



ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ
DOĞAL AFETLER UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ



DOĞAL AFETLER VE ÇEVRE DERGİSİ
Journal of Natural Hazards and Environment



Sahibi / Owner

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Adına
Prof. Dr. Halil AKINCI (Müdür)

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Halil AKINCI

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Prof. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP
Dr. Öğr. Üyesi Kazım Onur DEMİRARSLAN

Yabancı Dil Editörü / Language Editor

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BİÇİCİ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Prof. Dr. Mehmet ÖZALP

Editör Kurulu / Editorial Board

- Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN (Düzce Üniversitesi)
Prof. Dr. Aykut AKGÜN (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Ayla BİLGİN (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Bülent SAĞLAM (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Bülent TURGUT (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU (Kapadokya Üniversitesi)
Prof. Dr. Emre ÖZŞAHİN (Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi)
Prof. Dr. Gül KAYKIOĞLU (Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi)
Prof. Dr. Hazan ALKAN AKINCI (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Mehmet ÖZALP (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Prof. Dr. Sedat DOĞAN (Ondokuz Mayıs Üniversitesi)
Prof. Dr. Selçuk ALEMDAĞ (Gümüşhane Üniversitesi)
Prof. Dr. Selim Latif SANİN (Hacettepe Üniversitesi)
Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK (Gümüşhane Üniversitesi)
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK (Fırat Üniversitesi)
Doç. Dr. Emrehan Kutluğ ŞAHİN (Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi)
Doç. Dr. Cem KILIÇOĞLU (Ondokuz Mayıs Üniversitesi)
Doç. Dr. Gülseren DAĞDELENLER (Hacettepe Üniversitesi)
Doç. Dr. Hüseyin CÜCE (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Ömer EKMEKÇİOĞLU (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Kazım Onur DEMİRARSLAN (Artvin Çoruh Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Serden BAŞAK (Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ (Artvin Çoruh Üniversitesi)

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ RESEARCH ARTICLES

- Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Elbistan İlçesi İçme Suyu Örneklerinde Bazı İz Elementlerin ICP-MS ile Belirlenmesi
Determination of Some Trace Elements in Drinking Water Samples of Elbistan District after Kahramanmaraş Earthquakes by ICP-MS
Tuğba Ulu, Teslima Daşbaşı 366 - 373
- Afet Sonrası Geçici Barınma Birimlerinde Sürdürülebilirlik Performansının Örnek Analizler Üzerinden İncelenmesi
Examining the Sustainability Performance of Post-Disaster Temporary Shelter Units Through Sample Analyses
İlham Aytar Sever, Betül İrem Tarakçı..... 374 - 392
- İdari Kayıp Yönetiminde Karar Verme Süreçlerinin ve Etki Düzeylerinin Analitik Hiyerarşi Süreç (AHP) ve Bulanık AHP ile Değerlendirilmesi
Evaluation of Decision-Making Processes and Impact Levels in Apparent Loss Management Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP
Furkan Acar, Cansu Bozkurt, Mahmut Fırat 393 - 405
- Hava Kirlenici Konsantrasyonlarının Zamansal Değişikliğinin Analizi; Kocaeli Örneği
Analysis of Temporal Changes of Air Pollutants Concentrations in Kocaeli, Turkey
Özer Akyürek..... 406 - 417
- Doğal Afet Maliyetlerinin Makro Ekonomik Göstergeler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi: BRICS-T Ülkelerinden Kanıtlar
Evaluating the Impact of Naturel Disaster Costs on Macroeconomic Indicators: Evidence from BRICS-T Countries
Ceren Pehlivan..... 418 - 427
- Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Politikaları Kapsamında Düzce İli Katı Atık Yönetiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
Life Cycle Assessment of Solid Waste Management in Düzce Province within the Scope of Türkiye's Decarbonization Policies
Kadriye Elif Maçın 428 - 444
- Atık Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanılması
Using of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Waste Selection
Eren Batu Günaydn, Oğuzhan Turan, Hasan Bilgehan Kaplan, Mehmet Kaan Temiz, Mehmet Pınarbaşı 445 - 455
- Damsa Baraj Gölü'nde (Kapadokya/Türkiye) Ağır Metallerin İndeks Tabanlı Mekânsal Değerlendirmesi
Index Based Spatial Assessment of Heavy Metals in Damsa Dam Lake, Cappadocia/Türkiye
Hüseyin Cüce, Mehmet Ali Dereli, Erkan Kalıpcı 456 - 470
- Yapay Zekâ Tabanlı Yöntemlerle Hava Kirliliği Araştırmalarının Gelişimi ve Gelecek Perspektifleri: Bibliyometrik Bir İnceleme
Development and Future Perspectives of Air Pollution Research Using Artificial Intelligence-Based Methods: A Bibliometric Review
Olgu Aydın, Hatice Kılar..... 471 - 487
- Avrupa Birliği'nin Eko-Kent Yaklaşımı ve Türkiye Kentlerine Uygulanabilirliği Üzerine Bir Değerlendirme
An Assessment of the European Union's Eco-City Approach and Its Applicability to Turkish Cities
Çiğdem Tuğaç..... 488 - 512
- Geliştirilmiş Yerel Dayanım (GLD) Yöntemi ile Betonarme Bir Yapının Aşamalı Göçme Analizi: UFC 4-023-03 ve Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Karşılaştırması
Progressive Collapse Analysis of a Reinforced Concrete Structure Using the Enhanced Local Resistance (ELR) Method: A Comparison of UFC 4-023-03 and the Turkish Earthquake Code (TEC 2018)
Saffet Kılıçer 513 - 525

ARAŞTIRMA MAKALELERİ RESEARCH ARTICLES

G7 Ülkelerinde İklimsel ve Çevresel Faktörlerin Doğal Afetlerin Meydana Gelme Sıklığı Üzerindeki Etkisinin Sigortacılık Sektörüne Yansımaları
The Impact of Climatic and Environmental Factors on the Frequency of Natural Disasters in the Insurance Sector in G7 Countries
Serap Yörübulut 526 - 537

Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri İle Samanlı Dağları Kütlesinde Heyelan Duyarlılık Analizi
Landslide Susceptibility Analysis in Samanlı Mountains Massif by Frequency Ratio and Artificial Neural Networks Methods
S. Murat Uzun 538 - 556

Taş Ocağında Patlatmalı Kazı Kaynaklı Zemin Titreşimleri, Hava Şoku ve Şev Duraylılığının İncelenmesi: Örnek Bir Uygulama
Investigation of Blast-Induced Ground Vibrations, Air Overpressure, and Slope Stability in a Quarry: A Case Study
İbrahim Çavuşoğlu, Selçuk Alemdağ..... 557 - 571

Giresun İlinin 2018-2023 Yılları İçerisindeki Katı Atık Performansının Ölçülmesi
Measurement of Solid Waste Performance of Giresun Province in 2018-2023
Hatice Doğan 572 - 589

MIKE Hidrolojik Model Programı ile Alanya İlçesi Oba Çayı Taşkın Bölgesinin Modellenmesi
Modeling of Alanya District Oba Çayı Flood Zone with MIKE Hydrological Model Program
Zübeyde Demirel, Mehmet Dikici 590 - 598

Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Elbistan İlçesi İçme Suyu Örneklerinde Bazı İz Elementlerin ICP-MS ile Belirlenmesi

Tuğba Ulu¹, Teslima Daşbaşı^{1*}

¹Kayseri Üniversitesi, Bünyan MYO, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, 38280, Kayseri.

Özet

Deprem gibi doğal afetlerin olduğu yerlerde deprem atıklarının oluştuğu, altyapı tesislerinin büyük zarar gördüğü, buna bağlı olarak da su kaynaklarının olumsuz yönde etkilenebileceği bilinmektedir. Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan büyük deprem sonrası Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesinde içme suyu ve temiz su kaynakları olarak kullanılan su örneklerinde bazı iz elementlerin miktarları incelenmiştir. Çalışmada; krom, demir, kobalt, bakır, çinko, arsenik, kadmiyum, civa ve kurşun (Cr, Fe, Co, Cu, Zn, As, Cd, Hg ve Pb) metallerinin tayini indüktif eşleşmeli plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS) ile yapılmıştır. Çalışılan elementlerin gözlenebilir sınırları (3s) sırasıyla Cr: 0.129, Fe: 4.172, Co: 0.073, Cu: 1.023, Zn: 1.829, As: 0.259, Cd: 0.042, Hg: 0.035 ve Pb: 1.501 $\mu\text{g L}^{-1}$ (n=11) olarak hesaplanmıştır. Çalışılan iz elementleri kalibrasyon eğimlerinin 0.997'den yüksektir. Yöntemin doğruluğu, standart referans materyal (CWW-TM-D certified wastewater) çalışması ile belirlenmiştir. Standart referans madde analizde çalışılan iz elementlerin geri kazanımlarının % 95 – 105 arasındadır. Farklı zamanlarda 3 kez aynı su kaynaklarından örnekler alınmış ve aynı yöntem ile analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Türk standartları Enstitüsü, Avrupa Birliği, Dünya Sağlık Örgütü ve ABD Çevre Koruma Ajansı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda bir numune de kurşun değerinin kabul edilen değerinin üstünde olduğu belirlenmiştir. Diğer içme suyu örneklerimizde çalışılan elementleri kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir.

Anahtar Sözcükler

Deprem, Su Analizi, Metal Kirliliği, ICP-MS

Determination of Some Trace Elements in Drinking Water Samples of Elbistan District after Kahramanmaraş Earthquakes by ICP-MS

Abstract

It is known that in places where natural disasters such as earthquakes occur, earthquake waste is formed, infrastructure facilities are severely damaged, and water resources may be negatively affected as a result. In this study, the amounts of some trace elements in water samples used as drinking water and clean water sources in Kahramanmaraş Elbistan district after the major earthquake on February 6, 2023 were examined. The determination of chromium, iron, cobalt, copper, zinc, arsenic, cadmium, mercury and lead (Cr, Fe, Co, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb) metals was performed by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The detection limits (3s) of the studied elements were calculated as Cr: 0.129, Fe: 4.172, Co: 0.073, Cu: 1.023, Zn: 1.829, As: 0.259, Cd: 0.042, Hg: 0.035 and Pb: 1.501 $\mu\text{g L}^{-1}$ for (n=11), respectively. The calibration slopes of the studied trace elements are higher than 0.997. The accuracy of the method was determined by the certified reference material (CWW-TM-D certified wastewater) study. The recoveries of heavy metals studied in the standard reference material analysis are between 95 and 105%. Samples were taken from the same water sources 3 times at different times and analyzed with the same method. The analysis results obtained were compared with the values of the Turkish Standards Institute, the European Union, the World Health Organization and the US Environmental Protection Agency. In our study, it was determined that the lead value in one sample was above the accepted value. It is seen that the elements studied in our other drinking water samples are at acceptable values.

Keywords

Earthquake, Water Analysis, Metal Pollution, ICP-MS

1. Giriş

Deprem, jeolojik kaynaklı yer kabuğunda kırılmalar meydana getiren ve dalgalar halinde ilerleyen etkisi büyük, doğal bir afettir (Yiğiter, 2008; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2024). Depremler, can ve mal kayıplarının yanı sıra heyelan, tsunami, yangın gibi ikincil felaketlere, bina, baraj vb. yapı çökmelerine ve alt yapı tesislerinin bozulmasına neden olmaktadır (Dökmeci, 2018). Ayrıca, depremin şiddetine göre afet bölgesinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik deprem atıkları oluşmaktadır (Esmer Duruel & Duruel, 2024).

Deprem sırasında ve sonrasında oluşan deprem atıkları arasında başta moloz ve beton olmak üzere plastik, elektronik, cam malzemeler, tıbbi atıklar, biyolojik kalıntılar, asbest ve ağır metaller gibi sağlık açısından tehlikeli maddeler bulunmaktadır (Demir, 2009). Bilindiği üzere 6 Şubat 2023 tarihinde, ülkemizin güney kesiminde 11 ilin büyük bir şekilde etkilendiği bir deprem felaketi gerçekleşmiştir. 50 binden fazla can kaybının yaşandığı Kahramanmaraş depremlerinde 354 km içme suyu hattının, 1.842 km kanalizasyon hattının zarar gördüğü rapor edilmiştir (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda Kahramanmaraş depremleri sonucunda yaklaşık 350-580 milyon ton inşaat yığın atığı oluşacağı rapor edilmiştir (Doğdu & Alkan, 2023). Tüm bu etmenler iz element konsantrasyonunu arttırmakta ve su kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Deprem atıklarının çevrede birikmesi eko sistemin kirlenmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla deprem atıklarının kaldırılması gerekmektedir. Enkaz kaldırma aşamasında atıklar çok küçük partiküller haline gelmekte ve toz bulutunu oluşturmaktadır. Bu toz yığını içerisinde yer alan iz elementler hava, su ve toprakta birikerek kirliliğe neden olmaktadır.

Deprem gibi doğal afetlerin olduğu yerlerde alt yapı tesislerinin bozulduğu bilinmektedir. Su borularının ve kanalizasyon tesislerinin zarar görmesi ve sızıntı yapması su kirliliğini arttırmaktadır (Yildiz, 2019). Sucul kirlilikler arasında toksik etkiye sahip iz elementler önemli bir yere sahiptir. Kısacası deprem atıkları, deprem ile meydana gelen alt yapı tesislerindeki bozukluklar, yapım - onarım aşamasındaki enkaz kaldırma işlemleri, deprem atıklarının geri dönüşümü ve ortadan kaldırılması gibi etmenler eko sistemdeki iz element konsantrasyonunu artmasına neden olmaktadır. Bu durum su da bulunan iz element yoğunluğunu etkilemektedir. Bununla birlikte, 6 Şubat depreminden sonra bölgede yer yüzeyinin yeniden şekillendiği ve su kaynaklarının değiştiği görülmüştür (Akdemir vd., 2015). Deprem sonrasında su kaybının önüne geçilerek su kalitesinin korunması gerekmektedir. Su kalitesi, kirlilikle orantılıdır. Bazı iz elementler ağır metal kirliliklerine neden olmaktadır. İz elementler çok düşük konsantrasyonlarda sağlık ve çevre açısından etkili elementlerdir (Daşbaşı vd., 2014). Gıda, su ve hava ile vücuda alınan ağır metallerin miktarları da çok önemlidir. Eksik ya da fazla alınması çeşitli rahatsızlıklara neden olmaktadır (Daşbaşı vd., 2015; He vd., 2008; Sharma vd., 2007). Esansiyel iz element özellik gösteren krom, demir, kobalt, bakır ve çinko gibi elementler biyolojik sistemde önemli rol oynamaktadır. Örneğin demir büyümede yer alan birçok proteinlerin ve enzimlerin önemli bir bileşenidir. Demir eksikliği yorgunluğa, bağışıklık sisteminin zayıflamasına ve hatta ölüme neden olmaktadır. Demirin yüksek miktarlarda alınması, hemokromatoz rahatsızlığına neden olmaktadır (Valfredo vd., 2008; Shakerian vd., 2008). Krom memelilerde glukoz, lipid ve protein metabolizmaları için gerekli eser elementtir ve eksikliği durumunda bu metabolizmalarda bozukluklara neden olmaktadır. Bakır eksikliği ise anemi, depresyon, üreme performansında bozukluklara, kalp yetmezliğine ve gastrointestinal rahatsızlıkları gibi çeşitli klinik bozukluklarına neden olmaktadır (Kudrin, 2000). Çinko transkripsiyon, replikasyon, sinyal iletiminde ve bağışıklık sisteminde rol oynamaktadır (Daşbaşı vd., 2015). Kobalt B12 vitaminin (cyanocobalamin) yapısında yer almakta ve anemi tedavisinde kullanılmaktadır. Bu metallerin toksit olabilmesi için vücutta belli bir oranın üzerine çıkması gerekmektedir. Diğer yandan arsenik, kadmiyum, civa ve kurşun gibi elementler ağır metaller olup, toksik özellik göstermektedir. Kadmiyum gıda maddelerinde inorganik tuzlar şeklinde bulunabilir. Kadmiyumun en önemli etkisi hipertansiyona neden olmasıdır. Kurşun çok toksik özellik göstermektedir ve saçlar, kemikler ve dişlerdeki kurşun miktarı muhtemel kurşun zehirlenmeleri hakkında bilgi vermektedir. Civa ise çok düşük konsantrasyonlarda bile zehirli bir elementtir. Gıda maddelerindeki civa, element, inorganik, iyonik veya organik formda bulunabilir. Bakteriyal ve enzimatik reaksiyonlar sonucu toksik etkileri çok yüksek olan civa bileşikleri oluşmaktadır. Kolaylıkla çevrede ve hayvan dokularında oluşabilen alkil civa toksikolojik açıdan büyük öneme sahiptir (Nasa, 2019). Arsenik ise kronik hastalıklara, ciltte koyu ve beyaz lekelere, ayak ve ellerde keratoz gibi cilt lezyonlarının oluşumuna neden olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra uzun süreli maruz kalındığında, cilt, akciğer, böbrek, karaciğer, prostat ve mesane kanserine neden olabilmektedir (Daşbaşı vd., 2015; Kudrin, 2000; Öztürk vd., 2017). Tek seferde ve ani ağır metal alımında zehirlenmeler meydana gelmekte, baş dönmesi, kusma, karaciğer ve böbrek fonksiyonlarında bozulmalar şeklinde belirtiler görülmekte ve son olarak ölümler meydana gelebilmektedir (Eaton, 2017). Dolayısıyla içme suyu örneklerinde iz elementlerin miktar tayinleri sağlık açısından önemlidir.

Bölgedeki gerek içme suyu gerekse su kaynaklarının iz elementlerin miktarının incelenmesi halk sağlığı açısından önemli bir konudur. Bu çalışmanın amacı, Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesinde içme suyu ve temiz su kaynakları olarak kullanılan 9 mahalle şebeke suyu ve 3 kaynak suyu numunelerinde bazı iz elementlerin miktarının tayin edilmesi ve analiz sonuçlarının Türk standartları Enstitüsü, Avrupa Birliği, Dünya Sağlık Örgütü ve ABD Çevre Koruma Ajansı değerleri ile karşılaştırılmasıdır. 31 Ekim 2023, depremden bir yıl sonra 6 Şubat 2024 ve 1 Mayıs 2024 tarihlerinde toplanan numunelerde krom, demir, kobalt, bakır, çinko, arsenik, kadmiyum, civa ve kurşun iz elementlerin konsantrasyonları indüktif eşleşmeli plazma-kütle spektrometresi (ICP –MS) ile analiz edilmiştir. Yöntemin analitik parametreleri belirlenmiştir ve yöntem standart referans madde çalışması ile doğrulanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Kimyasallar ve Cihazlar

Çalışmada kullanılan tüm katı, sıvı kimyasallar analitik saflıkta olup, Merck (Darmstadt, Almanya) ve Aldrich (Milwaukee, WI, USA) firmalarından temin edilmiştir. Örnek ve kör çözeltilerin hazırlanmasında ultra saf su kullanılmıştır. İz elementlerin analizleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan

AGILENT marka 7500A model İndüktif Eşlemeli Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) Tokyo, Japonya cihazı ile yapılmıştır. Cihazda bir otomatik örnekleyici, Babington nebülizörü, nikel koniler ve peristaltik numune dağıtım pompası bulunmaktadır. Her bir numune analizi üç tekrar halinde yapılmıştır. Plazma oluşumu için yüksek saflıkta argon gazı kullanılmıştır. ICP-MS cihazının ayarlanması için $10 \mu\text{g L}^{-1}$ lik (Ce, Co, Li, Tl ve Y) ayarlama çözeltisi kullanılmıştır. Veri toplama spektrum analizi ve tam kantitatif modda yapılmıştır. Ultra Saf Su Cihazı; ELGA & DVR5, masa üstü tip pH metre; HANNA & HI 2002-02, orbital çalkalayıcı; HEIDOLPH & UNIMAX 1010 ve vorteks olarak Velp Scientifica & Zx3 cihazı kullanılmıştır.

Tablo 1: ICP-MS çalışma şartları

Cihaz Ayarları	Değer
Radyo Frekans gücü	1550 W
Örnek Derinliği	8,0 mm
Taşıyıcı Gaz Hızı	1,05 L/dk
Yardımcı Gaz Akış Hızı	0,9 L/dk
Plazma Gazı Akış Hızı	15,0 L/dk
Nebulizatör Pompası	0,10 rps
Püskürtme Odası Sıcaklığı	2 °C

2.2. Yöntem

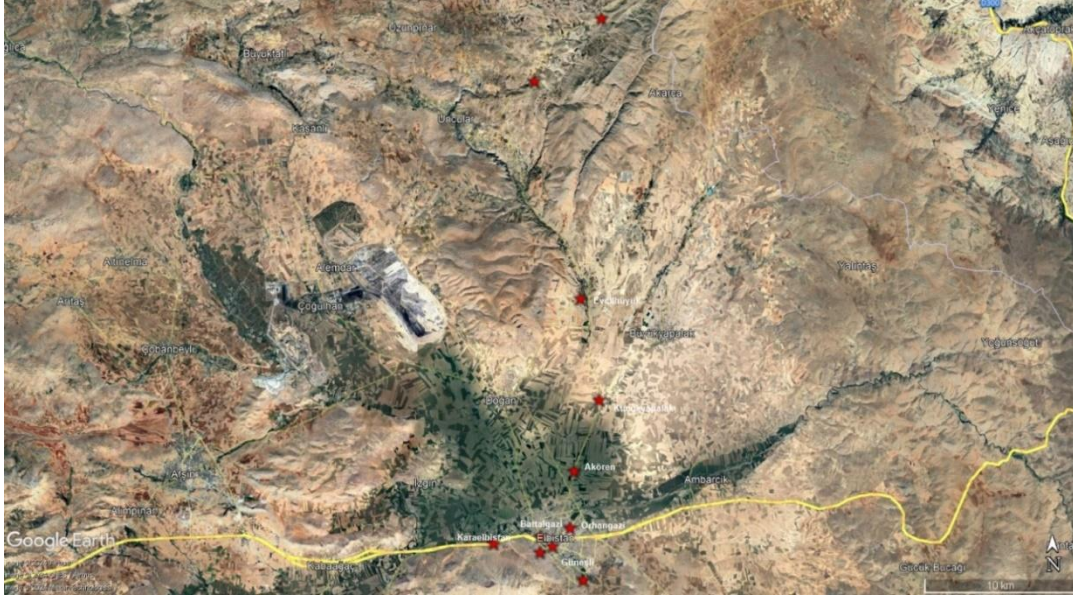
Numuneler 31 Ekim 2023, 6 Şubat 2024 ve 1 Mayıs 2024 tarihlerinde Elbistan ilçesinin farklı mahalle ve doğal su kaynaklarından toplanarak öncelikle HANNA & HI 2002-02 marka portatif pH metre ile su numunelerin asitliği ve oksidasyon indirgeme potansiyeli (ORP) ölçümleri yapılmıştır. Numuneler önceden temizlenmiş 1 litrelik koyu renkli polietilen örnek kaplarına alınmıştır. Daha sonra su numunelerine metal nitratların çökmesini engellemek ve numune kap çeperlerinde metal adsorpsiyonunu önlemek için %65'lik derişik nitrik asit den yaklaşık 140 mL eklenerek numune pH'ları 2 olarak ayarlanmıştır (Nasa, 2019; Eaton, 1999). Kör numunelerin hazırlanmasında da aynı metot uygulanmıştır. Buzdolabında analiz zamanına kadar +4 °C muhafaza edilmiştir. Numuneler membran filtreden (gözenek büyüklüğü: 0,45 μm ; çap: 47 mm) geçirilerek, önceden temizlenmiş kurutulmuş 50 mL'lik dereceli falkon tüplere alınmış ve ağızları kapatılmıştır. Çalışılan iz elementlerin miktarları (Cr, Fe, Co, Cu, Zn, As, Cd, Hg ve Pb) Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkez laboratuvarında ICP-MS cihazında analiz edilmiştir. Cihazın çalışma şartları Tablo 1'de yer almaktadır. Su numuneleri Elbistan ilçesinin Şekil 2'de belirtilen 12 ayrı lokasyonundan alınmıştır. Bunlar, sırasıyla, 1 numara Keçemağra Mahallesi, 2 numara Karamağra Mahallesi, 3 numara Akören Mahallesi, 4 numara Evcihüyük Şebeke suyu, 5 numara Küçükyapalak Mahallesi, 6 numara Orhangazi Mahallesi, 7 numara Battalgazi Mahallesi, 8 numara Güneşli Mahallesi, 9 numara Karaelbistan Mahallesi şebeke suyu, 10 numara Karaelbistan, 11 numara Köprübaşı ve 12 numara Pınarbaşı bölgesinden geçen doğal sulardır. Tablo 2'de lokasyonların isimleri, pH ve ORP (Oxidation Reduction Potential, Oksidasyon indirgeme potansiyeli) değerleri yer almaktadır.

Lokasyonlar Google Earth programında işaretlendi. Şekil 1'de içme su örneklerinin alındığı lokasyonlar görülmektedir. 1/10.000 ölçekli harita da kırmızı yıldızlar su numunenin alındığı yerleri göstermektedir.

Tablo 2: Su numunelerinin alındığı Mahalle isimleri, pH ve ORP değerleri (n = 3)

Örnek Numarası	Mahalle isimleri	pH	ORP (mV)
1	Keçemağra Mah.	$7.10 \pm 0.03^*$	-1.68 ± 0.6
2	Karamağra Mah.	7.70 ± 0.02	-33 ± 1
3	Akören Mah.	7.74 ± 0.04	-32 ± 1
4	Evcihüyük Mah.	7.73 ± 0.02	-31 ± 2
5	Küçükyapalak Mah.	7.55 ± 0.02	-21 ± 1
6	Orhangazi Mah.	7.68 ± 0.05	-29 ± 2
7	Battalgazi Mah.	7.70 ± 0.05	-28 ± 1
8	Güneşli Mahallesi	7.62 ± 0.04	-24 ± 1
9	Karaelbistan Mah.	7.65 ± 0.04	-25 ± 2
10	Karaelbistan Kaynak suyu	7.05 ± 0.04	11 ± 1
11	Köprübaşı kaynak suyu	7.61 ± 0.02	-24 ± 3
12	Pınarbaşı kaynak suyu	7.15 ± 0.03	1.68 ± 0.6

*Ortalama $\pm$ standart sapma



Şekil 1: Su numunelerin alındığı lokasyonlar (Google Earth, 19.11.2024)

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışılan iz elementler için gözlenebilme sınırları (DL), 3s formülüne göre hesaplandı ($n = 11$). Gözlenebilme sınırları, Cr için $0.13 \mu\text{g L}^{-1}$, Fe için $4.17 \mu\text{g L}^{-1}$, Co için $0.073 \mu\text{g L}^{-1}$, Cu için $1.02 \mu\text{g L}^{-1}$, Zn için $1.83 \mu\text{g L}^{-1}$, As için $0.26 \mu\text{g L}^{-1}$, Cd için $0.042 \mu\text{g L}^{-1}$, Hg için $0.035 \mu\text{g L}^{-1}$ ve Pb için $1.50 \mu\text{g L}^{-1}$ olarak bulundu. Yöntemin doğruluğunun belirlenmesi için sertifikalı standart referans madde (CWW-TM-D certified wastewater) çalışması yapıldı. Tablo 5’de çalışılan iz elementlerin geri kazanımlarının % 95 – 105 arasında olduğu görülmektedir. Kalibrasyon doğrularının belirlenmesinde analitlerin $0\text{--}50 \mu\text{g L}^{-1}$ çalışma aralığında standart çözeltileri hazırlandı ve analiz edildi. Çalışılan iz elementlerin kalibrasyon eğimlerinin 0.997’den yüksek olduğu belirlenmiştir. Üç farklı zamanda alınan su numunelerin bazı iz element konsantrasyonları $\mu\text{g L}^{-1}$ biriminde Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de yer alan örnek numaraları Tablo 2’deki ile aynıdır. Numunelerin alındığı bölgeler arasında (gruplar) farkın anlamlı olup olmadığını belirlemek için ANOVA testi yapıldı, Cr, Fe, Cu, Zn, As ve Pb elementlerinin her biri için hesaplanan p değerleri sırasıyla 0.0073, 0.8145, 0.0314, 0.0947, 0.0542 ve 0.4419 olarak hesaplanmıştır. Co, Cd ve Hg değerleri numunelerde gözlenebilme sınırının altında kaldığından dolayı tespit edilemedi ve p değeri hesaplanamadı.

Türk standartları Enstitüsü (TSE 266), Avrupa Birliği (EC), Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) (Doğa Bitkileri ve Su Ürünleri Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2022; Environmental Protection Agency, 2024) raporlarına göre içme sularında kabul edilebilir bazı iz elementlerin konsantrasyonları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 3: İçme suyu örneklerindeki çalışılan iz elementlerin konsantrasyonları ($n=3$)

No	Cr $\mu\text{g L}^{-1}$	Fe $\mu\text{g L}^{-1}$	Co $\mu\text{g L}^{-1}$	Cu $\mu\text{g L}^{-1}$	Zn $\mu\text{g L}^{-1}$	As $\mu\text{g L}^{-1}$	Cd $\mu\text{g L}^{-1}$	Hg $\mu\text{g L}^{-1}$	Pb $\mu\text{g L}^{-1}$
Kör	0.17 ± 0.04^a	0.22 ± 0.04	0.005 ± 0.001	1.22 ± 0.17	5.79 ± 0.26	0.51 ± 0.05	0.013 ± 0.005	0.073 ± 0.004	0.073 ± 0.004
1^c	0.21 ± 0.03	6.01 ± 0.14	^b	1.97 ± 0.09	31.11 ± 3.60	5.71 ± 0.03			
1^d	0.32 ± 0.01	5.72 ± 0.18	-	0.94 ± 0.03	38.02 ± 4.25	5.56 ± 0.08			
1^e	0.27 ± 0.03	5.84 ± 0.11	-	1.75 ± 0.09	36.25 ± 2.89	5.48 ± 0.04			
1	0.27 ± 0.02	5.86 ± 0.14	-	1.55 ± 0.07	35.12 ± 3.58	5.58 ± 0.05	-	-	-
2^c	0.54 ± 0.07	18.07 ± 1.45	-	4.66 ± 0.17	6.44 ± 0.21	0.63 ± 0.03			
2^d	0.42 ± 0.08	17.32 ± 1.15	-	4.55 ± 0.15	5.49 ± 0.20	0.70 ± 0.03			
2^e	0.61 ± 0.09	23.50 ± 1.37	-	4.95 ± 0.25	5.94 ± 0.17	0.75 ± 0.09			
2	0.52 ± 0.06	19.63 ± 1.32	-	4.72 ± 0.19	5.96 ± 0.20	0.69 ± 0.05	-	-	-
3^c	0.93 ± 0.09	-	-	20.26 ± 0.20	13.38 ± 0.41	1.83 ± 0.04			
3^d	1.15 ± 0.13	-	-	20.66 ± 0.26	14.03 ± 0.54	1.78 ± 0.06			
3^e	0.95 ± 0.15	-	-	20.64 ± 0.20	14.56 ± 0.32	1.91 ± 0.03			

Tablo 3'ün devamı

No	Cr µg L ⁻¹	Fe µg L ⁻¹	Co µg L ⁻¹	Cu µg L ⁻¹	Zn µg L ⁻¹	As µg L ⁻¹	Cd µg L ⁻¹	Hg µg L ⁻¹	Pb µg L ⁻¹
3	1.01 ± 0.12	-	-	20.22 ± 0.22	13.99 ± 0.42	1.84 ± 0.04	-	-	-
4 ^c	- ^b	-	-	-	-	0.50 ± 0.02			
4 ^d	-	-	-	-	-	0.53 ± 0.01			
4 ^e	-	-	-	-	-	0.54 ± 0.03			
4	-	-	-	-	-	0.54 ± 0.02	-	-	-
5 ^c	0.67 ± 0.08	4.33 ± 0.24	-	-	100.55 ± 6.58				
5 ^d	0.59 ± 0.09	5.05 ± 0.22	-	-	109.28 ± 8.64				
5 ^e	0.80 ± 0.09	4.70 ± 0.19	-	-	95.28 ± 5.93				
5	0.69 ± 0.09	4.69 ± 0.22	-	-	101.70 ± 7.05	-	-	-	-
6 ^c	0.57 ± 0.04	-	-	6.74 ± 0.078	6.80 ± 0.080	1.81 ± 0.25			25.10 ± 4.49
6 ^d	0.60 ± 0.03	-	-	6.67 ± 0.072	6.69 ± 0.058	1.41 ± 0.18			17.75 ± 2.84
6 ^e	0.53 ± 0.02	-	-	6.82 ± 0.076	6.74 ± 0.073	1.60 ± 0.17			22.81 ± 3.97
6	0.57 ± 0.03	-	-	6.74 ± 0.075	6.74 ± 0.07	1.61 ± 0.20	-	-	21.89 ± 3.76
7 ^c	-		-	-	-	0.70 ± 0.01			
7 ^d	-		-	-	-	0.60 ± 0.01			
7 ^e	-		-	-	-	0.68 ± 0.02			
7	-	-	-	-	-	0.66 ± 0.01	-	-	-
8 ^c	0.50 ± 0.03		-	10.47 ± 0.10	2.55 ± 0.05	1.65 ± 0.02			
8 ^d	0.55 ± 0.03		-	10.66 ± 0.16	2.45 ± 0.10	1.85 ± 0.06			
8 ^e	0.49 ± 0.04		-	10.63 ± 0.16	2.38 ± 0.09	1.72 ± 0.05			
8	0.51 ± 0.03	-	-	10.75 ± 0.14	2.46 ± 0.08	1.74 ± 0.04	-	-	-
9 ^c	-	10.59 ± 0.05		0.47 ± 0.07	170.91 ± 1.43				
9 ^d	-	12.82 ± 0.07		0.66 ± 0.08	168.3 ± 1.30				
9 ^e	-	9.81 ± 0.09		0.55 ± 0.11	170.37 ± 1.26				
9	-	11.03 ± 0.07	-	0.56 ± 0.09	169.86 ± 1.33	-	-	-	-
10 ^c	0.30 ± 0.05					0.71 ± 0.02			
10 ^d	0.29 ± 0.02					0.75 ± 0.01			
10 ^e	0.35 ± 0.02					0.64 ± 0.01			
10	0.32 ± 0.03	-	-	-	-	0.70 ± 0.01	-	-	-
11 ^c	0.21 ± 0.07	-	-			0.64 ± 0.02			
11 ^d	0.25 ± 0.03	-	-			0.70 ± 0.02			
11 ^e	0.31 ± 0.06	-	-			0.64 ± 0.08			
11	0.26 ± 0.05	-	-	-	-	0.66 ± 0.03	-	-	-
12 ^c	0.94 ± 0.02	-	-	1.17 ± 0.05					
12 ^d	1.24 ± 0.03	-	-	1.26 ± 0.05					
12 ^e	0.85 ± 0.01	-	-	1.15 ± 0.05					
12	1.01 ± 0.20	-	-	1.19 ± 0.05	-	-	-	-	-

^aOrtalama ± standart sapma; ^bGözlenebilme sınırının altında; ^c31 Ekim 2023; ^d6 Şubat 2024; ^e1 Mayıs 2024 tarihlerinde alınan numunelerin ortalama değerleri

Tablo 4. TSE, EC, WHO ve EPA'ya göre içme sularında kabul edilebilir bazı ağır metal konsantrasyonları

Element, mg L ⁻¹	TSE 266, Türk standartları Enstitüsü	EC, Avrupa Birliği	WHO, Dünya Sağlık Örgütü	EPA, ABD Çevre Koruma Ajansı	Sırasıyla Bulunan Ortalama Değer (µg L ⁻¹)
Toplam Cr	0.05	0.05	0.05	0.1	0.27, 0.52, 1.01, -, 0.69, 0.57, -, 0.51, -, 0.32, 0.26, 1.01
Fe	0.2	0.2	0.3		5.86, 19.63, -, -, 4.69, -, -, 11.03, -, -, -
Co					-
Cu	2	2	2	1.3	1.55, 4.72, 20.22, -, -, 6.74, -, 10.75, 0.56, -, -, 1.19
Zn	5				35.12, 5.96, 13.99, -, 101.70, 6.74, -, 2.46, 169.86, -, -, -
As	0.01	0.01	0.01	0.01	5.58, 0.69, 1.84, 0.54, -, 1.61, 0.66, 1.74, -, 0.70, 0.66, -
Cd	0.005	0.005	0.003	0.005	-
Hg	0.001	0.001	0.001	0.002	-
Pb	0.01	0.01	0.01	0.015	21.89 (6 numara)

Tablo 5: Çalışılan iz elementlerin standart referans materyal değerleri (CWW-TM-D certified wastewater, n=3)

CWW-TM-D	Cr µg mL ⁻¹	Fe µg mL ⁻¹	Co µg mL ⁻¹	Cu µg mL ⁻¹	Zn µg mL ⁻¹	As µg mL ⁻¹	Cd µg mL ⁻¹	Hg µg mL ⁻¹	Pb µg mL ⁻¹
Sertifika Değer	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.250	0.250	0.020	1.00
Bulunan	1.02 ± 0.03*	0.99 ± 0.01	0.98 ± 0.02	0.97 ± 0.02	1.05 ± 0.04	0.246 ± 0.02	0.252 ± 0.02	0.019 ± 0.005	0.99 ± 0.01
%Geri kazanım	102	99	98	97	105	98	101	95	99

*Ortalama ± standart sapma

Literatürde Kahramanmaraş / Elbistan İlçesi su örneklerinde deprem öncesi iz elementleri analizleri ile ilgili çalışmalar çok sınırlı sayıdır. 6 Şubat 2023 Depreminden sonra Elbistan İlçesi içme sularında iz elementlerinin tayini ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. [Gemci vd. \(2016\)](#) tarafından yapılan çalışmada Kahramanmaraş'taki Ayvalı yüzey suyu, Karasu ve Pınarbaşı kaynak sularının 2014 yılına ait aylar bazında TSE 266 standardına göre içme suyu kalitesi araştırılmıştır. Elementlerin analizinde ICP-OES kullanılmıştır ([Gemci vd., 2016](#)). Çalışmada Pınarbaşı su örneğinin analiz değerleri: pH 7.21, toplam demir 0.02 mg L⁻¹, kurşun 1.391 µg L⁻¹, bakır 5.257 µg L⁻¹, çinko 0.017 µg L⁻¹, kobalt 0.108 µg L⁻¹, kadmiyum 0.581 µg L⁻¹, krom 3.461 µg L⁻¹, civa 0.1139 µg L⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Bizim çalışmamızda 3 farklı ayda alınan Pınarbaşı su örneklerinin ortalama pH değeri 7.15 olarak kaydedildi. Krom 1.01 µg L⁻¹ ve bakır 1.19 µg L⁻¹ olarak tayin edilirken diğer elementler (demir, kobalt, çinko, arsenik, kadmiyum, civa ve kurşun) gözlemlenme sınırının altında kaldığından dolayı tespit edilememiştir.

[Canpolat ve Uzun \(2019\)](#) çalışmada Kahramanmaraş organize sanayi bölgesinde çeşitli sektörlerde üretim yapan fabrikaların deşarj ettikleri atık sular ve bu atık suların karıştığı Sır Baraj Gölü ve Aksu Çayı'nın belirli istasyonlarda 4 mevsimde alınan su örneklerinde ağır metal düzeyleri ICP ile tespit edilmiştir ve bu değerleri WHO, USEPA ve EC kuruluşlarının tarafından önerilen standart değerlerle karşılaştırılmıştır. Su örneklerinde demir, bakır ve çinko her mevsimde tüm istasyonlarda tespit edilmiştir. Krom, nikel ve kadmiyum sadece atık sularla belirlenirken, diğer istasyonlarda cihazın ölçüm duyarlılığının altında (Cr <0.9 mg L⁻¹, Ni <0.3 mg L⁻¹, Cd <1.4 mg L⁻¹) kaldığından belirlenememiştir. As (<1.7 µg L⁻¹) ve Hg (<0.08 µg L⁻¹) ise bütün istasyonlarda cihazın ölçüm duyarlılığının altında kaldığından tespit edilememiştir ([Canpolat & Uzun, 2019](#)). Yapmış olduğumuz çalışmada Ekim, Şubat ve Mayıs ayında tüm numunelerde analiz edilen en yüksek çinko miktarı Karaelbistan Mahallesinde 169.86 µg L⁻¹, en yüksek krom miktarı Pınarbaşı kaynak suyu 1.01 µg L⁻¹ ve en yüksek demir miktarı Karamağra Mahallesinde 19.63 µg L⁻¹ olarak bulunmuştur. Akören Mahallesi numunesinde en yüksek Cu 20.22 µg L⁻¹ ve Keçemağra Mahallesi numunesinde en yüksek arsenik miktarı 5.58 µg L⁻¹ olarak hesaplanmıştır. En yüksek kurşun miktarı Orhangazi Mahallesi 21.89 µg L⁻¹ olarak analiz edilmiştir. Co, Cd ve Hg tüm numunede gözlemlenme sınırının altında kaldığından dolayı tespit edilememiştir.

4. Sonuç

Tablo 3'ü incelediğimizde 31 Ekim 2023, 6 Şubat 2024 ve 1 Mayıs 2024 tarihlerinde toplanan numunelerdeki iz element miktarları kendi içinde değerlendirildiğinde birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Örneğin Akören Mahallesi'nden 3 farklı zamanda alınan numunelerde analiz edilen çinko miktarı sırası ile 13.38 ± 0.41 ; 14.03 ± 0.54 ve $14.56 \pm 0.32 \mu\text{g L}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Numunelerin toplandığı lokasyonlar arasındaki farklılık Anova testi ile değerlendirilmiştir. P değerlerine bakıldığında p değeri 0.05'den büyük olan Fe, Cu, As ve Pb elementleri için, numunelerin alındığı bölgeler arasında anlamlı bir fark bulunduğu görülmektedir. Cr ve Zn değerleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Çalışılan ağır metallerin konsantrasyonları, TSE, EC ve WHO ve EPA'ya göre değerlendirildiğinde kabul edilebilir miktarlarda ve içilebilir olduğu görülmektedir (Tablo 4). Yalnız bir numunede kurşun miktarı bu değerlerin üzerinde çıkmıştır. En yüksek kabul gören Pb değeri EPA'ya göre $15 \mu\text{g L}^{-1}$ 'dir. Fakat Orhangazi Mahallesi şebeke suyunda 3 farklı zamanlarda alınan su örneklerinin ve genel ortalamanın bu değeri aştığı görülmektedir. Kurşun toksik bir elementtir ve insan vücuduna hiç alınmaması gerekmektedir. Bu bağlamda, onarım ve iyileştirme çalışmalarında Orhangazi Mahallesi öncelik verilmesi gerektiği düşünülmektedir. Analiz sonuçlarına göre çalışılan diğer iz element konsantrasyonlarında kirlilik açısından bir sorun görünmemektedir. Bölgede iyileştirme ve onarım çalışmalarında su kirliliğinin oluşmaması için alt yapı çalışmalarına özen gösterilmeli, sismik dalgalanmalara dayanıklı boru sistemleri kullanılmalıdır. Özellikle eski mahallelerde su ve kanalizasyon şebekelerinin yenilenmesi gerekmektedir, yer altı ve yer üstü kaynak suların iz element miktarları periyodik olarak analiz edilmelidir. Bunun yanı sıra deprem atıklarının ortadan kaldırılmasında su kaynaklarına özen gösterilmeli ve atıklar için güvenli bir alan seçilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 1919B012301422).

Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2024). *Afet türleri*. <https://www.afad.gov.tr/afet-turleri>
- Akdemir, İ. O., Çağlıyan A., Dağlı, D. (2015). Kentsel Planlamada Coğrafi Bilgi: Elazığ Uygulaması. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 53–76.
- Canpolat, Ö., & Uzun, S. K. (2019). Kahramanmaraş Organize Sanayi Bölgesi atık sularının Sır Baraj Gölü'nde meydana getirdiği ağır metal kirliliğinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 816–825.
- Daşbaşı, T., Sağmacı, Ş., Şahan, S., Ülgen, A., & Kartal, Ş. (2014). On-line preconcentration and determination of Au(III) in various environmental/industrial samples by flame atomic absorption spectrometry. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 94(9), 916–929.
- Daşbaşı, T., Sağmacı, Ş., Ülgen, A., & Kartal, Ş. (2015). A solid phase extraction procedure for the determination of Cd(II) and Pb(II) ions in food and water samples by flame atomic absorption spectrometry. *Food Chemistry*, 174, 591–596.
- Demir, İ. (2009). İnşaat yıkıntı atıklarının beton üretiminde kullanımı ve beton özelliklerine etkisi. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2009(2), 105–114.
- Doğa Bitkileri ve Su Ürünleri Araştırma ve Uygulama Merkezi. (2022). *İçme suyu kabul edilebilir değerler*. <https://dobisu.marmara.edu.tr/orta-menu/yararli-bilgiler/icme-suyu-kabul-edilebilir-degerler>
- Doğdu, G., & Alkan, S. N. (2023). Evaluation of Post-Earthquake Construction and Demolition Wastes: 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Artvin Çoruh University Journal of Engineering and Science*, 1(1), 38–50.
- Dökmeçi, A. H. (2018). *Toksikolojik çevresel ve endüstriyel afetler*. Nobel Tıp Kitabevleri.
- Eaton, A. D. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th ed.). American Public Health Association.
- Eaton, A. D. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Environmental Protection Agency. (2024). *National Primary Drinking Water Regulations*. 28 Ağustos 2024'te <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations#Inorganics> adresinden alındı.
- Esmer Duruel, H. E., & Duruel, M. C. (2024, 6–8 Şubat). *Depremden sonra ortaya çıkan bir diğer felaket: Sucul kirlilik* [Bildiri Sunumu]. I. Uluslararası İstiklal Sempozyumu: Deprem ve Mekan, Kahramanmaraş, Türkiye.
- Gemci, E., Akarsu, S., Zıba, C. A., & Dolaz, M. (2016). Kahramanmaraş'taki Ayvalı yüzey suyu, Pınarbaşı ve Karasu kaynaklarının içme suyu kalitesinin araştırılması. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 21–24.
- He Q., Chang X., Huang X. ve Hu Z. (2008). Determination of trace elements in food samples by ICP-AES after preconcentration with p-toluenesulfonylamide immobilized on silica gel and nanometer SiO₂. *Microchimica Acta*, 160, 147–152.
- Kudrin, A. V. (2000). Trace elements in regulation of N F- zB activity. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 14, 129–142.
- Nasa, P. (2019). Heavy metal poisoning. In O. Singh, & D. Juneja (Eds.), *Principles and practice of critical care toxicology* (pp. 339–347). Springer.
- Öztürk, M., Aslan, Ş., & Demirbaş, A. (2017). Sulama sularındaki arseniğin bitkilerde birikimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 289–297.
- Shakerian, F., Dadfarnia, S., Haji Shabani, A. M., & Rohani, M. (2008). Multi simplex optimization of on-line sorbent preconcentration and determination of iron by FI-AAS and microcolumn of immobilized ferron. *Talanta*, 77, 551–555.

- Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. (2007). Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66, 258–266.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu*. <https://www.sbb.gov.tr/2023-kahramanmaras-ve-hatay-depremleri-raporu/>
- Valfredo, A., Lemos, M., Selis, S., Graciete, T. D., Mardson, V. M., & Marcos, A. B. (2008). Development of a cloud-point extraction method for copper and nickel determination in food samples. *Journal of Hazardous Materials*, 159, 245–251.
- Yıldız, D. (2019). *Deprem ve Su*. Su Politikaları Derneği.
- Yiğiter, N. D. (2008). *Planlamada afet bilgi sistemi ve yönetiminin coğrafi bilgi sistemleri ile modellenmesi: Adana örneği* [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>

Examining the Sustainability Performance of Post-Disaster Temporary Shelter Units Through Sample Analyses

İldem Aytar Sever¹, Betül İrem Tarakçı^{2,*}

¹Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, 34000, İstanbul.

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, 31000, Hatay.

Abstract

Temporary shelter units should not only provide a temporary living space for disaster victims, but also support their health and well-being. These structures should provide the necessary facilities for the reintegration of disaster victims into social and economic life. Although the need for post-disaster shelter is critical, the design and implementation of these units often ignore the principles of sustainability, leading to environmental, social and economic problems. This study examines the design and implementation of temporary shelter units in accordance with sustainability criteria. The aim is to evaluate the units used as temporary shelter through sustainability criteria to emphasize their sustainability and to develop recommendations for their sustainability. In this context, the sustainability of temporary shelter units selected from the countries most affected by natural disasters between 1900 and 2024 and used in different disasters were analysed. The findings showed that the temporary shelter units analysed were positive in terms of environmental and economic aspects, but weak in terms of social sustainability. As a result of the study, suggestions were made based on the examined temporary shelter units for post-disaster construction and it is thought that these suggestions will shed light on future design and academic studies. As a result, designing temporary shelter units in accordance with sustainability criteria is vital to support the health, welfare and social integration of disaster victims.

Keywords

Disaster, Sustainability, Temporary Shelter, Post-disaster Shelter

Afet Sonrası Geçici Barınma Birimlerinde Sürdürülebilirlik Performansının Örnek Analizler Üzerinden İncelenmesi

Özet

Geçici barınma birimleri, afet mağdurlarına sadece geçici bir yaşam alanı sağlamakla kalmamalı, aynı zamanda sağlık ve refahlarını desteklemelidir. Bu yapılar, afet mağdurlarının sosyal ve ekonomik hayata yeniden entegrasyonu için gerekli olanakları sunmalıdır. Afet sonrası barınma ihtiyacı kritik olmasına rağmen, bu birimlerin tasarımı ve uygulanması genellikle sürdürülebilirlik ilkelerini göz ardı ederek çevresel, sosyal ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır. Çalışma, afet sonrası geçici barınma birimlerinin sürdürülebilirlik kriterlerine uygun tasarım ve uygulamalarını incelemektedir. Amaç, geçici barınma olarak kullanılan birimlerin sürdürülebilirliğini vurgulamak amacıyla sürdürülebilirlik kriterleri aracılığıyla değerlendirmek ve sürdürülebilirliklerine dair öneriler geliştirmektir. Bu bağlamda, 1900-2024 tarihleri arasında doğal afetlerden en çok etkilenen ülkelerden seçilen ve farklı afetlerde kullanılan geçici barınma birimlerinin sürdürülebilirlikleri incelenmiştir. Bulgular, incelenen geçici barınma birimlerinin çevresel ve ekonomik açıdan olumlu olduğunu, ancak sosyal sürdürülebilirlik açısından zayıf kaldığını göstermiştir. Çalışma sonucunda, afet sonrası inşa edilecek yapılar için öneriler geliştirilmiştir. Sonuç olarak, geçici barınma birimlerinin sürdürülebilirlik kriterlerine uygun olarak tasarlanması, afet mağdurlarının sağlık, refah ve sosyal entegrasyonunu desteklemek açısından hayati önem taşımaktadır.

Anahtar Sözcükler

Afet, Sürdürülebilirlik, Geçici Barınma, Afet Sonrası Barınma

1. Introduction

Disasters, whether natural or man-made, deeply affect people's lives. Meeting the need for shelter after a disaster is critical for disaster victims to hold on to life again (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2013). In this context, temporary shelters play an important role in post-disaster recovery and reconstruction processes. However, the design and implementation of temporary shelters often ignore sustainability principles (Félix et al., 2013). However, environmentally, socially and economically sustainable temporary shelter solutions can positively affect post-disaster recovery and reconstruction processes. Environmental aspects such as energy efficiency, water management, waste management, material selection; social aspects such as user satisfaction, social cohesion, accessibility; and economic

aspects such as construction, operation and maintenance costs, local economic contribution, and longevity can be improved by applying sustainability criteria (Arslan & Cosgun, 2008; Félix et al., 2015). The results of post-disaster temporary shelter units, which are evaluated in line with sustainability criteria, are examined in practice, and it is thought that it will be enlightening for future designs or academic studies. Evaluating the post-disaster temporary sheltering process from a sustainability perspective requires a multidimensional approach. Environmental, social and economic elements should be taken into consideration for a holistic sustainable temporary shelter design. In the environmental dimension, it is important that the materials used in temporary shelters are environmentally friendly. In the economic dimension, solutions that are self-sufficient and have low operating costs stand out. In the social dimension, inclusion of users in the process and design approaches that support socialization are envisaged. Evaluating the post-disaster temporary sheltering process in the context of sustainability will not only provide significant gains in environmental, economic and social dimensions, but also contribute to meeting the immediate sheltering needs of disaster victims and long-term recovery processes. In the process of disaster management, the close relationship between pre-disaster and post-disaster periods cannot be ignored. Measures taken and preparations made in the pre-disaster period significantly affect the normalization process after the disaster. Similarly, the organizations and activities carried out after the disaster are reflected back to the pre-disaster period. This cyclical relationship should be addressed in environmental, economic and social dimensions. Decisions taken and investments made in the pre-disaster period can directly affect environmental impacts, economic costs and social outcomes in the post-disaster normalization process. Likewise, recovery and reconstruction activities carried out in the post-disaster period can also contribute to the sustainability of the pre-disaster period. In this context, disaster management strategies should be associated with environmental, economic and social dimensions of sustainability. Decisions to be taken in pre- and post-disaster periods should be planned in a way to observe the balance between these three dimensions.

In this context, it is important to explain the concepts of disaster, post-disaster shelter and sustainability. Disasters cause multifaceted harm to people. In addition to causing injuries and loss of life, they also cause emotional stress and trauma (Cuny, 1994). Every year, thousands of people around the world are affected by natural disasters. When examining the needs that arise after these disasters, providing safe shelter areas is critical for disaster victims to reorganize their lives (Dayanir et al., 2022). The increase in the number of natural disasters has caused extensive damage to buildings and resulted in many homes being rendered unusable. This has resulted in large numbers of people becoming homeless (Félix et al., 2013). A home is a space where people can live, providing conditions for family life, comfort, protection and privacy. After a disaster there must be a rapid response to shelter needs because losing a home is more than a physical deprivation, it is a loss of dignity, identity and privacy (Barakat, 2003). In other words, providing housing after a disaster is a basic need. This is because housing establishes a sense of normality in the affected community, prevents the spread of death and disease, offers favorable conditions for personal hygiene and provides protection against external influences. Post-disaster housing is a critical requirement for the launch of recovery and reconstruction programs, offering victims privacy, protection and better sanitation. Temporary shelter is needed when disaster victims cannot live in their previous housing and new permanent housing is not yet available. This need is urgent. In disaster management plans, the implementation of temporary shelter takes place simultaneously with recovery and reconstruction strategies in the post-disaster phase. These strategies are implemented to overcome the losses caused by the disaster (Abulnour, 2014). In other words, while temporary shelter is an urgent need in the post-disaster phase, it also forms part of recovery and reconstruction plans. Therefore, temporary shelter is vital for communities affected by disasters and aims to meet the temporary shelter needs of disaster victims. The concept is not simple and requires finding solutions to the emergency and temporary shelter problems created by disasters (Faragallah, 2021). The definition of temporary shelter is not a simple matter. Johnson (2002) uses the term "temporary shelter" to refer to the different types of temporary shelter that people use after disasters until they settle in a permanent home. From another perspective, temporary shelter is a complex component of housing reconstruction that enables people to recover and resume their domestic routines shelter housing is a cumulative system that provides shelter for recovery alternatives for families affected by hazards and disasters (Corsellis, 2012; Faragallah, 2021). Temporary shelter is a type of shelter provided at different stages in post-disaster situations. Shelter serves both as an immediate protection and a function to support the normalization process of disaster victims. Temporary shelter can also be defined in the following ways: (a) as an object, i.e. the physical structure where people live after a disaster. (b) as a process, i.e., temporary shelter is part of the process after a disaster, just as Turner (1972) defines housing as a process, not a product. (c) as a function, i.e. a place that functions to house people from the time of disaster until they have a permanent place (Johnson, 2007a). In conclusion, temporary shelter is a physical structure, a stage in the process and a place that serves a temporary function. According to Quarantelli (1995), temporary shelter is extremely important in the recovery process after disasters. Temporary shelter allows people to return to their normal daily activities such as work, cooking, cleaning, school, socializing (Johnson, 2007b; Arslan & Cosgun, 2008). At this point, Quarantelli (1995) makes a distinction between the concepts of shelter and housing. According to this Shelter is a temporary place to stay immediately after a disaster, where daily activities are suspended. Housing, on the other hand, refers to a return to household responsibilities and daily routine (Johnson, 2002). In other words, while shelter meets immediate needs, housing provides a more permanent solution for life to return to normal. Based on Quarantelli's distinction between shelter and housing, four stages of shelter can be defined in the post-disaster rehabilitation (recovery) process: Emergency Shelter: Temporary places where survivors stay for a short time immediately after a disaster, such as

a friend's house or public shelter. Temporary Shelter: Places such as tents, collective shelters, etc. used for longer but still temporary stays a few weeks after the disaster. Temporary shelter: A place where survivors can reside for six months to three years, such as a prefabricated house or rented accommodation. Here, daily activities can be resumed. Permanent Housing: A reconstructed or new house, where survivors can settle permanently. According to this four-stage process, post-disaster recovery and return to normalcy is ensured (Félix et al., 2013). The temporary shelter phase, one of these four phases, cannot be hidden or canceled (Javanforouzan et al., 2020). In summary, the post-disaster process consists of emergency, temporary and permanent phases. At each stage, the need for shelter is tried to be met in different ways. However, there are no specific and decisive strategies for all stages. This deficiency hinders preparedness for disasters. The current post-disaster housing approach fails to meet the needs of disaster victims in a phased, urgent, economic and ecological manner. Therefore, it is important to produce a solution equipped with sustainability criteria to solve the housing problem ecologically, progressively, urgently and economically (Javanforouzan et al., 2020). Temporary shelter solutions have been widely used after the largest-scale disasters. However, these solutions have been criticized as not sustainable and culturally adequate (Félix et al., 2013). In order to achieve sustainability, there are many criteria that a temporary architecture must achieve (Duksi & Küçükali, 2016). These sustainability criteria are an important element to evaluate the sustainability performance of temporary architecture (Duksi & Küçükali, 2016). In this context, it has been observed in the literature studies that the basic elements covering the sustainability criteria of temporary architecture are discussed under different headings in the studies. Duksi and Küçükali (2016): Budget, Operation Time, Use Time, Material, Energy, Water, Flexible Capacity, while Hosseini et al. (2019); Aysan and Davis (1993); Johnson (2002); Barakat (2003); Chandler (2007); El-anwar et al. (2009); Hadafi and Fallahi (2010a) and Wei et al. (2012) categorize them as economic, social and environmental aspects. Javanforouzan et al. (2020) categorizes sustainability criteria in post-disaster temporary shelter as social, cultural, economic and environmental, while Félix et al. (2013) examines cost and environmental aspects. In another study, the sustainability criteria proposed for temporary shelter were determined as economic, cultural and social aspects, environmental aspects, construction systems and materials, site organization and model, components and space design, and some approaches and solutions were developed accordingly (Faragallah, 2021). To summarize from the literature research; it is seen that it is important to explain some issues about determining the sustainability criteria of post-disaster shelter designs. These are;

Firstly, if Environmental Sustainability is considered, the use of renewable energy sources (solar, wind, etc.) is important for ensuring environmental sustainability in post-disaster shelter designs. Researchers such as Arslan (2007), Pourdeihimi (2011) and Alemi et al. (2015) and when environmental sustainability is examined in the section on shelter and settlement standards of the Humanitarian Convention and Minimum Standards in Humanitarian Assistance in the Sphere Guide (Sphere, 2018) emphasized that the use of renewable energy sources such as solar, wind, geothermal and hydroelectricity in post-disaster temporary shelters plays a key role in ensuring environmental sustainability. Solar energy is a low-cost renewable energy source that can be widely used in disaster areas. Arslan (2007) and Pourdeihimi (2011) stated that the installation of photovoltaic solar panels in temporary shelter units and thus meeting the electricity needs is very advantageous from an environmental point of view. Wind energy can also be effectively utilized, especially in rural areas. Alemi et al. (2015) stated that the integration of wind turbines can sustainably meet the energy needs of temporary shelter units. Geothermal energy is a type of energy obtained from underground resources and can be used in the long term. Geothermal energy systems can be used to meet the heating and cooling needs of temporary shelters, especially in disaster areas in hot climate zones (Pourdeihimi, 2011). Hydroelectric power plants can also be used to meet the energy needs of temporary shelter units after a disaster. These renewable energy sources offer clean and sustainable solutions for the operation and lighting of temporary shelters. Water management and recycling are other important criteria under the heading of Environmental Sustainability. Khalili and Amindeldar (2014) state that efficient use of water resources and recycling of wastewater in temporary shelter units are decisive in creating environmentally friendly systems. Patel and Hastak (2013) emphasized that rainwater collection and storage, gray water use and integration of wastewater treatment systems are important for sustainable water management in temporary shelter units. Other environmental sustainability criteria include the use of recyclable, natural and local materials (wood, soil, bamboo, etc.) (Sphere, 2018; Oliver, 2003; Sanderson et al. 2014) and designs that observe ecological balance and support biodiversity (Daneshpour & Mahmoudinejad, 2015; Barenstein, 2006; Hoşkara, 2007). Oliver (2003) stated that the use of traditional, local materials in temporary shelter units will reduce environmental impacts and provide designs that are compatible with the cultural context. Sanderson et al. (2014) also stated that temporary shelter units built using local materials in post-earthquake Haiti are successful examples in terms of environmental sustainability. In the Sphere (2018), Daneshpour and Mahmoudinejad (2015) and Barenstein (2006) emphasize that designs that respect ecological balance and support biodiversity will reduce the long-term environmental impacts of temporary shelter units after disasters.

Secondly, Social Sustainability: In terms of social sustainability, spaces that meet the psycho-social needs of disaster victims are important. Researchers such as Hayles (2010), Dalgish (2013) and Barenstein (2006) have emphasized that meeting the psychological and social needs of disaster victims plays a critical role in the design of post-disaster temporary shelter units. Félix et al. (2013) also drew attention to the importance of providing areas to support the psycho-social well-being of disaster victims in temporary shelter units. Sanderson et al. (2014) stated that the creation of community centers and therapy rooms in temporary shelters after the earthquake in Haiti accelerated the post-traumatic recovery process of

disaster victims. [Daneshpour and Mahmoudinejad \(2015\)](#) emphasized that strengthening social networks and community ties in post-disaster temporary shelter units contributed to the increase of psychological resilience of disaster victims. [Twigg \(2015\)](#) states that common areas that meet psycho-social needs enable disaster victims to have a healthier recovery process by reducing stress and anxiety levels. In common areas that support community formation and social interaction, [Dikmen \(2019\)](#) stated that it is also critical for social sustainability to consider the accessibility of disabled and disadvantaged groups to temporary shelter units. Designing shelters to meet the specific needs of these groups supports their daily life activities and participation in social life.

Finally, the criteria under the Economic Sustainability heading are important for the functionality and long-term use of temporary shelter units after a disaster. While meeting the needs of disaster victims, these criteria also support the efficient use of resources and local economic development. Low construction, operation and maintenance costs are critical for the economic sustainability of post-disaster temporary shelter solutions. [Sev \(2009\)](#), [Félix et al. \(2015\)](#) and [Arslan \(2007\)](#) stated that low-cost temporary shelter options are more effective in meeting the short and long-term needs of disaster victims. [Alemi et al. \(2015\)](#) and [Sanderson et al. \(2014\)](#) also emphasized that simple and modular building systems provide advantages in terms of both economic and environmental sustainability. Employment opportunities that will revitalize the local economy are also a prominent criterion under the heading of Economic Sustainability. [Patel and Hastak \(2013\)](#) and [Gharaati \(2006\)](#) argue that employing local people in the construction, operation and maintenance of temporary shelters offers economic opportunities and strengthens social cohesion. [Sanderson et al. \(2014\)](#) stated that the use of local materials and labor in post-disaster temporary shelter programs in Haiti contributed to economic development. Long-lasting and durable building systems are also considered as an important criterion for Economic Sustainability. [Arslan and Cosgun \(2008\)](#), [Gharaati \(2006\)](#) and [Alemi et al. \(2015\)](#) stated that the long-term use of building systems used in temporary shelters provides both economic and environmental advantages. Durable and reusable building elements can also be utilized in the post-disaster reconstruction process. Disaster shelter designs prepared by considering all these elements can both provide quality of life for disaster victims and support environmental, social and economic sustainability. In this way, the post-disaster process will be more resilient and permanent.

2. Material and Method

2.1. Material

One of the most critical needs after a disaster is the need for shelter. Solutions for sheltering needs differ according to the type of disaster, regional characteristics of the geography where the disaster occurred and the time elapsed after the disaster ([Baluken, 2023](#)). In this context, the design of temporary shelter units not only provides an immediate solution, but also constitutes a critical step to increase resilience against future disasters. Designing these units within the framework of sustainable principles is important not only to provide an emergency solution but also to increase resilience against future disasters. According to the data in the Emergency Event Database (EM-DAT) database (<https://public.emdat.be/>), a total of 17,187 natural disasters were recorded between 1900 and 2024. This database includes data obtained from various sources such as the International Federation of the Red Cross, the United Nations, Red Crescent Societies and national governments ([Usta, 2023](#)). Among the 19 countries most affected by natural disasters are the United States of America (USA), China, India, Philippines, Indonesia, Japan, Bangladesh, Mexico, Brazil, Iran, Pakistan, Colombia, Afghanistan, Australia, Peru, France, Italy and Russia, while Türkiye ranks 16th with 218 disaster records ([Emergency Event Database, 2024](#); [Tarakçı et al., 2024](#))(Figure 1).

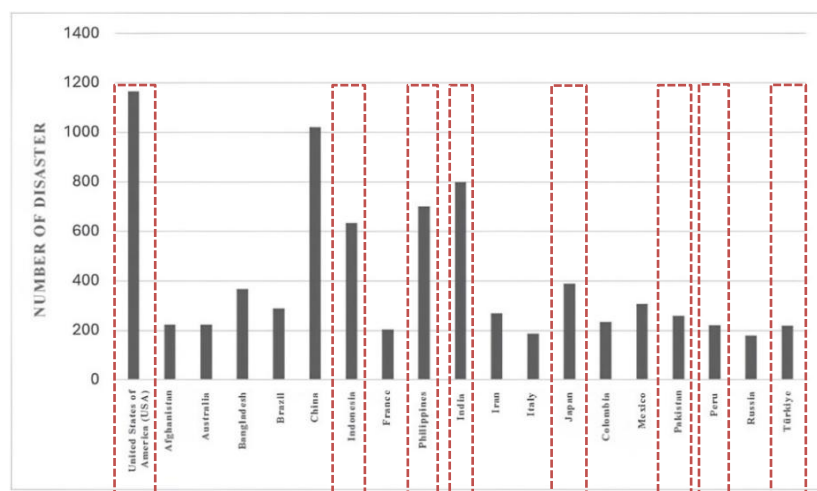


Figure 1: Disasters occurring in countries in the EM-DAT database ([Emergency Event Database, 2024](#); [Tarakçı et al., 2024](#))

In this study, the environmental, economic and social sustainability of temporary shelter units used in case of a possible disaster is analyzed within the framework of determined criteria. Within the scope of the research, structures that are considered as temporary shelter units, whose design information is accessible, used in different disasters, have 2D and 3D drawings with various square meters and interior and exterior visuals of the space, can be constructed in a short time, and maintain their durability until permanent solutions are possible were selected from 19 countries. The 8 countries where the selected buildings are located are marked in red in Figure 1. In this context, temporary shelter units were selected from the United States of America, Indonesia, Japan, Philippines, Pakistan, Türkiye, Peru and India, which have faced the most disasters. Temporary shelter units for which design information, visuals and drawings could not be accessed, which were not used after the disaster or which remained only as pilot designs were excluded from the scope (Table 1).

Table 1: Temporary shelter units determined for the study

Temporary Shelter Units					
	Rapido	Timber Frame	Paper Log House	Container T. Shelter	Transitional Shelter
Disaster Type	Hurricane	Earthquake	Earthquake	Earthquake	Typhoon
Name of Disaster	Dolly Hurricane	Padang Earthquake	Kobe Earthquake	Japan Earthquake	Washi Typhoon
Year	2008	2009	1995	2011	2011
Location	USA	Indonesia	Japan	Japan/Onagava	Philippines
Designer	Rapido	information not accessed	Shigeru Ban	Shigeru Ban	Jason Buensalido
Materials	Stone and wood	Bamboo	Plywood, steel bars etc.	Converted containers	Wood-Metal
Time to build	3 day	2 day	6 hour	1-2 day	12 day
Lifespan	information not accessed	6-12 month	2-5 year	5-10 year	5 year
Number Built	information not accessed	7000	information not accessed	100	250
Square meters	40.15	18	15.7	29	36
Source	Yılmaz (2021)	IFRC (2011)	Rethinking The Future (2024)	Arquitectura Viva (2024)	IFRC (2013)
Temporary Shelter Units					
	Cebu	One Room Shelter	Containers	Timber Frame-2	Paper Log House II
Disaster Type	Hurricane	Flood	Earthquake	Earthquake	Earthquake
Name of Disaster	Hurricane Haiyan	Pakistan floods	Kahramanmaraş Earthquake	Pisco Earthquake	Gujarat Earthquake
Year	2013	2010	2023	2007	2001
Location	Philippines	Pakistan	Türkiye	Peru	India
Designer	Jason Buensalido	information not accessed	AFAD	information not accessed	Shigeru Ban
Materials	Wood-metal	Brick-Tile	Steel	Wood veneer	Paper Log-Wood
Time to build	1-2 week	1-2 week	1-3 day	1 day	1-5 day
Lifespan	5-10 year	10 year	10-20 year l	24 month	5 year
Number Built	100 and above	875	information not accessed	2020	100 and above
Square meters	36	19	20-30 m ²	18	18-20
Source	Özcan vd. (2021)	IFRC (2013)	Tarakçı (2024)	IFRC (2011)	Shigeruban Architects (2024)

While analyzing the 10 selected buildings, many plans, sections, elevations, photographs and videos and data from different sources were examined. However, not all images were included in the study.

2.2. Method

This study, which deals with temporary shelter units within the framework of sustainability criteria, uses the case study method. Case study, as defined by Creswell (2007), is a qualitative research approach in which the researcher examines a limited number of situations or events in a certain period of time by using data collection tools (observations, interviews, audio-visual materials, documents, reports) obtained from multiple sources. In this process, situations and themes related to the situation are identified. In addition, case study is also defined as a qualitative research method in which a situation or event is investigated and the data collected are evaluated in the context of real life conditions (Davey, 1991; Yin, 1984).

This study, which analyses the environmental, social and economic sustainability of temporary shelter units, consists of five stages (Figure 2). The first stage is a comprehensive literature review on disaster, temporary sheltering, post-disaster temporary sheltering units and sustainability. This review formed the general framework of the study and provided the necessary theoretical background for the methodology. In the second stage, the method was designed by categorizing the information obtained through the literature review under environmental, social and economic sub-headings. In the third stage, the sample group to be analysed in the study was determined and detailed information about the buildings in this group was presented. In the fourth stage, analyses were carried out within the framework of sustainability criteria for the selected sample group. Finally, these analyses are evaluated with a table based on the findings of the literature review and recommendations are made about the buildings.

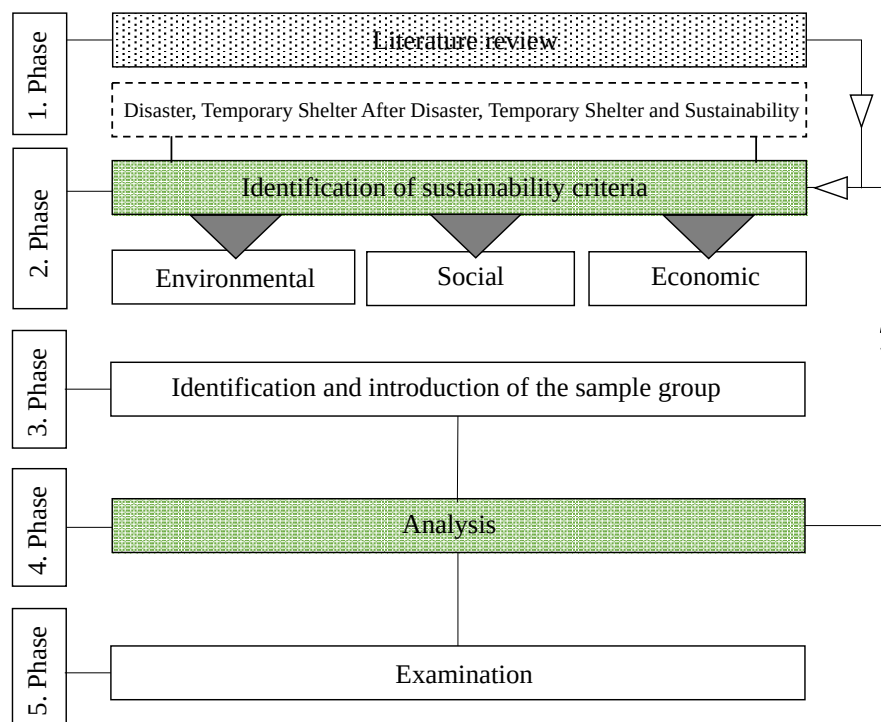


Figure 2: Stages of work

In the study, the sustainability of temporary shelter units is analysed by focusing on 3 sub-headings: environmental, social and economic. The criteria addressed in the literature review were analysed and the similar ones were classified. Table 2 shows the sustainability criteria created for the evaluation of temporary shelter units used after disasters. While creating these criteria; 13 sub-strategies belonging to the environmental, social and economic headings were determined based on the classifications made by Aysan and Davis (1993), Johnson (2002), Barakat (2003), Chandler (2007), Duksi and Küçükali (2016), El-Anwar et al. (2009), Hadafi and Fallahi (2010b), Hosseini et al. (2019), Wei et al. (2012) and Javanforouzande (2020). Each sub-strategy is numbered within its own sub-heading.

Table 2: Sustainability criteria for post-disaster temporary shelter units

	SUSTAINABILITY CRITERIA	REFERENCE
Environmental	1 Use of renewable energy sources (solar, wind, etc.)	Arslan (2008); Pourdeihimi (2011), Alemi et al. (2015)
	2 Ensuring water management and recycling	Khalili & Amineldar (2014); Patel & Hastak (2013); Hoşkara (2007)
	3 Preferring recyclable materials	Oliver (2003); Sanderson et al. (2014)
	4 Use of local materials	Daneshpour & Mahmoudinejad (2015); Barenstein (2006)
	5 Use of materials that do not have a negative impact on human health	Oliver (2003); Sanderson et al. (2014)
	6 Designs that consider ecological balance and support biodiversity	Daneshpour & Mahmoudinejad (2015); Barenstein (2006)
Social	1 Places that meet the psycho-social needs of disaster victims	Hayles (2010), Dalgish (2013), Barenstein (2006)
	2 Common spaces that support community formation and social interaction	Félix et al. (2013); Sanderson et al. (2014); Daneshpour & Mahmoudinejad (2015); Twigg (2015)
	3 Ensuring accessibility for disabled and disadvantaged groups	Dikmen (2019)
	4 Designs that preserve cultural and traditional elements	Barenstein (2006); Lizarralde & Davidson (2006)
Economic	1 Low construction, operation and maintenance costs	Félix et al. (2015); Arslan (2007); Alemi et al. (2015), Sanderson et al. (2014); Halliday (2008); Sev (2009)
	2 Employment opportunities that will stimulate the local economy	Patel & Hastak (2013), Gharaati (2006); Sanderson et al. (2014)
	3 Long-lasting and durable building systems	Arslan & Cosgun (2008), Gharaati (2006), Alemi et al. (2015)
		Aysan & Davis (1993); Johnson (2002); Barakat (2003); Chandler (2007); Duksi & Küçükali (2016); El-Anwar et al. (2009); Hadafi & Fallahi (2010b); Wei et al. (2012), Javanforouzande et al. (2020)

Main objectives of the strategies under the environmental sustainability criteria: Environmental sustainability strategies aim to minimize the environmental impacts of post-disaster temporary shelter solutions, reduce energy, water, waste generation and natural resource use, and ensure efficient use of resources through renewable energy and recycling. It is also important to promote the sustainable use of resources and ensure the long-term sustainability of these solutions by preferring natural and local materials.

Main objectives of the strategies under the social sustainability criteria: Social sustainability goals include supporting the mental health of disaster victims, providing social services and rehabilitation, strengthening solidarity and increasing accessibility. In this context, facilitating access to services for groups with special needs and creating designs that reflect cultural identities are also priorities.

Main objectives of the strategies under the economic sustainability criteria: To ensure that post-disaster temporary shelter solutions are economically cost-effective, to create a sustainable economic model by minimizing operation and maintenance costs in the long term, to support the local workforce and economic activities in the disaster area, to contribute to local employment and economic development, to ensure that post-disaster temporary shelter units are long-lasting and durable, to enable the reuse, conversion or recycling of structures.

3. Findings

3.1. Rapido

General information: In July 2008, Hurricane Dolly made landfall in the Gulf of Texas, causing significant damage along the southern coast of the United States. Hurricane Dolly reached South Padre Island in Texas on 23 July 2008. The hurricane, which was a Category 2 hurricane at the time, produced heavy rains and strong winds in the Texas-Mexico border region (Berg, 2009). Thousands of homes and businesses were damaged or destroyed in the areas hit by the hurricane. This situation brought the need for emergency shelter to the agenda of the local population. Local governments and aid organisations took action to establish temporary shelter units. These temporary shelter units served an important function to solve the immediate and short-term shelter problem until the disaster victims were able to find permanent housing. Thanks to the quick response of the authorities and the co-operation of various stakeholders, thousands of people were able to find safe and appropriate shelter in the aftermath of Cyclone Dolly.

The temporary shelter unit, which was produced to meet the basic needs of the disaster victims after this disaster, has a sleeping area of 13.40 square meters and a bathroom of 6.70 square meters. The other part of the unit, the living space, is 20,05 square meters and has a counter area. Elevations and porches for the entrance made by the disaster victims within their needs have increased the livability of the unit (Yilmaz, 2021), (Figure 3).



Figure 3: Rapido temporary shelter unit figure (Yilmaz, 2021)

Information on sustainability framework: RAPIDO programme is designed to meet the need for temporary shelter after a disaster and to facilitate the process of converting it into permanent housing. In this context; shelter units designed in prefabricated and modular structure can be applied to different terrain conditions and can be installed quickly. Panels and components produced off-site are brought to the disaster area and mounted on concrete foundations. Infrastructure, electricity and installation systems of the units are integrated into the panels. The RAPIDO programme includes the use of environmentally renewable energy sources. Water management and recycling practices ensure the effective use of water resources. Preference of recyclable materials reduces the amount of waste. The use of local stone or wood reduces transport costs. The use of materials such as paints with low VOC emissions and formaldehyde-free wood is observed. From an economic point of view, RAPIDO programme stands out with its low construction, operation and maintenance costs. The use of local labour force accelerates the construction process. It is aimed to increase resilience against future disasters by using long-lasting and durable building systems.

3.2. Timber Frame

General Information: On 30 September 2009, a series of earthquakes occurred in West Sumatra, particularly near the city of Padang. These earthquakes affected 13 of the 19 districts of West Sumatra province. Approximately 250,000 houses were either destroyed or severely damaged as a result of the earthquakes and landslides (Shelter Projects, 2010). The Government of Indonesia responded quickly with support from the national and international humanitarian community. The government focused on rebuilding provincial government capacity, search and rescue and emergency relief. The emergency phase was concluded within 8 weeks. The temporary shelter units built after the disasters were constructed using local materials. The bamboo tree grown in the Indonesian region constitutes the basic construction systems of the shelter units. In addition, when the materials used are examined; local materials such as terra cotta tiles, wooden constructions, palm fibres, galvanised steel frame, steel legs, screws and nuts, nails, wooden planks were used (Ünal, 2017). Timber frame structures were preferred as temporary shelter after the earthquake. This type of structure is lightweight and durable, showing a high resistance to earthquakes and can be constructed quickly. Since the wood material can be sourced locally, it reduces transport costs and supports the local economy. The shelter structure is a timber frame structure with a roof and walls made of palm trees. Its plan dimensions are 4.5 m x 4 m, with a height of 3.35 m to the summit beam and 2.4 m to the eaves level. The roof has a slope of 23.6 degrees (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2011), (Figure 4).

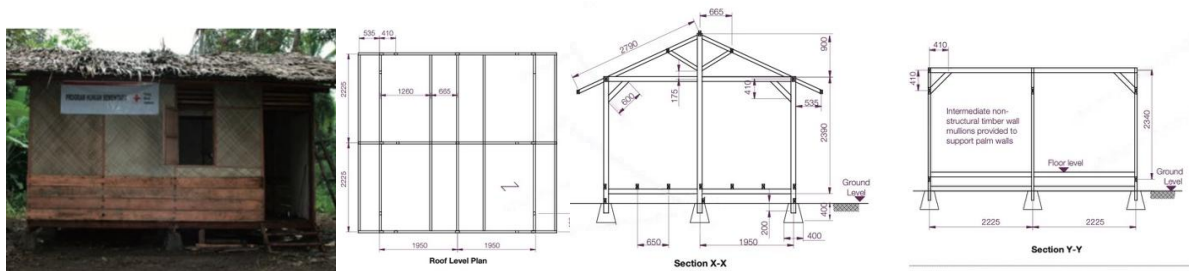


Figure 4: Timber Frame temporary shelter unit figure and drawing

Information in the context of sustainability: There is no bracing in the building; however, a certain stability is provided by the interconnection of the three portal frames with horizontal elements at ground, eaves and summit level. Each portal frame consists of two or three columns and beams supporting the roof and corner bracing elements.

Corner bracing elements in the frames provide horizontal stiffness. Secondary non-structural elements include floor joists, roof beams extending between the beams, and transoms supporting palm wall panels ([International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2011](#)). The shelter structure has a suspended floor structure, which is assumed to extend between the coconut wood flooring and the floor joists. The columns are embedded in concrete bucket foundations that rest directly on the ground ([International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2011](#)). The shelter is constructed from locally sourced materials that are familiar to residents and do not require special tools or equipment for assembly. It can therefore be constructed quickly after a disaster and is relatively easy to maintain and adapt over time, depending on the needs of the residents. This shelter offers a good short-term design solution, suitable in areas vulnerable to high seismic and wind loading ([International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2011](#)).

3.3. Paper Log House

General information: In 1995, the great earthquake in Kobe, Japan, was recorded as one of the most destructive earthquakes in the history of the country. The 7.2 magnitude earthquake, which occurred at 05:46 on 17 January 1995, destroyed the city ([Asahi, 1995](#)). After the earthquake, which severely damaged the city, architects and designers started to look for innovative solutions to respond to the urgent housing needs of people. In this process, architect Shigeru Ban developed emergency shelters made of 'paper logs', a material that can be used in extraordinary situations. This innovative approach resulted in a lightweight and reusable shelter that can be constructed quickly and economically. Paper logs, being a cheap, easily available and environmentally friendly material, have come to the fore as a solution that can respond to the need for emergency shelter after disasters. Shigeru Ban and his team named this new construction prototype 'Paper Log House' and it was an effective response to the need for emergency shelter after the earthquake in Kobe. This innovative approach is recognized as an important development in the field of post-disaster housing ([Rethinking The Future, 2024](#)) (Figure 5).



Figure 5: Paper Log House temporary shelter unit figures and drawing ([Shigeru Ban Architects, 2023](#))

Information within the framework of sustainability: The Paper Log House construction method can be realised quickly without the need for any machinery. Each structure, when equipped with the necessary materials, can be built by eight people in just two days ([Shigeru Ban Architects, 2023](#)). This quick and simple installation process can quickly respond to the need for emergency accommodation for victims in future disaster situations. Paper Log Houses offer an environmentally friendly shelter option as they are built using natural and renewable materials. Since the design criteria for temporary shelter for the victims of the Kobe Earthquake required affordable structures that anyone can build, have adequate thermal insulation and aesthetic appearance, and can be easily dismantled and recycled, the solution that meets these requirements was found to be a log house hut made of beer cans filled with sand, paper tubes and tent membranes.

3.4. Container Temporary Shelter

General information Container T. Shelter is an emergency shelter solution designed by Shigeru Ban after the major earthquake in Japan in 2011. This building was developed to meet the need for shelter in a fast and effective way after natural disasters. The architectural design was realised by Japanese architect Shigeru Ban. Container T. Shelter aims to provide a safe and habitable living space for post-earthquake victims. Each container dwelling is approximately 29 square meters in size. Depending on how the containers are combined, there are three types of apartments: for one or two persons (19.8 m²), for three or four persons (29.7 m²) and for more than four persons (39.6 m²). To improve the storage systems, the Volunteer Architects Network (VAN), led by Shigeru Ban himself, installed wooden shelves and cupboards in the rooms (Figure 6).



Figure 6: Container temporary shelter unit figures (Özcan et al., 2021)

Information within the framework of sustainability: Converted containers were used in the project. The containers have been transformed into habitable and comfortable spaces through architectural design. The construction time of Container T. Shelter usually varies between 1-2 days. The service life of Container T. Shelter usually varies between 5-10 years. It stands out as a solution that offers advantages such as fast assembly, flexibility and economy. It provided a quick response to the need for shelter after the earthquake. After the 2011 Japan earthquake, approximately 100 Container T. Shelter were built in the Onagawa region. These structures were widely used to meet the need for emergency shelter. Lightweight structural elements, insulation materials and durable cladding materials are used for interior design.

3.5. Transitional Shelter

General Information: In 2011, after Typhoon Washi (Sendong) hit the Philippines, the Cebu Transitional Shelter Project was initiated to provide a fast and permanent shelter solution for disaster victims. The prefabricated and modular shelter units are each approximately 36 m² in size. The units are constructed with timber frame, concrete wall, corrugated metal roof system and have a compact plan scheme. Each unit has a bathroom and an entrance hall. This structural system provides easy assembly, flexibility and conversion to permanent housing. It is also designed according to the needs and expectations of disaster victims. Prefabricated production was applied for fast installation after the disaster. Temporary shelter was provided until the return of the disaster victims and the ground was prepared for permanent housing planning. Improvements were made for the units with user participation. The architectural design of the Transitional Shelter Project was realised by Filipino architect Jason Buensalido. Each prefabricated shelter unit is approximately 36 square meters in size. The shelter is a rectangular building with a gable roof and a covered floor area of approximately 4.0 m x 5.0 m, with an indoor bathroom and an entrance hall of approximately 4.0 m x 1.5 m (Figure 7).

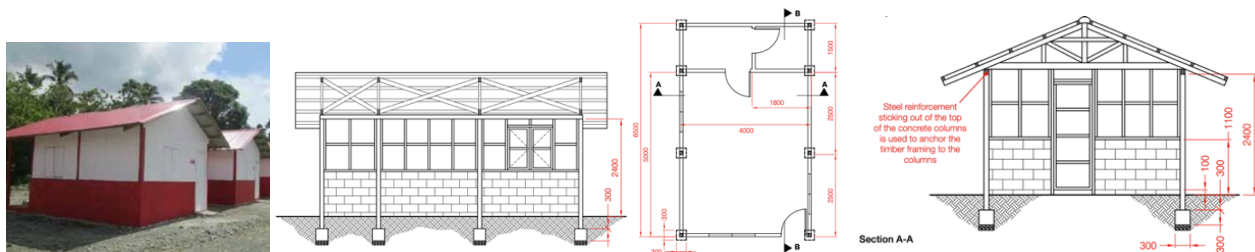


Figure 7: Transitional temporary shelter unit figures and drawing (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2013)

Information in the context of sustainability The external walls have a semi-high concrete masonry structure supported by a timber frame extending to the eaves, while the roof consists of timber beams and purlins carrying corrugated metal sheets; this roof frame is supported by eight prefabricated concrete columns located inside the external walls. The concrete columns and masonry walls are embedded in the ground and do not require a special foundation. The floor is covered with a poured concrete slab and a septic tank is located in the bathroom. Thanks to its modular design, the shelter can be expanded and relocated with minor changes to the main structure. The materials used offer a reasonable design life by increasing durability; the concrete and masonry materials are very robust and the wooden components are made durable by the necessary treatments. The prefabricated concrete columns allow the roof to be constructed quickly to provide a closed shelter during the construction of the external walls, while the shelter can perform adequately against lateral wind and seismic loads thanks to the appropriate anchorages of the timber frame.

3.6. Cebu

General Information: The Philippines is a country that is affected by many tropical cyclones every year. In 2013, after Hurricane Haiyan hit the Philippines, this unit was developed to meet the need for emergency shelter. The project was designed by Jason Buensalido and was created for a quick and effective post-disaster solution.

In this context, it was prepared as a project similar to the RAPIDO programme. Prefabricated and modular shelter units were designed. Thus, solutions that are suitable for different terrain conditions and can be installed quickly have been produced (Figure 8).



Figure 8: Cebu temporary shelter unit figures and drawing (Özcan et al., 2021)

Information within the framework of sustainability: Wall, roof and floor panels produced off-site in the factory were brought to the disaster area and assembled. This shortened the construction period. Disaster victims were involved in the design process by determining their needs. Thus, user satisfaction was tried to be ensured. Paper tubes were used in the corners of the design and woven bamboo sheets were applied as connection material between them. The foundations are made of beverage crates filled with sandbags and the floor is made of plywood made of coconut wood. Students at Sen Carlos University were also involved in its construction (Özcan et al., 2021). The construction time of the Cebu Hurricane structure usually varies between 1-2 weeks. In terms of its social impacts, Cebu Hurricane increases social resilience by allowing communities to rebuild quickly and supports economic revival through the employment of local labor. Economically, the fast construction time and use of local materials reduces costs, which is important for communities working with limited resources. In the long term, the resilience and reusability of the structure increases the capacity to respond quickly to future disasters.

3.7. One Room Shelter

General information: The 2010 floods across Pakistan had a major impact due to heavy rainfall that exceeded forecasts. The impact of the flood disaster was greater than the previous disasters of 2005 (earthquake), 2005 hurricane (Katrina), 2008 hurricane (Nargis in Myanmar), 2010 Haiti (earthquake) and 2004 Indian Ocean tsunami (Kuzucuoğlu & Başbuğ Erkan, 2020). One Room Shelter was developed to meet the urgent need for shelter after the major flood disaster in Pakistan in 2010. This shelter is a rectangular structure with dimensions of approximately 4.8m x 3.9m and has a flat roof (Figure 9).

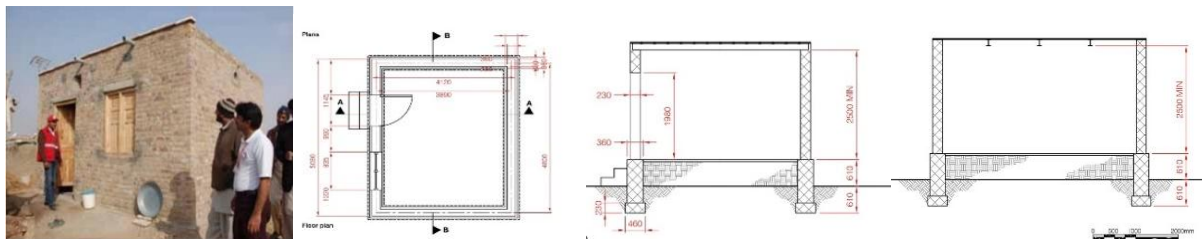


Figure 9: One Room temporary shelter unit figures and drawing (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2013)

Information in the framework of sustainability: The walls are constructed of 230 mm thick, unreinforced, fired bricks supporting the roof. The roof is covered with ceramic tiles, supported on steel beams, and a cement render coating is applied on top of the tiles. The foundation consists of unreinforced brick piers and foundation walls. The part of the floor covered with plaster is located at least 610 mm above the surrounding floor surface. The design of the structure includes a door and a window, as well as air vents at the top of the walls (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2013). This structure was designed to enable flood-affected communities to quickly regain a safe living space. Its main materials are bricks and tiles; the bricks increase the durability of the structure, while the tiles play an important role in providing waterproofing and longevity of the roofing. The expected lifespan of One Room Shelter is approximately 10 years, but this can be extended with regular maintenance and repair. The construction time usually varies between 1-2 weeks, which contributes to the reconstruction of communities by providing a quick solution in emergency situations. A total of 875 of these structures have been built, providing safe shelter for many people affected by the floods. One Room Shelter aims to minimize environmental impact by using local materials. Materials such as bricks and tiles are sourced locally, reducing construction costs and supporting the local economy. In addition, these structures are designed in accordance with local climatic conditions and are structured in a way to provide energy efficiency.

3.8. Containers

General Information: Türkiye is located on the Mediterranean-Alpine Himalayan earthquake belt, which is one of the most critical earthquake belts on earth, and earthquakes occur frequently in the country due to this geological structure. After various disasters such as earthquakes in Türkiye, public institutions have solved emergency and temporary shelter units. Container structures were rapidly established to meet the need for emergency shelter, especially after the major earthquake in Kahramanmaraş in 2023. These structures are designed to ensure that individuals affected by the earthquake have a safe living space. Containers can be placed quickly after the disaster thanks to their portable structures and can be used immediately in the areas where they are needed (Figure 10).



Figure 10: Containers temporary shelter unit figures and drawing (Tarakçı, 2024)

Information within the framework of sustainability: Container structures have various characteristics in terms of the comfort and security provided in temporary accommodation centres. The average indoor area per person varies between three and a half and four and a half square meters. In hot and humid climates, air flow is provided in the containers to prevent direct sunlight, while in cold climates the materials are intended to provide optimum insulation. The height of the containers should be at least 30 centimeters from the ground and necessary infrastructure connections should be made if there are areas such as toilets or kitchens in the interior (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2015). In addition, the containers have an installed power capacity of 15 kilowatts per hour. All connections in insulation and electrical installations must comply with Turkish Standards Institute (TSE) norms. The floor of the containers, which are built using fire-resistant materials, are made of materials that do not break and will not be damaged in case of contact with water. Sealing is ensured by using waterproof material on the upper parts of the ceiling. Kitchen worktops in the interiors are designed from unbreakable materials and equipped with ventilation systems over the stove (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2015).

3.9. Timber Frame II

General Information: Developed to address the urgent shelter needs following the Pisco Earthquake, this structure features a wooden frame construction that offers significant advantages in terms of lightweight and durability, allowing for rapid assembly in emergency situations. The construction time is merely one day, with plans for the structure to be utilized for up to 24 months. The interiors are designed to meet basic needs and can accommodate up to 18 individuals. Built on a 3m x 6m plan, it utilizes Bolaina wood-supported framing and features a single-pitched roof with a slope of four degrees (Figure 11).

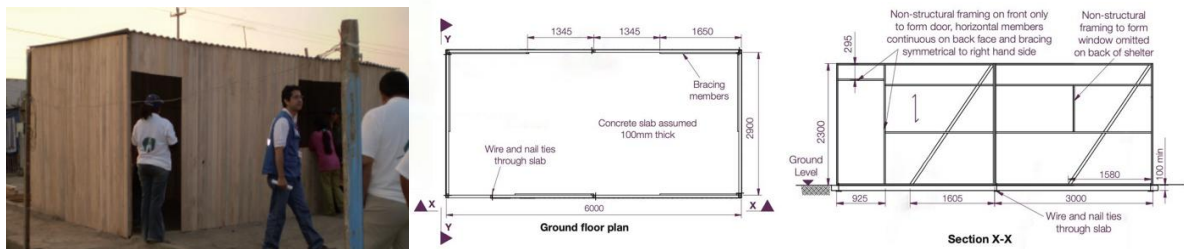


Figure 11: Timber Frame II temporary shelter unit figures and drawing (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2011)

Information within the framework of sustainability: The shelter features walls constructed with solid wood panels covered by a tongue-and-groove system, and a roof made of corrugated fiber cement sheets. Standing at a height of 2.4 meters, the structure is positioned on either a new or an existing concrete slab. When a new slab is utilized, wire ties wrapped around nails embedded in the ground provide resistance against upward lifting at all column points of the frame. In cases where existing slabs are used, the shelter is anchored to external posts for stability. The shelter consists of six panels that are assembled using connecting wooden elements, connection plates, and plastic straps. A central ridge beam

is added to the panels, with additional beams nailed on top to support the roof. This lightweight and simple box shelter presents a good design solution for areas sensitive to seismic loads; however, its performance under wind loads is deemed insufficient. The structure utilizes locally sourced materials and does not require specialized tools or equipment for assembly. The panelized construction method offers advantages in terms of construction speed and quality control.

3.10. Paper Log House II

General Information: The Paper Log House project, designed by Shigeru Ban, was implemented following the earthquake in Gujarat, India, in 2001, to provide shelter for those who lost their homes. The architectural design of the project is recognized for its pioneering work in disaster relief shelters by the Japanese architect Shigeru Ban. It was specifically conceived to address the urgent shelter needs after the Gujarat Earthquake in 2001. Ban aimed to offer a rapid solution by utilizing environmentally friendly and sustainable materials in this structure. Paper tubes form the foundation of this building due to their lightweight and ease of transport, while also providing a cost-effective option. Each Paper Log House has an approximate size of 18-20 square meters (Figure 12).



Figure 12: Paper Log House II temporary shelter unit figures and drawing (Shigeruban Architects, 2024)

General Information: The project utilizes inexpensive and readily available materials. Paper tubes (logs) and plastic coverings have been chosen as the primary construction materials, providing a rapid and economical solution. The structure features easy installation and dismantling capabilities, making it lightweight and portable. Environmentally friendly and recyclable materials have been employed. It has a seismic-resistant construction system and can be used as a temporary shelter. Rubble from demolished buildings was used for the foundation, covered with traditional mud flooring. For the roof, split bamboo was utilized for the ribbed vaults, while whole bamboo was used for the ridge beams, with a plastic tarp sandwiched between two woven bamboo mats

4. Examination and Recommendations

The strategic headings created under the environmental, social, and economic dimensions of sustainability criteria have been consolidated into a table for the analysis of shelter units used after disasters. The resulting evaluation table allows for the examination of a defined sample group in accordance with sustainability criteria, identifying the status of each sub-criterion. The evaluation and scoring system are as follows: 5 grades are defined for the evaluation, namely excellent, good, moderate, bad, and very bad. Each of these is displayed an assigned color. In this respect, green is for excellent, yellow for good, orange for mediocre, red for bad, and crimson for very bad.

In Table 4, each criterion and its sub-strategies are evaluated separately and suggestions are made for developing applicable designs or improving existing designs. From the perspective of environmental sustainability, it is of great importance to create self-sufficient housing units that will reduce environmental impacts, be environmentally friendly, minimize resource consumption and waste production.

Table 4: Evaluation of environmental sustainability criteria in structures and recommendations

CRITERIA UNITS	Environmental						RECOMMENDATIONS
	1	2	3	4	5	6	
Rapido							To ensure environmental sustainability. Design should be created by considering the place-context relationship
Timber Frame							Self-sufficient and self-powered units should be created, Integration of renewable energy systems such as solar panels and wind turbines should be considered,
Paper Log House							Consider how much resources it will consume during the construction phase and consider alternative energy sources, Energy efficient appliances or equipment should be used,
Container T. Shelter							It should offer energy efficient architectural solutions such as natural ventilation,
Transitional Shelter							Consider the use of recyclable materials, The installation of gray water recycling systems should be considered,
Cebu							Harvest and store rainwater, Integration of wastewater treatment systems should be ensured,
One Room Shelter							The duration of use and the areas of use should be determined correctly, and designs should be created by taking into account the damage to the area after the structures are removed,
Containers							Use of prefabricated, modular, and demountable building systems,
Timber Frame II							Consideration should be given to the production and use of temporary shelter units and the waste that may be generated after their use, and plans should be made to reduce this waste,
Paper Log House II							They should be considered and designed to be reusable or recyclable after their lifetime, Local and natural materials (wood, earth, bamboo, etc.) should be preferred.
Excellent Good Moderate Bad Very-bad							

In Table 4, an analysis of the selected examples based on social criteria has been conducted, and recommendations have been provided. The examined examples, including Container T. Shelter, Transitional Shelter, Cebu, One Room Shelter, Container, Timber Frame II, and Paper Log House II, indicate that renewable energy sources (solar, wind, etc.), water management, and recycling are not adequately implemented. To ensure environmental sustainability in temporary shelter units, solar panels can be integrated into the units. Wind turbines can be positioned in the shelter areas. Hybrid energy systems (solar + wind) can be utilized, and energy management systems can be established. High-efficiency LED lighting should be used, along with energy-efficient heating, cooling, and ventilation systems. Designs can be made to maximize the use of daylight, and passive solar design techniques (such as solar shading and thermal storage) can be applied. Natural ventilation and lighting systems can be utilized, and energy-efficient devices and equipment should be selected. Additionally, the establishment of greywater recycling systems, rainwater harvesting and storage, and wastewater treatment and reuse systems is important. This way, water management and recycling strategies can be effectively implemented. The recommendations for water management and recycling are also applicable to the Timber Frame and Paper Log House structures. Low-water consumption fixtures and devices can be used, and rainwater irrigation systems can be developed. Modular systems can be designed for water reuse, and rainwater storage ponds can be created. Sedimentation and filtration systems can be utilized for water recovery. In all structures, the use of local materials that do not adversely affect human health has been observed, along with designs that consider ecological balance and support biodiversity. The examined examples show the use of natural materials such as local wood, earth, bamboo, and reeds, benefiting from traditional construction techniques and local craftsmanship. Evaluating materials obtained from local vegetation, using local waste materials (such as agricultural and industrial waste), selecting non-harmful materials, and considering the recyclability and reusability of materials will minimize the environmental impacts of temporary shelter solutions after disasters.

From the perspective of social sustainability, it is important to address the social and psychological needs of disaster survivors living in the units, support community formation and social interaction, ensure accessibility for disabled and disadvantaged groups, and allow for the preservation of local cultural elements (Table 5).

Table 5: Evaluation of social sustainability criteria in buildings and recommendations

CRITERIA UNITS	Social				RECOMMENDATIONS
	1	2	3	4	
Rapido					To ensure social sustainability. Psychological counseling and therapy rooms can be designed, Playgrounds and educational spaces can be created for children, Social and vocational skills development spaces for young people can be provided, Recreation and socialization areas for the elderly can be organized, Rehabilitation and physical therapy centers can be established, Activity areas that support the social and emotional well-being of disaster victims can be created, Designs can be made to meet privacy and security needs, Shared spaces such as communal kitchens, laundry and recreation areas can be designed, Areas can be allocated for outdoor activities, concerts, festivals, Communal spaces can be created to strengthen neighborhood relations, Accessible designs can be made for wheelchair, visually and hearing impaired people, Accessibility elements such as ramps, elevators, disabled toilets, handrails can be integrated, Can apply universal design principles in guidance and information systems, Furniture and equipment can be selected according to the needs of disabled and elderly users, Inclusive and accessible spaces can be created by adopting universal design principles, Traditional designs can be made using local architectural textures, materials, and techniques, Symbols, motifs, and decorations reflecting the cultural identity of the disaster victims can be added, Incentives and support can be provided for the preservation of cultural and traditional elements, Communal areas reflecting the cultural identities of disaster victims can be designed.
Timber Frame					
Paper Log House					
Container T. Shelter					
Transitional Shelter					
Cebu					
One Room Shelter					
Containers					
Timber Frame II					
Paper Log House II					
Excellent Good Moderate Bad Very-bad					

In Table 5, an analysis of the selected examples based on social criteria has been conducted, and recommendations have been provided. It has been observed that the objectives of the sub-strategies are not being met in the examined examples. In these structures, including temporary shelter units, if social sustainability criteria are not met, the temporary shelter solutions following a disaster will be unable to address the social and cultural needs of the survivors, community formation and solidarity will remain weak, and accessibility for disabled and disadvantaged groups will not be ensured. This situation will negatively impact the recovery and reintegration processes of the survivors, complicating social cohesion and integration. Furthermore, the preservation and transmission of cultural heritage will also become more challenging.

From the perspective of economic sustainability, it is important to achieve more cost-effective, locally supportive, and long-term resilient units in temporary shelter solutions following a disaster (Table 6).

Table 6: Evaluation of economic sustainability criteria in buildings and recommendations

CRITERIA UNITS	Economic				RECOMMENDATIONS
	1	2	3	4	
Rapido					To ensure economic sustainability. Materials that do not require maintenance and repair can be selected, Techniques that save labor and time in the maintenance process can be applied, Self-repairing materials and systems that do not require maintenance and repair can be used, Material and energy-saving technologies can be used during construction and operation, Local labor force in the disaster area can be integrated into the construction processes, Local material producers, suppliers and artisans can be supported, Local employment can be ensured in the maintenance and operation of temporary shelter units, Local commercial and economic activities can be established in temporary shelter areas, Policies and incentives can be created to ensure the sustainability of local economic activities, Durable, long-lasting and maintenance-free materials may be preferred, Design solutions that increase the flexibility and adaptability of buildings can be created, Designs that allow for the reuse, transformation or recycling of structures can be created, Integration of technologies and systems that reduce the need for maintenance and repair of buildings can be achieved, Design solutions that reduce the risks of collapse, damage and deformation of structures can be created, Preventive maintenance and repair programs can be implemented to extend the life of buildings.
Timber Frame					
Paper Log House					
Container T. Shelter					
Transitional Shelter					
Cebu					
One Room Shelter					
Containers					
Timber Frame II					
Paper Log House II					
Excellent Good Moderate Bad Very-bad					

In Table 6, the selected examples are analyzed economically in line with the criteria and recommendations are made. It is seen that the sub-strategies meet their objectives in the analyzed examples. If the economic sustainability criteria are met, post-disaster temporary shelter solutions will be more cost-effective, supportive of the local economy and durable in the long term. In this way, economic recovery and development processes in the disaster area will be accelerated, local employment and income opportunities will increase, efficient use of resources will be ensured and shelter needs of disaster victims will be met more economically.

5. Conclusion

Disasters not only result in loss of life but also cause many people to become homeless, highlighting the urgent need for shelter for disaster victims. Therefore, ensuring that disaster victims have access to temporary shelter units as quickly as possible is of critical importance. However, the design of temporary shelter structures should not only focus on meeting immediate needs but also adhere to sustainability principles. In this regard, the use of environmentally friendly materials, energy and water management, waste management, flexibility, and reuse should be considered. Designing temporary shelter units in accordance with sustainability criteria will not only meet the basic needs of disaster victims but also support long-term recovery and reintegration into society. In this context, analyzing the practical outcomes of temporary shelter units used after disasters will provide guidance for future designs and academic studies. This analysis offers recommendations for understanding the sustainability performance of temporary shelter solutions, transferring the findings to future research, and developing evaluation tools. In this way, more sustainable, inclusive, and cost-effective temporary shelter solutions can be designed and implemented. From an environmental perspective, positive outcomes such as improved energy efficiency, enhanced water and waste management practices, increased use of renewable energy, and widespread recycling activities have been achieved in temporary shelter units. As a result, the environmental impacts of post-disaster recovery and reconstruction processes have been minimized, long-term sustainability has been ensured, and natural resources have been preserved. However, neglecting environmental criteria may lead to environmental degradation, social inequalities, and economic constraints.

From a social perspective, temporary shelter units contribute significantly by addressing the psychosocial needs of disaster victims, fostering community formation, ensuring accessibility for disabled and disadvantaged groups, and preserving local cultural and traditional elements. These factors strengthen social cohesion and solidarity, facilitating the recovery and reintegration processes of disaster victims. However, in the analyzed examples, these criteria were overlooked, which may hinder social integration and cohesion in the future, making it more challenging to preserve cultural heritage. From an economic perspective, temporary shelter units provide significant benefits by reducing construction, operation, and maintenance costs, boosting local economies and employment opportunities, and promoting the development of long-lasting and durable building systems. As a result, post-disaster economic recovery and development will be accelerated. Otherwise, construction, operation, and maintenance costs will rise, local economies and employment opportunities will be limited, durable building systems will not be established, and post-disaster economic recovery and development will slow down. Additionally, resources will be wasted, and the sheltering needs of disaster victims will be met at a higher cost. In conclusion, the implementation of environmental, social, and economic sustainability criteria in temporary shelter units will ensure that post-disaster recovery and reconstruction processes are more sustainable, inclusive, and cost-effective. Otherwise, issues such as environmental damage, social inequalities, and economic constraints may arise. This study provides insights that will guide future design and academic research, offering clues for developing criteria and approaches to evaluate the sustainability performance of temporary shelter units. Consequently, more sustainable solutions can be developed for post-disaster recovery and reconstruction processes. Ultimately, the presence of sustainability features in temporary shelter units is crucial for both supporting the well-being of disaster victims and reducing environmental impacts. To ensure that temporary shelter solutions are durable, environmentally friendly, and responsive to the needs of disaster victims, key criteria such as eco-friendly materials, energy efficiency, water management, waste management, flexibility, and reuse should be considered. Taking these factors into account will enable the development of more resilient and sustainable temporary shelter solutions in post-disaster processes.

References

- Abulnour, A. H. (2014). The post-disaster temporary dwelling: Fundamentals of provision, design and construction. *HBRC Journal*, 10(1), 10–24.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2015). *Geçici barınma merkezlerinin kurulması, yönetimi ve işletilmesi hakkında yönerge*. 10 Aralık 2024'te <https://www.aile.gov.tr/> adresinden alındı.
- Alemi, F., Ouyang, G., Nozick, L., & Xu, N. (2015). Comprehensive framework for selection of temporary housing site locations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 250–266.
- Arquitectura Viva. (2024, June 20). *Viviendas temporales container*. Retrieved June 20, 2024, from <https://arquitecturaviva.com/works/viviendas-temporales-container->
- Arslan, H. (2007). Re-design, re-use and recycle of temporary houses. *Building and Environment*, 42(1), 400–406.
- Arslan, H., & Coşgun, N. (2008). Reuse and recycle potentials of the temporary houses: Example of Düzce, Türkiye. *Building and Environment*, 43(5), 702–709.
- Asahi, S. (1995). 1995: *Earthquake devastates Kobe*. BBC Home. http://news.bbc.co.uk/onthisday/hi/dates/stories/january/17/newsid_3375000/3375733.stm
- Aysan, Y., & Davis, I. (1993). *Rehabilitation and reconstruction: trainer's guide*. Disaster Management Training Programme.
- Baluken, C. (2023, 20 Nisan). *Deprem sonrası barınma çözümleri için literatür ne diyor?* Türkiye Ekonomi Politikaları Araştırma Vakfı. <https://tepav.org.tr/tr/haberler/s/10561>
- Barakat, S. (2003). *Housing reconstruction after conflict and disaster*. Overseas Development Institute.
- Barenstein, J. D. (2006). *Housing reconstruction in post-earthquake Gujarat: A comparative analysis*. Humanitarian Practice Network.
- Berg, R. (2009). *Tropical Cyclone Report: Hurricane Dolly*. National Hurricane Center.
- Chandler, P. J. (2007). *Environmental factors influencing the siting of temporary housing in Orleans Parish* [Master's thesis, Louisiana State University]. LSU Scholarly Repository. https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/3888
- Creswell, J. W. (2007). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. SAGE Publications.
- Corsellis, T. (2012). *Transitional shelter guidelines*. Ginebra: Shelter Center.
- Cuny, F. C. (1994). *Disasters and development*. Intertect Press.
- Dalgish, G. (2013). Disaster, resilience and cultural heritage. *Archeology International*, 16, 75–85.
- Daneshpour, A., & Mahmoudinejad, H. (2015). Factors affecting the form of temporary housing after disasters in developing countries. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 201, 267–276.
- Davey, L. (1991). The application of case study evaluations. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 2(9), 1-2. <https://doi.org/10.7275/02g8-bb93>
- Dayanır, H., Çınar, A. K., & Akgün, Y. (2022). Post-disaster temporary shelter area selection and planning by using Delphi method: İzmir/Seferihisar case. *Journal of Natural Hazards and Environment*, 8(1), 87–102. <https://doi.org/10.21324/dacd.936585>
- Dikmen, N. (2019). Temporary housing assessment in the context of vulnerability and sustainability after the 2011 Van earthquake. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 10(2/3), 134–149.
- Duksi, A., & Küçükali, U. F. (2016). Sustainable temporary architecture. *A+Arch Design International Journal of Architecture and Design*, 2(2), 1-12.
- Emergency Event Database. (2024). *Monitoring hazards & disasters worldwide since 1988*. Retrieved December 15, 2024, from <https://public.emdat.be/data>.
- El-Anwar, O., El-Rayes, K., & Elnashai, A. (2009). Disasters, optimizing large-scale temporary housing arrangements after natural. *Computing in Civil Engineering*, 23(2), 110–118.

- Gharaati, M. (2006). *An overview of the reconstruction program after the earthquake of Bam, Iran*. Retrieved December 15, 2024, from http://www.grif.umontreal.ca/pages/gharaati_mehran.pdf
- Faragallah, N. R. (2021). Fundamentals of temporary dwelling solutions: A proposed sustainable model for design and construction. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 3305–3316.
- Félix, D., Branco, J. M., & Feio, A. (2013). Temporary housing after disasters: A state of the art survey. *Habitat International*, 40, 136–141.
- Félix, D., Monteiro, D., Branco, J. M., Bologna, R., & Feio, A. (2015). The role of temporary accommodation buildings for post-disaster housing reconstruction. *Journal of Housing and the Built Environment*, 30(4), 683–699.
- Hadafi, F., & Fallahi, A. (2010a). Temporary housing respond to disasters in developing countries – Case study: Iran Ardabil and Lorestan Province earthquakes. *International Journal of Humanities and Social Sciences*, 4(6), 1326–1332.
- Hadafi, F., & Fallahi, A. (2010b). Temporary housing respond to disasters in developing countries – Case study: Iran Ardabil and Lorestan Province earthquakes. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 66, 1536–1541.
- Halliday, S. (2008). *Sustainable construction*. Butterworth-Heinemann.
- Hayles, C. S. (2010). An examination of decision making in post-disaster housing reconstruction. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1(3), 290–302.
- Hosseini, S. M. A., Pons, O., & De La Fuente, A. (2019) A sustainability-based model for dealing with the uncertainties of post-disaster temporary housing. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(5), 330–348.
- Hoşkara, E. (2007). *Strategic method model for sustainable construction suitable for national conditions* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2011). *Transitional shelters - Eight designs*. IFRC. <https://s3.eu-north-1.amazonaws.com/cdn.sheltercluster.org/public/docs/Transitional%20Shelters%20-%20Eight%20Designs.pdf>
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2013). *Post-disaster shelter: Ten designs*. IFRC. <https://www.shelterprojects.org/tshelter-8designs/10designs2013/2013-10-28-Post-disaster-shelter-ten-designs-IFRC-lores.pdf>
- Javanforouzande, A., Asgari Namin, E., Asefi, M., & Shakeri, K. (2020). Explaining the conceptual model of the post-disaster sustainable temporary housing system (Case study: Sar-e-Pol Zahab). *Journal of Sustainable Rural Development*, 4(2), 185–200.
- Johnson, C. (2002, May 14–17). *What's the big deal about temporary housing? Planning considerations for temporary accommodation after disasters: Example of the 1999 Turkish earthquakes* [Conference presentation]. 2002 TIEMS Disaster Management Conference, Waterloo Canada.
- Johnson, C. (2007a). Impacts of prefabricated temporary housing after disasters: 1999 earthquakes in Turkey. *Habitat international*, 31(1), 36–52.
- Johnson, C. (2007b) Strategic planning for post-disaster temporary housing. *Disasters*, 31(4), 435–458.
- Khalili, R., & Amindeldar, S. (2014). Sustainable post-disaster temporary housing: Lessons from Iran. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 5(1), 93–108.
- Kuzucuoğlu, H., & Başbuğ Erkan, B. (2020). The role of civil initiatives in reducing disaster risks: Sample of TRI DRR. *Journal of Disaster and Risk*, 3(2), 101–124.
- Lizarralde, G., & Davidson, C. (2006). Learning from the poor. In D. Alexander (Ed.), *Post-disaster reconstruction: Meeting stakeholders' interest*. Università degli Studdi.
- Oliver, P. (2003). *Dwellings: The vernacular house worldwide*. Phaidon Press.
- Özcan, U., Güler, B., & Korkmaz, B. (2021). Shigeru Ban ve “geçici barınak” kavramı. *International Journal of Social and Humanities Sciences (IJSHS)*, 5(2), 65–90.
- Patel, S. B., & Hastak, M. (2013). A framework to construct post-disaster temporary housing. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 4(1), 43–58.
- Pourdeihimi, S. (2011). Sustainable post-disaster temporary housing: Lessons from Iran. *Procedia Engineering*, 21, 595–602.
- Rethinking the Future. (2024, June 20). *Paper Log Houses by Shigeru Ban: Recyclable materials and architecture*. Retrieved June 20, 2024, from <https://www.re-thinkingthefuture.com/case-studies/a4922-paper-log-houses-by-shigeru-ban-recyclable-materials-and-architecture/>
- Quarantelli, E. L. (1995). Patterns of sheltering and housing in US disasters. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 4(3), 43–53.
- Sanderson, D., Sharma, A., Kennedy, J., & Burnell, J. (2014). Lost in transition: principles, practice and lessons from Haiti for urban post-disaster shelter recovery programs. *Asian Journal of Environment and Disaster Management*, 6 (2), 131–151.
- Shelter Projects. (2010). *Indonesia - Sumatra - 2009 – Overview*. Retrieved December 14, 2024, from <https://shelterprojects.org/shelterprojects2010/A-12-A15-Indonesia-Pedang.pdf>
- Sev, A. (2009). *Sustainable architecture*. Yem Yayınları.
- Shigeru Ban Architects. (2023). *Paper Log House*. Shigeru Ban Architects. <https://shigerubanarchitects.com/works/paper-tubes/paper-log-house-kobe/>
- Shigeruban Architects. (2024, June 20). *Paper Log House – India*. Retrieved June 20, 2024, from <https://shigerubanarchitects.com/works/paper-tubes/paper-log-house-india>
- Sphere. (2018). *The Sphere Handbook: Humanitarian charter and minimum standards in humanitarian response*. <https://spherestandards.org/wp-content/uploads/Sphere-Handbook-2018-Turkish.pdf>
- Tarakçı, B. İ. (2024, December 10). *Personal archive*.
- Tarakçı, B. İ., Ertaş Beşir, Ş., & Seyfettinoğlu, M. (2024, September 27–29). *The effectiveness of disaster management and temporary shelter units: Examples from around the world and Turkey* [Congress presentation]. IX. International Social Sciences Congress, Ankara, Türkiye.
- Turner, J. F. (1972). Housing as a verb. In J. F. C. Turner & R. Fichter (Eds.), *Freedom to build: Dweller control of the housing process* (pp. 148–175). Macmillan.
- Twigg, J. (2015). *Disaster risk reduction*. Overseas Development Institute.

- Usta, G. (2023). Statistical analysis of disasters in the world (1900–2022). *Gümüşhane University Journal of Social Sciences*, 14(1), 172–186.
- Wei, L., Li, W., Li, K., Liu, H., & Chenguse, A. L. (2012). Decision support for urban shelter locations based on covering model. *Procedia Engineering*, 43, 59–64.
- Yılmaz, S. (2021). *Evaluation of the environmental, economic and social sustainability of temporary shelter after disaster* [Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Yin, R. (1984). *Case study research: Design and methods*. Sage Publications.

İdari Kayıp Yönetiminde Karar Verme Süreçlerinin ve Etki Düzeylerinin Analitik Hiyerarşi Süreç (AHP) ve Bulanık AHP ile Değerlendirilmesi

Furkan Acar¹, Cansu Bozkurt^{2,*}, Mahmut Fırat³

¹İnönü Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Malatya.

²Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimleri Meslek Yüksek Okulu, Ardahan.

³İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya.

Özet

Son yıllarda etkisi daha fazla hissedilen küresel iklim krizi su kaynakları üzerinde daha da fazla stres oluşturmaktadır. Kentsel su temin ve dağıtım sistemlerinde mevcut su kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Su hırsızlığı, faturalama hataları ve eksik veri kaydı gibi sebeplerden kaynaklanan idari su kayıpları, su ve enerji kaybının yanı sıra, gelir kaybı da oluşturmaktadır. Aynı zamanda su kayıpları su üretimi ile de ilişkili olduğu için su alma, arıtma, tedarik işlemleri ve gerekli altyapının kurulması aşamalarında çevresel etkilere de neden olmaktadır. Bu kayıpların yönetilebilmesi için etkili faktörler, azaltılmasına yönelik stratejiler, kayıp yönetiminde kullanılan mevcut bilgi ve uygulamalar kapsamlı bir biçimde incelenmelidir. Bu çalışmada idari kayıp yönetiminde karar verme süreçlerinin ve etki düzeylerinin analitik hiyerarşi süreç (AHP) ve BAHP yöntemleri ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için veri ölçüm ve yönetimi, sayaç yönetimi, faturalandırılmamış yasal kullanımlar ve kaçak kullanım başlıkları altında toplam 22 yönetim bileşeni belirlenmiştir. AHP ve BAHP yöntemleri ile elde edilen idari kayıp yönetimi bileşenlerinin ağırlık katsayıları incelendiğinde AHP’de 0.5048 ve BAHP’de 0.3489 katsayıları ile veri ölçüm ve yönetim ana başlığının ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Alt bileşen ağırlıkları incelendiğinde ise AHP ve BAHP yöntemleri ile elde edilen ağırlık katsayılarına göre oluşturulan sıralamada ilk 11 bileşenden 9 tanesinin aynı olduğu, AHP yönteminde net yargıların dikkate alınması BAHP’de ise bulanık küme teorisinin kullanılması gibi yöntemlerin hesaplama tekniklerinden kaynaklı olarak diğer sıralamalarda iki yöntem arasında farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Karar probleminde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri kullanılarak ağırlık katsayıları, kullanılan yöntemin hesaplama tekniği, karar bileşenlerinin birbiri ile etkileşim durumu, problemin içerdiği belirsizlikler ve kararlılıklara bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle çalışmada karar probleminin yapısına uygun tekniğin seçilmesiyle idari kayıp yönetimi bileşenlerinin önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın su idarelerinin strateji belirleme, planlanma ve bütçeleme gibi çalışmalarda karşılaştıkları zorluklara fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler

Su Yönetimi, Su Kayıpları, İdari Kayıplar, ÇKKV, Bulanık AHP

Evaluation of Decision-Making Processes and Impact Levels in Apparent Loss Management Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy AHP

Abstract

The global climate crisis, which has become more evident in recent years, is creating even more stress on water resources. Sustainable and efficient use of existing water resources in urban water supply and distribution systems is becoming necessary. Apparent losses including the water theft, illegal usages, losses due to the inaccuracies in water meters, billing errors and incomplete data recording cause loss of income as well as water and energy loss. Water losses also cause environmental impacts during water production, treatment, supply processes and the establishment of necessary infrastructure. In order to manage these losses, effective factors, strategies for reduction, and current knowledge and practices used in loss management should be examined comprehensively. This study aims to evaluate the decision-making processes and impact levels in administrative loss management using analytical hierarchy process (AHP) and fuzzy AHP (FAHP) methods. A total of 22 management components have been determined under the headings of data measurement and management, meter management, unbilled authorized uses and illegal use. The main heading of data measurement and management has the highest weight (0.5048 with the AHP method and 0.3489 with the BAHP method). When the sub-component weights are examined, 9 of the first 11 components in the ranking created according to the weight coefficients obtained with the AHP and FAHP methods are the same. In the decision problem, when using Multi Criteria Decision Making (MCDM) techniques, the weight coefficients can change depending on the calculation technique of the method used, the interaction of the decision components with each other, the uncertainties and determinations contained in the problem. Therefore, the aim of the study is to prioritize apparent loss management components by selecting the appropriate technique for the structure of the decision problem. It is thought that this study will benefit the utilities in the difficulties they face in strategy determination, planning and budgeting.

Keywords

Water Management, Water Losses, Apparent Losses, MCDM, Fuzzy AHP

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (478) 2117575 Faks: +90 (478) 2117575

E-posta: 44furkanacar44@gmail.com (Acar F.), cansubozkurt@ardahan.edu.tr (Bozkurt C.)
mahmut.firat@inonu.edu.tr (Fırat M.)

Gönderim Tarihi / Received : 26/11/2024

Kabul Tarihi / Accepted : 04/03/2025

1. Giriş

İnsanlığın yaşam kaynağı olan su aşırı tüketim, hızlı kalkınma, kirlilik, küresel ısınma nedenleriyle hızla tükenmektedir. Birleşmiş Milletler Dünya Su Kalkınma Raporuna göre küresel olarak su kullanımı yılda yaklaşık %1 oranında artmaktadır. Nüfus artışı, sosyo ekonomik gelişmeler ve değişen tüketim profilleri incelendiğinde bu artışın 2050 yılına kadar sürmesi beklenmektedir (Connor & Miletto, 2023; Öztürk vd., 2024). Artan taleple birlikte suyun kötü yönetilmesi, kayıpların tespit edilememesi, uygun stratejilerin belirlenememesi gibi sebeplerle su kaynakları azalmaktadır. Su temin ve dağıtım sistemlerinde meydana gelen kayıplar, fiziki ve idari kayıplar olmak üzere iki başlıkta incelenir (Farley vd., 2008; Koşucu vd., 2021). Dağıtım sistemlerinde meydana gelen sızıntılardan oluşan fiziki su kayıplarının bileşenleri: belirsiz sızıntılar (arka plan sızıntıları), rapor edilen ve rapor edilemeyen sızıntılardır (Hamilton vd., 2006; Kızılöz, 2021). İdari kayıplar yasa dışı bağlantılar, yanlış ölçüm ve eksik okumalardan kaynaklanır (Rimeika & Albrektienė, 2014). Fiziki kayıplar daha büyük kayıp hacmi oluştururken, idari kayıpların finansal etkisinin daha yüksek olduğu bilinmektedir (Akdeniz & Muhammetoğlu 2023; Kızılöz & Şişman, 2021). İdari kayıplar hizmet sunulduğu halde ücreti alınamayan suyu ifade etmekte ve fatura bedeli üzerinden kayıp oluşturmaktadır (Arregui vd., 2018). Genel olarak idari kayıpların, abone sayaç hataları, izinsiz tüketim (su hırsızlığı, yasa dışı bağlantılar, yangın musluklarının yanlış kullanımı, yanlış sayaç tipi kullanımı ve sayaçlara dışarıdan müdahale vb.), sayaç okuma hataları ve faturalandırma hataları ana bileşenlerinden kaynaklandığı kabul edilmektedir; (Farley vd., 2008; Liemberger vd., 2007; Rizzo & Cilia, 2005). İdari kayıplar idarelerin gelir kaybının yanı sıra eksik ve hatalı ölçümler nedeniyle temel verilerin yanlış hesaplanmasına yol açmakta bu durum da su yönetimi çalışmalarını iyice zorlaştırmaktadır (Mutikanga vd., 2011). İdari kayıplar toplam kayıpların %30-40'ını oluşturmaktadır (Lambert, 2002). Bu kayıplar ekonomi, çevre ve enerji sürdürülebilirliğini etkilediği için su idareleri açısından endişe oluşturmaktadır. Suyun sürdürülebilir kullanımı için mevcut su kaynaklarının iyi bir şekilde yönetilmesi ve korunması büyük önem taşımaktadır. Bu noktada su idaresi yöneticilerine büyük görevler düşmektedir. Su temin ve dağıtım hizmetleri ekonomik, çevresel, teknik, sosyal, sağlık ve politik boyutlar taşıması nedeniyle karmaşıktır. Su idarelerinin su temin ve dağıtımındaki hizmetlerinin yetersiz olmasının çevre ve yaşam kalitesi üzerinde etkileri bulunmaktadır (European Union, 2023). Literatürden de görüleceği üzere su kayıpları su temin ve dağıtım sistemlerinde kaynakların verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu kayıpların en aza indirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için kayıp yönetim bileşenlerinin tanımlanması, bu bileşenlerin kayıplar üzerindeki etki düzeylerinin ortaya konulması ve buna göre önleme stratejilerinin belirlenmesi gerekir.

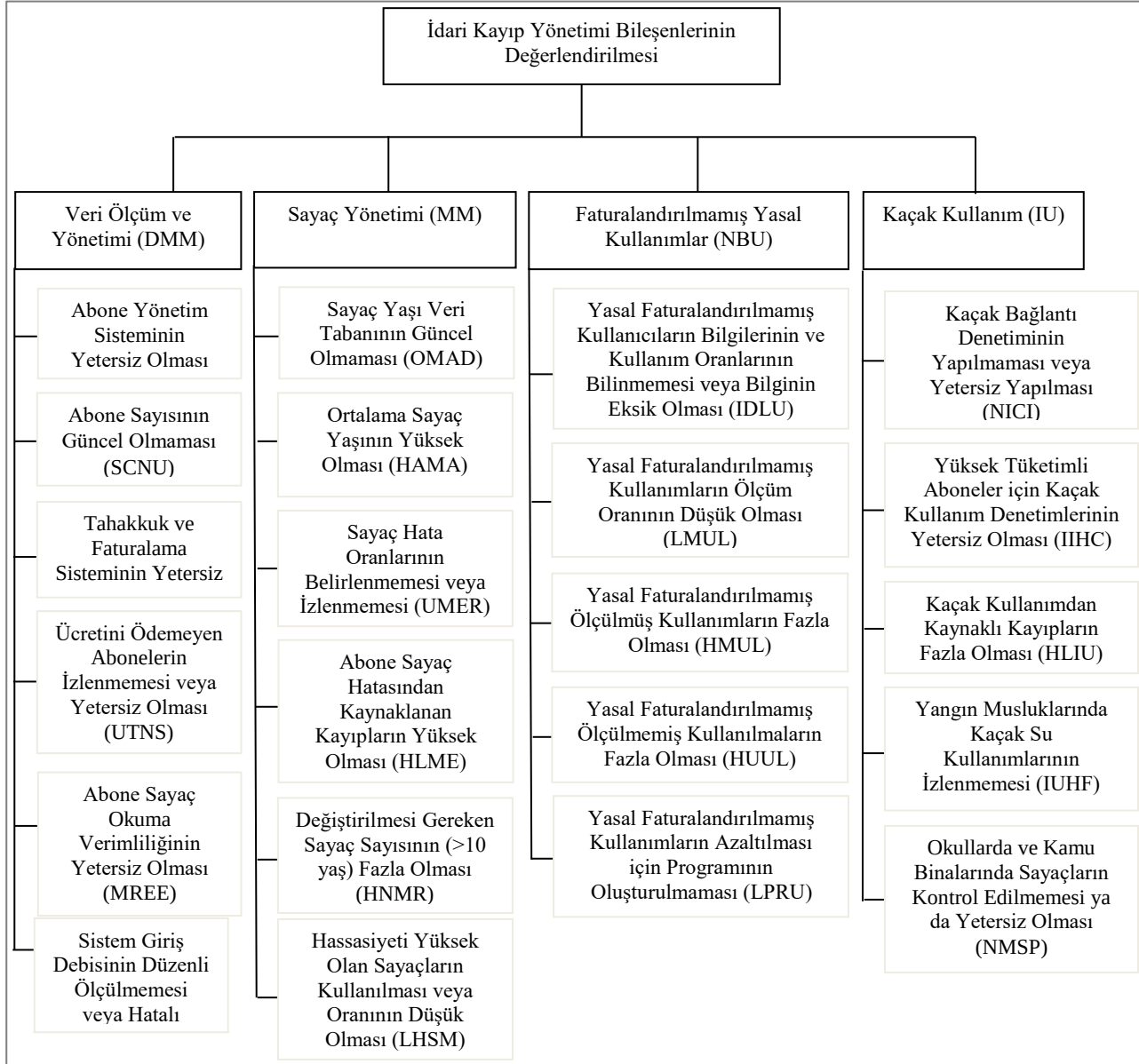
Su iletim ve dağıtım sistemlerinin daha etkin yönetimi ve stratejilerin önceliklendirilmesine yönelik çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanabilmektedir. (Kadenge vd., 2019) tarafından ortaya konmuş olan çalışmada su idarelerinin su dağıtım sistemlerinde uygulanan su kayıp yönetimi stratejilerini optimize ederek en iyi karar seçeneğini seçmesine yardımcı olmak amacıyla ÇKKV teknikleri uygulanmıştır. Su kaynak yönetiminin karmaşık yapısı ve içerdiği belirsizlikler karar vermeyi zorlaştırmaktadır. (Golfam vd., 2019) çalışmada iklim değişikliğinde en iyi senaryoyu belirleyebilmek amacıyla ÇKKV tekniklerinden AHP'yi uygulamıştır. (Ebad Ardestani vd., 2020) tarafından yürütülen çalışmada drenaj havzasındaki su kaynaklarının yönetimi ve planlamasında etkili 21 bileşen teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel ana başlıklar altında sınıflandırılmış ve ÇKKV teknikleri ile değerlendirilmiştir. (Tabesh vd., 2020) Diğer bir çalışmada gelir getirmeyen su bileşenlerinden fiziksel ve idari kayıpların azaltılması için uygulanan politikaların etkinliğini araştırmıştır. Bu amaçla çalışmada ÇKKV tekniklerinden ideal çözüme benzerliğe göre tercih sıralaması tekniği uygulanmış olup aynı çalışmada su dağıtım şebekelerinde su kayıplarını azaltabilmek için bir karar destek çerçevesi geliştirilmiş, kayıp bileşenlerini değerlendirmek için de ÇKKV tekniklerinden BAHF yöntemi kullanılmıştır (Zyoud & Fuchs-Hanusch, 2020). Su temin sistemlerindeki yüksek kayıplar, kesintili tedarik, yüksek su ve enerji tüketiminin beraberinde getirdiği yetersiz hizmetler Su İdareleri için önemli bir endişe haline gelmiştir. Birçok alanda etkisi olan bu karmaşık problemin çözümünde ise ÇKKV teknikleri etkilidir.

Bu çalışmada idari kayıp yönetimine etki eden bileşenlerin analitik hiyerarşi süreç (AHP) ve bulanık AHP yöntemleri ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için veri ölçüm ve yönetimi, sayaç yönetimi, faturalandırılmamış yasal kullanımlar ile kaçak kullanım başlıkları altında toplam 22 yönetim bileşeni belirlenmiştir. Çalışma kapsamında su kayıplarını en etkili biçimde yönetmek için su kayıp bileşenlerini önceliklendirme çerçevesi AHP ve kararlardaki belirsizlikleri karşılaştırmak için BAHF yöntemleri ile test edilmiştir. BAHF ve AHP yöntem çıktıları arasında karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. Makalenin geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır. 2. Bölümde idari su kaybı bileşenleri tanımlanmış, 3. Bölüm çalışmada uygulanacak AHP, BAHF ve Bulanık sayıların sıralama tekniklerine ayrılmıştır. 4. Bölümde vaka çalışması açıklanmış, bölüm sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Son olarak 5. Bölümde sonuçlar özetlenmiştir.

2. İdari Kayıp Bileşenleri

Çalışmada su temin ve dağıtım sistemlerinde doğrudan idari su kayıplarına neden olan veri ölçüm ve yönetimi, sayaç yönetimi, faturalandırılmamış yasal kullanımlar ve kaçak kullanımlar olmak üzere 4 ana başlık belirlenmiş ve idari kayıp yönetiminde öncelikli iyileştirilmesi gereken 22 bileşen ise bu ana başlıklar altında sınıflandırılmıştır. *Veri ölçüm ve yönetimi* ana başlığı verilerin işlenmesi ve faturalandırma aşamalarında yapılan hatalar, okumaların düzenli yapılmaması, tahmin ile değerlendirme yapılmasından kaynaklanan kayıplar ve bu kayıpların tespit edilerek yönetilmesinde gerekli

olan bileşenlerden oluşmaktadır. *Sayaç yönetimi*, abone sayaç verilerinin yetersiz olması, sayaçların doğru ölçüm yapmaması veya hassas olmaması, doğru sayaç tipinin kullanılmaması, sayaçların eski olması, hata oranlarının ölçülmemesi nedenleriyle doğru ölçülemeyen kayıpların önlenmesi ana başlığıdır. *Faturalandırılmamış yasal kullanımlar* ise halka açık alanlardaki tüketimler, iletim ve dağıtım sistemlerinde bakım ve onarım için tahliye edilen sular gibi izinli ancak gelir getirmeyen kullanımları oluşturmaktadır. Kullanıcı bilgilerinin eksik olması, ölçüm oranlarının düşük olması, kullanımın fazla olması, azaltılması ve kontrol altına alınması için program oluşturulmaması bileşenlerinden oluşmaktadır. *Kaçak kullanımlar* ana başlığı yasa dışı bağlantılar, sayacın by-pass edilmesi, yangın hidrantlarından izinsiz su kullanımı nedenleriyle oluşan kayıpların belirlenmesi ve önenebilmesi amacıyla uygulanacak kontrol ve denetimleri kapsamaktadır (Bozkurt, 2022; Kılıç, 2023; Fırat vd., 2021; Fırat vd., 2023; Muhammetoğlu & Muhammetoğlu, 2017). Şekil 1’de ana başlık ve alt bileşenler detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 1: İdari kayıp bileşenleri

3. Yöntem

3.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

Karmaşık karar verme problemleriyle başa çıkmada yaygın olarak kullanılan AHP yöntemi Thomas Saaty tarafından 1970 yılında geliştirilmiştir (Saaty, 2002). Bu yöntem, karar vericiler için birden fazla kriter ve alt kriterin bulunduğu durumlarda en iyi alternatifin seçilmesinde kolaylık tanımaktadır.

Ayrıca alınan kararların tutarlılığı analiz edilerek karara karşı önyargıyı azaltmaktadır (Yang & Chen, 2004). AHP yaklaşımı üç önemli adıma dayanmaktadır (Zyoud vd., 2016). AHP’de ilk adım, karar probleminin belirlenmesi ve hiyerarşik yapının oluşturulmasıdır. Bu yapı birinci düzeyde amaç, ikinci düzeyde kriterler, üçüncü düzeyde ise alt kriterler veya alternatiflerden oluşmaktadır. Bir sonraki adım, karar yapısında bulunan bir kriterin diğer kriterlere göre önemini belirlemektir. Karşılaştırmalı yargılar, bir kriterin sabit tutularak diğer tüm kriterlerle kıyaslama yapılması ile belirlenmektedir. Karşılaştırmada önem düzeyi Saaty tarafından önerilen ölçek kullanılarak yapılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1: AHP ve Bulanık AHP ölçekleri (Saaty, 1990; Chang, 1992; Chang, 1996)

AHP			Bulanık AHP	
Saaty Ölçeği	Karşılık Ölçek	Tanım	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
1	1	Eşit Önem	(1,1,1)	(1,1,1)
3	1/3	Orta Derece Önem	(1,3,5)	(1/5,1/3,1/1)
5	1/5	Kuvvetli Düzey Önem	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
7	1/7	Çok Kuvvetli Düzey Önem	(5,7,9)	(1/9,1/7,1/5)
9	1/9	Kesin Önem	(7,9,9)	(1/9,1/9,1/7)

Son adımda ise tutarlılık oranının belirlenmesi için ilk olarak öncelik vektörü hesaplanır, bileşenlerin ağırlıkları belirlenir ve kararların tutarlılığı değerlendirilir. Tutarlılık indisinin (CI) rassal indise (RI) bölünmesiyle tutarlılık oranı (CR) hesaplanır. CR değeri pozitif ve 1’den küçük ise karar kabul edilir değilse kararların yeniden incelenmesi talep edilir. Tablo 2’de karar yapısında bulunan kriter sayısına göre alınması gereken RI değerleri sunulmuştur.

Tablo 2: AHP yönteminde tutarlılık indeksi için RI değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59

AHP yönteminin işlem adımları Tablo 3’te özetlenmiştir. 1. Adımda köşegenleri 1 olan karar matrisi kurularak bileşenlerin ikili karşılaştırması yapılmakta, 2. Adımda verilen formül ile karar matrisi normalize edilmekte, 3. Adımda normalize karar matrisi satır ortalamaları alınarak bileşen ağırlıkları elde edilmekte, 4. ve 5. İşlem adımlarında ise başlangıçta uzman görüşleri alınarak değerlendirilen ikili karşılaştırmaların tutarlılık oranları analiz edilmektedir.

Tablo 3: AHP işlem adımları ve formüller

Adım 1: Hiyerarşik modelin ve karar matrisinin kurulması $A = [a_{ij}]$	Adım 2: Normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması $\bar{A} = [\bar{a}_{ij}]$	Adım 3: Normalleştirilmiş Eigen vektörünün değerlendirilmesi $W = [w_1, w_2, w_3]^T$	Adım 4: Öz değerin belirlenmesi λ_{max}	Adım 5: Tutarlılık oranı hesabı CR
$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & 1 & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & 1 \end{bmatrix}$	$\bar{A} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{a_{31}} & \frac{a_{12}}{a_{32}} & \frac{a_{13}}{a_{33}} \\ \frac{a_{21}}{a_{31}} & \frac{a_{22}}{a_{32}} & \frac{a_{23}}{a_{33}} \\ \frac{a_{31}}{a_{31}} & \frac{a_{32}}{a_{32}} & \frac{a_{33}}{a_{33}} \end{bmatrix}$ $\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^3 a_{kj}}$	$w_i = \frac{\sum_{k=1}^3 \bar{a}_{ik}}{3}$	$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^3 (\sum_{i=1}^3 \bar{a}_{ij}) w_j$	$CR = \frac{CI}{RI}$ $CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{n - 1}$ $CR = \frac{\lambda_{max} - m}{RI * (m - 1)}$

3.2. Bulanık AHP

Klasik AHP mantığı karar vericilerin kesin yargılarını dikkate almaktadır. Buna göre bir nesne bir kümeye ait veya değildir. Gerçek dünyada ise nesneler belirli bir sınırı olmayan uzaya aittir. Bilginin belirsiz olması, insan duyguları ve kararlarının kesin sayısal değerlerle ifade edilememesi nedeniyle çok kriterli karar verme problemlerinde değerlendirme yapmak zorlaşır ve kesin yargılar hata payını yükseltir. Kesin yargılar yerine ara yargıların da tercih edilebilmesine imkan sunan Bulanık AHP yönteminin ilk çalışması Yager tarafından 1978 yılında yapılmıştır (Yager, 1978). İkili karşılaştırmalarda üçgensel bulanık sayıların kullanıldığı bu yöntemde nesneler [0,1] aralığındaki üyelik değerlerine sahip olabilir (Krawczak & Szkatuła, 2020). Böylece karşılaştırma süreci daha esnek hale gelmektedir. Literatürde AHP’nin bulanıklaştırılmasında çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Chang (1996), bulanık AHP’nin ikili karşılaştırma ölçeği için üçgensel bulanık sayıların kullanımı ve ikili karşılaştırmaların sentetik mertebe değerleri için mertebe analizi yönteminin kullanılmasıyla yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur.

Bu yaklaşımda, bir bileşenin diğerine göre tercih üstünlüğü için üçgensel bulanık sayılar kullanılır ve daha sonra mertebeye analiz tekniği ile ikili karşılaştırmalar için sentetik mertebeye değerleri hesaplanır. Bu değerler ile ise normalleştirilmiş ağırlık katsayıları hesaplanmaktadır (Huang vd., 2008). Tablo 1’de ikili karşılaştırmalarda kullanılan puan ölçeği verilmiştir.

$X = x_1, x_2, \dots, x_n$ bir nesne kümesi ve $U = g_1, g_2, \dots, g_n$ hedef kümesi olsun. Chang’ın mertebeye analizi yöntemine göre her nesne alınır ve her hedef için mertebeye analizi sırasıyla gerçekleştirilir. $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$ ve $i=1,2,\dots,n$. Burada $M_{g_i}^j$ ($j=1,2,\dots,m$) parametreleri üçgensel bulanık sayılardır (l, m, u) şeklinde gösterilir.

$A_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ve $A_2 = (l_2, m_2, u_2)$ olmak üzere (Cheng & Mon, 1994):

Bulanık sayılarda toplama işlemi

$$A_1 \oplus A_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (1)$$

Bulanık sayılarda çarpma işlemi

$$A_1 \otimes A_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \quad (2)$$

$l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$

Bulanık sayılarda çıkarma işlemi

$$A_1 \ominus A_2 = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (3)$$

Bulanık sayılarda bölme işlemi

$$A_1 \odot A_2 = (l_1, m_1, u_1) \odot (l_2, m_2, u_2) = (l_1/u_2, m_1/m_2, u_1/l_2) \quad (4)$$

$l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$

Bulanık sayıların tersini alma işlemi

$$A_1^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = (\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}) \quad (5)$$

$l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$

Chang’ın mertebeye analizi yöntemi işlem adımları Tablo 4’te verilmiştir. 1. Adımda ikili karşılaştırma matrisindeki bulanık sayılar sentezlenerek tek bir (l, m, u) sütunu elde edilmektedir. 2. Adımda verilen koşullar incelenerek olasılık dereceleri tanımlanmakta, 3. Adımda dış bükey (konveks) küme matrisinde her satırın minimum değerleri alınmakta 4. Adımda bu değerler normalize edilerek ağırlık katsayıları hesaplanmaktadır.

Tablo 4. BAHF İşlem adımları (Tornyeviadzi vd., 2021)

Adım 1: İ’inci nesneye göre bulanık sentetik mertebeye değerinin tanımlanması S_i	Adım 2: $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ Olasılık derecelerinin tanımlanması $V = (M_2 \geq M_1)$	Adım 3: Bir dış bükey bulanık sayının k’dan büyük olma olasılığının belirlenmesi W'	Adım 4: Normalleştirilmiş ağırlık vektörlerinin elde edilmesi W
S_i $= \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$ $\otimes [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1}$	$V((M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2)$ $= \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_2 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{diğer} \end{cases}$	$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$ kabulü yapıldığında $k = 1, 2, 3, \dots, n; k \neq i$ için: $W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$	$W = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$ $i=(1,2,3,\dots,n)$

S_i 'nin elde edilmesi için öncelikle $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j)$ işlemi gerçekleştirilir daha sonra $[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1}$ değerinin hesaplanabilmesi için $M_{g_i}^j$ ($j=1,2,\dots,m$) değerleri bulanık toplanır ve eşitliğin tersi alınarak bulanık sentetik mertbe değeri elde edilir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{j=1}^m 1_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (6)$$

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (7)$$

3.3. Bulanık Sayıların Sıralanması

BAHP yöntemi çalışma prensibi olarak sistemi en çok etkileyen bileşenin tespit edilebilmesi için etkili bileşenin ağırlığını artırırken etkisi az olan bileşenin etkisini düşürmekte ve en etkili bileşeni kesin bir düzeyde ifade etmektedir. Bu da BAHP yönteminin dezavantajını oluşturmaktadır. Olabilirlik derecelerinin tespitinde üçgensel bulanık sayılardan $l_2 \geq u_2$ olması durumunda 0 derecesinin atanması ve dış bükey bulanık sayının k 'dan büyük olması durumunda satırların minimum değerinin alınarak ağırlıkların hesaplanması ve bileşenlerin 0 ağırlığı taşımasıdır. Chang'ın önerdiği algoritma, üçgen sayıları genişleterek ve L 'nin kesişme olasılığını artırarak L 'nin azalması ve U değerlerinin artması problemini kısmen çözen normalleştirmeyi içerir.

Çok sayıda bileşenden oluşan değerlendirme sistemlerinde birden fazla bileşenin 0 ağırlığını taşıması durumunda bu bileşenler içerisinde de önceliklendirme yapabilmek amacıyla çeşitli sıralama teknikleri önerilmiştir. Literatürde genellikle Chang'ın sıralama tekniği, Lio-Wang yöntemi, Kareli ortalama, Abdel-Kader, Dugdale ve Kwong-Bai yöntemleri uygulanmıştır (Cheng, 1998; Liou & Wang, 1992; Şengül vd., 2012). Çalışma kapsamında işlem kolaylığı ve elde edilen sıralamanın karşılaştırılmasına olanak tanınması bakımından bu yöntemlerden Kareli Ortalama ve Kwong-Bai seçilerek uygulanmıştır. Tablo 5'te verilen formüller kullanılarak elde edilen reel sayıların büyükten küçüğe doğru sıralanması ile sistem için en etkili bileşenler belirlenmektedir.

Tablo 5. Kareli Ortalama ve Kwong-Bai formülleri (Kiavarz vd., 2014)

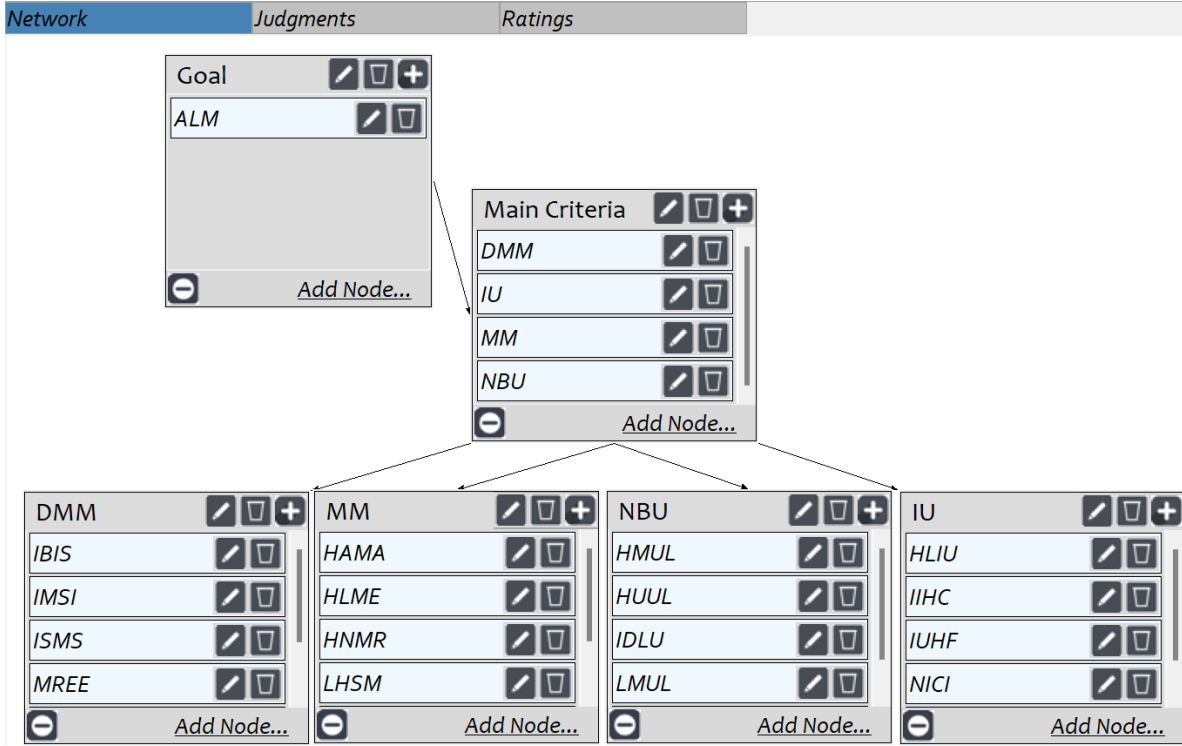
Kareli Ortalama Yöntemi	Kwong-Bai Yöntemi
$W_i \leq 0$ olması durumunda kullanılır (Göksu, 2008).	Bulanık sayıların reel sayılara dönüştürülmesi, sıralanması ve tutarlılığının analizi için uygulanır (Kwong & Bai, 2003)
$(A_k) = (l, m, u)$	$M = (l, m, u)$
$K(A_k) = \sqrt{\frac{l^2 + m^2 + u^2}{3}}$	$M_k = \frac{l + 4m + u}{6}$

4. Analiz ve Bulgular

İdari kayıp yönetimi bileşenleri için tasarlanmış karar verme modelinde kullanılan AHP ve BAHP karşılaştırma matrisleri tamamı Su İdarelerinde görev yapmakta olan mühendis ekip tarafından puanlandırılmıştır. AHP puanlandırmalarında Saaty ölçeği BAHP puanlandırmalarında Chang'ın bulanık üçgen sayılar ölçeği kullanılmıştır. Karar matrisi ise puan matrislerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir.

4.1. AHP Kullanarak Ağırlıkların Belirlenmesi

Çalışmada AHP işlemleri "SuperDecisions" paket yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım bir karar problemindeki bileşenlerin ağırlıklandırılması ve önceliklendirilmesinde ÇKKV tekniklerinden AHP ve Analitik Ağ Süreci (AAS) yöntemlerini etkili bir şekilde uygulayabilmek amacıyla geliştirilmiştir. AHP ve ANP modellerini oluşturmak ve yönetmek, kararları değerlendirmek, ağırlıkları elde etmek ve sonuçlar üzerinde duyarlılık analizi yapmak için araçlar sağlamaktadır. Karar probleminin hiyerarşik yapısı Şekil 2'de gösterildiği gibidir. Buna göre İdari kayıp yönetimi bileşenleri DMM, IU, MM ve NBU ana başlıkları altında incelenmiştir



Şekil 2. AHP hiyerarşik yapısı

AHP yönteminde öncelikle ana başlıklar kendi içerisinde ikili karşılaştırılmakta ve ana başlık ağırlıkları elde edilmektedir. Daha sonra ise her bir ana başlık altında bulunan bileşenler için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmakta ve ağırlık katsayıları toplamı 1 olacak şekilde elde edilmektedir. Son olarak farklı ana başlıklar altında bulunan bileşenlerin de kıyaslanması ve önceliklendirilmesine olanak tanınması amacıyla her bileşenin küme ağırlığı ana başlık ağırlığı ile çarpılarak genel ağırlıklar elde edilmektedir. Şekil 3'te ana başlıklar için kurulan ikili karşılaştırma puan tablosu örneği ve elde edilen ağırlıklar sunulmuştur.

Network	Judgments	Ratings
1. Choose	2. Node comparisons with respect to ALM	3. Results
Node Cluster	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct	Normal Hybrid
Choose Node	Comparisons wrt "ALM" node in "Main Criteria" cluster	Inconsistency: 0.07418
ALM	DMM is moderately more important than IU	DMM 0.50483
Cluster: Goal	1. DMM >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. IU	IU 0.14308
Choose Cluster	2. DMM >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. MM	MM 0.28763
Main Criteria	3. DMM >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. NBU	NBU 0.06447
	4. IU >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. MM	
	5. IU >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. NBU	
	6. MM >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. NBU	

Şekil 3. AHP ikili karşılaştırma örneği

DMM bileşeni IU'dan 3 kat üstündür. Bu puan DMM'in IU'dan orta derecede üstün olduğunu göstermektedir. MM ile NBU bileşenlerinin ikili karşılaştırması incelendiğinde MM'in NBU'dan 5 kat üstün yani MM'in oldukça önemli olduğunu ifade etmektedir. Bu karşılaştırmalara göre DMM 0.50483 ağırlık katsayısı ile en önemli ana başlık seçilmiştir. Ardından 0.28763 ile MM, 0.14308 ile IU ve 0.06447 ile NBU başlıkları gelmektedir. Bu karşılaştırma için CR tutarlılık indisi 0.07418 bulunmuştur. CR değerinin 1'den küçük ve 0'dan büyük olması karşılaştırmanın tutarlı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde ana başlıklar için de ikili karşılaştırma matrisleri kurulmuş, küme ağırlıkları elde edilmiş, tutarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve son olarak genel ağırlıklar elde edilmiştir. Tablo 6'da AHP yöntemi ile elde edilen ağırlık katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 6. AHP ile elde edilen ağırlıklar

Ana Bileşenler	Ağırlık Katsayısı	CR	Alt Bileşenler	Küme Ağırlık	Genel Ağırlık	CR
DMM	0.50483	0.07418	ISMS	0.25628	0.12938	0.09374
			SCNU	0.17562	0.08866	
			IBIS	0.07721	0.03898	
			UTNS	0.07166	0.03618	
			MREE	0.37719	0.19042	
IU	0.14308		IMSI	0.04204	0.02122	0.08992
			NICI	0.27629	0.03953	
			IIHC	0.38188	0.05464	
			HLIU	0.07038	0.01007	
			IUHF	0.16816	0.02406	
MM	0.28763		NMSP	0.10329	0.01478	0.08221
			OMAD	0.39294	0.11302	
			HAMA	0.20959	0.06028	
			UMER	0.05701	0.01640	
			HLME	0.16775	0.04825	
NBU	0.06447		HNMR	0.09593	0.02759	0.07482
			LHSM	0.07678	0.02208	
			IDLU	0.15944	0.01028	
			LMUL	0.20384	0.01314	
			HMUL	0.48047	0.03098	
			HUUL	0.09791	0.00631	
			LPRU	0.05833	0.00376	

Tablo 6 incelendiğinde ana başlıklar içerisinde en yüksek ağırlık katsayısının Su idarelerinde verilerin düzenli ölçülmesi, güncellenmesi, izlenmesi ve yönetilmesini ifade eden DMM bileşeninin aldığı görülmektedir. Su kayıplarının yönetiminde en önemli parametre verilerin güncel olmasıdır. Örneğin sisteme verilen su hacmi doğru bilinmezse ölçülen veya tahmin edilen kayıp hacimlerinde de hata olabilmektedir. Özellikle su kayıplarının doğrudan ölçülemediği durumlarda sistem giriş hacmi üzerinden oranlamalar ile tahmin yöntemine gidilmektedir. Bu nedenle verilerin güncel olması oldukça önem taşımaktadır.

Ana başlık bileşenleri incelendiğinde Veri Ölçüm ve Yönetimi (DMM)'de 0.37719 ile Abone Sayaç Okuma Verimliliğinin Yetersiz Olması (MREE) ve 0.25628 ile Abone Yönetim Sisteminin Yetersiz Olması (ISMS) bileşenleri almıştır. Kaçak Kullanım (IU) ana başlığında 0.38188 ile Yüksek Tüketimli Aboneler için Kaçak Kullanım Denetimlerinin Yetersiz Olması (IIHC) ve 0.27629 Kaçak Bağlantı Denetiminin Yapılmaması veya Yetersiz Yapılması (NICI). Sayaç Yönetimi (MM) ana başlığında 0.39294 ile Sayaç Yaşı Veritabanının Güncel Olmaması (OMAD) ve 0.20959 ile Ortalama Sayaç Yaşının Yüksek Olması (HAMA) ve Faturalandırılmamış Yasal Kullanımlar (NBU) ana başlığında ise 0.48047 Yasal Faturalandırılmamış Ölçülmüş Kullanımların Fazla Olması (HMUL) ve 0.20384 Yasal Faturalandırılmamış Kullanımların Ölçüm Oranının Düşük Olması (LMUL) bileşenlerinin en yüksek ağırlık katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Ana bileşen puanları da dikkate alınarak elde edilen genel ağırlıklara göre ise sıralamada ilk 5 bileşen 0.19042 ile Abone Sayaç Okuma Verimliliğinin Yetersiz Olması (MREE), 0.12938 ile Abone Yönetim Sisteminin Yetersiz Olması (ISMS), 0.11302 ile Sayaç Yaşı Veritabanının Güncel Olmaması (OMAD), 0.08866 ile Abone Sayısının Güncel Olmaması (SCNU) ve 0.06028 ile Ortalama Sayaç Yaşının Yüksek Olması (HAMA) şeklinde yer almaktadır.

4.2. Bulanık AHP Kullanarak Ağırlıkların Belirlenmesi

AHP sonuçlarını kıyaslamak ve üçgensel bulanık sayılarla yapılan ikili karşılaştırmaların bileşen sıralamasındaki etkisini gözlemlemek amacıyla BAHF yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında da AHP'ye benzer olarak öncelikle ana başlıkların ikili karşılaştırması yapılmış, etki düzeyleri belirlenmiş daha sonra her bir ana başlık için ikili karşılaştırma matrisleri kurulmuş ve bileşenlerin ağırlıkları elde edilmiştir. Puanlamada üçgensel bulanık sayılar kullanılmıştır. Tablo 7'de ana başlıkların ikili karşılaştırma örneğine yer verilmiştir.

Tablo 7: Ana kriterlerin bulanık ikili karşılaştırma matrisi

İKM	DMM			MM			NBU			IU		
DMM	1	1	1	1	3	5	3	5	7	1	3	5
MM	1/5	1/3	1	1	1	1	1/7	1/5	1/3	1	3	5
NBU	1/7	1/5	1/3	3	5	7	1	1	1	1/5	1/3	1
IU	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1	3	5	1	1	1

İkili karşılaştırma matrisinde bulunan üçgensel bulanık sayılar reel sayılara dönüştürülerek AHP yönteminde olduğu gibi tutarlılık analizi gerçekleştirilir. Daha sonra bulanık sentetik mertebe değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_{DMM} = (6, 12, 18) \times (6/42.67, 12/27.73, 18/15.09) = (0.141, 0.433, 1.193)$$

$$S_{MM} = (2.34, 4.53, 7.33) \times (2.34/42.67, 4.53/27.73, 7.33/15.09) = (0.055, 0.163, 0.486)$$

$$S_{NBU} = (4.34, 6.53, 9.33) \times (4.34/42.67, 6.53/27.73, 9.33/15.09) = (0.102, 0.236, 0.619)$$

$$S_{IU} = (2.4, 4.67, 8) \times (2.4/42.67, 4.67/27.73, 8/15.09) = (0.056, 0.168, 0.530)$$

Olabilirlik dereceleri ise bulanık sentetik mertebe değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Tablo 8’de ana başlıklar için yapılan hesaplamalar verilmiştir.

Tablo 8: Olabilirlik derecelerinin hesaplanması

Kural 1			Kural 2			Kural 3		
m1								
$m_2 \geq m_1$	$0,16 \geq 0,43$	Kural 2	$l_1 \geq u_2$	$0,14 \geq 0,49$	Kural 3	$(l_1 - u_2) / ((m_2 - u_2) - (m_1 - l_1))$	0.56203	0.56203
$m_3 \geq m_1$	$0,24 \geq 0,43$	Kural 2	$l_1 \geq u_3$	$0,14 \geq 0,62$	Kural 3	$(l_1 - u_3) / ((m_3 - u_3) - (m_1 - l_1))$	0.70805	0.70805
$m_4 \geq m_1$	$0,17 \geq 0,43$	Kural 2	$l_1 \geq u_4$	$0,14 \geq 0,53$	Kural 3	$(l_1 - u_4) / ((m_4 - u_4) - (m_1 - l_1))$	0.59575	0.59575
$m_1 \geq m_2$	$0,43 \geq 0,16$	1						1
m2								
$m_3 \geq m_2$	$0,24 \geq 0,16$	1						1
$m_4 \geq m_2$	$0,17 \geq 0,16$	1						1
$m_1 \geq m_3$	$0,43 \geq 0,24$	1						1
$m_2 \geq m_3$	$0,16 \geq 0,24$	Kural 2	$l_3 \geq u_2$	$0,1 \geq 0,49$	Kural 3	$(l_3 - u_2) / ((m_2 - u_2) - (m_3 - l_3))$	0.84201	0.84201
m3								
$m_4 \geq m_3$	$0,17 \geq 0,24$	Kural 2	$l_3 \geq u_4$	$0,1 \geq 0,53$	Kural 3	$(l_3 - u_4) / ((m_4 - u_4) - (m_3 - l_3))$	0.86425	0.86425
$m_1 \geq m_4$	$0,43 \geq 0,17$	1						1
$m_2 \geq m_4$	$0,16 \geq 0,17$	Kural 2	$l_4 \geq u_2$	$0,06 \geq 0,49$	Kural 3	$(l_4 - u_2) / ((m_2 - u_2) - (m_4 - l_4))$	0.98894	0.98894
$m_3 \geq m_4$	$0,24 \geq 0,17$	1						1
m4								

Tablo 8 incelendiğinde $V(M_i \geq M_v) = V(M_2 \geq M_1)$ karşılaştırmasında, $m_2 \geq m_1$ şartı $0.16 \geq 0.43$ sağlanamadığı için olabilirlik derecesi 1 değildir. 2. Kurala geçilir. $l_1 \geq u_2$ şartı $0.14 \geq 0.49$ sağlanamadığı için olabilirlik derecesi 0 değildir. 3.kurala geçilir. $(l_1 - u_2) / ((m_2 - u_2) - (m_1 - l_1))$ şartı $(0.14 - 0.49) / ((0.16 - 0.49) - (0.43 - 0.14)) = 0.562025$ elde edilir. Tablo 8’e göre ana başlıklar için olabilirlik dereceleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Ana başlıkların olabilirlik dereceleri

	DMM	MM	NBU	IU
DMM		1	1	1
MM	0.562025		0.842005	0.988939
NBU	0.708054	1		1
IU	0.595746	1	0.864251	

Bileşenlerin konveks olabilirlik durumları elde edilen matrislerde satırların minimum değerleri alınarak elde edilmektedir. Bu durumda ana başlıklar için $W'(1, 0.562025, 0.708054, 0.595746)$ bulunmuştur. Konveks olabilirlik değerlerine normalizasyon işlemi uygulanarak ağırlık katsayıları elde edilmektedir.

$$WDMM=(1/(1+ 0.562025+ 0.708054+ 0.595746))=0.348940$$

$$WMM=(0.562025/(1+ 0.562025+ 0.708054+ 0.595746))=0.196113$$

$$WNBU=(0.708054/(1+ 0.562025+ 0.708054+ 0.595746))=0.247068$$

$$WIU=(0.595746/(1+ 0.562025+ 0.708054+ 0.595746))=0.207879$$

Sonuçlar incelendiğinde ana bileşenler içerisinde en etkili olan 0,348940 ağırlık katsayısı ile DMM olmuştur. Sıralama NBU, IU ve MM şeklinde devam etmektedir. Ana başlıkların ağırlıkları elde edildikten sonra alt bileşenlerin ağırlık katsayılarını hesaplayabilmek amacıyla her ana başlık için bir karşılaştırma matrisi kurularak işlemler tekrar edilmektedir. BAHF ile elde edilen bileşen ağırlıkları ve sıralamaları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. AHP ve BAHF ile İKY bileşenlerinin önceliklendirilmesi sonuçları

AHP	Sıralama	BAHF	Sıralama	Kareli Ortalama	Sıralama	Kwong-Bai	Sıralama
0.1904	MREE	0.4445	HMUL	0.7039	HMUL	0.4923	HMUL
0.1294	ISMS	0.3305	LMUL	0.7028	IIHC	0.4354	IIHC
0.1130	OMAD	0.2957	MREE	0.6528	OMAD	0.4255	OMAD
0.0887	SCNU	0.2674	ISMS	0.5684	NICI	0.3827	MREE
0.0603	HAMA	0.2638	IIHC	0.5186	MREE	0.3505	NICI
0.0546	IIHC	0.2531	OMAD	0.4513	HAMA	0.3173	ISMS
0.0482	HLME	0.2451	NICI	0.4443	ISMS	0.2782	LMUL
0.0395	NICI	0.2161	IUHF	0.4333	IUHF	0.2756	HAMA
0.0390	IBIS	0.2102	HAMA	0.4248	LMUL	0.2621	IUHF
0.0362	UTNS	0.1991	SCNU	0.3876	HLME	0.2392	HLME
0.0310	HMUL	0.1958	HLME	0.3611	IDLU	0.2389	IDLU
0.0276	HNMR	0.1848	HUUL	0.3008	SCNU	0.1974	SCNU
0.0241	IUHF	0.1696	NMSP	0.2832	NMSP	0.1706	NMSP
0.0221	LHSM	0.1515	HNMR	0.2643	HNMR	0.1584	HNMR
0.0212	IMSI	0.1449	IBIS	0.2194	HUUL	0.1418	IBIS
0.0164	UMER	0.1208	LHSM	0.2125	IBIS	0.1360	HUUL
0.0148	NMSP	0.1053	HLIU	0.2005	LHSM	0.1220	LHSM
0.0131	LMUL	0.0928	IMSI	0.1648	HLIU	0.0998	IMSI
0.0103	IDLU	0.0686	UMER	0.1554	IMSI	0.0914	HLIU
0.0101	HLIU	0.0402	LPRU	0.1272	UMER	0.0711	LPRU
0.0063	HUUL	0.0000	UTNS	0.1069	LPRU	0.0698	UMER
0.0038	LPRU	0.0000	IDLU	0.0754	UTNS	0.0475	UTNS

Tablo 10 incelendiğinde BAHF ağırlıklarında Ücretini Ödemeyen Abonelerin İzlenmemesi veya Yetersiz Olması (UTNS) ve Yasal Faturalandırılmamış Kullanıcıların Bilgilerinin ve Kullanım Oranlarının Bilinmemesi veya Bilginin Eksik Olması (IDLU) bileşenlerinin 0 ağırlık katsayısına sahip olduğu bu nedenle kendi aralarında önceliklendirilemediği,

Bulanık sayıların sıralama teknikleri kullanıldığında ise bu iki bileşenin önceliklendirildiği, IDLU bileşeninin UTNS'den daha etkili olduğu görülmektedir. Bulanık sayıların sıralanması için uygulanan Kwong-Bai ve Kareli Ortalama tekniklerinin birbiri ile yakın sıralamalar oluşturduğu, ilk 10'da Tüm bileşenlerin aynı, sadece sıralamalarında farklılık olduğu görülmektedir. BAHF sıralamasında da benzer şekilde ilk 10'da 9 bileşenin aynı, sıralamalarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Bulanık sayılarla elde edilen sıralamalar AHP sonuçları ile kıyaslandığında sıralamalarda büyük oranda farklılık olduğu görülmektedir. Örneğin abone sayısı bilgisinin güncel olmama durumunu ifade eden SCNU bileşeni AHP'de 4.sırada öncelikli olarak görünürken, BAHF'de 10. sırada, Kareli ortalama ve Kwong-Bai'de ise 12. sırada gelmektedir. Benzer şekilde bulanık yöntem sonuçlarına göre 1. Sırada yer alan İdarelerde abone kaydı ve sayaç bağlantısı olan, su tüketimleri ölçülmüş ancak Su İdaresinin bilgisi dahilinde izinli şekilde faturalandırma yapılmayan abonelerin (cami, vs.) kullandığı su miktarını ifade eden HMUL bileşeni AHP yönteminde 11. sırada yer almaktadır. En iyi alternatifi seçmek ve doğru kararı vermek için ÇKKV yöntemlerinin kullanımında modellerinin ve sonuçların kararlılığı kullanılan yöntemlere ve problemin unsurlarına bağlıdır. Bu nedenle, ÇKKV yöntemleri ile çözülen her bir spesifik problem için bileşen ağırlıkları, karar probleminin yapısı, bileşenler arasındaki ilişki şekilleri, problemdeki belirsizlikler ve kararlılıklar göz önünde bulundurularak en uygun yöntem ile belirlenmelidir (Vinogradova-Zinkevič vd., 2021).

5. Sonuçlar

Su kayıplarını tamamen önlemek teknik ve ekonomik olarak mümkün değildir ancak su kayıp bileşenleri doğru bir şekilde değerlendirilip, su kayıplarını azaltmak, kontrol altına almak ve yönetmek önemlidir ve bu amaçla bileşenler önceliklendirilmelidir. Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde kayıt hataları, sayaç ve okuma hataları, izinsiz ve su idarelerinin bilgisi dahilinde bedelsiz olarak verilen suları kapsayan idari su kayıpları tüm yönleriyle incelenmiş ve bu kayıpların bileşenleri belirlenmiştir. İdari su kayıplarını doğrudan etkileyen bu bileşenlerin etkinliğini değerlendirebilmek, Su idarelerinin idari kayıp yönetiminde karar verme süreçlerini kolaylaştırmak, ekonomik verimi artırmak ve sürdürülebilirliği sağlamak amaçlarıyla ÇKKV tekniklerinden faydalanılmıştır. Çalışmada AHP ve üçgensel bulanık küme teorisi kullanılarak geliştirilmiş BAHF yöntemleri uygulanmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde her iki yöntemde de ana kriterler içerisinde en etkili bileşenin veri ölçüm ve yönetimini ifade eden DMM olduğu görülmektedir. AHP yönteminde bu sıralama sayaç yönetimi, kaçak kullanımlar ve faturalandırılmamış yasal kullanımlar şeklinde devam ederken BAHF'de faturalandırılmamış yasal kullanımlar, kaçak kullanım ve sayaç yönetimi şeklindedir. Alt bileşenler için elde edilen öncelik sıralamaları incelendiğinde AHP'de sayaç okuma yetersizliği ve abone yönetim sistemi ile ilgili bileşenlerin daha öncelikli olduğu, BAHF'de ise yasal faturalandırılmamış ölçülmüş kullanımların fazla olması ve yüksek tüketimli aboneler için kaçak kullanım denetimlerinin yetersiz olması bileşenleri ön plana çıkmıştır. Sonuçlar ve problemin hiyerarşisi incelendiğinde AHP yönteminin bu model için daha doğru ve hassas kararlar verdiği, kararlılığının yüksek olduğu görülmektedir. Buna göre öncelikle idari su kayıp yönetiminde coğrafi bilgi sistemleri teknolojileri, veri tabanlı kontrol ve izleme sistemi ve abone bilgi sistemi entegre olarak düşünülmeli, veri ölçüm ve yönetimi desteklenmelidir. Sayaç okuma ve faturalama sistemleri izlenmeli, denetleme ve yenileme politikaları uygulanmalı, izinsiz tüketimler için etkin bir müdahale gerçekleştirilmelidir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarının su temin ve dağıtım sistemlerindeki idari kayıpların azaltılması faaliyetlerini önceliklendirerek içme suyunun kullanılabilirliğinin artırılmasına ve su kaynaklarının uygun şekilde yönetilmesine de katkıda bulunması hedeflenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (İÜ-BAP FYL-2024-3596) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Akdeniz, T., & Muhammetoğlu, H. (2023), Türkiye'de Kentsel Su Dağıtım Şebekelerinde İdari Su Kayıplarının Değerlendirilmesi. *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24(1) 1–6.
- Arregui, F. J., Gavara, F. J., Soriano, J., & Pastor-Jabaloyes, L. (2018). Performance analysis of ageing single-jet water meters for measuring residential water consumption. *Water (Switzerland)*, 10(5), Article 612. <https://doi.org/10.3390/w10050612>
- Bozkurt, C. (2022). *Su kayıp yönetimi ve kontrolü için optimizasyon tabanlı en uygun strateji modelinin geliştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Chang, D. Y. (1992). Extent analysis and synthetic decision. *Optimization techniques and applications*, 1(1), 352–355.
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), 649–655.
- Cheng, C. H. (1998). A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method. *Fuzzy Sets and Systems*, 95(3), 307–317. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(96\)00272-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(96)00272-2)
- Cheng, C. H., & Mon, D. L. (1994). Evaluating weapon system by Analytical Hierarchy Process based on fuzzy scales. *Fuzzy Sets and Systems*, 63(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)90140-6)
- Connor, R., & Miletto, M. (2023). *The United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water; Executive summary*. UNESCO. 25 Kasım 2024'te <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384657> adresinden alındı.

- Ebad Ardestani, M., Sharifi Teshnizi, E., Babakhani, P., Mahdad, M., & Golian, M. (2020). An optimal management approach for agricultural water supply in accordance with sustainable development criteria using MCDM (TOPSIS) (Case study of Poldasht catchment in West Azerbaijan Province-Iran). *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 8(2), 88–107. <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1761896>
- European Union. (2023). *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on Energy Efficiency and Amending Regulation (EU) 2023/955 (Recast)*. 25 Kasım 2024'te <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791> adresinden alındı.
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z. B. M., Istandar, A., & Sigh, S. (2008). *The manager's non-revenue water handbook: A guide to understanding water losses*. Ranthill Utilities Berhad and USAID.
- Fırat, M., Bozkurt, C., Ateş, A., Yılmaz, S., & Özdemir, Ö. (2023). Development and implementation of a novel assessment system for water utilities in strategic water loss management. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 14(1), Article 04022065. <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1323>
- Fırat, M., Orhan, C., Yılmaz, S., & Özdemir, Ö. (2021). Su idarelerinin su kayıp yönetim performansının analizi ve temel performans gösterge hesaplama aracının geliştirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 75–88. <https://doi.org/10.21324/dacd.784488>
- Göksu, A. (2008). *Bulanık Analitik Hiyerarşik Proses ve üniversite tercih sıralamasında uygulanması* [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Golfam, P., Ashofteh, P. S., Rajaei, T., & Chu, X. (2019). Prioritization of water allocation for adaptation to climate change using multi-criteria decision making (MCDM). *Water Resources Management*, 33(10), 3401–3416. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02307-7>
- Hamilton, S., McKenzie, R., & Seago, C. (2006). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Voda i Sanitarna Tehnika*, 36(6), 15–24.
- Huang, C. C., Chu, P. Y., & Chiang, Y. H. (2008). A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection. *Omega*, 36(6), 1038–1052. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.05.003>
- Kadenge, M. J., Grace Masanja, V., & Mkandawile, M. (2019). A comparative analysis of multi-criteria decision making methods in optimizing water loss management strategies used in water distribution system: A case of Moshi Urban Water Supply and Sanitation Authority, Tanzania. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 16(1), 260–274.
- Kılıç, S. (2023). *Sürdürülebilir su ve atık su yönetimi için en uygun strateji modelinin ve performans değerlendirme sisteminin geliştirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Kiavarz, M., Samadzadegan, F., & Noorollahi, Y. (2014). Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map. *Geothermics*, 50, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.004>
- Kızıllöz, B. (2021). İçme suyu dağıtım sistemlerinde su kayıplarının azaltılması: Kocaeli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(2), 213–225. <https://doi.org/10.21324/dacd.793762>
- Kızıllöz, B., & Şişman, E. (2021). Gelir getirmeyen su oranı tahmin modelleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 276–283. <https://doi.org/10.28948/ngmuh.789694>
- Koşucu, M. M., Sarı, Ö., Demirel, M. C., Kıran, S., Yılmaz, A., Aybakan, A., Albay, E., & Kırca, V. Ş. Ö. (2021). Gerçek zamanlı basınç yönetimiyle su dağıtım şebekesinde su kaybının azaltılması. *Teknik Dergi*, 32(1), 10541–10564. <https://doi.org/10.18400/tekderg.658870>
- Krawczak, M., & Szkatuła, G. (2020). On matching of intuitionistic fuzzy sets. *Information Sciences*, 517, 254–274. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.11.050>
- Kwong, C. K., & Bai, H. (2003). Determining the importance weights for the customer requirements in QFD using a fuzzy AHP with an extent analysis approach. *IIE Transactions*, 35(7), 619–626. <https://doi.org/10.1080/074081703004355>
- Lambert, A. O. (2002). International report: Water losses management and techniques. *Water Supply*, 2(4), 1–20. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0115>
- Liemberger, R., Brothers, K., Lambert, A., McKenzie, R., Rizzo, A., & Waldron, T. (2007). Water loss performance indicators. *Water*, 21, 148–160.
- Liou, T. S., & Wang, M. J. J. (1992). Ranking fuzzy numbers with integral value. *Fuzzy Sets and Systems*, 50(3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(92\)90223-Q](https://doi.org/10.1016/0165-0114(92)90223-Q)
- Muhammetoğlu, H., & Muhammetoğlu, A. (2017). *İçme suyu temin ve dağıtım sistemlerindeki su kayıplarının kontrolü el kitabı*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Assessment of apparent losses in urban water systems. *Water and Environment Journal*, 25(3), 327–335. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00225.x>
- Öztürk, İ., Koşucu, M. M. ve Deneri, E. Z. (2024). Su Kayıp ve İsrafının Boyutları: İklim Kaynaklı Potansiyel Risk ve Tehditler. In K. Şahin, & İ. Erol (Eds.), *Gıda, Su Kaybı ve İsrafı* (ss.39-72). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.
- Rimeika, M., & Albrektienė, R. (2014, May 22–24). *Analysis of apparent water losses: Case study* [Conference presentation]. 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE 2014), Vilnius, Lithuania.
- Rizzo, A., & Cilia, J. (2005, September 12–14). *Quantifying meter under-registration caused by the ball valves of roof tanks (for indirect plumbing systems)* [Conference presentation]. Leakage 2005 International Conference, Halifax, Canada.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T. L. (2002). Decision making with the analytic hierarchy process. *Scientia Iranica*, 9(3), 215–229. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>
- Şengül, Ü., Eren, M., & Shiraz, S. E. (2012). Bulanık AHP ile belediyelerin toplu taşıma araç seçimi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40, 143–165.
- Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Salehi, S., Rasi Faghihi, N., & Heydarzadeh, R. (2020). Prioritization of non-revenue water reduction scenarios using a risk-based group decision-making approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(11), 1713–1724. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01858-1>

- Tornyeviadzi, H. M., Neba, F. A., Mohammed, H., & Seidu, R. (2021). Nodal vulnerability assessment of water distribution networks: An integrated fuzzy AHP-TOPSIS approach. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 34, Article 100434. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100434>
- Vinogradova-Zinkevič, I., Podvezko, V., & Zavadskas, E. K. (2021). Comparative assessment of the stability of AHP and FAHP methods. *Symmetry*, 13(3), Article 479. <https://doi.org/10.3390/sym13030479>
- Yager, R. R. (1978). Fuzzy decision making including unequal objectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), 87–95.
- Yang, C. C., & Chen, B. S. (2004). Key quality performance evaluation using fuzzy AHP. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 21(6), 543–550. <https://doi.org/10.1080/10170660409509433>
- Zyoud, S. H., Fuchs-Hanusch, D., Shaheen, H., Samhan, S., Rabi, A., & Al-Wadi, F. (2016). Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 6(4), 534–546. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.123>
- Zyoud, S. H., & Fuchs-Hanusch, D. (2020). An Integrated Decision-Making Framework to Appraise Water Losses in Municipal Water Systems. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 19(5), 1293–1326. <https://doi.org/10.1142/S0219622020500297>

Analysis of Temporal Changes of Air Pollutants Concentrations in Kocaeli, Turkey

Özer Akyürek^{1,*}

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli.

Abstract

Air is an essential requirement for living things to survive. Air pollution is defined as the foreign substances in the air reaching a quantity and density above normal. Regular monitoring and analysis of air pollution is an indispensable step for the measures and policies to be taken. In recent years, the use of open-source software in the evaluation and analysis of air quality data has increased. The R software-based Openair Package developed by the Environmental Research Group at King's College London. This package is used to analyze air quality data, identify potential pollutant sources, and identify correlations and statistical relationships between parameters. In this study, the hourly pollutant parameter (PM, SO₂, and NO_x) measured from two air quality stations between 2018 and 2022 in Kocaeli, were analyzed temporally and statistically with the Openair Package. The study found that the primary sources of pollutants are anthropogenic activities such as vehicle traffic, fossil fuels used for heating, and natural resources. As a result of the analysis, a decrease in PM concentrations and an increase in SO₂ concentrations were observed during the study period. In addition, it was determined that traffic density has a linear relationship with the NO_x parameter.

Keywords

Air Pollution, Time Series, Theil-Sen Estimator, R Project / Openair Package

Hava Kirleticili Konsantrasyonlarının Zamansal Değişikliğinin Analizi; Kocaeli Örneği

Özet

Hava, canlıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için temel bir gereksinimdir. Hava kirliliği, havadaki yabancı maddelerin normalin üzerinde bir miktar ve yoğunluğa ulaşması olarak tanımlanmaktadır. Hava kirliliğinin düzenli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, alınacak önlemler ve politikalar için vazgeçilmez bir adımdır. Son yıllarda hava kalitesi verilerinin değerlendirilmesi ve analizinde açık kaynak kodlu yazılımların kullanımı artmıştır. King's College London'daki Çevre Araştırma Grubu tarafından R yazılımı tabanlı Openair Paketi geliştirilmiştir. Bu paket, hava kalitesi verilerini analiz etmek, potansiyel kirleticili kaynaklarını belirlemek ve parametreler arasındaki korelasyonları ve istatistiksel ilişkileri tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Kocaeli'de 2018-2022 yılları arasında iki hava kalitesi istasyonundan ölçülen saatlik kirleticili parametreler (PM, SO₂ ve NO_x) Openair Paketi ile zamansal ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Çalışma, kirleticilerin birincil kaynaklarının araç trafiği, ısınma için kullanılan fosil yakıtlar ve doğal kaynaklar gibi antropojenik faaliyetler olduğunu ortaya koymuştur. Analiz sonucunda, çalışma dönemi boyunca PM konsantrasyonlarında azalma, SO₂ konsantrasyonlarında ise artış gözlemlenmiştir. Ayrıca trafik yoğunluğunun NO_x parametresi ile doğrusal bir ilişki içinde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kirliliği, Zaman Serisi, Theil-Sen Kestirimi, R Yazılımı / Openair Paketi

1. Introduction

Air pollution is defined as the presence of foreign particles in the atmosphere in such quantity, density, and duration that can harm human health and the ecosystem. This has become an important health and urban problem in recent years, especially in countries with rapid industrialization, urbanization, and population growth (World Health Organization, 2022). Domestic heating, vehicles, industrial plants, and natural sources are the main sources of air pollution (Agustine et al., 2018; Chaurasia & Mohan, 2022). Particulate matter (PM), carbon monoxide (CO), ozone (O₃), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur dioxide (SO₂) are the most important pollutants threatening public health (Demirarslan & Zeybek, 2022). World Health Organization (WHO) data shows that almost the entire population (99%) breathes air with an extreme pollutant that exceeds limit values (World Health Organization, 2022).

Today, there is an increase in the number of health problems due to air pollution. The WHO classifies air pollution as the 13th leading cause of death (Yorkor et al., 2021). Short-term exposure to air pollution can lead to infectious respiratory diseases such as coughing, shortness of breath, and wheezing, which damage lung function, as well as lung cancer, asthma, and cardiovascular health problems (Badida & Jayaprakash, 2022; Demirarslan & Zeybek, 2022).

In 2019, it was estimated that 4.2 million premature deaths worldwide were related to air pollution (Agustine et al., 2018; Sidjabat et al., 2019; World Health Organization, 2022). To minimize the negative impacts of air pollution, the number of air quality monitoring stations has increased significantly in late years. Therefore, a considerable quantity of digital data is stored and made available to users online. Therefore, the necessity of various software tools for processing and analyzing large data sets has gained great importance. One of the software examples used in the evaluation and analysis of air quality data is the Openair Package within the R programming environment. This software package was developed by the Environmental Research Group at King's College London as a Natural Environment Research Council (NERC) project. Each function in the package has a stand-alone analytical method or background, such as linear regression, p-value, and coefficient of determination and decision-making (Carslaw & Ropkins, 2012; Sidjabat et al., 2019; Szulecka et al., 2017). This package includes functions to analyze air quality data, identify correlations of pollutant parameters, define potential pollutant sources using polar plots, and evaluate and analysis of HYSPLIT back trajectories using statistical methods (Carslaw, 2019).

In recent years, the Openair Package has proven its usability in air quality studies. For this reason, this software package has been utilized in many air quality studies in the literature. Dang et al. (2017), analyzed PM₁₀ and PM_{2.5} air pollutant parameters in Kaohsiung City, Taiwan with the help of functions in the Openair Package. They investigated the behavior of air pollutant parameters in the study area. Szulecka et al. (2017), analyzed the air quality measurement station data in Krakow, Poland by modeling it with the Openair Package. They pointed out the superiority of the Openair Package in analyzing large data sets and its low processing time. They also mentioned the functionality of this software package and its valuable contributions to the air quality management system. Agustine et al. (2018), investigated the PM₁₀ pollutant parameter values in two cities in Indonesia with the Openair Package. They revealed the pollution values of the two cities by extracting the PM₁₀ distribution during the study season. Sidjabat et al. (2019), examined the distribution of air pollutant parameters together with meteorological parameters in Jabababeka Industrial Zone in Indonesia in 2015-2018 using the Openair Package. They investigated the distribution around the air monitoring stations using the pollution rose function. Huzlík et al. (2020), examined the parks in Brno, the second largest city of the Czech Republic, in terms of their relationship with air pollutants and meteorological parameters with openair and openairmaps packages. Oleniacz et al. (2021), investigated the air pollutant parameters in the dense industrial and residential areas in the northeast of Krakow, Poland, with the help of the Openair Package. Yorkor et al. (2021), examined the temporal variations of SO₂, NO₂, O₃, and PM_{2.5} air pollutant parameters in Ogoni in the Niger Delta region in Nigeria with the help of an Openair Package. As a result of their analysis, they determined that pollutant parameters increased during the week and decreased at weekends. Yulinawati et al. (2021), determined the indoor and outdoor PM_{2.5} air pollutant value of the women and children's hospital in West Jakarta with the help of low-cost sensors and analyzed it with the Openair Package. According to their results, the pollution value outside the hospital was found to be higher than inside. Demirarslan and Zeybek (2022), analyzed the data of 14 air monitoring and meteorological stations in the Eastern Black Sea region with the polar plot function in the Openair Package. They concluded that the primary pollutant sources are anthropogenic activities. Badida and Jayaprakash (2022), examined the changes in air quality caused by lockdowns in India before and during the Covid-19 pandemic. They concluded that restrictions at the country and state levels positively affected air quality. Beringui et al. (2022), examined the air quality of Rio de Janeiro, one of the most populous cities in Brazil, during the Covid-19 lockdown with the Openair Package. Analyzing pollutant parameters measured at five air quality monitoring stations spread across the city, they found that CO decreased and O₃ increased during the lockdown. They concluded that working from home and distance learning positively affect air quality. Rosianu et al. (2022), investigated the potential relationship and correlation between the main air pollutant parameters, meteorological parameters, and airborne pollen levels in Bucharest between 2014 and 2019 using the Openair Package of R software. Wang et al. (2022), conducted a trend analysis of the PM_{2.5} air pollutant parameter between 2015 and 2019 with the random forest algorithm machine learning method using hourly data from three urban air quality monitoring stations in Xi'an, China. Ropkins et al. (2022), examined the trend analysis and polar graphs of the NO₂ pollutant parameter between 2015 and 2019 by using the data of air quality and meteorology measurement stations in the city of Leeds in the United Kingdom with the help of Openair Package. Iskandaryan et al. (2022), aimed to predict the NO₂ concentration value in Madrid, Spain using machine learning techniques. For this purpose, they tried to learn the behavior of the air pollutant by examining the trend analysis and polar graphs of the hourly values obtained from the air quality measurement stations of 2019 with the Openair Package.

This study aims to analyze the air quality in Kocaeli, an industrial city with the tenth largest population in Turkey, with the help of an Openair Package. Therefore, hourly pollutant parameter values of two air monitoring stations located in the city between 2018–2022 were analyzed temporally and statistically with meteorological (wind speed and direction) data.

2. Materials and Methods

Covid-19 (Coronavirus) disease is an infectious disease caused by the SARS-CoV-2 virus. It was declared a pandemic by the WHO as a result of the rapid spread of the virus, which first emerged in Wuhan, China in December 2019. The Covid-19 pandemic, which first caused a health crisis on a global scale, triggered the economic effects of the crisis with measures such as social distancing practices, lockdowns, closure of production sites, and bans on entry and exit at country borders,

which governments put into effect to prevent the spread of the disease (Marangoz & Akçam, 2023; Yener & Demirarslan, 2024). By the end of 2024, the number of Covid-19 cases in the world reached 777 million and the total number of deaths reached 7.1 million. In Türkiye, the number of cases has reached 17 million and the number of deaths has reached 101 thousand (World Health Organization, 2025). Following the first Covid-19 case on March 11, 2020, the Turkish Ministry of Health decided to take various measurements. These measures included school vacations or switching to distance education, postponement of social, cultural and sporting activities, and lockdowns. Education activities in Türkiye were conducted remotely between March 2020 and September 2021. In addition, lockdowns, especially on weekends, were first implemented on April 10, 2020 and continued until May 17, 2021.

2.1. Study area

Kocaeli is an industrial city located in a geographically critical region with a dense population of 2,102,907 people and a daily traffic volume of 57,500 vehicles. The surface area of Kocaeli is 3.613 square kilometers. The number of people per square kilometer in the province is 582, which is the highest population density after İstanbul (Governorship of Kocaeli, 2025). Kocaeli is one of the fastest growing industrial regions in Türkiye, with industrial investments intensifying especially between 1960-1975. Kocaeli has 400 first class and approximately 7000 second and third class industrial facilities. Within its borders, there are over 1,000 industrial facilities, 300 of which are large, including three tire factories, an automotive industry, a paper mill, a petrochemical industry, and an oil refinery. When the sectoral distribution of industrial enterprises in Kocaeli is analyzed; It is seen that the first place is the manufacture of fabricated metal products with 19.49%, the second place is the manufacture of machinery and equipment with 12.45%, and the third place is the manufacture of basic metal products with 10.01%. In addition, as of the end of 2019, there are 14 organized industrial zones in Kocaeli province. The most important factors in terms of air pollutants are the city's dense population and related vehicle traffic and the fact that it is an industrial city (Akyürek et al., 2013; Republic of Turkey Ministry of Industry and Technology, 2019).

2.2. Air quality and meteorological data

Data obtained from two air quality monitoring stations were used in the study. The first one is located in the city center in a region with a high density of commercial areas and vehicle traffic where people spend time all day long. The second is located in the Alikahya neighborhood in an area with dense residential and industrial facilities such as tire factories. PM_{10} ($\mu g/m^3$), SO_2 ($\mu g/m^3$), and NO_x ($\mu g/m^3$) air pollutant parameters obtained hourly between January 01, 2018, and November 30, 2022, published online by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate of the Republic of Turkey were used as a data set. Pollutant parameters are measured according to the methods and sampling methods determined by the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change (2023). Measurements at the stations have been carried out with fully automatic devices since 1984 in a way to give hourly averages.

Hourly wind direction and speed data of the İzmit/Tepetarla meteorological station in the Meteostat database (Lamprecht, 2023), which is the closest distance to the measurement stations, were obtained and used to help analyze air pollutant parameters. Among the 12 air quality monitoring stations located within the boundaries of the province of Kocaeli, the primary rationale for selecting only two stations (as detailed in Table 1) for the analysis is their proximity to the İzmit/Tepetarla station, where meteorological data is collected. It is deemed suitable to utilize the data from the air pollutant stations in closest proximity to this station, which is the sole station within the boundaries of Kocaeli province that provides meteorological data as open data, for the analysis to be conducted.

Figure 1 shows the locations of the air monitoring stations and Table 1 shows the information about the stations and measured pollutant values.

Table 1: Information on air quality monitoring stations

Station No	Stations	Geographical coordinates		Measured pollutants
		Latitude	Longitude	
AQM ₁	Merkez	40.7658	29.9512	PM_{10} , SO_2 , NO_x
AQM ₂	Alikahya	40.771	30.0077	PM_{10} , SO_2 , NO_x

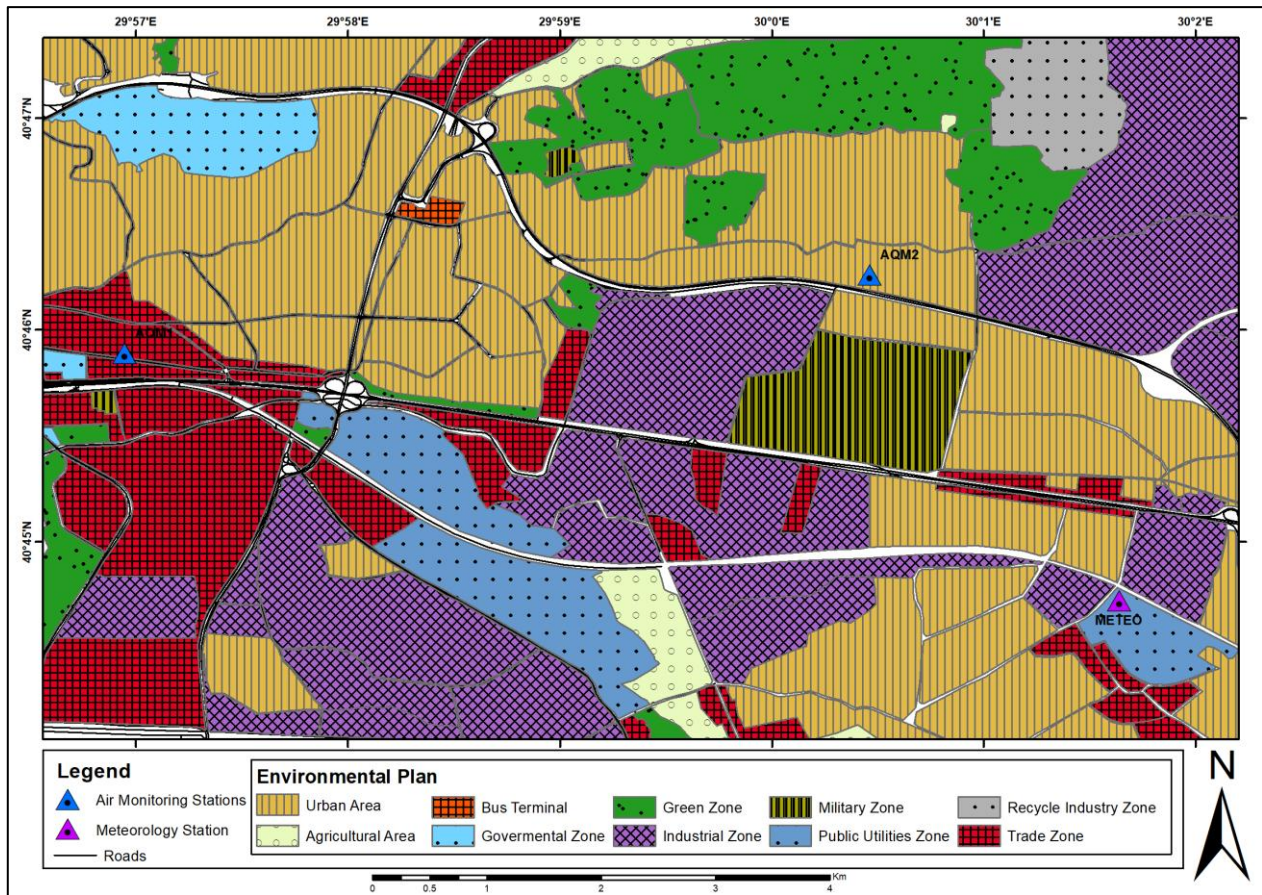


Figure 1: Air monitoring/meteorology station and environmental plan of study area

2.3. Data analysis

Open-source R software is preferred by different disciplines for many different studies (R Core Team, 2019). It is useful software for air quality research with data editing, statistical analysis with many functions, creating high-quality graphics capability, and visualization characteristic parameters (Demirarslan & Zeybek, 2022). The Openair Package of the open-source R software developed by Carslaw and Ropkins (2012) was used for the interpretation, visualization, and analysis of air pollutant and meteorological parameters obtained in this study. With the help of the Openair Package, time series and time variation technique analysis procedures were applied to air pollutant parameters and graphs of these methods were created. The change in the average concentrations of air pollutants over time was determined at a 95% confidence interval. All openair codes used in the analyzes were run with a default value of 0.99 percentile. In other words, the top 1% of the data set was removed so that outliers would not affect the analysis. Daily and monthly averages were obtained using the *timeAverage* function in the relevant code blocks of the Openair Package.

The first process applied for the analysis of air pollutants is the polar plot function. This function provides a useful visualization tool to study the behavior of pollutant parameters and for pollutant source characterization (Ropkins & Carslaw, 2012). Two-variable polar graphs are an effective graphical tool used to distinguish between different types of sources and their properties. It shows how the intensity of a pollutant parameter changes with wind speed and direction in polar coordinates (Szulecka et al., 2017). According to Carslaw and Beevers (2013), the following steps should be followed to create bivariate polar plots. Pollutant intensities are separated into 'bins' according to wind speed-direction values, and the average pollutant concentration values of the values corresponding to these 'bins' are calculated. To obtain sufficient information from the concentration distribution, the wind speed should be 30 m/s and the wind direction should be 10°. Wind speeds above this value cannot be used in the analysis due to the decreasing accuracy of the measuring instruments in obtaining wind speeds higher than 30 m/s.

Wind components u and v values;

$$u = \bar{u} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\theta}\right), \quad v = \bar{u} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\theta}\right) \quad (1)$$

is calculated by the formula. Here $\bar{u}$ is the hourly average wind speed and θ is the average wind direction, where 90° indicates east.

As a result of these processes, we have u , v , and the concentration (C) of the pollutant parameter measured at the surface. The Generalized Additive Model (GAM) is used to calculate a point on the graph. GAM is a practical model approximation for predicting air pollution. Since the relationships between variables are not linear, their relationships with each other are essential. GAM approach is as follows;

$$\sqrt{C_i} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n s_j(x_{ij}) + e_i \quad (2)$$

where C_i is the i th pollutant concentration, β_0 is the overall mean of the response, $s_j(x_{ij})$ is the smooth function of i th value of covariate j , n is the total number of covariates, and e_i is the i th residual.

The second process applied to air pollutant parameters is the Theil-Sen function. This function is used to show the time trends of pollutant parameters. The Theil-Sen approach is commonly used for long-term trend analysis (Wang et al., 2022). According to Carslaw (2019), the method works as follows. The slopes between all points in the dataset are calculated. As the size of the dataset increases, the value of the calculated slope increases rapidly. The Theil-Sen estimate is the median value of the calculated slopes in the data set. The advantage of this method is that it is capable of providing accurate confidence intervals even for data sets that are not normally distributed and have variable variances. It is also robust against possible outliers. These two advantages can be important in air pollution forecasting.

3. Results

In this study, the air quality of the study area between 2018 and 2022 was analyzed using the data obtained from the air quality measurement stations whose location and measured air pollutant parameters are given in Table 1. Figure 2 shows the time series graph of the daily averages of the data obtained from air quality measurement stations. The area shown in gray in the graph shows the Covid-19 period, which affected the whole world. During the Covid-19 period, various restrictions (lockdowns, distance education, work, and so on) were also imposed in Turkey, as they were all over the world. After the first case was reported in Turkey in March 2020, restrictions were imposed in the following months to reduce the impact of Covid-19. As can be seen in Figure 2, Covid-19 has had a positive impact on air quality as mentioned in many studies in the literature (Lv et al., 2022; Matthias et al., 2021; Shen et al., 2022). During the Covid-19 period, there was a noticeable decrease, especially in SO_2 and NO_x values. In the period after the restrictions were lifted, pollutant parameter concentrations increased.



Figure 2: Time series of daily means of air pollutants by 2018 – 2022 in Kocaeli

Figure 3 shows the time variation graph of air pollutant parameters. From this graph, it is possible to examine the weekly, monthly, and hourly distributions of pollutant parameters during the study period. Accordingly, it is seen that NO_x values of AQM₁ station located in the city center where vehicle traffic is intense reach the highest values ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) during the midday hours (10:00-14:00) on weekdays. Especially when the Sunday section is examined, the decrease in NO_x values at noon due to the lack of vehicle traffic is striking. Likewise, at the AQM₂ station, which is close to industrial facilities, NO_x values were found to be high ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) during the same hours. It is observed that NO_x values are at high levels, especially in spring and winter months, and decrease in summer months. When the PM_{10} pollutant parameter is analyzed, it is seen that it is at similar levels in both monitoring stations. It was determined that the highest levels during the day reached in the afternoon hours (14:00-15:00). It is seen that PM_{10} pollutant reaches the highest levels, especially in November. When the SO_2 pollutant parameter is analyzed, it is seen that the highest values are in the evening hours (18:00-20:00). The reason for this is generally thought to be due to the need for heating. As it is known, the biggest source of SO_2 is fossil fuels burned for heating purposes. For this reason, SO_2 values are higher at the AQM₂ station, which is closer to industrial and residential areas. Especially in December, February, March, and April, which are the months with the lowest temperatures due to the climate of the study area, it was determined that SO_2 values due to heating are high.

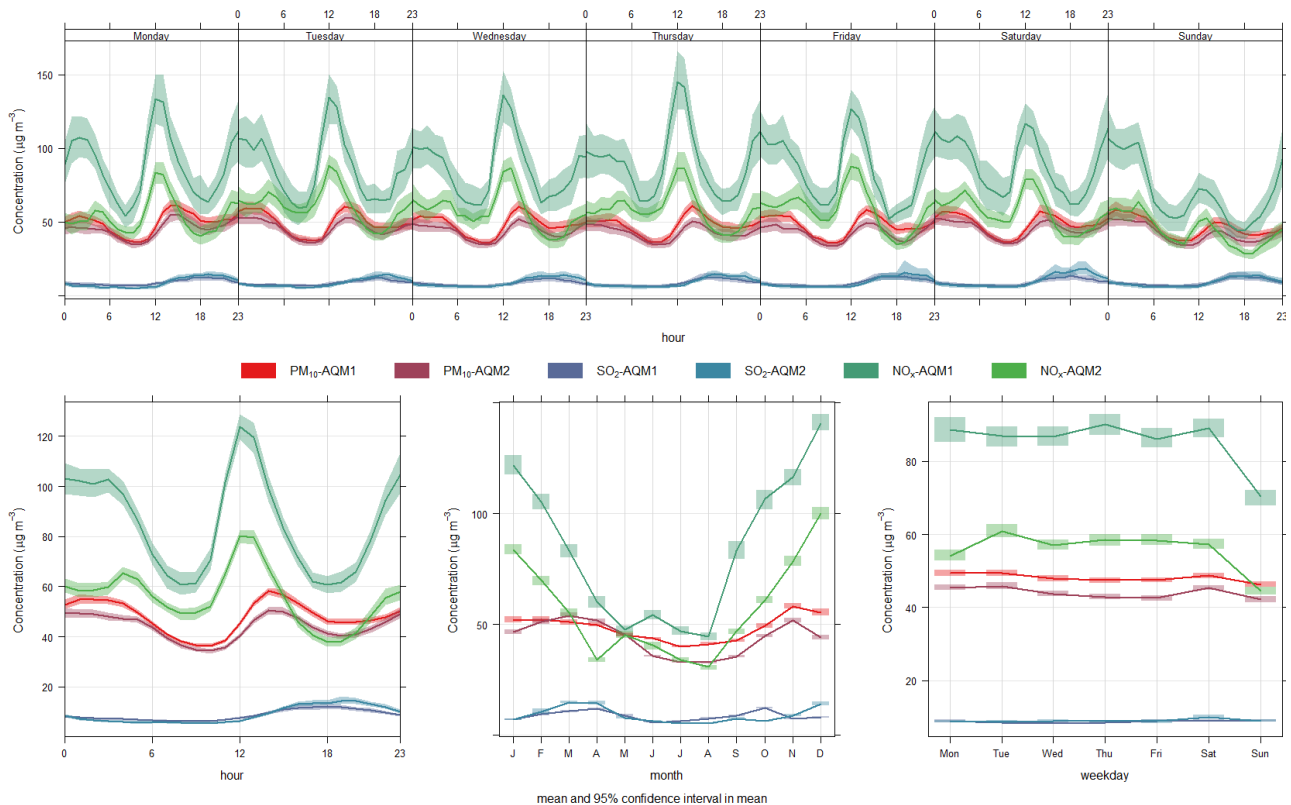


Figure 3: Time variations of air pollutants in hours, weekdays, and months between 2018–2022

Figure 4 shows bivariate polar plots by using PM_{10} , SO_2 , and NO_x pollutant parameters measured at air monitoring stations and wind speed and direction parameters. In the graphs created, the starting point of the axes indicates the location of the measuring station. When Figure 4 is analyzed, the most obvious situation for PM_{10} is that pollutant values are also at low levels at low wind speeds. As the wind speed increases (8-12 m/s), pollutant parameter values also increase. Especially in 2018, the highest values were detected in the east direction at the AQM₁ station located in the city center. Also in 2022, high concentrations are observed in the northwest direction at station AQM₂, which is located in the area of industrial facilities. The reason for this situation is thought to be the transport of PM_{10} pollutant from different regions to the study area due to high wind speed. When the graphs created for SO_2 are examined, it is determined that the highest values were reached in the east direction in the region where industrial facilities are located in 2021. In both stations, pollutant values, which were at low levels in the first years of the study, have shown an increasing trend in recent years. Especially for AQM₂ in 2022, it is seen that high pollutant values are reached with westerly winds at high wind speeds. When the NO_x pollutant is analyzed, it is seen that the AQM₁ station, where there is heavy vehicle traffic, has higher pollutant values in all years. Especially in 2018, the highest pollutant values were reached at low wind speeds.

Figure 5 shows the correlation coefficients of pollutant parameters and wind speed and direction. When Figure 5 is analyzed, it is seen that PM_{10} and NO_x values have low negative correlation and SO_2 parameter has low positive correlation value. This situation is in parallel with the SO_2 polar plot values shown in Figure 4.

In Figure 4, SO_2 values are at low levels at low wind speeds and their distribution increases as the wind speed increases. Similar situation can be said for NO_x values, NO_x values, which have a negative correlation with wind speed in Figure 5, are shown as high pollutant values at low wind speeds and low pollutant values at high wind speeds in the polar plot graphs given in Figure 4. However, the same is not the case for PM pollutant values. The pollutant values in Figure 5, which have a negative correlation with wind speed, do not show similar characteristics in Figure 4. In this case, as mentioned above, it strengthens the belief that high wind speed carries PM values from different regions to the study area.

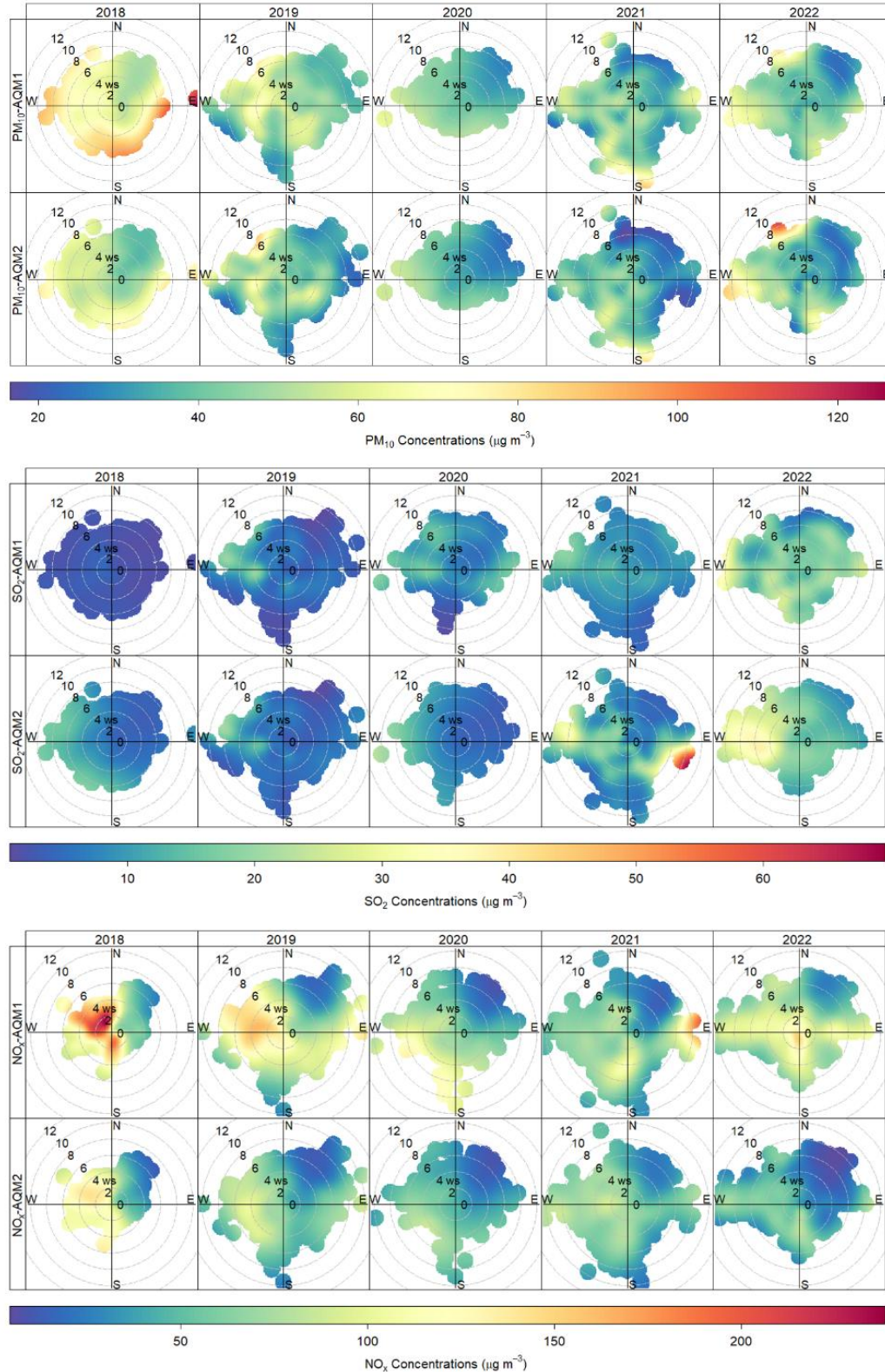


Figure 4: The identification of potential source contribution for wind speed for air pollutants at the monitoring stations

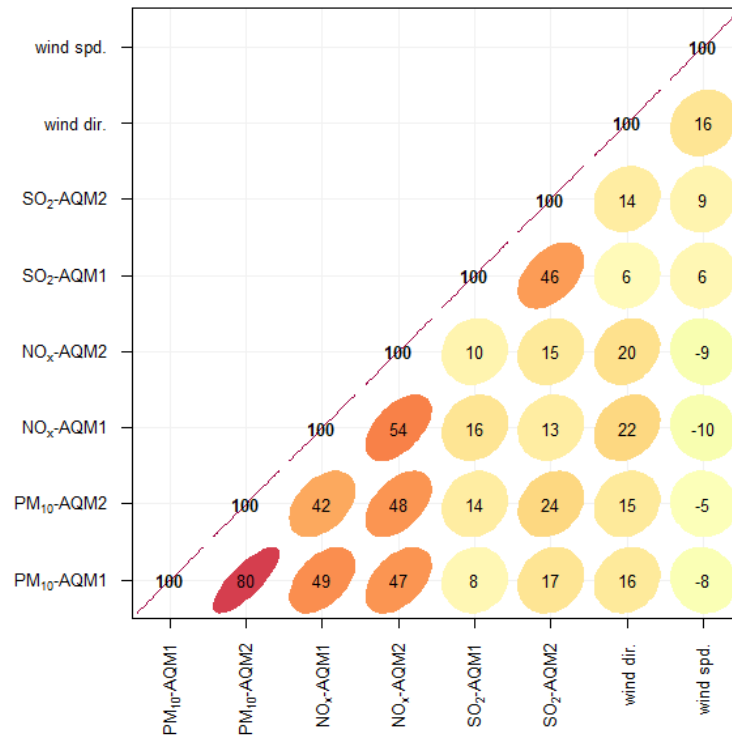


Figure 5: Statistical correlation coefficients of pollutant parameters and wind parameters

A non-parametric Mann-Kendall method using the Theil-Sen function was used to determine the statistical significance of the trends of air pollutants at the monitored stations. Figure 6 shows the graphs generated with the Theil-Sen function. Theil-Sen graphs were created based on monthly averages in three categories: before, during and after the pandemic. Therefore, hourly data were first converted to monthly averages. Then, since air pollutants show strong seasonal variations, the data were subjected to de-seasonalization, a feature of the Openair Package (Carslaw & Ropkins, 2012). The graphs in Figure 6 show the de-seasonalized monthly average concentrations of air pollutant parameters. The solid red line represents the trend of the pollutants. The leftmost value shown in green at the top of each graph represents the overall trend for each time period. The 95% confidence interval values of the slope are shown in square brackets. The * symbols at the end of the trend values indicate how statistically significant the estimate is: $p < 0.001 = ***$, $p < 0.01 = **$, $p < 0.05 = *$, and $p < 0.1 = +$. The absence of a symbol means that there is no statistically significant slope detected.

When the PM₁₀ pollutant parameter is analyzed from the graphs in Figure 6, it is seen that this parameter shows a downward trend in both stations. Only AQM₂ showed a significant increase in pollutant values after the pandemic. In AQM₁, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $-13.06 - -6.86$, $-7.24 - 8.21$, $-19.09 - 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. In addition, a decrease of -10.69 , -0.59 and $-1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before, during and after the period was determined, respectively. In AQM₂, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $-7.36 - -1.08$, $-21.52 - 12.67$, $-35.61 - 20.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. Also, a decrease of -4.91 , $-2.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before, during the period were determined, respectively, and an increase of $3.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ after the period was determined. A significant increase in the PM₁₀ pollutant parameter was observed only at the AQM₂ station, which is located in a dense industrial and residential area after the pandemic. When the SO₂ pollutant parameter graphs are analyzed, it is seen that there is an increasing trend in both stations. It is observed that there is a decrease in pollutant parameter values during the pandemic at AQM₁ station and before the pandemic at AQM₂ station. AQM₁, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $0.84 - 3.77$, $-5.91 - 8.68$, $-13.28 - 20.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. In addition, an increase of $2.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before the period was determined, and a decrease of -0.42 and $-4.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ during and after the period were determined, respectively. In AQM₂, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $-2.6 - -0.04$, $-2.08 - 7.46$, $-21.83 - 15.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. In addition, a decrease of $-1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before the period was determined, also an increase of 1.29 and $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ during and after the period were determined, respectively. We can relate the decrease in AQM₁ during the pandemic to the restriction of mobility. This area, where dense commercial areas are located, has decreased in terms of SO₂ pollutant with the closure decisions taken within the scope of pandemic measures. The same cannot be said for AQM₂. As a result of the continued operation of industrial facilities during the pandemic process, no decrease was observed during the pandemic process.

Finally, when the graphs of the NO_x pollutant parameter are examined, it is determined that there are increasing trends at the AQM₁ station located in the city center around heavy vehicle traffic and decreasing trends at the AQM₂ station

located near industrial and residential areas. In AQM₁, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $-6.38 - 44$, $-59.76 - 27.39$, $-71.99 - 164.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. In addition, an increase of 12.69 and $57.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before and after the period were determined, respectively, and also a decrease of $-10.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ during the period was determined. In AQM₂, the upper and lower limit values before, during and after pandemic of $-6.01 - 5.96$, $12.25 - 68.59$, $-123.98 - -2.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a 95% confidence interval, respectively. In addition, an increase of 0.5 and $37.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ before and during the period were determined, respectively, and also a decrease of $-73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ after the period was determined. It is thought that the biggest reason for the decrease in the NO_x pollutant parameter at AQM₁ station during the pandemic is the decrease in vehicle traffic in the relevant region. The increases before and after the pandemic support this situation. In the AQM₂ region, where industrial and residential areas are dense, the intense increase in the pandemic process and the rapid downward trend afterwards are thought to be related to the ozone- NO_x chemical transformation in the atmosphere. However, no investigation on this chemical transformation was performed in this study.

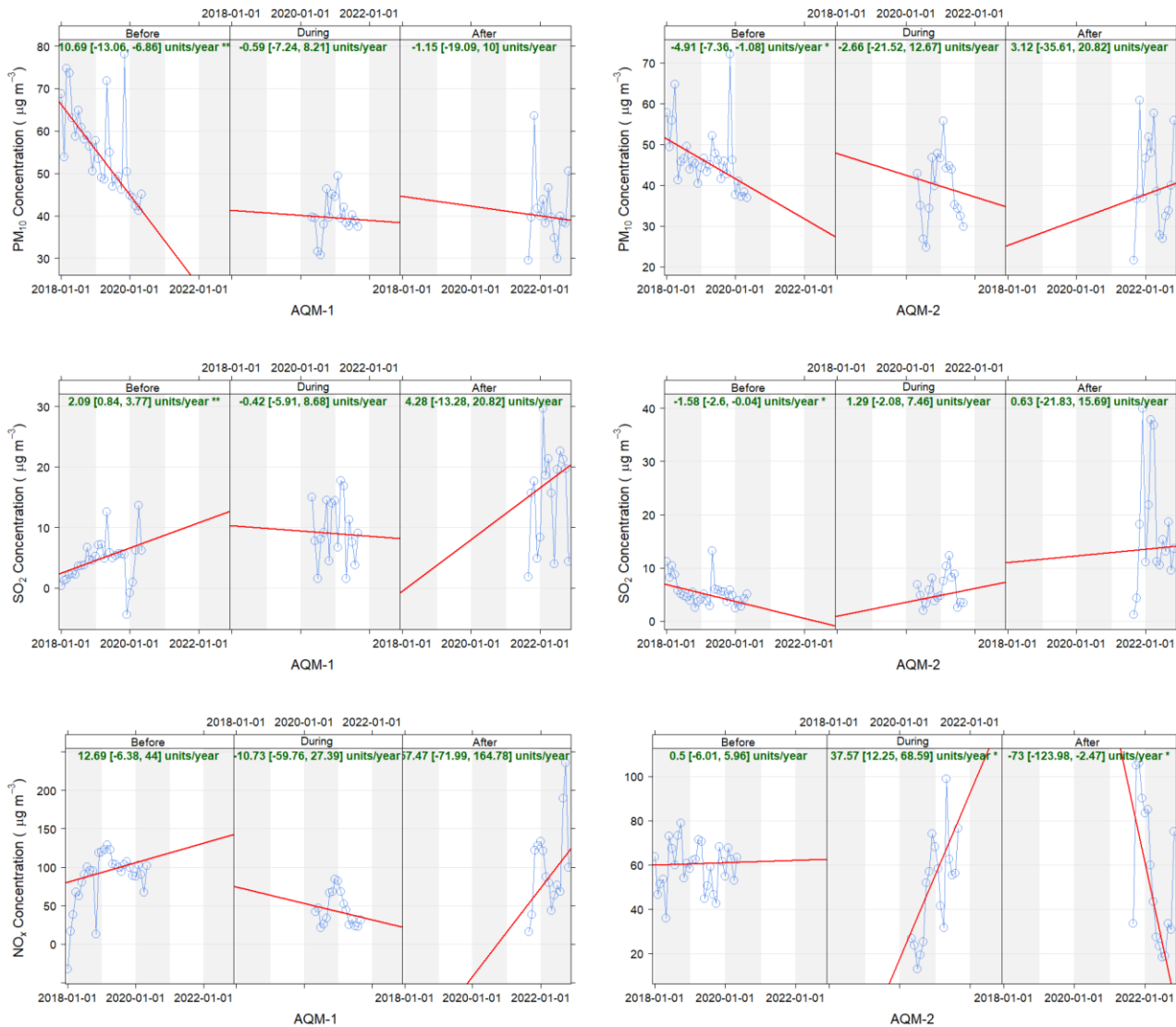


Figure 6: Trends in the air pollutants at the monitoring stations before, during and after the Covid-19 pandemic

4. Discussion

In this study, the air quality of Kocaeli province, which has intensive industrial facilities and therefore a dense population, has been investigated for 5 years between 2018 and 2022. For this purpose, hourly data from two air quality monitoring stations in the city center, where commercial areas and heavy traffic flow are located, and around the city center, where industrial facilities and residential areas are located, were used.

Studies by Badida and Jayaprakash (2022), Beringui et al. (2022), Habeebullah et al. (2022), Ngo et al. (2022) and Yener and Demirarslan, (2024) show that there has been a decrease in air pollutant values due to the lockdowns imposed during Covid-19. In this study, there is a decrease in pollutant values during the Covid-19 period in the time series graphs.

In addition, in the Thil-Sen trend graphs, it can be said that the pollutants show a downward trend with the effect of the Covid-19 period, or the pollutants that have an increasing trend causes the rate of increase to remain at low levels.

In the PolarPlot graphs, high PM₁₀ concentrations are observed at high wind speeds as reported by Dang et al. (2017), Demirarslan and Zeybek (2022), Beddows et al. (2015), Carslaw et al. (2006), Grange et al. (2016) and Bousiotis et al. (2022). Similar results were obtained in this study as well. In the graphs, PM₁₀ concentrations measured at both stations show an increase at high wind speeds. According to Huzlík et al. (2020), Iskandaryan et al. (2022), Ropkins et al. (2022), and Uria-Tellaetxe and Carslaw (2014) showed that NO_x values were high in measurements made in areas adjacent to heavy vehicle traffic. In the present study, similar results were obtained at the station located in the city center (AQM₁) due to traffic.

When the time-variation graphs are examined, Dang et al. (2017), Yorkor et al. (2021), Szulecka et al. (2017), Chaurasia and Mohan (2022) and Demirarslan and Akıncı, (2018) emphasized that pollutant parameter concentrations increase in winter months. In the current study, it was determined that the concentrations of all parameters measured at air quality stations increased in winter months. In addition, NO_x concentrations were found to be lower on Sundays compared to other days of the week in all studies in the literature (such as Carslaw & Beevers (2013)) as well as in this study. In addition, Yener and Demirarslan (2022) and Demirarslan and Akıncı (2018) stated in their study that the negative effect of anthropogenic factors on O₃ can be attributed to increased NO₂ due to motor vehicle use, industrial activities and population growth. The biggest reason for this is that the vehicle density is much less on Sunday, which is a holiday, compared to other days.

The Openair Package, a package of open source R software used in the literature and in this study, is shown to be a useful tool for temporal and statistical analysis of air pollutants. Sidjabat et al. (2019), Oleniacz et al. (2021) and Uria-Tellaetxe and Carslaw (2014) highlighted that the Openair Package is particularly useful in analyzing pollutant parameters around industrial areas. The R software, which is open-source and utilizes the Openair Package, is capable of running on all operating systems, thus negating the necessity for specialized hardware. A critical distinguishing feature of Openair is its capacity to facilitate the examination of large data sets in a remarkably short period of time through its functions and visualization methods, which are the most significant aspect of the software. It facilitates the determination of relationships between the parameters that constitute the data set, the definition of complex spatial analyses, and the creation and verification of distribution models.

5. Conclusion

Air pollution is a very important factor in human health and climate change. To minimize the harmful effects of air pollution, it needs to be continuously monitored and intervened when necessary. Air quality monitoring stations are established by countries to monitor air pollution regularly and various environmental policies are produced with the data obtained from these stations. It is important for the institutions that produce policies to overcome air pollution to access the correct information as soon as possible. For this reason, the data obtained from monitoring stations should be analyzed reliably in a short time.

Openair, a package of R, open-source software used in this study, is an important tool for the analysis of air pollution. As a result of the analysis made with the Openair Package in the study, it is seen that air pollutant sources are mostly anthropogenic. It has been determined that high values of wind speed, which is one of the meteorological parameters, increase the density of particulate matter in the air. In addition, it was observed that the Covid-19 pandemic period within the study period had a positive effect on air pollution by reducing the concentrations of PM₁₀ and NO_x air pollutants. On the contrary, an increase in SO₂ pollutant values was observed. It was also revealed that traffic density has a linear relationship with NO_x. Several measures can be taken with various policies to reduce these pollutants. Reducing fossil fuels used to meet the heating needs of homes, expanding the use of electric vehicles, and improving the filter systems used in industrial facilities can be shown as a few examples of measures that can be taken.

Acknowledgments

The author is thankful to the Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change for providing the data, and also to the Environmental Research Group at King's College London for the package of openair.

References

- Agustine, I., Yulinawati, H., Gunawan, D., & Suswantoro, E. (2018). Potential impact of particulate matter less than 10 micron (PM₁₀) to ambient air quality of Jakarta and Palembang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 106(1), Article 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012057>
- Akyürek, Ö., Arslan, O., & Karademir, A. (2013, 11–13 Kasım). *Spatial analysis of air pollution parameters SO₂ and PM₁₀ with GIS: A case study of Kocaeli province* [Bildiri sunumu]. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara.
- Badida, P., & Jayaprakash, J. (2022). Variations in local, transported, and exposure risks of PM_{2.5} pollution: Insights from long-term monitoring data in mega coastal city. *Human and Ecological Risk Assessment*, 28(10), 1146–1174.

- Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., Green, D. C., & Fuller, G. W. (2015). Receptor modelling of both particle composition and size distribution from a background site in London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(17), 10107–10125. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10107-2015>
- Beringui, K., Justo, E. P. S., De Falco, A., Santa-Helena, E., Rocha, W. F. C., Deroubaix, A., & Gioda, A. (2022). Assessment of air quality changes during COVID-19 partial lockdown in a Brazilian metropolis: From lockdown to economic opening of Rio de Janeiro, Brazil. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 15(7), 1205–1220. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01127-2>
- Bousiotis, D., Beddows, D. C. S., Singh, A., Haugen, M., Diez, S., Edwards, P. M., Boies, A., Harrison, R. M., & Pope, F. D. (2022). A study on the performance of low-cost sensors for source apportionment at an urban background site. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(13), 4047–4061. <https://doi.org/10.5194/amt-15-4047-2022>
- Carslaw, D. C. (2019). *The openair manual — open-source tools for analysing air pollution data* (Issue November). <https://davidcarslaw.com/files/openairmanual.pdf>
- Carslaw, D. C., & Beevers, S. D. (2013). Characterising and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering. *Environmental Modelling and Software*, 40, 325–329. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.005>
- Carslaw, D. C., Beevers, S. D., Ropkins, K., & Bell, M. C. (2006). Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5424–5434. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.062>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair – An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, 27–28, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Chaurasia, R., & Mohan, M. (2022). Estimation of background concentration of ambient pollutants for Delhi NCT region. *Atmospheric Pollution Research*, 13(7), Article 101476. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101476>
- Dang, D., Shu, M., Nguyen, T., Hsu, B., & Pham, K. (2017). Using Open-Air Package for statistic of air quality data: Study in Kaohsiung, Taiwan. *Global Journal of Advanced Engineering Technologies and Sciences*, 4(4), 53–59.
- Demirarslan, K. O., & Akıncı, H. (2018). CBS ve hava kalitesi verileri kullanılarak Marmara Bölgesi'nin kış sezonunda hava kalitesinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(1), 11–27. <https://doi.org/10.21324/dacd.344564>
- Demirarslan, K. O., & Zeybek, M. (2022). Conventional air pollutant source determination using bivariate polar plot in Black Sea, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 24(2), 2736–2766. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01553-3>
- Governorship of Kocaeli. (2025). *Kocaeli's population was 2 million 102 thousand 907*. <http://www.kocaeli.gov.tr/kocaelinin-nufusu-2-milyon-102-bin-907-oldu>
- Grange, S. K., Lewis, A. C., & Carslaw, D. C. (2016). Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics. *Atmospheric Environment*, 145, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.016>
- Habeebullah, T. M., Munir, S., Zeb, J., & Morsy, E. A. (2022). Modelling the effect of COVID-19 lockdown on air pollution in Makkah, Saudi Arabia with a supervised machine learning approach. *Toxics*, 10(5), Article 225. <https://doi.org/10.3390/toxics10050225>
- Huzlík, J., Hegrová, J., Effenberger, K., Ličbinský, R., & Brtnický, M. (2020). Air quality in Brno City parks. *Atmosphere*, 11(5), Article 510. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11050510>
- Iskandaryan, D., Di Sabatino, S., Ramos, F., & Trilles, S. (2022). Exploratory analysis and feature selection for the prediction of nitrogen dioxide. *AGILE: GIScience Series*, 3(2), 1–11. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-3-6-2022>
- Lamprecht, C. (2023). *Meteorological weather and climate data* [Data set]. <https://meteostat.net/en/station/LTBQ0?t=2021-01-01/2021-12-31>
- Lv, Y., Tian, H., Luo, L., Liu, S., Bai, X., Zhao, H., Lin, S., Zhao, S., Guo, Z., Xiao, Y., & Yang, J. (2022). Meteorology-normalized variations of air quality during the COVID-19 lockdown in three Chinese megacities. *Atmospheric Pollution Research*, 13(6), Article 101452. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101452>
- Marangoz, M., & Akçam, G. (2023). The effect of the COVID-19 pandemic on the sectors: A conceptual evaluation. *Hitit Journal of Economics and Politics*, 3(1), 20–46. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1366522>
- Matthias, V., Quante, M., Arndt, J. A., Badeke, R., Fink, L., Petrik, R., Feldner, J., Schwarzkopf, D., Link, E. M., Ramacher, M. O. P., & Wedemann, R. (2021). The role of emission reductions and the meteorological situation for air quality improvements during the COVID-19 lockdown period in central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(18), 13931–13971. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13931-2021>
- Ministry of Environment Urbanization and Climate Change. (2023). *National Air Quality Monitoring Network*. [Data set]. https://sim.csb.gov.tr/STN/STN_Report/StationDataDownloadNew
- Ngo, T. H., Pan, W. C., & Waits, A. (2022). Reduction in aviation volume due to COVID-19 and changes in air pollution near the international airport in Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(4), 1–9. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210297>
- Oleniacz, R., Gorzelnik, T., & Bogacki, M. (2021). Impact of urban, suburban and industrial background on air pollution levels of dust substances in north-eastern part of Krakow (Poland). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 642(1), Article 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/642/1/012013>
- R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.2.2). R Foundation for Statistical Computing.
- Republic of Turkey Ministry of Industry and Technology. (2019). *Kocaeli province industry status report*. <https://kosano.org.tr/wp-content/uploads/2020/02/KSO-faaliyet-raporu-2019.pdf>
- Ropkins, K., & Carslaw, D. C. (2012). Openair – Data analysis tools for the air quality community. *R Journal*, 4(1), 20–29. <https://doi.org/10.32614/rj-2012-003>
- Ropkins, K., Tate, J. E., Walker, A., & Clark, T. (2022). Measuring the impact of air quality related interventions. *Environmental Science: Atmospheres*, 500–516. <https://doi.org/10.1039/d1ea00073j>
- Rosianu, A. M., Leru, P. M., Stefan, S., Iorga, G., & Marmureanu, L. (2022). Six-year monitoring of atmospheric pollen and major air pollutant concentrations in relation with meteorological factors in Bucharest, Romania. *Romanian Reports in Physics*, 74(2), 1–15.
- Shen, F., Hegglin, M. I., Luo, Y., Yuan, Y., Wang, B., Flemming, J., Wang, J., Zhang, Y., Chen, M., Yang, Q., & Ge, X. (2022). Disentangling drivers of air pollutant and health risk changes during the COVID-19 lockdown in China. *Climate and Atmospheric*

- Science, 5(1), Article 54. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00276-0>
- Sidjabat, F. M., Hakiki, R., & Wikaningrum, T. (2019). Air quality monitoring in industrial estate (case study: Jababeka Industrial Estate, Cikarang). *Journal of Environmental Engineering and Waste Management*, 4(2), 50–58.
- Szulecka, A., Oleniacz, R., & Rzesutek, M. (2017). Functionality of openair package in air pollution assessment and modeling – A case study of Krakow. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 28(2), 22–27. <https://doi.org/10.1515/oszn-2017-0009>
- Uria-Tellaetxe, I., & Carslaw, D. C. (2014). Conditional bivariate probability function for source identification. *Environmental Modelling and Software*, 59, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>
- Wang, M., Zhang, Z., Yuan, Q., Li, X., Han, S., Lam, Y., Cui, L., Huang, Y., Cao, J., & Lee, S. C. (2022). Slower than expected reduction in annual PM_{2.5} in Xi'an revealed by machine learning-based meteorological normalization. *Science of the Total Environment*, 841, Article 156740. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156740>
- World Health Organization. (2022). *Air pollution*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- World Health Organization. (2025). *WHO COVID-19 dashboard*. <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases?m49=001&n=o>
- Yener, İ., & Demirarslan, K. O. (2022). Determining the factors affecting air quality in Marmara, Turkey, and assessing it using air quality indices. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(2), 383–395. <https://doi.org/10.21324/dacd.1081167>
- Yener, İ., & Demirarslan, K. O. (2024). Did Turkey experience reductions in air pollution during the COVID-19 lockdown and partial lockdown? *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 179–191. <https://doi.org/10.21324/dacd.1339741>
- Yorkor, B., Leton, T. G., & Ugbebor, J. N. (2021). Analysis of temporal variations of air pollutant concentrations in Ogoni Area, Niger Delta Region, Nigeria. *Asian Journal of Environment & Ecology*, November, 63–73. <https://doi.org/10.9734/ajee/2021/v16i430260>
- Yulinawati, H., Khairani, T., & Siami, L. (2021). Analysis of indoor and outdoor particulate (PM_{2.5}) at a women and children's hospital in West Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 737(1), Article 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/737/1/012067>

Evaluating the Impact of Naturel Disaster Costs on Macroeconomic Indicators: Evidence from BRICS-T Countries

Ceren Pehlivan^{1,*} 

¹Munzur Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, 62100, Tunceli.

Abstract

Natural disasters vary in their impact and shape. Following a calamity, countries may incur social, economic, and political losses. Losses have both short- and long-term consequences that affect a wide range of topics. This study attempted to evaluate the theoretical and empirical influence of costs incurred during natural catastrophes on macroeconomic indices. The study used macro indicators such as growth, unemployment, inflation, expenditure, and payment. Each variable was treated as its own model. The study covered the years 2000 to 2022. The association between natural disaster expenses and macroeconomic variables was investigated using panel analysis. Firstly, descriptive statistics for the variables were used in the analysis. The next step was to do the required causality test using horizontal section and delta tests. In accordance with the findings, the *Konya causality test* was used. This test reveals a one-way relationship between the natural disaster variable and the growth variable, a one-way relationship from the natural disaster variable to the unemployment variable, a bidirectional relationship between the natural disaster and investment expenditure variables, a one-way relationship between the natural disaster variable and the expenditure variable, and a unidirectional relationship between the natural disaster variable and the It was established that a directional connection existed.

Keywords

Natural Disaster, Macro Economic Indicators, BRICS-T

Doğal Afet Maliyetlerinin Makro Ekonomik Göstergeler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi: BRICS-T Ülkelerinden Kanıtlar

Özet

Doğal afetler etkisi ve oluşum biçimiyle farklılık göstermektedir. Yaşanan afetler sonrasında yaşanan gelişmeler sosyal, ekonomik ve siyasi açıdan ülkelerin kayıplar yaşamasına yol açabilmektedir. Kayıpların kısa ve uzun dönemli etkileri birçok alanda ve başlıkta etkisini göstermektedir. Bu çalışmada doğal afet sonrasında oluşan maliyetlerin makro ekonomik göstergeler üzerindeki etkisi hem teorik hem de ampirik olarak araştırılmaya çalışılmıştır. Makro değişken olarak çalışmada büyüme, işsizlik, enflasyon, harcama ve ödeme değişkenleri kullanılmıştır. Her değişken için ayrı ayrı modeller oluşturulmuştur. Çalışmada 2000-2022 yılları baz alınmıştır. Panel analiziyle doğal afet maliyetlerinin makro değişkenler arasındaki ilişkisi incelenmiştir. Analizde ilk olarak değişkenlere ilişkin tanımlayıcı istatistiklere yer verilmiştir. Sonrasında yatay kesit ve delta testi yapılarak uygun nedensellik testinin yapılması amaçlanmıştır. Çıkan sonuçlar doğrultusunda Konya nedensellik testi yapılmıştır. Bu test sonucunda doğal afet değişkeni ile büyüme değişkeni arasında tek yönlü, doğal afet değişkeninden işsizlik değişkenine doğru tek yönlü, doğal afet ile yatırım harcaması değişkenleri arasında çift yönlü, doğal afet değişkeni ile harcama değişkeni arasında tek yönlü ve doğal afet değişkeni ile enflasyon değişkeni arasında tek yönlü bir bağlantının olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Doğal Afet, Makro Ekonomik Göstergeler, BRICS-T

1. Introduction

A natural disaster, by definition, has a structure that can have a detrimental impact on people's lives by causing physical, economic, and social damage. Furthermore, natural catastrophes are viewed as unexpected, sudden, and unusual events for which society's coping capacity is insufficient due to their structural characteristics. There are several types of natural disasters. But when we examine how it happens, we find that geological events like earthquakes and landslides, as well as meteorological phenomena like storms and floods, seem to be the beginning. Natural disasters can strike rapidly, sometimes without notice. This disaster might develop gradually over several days, weeks, months, or even years (Dikmen, 2019). Although natural disasters have different causes, their effects on the economy are long-lasting and effective.

The first effect that natural disasters are thought to have on the economy is growth. Natural disasters can cause a drop in supply as well as an increase in demand for certain items. This may result in disasters having a short-term impact on local prices. This circumstance, and its consequences in the short term, can harm productive physical and human resources. As a result, the economy's growth rate is likely to slow down (Dikmen, 2019). Nonetheless, a variety of macroeconomic indices may be impacted by natural disasters. Unemployment is one of these. Natural disaster losses are one example of market-based adverse economic impacts. Classifying these losses reveals that they are composed of two types of consequences: direct effects, which include the actual physical damage of structures, goods, and natural resources, and indirect effects, which include economic interruptions and temporary unemployment brought on by this destruction (National Research Council, 1999).

Natural disasters can happen in a variety of ways. These occurrences demonstrate the immediate and long-term impacts on living things, nations, and economies of natural disasters including earthquakes, volcanic eruptions, severe temperatures, droughts, floods, and tsunamis brought on by geophysical, meteorological, hydrological, and climate change. Thus, both present and future generations are impacted by natural disasters in both the short and long term. Natural catastrophes, losses, and developments have been found to affect the nation's economies in areas including poverty, development, and economic growth. Due to globalization, these consequences have started to spread quickly around the world. Consequently, it calls into question whether natural disasters have an impact on national economy, particularly budget balances (Keyifli, 2021). Expenses to make up for the material losses and destruction that occur following natural catastrophes rise, leading to a growth in the amount of money paid to cover the losses. Government monetary and fiscal indicators show this state of affairs.

It would create a significant incentive for politicians to stimulate the economy by enacting more expansionary fiscal and monetary policies following a catastrophe. To do this, governments can exert enormous political pressure on the central bank to loosen monetary policy following a natural calamity. However, in countries with an independent central bank, monetary policy must withstand political pressure. As a result, in countries with an autonomous central bank, much of the disaster impact is absorbed through lower output, which then stabilizes the price level. whereas in countries with a central bank that is more susceptible to political influence, output would be encouraged more due to electoral considerations, resulting in a higher short-term price level. The problem of monetary policy delegation is framed as a two-part game between the government and the central bank. During the first step, the government selects the institutional design of the central bank. The second stage involves the implementation of real monetary and fiscal policies. However, delegating monetary policy to an independent central bank might result in a conflict of interest between monetary authorities and the central government, as economic goals are not always congruent. It becomes particularly evident following a negative supply shock, such as a natural disaster. Supply shocks enhance producers' marginal costs, resulting in short-term output shortages. For electoral reasons, the administration wishes to pursue an expansionary monetary policy in order to boost economic recovery following the shock. As a result, the majority of the supply shock will be mitigated by a rise in inflation. In contrast, the central bank chooses to pursue a more contractionary policy to keep prices stable and low following a natural disaster since it is thought to be more conservative than the government in preserving low inflation. As a result, a sufficiently independent central bank will absorb the shock mostly through a reduction in output. The outcome of this policy shift is ultimately determined by the degree of devolution of monetary authority and the central bank governors' stance toward inflation (Klomp & Sseruyange, 2021).

In the present investigation, we attempted to investigate the economic consequences of natural disasters. The first portion of the study, which is divided into three parts, attempts to contain conceptual definitions and theoretical material. The second component of the investigation includes subject-specific literature research. In the final section, the research was experimentally evaluated and the findings were interpreted. The study sought to explore natural disasters both conceptually and empirically, using broad categories rather than a single economic consequence. The study is intended to contribute to the literature because of how it is conducted, the methods employed, and the extent of the variables.

2. Literature Review

Noy (2009) investigated the macroeconomic consequences of natural disasters in his research. In his research, he discovered that it had a statistically significant negative influence on the macroeconomy in the short run. He also discovered that more costly occurrences cause large output slowdowns. Interestingly, developing countries and smaller economies experience considerably greater output drops following a disaster of comparable size than industrialized countries or larger economies.

Akar (2013) conducted study on the influence of natural catastrophes on Türkiye macroeconomics and public finances. His research revealed that natural disasters have a significant economic impact. Furthermore, the study determined that earthquakes were the primary cause of natural disasters' economic impact in Türkiye.

Klomp and Valchx (2014) investigated the association between per capita economic growth and natural disasters using over 750 projections. The study performed a meta-regression analysis. The investigation revealed that natural disasters have a negative and genuine effect on economic growth, which has increased over the analyzed time. However, variations were found between the catastrophes included in the analysis and the country sample used. Climate disasters in poor countries have been determined to have the most detrimental influence on economic growth.

Klomp (2016) investigated the effects of large-scale natural disasters on economic development. The analysis was complicated by the poor quality of data on GDP per capita in low-income nations, as well as the fact that these countries account for more than 90% of all disasters that occur globally. To address this issue, data from satellite photos of night light intensity in a certain country or region was employed, which has been proven to be substantially linked with per capita income. The analysis revealed that the majority of the economic repercussions of natural disasters were explained by regional effects, but this influence faded over time.

Strulik and Trimborn (2018) explored how natural disasters affect the economy. According to the findings of the study, when natural disasters damage durable consumer goods (cars, etc.), GDP grows above its pre-shock levels.

Panwar and Sen (2019) revisited the link between natural disasters and economic growth in their research. They wanted to contribute to a relatively restricted literature on the short- to medium-term economic and sectoral impacts of natural catastrophes (up to 5 years). They also investigated if disaster impacts vary with a country's level of development. Using panel data from 102 (29 developed and 73 developing) nations from 1981 to 2015, the growth effects of four types of natural catastrophes, namely flood, drought, storm, and earthquake, were explored using the system generalized method of moments (GMM) technique. Pursuant to the study's findings, natural catastrophes have varying economic repercussions across economic sectors depending on the type and severity of the event.

Keyifli (2021) evaluated the economic impact of natural disasters in OECD countries. A study on the association between budget deficits and natural disasters was undertaken from 2000 to 2018. The analysis revealed no significant link between the existing factors.

Cavallo et al. (2022) looked into the economic consequences of devastating natural disasters in their study. The study included an investigation of the years 1970 to 2019. An analysis was performed on the panel data set. According to the findings of the study, the impact of natural catastrophes on growth is an economic development issue, with impoverished countries suffering the most.

Güneş (2023) evaluated the influence of natural disasters on the direct, indirect, and macroeconomic levels. His research found that the expenses and damages caused by natural disasters had a detrimental impact on economic growth, spending, and international trade.

Marangoz & İzci (2023) investigated the impact of natural disasters on society, economy, and the environment. His research looked into the developments that occurred following the Kahramanmaraş earthquake on February 6, 2023, as well as the impact of these developments. The investigation yielded outcomes that were beneficial across all of the areas mentioned.

When looking at the literature on the relationship between natural disasters and growth, it is clear that not only a single country, but also groupings of countries, are considered. In the studies, the natural disaster variable was investigated utilizing variables such as the number of persons, costs, and impacts. The association between natural disasters and growth was studied in this study using the variable for natural disaster-related costs. Given the findings, the study is likely to contribute to the literature in terms of time period, current analysis methodologies, and approach to the issue.

3. Data Set, Method, and Methodology

The study's goal is to look at the association between macroeconomic variables and the expenses of natural disasters in BRICS-T countries from 2000 to 2022. The models that will be investigated in this context are the following:

$$\begin{aligned}\text{Model 1: } LNGDP_{it} &= \beta + \beta_1 LNDISASTER_{it} + e_{it} \\ \text{Model 2: } LNUNEMPLOYMENT_{it} &= \delta + \delta_1 DISASTER_{it} + u_{it} \\ \text{Model 3: } LNEXPENSE_{it} &= \gamma + \gamma_t DISASTER_{it} + v_{it} \\ \text{Model 4: } LNIPAYMENTS_{it} &= \theta + \theta_t DISASTER_{it} + w_{it} \\ \text{Model 5: } LNINFLATION_{it} &= \alpha + \alpha_t DISASTER_{it} + \varepsilon_{it}\end{aligned}$$

The study's growth and disaster variables were logarithmically transformed. The reason for taking the logarithm is that taking the logarithm of an exponentially growing series results in linear growth. Taking the logarithm stabilizes the variance and reduces the effects of outliers. (Türe & Akdi, 2005). Table 1 provides detailed information on the variables studied within the scope of the models:

Table 1: Variables and sources

Sembol	Variables	Sources
<i>LNGDP</i>	GDP (Constant 2005 \$)	World Bank
<i>UNEMPLOYMENT</i>	Unemployment, Total (% of Total Labor Force)	World Bank
<i>EXPENSE</i>	Expense (% of GDP)	World Bank
<i>IPAYMENTS</i>	Interest Payments (% of Expense)	World Bank
<i>INFLATION</i>	Annual (%)	World Bank
<i>LNDISASTER</i>	Total Cost of Damage Due to Disaster (Million \$)	EM-DAT

Table 2 shows the descriptive statistics of the series studied in the models:

Table 2: Descriptive statistics

	Mean	Median	Std. Dev.	Skewness	Kurtosis	Jarque-Bera	Prob.
<i>LNGDP</i>	27.752	27.668	1.049	0.826	3.235	16.027	0.000***
<i>UNEMPLOYMENT</i>	10.173	8.002	6.930	1.340	3.671	43.912	0.000***
<i>EXPENSE</i>	28.603	30.671	7.388	-0.581	2.368	10.054	0.006***
<i>IPAYMENTS</i>	12.011	10.800	7.104	0.844	3.274	16.822	0.000***
<i>INFLATION</i>	9.701	7.351	11.017	4.574	31.518	5157.885	0.000***
<i>LNDISASTER</i>	26.393	25.220	2.922	1.220	3.356	34.975	0.000***

Note: If the skew value is < 0 ; skewed to the left, if the Skewness value is > 0 ; is skewed to the right. If the kurtosis value is < 3 ; flattened, if kurtosis value is > 3 ; is upright. The threshold of significance level at the 1% level is indicated by the *** character.

Pursuant to the descriptive statistics, *INFLATION* and *UNEMPLOYMENT* variables stand out for their significant variation and right-skewed distributions, whereas *LNGDP* and *LNDISASTER* have a narrower range and closer to symmetrical distributions. The expense variable stands out from others due to its negative skewness and flat distribution. The Jarque-Bera test results show that the distributions of each variable are not normal.

The research endeavor began by determining the cross-sectional dependencies of the variables through analysis. In accordance with the findings, the goal was to determine the link between the variables and the direction of that relationship. For this objective, the [Kónya \(2006\)](#) causality test was used.

[Kónya \(2006\)](#) created this assessment, which leverages [Zellner's \(1962\)](#) seemingly unrelated regression (SUR) estimation approach to examine simultaneous correlations like cross-section dependency. This test offers bootstrap critical values, independent of unit root and cointegration, and individual discoveries through the Wald test. In other words, results are collected for both individuals and the entire panel. Given the assumption that the panel is diverse, Granger causality analysis can be performed individually for each member. This test does not require a shared hypothesis for all panel units, nor does it require any previous knowledge other than the amount of lags ([Kónya, 2006](#)). The SUR structure utilized for this test is as follows:

$$Y_{1,t} = \alpha_{1,1} + \sum_{l=1}^{mly_1} \beta_{1,1,l} Y_{1,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_1} \delta_{1,1,l} X_{1,t-l} + \varepsilon_{1,1,t} \quad (1)$$

$$Y_{2,t} = \alpha_{1,2} + \sum_{l=1}^{mly_1} \beta_{1,2,l} Y_{2,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_1} \delta_{1,2,l} X_{2,t-l} + \varepsilon_{1,2,t} \quad (2)$$

$$Y_{N,t} = \alpha_{1,N} + \sum_{l=1}^{mly_1} \beta_{1,N,l} Y_{N,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_1} \delta_{1,N,l} X_{N,t-l} + \varepsilon_{1,N,t} \quad (3)$$

$$X_{1,t} = \alpha_{2,1} + \sum_{l=1}^{mly_2} \beta_{2,1,l} Y_{1,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_2} \delta_{2,1,l} X_{1,t-l} + \varepsilon_{2,1,t} \quad (4)$$

$$X_{2,t} = \alpha_{2,2} + \sum_{l=1}^{mly_2} \beta_{2,2,l} Y_{2,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_2} \delta_{2,2,l} X_{2,t-l} + \varepsilon_{2,2,t} \quad (5)$$

$$Y_{N,t} = \alpha_{2,N} + \sum_{l=1}^{mly_2} \beta_{2,N,l} Y_{N,t-l} + \sum_{l=1}^{mlx_2} \delta_{2,N,l} X_{N,t-l} + \varepsilon_{2,N,t} \quad (6)$$

The term l refers to the length of the delay. The Granger causality test is performed in the SUR system. Each equation is from a different country and was determined with distinct samples. All equations use the same variables, but the observations vary. Cross-sectional dependence tests possible linkages between individual regressions ([Konat & Fendoğlu, 2021](#)).

4. Findings

For method selection in panel data analysis, cross-sectional dependence and homogeneity must be determined. In this study, Breusch-Pagan LM test was used since $T > N$ for BRICS-T countries. For homogeneity, the Adjusted Delta (Δ_{adj}) test was preferred to test homogeneity for annual data between 2000-2022. Table 3 illustrates the results of the cross-sectional dependency test for the variables studied:

Table 3: Cross-section dependency results of variables

		Statistical Value	Prob.
LNGDP	Breusch-Pagan LM	317.802	0.000***
	Pesaran scaled LM	55.284	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	55.147	0.000***
	Pesaran CD	17.82	0.000***
UNEMPLOYMENT	Breusch-Pagan LM	58.568	0.000***
	Pesaran scaled LM	7.954	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	7.818	0.000***
	Pesaran CD	0.969	0.332
EXPENSE	Breusch-Pagan LM	105.47	0.000***
	Pesaran scaled LM	16.517	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	16.381	0.000***
	Pesaran CD	5.544	0.000***
IPAYMENTS	Breusch-Pagan LM	56.823	0.000***
	Pesaran scaled LM	7.636	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	7.499	0.000***
	Pesaran CD	1.559	0.118
INFLATION	Breusch-Pagan LM	37.4	0.000***
	Pesaran scaled LM	4.09	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	3.953	0.000***
	Pesaran CD	4.418	0.000***
LNDISASTER	Breusch-Pagan LM	250.033	0.000***
	Pesaran scaled LM	42.911	0.000***
	Bias-corrected scaled LM	42.775	0.000***
	Pesaran CD	15.665	0.000***

Note: The threshold of significance level at the 1% level is indicated by the *** character.

When Table 3 is reviewed, the variables exhibit cross-sectional dependence. Table 4 shows the delta test results for cross-sectional dependency and homogeneity testing of the models developed within the scope of the study.

Table 4: Cross-section dependency and test results of models

		Test Statistics	Prob.	
Cross-Section Dependency	$LNGDP_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	7.817	0.000***	
	$UNEMPLOYMENT_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	8.595	0.000***	
	$IPAYMENTS_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	8.199	0.000***	
	$EXPENSE_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	2.581	0.009***	
	$INFLATION_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	12.147	0.000***	
Delta Test		Δ	19.791	0.000***
	$LNGDP_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	Δ_{adj}	21.224	0.000***
		Δ	8.998	0.000***
	$UNEMPLOYMENT_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	Δ_{adj}	9.649	0.000***
		Δ	8.058	0.000***
	$IPAYMENTS_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	Δ_{adj}	8.641	0.000***
		Δ	15.53	0.000***
	$EXPENSE_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	Δ_{adj}	16.654	0.000***
		Δ	10.402	0.000***
	$INFLATION_{it} = f(LNDISASTER_{it})$	Δ_{adj}	10.431	0.000***

Note: The threshold of significance level at the 1% level is indicated by the *** character.

When Table 4 is reviewed, it is clear that the models exhibit cross-sectional dependence and heterogeneity. Following the cross-sectional dependence and Delta tests, the Kónya causality test was used. This test requires a common hypothesis for all panel units and can be done without prior knowledge of unit root or cointegration. Tables 5–9 reflect the results of the Kónya causality analysis.

Table 5: Causal relationship between economic growth and natural disaster

H_0	Country	Wald Statistics	Prob.	Critical Values			Panel Fisher Statistics
				1%	5%	10%	
$LNDISASTER \rightarrow LNGDP$	Brazil	17.331	0.009***	9.842	7.199	6.28	25.299 (0.025)**
	Russia	3.402	0.569	12.178	9.197	7.694	
	India	0.592	0.809	10.054	5.68	4.109	
	China	51.139	0.025**	67.913	47.494	40.385	
	South Africa	0.347	0.921	15.755	10.178	7.288	
	Türkiye	0.105	0.972	22.037	14.539	11.605	
$LNGDP \rightarrow LNDISASTER$	Brazil	0.014	0.932	6.862	4.346	3.19	7.687 (0.809)
	Russia	1.097	0.876	15.708	10.573	8.747	
	India	3.086	0.151	11.487	7.107	4.709	
	China	1.854	0.495	25.956	14.995	10.267	
	South Africa	9.692	0.109	23.422	13.259	10.252	
	Türkiye	8.323	0.212	19.184	13.577	10.751	

Note: ** and *** represent significance at the 5% and 1% levels, respectively.

Table 5 illustrates that there is unidirectional causality between the natural catastrophe variable and the growth variable. When evaluated individually, it is clear that there is a one-way causal relationship between the natural catastrophe variable and the growth variable in both Brazil and China. Economic activity may be disrupted due to the destruction or damage of assets such as infrastructure, houses, workplaces, and agricultural land. Damage to production facilities and supply lines causes output losses. Similarly, consumer purchasing may be interrupted by a calamity. Increased expenses following natural disasters may encourage people and institutions to save. Experiencing costs may slow growth rates.

Table 6: Causal relationship between unemployment and natural disaster

H_0	Country	Wald Statistics	Prob.	Critical Values			Panel Fisher Statistics
				1%	5%	10%	
$LNDISASTER \rightarrow UNEMPLOYMENT$	Brazil	2.010	0.128	5.339	3.265	2.396	24.462 (0.018)**
	Russia	15.567	0.005***	12.192	7.201	5.705	
	India	3.590	0.106	7.020	4.635	3.674	
	China	0.722	0.489	7.122	3.952	2.920	
	South Africa	2.484	0.250	10.211	6.035	4.387	
	Türkiye	0.297	0.588	5.567	3.266	2.336	
$UNEMPLOYMENT \rightarrow LNDISASTER$	Brazil	0.000	0.997	4.718	3.047	2.350	7.346 (0.834)
	Russia	13.499	0.139	24.216	17.804	14.851	
	India	0.396	0.598	4.139	2.903	2.082	
	China	2.730	0.657	14.390	10.058	8.182	
	South Africa	0.315	0.474	4.768	2.518	1.754	
	Türkiye	0.001	0.984	8.705	4.715	3.548	

Note: ** and *** represent significance at the 5% and 1% levels, respectively.

Table 6 illustrates that there is unidirectional causality from the natural catastrophe variable to the unemployment variable. When evaluated separately, it is clear that there is a one-way causal relationship between the natural catastrophe variable and the unemployment variable in Russia. Closing or damaging workplaces during a natural disaster may raise unemployment rates. This can lead to lower household incomes and a reduction in overall economic activity.

Table 7: Causal relationship between investment expenditures and natural disaster

H_0	Country	Wald Statistics	Prob.	Critical Values			Panel Fisher Statistics
				1%	5%	10%	
<i>LNDISASTER</i> → <i>IPAYMENTS</i>	Brazil	2.248	0.356	12.587	8.116	5.749	42.476 (0.000)***
	Russia	0.605	0.495	6.396	3.84	2.82	
	India	10.931	0.017**	13.906	5.289	2.186	
	China	26.337	0.000***	15.774	9.263	6.834	
	South Africa	7.015	0.010**	6.986	4.018	2.763	
	Türkiye	0.084	0.962	12.605	7.68	6.059	
<i>IPAYMENTS</i> → <i>LNDISASTER</i>	Brazil	1.944	0.135	5.906	3.466	2.387	32.469 (0.009)***
	Russia	1.676	0.060*	3.142	1.865	1.283	
	India	0.039	0.917	15.915	10.531	8.058	
	China	0.197	0.784	16.313	9.443	6.909	
	South Africa	0.419	0.354	3.263	2.037	1.361	
	Türkiye	0.004	0.951	5.198	2.908	2.035	

Note: ** and *** represent significance at the 5% and 1% levels, respectively.

Table 7 shows that there is a bidirectional causal relationship between the natural catastrophe and investment expenditure variables. When evaluated individually, it is clear that the natural disaster variable has a unidirectional causal relationship with the investment spending variable in India, China, and South Africa. In Russia, there is one-way correlation between investment expenditures and natural disasters. Following natural disasters, significant investment may be necessary to rebuild the devastated areas. The calamity requires the reconstruction of investments, infrastructure, housing, public services, and workplaces. This condition produces an increase in investment expenditures.

Table 8: Causal relationship between expenditure and natural disaster

H_0	Country	Wald Statistics	Prob.	Critical Values			Panel Fisher Statistics
				1%	5%	10%	
<i>LNDISASTER</i> → <i>EXPENSE</i>	Brazil	1.112	0.278	6.949	4.151	2.922	17.251 (0.084)*
	Russia	1.750	0.211	8.438	4.595	3.033	
	India	0.200	0.687	9.06	4.563	2.95	
	China	0.004	0.967	11.633	7.165	4.843	
	South Africa	2.148	0.387	10.261	5.684	4.631	
	Türkiye	0.666	0.394	7.943	3.999	2.537	
<i>EXPENSE</i> → <i>LNDISASTER</i>	Brazil	8.787	0.31	31.69	18.736	15.078	10.203 (0.598)
	Russia	10.029	0.158	21.57	14.273	11.708	
	India	1.376	0.284	15.895	6.547	3.603	
	China	3.387	0.649	20.554	13.555	10.318	
	South Africa	0.457	0.704	10.518	6.025	4.393	
	Türkiye	0.002	0.958	5.963	3.565	2.432	

Note: * represent significance 10% level.

Table 8 illustrates that there is unidirectional causality between the natural catastrophe variable and the expenditure variable. To mitigate the effects of natural disasters, public, business, and personal expenses may rise. Short and long-term expenditures may be increased to compensate for the consequent output and resource losses.

Table 9: Causal relationship between inflation and natural disaster

H_0	Country	Wald Statistics	Prob.	Critical Values			Panel Fisher Statistics
				1%	5%	10%	
$LNDISASTER \rightarrow EXPENSE$	Brazil	1.246	0.279	9.699	5.091	3.142	17.251 (0.084)*
	Russia	2.082	0.285	13.981	7.641	5.130	
	India	1.568	0.596	21.974	13.552	10.149	
	China	0.294	0.644	12.669	6.523	4.154	
	South Africa	3.565	0.273	17.434	10.489	7.433	
	Türkiye	26.333	0.000***	3.901	2.144	1.440	
$EXPENSE \rightarrow LNDISASTER$	Brazil	1.089	0.426	10.482	6.129	4.466	10.203 (0.598)
	Russia	1.074	0.551	20.128	9.793	6.759	
	India	4.156	0.285	15.345	9.540	7.688	
	China	0.329	0.617	7.835	4.352	3.206	
	South Africa	3.423	0.491	23.210	12.701	10.098	
	Türkiye	1.759	0.138	5.358	2.927	2.110	

Note: The threshold of significance level at the 1% level is indicated by the *** character.

Table 9 illustrates that there is unidirectional causality between the natural catastrophe variable and the inflation variable. When studied separately, it is clear that there is a unidirectional causality between the natural catastrophe variable and the inflation variable in Türkiye. Following natural disasters, production facilities, agricultural fields, and supply systems may suffer damage. This may cause a decline in the supply of goods and services. The supply shock in the economy has the potential to produce rapid price increases in important sectors such as energy and construction materials, particularly the food industry. Furthermore, rehabilitation and repair activities following natural catastrophes may enhance demand for specific goods and services based on need. More specifically, demand for construction supplies, gasoline, and labor may surge, causing costs to soar.

5. Conclusion

Natural disasters differ in terms of how they happen. These disparities have various implications for the social structure and economy. Following natural disasters, several negative emotions arise, both personally and socially. Individuals and institutions face quick and long-term challenges as a result of the costs incurred, which vary according to the magnitude of the destruction. These impacts cause social, political, and economic concerns. In this work, we attempted to investigate the economic consequences of natural disaster costs. The study attempted to analyze the effect of the costs incurred as a result of natural disasters on chosen macro variables using both theoretical and empirical methodologies. The investigation, which conducted a panel analysis on BRICS-T countries, covered the years 2000 to 2022. The evaluation of the research began with descriptive statistics on the variables. The next step was to do the required causality test using horizontal section and delta tests. In accordance with the findings, the *Kónya* (2006) causality test was used. This test revealed that the natural disaster variable had a unidirectional relationship with growth, unemployment, expenditure, and inflation variables, as well as a bidirectional relationship with investment expenditure variables.

Natural disasters are a phenomenon that occurs for geopolitical causes and necessitates early planning because the time is unpredictable. As a result, countries must perform preliminary research on the solution to the problem within the context of their particular structural peculiarities. Problems must be detected and mitigated through proactive safeguards and structural adjustments. Natural disaster costs have a direct and indirect impact on the country's economy. To mitigate this impact, countries should include essential steps in their reports and future plans. Preventative measures will save money and reduce physical damage. Precaution strategies should be created and implemented in collaboration with specialists to avert natural disasters. The construction of earthquake-resistant buildings, the closure of flood and landslide-prone areas, the preservation of forests, and measures against widespread disasters should all be implemented when the causes of natural disasters have been identified.

References

- Akar, S. (2013). Doğal afetlerin kamu maliyesine ve makro ekonomiye etkileri: Türkiye değerlendirmesi. *Journal of Management and Economics Research*, 11(21), 185–206.
- Cavallo, E. A., Becerra, O., & Acevedo, L. (2022). *The impact of natural disasters on economic growth* (IDB Working Paper Series No. IDB-WP-1257). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0003683>
- Dikmen, A. T. (2019). *Türkiye’de doğal afetlerin makroekonomik etkileri* [Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>

- Güneş, İ. (2023). Afetler ve afet ekonomisi: Teorik bir inceleme. In S. Berkün (Ed.), *Sosyal, beşeri ve idari bilimler alanında uluslararası araştırmalar* (pp. 149–167). Eğitim Yayıncılık.
- Keyifli, N. (2021). OECD ülkelerinde doğal afetlerin bütçe açıkları üzerine etkisi: Dinamik panel veri analizi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 43, 303–318.
- Klomp, J., & Valckx, K. (2014). Natural disasters and economic growth: A meta-analysis. *Global Environmental Change*, 26, 183–195.
- Klomp, J. (2016). Economic development and natural disasters: A satellite data analysis. *Global Environmental Change*, 36, 67–88.
- Klomp, J., & Sseruyange, J. (2021). Earthquakes and economic outcomes: Does central bank independence matter? *Open Economies Review*, 32(2), 335–359.
- Konat, G., & Fendoğlu, E. (2021). Covid-19 salgınının makroekonomik etkileri: Ekonometrik bir analiz. In A. Aksoy, A. Karapınar, F. Zaif, & B. Aydın (Eds.), *Covid-19 pandemisinin işletme ve ekonomi alanında etkileri: Seçme yazılar* (pp. 255–272). Gazi Kitabevi.
- Kónya, L. (2006). Exports and growth: Granger causality analysis on OECD countries with a panel data approach. *Economic Modelling*, 23, 978–992. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2006.04.008>
- Marangoz, M., & İzci, Ç. (2023). Doğal afetlerin ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerinin 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler bağlamında girişimciler açısından değerlendirilmesi. *Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 24(52), 1–30.
- National Research Council. (1999). *The impacts of natural disasters: A framework for loss estimation*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/6425>
- Noy, I. (2009). The macroeconomic consequences of disasters. *Journal of Development Economics*, 88(2), 221–231.
- Panwar, V., & Sen, S. (2019). Economic impact of natural disasters: An empirical re-examination. *Margin: The Journal of Applied Economic Research*, 13(1), 109–139.
- Strulik, H., & Trimborn, T. (2019). Natural disasters and macroeconomic performance. *Environmental and Resource Economics*, 72, 1069–1098.
- Türe, H., & Akdi, Y. (2005, 26–27 Mayıs). *Mevsimsel kointegrasyon: Türkiye verilerine bir uygulama* [Sempozyum Bildirisi]. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu, İstanbul Üniversitesi, Türkiye.
- Zellner, A. (1962). An efficient method of estimating seemingly unrelated regression equations and tests of aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, 57(298), 500–509. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1962.10480664>

Appendix 1: CADF-CIPS Unit Root Tests Results

Variables	Countries	Lags	CADF Stat.		CIPS Stat.	
			I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
LNGDP	Brazil	5	-3.525	-6.519**	-2.557	-8.32***
	Russia	2	-2.047	-5.456**		
	India	2	-1.029	-7.082**		
	China	4	-3.19	-4.038***		
	South Africa	2	-2.906	-6.945**		
	Türkiye	2	-2.646	-7.879***		
UNEMPLOYMENT	Brazil	2	-1.834	-5.083**	-1.883	-6.614***
	Russia	3	-1.923	-5.614**		
	India	2	-2.497	-6.325**		
	China	2	-3.428	-5.593**		
	South Africa	4	-1.437	-5.284**		
	Türkiye	5	-0.179	-6.784**		
EXPENSE	Brazil	5	-1.486	-5.834**	-2.123	-5.175***
	Russia	2	-1.468	-4.911**		
	India	2	-3.326	-5.111**		
	China	2	-1.95	-4.068*		
	South Africa	2	-2.337	-4.671*		
	Türkiye	2	-2.173	-5.556**		
IPAYMENTS	Brazil	5	-1.99	-6.903**	-2.362	-8.396***
	Russia	3	-1.481	-5.333**		
	India	2	-6.815	---		
	China	4	-1.891	-6.327**		
	South Africa	2	-1.645	-6.896**		
	Türkiye	3	-0.35	-10.752***		
INFLATION	Brazil	2	-3.17	-5.143**	-2.83*	---
	Russia	3	-2.86	-5.296**		
	India	2	-2.87	-6.642**		
	China	5	-0.841	-5.171**		
	South Africa	3	-4.000	----		
	Türkiye	2	-3.27	-5.723**		
LNDISASTER	Brazil	2	-1.397	-5.391**	-1.554	-4.532***
	Russia	2	-0.873	-5.772**		
	India	2	-5.373	---		
	China	2	-2.207	-5.721**		
	South Africa	5	0.709	-9.185***		
	Türkiye	3	-0.185	-4.367*		

Note: *, ** and *** represent significance at 10%, 5% and 1% levels, respectively.

Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Politikaları Kapsamında Düzce İli Katı Atık Yönetiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Kadriye Elif Maçın^{1,*}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34467, İstanbul.

Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 yılı karbonsuzlaşma hedefi doğrultusunda Düzce'deki katı atık yönetiminin çevresel etkilerini değerlendirmektedir. Çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirme yöntemi kullanılarak farklı elektrik karışımlarının etkileri karşılaştırılmıştır. Düzce'deki yıllık atık üretimi fonksiyonel birim olarak belirlenmiş ve ReCiPe-2016 metodu kullanılarak sekiz etki kategorisi ile yedi farklı senaryo analiz edilmiştir. Arka plan verileri, literatür kaynakları ve ecoinvent 3.7.1 veri tabanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, düzenli depolama tesisindeki (DDT) gaz toplama oranlarının değişimleri hassasiyet (duyarlılık) analizi yöntemiyle incelenmiştir. Sonuçlar, Türkiye'nin 2053 yılına yönelik karbonsuzlaşma hedeflerini gerçekleştirmesine rağmen, DDT'ye sıfır atık gönderme hedefine ulaşamamasının ilave çevresel yükler oluşturabileceğini göstermektedir. Özellikle geri dönüşüm oranlarının düşüklüğü, enerji geri kazanımının sınırlı olması ve biyolojik olarak parçalanabilir atıkların DDT'de uzun vadeli çevresel riskler yaratması öne çıkan bulgular arasındadır. Geri dönüşümle hammadde ikamesi, tüm senaryolarda çevresel kazanç sağlamaktadır ve özellikle son yıllarda gündeme gelen depozito sisteminin hızla uygulanması gerektiği vurgulanmaktadır. Karbonsuzlaşma politikasıyla uyum için, döngüsel ekonomi modelinin atık yönetiminde benimsenmesi kritiktir. Kamu-özel sektör iş birliğinin güçlendirilmesi ve lojistik süreçlerin optimizasyonu önemli stratejik adımlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, ileride atık yönetiminde maliyet analizlerinin yapılması, karar vericilerin etkili politika önerileri geliştirmesine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler

Karbonsuzlaşma, Karbondan Uzaklaşma, Kentsel Katı Atık, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, Düzenli Depolama Tesisi, Çevresel Etki

Life Cycle Assessment of Solid Waste Management in Düzce Province within the Scope of Türkiye's Decarbonization Policies

Abstract

This study evaluates the environmental impacts of solid waste management in Düzce within the framework of Türkiye's 2053 carbon decarbonization target. Using the life cycle assessment, the effects of different electricity mixes were compared. The annual waste generation in Düzce was defined as the functional unit, and the ReCiPe-2016 method was employed to analyze eight impact categories across seven different scenarios. Background data were sourced from literature and the ecoinvent 3.7.1 database. Additionally, sensitivity analysis was conducted to assess variations in gas collection rates at landfill. The findings indicate that despite Türkiye's efforts to achieve carbon neutrality by 2053, failure to meet the zero-waste-to-landfill target could lead to additional environmental burdens. Key concerns include low recycling rates, insufficient energy recovery, and long-term environmental risks posed by biodegradable waste disposal. Raw material substitution by recycling provide environmental benefits across all scenarios, emphasizing the need for the swift implementation of the deposit system, which has gained prominence in recent years. Integrating a circular economy model into waste management is significant for ensuring compliance with decarbonization policies. Strengthening public-private partnerships and optimizing logistics processes are essential strategic measures. Furthermore, conducting cost analyses in waste management will support policymakers in developing effective policy recommendations.

Keywords

Decarbonization, Phasing-out Carbon, Municipal Solid Waste, Life Cycle Assessment, Landfill, Environmental Impacts

1. Giriş

Elektrik sisteminin karbonsuzlaştırılması, iklim değişikliğinin azaltılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Paris Anlaşması'nın 2°C iklim hedefine ulaşabilmek için, elektrik sektörü ve daha geniş anlamda enerji sektörünün sera gazı emisyonlarını yüzyılın ortasına kadar hızla ve neredeyse sıfıra indirmesi gerekmektedir (Skea, 2022). Net sıfır dünyaya geçiş, tüm sektörlerde köklü ve sistematik bir dönüşümü gerektirmektedir. Atık yönetim sektörü ise artan talepleri karşılayabilmek adına döngüsellik önemli ölçüde artırmalı ve aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltmalıdır. Döngüsel ekonomiye geçiş, sürdürülebilirlik hedefleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde, birçok sektöre özgü karbon giderme yol haritalarında, karbon azaltma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm uygulamalarına yer verilmesi, bu konunun ne kadar ciddi şekilde ele alındığını göstermektedir. Dünyada doğal kaynakların tüketimi ve katı atık yönetimi (KAY) uygulamalarına ilişkin endişeler giderek artmaktadır. Malzeme tüketiminin 2060 yılına kadar iki katına çıkması ve atık üretiminin 2050 yılına kadar %70 oranında artması öngörülmektedir ([Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019](#)). Kentsel KAY, dünya nüfusunun yarısından daha azının yeterli atık yönetimine erişebildiği kritik bir küresel sorundur. 2050 yılına kadar 3,4 milyar tona ulaşması öngörülen küresel kentsel katı atık üretimindeki artış, çevreyi tehdit etmekte ve sosyoekonomik kalkınmayı olumsuz yönde etkilemektedir ([Kaza vd., 2018](#)). Bu duruma karşılık olarak, dünya çapındaki belediyelerde sürdürülebilir atık yönetim sistemleri ve politikaları hayata geçirilmektedir. Ayrıca, şehirler iklim değişikliğine uyum sağlamak amacıyla dönüşüm sürecine girmektedir.

Atık yönetimi, kaynak tüketimi, iklim değişikliği gibi farklı kavramların birbiriyle ilişkisini kurabilmek ve atık yönetiminin çevresel etkilerini inceleyebilmek için kullanılan metotlardan biri yaşam döngüsü değerlendirmesidir (YDD). YDD, bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca, yani hammadde alımından, bertarafına kadar geçen zamanda çevresel yükü ve faydalarını değerlendirmek için kullanılan bilgisayar tabanlı bir araçtır ([Khandelwal vd., 2019a](#)). YDD, atık yönetimi için kritik bir öneme sahiptir, çünkü atığın oluşumundan nihai bertarafına kadar çevresel etkilerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Sera gazı emisyonları, kaynak tükenmesi, asidifikasyon ve ötrofikasyon gibi etkileri ölçen YDD, geri dönüşüm, yakma ve depolama gibi yöntemlerin karşılaştırılmasını sağlayarak karar vericilere en sürdürülebilir stratejileri belirlemede rehberlik etmektedir. Atık yönetimi teknolojilerinin veya senaryolarının zorluklarını belirlemek ve potansiyel çevresel etkilerini değerlendirmek için birçok YDD çalışması yürütülmüştür ([Ionescu vd., 2013](#); [Ferronato vd., 2020](#)). Uluslararası literatürde, KAY için YDD çalışmalarına ilgi son yıllarda artarak devam etmektedir ([Turner vd., 2016](#); [Wang vd., 2020](#); [Tian vd., 2025](#)).

2006-2025 yılları arasında atık yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, gelişmiş ülkeler (Birleşik Krallık, İtalya, Portekiz) ve gelişmekte olan ülkeler (Brezilya, Hindistan, Türkiye) arasında farklılıklar gözlemlenmiştir (Tablo 1). Son 20 yılda Türkiye'de de kentsel ölçekte YDD çalışmalarına artan bir ilgi vardır. [Güven vd. \(2019\)](#)'ın İstanbul'da yaptığı çalışmada düzenli depolama tesisi (DDT) oranı %84 olarak belirlenirken, [Banar vd. \(2009\)](#)'ın Eskişehir'deki çalışmasında bu oran %93 olarak kaydedilmiştir. Ancak, Ankara ([Özeler vd., 2006](#)), Sakarya ([Erses Yay, 2015](#)), Aksaray ([Çetinkaya vd., 2018](#)), Bursa ([Salihoğlu vd., 2019](#)), Kayseri ([Irbaş & Dadaşer-Celik, 2021](#)) için DDT oranı %100 olarak raporlanmıştır. [Khandelwal \(2019b\)](#)'ın Hindistan'ın Nagpur şehrinde yaptığı çalışmada DDT oranı %83 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, [Goulart Coelho ve Lange \(2018\)](#)'ın Brezilya'nın Rio de Janeiro şehrinde gerçekleştirdiği çalışmada bu oran %98 olarak raporlanmıştır. Bu sonuçlar, Türkiye'deki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Birleşik Krallık'taki Nottingham ([Wang vd., 2020](#)) ve Cardiff ([Turner vd., 2016](#)) şehirlerinde yapılan çalışmalarda, DDT oranları sırasıyla %57,6 ve %54 olarak tespit edilmiştir. [Slorach vd. \(2020\)](#) ise sadece gıda atıkları için yaptığı çalışmada DDT oranını %34 bulmuştur. İtalya'da ([Tunesi vd., 2016](#)) yapılan çalışmada DDT oranı %26 olarak belirlenirken, Portekiz'de ([Fernández-Braña vd., 2020](#)) bu oran %62 olarak tespit edilmiştir. Literatürde bahsi geçen şehirler, farklı nüfus büyüklüklerine sahip olmalarına rağmen, bulundukları ülkenin gelişmişlik düzeyi ve genel atık yönetimi politikalarından etkilenmişlerdir. Modellerde, yıllık üretilen belediye atığı miktarı ([Goulart Coelho & Lange, 2018](#)), ton atık başına ([Wang vd., 2020](#)) ve ton gıda atığı başına ([Güven vd., 2019](#)) gibi farklı fonksiyonel birim seçimleri kullanılmıştır. Bu çeşitlilik, atık yönetimi çalışmalarında kullanılan metriklerin, araştırmanın amacına ve bağlamına göre değişiklik gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Fonksiyonel birimde olduğu gibi, seçilen metodolojilerde de çeşitlilik gözlemlenmiştir. CML ([Khandelwal vd., 2019b](#)), IPCC 2006 ([Turner vd., 2016](#)), IPCC 2013 ([Wang vd., 2020](#)), ILCD ([Tunesi vd., 2016](#)), IMPACT 2002+ ([Çetinkaya vd., 2018](#)) ve ReCiPe ([Güven vd., 2019](#)) gibi YDD çalışmalarında genel kabul görmüş yöntemlerin yanı sıra, atık yönetimine özel olarak geliştirilmiş Integrated Waste Management Model for Municipalities ([Irbaş & Dadaşer-Celik, 2021](#)) gibi metodolojilere de rastlanmıştır. Çevresel etki kategorilerinde, küresel iklim değişikliği tüm çalışmalarda ele alınan ana kategori olmuştur. Bu kategoriyi ise sırasıyla asidifikasyon potansiyeli ve ötrofikasyon potansiyeli takip etmiştir. Elektrik karışımlarının (ve karbonsuzlaşma politikalarının) KAY üzerine etkisini incelemeye gelindiğinde, bu konuya odaklanan çalışmalar sayılıdır. Örneğin; [Güven vd. \(2019\)](#) tüm KAY yerine sadece gıda atıklarına odaklanarak çalışmalarını tamamlamıştır.

Türkiye'de her yıl 30,3 milyon ton atık üretilmektedir ([Türkiye İstatistik Kurumu, 2023a](#)). 2023 yılında belediye atıklarının %53,4'i düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmiş, %11,7'si kontrolsüz depolama sahalarında bertaraf edilmiş ve %34,9'si atık tesislerinde (biyometanizasyon, kompostlaştırma, yakma ve mekanik biyolojik işlem dâhil) geri kazanılmıştır ([Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023a](#)). 2053 yılına kadar hedef, atıkların yalnızca %30'unu DDT bertaraf etmek, kontrolsüz döküm alanlarını ortadan kaldırmak ve toplam geri kazanım oranını %70'e çıkarmaktır. Bunun yanı sıra Türkiye'nin enerji ihtiyacının %50'den fazlasını fosil kaynaklardan elde ettiği bilinmektedir ([Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 2024](#)). Atık sektörü, Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonlarının %2,3'ünü oluşturarak 2023 yılında 14,1 MtCO₂ eşdeğerinde emisyonu neden olmuştur. Bu değer içinde atık su arıtma emisyonları da dahildir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesini artırma hedefi ve 2053 yılı karbonsuzlaşma politikaları doğrultusunda, bu dönüşümün atık yönetimi üzerindeki etkilerini belirlemek büyük önem taşımaktadır. KAY'a ilişkin mevcut literatürün büyük bölümü mevcut elektrik karışımı üzerine odaklanmış olup, Türkiye'nin karbonsuzlaşma politikalarının KAY üzerindeki etkisine dair bir çalışmaya yapılan literatür araştırmalarında rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, YDD perspektifini kullanarak Düzce'deki mevcut KAY sisteminin çevresel etkilerini analiz etmek ve farklı elektrik karışımları için ortaya çıkan değişimleri karşılaştırmaktır. Bugün hâlâ en yaygın şekilde kullanılan tesisler DDT'lerdir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023a) ve atık yönetim sistemindeki geçiş sürecinde DDT'lerin verimli şekilde işletilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, DDT süreçlerinde depo gazı toplama oranındaki değişim hassasiyet (duyarlılık) analizi yöntemiyle incelenmiş ve tartışılmıştır. Çalışmanın bulgularının, karar vericilere atık yönetimi politikalarını iyileştirme sürecinde rehberlik edeceği ve gelecekteki çalışmalara önemli bir referans noktası sunacağı öngörülmektedir.

Tablo 1: Literatürdeki ulusal ve uluslararası atık yönetimi yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları

Bölge/Çalışma*	Fonksiyonel Birim**	Metot	Etki Kategorileri***	Mevcut Atık Yönetimi****	Çalışmada gelecek döneme ilişkin elektrik projeksiyonu var mı?
Cardiff, Birleşik Krallık (Turner vd., 2016)	Yıllık BA üretimi	IPCC 2006	KIP	%54 DDT, %45,2 MGT, KOM ve AÇ.	Yok
Nottingham, Birleşik Krallık (Wang vd., 2020)	1 t BA	IPCC 2013	KIP	%7,3 DDT, %31,5 MGT %12,9 KOM ve %57,6 yakma.	Yok
Birleşik Krallık (Slorach vd., 2020)	1 t gıda atığı	ReCiPe	KIP, AP, KA, ÖP, İT, AKT, OTİ, FO, ÖD, ET (DS), ET (TS), ET (K), AK, İPM	%34 DDT, %10 KOM, %6 AÇ ve %50 yakma.	Var
La Paz, Bolivya (Ferronato vd., 2020)	Yıllık BA üretimi	CML	KIP, AP, ÖP, İT	BA karışık olarak toplanması çoğunlukla DDT'ye yönlendirilirken, 4/gün küçük bir kısmı KOM tesisine gitmektedir.	Yok
Rio de Janeiro, Brezilya (Goulart Coelho & Lange, 2018)	Yıllık BA üretimi	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%98,2 DDT, %0,4 MGT ve %1,4 KOM.	Var
31 şehir, Çin (Tian vd., 2025)	1000 t BA'nın organik bölümü	CML	KIP, AP, ÖP, ET (TS), ET (K)	%100 KOM	Yok
Nagpur, Hindistan (Khandelwal vd., 2019b)	1 t BA	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%83 DDT ve %17 KOM	Yok
Bologna, İtalya (Tunesi vd., 2016)	Yıllık toplanan BA	ILCD	KIP, AP, AKT	%26 DDT, %34 MGT, KOM ve AÇ, %38 enerji geri kazanımı ile yakma.	Yok
Orta büyüklükte şehir, Portekiz (Fernández-Braña vd., 2020)	Yıllık BA üretimi	IPCC 2013 ReCiPe	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, ET (K) ET (TS), OTİ, İPM	%62 DDT, %12,7 MGT ve % 25 MBT	Yok
Ankara, Türkiye (Özeler vd., 2006)	Yıllık BA üretimi	Integrated Waste Management Model for Municipalities	KIP, AP, ÖP, İT	%100 DDT	Yok
Eskişehir, Türkiye (Banar vd., 2009)	1 t BA	CML	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%93 DDT, %7 MGT	Yok
Sakarya, Türkiye (Erses Yay, 2015)	1 t BA	CML	KIP, AP, İT, AKT, ET (DS), ET (TS), ET (K), OTİ, FO	%100 DDT	Yok
Aksaray, Türkiye (Çetinkaya vd., 2018)	Yıllık BA üretimi	IMPACT 2002+	KIP, AP, ÖP, İT, AKT, FO	%100 DDT	Yok
Bursa, Türkiye (Salihoğlu vd., 2019)	1 t BA	ReCiPe	KIP, AP, ÖP, OTİ, AKT, ET	%100 DDT	Yok
İstanbul, Türkiye (Güven vd., 2019)	1 kg gıda atığı	ReCiPe	KIP, AP, İT, AKT, ET (DS), ET (TS), ET (K)	%84,2 DDT, %10,5 MBT, %5,3 KOM	Var
Kayseri, Türkiye (İrbaş & Dadaşer-Çelik, 2021)	Yıllık BA üretimi	Integrated Waste Management Model for Municipalities	KIP, AP, ÖP	%100 DDT	Yok

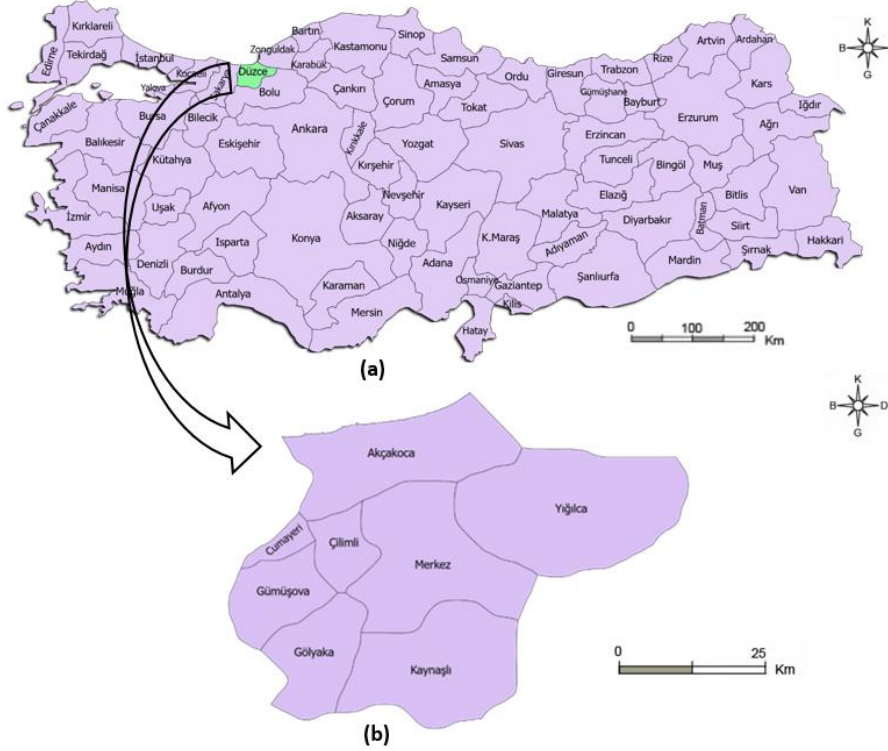
* Sütun, ülkelerin alfabetik sırasına göre düzenlenmiştir. ** BA: Belediye Atığı/kentsel atık, kg: kilogram, t: ton. *** Küresel Isınma Potansiyeli/İklim Değişikliği: KIP, Asitleme Potansiyeli: AP, Karasal Asitlenme: KA, Ötrofikasyon Potansiyeli: ÖP, İnsan üzerinden toksisite: İT, Abiyotik kaynakların tükenmesi: AKT, Ozon Tabakasında İncelme: OTİ, Fotokimyasal Oksidasyon, FO, ÖD, Ekotoksiste (deniz suyu): ET (DS), Ekotoksiste (tatlı su): ET (TS), Ekotoksiste (karasal): ET (K), Arazi Kullanımı: AK, İnce partikül madde oluşumu: İPM. **** AÇ: Anaerobik çürütücü, DDT: Düzenli depolama tesisi, MBT: Mekanik ve biyolojik işlem, MGT: Maddesel geri dönüşüm tesisi, KOM: Kompostlaştırma.

2. Materyal ve Metot

2.1. Düzce İli Atık Yönetimi

Düzce, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan ve Karadeniz kıyısına uzanan bir ildir (Şekil 1). İl statüsünü 1999 yılında kazanmıştır. Düzce'nin merkez, Akçakoca, Cumayeri, Çilimli, Gölyaka, Gümüşova, Kaynaşlı ve Yığılca olmak üzere 8 ilçesi bulunmaktadır. Düzce ilinin alanı 2.492 km²'dir. Düzce'de imalat sanayisinin en fazla tesis ve istihdam sağlayan sektörleri tekstil, metal, gıda, orman, mobilya, kauçuk, otomotiv ve kimya ilaç sektörleridir (Düzce Ticaret Borsası, 2020).

Düzce ilinde bir adet DDT bulunmaktadır. Yoğun nüfuslu alanlarda sıklıkla 400 L ve 800 L kapasiteli konteynerler tercih edilmektedir. Karışık ve organik atıklar genellikle sıkıştırılmalı araçlarla toplanmaktadır. Mekanik ayırma tesisinden gelen biyobozunur atıklar (mutfak atıkları ve park-bahçe atıkları), biyometanizasyon tesisine alınarak fermentasyona tabi tutulmaktadır. Elde edilen biyogaz ise elektrik üretim tesisinde hem ısı hem de elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Isı, biyometanizasyon tesisinde değerlendirilir, elektrik ise enterkonnekte sisteme verilmektedir. Sıvı fermente ürünün %50'si, geri dönüşüm sistemi ile biyobozunur atıkların fermentasyon işleminde kullanılmaktadır (Beşer-Karpuz, 2022). Biyometanizasyon tesisinde fermentasyon işlemi sırasında oluşan %20-25 oranındaki katı fermente ürün, ilgili mevzuatların gereksinimlerini karşıladığı takdirde tarımda veya park-bahçe uygulamalarında kullanılmakta, aksi halde "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik" hükümlerine uygun olarak yönetilmektedir (T.C. Resmi Gazete, 2010). Yine mekanik ayırma tesisinde ayrılan ambalaj atıkları geri dönüşüm için maddesel geri kazanım tesisine (MGT) gönderilmektedir. Reddedilen atıklar DDT'ye gönderilmektedir.



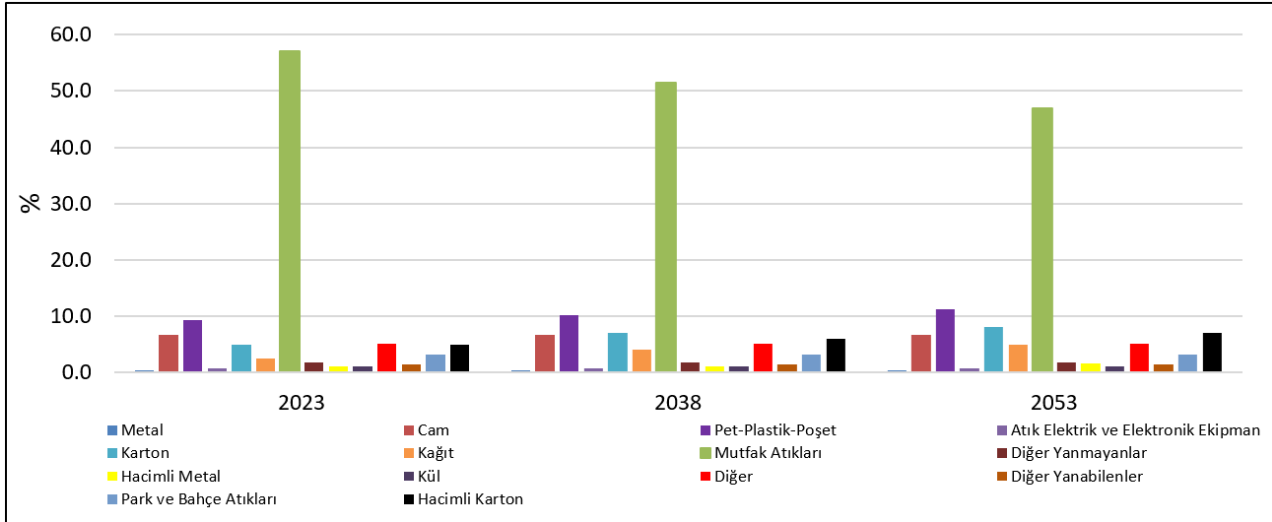
Şekil 1: a) Türkiye ve b) Düzce haritası

2.2. Düzce Nüfus ve Atık Miktarı Projeksiyonu

Katı atıkların miktarları ve özellikleri ülkelere göre değişebildiği gibi aynı ülke içinde bölgeden bölgeye değişebilmektedir (Demirarslan & Yalçın Çelik, 2018). Bu yüzden atık karakterizasyonu verileri, Düzce Belediyesi'nin gerçekleştirdiği saha çalışmalarına dayanan karakterizasyon çalışmasından elde edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023b). Düzce'de yapılan atık karakterizasyon çalışmasında, mutfak atıklarının oranı %57, kağıt ve karton %7,5, metal atıklar %0,3 ve diğer atıkların oranı %5,1 olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

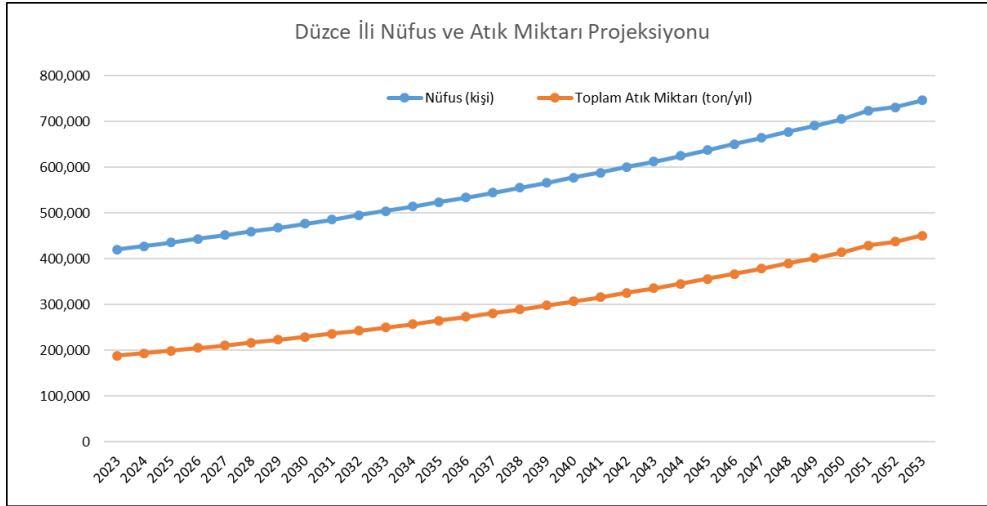
Karadeniz bölgesindeki Artvin ilinde gerçekleştirilen çalışmada, organik atıkların oranı %61, olarak saptanmıştır. Atık türleri arasında en büyük pay %10 ile kağıt atıklara ait olup, bunu sırasıyla %9 ile plastik atıklar, %2,3 ile metal atıklar ve %3,2 ile cam atıklar takip etmektedir (Demirarslan & Yalçın Çelik, 2018). Trabzon'da yapılan atık karakterizasyon çalışmasında, organik atıkların oranı %57,4, kağıt atıklarının %9,8 ve metal atıklarının %0,5 olduğu belirlenmiştir.

Gümüşhane'de ise organik atıkların oranı %29,8 farklı bir sonuç olarak dikkat çekmektedir (Nas & Bayram, 2008). Düzce ili verileri ise Karadeniz'deki diğer şehirlerle karşılaştırıldığında genel olarak tutarlılık göstermektedir. Bu bağlamda, karakterizasyon sonuçları (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023b) projeksiyon çalışmalarında kullanılmak üzere uygun görülmüştür.



Şekil 2: Düzce atık karakterizasyonu ve atık projeksiyonu (%)

Gelecekteki atık miktarı, Düzce ili Sıfır atık Planı'na uygun olarak projelendirilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021). Kişi başına düşen atık miktarı, atık karakterizasyonu ve nüfus değişiklikleri gibi atık oluşumuna ilişkin çeşitli itici faktörler dikkate alınmıştır (Izquierdo-Horna vd., 2022). Düzce'nin tahmini nüfusunun kişi başına atık üretimiyle çarpılmasıyla tahmin edilmiştir (Şekil 3). Ayrıca, Düzce ve Türkiye'deki (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017) atık karakterizasyon değişim eğrileri göz önünde bulundurularak atık karakterizasyon değişiklikleri dikkate alınmıştır (Şekil 2). Nüfus 2023 yılı için 421 bin kabul edilmiş, bu değer üzerinden yapılan projeksiyon ile 2038 ve 2053 için 555 bin ve 745 bin olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Belediye atıkları haricinde toplanan park- bahçe atıklarının da biyometanizasyon tesisine gönderildiği bilinmektedir. Böylelikle 2023 yılında üretilen toplam atık 223 bin ton-atık/yıl olarak bulunmuştur. Düzce'de 2023 yılında en çok üretilen atık bileşeni %57 ile mutfak atıkları olmuştur hesaplamalar sonucunda bu yüzdenin 2053 yılında %47'ye düşeceği ön görülmüştür (Şekil 2).



Şekil 3: Düzce nüfus ve atık projeksiyonu

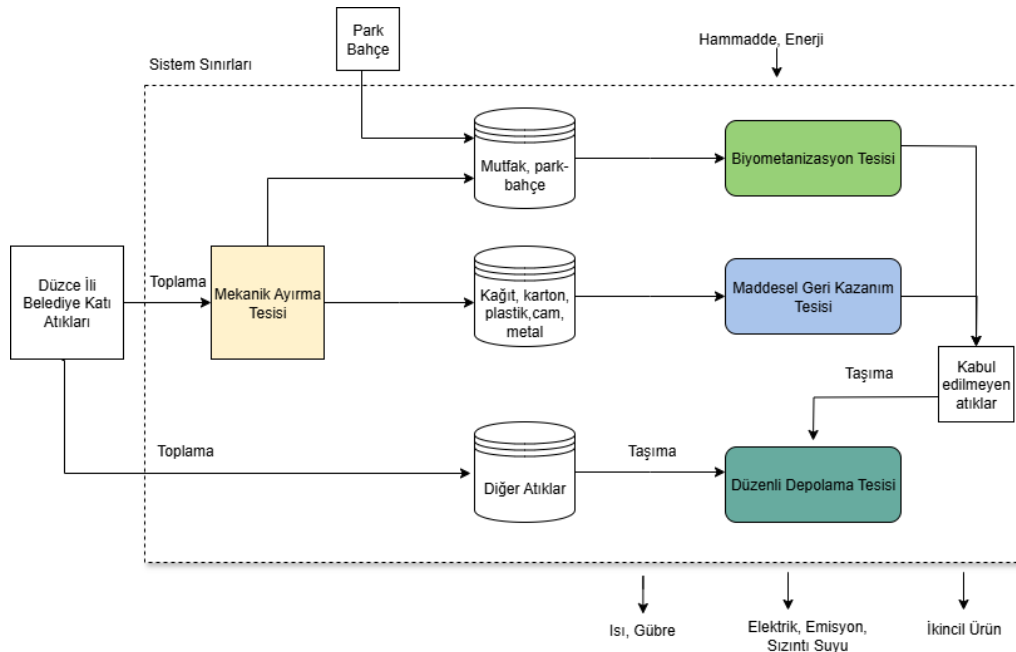
2.3. YDD Modeli

Atık yönetimi, YDD çalışmaları, malzeme geri dönüşümü ve enerji geri kazanımı sonucunda çok işlevlilikten etkilenmektedir. Sonuç odaklı (consequential) YDD envanteri "değişim odaklı", "etki odaklı" ve/veya "karara dayalı" modelleme ilkesine dayanmaktadır. Sistemde alınan bir kararın, hem analiz edilen sistemin arka plan sisteminde hem de diğer sistemlerde ekonominin diğer süreçleri ve sistemleri için doğurduğu sonuçları belirlemeyi amaçlar. Analiz edilen sistemi bu sonuçlar etrafında modeller (Bernstad Saraiva vd., 2018). Mevcut çalışmada, "elektrik karışımlarındaki" değişimin atık sistemi üzerindeki etkisi incelendiğinden, sonuç odaklı YDD uygun bir yaklaşım olarak benimsenmiştir. Ecoinvent v3.7.1 veri tabanından, "İkame, sonuç odaklı, uzun vadeli" veri setinden yararlanılmıştır (Ecoinvent, 2021).

Ecoinvent 2000'li yılların başında, İsviçre Federal Araştırma Enstitüleri ve İdaresi tarafından ülkedeki YDD çalışmalarını desteklemek amacıyla tutarlı bir yaşam döngüsü envanteri veri tabanının oluşturulması ve yönetilmesi için başlatılan bir çalışmanın ürünüdür. Ecoinvent, enerji tedariki, kimyasallar, plastikler ve plastik üretimi, metallerin üretimi ve işlenmesi, ulaşım ve mobilite, bertaraf, inşaat, tarım, elektronik, biyoyakıtlar, kağıt endüstrisi, geri dönüşüm süreçleri ve su verileri gibi ürünler veya hizmetler hakkında 11.500'den fazla envanter veri kümesi içermektedir (Gnansounou, 2017). Modelleme sırasında kullanılan envanterde hem birincil hem de ikincil veriler kullanılmıştır. Birincil veriler doğrudan çalışma alanına Düzce ile KAY sistemine ait verileri içerirken ikincil veriler, birincil kaynaklardan elde edilemeyen örneğin, MGT tesislerinde geri dönüştürülen malzemelerin (ikincil ürünlerin) hammadde ikame oranları (Fernández-Braña vd., 2020) gibi literatür kaynakları içermektedir. Benzer şekilde yukarıda bahsi geçen Ecoinvent veri tabanı da bu çalışma kapsamında ikincil veri sınıfına girmektedir.

Sistem sınırlarının coğrafi kapsamı, Düzce ili olarak tanımlanmıştır (Şekil 1). Bu bağlamda, Düzce ilindeki atıkların toplanması, taşınması, mekanik ayırma tesisi, biyometanizasyon tesisi, MGT ve DDT çalışmaları sistem sınırları içerisinde değerlendirilmiştir (Şekil 4). Bu çalışmanın fonksiyonel birimi, farklı senaryoların toplam çevresel etkilerini karşılaştırmayı mümkün kılmak amacıyla, Düzce ilinde yıllık olarak üretilen atık miktarı (ton/yıl) olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, karışık KAY ile kaynağında ayrıştırılan bahçe atıkları incelenmiştir. Tıbbi atıklar, inşaat ve yıkıntı atıkları çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. YDD’de ISO 14040 ve 14044 standart yöntemleri izlenmiştir ([International Organization for Standardization, 2006a; 2006b](#)). Çalışmada, yukarı akış yükleri göz ardı edilerek sıfır yük varsayımı benimsenmiştir ([International Organization for Standardization, 2006b](#)). Etki değerlendirmesi ReCiPe-2016 orta nokta düzeyindeki (mid-point) karakterizasyon faktörleri metodu takip edilerek gerçekleştirilmiştir ([Huijbregts vd., 2016](#)). Sadece iklim değişikliği kategorisinde en güncel hesaplama metodu olan IPCC 2021 takip edilmiştir ([Skea, 2022](#)). İklim değişikliği, deniz suyu ötrofikasyonu, karasal ekotoksiste, karasal asidifikasyon, tatlısu ekotoksiste, insan üzerinde toksiste-kanserdışı, tatlısu ötrofikasyonu, ekotoksiste denizsuyu olmak üzere 8 etki kategorisinin sonuçları değerlendirilmiştir.

Katı atık yönetimi sistemiyle üretilen elektrik için, Türkiye elektrik şebeke karışımındaki üretilen eşdeğer miktarda elektriğin ikame edileceği varsayılmıştır. Analizde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik karışımındaki potansiyel değişimleri ve bunların KAY sistemine etkileri ele alınmıştır. Değişimlere dair ayrıntılar senaryolar başlığında verilmiştir.



Şekil 4: Düzce ili belediye atıkları yaşam döngüsü değerlendirilmesi sistem sınırları

2.4. Senaryolar

Bu çalışmada, Düzce'deki mevcut tesisler YDD ile modellenerek KAY'ın çevresel etkileri analiz edilmiştir. Türkiye'nin karbonsuzlaşma politikasının sistem üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, atık miktarı ve karakterizasyonu dışında, yalnızca arka plan verileri (background data) değiştirilmiştir. Çünkü karbondan uzaklaşma senaryoları (Şekil 5) kendi içerisinde halihazırda bir belirsizlik içermektedir. Bu şekilde modeldeki belirsizlik miktarı azaltılmaya çalışılmıştır. Tablo 2'de gösterildiği üzere yedi senaryo tanımlanmıştır. Örneğin; Düzce mevcut atık yönetimi, normal senaryo elektrik karışımı Senaryo 1 olarak tanımlanırken, 2038 atık miktarı ve karakterizasyonu ve 1,5°C hedefi elektrik karışımı, Senaryo 4 olarak tanımlanmış ve 2053 atık miktarı ve karakterizasyonu ve 2 °C hedefi elektrik karışımı ise Senaryo 7 olarak tanımlanmıştır.

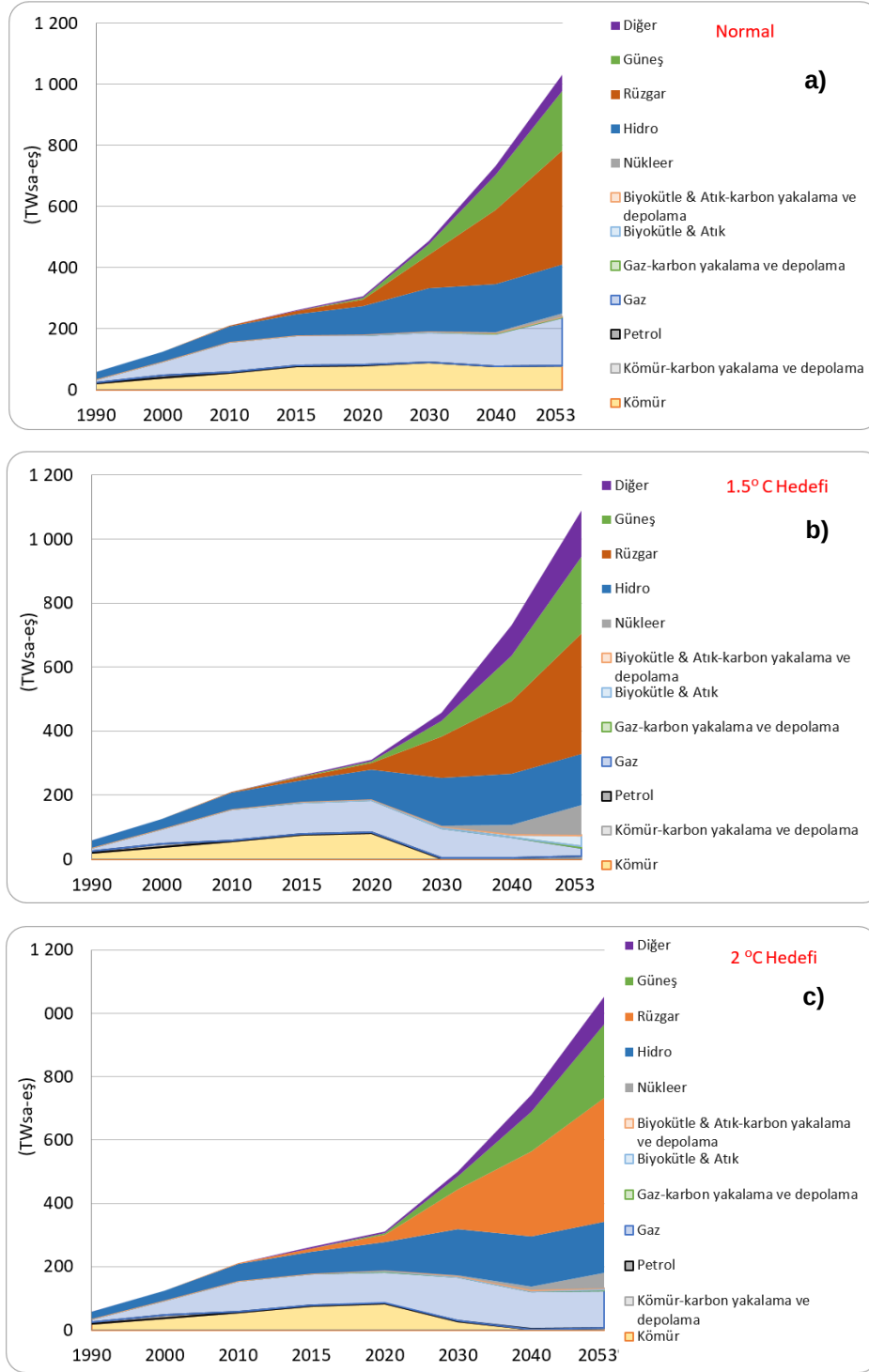
Senaryolarda elektrik karışımları önemli yer tutmaktadır. İklim değişikliğiyle uyum bağlamında, enerji politikası yapımcıları ekonomi odaklı planlardan sürdürülebilirlik odaklı planlara geçme ihtiyacıyla karşı karşıyadır. Bu durumun YDD çalışmasını ilgilendiren kısmı ise, elektrik emisyon faktörlerinin, elektrik şebekesindeki üretim karışımına bağlı olarak değişmesidir. Gelecekteki emisyon azaltma senaryoları için bir çok model bulunmaktadır. Bu çalışma için [Keramidas vd. \(2021\)](#) çalışmasının gelecek elektrik karışımı (Şekil 5), sonuçları kullanılarak emisyon faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo 2: Düzce ili katı atık yönetim senaryoları

Yıl	Atık Miktarı ve Karakterizasyonu	Elektirik karışımı			Tesisler
2023	Mevcut Durum (S1)				
2038	İl sıfır atık planına göre artış (bkz. Şekil 2-3) (S2-S4-S6)	Normal (S1-S2-S3)	1,5°C Hedefi (S4-S5)	2°C Hedefi (S6-S7)	Mekanik ayırma tesisi, biyometanizasyon tesisi, MGT, DDT (S1-S2-S3- S4-S5-S6- S7)*
2053	İl sıfır atık planına göre artış (bkz. Şekil 2-3) (S3-S5-S7)				

*(S1-S2-S3- S4-S5-S6- S7): Senaryo 1-7 anlamına gelmektedir. Tabloda hangi senaryonun altında kısaltma varsa o senaryo için o elektrik karışımı veya atık miktarı/karakterizasyonu temsil edici olarak kullanılmıştır.

Bu model üç ana senaryo içermektedir. Bunlar; bu yüzyılın sonuna kadar küresel ortalama sıcaklık değişimini 1.5°C, 2°C'nin çok altında tutma yönündeki Paris Anlaşması hedefleriyle uyumlu yollarla karşılaştırmak ve normal senaryolarıdır (Şekil 5). Burada dikkat edilmesi gereken nokta normal senaryosunun da ciddi anlamda karbondan ve fosil kaynaklardan uzaklaşma hedefleri içermesidir ([Keramidas vd., 2021](#)). Türkiye'nin 2053 hedefleri arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli ölçüde artırma ve enerji arzındaki paylarını yükseltme planları yer almaktadır. Türkiye'de toplam elektrik talebinin 2053 yılına kadar 1.000 TWsa üzerine çıkması öngörülmektedir ([Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 2024](#)). 2020'de %42,5 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payının, bu talebi karşılamak için 2053 yılında normal senaryoda %63,9'a çıkması beklenilmektedir ([Keramidas vd., 2021](#)). Özellikle güneş ve rüzgar enerjisinin, düşük karbonlu elektrik üretim sistemine geçişte önemli bir rol oynaması beklenilmektedir. Kömür ve doğalgazdan tamamen çıkmak çalışmadaki senaryolar arasında yoktur. 2053 yılında, 1.5°C ve 2°C senaryolarında kömür kullanımının %0,4'e kadar düşmesi beklenirken, bu oran normal senaryoda %10,5 olarak öngörülmektedir. 1.5°C ve 2°C senaryoları kendi aralarında karşılaştırıldığında, en büyük farklardan biri toplam enerji tüketim beklentisinin 2°C senaryosunda daha az olmasıdır. Enerji karışımına bakıldığında ise, 2°C senaryosu %36,1 rüzgar ve %17,2 güneş enerjisi içerirken, 1.5°C senaryosu %31,2 rüzgar ve %19,5 güneş enerjisi içermektedir. Normal senaryonun IPCC 2021 ile hesaplanan sonuçlarına göre elektrik şebekesi CO₂eş emisyon faktörünün 2023'te 0,45 kg CO₂eş/kWsa'ten 2038'te 0,31 kgCO₂eş/kWsa ve 2053'te 0,20 CO₂eq/kWsa'te düşeceği öngörülmektedir.



Şekil 5: Türkiye karbondan uzaklaşma enerji üretim senaryoları: a) normal, b) 1.5°C hedefi, c) 2°C hedefi

2.5. Hassasiyet (Duyarlılık) Analizi

Düzce’de kentsel atıkların çoğu DDT’ye gönderilmektedir. Literatürdeki daha önceki çalışmalar (Mboowa vd., 2017; Maalouf & El-Fadel, 2019) DDT’ye atılan atıkların, biyolojik olarak parçalanabilir atıklarının ayrışması nedeniyle metan emisyonu (iklim değişikliği), insan sağlığı zararları (depolama alanlarından kimyasallara, bakterilere maruz kalma), ekosistem zararları (depolama alanlarından atmosfere, suya ve toprağa sızıntı ve gaz emisyonu), beklenmeyen felaketler (depolama alanlarından gaz ve sızıntı göçünden kaynaklanan yangınlar ve patlamalar) gibi ciddi çevresel sonuçlara neden olabileceğini göstermektedir. Bu yüzden DDT’lerdeki depo gazı kontrolü oldukça önemlidir. Depo gazı toplama oranının yıllara bağlı nasıl değiştiğine dair veriler Türkiye’deki DTT’ler için bulunması kolay değildir. Salihoğlu vd. (2019) Bursa için yaptığı modelleme çalışmasında ortalama oranı %58 olarak bulmuştur.

DTT gazı toplama verimlilikleri yıllar içerisinde (günlük örtü ve nihai örtü gibi teknik değişikliklere ve işletmeye göre) %14 ile %99,6 arasında değişmekte olup, üst örtü için önerilen ortalama %70-75 civarındadır (Tonini vd., 2018). Bu nedenle, bu çalışmada hem orijinal senaryo hem de hassasiyet analizinde literatür verilerinden yararlanılmıştır (Spokas vd., 2006; Sullivan, 2010) (Tablo 3). Orijinal senaryoda, ilk 5 yıl içerisinde üretilen depo gazının %35'inin, 5-10 yıl arasında %60'ının, 10-40 yıl arasında %70'inin toplanabileceği kabul edilmiştir. Hassasiyet hesaplamalarında, Manfredi ve Christensen (2009)'nin çalışmalarında tespit edilen, geleneksel (biyoreaktör veya özel işlem içermeyen) depo gazı toplama oranlarının ortalaması kullanılmıştır. Bu senaryoda depo gazı toplanmasında %15'lik bir verim artışı kabul edilmiştir.

Tablo 3: Hassasiyet analizi- depo gazı toplama oranının değişmesi (%)

Zaman periyodu (yıl)	Toplanan depo gazı- orijinal senaryo (%)	Toplanan depo gazı-hassasiyet senaryosu (%)
5 (günlük örtü)	35	50
10 (ara tabaka)	60	75
40 (nihai-örtü)	70	85

2.6. Tesisler

2.6.1. Mekanik Ayırma Tesisi

Belediye tarafından toplanan karışık atıklar, mekanik ayırma tesisinde işleme alınarak, içerisindeki biyobozunur ve geri dönüşebilir atıklar ayrıştırılmaktadır. Atık taşıma araçları tarafından tesis içerisine boşaltılan atıklar, biyobozunur, bakiye ve geri dönüşebilir türlerine göre ayrılmaktadır. Ayrıştırılan geri dönüşebilir atıklar, karışık olarak preslenip depolanmaktadır. Mekanik ayırma tesisindeki bu süreçler, ekonomik olarak değerlendirilebilecek atıkların yeniden kazandırılmasına katkı sağlamaktadır. Tesisteki atık alımı önce, elekten geçmekte ve küçük boyutlu malzeme biyometanizasyon tesisine giderken, büyük boyutlu malzeme MGT'ye gitmektedir. Elekte dizel tüketimi 2,31 (L/ton-atık) olarak kabul edilmiştir (Grzesik & Malinowski, 2016).

2.6.2. Biyometanizasyon Tesisi

Biyometanizasyon tesisi tarafından üretilen ısı, tesisin kendisi tarafından belirli bir sıcaklığı korumak için kullanıldığı varsayılmıştır. Biyometanizasyon tesisinde üretilen biyogazın CH₄ ve CO₂ karışımından oluştuğu kabul edilmiştir. Biyogazdaki her bir gazın payı atığın bileşimi tarafından belirlenmektedir. Yağ açısından zengin malzemeler CH₄ payını artırırken, karbonhidrat açısından zengin malzemeler benzer CH₄ ve CO₂ paylarına sahip bir biyogaz üretmektedir. Anaerobik koşullar altında malzemelerin biyolojik olarak parçalanabilirliği genellikle metan potansiyeli kullanılarak ifade edilir (üretilen m³CH₄/tonUKM). Bu farklılığı göz önünde bulundurmak için her bir atık malzemeden üretilen biyogazın bileşimi Buswell denklemi ile hesaplanmıştır (Buswell & Boruff, 1932). Biyometanizasyon tesislerinde, kaçak biyogaz emisyonları, gaz motorları, borular, vanalar, biyogaz depolama, biyogaz yükseltme vb. kaynaklı sızıntılar nedeniyle yaygındır. Bu çalışmadaki modellemede sızıntı oranı %2 kabul edilmiştir (Tablo 4) (Scheutz & Fredenslund, 2019).

Tablo 4: Yaşam döngüsü değerlendirmesi envanter özeti

Biyometanizasyon	Değer	Kaynak
Sızan Gaz (%)	2	(Scheutz & Fredenslund, 2019)
Dizel tüketimi (L /ton atık)	1	(Lipasto, 2012)
Katı Faz- fermentasyon ürünü	%23	(Beşer-Karpuz, 2022)
Sızıntı Suyu		
Sızıntı Suyu Arıtımı (kWsa/kg KOI)	1,5	(Türkiye Su Enstitüsü, 2019)
Düzenli Depolama		
Elektrik tüketimi (kWsa/ton atık)	5	(Manfredi vd., 2009)
Dizel tüketimi (L/ton atık)	1	(Manfredi vd., 2009)
Hassasiyet- depo gazı toplama oranı (%)	50-85	(Manfredi & Christensen, 2009)
Atık Toplama-Taşıma		
Dizel tüketimi –toplama (L/ ton atık)	5,69	(Yaman, 2011)
Dizel tüketimi –taşıma (L/ton-km)	0,018	(Yaman, 2011; Sezer, 2019)
Geri Dönüşüm-İkame oranları (%)		(Fernández-Braña vd., 2020)
Karton	0,83	(Fernández-Braña vd., 2020)
Plastik	0,85	(Fernández-Braña vd., 2020)
Cam	1	(Fernández-Braña vd., 2020)
Demir Metaller	0,7	(Tagliaferri vd., 2016)
PET	0,81	(Tagliaferri vd., 2016)
MGT elektrik tüketimi (kWsa/ ton atık)	14,3	(Kurdoğlu, 2013).
Ayırma Tesisi elektrik tüketimi (kWsa/ ton atık)	8,97	(Yıldız-Geyhan vd., 2016)

2.6.3. Maddesel Geri Kazanım Tesisi (MGT)

İlçe belediyeleri coğrafi sınırları içinde üretilen atıkların toplanması ve il belediyeleri taşınması, geri dönüşümü ve nihai bertarafından sorumludur. Düzce'deki MGT karışık atıkları kabul etmektedir. Öte yandan geri dönüşüm genellikle ulusal pazarın ve başka aktörlerin (paydaşların) dâhil olduğu karmaşık bir sistemde gerçekleşmektedir. Ambalaj atıkları, kağıt/karton ve cam atıkları mekanik ayırma tesisi sonrası ek ayırma işlemleri için MGT'lere teslim edilmektedir. Reddedilen atıklar, DDT'ye gönderilmektedir. İkame edilen birincil malzemelerin miktarı, geri kazanılan geri dönüştürülebilir malzemelerin miktarına, geri dönüşümün verimliliğine ve ikame oranına bağlıdır. Geri dönüşüm verimliliği, geri dönüştürülen girdi malzemesinin kütlesi ile elde edilen ikincil malzemenin kütlesi arasındaki oranı temsil eder. Bu verimlilik, geri dönüşüm sırasında oluşan malzeme kayıplarını yansıtır. İkame oranı, geri dönüşüm sırasındaki kalite kayıpları göz önünde bulundurulduğunda birincil malzemenin ne kadarının ikincil bir malzemeyle ikame edildiğini temsil eder. MGT performansı için literatür değerleri (Pressley vd., 2015) kullanılmıştır. MGT tesislerindeki elektrik tüketimi Türkiye'de yürütülen önceki çalışmalardan alınmıştır (Yıldız-Geyhan vd., 2016). Hammadde kaynaklarının gerçek ikamesi, piyasa koşulları ve literatür kaynakları dikkate alınarak modellenmiştir (Fernández-Braña vd., 2020).

2.6.4. Düzenli Depolama Tesisi

Her atık kategorisi için depolama sahasındaki atık bozunma oranları De la Cruz ve Barlaz (2010)'dan alınmıştır. KAY sisteminin uzun vadeli etkileri 100 yıllık zaman dilimiyle sınırlandırılmıştır. Biyolojik olarak parçalanabilir atıkların DDT'de ayrışması yavaş bir işlemdir. Sonuç olarak, depo gazı ve sızıntı suyu oluşumu atık bertarafından sonra uzun bir zaman diliminde meydana gelir. Bozunma oranı, 100 yıl boyunca elde edilen maksimum CH₄ potansiyelinin yüzdesini belirler. Bu çalışmada, yağışlı iklim bölgesi için IPCC 2006 Yönergelerinde (Pipatti vd., 2006) önerilen varsayılan bozunma oranları kullanılmıştır. 100 yıllık zaman diliminde parçalanmayan biyogenik karbonun DDT'de depolanmaya devam ettiği varsayılmıştır. DDT'de depolanmaya devam eden biyogenik CO₂'nin eşdeğer kütlesi, atık malzemelerde bulunan biyogenik karbon kütlesinden ve depo gazına dönüştürülen biyogenik karbon kütlesinden hesaplanmıştır. Tüm depo gazı toplanmadığı için bir kısmı DDT sahasının üst örtüsünden geçmekte ve atmosfere salınmaktadır. Toplanmayan CO₂ doğrudan atmosfere salınırken, toplanmayan CH₄ DDT'nin üst örtüsünde kısmen CO₂'ye oksitlenmektedir.

HELP (orijinal ismi: Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) modeli, EPA tarafından DDT'deki gerçek sızıntı suyu miktarını bulmak için geliştirilmiştir (Schroeder vd., 1994). Sızıntı miktarı yağış, buharlaşma ve DDT katmanlarından etkilenir, gerçek miktarı bulmak için HELP modeli 100 yıllık süreç için çalıştırılmıştır. Model, Düzce'nin 100 yıllık yağış (mm/yıl), sıcaklık (C°) ve güneş radyasyonu (mj/m²) değerlerini kullanmıştır. Modeldeki DDT katmanı (profil yapısı) Atıkların Düzeltilmiş Depolanması Yönetmeliği gerekliliklerine uygun hale getirilmiştir. Toplanmayan sızıntı suyu miktarı, yüzey suyunun bir bitiş noktası olduğu varsayılarak modellenmiştir. Türkiye için atıksu arıtma tesisi enerji tüketimi-ortalama verisi 0,30 kWh/m³tür (Türkiye Su Enstitüsü, 2019) ve ortalama KOİ yaklaşık 0,45 kg/m³tür (450 mg/L). Buna dayanarak elektrik tüketiminin 1,5 kWh/kg KOİ olduğu bulunmuştur (Tablo 4).

3. Bulgular ve Tartışma

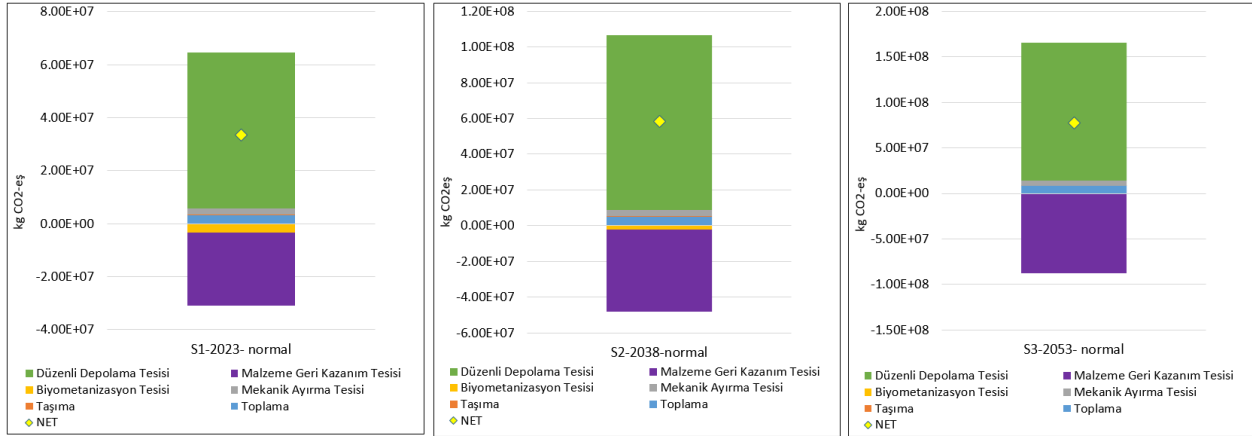
Bu bölümde, her bir atık prosesi ve tesisin sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla iklim değişikliği karakterizasyon sonuçları paylaşılmıştır. Daha sonra, tüm etki kategorilerini karşılaştırmak için normalize edilmiş sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak, hassasiyet analizi sonuçları sunulmuştur.

Normal elektrik karışımı iklim değişikliği YDD sonuçları (S1-S2-S3), karakterize sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir. Negatif bir değer, çevresel bir kazanç veya pozitif katkıyı gösterirken, pozitif bir değer, çevresel bir yükü veya negatif bir katkıyı göstermektedir.

3.1. İklim Değişikliği Kategorisi

İklim değişikliği için seçilen orta nokta karakterizasyon faktörü, kg CO₂-eş olarak ifade edilen, yaygın olarak kullanılan küresel ısınma potansiyelidir (KIP). Düzce'deki KAY sisteminin 2023'deki net küresel ısınma etkisi (normal elektrik karışımı için) (S1) 175 kg CO₂-eş/ton-atık ve net toplam: 33564 kg CO₂-eş/FB bulunmuştur (Şekil 6). Bu değerdeki en büyük negatif etkiye DDT sebep olmuştur. DDT içinde ise, günlük örtünden sızan depo gazı bu etkiye neden olmuştur. En büyük pozitif katkıyı (çevresel kazanımı) ise MGT'de hammaddeyi ikame eden ikincil ürünler sağlamıştır. Aynı senaryo 2038 ve 2053 yılı daha karbonsuz elektrik şebekesi sistemi için incelendiğinde net etki toplam etkinin sırasıyla (S2) 58374 kg CO₂-eş/FB ve (S3) 77469 kg CO₂-eş/FB olarak arttığı fakat atık başına emisyonların 2038 yılı için artarken 199 kg CO₂-eş/ton-atık, 2058 yılı için azaldığı 169 kg CO₂-eş/ton-atık görülmektedir (Şekil 6). Bu sonuçlar hem fonksiyonel birim hem de ton atık başına sonuçları beraber değerlendirmenin önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Hem 2038 hem de 2053 daha fazla atık üretildiği ve bu atıklar daha çok DDT'ye gönderildiğinden, net toplam emisyon değeri artmıştır. Fakat hem biyometanizasyon tesisi hem de DDT'de ikame edilen şebeke elektriği daha az fosil kaynak içerdiğinden ton atık başına değerler farklılık göstermiştir. Hammaddeyi ikame eden ikincil ürün miktarı artsa da DDT ve biyometanizasyondaki kayıp çok daha fazla olduğundan net emisyonlarda azalma görülmüştür.

Ayrıca, toplama ve mekanik ayırma tesisi emisyonları 2023'ten 2053'e artmakla beraber diğer tesislerin etkisi yanında etkileri ihmal edilebilir düzeyde az kalmıştır.



*FB: fonksiyonel birim

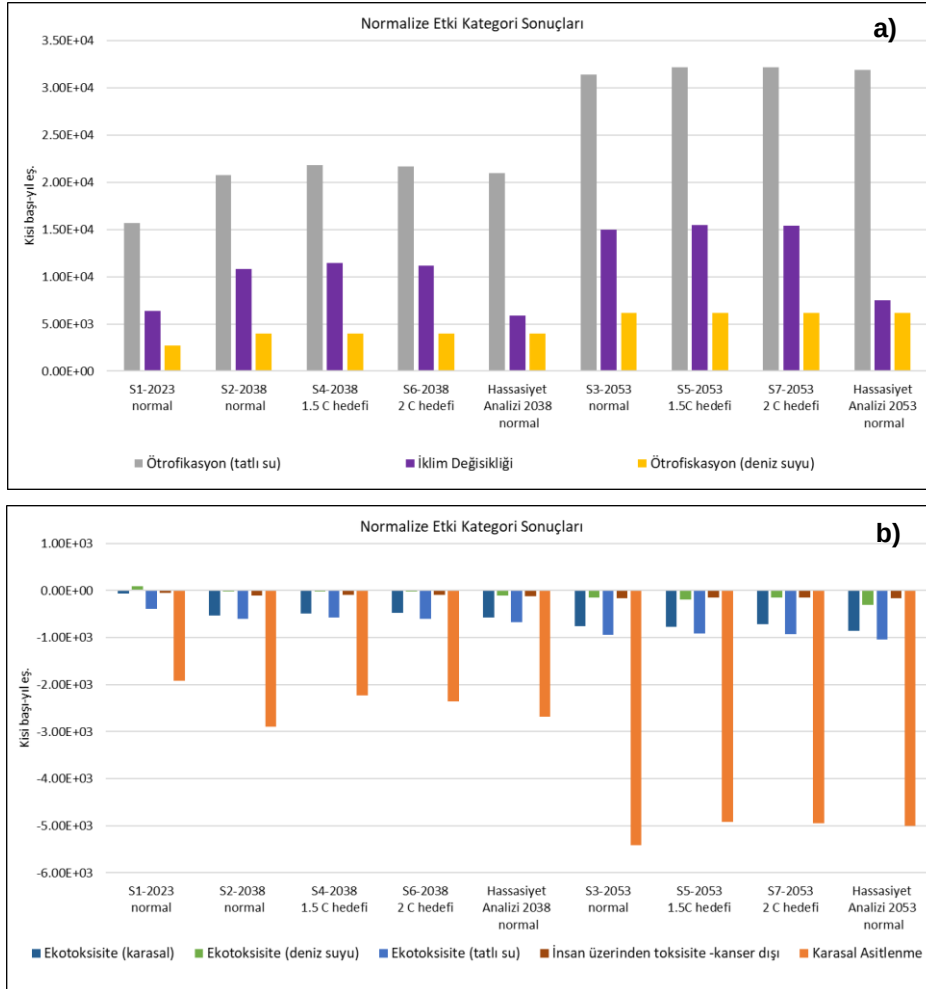
Şekil 6: Düzce belediye atıklarının Türkiye karbonsuzlaşma enerji üretim senaryolarına bağlı olarak iklim değişikliği etkisi kategorisi değişimi (kg CO₂-eş/FB)

Normal karbonsuzlaşma senaryosu için açıklanan bu durum, net emisyonların artış ve azalışı açısından 1.5°C (S4-S5), ve 2°C (S6-S7), senaryoları içinde benzer şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 7). İklim değişikliği kapsamında değerlendirilen karbonsuzlaşma senaryolarının hiçbirisi net sıfır veya negatif emisyon seviyelerine ulaşamamıştır. DDT'de kaynaklanan potansiyel riskin çoğu, sızıntı suyu ve depolama gazından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, depo gazı kontrol edilmezse, yangınlara neden olabilmektedir. Bu yangınlar sırasında oluşan duman CO, H₂S, CH₄ gibi tehlikeli toksik gazlar ve dioksinler gibi kanserojen maddeler içerebilmektedir (Vaverková, 2019). İklim değişikliği kategorisinde en büyük yük, günlük örtü arasından sızan, toplanamayan depo gazından kaynaklanmaktadır. Diğer çevresel kategorilerde ise depo gazının ön plana çıkan büyük bir etkisi yoktur. Yıllara bağlı olarak DDT'te gönderilen atık miktarı arttığı ve aktif gaz üretimi devam ettiği için, depo gazının en az etkisi 2023 yılında görülürken en büyük etkisi 2053 yılında görülmektedir. Benzer sonuçlar Tonini vd. (2018) tarafından bulunmuştur. 1 ton atığın DDT'ye gönderilmesi durumunda oluşacak iklim değişikliği etkilerini karşılaştırdıklarında, en büyük yük depo gazından kaynaklanırken, bunu sahada kullanılan ekipmanların yakıt tüketimi takip etmiştir. Daha önce Turner vd. (2016)'da Birleşik Krallık'ta KAY için yaptığı çalışmada, iklim değişikliği kategorisi yükünün baskın kaynağının DDT ve MGT ile hammadde ikamesinin pozitif etkilerin temel nedeni olduğunu tespit etmiştir. Yine dünya genelinde yapılan YDD derleme çalışmasında da benzer şekilde en büyük çevresel yükün DDT'den geldiği tespit edilmiştir (Khandelwal vd., 2019a).

MGT daha ayrıntılı incelendiğinde, Düzce'deki geri dönüşüm sürecinde en fazla çevresel kazanç, sırasıyla PET, çelik, alüminyum, kağıt-karton ve cam süreçlerinden kaynaklanmaktadır. 1.5°C (S4-S5) senaryosunda, net çevresel kazançlar normal karbonsuzlaşma senaryosuna (S2-S3) kıyasla artmıştır. Bu artışın önemli nedenlerinden biri, MGT'de kullanılan elektriğin daha az fosil yakıt kaynaklı olmasıdır. Bu çalışmasının sonuçlarından farklı olarak Wang vd. (2020)'in Birleşik Krallık'ta yaptığı çalışmada iklim değişikliğinde en büyük kazancı metaller, ardından kağıdın geri dönüşüm sürecinde bulmuştur. Geri dönüştürülmüş kağıt miktarı, metal miktarından fazla olmasına rağmen, kağıt geri dönüşümünde kullanılan kimyasal ve fosil yakıt tüketimi bu sonuçlara neden olmuştur. Khandelwal vd. (2019b)'in Hindistan için yaptığı YDD çalışmasında, MGT sürecinde geri dönüşüm oranının %20 ile %100 arasında artmasına dayalı hassasiyet senaryosu incelenmiştir. Geri dönüşüm oranındaki değişiklik ile çevresel fayda arasında doğrusal ve ters orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yani, MGT kullanım veya geri dönüşüm oranı arttıkça net çevresel yük azalmaktadır. Haupt vd. (2018), toplama oranı ile saflık arasında negatif bir korelasyon olduğunu belirlemiştir; yani, toplama oranı arttıkça saflık azalmaktadır. Aynı çalışmada, daha düşük saflığa ve daha uzun taşıma mesafelerine rağmen, yüksek toplama oranlarının kayda değer çevresel faydalar sağladığı ortaya konulmuştur. Düzce için MGT kapasitesi artırılırken, optimum toplama oranı belirlenmeli, kaynağında ayırım performansının artırılması için halk eğitilmeli ve Haupt vd. (2018) gibi çalışmaların sonuçları göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanılan elektrik karışımına bakıldığında ise Ferronato vd. (2020) sonuçlarına benzer şekilde, elektrik kaynağı fosil yakıtlar veya yenilenebilir kaynaklar olsa da, MGT çevresel açıdan en kazançlı tesis olarak bulunmuştur. Bu kapsamda, MGT'nin daha verimli kullanılabilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarının artırılması, geri dönüşüm altyapısının genişletilmesi, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını teşvik eden politikaların hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, kamu alımlarında geri dönüştürülmüş içerik kriterlerinin benimsenmesi, tüketicilerin atık yönetimi konusunda bilinçlendirilmesi ve DDT için depolama vergisi gibi önlemler, geri dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan zorlukların aşılmasına önemli katkılar sağlayabileceği öngörülmektedir.

3.2. Diğer Etki Kategorileri

İklim değişikliği ve bu çalışmada hesaplanan diğer yedi etki kategorisini karşılaştırmak ve değerlendirmek amacıyla, sonuçlar normalize edilmiştir (Şekil 7). Elektrik karışımındaki değişiklikler yalnızca tüketilen enerjiyi değil, aynı zamanda atık yönetim tesislerinde elektrik üretimiyle ikame edilen enerjiyi ve malzeme geri dönüşümünden kaçınılan elektriği de etkileyecektir (Goulart Coelho & Lange, 2018). Bu bağlamda, elektrik karışımındaki değişiklikler en çok ötrofikasyon (tatlı su) etki kategorisini etkilemiştir. Tatlı su ötrofikasyon kategorisinde en büyük yük, biyometanizasyon tesisinden çıkan fermentasyon ürününün katı fazının toprak üstü uygulamaları ve sızıntılarından gelmektedir. Deniz suyu ötrofikasyon kategorisinde en büyük yük, sızıntı suyu arıtımından gelmektedir. ReCiPe; tatlı su ve deniz suyu etki kategorileri hesaplamalarında CARMEN ve EUTREND modellerini kullanılmaktadır. Bu çerçevede alıcı su bölmelerini sınırlayıcı besine göre ayıran bir anlayış benimsenmektedir. Tatlı su ortamlarında fosfor (P) sınırlayıcı faktör olarak kabul edilirken, deniz suyu ortamlarında ise azot (N) sınırlayıcı faktör kabul edilmektedir. Bu tanımlamalara bakıldığında, yüksek oranda fosfor (P) içeren katı faz fermentasyon ürününün tatlı su ötrofikasyon yüküne ve yüksek azot (N) içeren sızıntı suyunun deniz suyu ötrofikasyon yüküne neden olması oldukça mantıklıdır. AÇ'den elde edilen katı faz fermentasyon ürünü, toprak üstü uygulamalar için uygun olup kimyasal gübreyi ikame etme potansiyeline sahiptir. Bu özelliği sayesinde doğrudan doğal sulara sızarak tatlı su kategorisinde etkili olabilmektedir. Tatlı su ve deniz suyu ötrofikasyonu etki kategorilerinde, MGT özellikle karton geri dönüşümünden kaynaklanan çevresel kazançlar sağlasa da, AÇ ve DDT'den gelen yüklerin fazlalığı nedeniyle net etki çevresel yüklerle sonuçlanmaktadır. Düzce atık yönetiminin sonuçlarına göre MGT tüm etki kategorilerinde çevresel kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, 2053 yılına gelindiğinde ise, tatlı su ve deniz suyu ötrofikasyonu kategorilerinde hâlâ çevresel kazanç sağlamaya devam etmektedir.



Şekil 7: Düzce belediye atıkları yönetimi- farklı etki kategorilerinin normalize edilmiş sonuçları: a) KIP, ÖP (TS), ÖP (DS), b) ET (K), ET (DS), ET (TS), İT, KA

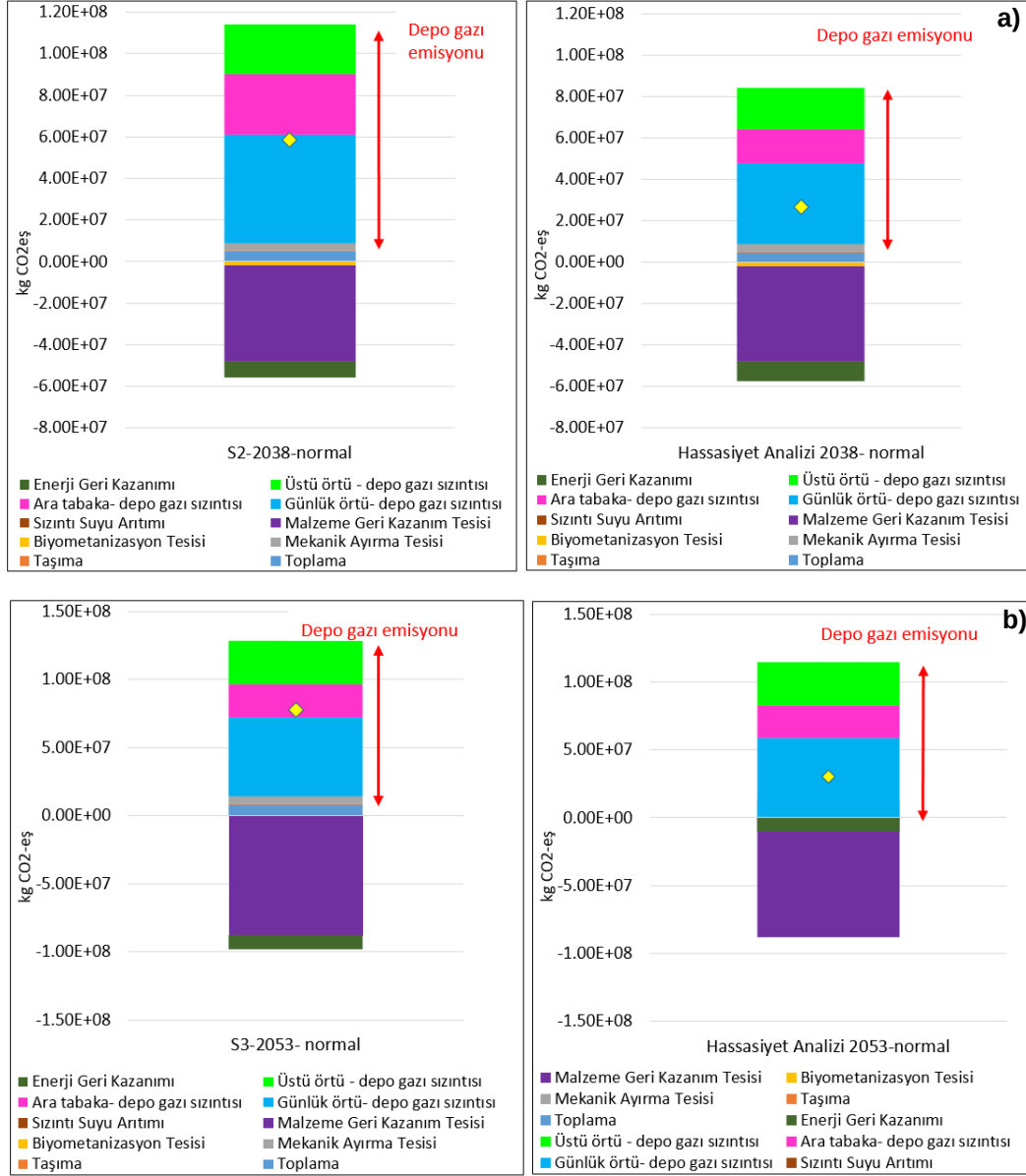
Net çevresel etkiler değerlendirildiğinde, iklim değişikliği, ötrofikasyon (tatlı su) ve ötrofikasyon (deniz suyu) olumsuz etkiler gösterirken; karasal asitlenme, asidifikasyon potansiyeli, ekotoksosite (tatlı su, deniz suyu ve karasal) ile insan üzerindeki toksosite (kansere dışı) kategorilerinde çevresel kazanımlar sağlanmaktadır. Karasal asitlenme kategorisinde, toplama, taşıma, biyometanizasyon tesisi ve DDT'den kayıplar olsa da, MGT'den gelen kazançlar net çevresel pozitif sonuçlara neden olmaktadır. Asidifikasyon potansiyeli, sülfür dioksit (SO₂), amonyak (NH₃) ve azot oksitler (NO_x) gibi asidik gazların atmosferdeki suyla etkileşime girerek asit yağmurlarına dönüşme potansiyeli olarak tanımlanabilmektedir. ReCiPe'de bu potansiyel GEOS-Chem modeliyle hesaplanmaktadır. Bu nedenle atık YDD çalışmalarında toplama-taşıma süreçlerinde yüksek asidifikasyon yüklerine rastlanmaktadır. Ayrıca [İrbaş ve Dadaşer-Celik \(2021\)](#)'te daha önce benzer şekilde geri dönüşümün, asidifikasyonun azaltılmasına katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, [Ferronato vd. \(2020\)](#)'nın Bolivya üzerine yaptığı çalışmada, fosil yakıt yanmasının azaltılmasıyla elde edilen atıktan enerji geri kazanımının, asitlenme potansiyelinin önlenmesine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu tespit edilmiştir.

Ekotoksosite (tatlı su) kategorisinde en büyük yük DDT sızıntı suyu arıtmasından ve kazanç MGT kağıt geri dönüşümünden gelmektedir. Ekotoksosite (deniz suyu) kategorisinde en büyük kazanç MGT kağıt geri dönüşümünden gelmektedir. İnsan üzerinden toksosite -kansere dışı ve Ekotoksosite (karasal) kategorilerinde de en büyük kazanç MGT kağıt ve PET geri dönüşümünden gelmektedir, en büyük yük ise taşımadan gelmektedir. Türkiye'nin gelecekteki elektrik karışımının yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklı olması, kaçınılan elektrik tüketiminin sonuçlara olan etkisini azaltmaktadır. İklim değişikliğe etki kategorisinde olduğu gibi, diğer kategorilerde de elektrik sisteminde karbondan uzaklaşmanın, senaryoların net çevresel yük sıralamalarını önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. TÜİK sonuçlarında da belirtildiği gibi Türkiye'de halen en yaygın kullanılan atık yönetim şekli DDT'dir ([Türkiye İstatistik Kurumu, 2023a](#)). Eğer Türkiye 2053 yılı karbondan uzaklaşma hedeflerine ulaşırken, DDT'ye sıfır atık gönderme hedefine ulaşamazsa (Şekil 6) bu durum atık sektöründe, beklenmeyen ekstra çevresel yüklere neden olabilecektir (Şekil 7).

3.3. Hassasiyet (Duyarlılık) Analizi

Senaryo sonuçları incelendiğinde DDT'nin ve özellikle DDT içerisinde depo gazı sızıntısının iklim değişikliği kategorisi sonuçları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. 2038 ve 2053'te net küresel ısınma etkisi 199 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 58374 kg CO₂-eş/FB) ve 169 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 77469 kg CO₂-eş/FB) olan değerler depo gazı toplama oranının artmasıyla (Tablo 2) 92 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 26918 kg CO₂-eş/FB) ve 66 kg CO₂-eş/ton-atık (net toplam: 30401 kg CO₂-eş/FB) olarak azalmıştır (Şekil 8). Fakat depo gazının daha verimli toplanması durumunda hem 2038 hem 2053 yıllarında temel senaryo (S1) göre yani 2023'deki net küresel ısınma etkisi (normal elektrik karışımı için) ton atık başına emisyonlar daha düşük olmaktadır.

YDD sonuçları, daha önceki çalışmalarla uyumlu olarak, depolama gazının toplanıp enerjiye dönüştürülmesi durumunda bile, DDT alanlarının yüksek emisyon seviyelerine sahip olduğunu, en fazla çevresel yükün DDT'den geldiğini ve enerji geri kazanım verimliliğinin düşük olduğunu göstermektedir ([Güven vd., 2019](#)). DDT'nin en büyük yükü, günlük örtü arasından sızan ve toplanamayan depo gazından kaynaklanmaktadır (Şekil 8). Hassasiyet senaryosunda, depo gazı toplama verimi %15 arttığından, buna bağlı olarak depo gazından kaynaklanan emisyon yükü de azalmaktadır. Ancak 2038 ve 2053 yıllarında depo gazından elde edilen enerji kazanımları değerlendirildiğinde, 2038 yılında daha büyük çevresel kazanç sağlandığı görülmektedir. Bu durum, doğrudan elektrik üretimindeki karbonsuzlaşma süreci ve 2038 yılında daha fazla fosil yakıtın ikame edilmesiyle ilişkilidir. YDD sonuçları, yenilenebilir kaynaklara doğru geçişin net etkilerde (ve özellikle DDT'de) iklim değişikliği etkilerini hafifletmek için faydalı olmadığını göstermektedir. Çünkü mevcut atık sistemi korunurken, elektrik karışımı karbondan uzaklaşırsa, daha fazla atık DDT'ye giderken daha az fosil kaynak ikame edilmiş olacaktır. Hassasiyet analizi sonuçları depo gazı toplama veriminin artması durumunda atık başına düşen CO₂eş değerinin 2038 ve 2053 yıllarında azalacağını göstermektedir. Yani depo gazının daha verimli toplanması iklim değişikliği hedefi ile uyumlu hale gelmek için gereklidir. Fakat her durumda en büyük çevresel yük DDT'den gelmektedir. Bu da Türkiye'nin 2053 yılına kadar DDT'ye sıfır atık gönderme hedefinin ne kadar doğru olduğunu göstermektedir. Literatürde karbonsuzlaşmanın atık yönetimi üzerinde benzer sonuçlara neden olduğuna daha önce rastlanmıştır ([Slorach vd., 2020](#)).



Şekil 8: Düzce belediye atıkları yönetimi- hassasiyet analizi sonuçları- düzenli depolama gazı toplama oranının değişmesi (a) 2038 yılı (b) 2053 yılı (kg CO₂-eş/FB)

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmanın bulguları, Düzce'deki KAY sisteminin bazı önemli eksikliklerini ortaya koymaktadır. Geri dönüştürülen atık miktarının düşük olması, atıktan enerji üretiminin yetersizliği ve biyolojik olarak parçalanabilir atıkların depolanmasının uzun vadeli çevresel yükler oluşturması, sistemin sürdürülebilirlik açısından geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tüm senaryolarda ve etki kategorilerinde, MGT en fazla çevresel kazanım olduğu tesislerdir. Bu yüzden MGT'den reddedilen atıkları azaltmak için MGT tesislerinin verimlerinin ve kaynağında atık ayrımının artması gereklidir. Tüm yıllar (2023- 2038-2053) için yapılan analizlerde en büyük çevresel yüke (fermentasyon ürününün azot yükü yüzünden) tatlı su ötrofikasyon sahipken en büyük çevresel kazanca (geri dönüşümle hammadde ikamesi dolayısıyla) karasal asitleşme sahiptir. Fosil yakıtların aşamalı olarak kaldırılması ve elektrik sisteminde karbondan uzaklaşılması sonuçları değiştirmemiştir. Mevcut atık yönetimi süreçlerinde karbonsuzlaşma hedeflerinin beklenen çevresel etkileri yaratmadığı tespit edilmiştir. Bulgular ışığında, aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Enerji Geri Kazanımı: Düzce'de doğrudan enerji geri kazanımı sağlayan tesislerinin olmaması, sistemin çevresel etkilerini artırmaktadır. Yeni tesislerin kurulması ve bu tesislerin enerji verimliliğinin artırılması gelecek çalışmalarda değerlendirilmelidir.

Geri Dönüşüm ve Depozito Sistemi: Türkiye’de ve Düzce’de en yaygın kullanılan atık yönetim sistemi DDT olduğundan, geri dönüşüm oranlarının artırılması büyük önem taşımaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). Özellikle depozito sisteminin hayata geçirilmesiyle DDT’ye gönderilen atık miktarı azaltılarak çevresel kazanımlar artırılabilir. Bu süreçte halkın ve diğer paydaşların eğitilmesi önemlidir.

Döngüsel Ekonomi ve Karbonsuzlaşma: 2053 karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için atık sektörünün döngüsel ekonomi modelini benimsemesi gerekmektedir. Atıkların kaynağa ayrıştırılması, biyolojik olarak parçalanabilir atıkların işlenmesi kritik adımlardır. Bu tür sistemlerin yaygınlaşması için DDT için depolama vergisi gibi araçlar dikkate alınması önemlidir.

Kamu-Özel Sektör İş Birliği: Atık yönetiminde sürdürülebilir çözümler geliştirmek için kamu-özel sektör iş birliği güçlendirilmelidir. Finansal mekanizmaların geliştirilmesi, yenilikçi atık yönetim modellerinin benimsenmesini destekleyecektir.

Atık Toplama ve Lojistik Optimizasyonu: Kaynağa ayrıştırılan atıkların toplanması sırasında kullanılan araçların sera gazı emisyonlarını azaltmak için rota optimizasyonu ve alternatif yakıt kullanımının teşvik edilmesi önemlidir.

Maliyet Analizleri: Atık yönetim sistemlerinin yaşam döngüsü maliyetleri üzerine detaylı analizlerin yapılması, karar vericilere daha sağlıklı politika önerileri sunulmasını sağlayacaktır. Düzce’ye ait maliyet verilerinin toplanması durumunda ayrıntılı bir yaşam maliyet analiz çalışması yapılmalıdır.

Gelecek Çalışmalar: Türkiye’nin 2053 yılına kadar DDT’ye sıfır atık gönderme hedefi doğrultusunda daha kapsamlı değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmadaki sonuçların en önemli nedenlerinden biri Düzce’de yakma tesisi gibi doğrudan enerji geri kazanımı yapan tesislerin bulunmamasıdır. Mevcut durumda biyometanizasyon ve DDT tesislerinde geri kazanım yapılsa da bu tesislerden yakma tesisleri vb. olduğu gibi yüksek oranda enerji geri kazanımı olmadığından, sistemin çevresel etkilerinde dolaylı değişimler gözlenmektedir. Bu çalışma, Düzce’nin mevcut tesisleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Yakma gibi yeni tesislerin kurulması durumunda ne gibi değişikliklerinin gözleneceği, gelecek çalışmalarda ele alınmalıdır. Özellikle bu çalışmadaki, elektrik karışımı halihazırda yakma tesisi ve yüksek kapasiteli biyometanizasyon tesisi bulunan İstanbul gibi metropol şehirlere uygulanırsa daha hassas sonuçlar alınması mümkündür.

Çalışmanın sonuçlarının, karar verici makamlar tarafından geliştirilerek atık politikaları ve bundan sonraki çalışmalar için bir referans noktası oluşturması beklenmektedir. Bu kapsamda önerilen stratejilerin uygulanması, sürdürülebilir çevresel yönetim hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Banar, M., Cokaygil, Z., & Ozkan, A. (2009). Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management*, 29(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.12.006>
- Bernstad Saraiva, A., Souza, R.G., Mahler, C.F., & Valle, R.A.B. (2018). Consequential lifecycle modelling of solid waste management systems – Reviewing choices and exploring their consequences. *Journal of Cleaner Production*, 202, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.038>
- Beşer-Karpuz, A. (2022). *Düzce’de Çöp Sorunu Tarih Oldu*. 16 Kasım 2024’te <https://www.duzcedamla.com/video/18380392/duzcede-cop-sorunu-tarih-oldu> adresinden alındı.
- Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi. (2024). *Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi*. 27 Nisan 2025’de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Turkiye_Long_Term_Climate_Strategy.pdf adresinden alındı.
- Buswell, A. M., & Boruff, C. S. (1932). The relation between the chemical composition of organic matter and the quality and quantity of gas produced during sludge digestion. *Sewage Works Journal*, 4(3), 454–460.
- Çetinkaya, A.Y., Bilgili, L., & Levent, K. S. (2018). Life cycle assessment and greenhouse gas emission evaluation from aksaray solid waste disposal facility. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 549–558. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0559-3>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2017). *Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2023*. 9 Eylül 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/haberler/ulusal_at_k_yonet-m--eylem_plan--20180328154824.pdf adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Düzce İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı*. 10 Kasım 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/duzce/menu/il-sifir-atik-yonetim-sistemi-planı_20210402061151.pdf adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Zorunlu Depozito Yönetim Sistemi Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar*. 16 Kasım 2024’te <https://webdosya.csb.gov.tr/db/tuca/icerikler//kurum-mevzuati-11555-20230822110901.pdf> adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023a). *İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030)*. 26 Nisan 2025’te <https://iklim.gov.tr/db/english/dokumanlar/2024-2030--8230-3126-20240328165629.pdf> adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023b). *Düzce İli 2023 Yılı Çevre Durum Raporu*. 16 Kasım 2024’te https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/duzce_-cdr2023-20241108082014.pdf adresinden alındı.
- De la Cruz, F. B., & Barlaz, M. A. (2010). Estimation of waste component-specific landfill decay rates using laboratory-scale decomposition data. *Environmental Science & Technology*, 44(12), 4722–4728. <https://doi.org/10.1021/es100240r>
- Demirarslan, K. O., & Yalçın Çelik, B. (2018). Urban solid waste characterization in the east part of Black Sea region. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(2), 167–182. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2018.04.02.005>
- Düzce Ticaret Borsası. (2020). *Düzce Ticari Hayatı ve Üretim Durumu 2020*. 25 Nisan 2025’te <https://www.duzcetb.org.tr/Dosyalar/DUZCE-PANAROMASI-VE-EKONOMİK-GOSTERGELERİ-RAPORU.pdf> adresinden alındı
- Ecoinvent. (2021). *ecoinvent version 3.7.1*. 10 Kasım 2024’te <https://ecoinvent.org/sayfasından> alındı.
- Erses Yay, A. S. (2015). Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>

- Fernández-Braña, A., Feijoo, G., & Dias-Ferreira, C. (2020). Turning waste management into a carbon neutral activity: practical demonstration in a medium-sized European city. *Science of Total Environment*, 728, Article 138843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138843>
- Ferronato, N., Gorritty Portillo, M. A., Guisbert Lizarazu, E.G., & Torretta, V. (2020). Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework. *Waste Management & Research*, 38, 98–116. <https://doi.org/10.1177/0734242X20906250>
- Grzesik, K., & Malinowski, M. (2016). Life cycle assessment of refuse-derived fuel production from mixed municipal waste. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(21), 3150–3157.
- Gnansounou, E. (2017). Fundamentals of life cycle assessment and specificity of Biorefineries. In G. Gnansounou & A. Pandey (Eds.), *Life-Cycle Assessment of Biorefineries* (pp. 41–75). Elsevier.
- Goulart Coelho, L.M., & Lange, L.C. (2018). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.026>
- Güven, H., Wang, Z., & Eriksson, O. (2019). Evaluation of future food waste management alternatives in Istanbul from the life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 239, Article 117999. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117999>
- Haupt, M., Waser, E., Würmli, J.C., & Hellweg, S. (2018). Is there an environmentally optimal separate collection rate?. *Waste Management*, 77, 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.050>
- Ionescu, G., Rada, E.C., Ragazzi, M., Mărculescu, C., Badea, A., & Apostol, T., (2013). Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes. *Energy Conversion and Management*, 76, 1083–1092. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.049>
- Irbaş, E., & Dadaser-Celik, F. (2021). Evsel katı atık yönetim senaryolarının yaşam döngüsü analizi: Melikgazi İlçesi (Kayseri) örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(2), 266–277. <https://doi.org/10.21324/dacd.824621>
- International Organization for Standardization. (2006a). ISO 14040:2006 – Çevre yönetimi – Yaşam döngüsü değerlendirme – İlkeler ve çerçeve. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). ISO 14044:2006 – Çevre yönetimi – Yaşam döngüsü değerlendirme – Gereklilikler ve kılavuzlar. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Horna, L., Kahhat, R., & Vázquez-Rowe, I. (2022). Reviewing the influence of sociocultural, environmental and economic variables to forecast municipal solid waste (MSW) generation. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 809–819.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., Hollander, A., Zijp, M., & van Zelm, R., (2016). *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. National Institute for Public Health and the Environment. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- Khandelwal, H., Dhar, H., Thalla, A. K., & Kumar, S. (2019a). Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *Journal of Cleaner Production*, 209, 630–654.
- Khandelwal, H., Thalla, A.K., Kumar, S., & Kumar, R. (2019b). Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology*, 288, Article 121515. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121515>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *Urban Development Series. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Keramidas, K., Fosse, F., Diaz-Vazquez, A., Schade, B.,Tchung-Ming, S., Weitzel, M., Vandyck, T.& Wojtowicz, K. (2021). *Global energy and climate outlook 2020: A new normal beyond Covid-19*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/608429, JRC123203>
- Kurdoğlu, A.Ş. (2013). *Ambalaj atıkları yönetimi İstanbul, Kadıköy Örneği* [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Lipasto, (2012). *Calculation system for transport exhaust emissions and energy use in Finland*. 6 Aralık 2024'te http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muute/tyokoneete/diesel_a_te.htm adresinden alındı.
- Maalouf, A., & El-Fadel, M. (2019). Life cycle assessment for solid waste management in Lebanon: Economic implications of carbon credit. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(1_suppl), 14–26. <https://doi.org/10.1177/0734242X18815951>
- Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*, 29(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.021>
- Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., & Scharff, H. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(8), 825–836.
- Mboowa, D., Quereshe, S., Bhattacharjee, C., Tonny, K., & Dutta, S. (2017). Qualitative determination of energy potential and methane generation from municipal solid waste (MSW) in Dhanbad (India). *Energy*, 123, 386–391.
- Nas, S. S., & Bayram, A. (2008). Municipal solid waste characteristics and management in Gümüşhane, Turkey. *Waste Management*, 28(12), 2435–2442. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.039>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2019), *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- Özeler, D., Yetis, U., & Demirel, G.N. (2006). Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environment International*, 32(3), 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.10.002>
- Pipatti, R., Svandal, P., Silva Alves, J. W., Gao, Q., López Cabrera, C., Mareckova, K., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A., & Yamada, M. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Pressley, P. N., Levis, J. W., Damgaard, A., Barlaz, M. A., & DeCarolis, J. F. (2015). Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. *Waste Management*, 35, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.012>
- Salihoğlu, G., Poroy, Z., & Salihoğlu, N. K. (2019). Life cycle assessment for municipal waste management: analysis for Bursa. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(6), 692–699. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.33603>

- Scheutz, C., Fredenslund, A. M. (2019). Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. *Waste Management*, 97, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>
- Schroeder, P. R., Lloyd, C., Zappi, P., & Aziz, N. (1994). *HELP modeli: Düzenli depolama alanı performansının hidrolojik değerlendirmesi – Sürüm 3 için mühendislik dokümantasyonu* (NTIS PB 95-212700). ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA), Araştırma ve Geliştirme Ofisi. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=300038SW.TXT>
- Sezer, F.E. (2019). *İstanbul'un Avrupa yakasında oluşan katı atıkların demiryoluyla taşınması üzerine bir araştırma* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Skea, J., Shukla, P. R., Reisinger, A., Slade, R., Pathak, M., ... Winkler, H. (2022). Summary for Policymakers. In J. Skea, P. R. Shukla, A. Reisinger, R. Slade, M. Pathak & A. Al Khouradje (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2020). Assessing the economic and environmental sustainability of household food waste management in the UK: Current situation and future scenarios. *Science of the Total Environment*, 710, Article 135580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135580>
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J.P., Morcet, M., Aran, C., Moreau-Le Golvan, Y., & Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26, 516–25.
- Sullivan, P. (2010). *Current MSW Industry Position and State-of-the-Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills*. Solid Waste Industry for Climate Solutions (SWICS). https://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan_LFG_Destruction_Efficiency_White_Paper.pdf
- Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Clift, R., Lettieri, P., Chapman, C., & Taylor, R. (2016). Life cycle assessment of conventional and advanced two-stage energy-from-waste technologies for methane production. *Journal of Cleaner Production*, 129, 144–158.
- T.C. Resmi Gazete. (2010). *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik* (Resmi Gazete Tarih: 26.03.2010, Sayı: 27533). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100326-5.htm>
- Tian, P., Wu, Y., Shang, B., Qi, C., Xu, Z., Li, G., Luo, W., Zhang, W., & Li, Y. (2025). LCA as a decision support tool for the environmental improvement of organic fraction of municipal solid waste composting in China. *Journal of Cleaner Production*, 495, Article 145068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145068>
- Tonini, D., Manfredi, S., Bakas, I., Kai-Sørensen Brogaard, L., & Damgaard, A. (2018). Life Cycle Assessment of Landfilling. In R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Solid Waste Landfilling* (pp. 955–972). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00046-2>
- Tunesi, S., Baroni, S., & Boarini, S. (2016). Waste flow analysis and life cycle assessment of integrated waste management systems as planning tools: Application to optimise the system of the City of Bologna. *Waste Management & Research*, 34, 933–946.
- Turner, D. A., Williams, I. D., & Kemp, S. (2016). Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. *Journal of Cleaner Production*, 129, 234–248.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023a). *Atık İstatistikleri 2022*. 6 Aralık 2024'te <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570> adresinden alındı.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023b). *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2023*. 3 Mayıs 2025'te <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2023-53974> adresinden alındı.
- Türkiye Su Enstitüsü. (2019). *Büyükşehir Su ve Kanalizasyon İdareleri Arasında Mukayeseli Değerlendirme Çalışması*. 6 Aralık 2024'te <https://www.suen.gov.tr/Suen/catdt.asp?val=390> adresinden alındı.
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill impacts on the Environment—Review. *Geosciences*, 9(10), Article 431. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100431>
- Wang, D., He, J., Tang, Y.T., Higgitt, D., & Robinson, D. (2020). Life cycle assessment of municipal solid waste management in Nottingham, England: Past and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 251, Article 119636. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119636>
- Yaman, C. (2011). *İstanbul için evsel katı atıkların toplanması, taşınması, bertarafı ve genel kent temizliğine ilişkin maliyetler*. Halic Çevre. <https://www.haliccevre.com/images/sempozyum/47.pdf>
- Yıldız-Geyhan, E., Yılan-Çiftçi, G., Altun-Çiftçi, G. A., & Neşet Kadirgan, M. A. (2016). Environmental analysis of different packaging waste collection systems for Istanbul – Turkey case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 27–37.

Atık Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanılması

Eren Batu Günaydın¹, Oğuzhan Turan¹, Hasan Bilgehan Kaplan¹
Mehmet Kaan Temiz¹, Mehmet Pınarbaşı^{1*}

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale.

Özet

Atık, üretim süreçlerinden kaynaklanan ve artık kullanılamayan maddeler olarak tanımlanır. Üretim tesisleri, bu atıkları teknik ve yasal gerekliliklere uygun şekilde bertaraf etmek zorundadır. Uygun atıkların seçilmesi, yüklenici firmaların çevresel sorumluluklarını yerine getirmeleri ve ekonomik faydaları en üst düzeye çıkarmaları açısından önemli bir süreçtir. Bu seçimde kârlılık, arz sürekliliği, zehir ve su oranı, kalorifik değer gibi birçok kriter etkili olur. Çalışmada, bu kriterlerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden faydalanılmıştır. İlk olarak, kriterlerin önem dereceleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile hesaplanmıştır. Ardından, belirlenen alternatifler TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır. AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir arada kullanılması, karar verme sürecinde objektifliği artırarak alternatiflerin daha sistematik bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Grup karar verme yaklaşımıyla uzmanlardan alınan görüşler doğrultusunda 12 kriter belirlenmiştir. Sonuçlarda "Satın Alma Maliyeti" en etkili, "Bertaraf Yöntemi" ise en az etkili kriter olarak tespit edilmiştir. Çalışma, yüklenici firmaların verimli ve etkili atık seçimi süreçleri oluşturmalarına rehberlik ederek karar alma süreçlerinde katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Sözcükler

Atık Seçimi, Seçim Kriterleri, Çok Kriterli Karar Verme, AHP, TOPSIS

Using of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Waste Selection

Abstract

Waste is defined as materials resulting from production processes that can no longer be used. Production facilities have to dispose of these wastes in accordance with technical and legal requirements. The selection of suitable waste is an essential process for contractor firms to fulfill their environmental responsibilities and maximize economic benefits. This selection is influenced by many criteria, such as profitability, continuity of supply, toxicity and water ratio, and calorific value. In this study, multi-criteria decision-making methods are used to identify and evaluate these criteria. First, the importance levels of the criteria were calculated using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Then, the identified alternatives were ranked by the TOPSIS method. The combined use of AHP and TOPSIS methods has enhanced objectivity in the decision-making process, enabling a more systematic evaluation of alternatives. With the group decision-making approach, 12 criteria were determined in line with the opinions received from the experts. In the results, "Purchase Cost" was found to be the most effective criterion, and "Disposal Method" was found to be the least effective criterion. The study aims to contribute to decision-making processes by guiding contractor firms in establishing efficient and effective waste selection processes.

Keywords

Waste Selection, Selection Criteria, Multi Criteria Decision Making, AHP, TOPSIS

1. Giriş

Dünya Sağlık Örgütü, sağlığı sadece fiziksel olarak değil aynı zamanda zihinsel ve sosyal tam bir refah hali şeklinde tanımlamaktadır (World Health Organization, 1948). Tanım, sağlıklı olmanın temel koşullarından birinin sağlıklı bir çevrenin varlığına bağlı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Akin, 2007). Sanayileşme süreci 19. yüzyıl itibarıyla hız kazanarak çevre sorunlarını daha belirgin hale getirmiştir. Günümüzde de sanayi üretiminin son hızla artmasıyla birlikte çevre sorunları olduğundan daha fazla önemli bir hale gelmiştir. Hızlı kentleşme ve göç, bu sorunların ciddiyetini artırırken, kentleşmenin getirdiği nüfus artışı atık toplama, geri dönüşüm ve bertaraf hizmetlerini gerçekleştiren müesseselerin sayısında da bir artışa neden olmuştur. Çevre sorunlarının en önemlilerinin başını sanayi, tehlikeli ve tıbbi atıklar çekmektedir (İşildar, 2018). Bu tür atıklar çeşitli faaliyetlerin istenmeyen çıktıları olup, çevre, insan gibi faktörler için su ve hava kirliliğine ve buna bağlı olarak insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere ve toprak verimliliğinin düşmesi gibi sorunlara yol açmaktadır (Kızıldemir & Sandıkcı, 2017; Pour vd., 2018).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (318) 3574242 Faks: +90 (318) 3572459

E-posta: erenbatugunaydin@gmail.com (Günaydın E.B.),
ogzhanturan@hotmail.com (Turan O.), hb_34kaplan@hotmail.com (Kaplan H.B.),
mehmetkaantemiz@gmail.com (Temiz M.K.), mpinarbasi@kku.edu.tr (Pınarbaşı M.)

Gönderim Tarihi / Received : 16/01/2025

Kabul Tarihi / Accepted : 03/03/2025

İnsanlar atıklarla yaşam döngüsü boyunca etkileşim halindedir. Atık yönetim süreçleri doğru yönetilmediği takdirde bu durum insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından çeşitli problemlere yol açabilmektedir. (Aydoğdu & Çobanoğlu, 2006).

Atıkların günümüzde önemli bir sorun olduğu dünya genelindeki çevreci örgütler ve devletler tarafından kabul edilmekle beraber kontrol edilmediği takdirde önüne geçilemez sorunlar yaratacağı da bu örgütlerin ve devletlerin yapmakta olduğu çalışmaların sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır (Bilgili, 2023). Atıklar, kaynağına ve fiziksel formuna bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Endüstriyel süreçlerden, evsel kullanımdan ve tıbbi uygulamalardan kaynaklanan atıklar katı, sıvı ve gaz formunda olabilir. Fakat atık çeşitleri literatürde sadece katı, sıvı ve gaz atıklarla sınırlı olmamakla birlikte ambalaj atıkları da yer almaktadır (Gündüzalp & Güven, 2016). Ambalaj atıkları ise özellikle geri dönüşüm süreçleri açısından ayrı bir sınıflandırma gerektirir. Sıvı atıklar; ev ve işletmelerdeki temizlik suları, kanalizasyon suları, insandan çıkan kirli kan vs. atıkları ifade etmektedir. Gaz atıklar; sanayi işletme bacaları, yakma tesisleri, fosil yakıtların kullanılması, çöp depolama vs. atığın temel kaynaklarıdır (Karasu, 2013). Ambalaj atıklarına örnek olarak ticari açıdan her türlü ambalaj atıkları örnek verilebilir.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı atık yönetimi ve tehlikeli atıkların kontrolü hakkındaki yönetmelikleri (T.C. Resmi Gazete, 2005; 2015) ile işletmelere birtakım yükümlülükler yüklemektedir. Bu yükümlülükler arasında atık yönetim planı hazırlama, atıkları türlerine göre ayrıştırma ve depolama, geri dönüşüm ve yeniden kullanım teşviki, tehlikeli atıkların güvenli yönetimi, düzenli beyan ve raporlama, çalışanların eğitimi, yasal uygunluk ve denetimlere uyma, diğer işletmeler ve yerel yönetimlerle iş birliği yapma, atık yönetimi maliyetlerini karşılama ve ulusal ve uluslararası çevre standartlarına uygunluk gibi maddeler bulunur. Bu yükümlülükler, işletmelerin çevreye zarar vermeden faaliyetlerini sürdürmesini ve yasal gerekliliklere uymasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Atık bertarafını ticari bir iş olarak yürüten işletmeler için bu yükümlülüklerin yerine getirilmesi, hem çevreye duyarlı bir faaliyet yürütmeyi hem de rekabet avantajı elde etmeyi mümkün kılar. Rekabet avantajı açısından atık bertaraf şirketleri uygun atıkları alıp kendi işletmesinin şartlarına uygun atıkları seçip işleme durumu ile karşı karşıya kalmaktadır. Uygun atık, atık bertaraf ve geri dönüşüm tesislerinin kabul edebileceği özelliklere sahip atıklardır. Uygun atık sadece kimyasal ve fiziksel etkileri değil, aynı zamanda çevresel etkileri de dahil edilerek belirlenen kriterlere dayanarak seçilen atıklardır. Bir atığın kokusu, zehir miktarı, su miktarı, kalorifik değeri gibi birçok kriter bu kriterler arasında sayılabilir.

Bu çalışmada, atık bertarafını ticari bir iş olarak yapan bir işletmenin, atık seçimi için dikkate aldığı kriterlerin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kriterler Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve TOPSIS yöntemi ile de alternatif atıklar önceliklendirilmiştir. Bu sayede, işletmenin atık yönetim planını daha verimli hale getirerek çevresel, ekonomik, teknik ve yasal faktörleri göz önünde bulundurmasını ve bu kriterler ile alternatifleri sistematik bir şekilde değerlendirmesi sağlanmıştır. Çalışma hakkındaki literatür araştırmasına ait özet bilgilere Tablo 1’de yer verilmiştir.

Tablo 1: Atık seçimi ile ilgili literatür araştırması

Yazarlar	Konu	Yöntemler	Gösterge
(Dijkgraaf & Vollebergh, 2004)	Katı atık bertaraf yöntemlerinin sosyal maliyet analizi	Sosyal maliyet analizi	Bertaraf yöntemlerinin maliyet farkları
(Ghose vd., 2006)	Katı atık taşımacılığı için GIS tabanlı model	Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS)	Ulaşım mesafesi, maliyet, kapasite
(Koushki vd., 2004)	Kuveyt'teki evsel katı atıkların taşıma ve toplama maliyetleri	Maliyet analizi	Toplama maliyeti, taşıma maliyeti
(Wu vd., 2020)	Atık toplama ve taşıma için araç rotası optimizasyonu	Araç rotası optimizasyonu	Mesafe, maliyet, zaman
(Korkmazer vd., 2016)	Atık bertaraf firması seçimi	Çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV)	Maliyet, çevresel etki, firma performansı
(Hasanov vd., 2013)	Kapalı devre tedarik zinciri sisteminin enerji ve maliyet analizi	Tedarik zinciri modeli	Enerji tüketimi, atık bertaraf maliyeti, ulaşım maliyeti
(Gopalakrishnan vd., 2021)	Blockchain tabanlı atık yönetimi sisteminin maliyet analizi	Maliyet analizi ve optimizasyon	Blockchain güvenliği, işlem maliyetleri
(Kaçtıoğlu & Şengül, 2010)	Erzurum'daki ambalaj atıklarının geri dönüşüm ağı tasarımı	Tersine lojistik ve karma tamsayılı programlama modeli	Maliyet, ağı tasarımı, geri dönüşüm kapasitesi
(Eriksson vd., 2016)	Süpermarketlerde gıda atığını azaltma	Depolama sıcaklığı kontrolü	Maliyet, enerji tüketimi, gıda kaybı oranı
(Ulucak & Erdem, 2014)	Türkiye'deki çevre politikalarının etkinliği	Çevre-iktisat analizi	Çevresel sürdürülebilirlik, politika etkinliği
(İşildar, 2018)	Katı atık bertaraf yöntemi seçimi	Çok kriterli karar verme yöntemleri	Bertaraf yöntemlerinin maliyet ve çevresel etkisi
(Kılıç & Tüylü, 2019)	Atık döküm kumlarının hazır beton üretiminde kullanımı	Endüstriyel simbiyoz	Maliyet, çevresel etki, üretim kapasitesi

Tablo 1'in devamı

Yazarlar	Konu	Yöntemler	Gösterge
(Aka, 2021)	Endüstriyel atık geri dönüşüm kriterleri	BWM (Best-Worst Method)	Karar kriterlerinin etkisi (plastik, cam, çelik endüstrisi)
(Ertas & Güden, 2019)	Hastanelerde tıbbi atık yönetimi	Yönetim analizi	Maliyet, sağlık riskleri, çevresel etkiler
(Saltabaş vd., 2009)	İstanbul'da termal atık bertaraf yöntemleri	Termal bertaraf yöntemi analizi	Enerji üretimi, çevresel etki, maliyet
(Demirarslan & Başak, 2018)	Doğu Karadeniz illeri katı atık yönetimi	Bölgesel analiz	Katı atık türleri, toplama yöntemleri, maliyet
(Oğuz, 2018)	Tedarikçi seçimi	AHP ve TOPSIS	Maliyet, kalite, teslimat süresi

Literatürde atık seçimi konusunda, özellikle sanayi alanında seçim problemi çok azdır. Ağırlıklı olarak bertaraf yöntemi seçimleri veya tesis yeri seçimi problemleri ele alınmıştır. Bundan dolayı bu çalışmanın literatüre katkısını şu şekilde maddelendirmek mümkündür;

- Atık seçimi konusunda karar verme süreçlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulanabilirliğini göstermek,
- Atık türü ve yönetimi stratejilerindeki avantajları karşılaştırarak yeni bir bakış açısı sunmak,
- Atık seçiminde AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir arada kullanıldığı örnek bir çalışma sunmak.

Çalışmanın ikinci bölümü materyal ve metot hakkında bilgilere yer vermektedir. Üçüncü bölüm uygulama bölümüdür. Dördüncü bölümde ise çalışmanın sonucuna yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. AHP Yöntemi

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), hiyerarşik yapılar üzerinden çalışan iki yönlü karşılaştırma yaklaşımına dayanan bir çok kriterli karar verme yöntemidir (Felek vd., 2007; Özcan vd., 2017). Bu yöntem, karar sürecine etki eden kriterlerin ağırlıklarını tahmin ederek hesaplayan bir karar mekanizmasıdır (Saaty, 1994). Karar verme süreçlerinde pratik çözümler sunar ve kriter ağırlıklarının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Yöntemin temel uygulama adımları şu şekilde sıralanabilir.

Adım 1. Karar problemi tanımlanarak model kurulur.

Adım 2. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulur ve kriterlerden daha öncelikli olanı göstermektedir. Çalışmada 1-9'a kadar sayılar kullanılarak yapılan Saaty ölçeğine göre karşılaştırmalar yapılmıştır (Saaty, 1994). Ölçek Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: İkili karşılaştırma ölçeği

Önem Ölçeği	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	Bu seviyedeki kriterler, birbirine yakın öneme sahip olup, her birinin atık yönetimi sürecindeki katkıları eşit derecede önemlidir.
3	Orta derecede önemli	Bu düzeydeki kriterler, sürecin etkinliğini etkileyen ancak daha düşük öneme sahip unsurları ifade eder. Karar süreçlerinde belirli ölçüde etki yaratırlar.
5	Kuvvetli derecede önemli	Kuvvetli derecede önemli kriterler, sürecin başarıya ulaşması için belirleyici rol oynayan, yüksek etkiye sahip faktörlerdir.
7	Kuvvetli derecede önemli	Bu seviyedeki kriterler, genellikle stratejik kararlar üzerinde yüksek derecede etki yapar ve sistemin etkinliğini büyük ölçüde etkiler.
9	Kesin önemli	Kesin olarak önemli kriterler, atık yönetimi sürecinde kritik rol oynayan ve sürecin genel başarısını belirleyen unsurlardır.
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanmak üzere ardışık iki yargı arasındaki değerlerdir.

Adım 3. Öncelik değerlerinin belirlenmesi

Karşılaştırma matrisleri yardımıyla ağırlık vektörü (w) hesaplanır. İlk adımda, ikili karşılaştırma matrisi normalize edilerek $A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w$ formülüne uygun hale getirilir. Daha sonra, ağırlık değerleri elde edilir. Normalizasyon işlemi, a_{ij} 'nin elemanlarının her bir sütun toplamına bölünmesiyle gerçekleştirilir (Özcan vd., 2017; Çalışkan & Eren, 2016).

$$W_i = \frac{\sum_{l=1}^n a_{il}}{n} \quad (1)$$

Adım 4: Tutarlılık Oranının (CR) Hesaplanması

CR katsayısı, tutarlılık indeksi (CI) hesaplandıktan sonra belirlenir. İkili karşılaştırma matrislerinde CR değeri 0,1'den küçük olduğunda matrisin tutarlı olduğu kabul edilir. Tutarlılık indeksi aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (2)$$

CR ise, tutarlılık indeksinin (CI), rastgele tutarlılık indeksi (RI) değerine bölünmesiyle bulunur. CR değerinin hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılır.

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

Elde edilen CR değeri uygun değilse, ikili karşılaştırma matrisindeki değerlerin yeniden gözden geçirilmesi gerekir. Tutarlılık analizinde RI değerleri Tablo 3'e göre kontrol edilir (Özcan vd., 2017; Önder vd., 2014).

Tablo 3: RI indisi

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

Adım 5: AHP Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar tutarlılık açısından uygun bulunduğu, kriterlerin ağırlıkları hesaplanarak belirlenir (Özcan vd., 2017).

2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş olup, alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlığını esas alan bir yöntemdir. Anlaşılır yapısı ve kolay yorumlanabilir sonuçları sayesinde çok kriterli karar verme problemlerinde yaygın olarak tercih edilir (Shyjith, 2008; Yücel, 2018). Bu yöntem, alternatifler arasından en uygun seçeneği belirleme imkânı sunar.

Adım 1: Karar Matrisinin (A) Oluşturulması

Karar matrisi, satırlarında alternatifler ve sütunlarında değerlendirme kriterleri olacak şekilde düzenlenir. Matristeki A_{ij} , A matrisinde i alternatifinin j kriterine göre elde ettiği değeri ifade eder (Çaylak, 2019).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 2: Standart Karar Matrisinin (R) Oluşturulması

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n a_{kj}^2}} \quad (r_{ij}; i, : 1, 2, \dots, n; \text{kriter Sayısı} \quad j: 1, 2, \dots, k; \text{alternatif sayısı}) \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{a1} & r_{a2} & \dots & r_{nk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Karar matrisi adımı tamamlandıktan sonra, her bir kriterin ağırlığını dikkate alarak ağırlıklı standart karar matrisi (V) oluşturulur. Bu işlem, ilgili formüller yardımıyla verilerin normalize edilmesi ve kriter ağırlıklarıyla çarpılması sonucunda gerçekleştirilir.

Adım 3: Ağırlıklı Standart Karar Matrisinin (V) Oluşturulması

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{a1} & W_{a2} & \dots & W_{nk} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Her bir W_j , j kriterinin ağırlığını temsil eder. Normalleştirilmiş karar matrisinin elemanları, kriterlerin önem derecelerine göre ağırlıklandırılarak hesaplanır. Bu işlem, kriterlerin göreceli önemini yansıtan ağırlık değerleriyle gerçekleştirilir. Daha sonra Eşitlik 6'da gösterilen R matrisinin her sütun elemanlarının Eşitlik 7'deki ilgili W_{ij} değeri ile çarpılması ile Eşitlik 8'de verilen V matrisi oluşturulur.

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1k} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{a1} & V_{a2} & \dots & V_{nk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Adım 4. Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlerin Oluşturulması:

$$A^- = \{(\min V_{ij} \mid j \in I), (\max V_{ij} \mid j \in J)\} \quad (9)$$

$$A^+ = \{(\max V_{ij} \mid j \in I), (\min V_{ij} \mid j \in J)\} \quad (10)$$

Pozitif ideal çözüm ağırlıklı standart karar matrisinin en iyi performans değerlerini oluştururken negatif ideal çözüm en kötü değerlerini oluşturmaktadır. İdeal çözümler Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Adım 5. Ayırım Ölçülerinin Hesaplanması:

Öncelikle alternatifler arasındaki uzaklıklar tespit edilir. Her bir seçeneğin pozitif ideal çözümle olan uzaklığı Eşitlik 11'deki formül ile hesaplanır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (11)$$

Negatif ideal çözümden elde edilen mesafeler ise Eşitlik 12'den faydalanılarak hesaplanır (Monjezi vd., 2010).

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (12)$$

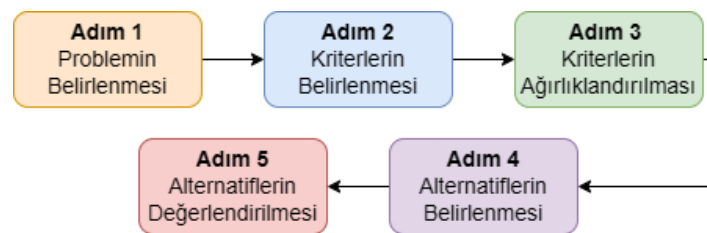
Adım 6. İdeal Çözüme Göreceli Yakınlık Değerinin Hesaplanması:

Eşitlik 13'ten faydalanılarak ideal çözüme göreceli yakınlık değeri hesaplanır (Monjezi vd., 2010).

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (13)$$

3. Uygulama

Çalışmada gerçekleştirilen uygulama Şekil 1'de verilen akış şemasına göre yürütülmüştür. Akış şeması problemin belirlenmesi, atık seçimine etki eden kriterlerin uzmanlarca grup karar verme yöntemi ile belirlenmesi, AHP yöntemi ile kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin değerlendirilmesi öğelerini içermektedir.



Şekil 1: Çalışmanın uygulama adımları

3.1. Problemlerin Belirlenmesi

Atık bertarafını ticari bir iş olarak yapan bir işletme için atık seçimi, çevresel, ekonomik, teknik ve yasal gereklilikler göz önünde bulundurulacak en önemli problemlerden biridir. Bu süreçte, AHP ve TOPSIS yöntemi kullanılarak atık seçimi kriterlerinin değerlendirilmesi ve alternatiflerinin önceliklendirilmesi yapılacaktır. Bir bertaraf işletmesine fabrikalar tarafından birçok atık bertaraf başvurusu yapılmaktadır. Yapılan başvurulardaki atıkların çeşitleri birbirinden çoğunlukla farklıdır. Atık bertaraf şirketinin bu farklı atıklardan kendisine en uygun olanı seçmesi gerekmektedir. Atık şirketi bu seçimi yaparken doğal olarak kendisine en az maliyetli ve en çok fayda sağlayacağı atığı seçmek isteyecektir. Atığın seçimi için ise birden fazla birbiri ile çelişen kriterler söz konusudur. Bu kriterlere maliyet, bertaraf yöntemi ve pazar payı gibi birçok kriter örnek verilebilir. Bu çalışmanın ele aldığı temel problem atık bertaraf şirketi adına bertaraf için başvuru alan atıklardan uygun atığın seçilmesi problemidir.

3.2. Kriterlerin Belirlenmesi

Atık bertarafını ticari bir iş olarak yapan bir işletmenin atık seçimi kapsamında değerlendirilecek olan kriterler uzman görüşleri ve literatürde yer alan bilgiler ile belirlenmiştir. Literatürde yer alan bilgilerle (Aka, 2021; Wu, 2020; Korkmazer vd., 2016; Balaban ve Baki, 2011) önce bir kriter havuzu belirlenmiş, 4 akademisyen ile firmadan 1 endüstri mühendisi ve 1 çevre mühendisinden oluşan uzman ekibe belirlenen kriterler sunulmuştur. Yüz yüze grup karar verme tekniği kullanılarak belirlenen 12 adet kriter aşağıda verilen şekilde belirlenmiştir.

Satın Alma Maliyeti (SAM): Atıkların bertarafı için satın alma maliyeti, atıkların uygun şekilde toplanması, taşınması, işlenmesi ve gereken hizmetlerin veya ekipmanların edinilmesi sürecinde oluşan maliyetleri kapsamaktadır.

Taşıma Maliyeti (TM): Taşıma maliyeti, atıkların kaynak noktasından bertaraf tesisine taşınması için gereken lojistik işlemlerinin ve nakliye hizmetlerinin maliyetlerini içermektedir.

Bertaraf Maliyeti (BM): Atıkların bertaraf edildiği yerde gerçekleştirilen tüm süreçlerin maliyetini kapsamaktadır.

Depolama Maliyeti (DM): Depolama maliyeti, atıkların özel olarak tasarlanmış depolama alanlarına taşınması ve burada saklanması sürecinde oluşan maliyetleri içermektedir.

Test Maliyeti (TM): Test maliyeti, atıkların çeşidine ve özelliklerine bağlı olarak yapılan laboratuvar testleri için oluşan maliyetleri kapsamaktadır.

Atık Miktarı (AM): Atık yönetimi sürecinde önemli bir parametredir ve atıkların toplam hacmini veya kütlesini ifade etmektedir. Sürdürülebilir talep için oldukça önemlidir.

Pazar Sirkülasyonu (PS): Pazar sirkülasyonu, atıkların ekonomiye geri dönüşüm veya yeniden kullanım yoluyla dahil edilmesini ifade etmektedir.

Pazar Payı (PP): Belirli bir endüstride veya atık yönetimi sektöründe belirli bir atık türünün veya hizmetin pazar içindeki değerinin yüzdesel olarak ifadesidir.

Taşıma Yöntemi (TY): Taşıma yöntemi, atıkların kaynak noktasından bertaraf veya işleme yerine taşınması sürecini ifade etmektedir. Bu yöntemler, atıkların çeşidine, miktarına, taşınacak mesafeye ve yerel düzenlemelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Bertaraf Yöntemi (BY): Atıkların kaynak noktasından alınarak son kullanım yerine taşınması ve uygun yöntem ile işlenip bertaraf edilmesini ifade eder.

Atığın Birim Karı (ABK): Atıkların satışından veya işlenmesinden elde edilen gelirden, üretim veya işleme maliyetlerine göre hesaplanan kar miktarını ifade etmektedir.

Atığın Satılabilirliği (AS): Atıkların belirli bir pazarda veya endüstride değer kazanma potansiyelini ifade etmektedir.

3.3. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Bu bölümde problem çözümü için AHP yöntemi kullanılmıştır. Problemin çözülmesi adına öncelikli olarak kriterler belirlenmiş, hiyerarşik yapı inşa edilmiştir. Bu yapı oluşturulduktan sonra alanında uzman kişilerden önem ölçeğine (Saaty, 1994) göre hangi kriterin hangi kritere baskın olduğunu 1-9 arasında değerler vererek belirlemeleri istenmiş ve AHP sürecinde kullanılacak olan kriterler arasında ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matris Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: İkili karşılaştırma matrisi tablosu

Kriterler	SAM	TM	BM	DM	TM	AM	PS	PP	TY	BY	ABK	AS
SAM	1,00	3,00	5,00	4,00	3,00	2,00	4,00	4,00	3,00	4,00	2,00	2,00
TM	0,33	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	3,00	3,00	2,00	3,00	2,00	1,00
BM	0,20	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00
DM	0,25	0,50	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00	1,00	1,00
TM	0,33	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	1,00
AM	0,50	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	1,00
PS	0,25	0,33	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00
PP	0,25	0,33	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	1,00
TY	0,33	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00
BY	0,25	0,33	0,50	0,33	0,50	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00
ABK	0,50	0,50	0,33	1,00	1,00	0,33	0,50	0,33	0,50	1,00	1,00	4,00
AS	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,25	1,00
Toplam	4,70	8,67	16,33	13,33	16,50	12,67	16,33	17,67	17,50	28,00	21,25	16,00

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra Microsoft Excel programı yardımıyla her kriterin kendine ait değeri her sütun toplamına bölünerek standart karar matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra her bir satır değeri toplanarak kriter sayısına bölünmüş ve kriter ağırlıkları bulunmuştur. Bu hesaplamalar Bölüm 2.1’de verilen AHP yöntemi adımlarına göre devam ettirilmiştir. Normalize karar matrisine ulaşılmasının ardından AHP’nin adımları takip edilerek kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Bulunan kriter ağırlıkları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: Sonuç tablosu ölçeği

Kriterler	Kriter Ağırlıkları
SAM	0,2091
TM	0,1326
BM	0,0723
DM	0,0860
TM	0,0592
AM	0,0835
PS	0,0688
PP	0,0647
TY	0,0583
BY	0,0371
ABK	0,0631
AS	0,0652

Ağırlıkları bulunan kriterler için tutarlılık oranı hesabı gerçekleştirilmiştir. Bunun için Tablo 4’te yer alan her bir kriter değeri Tablo 5’teki kriter ağırlıklarıyla çarpılmış ve kriter toplamaları bulunmuştur. Daha sonra kriter toplamaları ile kriter ağırlıkları oranı alınarak λ değeri bulunmuş ve ortalaması alınmıştır. Bulunan değer Tablo 3’te yer alan kriter sayısının 1 eksiğine denk gelen değere bölünerek tutarlılık oranı 0.07 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 0 ile 0.10 arasında bir değer olduğu için çalışmanın tutarlılığının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. AHP çözümü doğrultusunda kriterlerden en önemlisi satın alma maliyeti kriteri olarak tespit edilmiştir. Taşıma maliyeti kriteri ikinci önemli düzeyde, bertaraf yöntemi kriteri ise en önemsiz düzeyde bulunmaktadır. Karşılaşılan sonucun hayatın olağan akışı ile tutarlılık gösterdiği söylenebilir.

3.4. Alternatiflerin Belirlenmesi

Atık bertarafını ticari bir iş olarak yapan bir işletmenin atık seçimi kapsamında değerlendirilecek olan alternatifler atık yönetimi yönetmeliği (T.C. Resmi Gazete, 2015) incelenerek uzman görüşleri ve işletmeden alınan bilgiler yardımıyla belirlenmiştir.

Sentetik Hidrolik Yağlar (SHY): Petrokimyasal işlemlerden üretilen yağlardır. En çok otomotiv ve endüstri, denizcilik ve tarım alanlarında kullanılmaktadır. Ömrünü tamamladığında doğaya olan zararından dolayı bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Elek Üstü Maddeler (EÜM): Partikül boyutuna bağlı olarak belirli bir eleğin üzerinde kalan parçacıklardır. Maden, inşaat, tarım, gıda ve kimya endüstrilerinde hammadde olarak kullanılmaktadır.

Atık Metal (AM): Kullanım ömrünü tamamlamış metal nesnelerdir. Sanayi, inşaat ve otomotiv gibi sektörlerden meydana gelir. Bu metallerin yeniden işlenmesi ekonomik bir değer yaratmaktadır.

Sentetik Yalıtım ve Isı İletim Yağları (SIY): Elektriksel ve ısı yalıtımı için kullanılan sentetik yağlardır. Bu yağlar yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Doğaya zararı fazla olmasından dolayı ömrünü tamamladığında bertaraf edilmelidir.

Kentsel Atık Suyu Arıtılmasından Kaynaklanan Çamurlar (KAS): Arıtma tesislerinde suyun arıtılması sırasında oluşan atıklardır. Çevre ve halk sağlığı için tehdit olan bu atıklar, kurutularak, yakma veya depolama yöntemi ile bertaraf edilir. Ayrıca bazı işlemlerin ardından gübre olarak kullanılabilir.

3.5. Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde problem çözümü için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle TOPSIS yönteminde kullanılmak üzere uzman görüşlerinden de yararlanılarak satırlarda alternatifler, sütunlarda ise kriterler yer alacak şekilde alternatiflerin kriterlere göre 1-10 arası önem puanlandırmaları gerçekleştirilerek Tablo 6'daki karar matrisi oluşturulmuştur.

Önem puanlandırmaları yapılırken örneğin atık metal alternatif, satın alma kriteri açısından oldukça önemli olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Önemli bir alternatif olmasının sebebi geri dönüşüm, enerji tüketimi ve doğal kaynakların korunması açısından avantajlar sunmasıdır. Örneğin geri dönüştürülmüş bir metal kullanımı yeni metal üretimine göre enerji tüketimi yüksek oranda azaltabilir. Bundan dolayı diğer alternatiflerle kıyaslandığında önem puanı daha önemli olacak şekilde puanlandırılmalıdır.

Tablo 6: Karar matrisi

Alternatifler- Kriterler	SAM	TM	BM	DM	TM	AM	PS	PP	TY	BY	ABK	AS
SHY	6	5	7	6	7	5	8	8	6	7	8	8
EÜM	3	7	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
AM	8	8	9	9	9	9	7	7	9	9	9	9
SIY	7	6	8	8	8	7	6	6	7	8	7	7
KAS	4	4	6	4	5	6	5	5	5	5	6	6

Kriterlerin puan değerleri Microsoft Excel programı yardımıyla Eşitlik 5 kullanılarak standart hale getirilmiştir. Tablo 7'de bu işlem sonucu oluşturulan matris gösterilmektedir.

Tablo 7: Standart karar matrisi

Alternatifler- Kriterler	SAM	TM	BM	DM	TM	AM	PS	PP	TY	BY	ABK	AS
SHY	0.455	0.379	0.531	0.455	0.531	0.379	0.606	0.606	0.455	0.531	0.606	0.606
EÜM	0.227	0.531	0.227	0.227	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.379	0.379
AM	0.606	0.606	0.682	0.682	0.682	0.682	0.531	0.531	0.682	0.682	0.682	0.682
SIY	0.531	0.455	0.606	0.606	0.606	0.531	0.455	0.455	0.531	0.606	0.531	0.531
KAS	0.303	0.303	0.455	0.303	0.379	0.455	0.379	0.379	0.379	0.379	0.455	0.455

Standart karar matrisi hesaplandıktan sonra AHP yöntemiyle bulunan Tablo 5'teki kriter ağırlıkları Tablo 7'deki değerlerle çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi elde edilmiştir. Elde edilen matris Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Ağırlıklı standart karar matrisi

Alternatifler- Kriterler	SAM	TM	BM	DM	TM	AM	PS	PP	TY	BY	ABK	AS
SHY	0.095	0.050	0.038	0.039	0.031	0.032	0.042	0.039	0.027	0.020	0.038	0.040
EÜM	0.048	0.070	0.016	0.020	0.018	0.025	0.021	0.020	0.018	0.011	0.024	0.025
AM	0.127	0.080	0.049	0.059	0.040	0.057	0.037	0.034	0.040	0.025	0.043	0.044
SIY	0.111	0.060	0.044	0.052	0.036	0.044	0.031	0.029	0.031	0.023	0.033	0.035
KAS	0.063	0.040	0.033	0.026	0.022	0.038	0.026	0.025	0.022	0.014	0.029	0.030

Ağırlıklı standart karar matrisi Microsoft Excel programıyla hesaplandıktan sonra her kriter için pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin belirlenebilmesi için Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 kullanılmıştır. Pozitif ideal ve negatif ideal çözümler belirlendikten sonra S_i^+ ve S_i^- değerleri Eşitlik 11-12 ile hesaplanmıştır. Bulunan sayısal değerler Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9: Pozitif ideal ve negatif ideal değerler tablosu

	S_i^+	S_i^-
SHY	0.055	0.066
EÜM	0.107	0.029
AM	0.007	0.112
SIY	0.035	0.083
KAS	0.091	0.027

Bulunan S_i^+ ve S_i^- değerleri toplanarak S_i^- değerine bölünmüştür. Bunun sonucunda Tablo 10'daki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 10: Sonuç tablosu

	1	2	3	4	5
Alternatif	Atık Metal	Sentetik Yalıtım ve Isı İletim Yağları	Sentetik Hidrolik Yağlar	Kentsel Atık Suyu Arıtılmasından Kaynaklanan	Elek Üstü Maddeler
Puan	0.94	0.70	0.54	0.24	0.21

Tablo 10'daki sonuçlara göre sıralama şu şekilde oluşmuştur: Atık metal, sentetik yalıtım ve ısı iletim yağları, sentetik hidrolik yağlar, kentsel atık suyu arıtılmasından kaynaklanan çamurlar ve elek üstü maddelerdir. Atık metal, kar oranı açısından oldukça avantajlı bir geri dönüşüm malzemesidir. Metallerin nispeten ağır olmalarına rağmen kolay taşınabilir olması, lojistik süreçlerin daha verimli yönetilmesini sağlamaktadır. Ayrıca atık metal piyasasında sürekli bir talep bulunması, pazar sürekliliğini garanti altına alarak yatırımların karşılığını almayı kolaylaştırmaktadır. Tüm bu faktörler, atık metalin geri dönüşüm sektöründe karlı bir iş fırsatı olarak öne çıkmasına neden olmaktadır.

3.6. Tartışma

Uzmanlarca belirlenen kriterlerden en önemli kriterin 0.2091 ağırlık katsayısı ile satın alma maliyeti olduğu hesaplanmıştır. İkinci ve üçüncü sırada ise 0.1326 ağırlık katsayısıyla taşıma maliyeti ve 0.0860 ağırlık katsayısıyla depolama maliyeti kriterlerinin takip ettiği görülmüştür. Birbirine yakın ağırlık puanları ile sırasıyla geriye kalan kriterler atık miktarı, bertaraf maliyeti, pazar sirkülasyonu, atığın satılabilirliği, pazar payı, atığın birim karı, test maliyeti, taşıma yöntemi ve bertaraf yöntemi şeklinde sıralanmıştır.

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanımı ile gerçekleştirilen bu çalışma, ticari amaçla bu faaliyetleri gerçekleştiren firmada yapılması nedeniyle [Dijkgraaf ve Vollebergh \(2004\)](#) gerçekleştirdiği çalışma ile benzerlik göstermektedir. [Dijkgraaf ve Vollebergh \(2004\)](#) çalışmalarında sosyal maliyet analizine odaklanması ile bu çalışma ile uyumlu olarak maliyet faktörlerinin atık seçim süreçlerindeki belirleyici rolünü bir kez daha göz önüne sermiştir.

Ayrıca literatürde “atık seçimi” konusunda yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Mevcut literatürde ağırlıklı olarak atık bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi, katı atık seçimi ve tesis yer seçimi gibi konulara odaklanılmıştır. Bu sebeple, literatür taraması göz önünde bulundurulduğunda atık seçimi gerçekleştirilen bu çalışma literatürdeki boşluğu doldurmaktadır.

Çalışmada etkili sonuçların alınabilmesi için AHP-TOPSIS ikilisi beraber kullanılmıştır. [Ercan ve Pınarbaşı \(2024\)](#) çalışmalarında AHP ve TOPSIS yöntemlerini bir arada kullanarak biyogaz enerji santrali kuruluş yeri seçimi gerçekleştirmiştir. Çalışmalarının sonucunda sonuçları karşılaştırarak etkili sonuçlar aldıkları konusunda beyanlarını bildirmişlerdir. Yine literatürde yer alan [Işıldar \(2018\)](#) çalışmasında katı atık bertaraf yöntemlerini TOPSIS, PROMETHEE ve En İyi-En Kötü yöntemlerini kullanarak birbirleriyle kıyaslamış ve en uygun bertaraf yöntemini seçmiştir. Başka bir çalışma olan [Özcan vd. \(2017\)](#) hidroelektrik santrallerinde bakım stratejisi seçimi için AHP ve hedef programlama yaklaşımı ile birlikte TOPSIS yöntemini bir arada kullanmış ve yöntemlerin bir arada kullanılmasıyla beraber etkili sonuçlar aldıklarını not düşmüşlerdir. Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında bu çalışmada birden fazla çok kriterli karar verme yönteminin bir arada atık seçiminde kullanılmasının literatürle uyumlu olarak ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, işletmelerin atık bertarafı konusunda karşılaştıkları zorluklara ve çözüm yollarına odaklanılmıştır. Atık yönetimi, sadece çevre için değil, aynı zamanda işletmelerin sürdürülebilirliği ve rekabet avantajı için de kritik bir öneme sahip olmaktadır. AHP yöntemiyle atık seçimi kriterlerinin değerlendirilerek TOPSIS yöntemiyle önceliklendirilmesi

işletmelerin atık yönetim stratejilerini optimize etmelerine yardımcı olabilir. Bu analiz, işletmelerin atık bertarafı için en uygun stratejileri belirlerken çevresel, ekonomik, teknik ve yasal faktörleri dengeli bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanımaktadır. Yapılan AHP analizi sonucunda satın alma maliyeti ve taşıma maliyeti en önemli iki kriter olarak tespit edilmiştir. Ağırlığı en düşük olarak son sırada değerlendirilen kriter ise bertaraf yöntemi olarak belirlenmiştir. TOPSIS sonucunda ise atık metal en önemli alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, işletmelerin çevresel ve yasal yükümlülüklerini yerine getirirken aynı zamanda operasyonel verimliliklerini artırmalarına yardımcı olacaktır.

Bu çalışma gelecekte birçok yeni çalışmaların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Kriter ağırlıklarının AHP yöntemi dışında ANP gibi yöntemler ile değerlendirilmesi bir gelecek çalışma önerisidir. Bunun yanı sıra PROMETHEE gibi seçim algoritmaları kullanılarak belirlenen kriter ağırlıkları ile alternatif atıkların değerlendirilmesi umut verici bir gelecek çalışma olacaktır. Çalışmanın kapsamı belediyeler, sağlık sektörü, tarım ve gıda sektörü gibi alanları kapsayacak şekilde genişletilerek bu alanlar için farklı kriter ve alternatifler belirlenerek genişletilebilir.

Teşekkür

Sıfır Atık Enerji Geri Kazanım ve Geri Dönüşüm San. ve Tic. Ltd. Şti. sorumlusu Çevre Mühendisi Ali Doğan'a çalışmaya yapmış olduğu katkıları ve destekleri için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Aka, D. Ç. (2021). Endüstriyel atık geri dönüşümünde etkili olan karar kriterlerinin bwm ile değerlendirilmesi: plastik, cam ve çelik endüstrisinde uygulama. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 31, 390–398.
- Akin, C. S. (2007). *Sağlık ve sağlık harcamalarının ekonomik büyüme üzerine etkisi: Türkiye 'de sağlık sektörü ve harcamaları* [Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Aydoğdu, İ. B., & Çobanoğlu, N. (2006, 16–20 Eylül). *Tıbbi atıkların yönetimi, toplanması, taşınması ve bertarafında yerel yönetimler tarafından uyulacak esaslar* [Bildiri sunumu]. I. Ulusal Yerel Yönetimlerde Sağlık Hizmetleri Kongresi Ankara, Turkey.
- Balaban, Y., & Baki, B. (2011). Analitik ağ süreci yaklaşımıyla en uygun katı atık bertaraf sisteminin belirlenmesi: Trabzon ili örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24(3), 183–197.
- Bilgili, M. Y. (2023). Sıfır atık yönetiminin çevre etiği yaklaşımları açısından incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 64, 21–28. <https://doi.org/10.18070/erciyesuibd.1173752>
- Çalışkan, E., & Eren, T. (2016). Bankaların performanslarının çok kriterli karar verme yöntemiyle değerlendirilmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 85–107. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ordubtd/issue/27365/287965>
- Çaylak, M. (2019). TOPSIS yöntemi ile en uygun otel seçimi. *Oğuzhan Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(2), 65–76. <https://dergipark.org.tr/en/pub/oguzhan/issue/51155/657321>
- Demirarslan, K. O., & Başak, S. (2018). Doğu Karadeniz Bölgesi illeri katı atık yönetimi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(3), 117–132. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/555407>
- Dijkgraaf, E., & Vollebergh, H. R. (2004). Burn or bury? A social cost comparison of final waste disposal methods. *Ecological Economics*, 50(3–4), 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.01.017>
- Ercan, Z., & Pınarbaşı, M. (2024). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile biyogaz enerji santrali kuruluş yeri seçimi: Ankara ili Polatlı ilçesi için bir örnek. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 395–408. <https://doi.org/10.21324/dacd.1393150>
- Eriksson, M., Strid, I., & Hansson, P. A. (2016). Food waste reduction in supermarkets—Net costs and benefits of reduced storage temperature. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.11.022>
- Ertaş, H., & Güden, M. A. (2019). Hastanelerde tıbbi atık yönetimi. *Sosyal Araştırmalar ve Yönetim Dergisi*, 1, 53–67. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sayod/issue/44297/541876>
- Felek, S., Yurdakul, Y., & Aladağ, Z. (2007). Mobil iletişim sektöründe pazar paylaşımının tahmininde AHP ve ANP yöntemlerinin kıyaslanması. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 18(1), 6–22.
- Ghose, M. K., Dikshit, A. K., & Sharma, S. K. (2006). A GIS based transportation model for solid waste disposal: A case study on Asansol municipality. *Waste Management*, 26(11), 1287–1293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022>
- Gopalakrishnan, P. K., Hall, J., & Behdad, S. (2021). Cost analysis and optimization of Blockchain-based solid waste management traceability system. *Waste Management*, 120, 594–607. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.027>
- Gündüzalp, A. A., & Güven, S. (2016). Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9(1), 1–19.
- Hasanov, P., Jaber, M. Y., Zononi, S., & Zavanella, L. E. (2013). Closed-loop supply chain system with energy, transportation, and waste disposal costs. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4), 352–358.
- Işıldar, A. (2018). *Çok kriterli karar verme yöntemleriyle katı atık bertaraf yöntemi seçimi* [Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Kaçtıoğlu, S., & Şengül, Ü. (2011). Erzurum kenti ambalaj atıklarının geri dönüşümü için tersine lojistik ağı tasarımı ve bir karma tamsayılı programlama modeli. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24(1), 89–112.
- Karasu, A. (2013). *Çevresel atıklar, nedenleri, çevresel atıkların geri dönüştürülmesi ve yenilenebilir enerji olanaklarının araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Kılıç, M. Y., & Tüylü, M. (2019). Bursa'daki atık döküm kumlarının endüstriyel simbiyoz ile hazır beton üretiminde ham madde olarak kullanımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1), 99–110.
- Kızıldemir, Ö., & Sandıkcı, M. (2017). Otel işletmelerinde katı atık yönetimi: Ön büro departmanındaki uygulamalara yönelik bir araştırma. *Turak Turizm ve Araştırma Dergisi*, 3(2), 42–69. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/turak/issue/39645/469122>

- Korkmaz, C., Aktar Demirtaş, E., & Erol, D. (2016). Çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile atık bertaraf firması seçimi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 22(4), 305–313. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/24686/261043>
- Koushki, P. A., Al-Duaij, U., & Al-Ghimlas, W. (2004). Collection and transportation cost of household solid waste in Kuwait. *Waste Management*, 24(9), 957–964. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.013>
- Monjezi, M., Dehghani, H., Singh, T. N., Sayadi, A. R., & Gholinejad, A. (2010). Application of TOPSIS method for selecting the most appropriate blast design. *Arabian Journal of Geosciences*, 1, 19–34. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0164-3>
- Oğuz, M. A. (2018). AHP ve TOPSIS yöntemi ile tedarikçi seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(34), 69–89. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbid/issue/55969/506870>
- Önder, E., Önder, G., Kuvat, Ö., & Taş, N. (2014). Identifying the importance level of factors influencing the selection of nursing as a career choice using AHP: Survey to compare the precedence of private vocational high school nursing students and their parents. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 122, 398–404. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1361>
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming–AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410–1423.
- Pour, N., Webley, P. A., & Cook, P. J. (2018). Potential for using municipal solid waste as a resource for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.11.007>
- Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19–43.
- Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., & Balahorli, V. (2009, 15–17 Haziran). *Evsel katı atık termal bertaraf yöntemleri ve İstanbul'a uygulanabilirliği* [Bildiri sunumu]. Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu İstanbul, Türkiye.
- Shyjith, K., Ilangkumaran, M., & Kumanan, S. (2008). Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 375–386.
- T.C. Resmi Gazete. (2005). *Tehlikeli atıkların kontrolü yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 14.03.2025, Sayı: 25755). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/03/20050314-1.htm>
- T.C. Resmi Gazete. (2015). *Atık yönetimi yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 02.04.2015, Sayı: 29314). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>
- Ulucak, R., & Erdem, E. (2014). Çevre-İktisat ilişkisi ve Türkiye’de çevre politikalarının etkinliği, *Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi (AKAD)*, 4(6), 78–98. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kilisiibfakademik/issue/19254/204529>
- World Health Organization. (1948). *Preamble to the Constitution of the World Health Organization, as adopted by the International Health Conference*. <https://www.who.int/about/governance/constitution>
- Wu, H., Tao, F., & Yang, B. (2020). Optimization of vehicle routing for waste collection and transportation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), Article 4963. <https://doi.org/10.3390/ijerph17144963>
- Yücel, Y. B. (2018). *Çok kriterli karar verme teknikleri ile tekstil sektöründe en uygun tedarikçi seçimi ve bir yazılım uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>

Index Based Spatial Assessment of Heavy Metals in Damsa Dam Lake, Cappadocia/Türkiye

Hüseyin Cüce^{1,*}, Mehmet Ali Dereli², Erkan Kalıpcı²

¹Giresun University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, 28200, Giresun.

²Giresun University, Engineering Faculty, Department of Geomatics Engineering, 28200, Giresun.

Abstract

Damsa Dam Lake is significant value to the Cappadocia/Nevşehir region in terms of recreation, fishing and agricultural irrigation. The study was conducted to assess potential harmful elements (PHEs) in the dam and to examine the distribution eco-toxicological effects by Geographical Information System (GIS). Samples were collected for one year at 12 stations on the dam lake according to standard methods. The results of analysis obtained field studies along the spring mix period in the dam showed that high harmful metal(loid)s content (especially, average of 7.38 µg / L As and 4.94 µg/L Cu). According to the average concentration level in surface water, the order of PHEs was determined as follows: Fe > Zn > As > Mn > Al > Cu > Se > Pb > Cr > Hg > Ni > Cd. The findings obtained from the sampling were evaluated according to the relevant water quality regulations. Index-based spatial distribution maps created with ArcGIS showed that heavy metal-polluted lake water layer may have a significant effect on the ecological balance at some stations in the lake. This situation reveals the necessity of ongoing rehabilitation measures in the lake and the importance of sustainable conservation priority management practices.

Keywords

Heavy Metals, Surface Water Quality, Spatial Analysis, Damsa Dam, Ürgüp

Damsa Baraj Gölü'nde (Kapadokya/Türkiye) Ağır Metallerin İndeks Tabanlı Mekânsal Değerlendirmesi

Özet

Damsa Baraj Gölü, Kapadokya/Nevşehir bölgesi için rekreasyon, balıkçılık ve tarımsal sulama açısından önemli bir değere sahiptir. Çalışma, barajdaki potansiyel zararlı elementleri (PZE) değerlendirmek ve ekotoksikolojik etkilerinin dağılımını Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile incelemek amacıyla yürütülmüştür. Baraj gölü üzerinde bulunan 12 istasyondan bir yıl boyunca standart yöntemlere göre örnekler toplanmıştır. Barajda ilkbahar karışım döneminde yapılan arazi çalışmalarında elde edilen analiz sonuçlarına göre yüksek zararlı metal(loid) içeriği (özellikle ortalama 7,38 µg/L As ve 4,94 µg/L Cu) olduğu belirlenmiştir. Yüzey sularındaki ortalama konsantrasyon seviyelerine göre PZE'lerin sıralaması şu şekilde belirlenmiştir: Fe > Zn > As > Mn > Al > Cu > Se > Pb > Cr > Hg > Ni > Cd. Örneklemekten elde edilen bulgular ilgili su kalite yönetmeliklerine göre değerlendirilmiştir. ArcGIS ile oluşturulan indeks tabanlı mekansal dağılım haritaları, göldeki bazı istasyonlarda ağır metal yönünden kirlenmiş göl suyu tabakasının ekolojik denge üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermiştir. Bu durum, gölde devam eden rehabilitasyon önlemlerinin gerekliliğini ve sürdürülebilir koruma öncelikli yönetim uygulamalarının önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler

Ağır Metaller, Yüzey Suyu Kalitesi, Mekansal Analiz, Damsa Barajı, Ürgüp

1. Introduction

Surface water is used for a variety of purposes, including agriculture, drinking water, and other services. Therefore, its quality is crucial for irrigation, human welfare, and health. The ecological integrity of surface waters is frequently threatened by human activities that can lead to toxic or organic pollution through changes that can reduce connectivity. Moreover, seasonal changes and non-point pollution sources attributable to surface runoffs and groundwaters in urban areas compromise water quality. The main pollutants in water include suspended particles, toxic metals, nutrients, parasites, microbial disease-causing organisms, volatile and biodegradable organic compounds, and parasites. Heavy metal(loid)s are the primary cause of inorganic water pollution. The chemical form of heavy metals is a primary factor contributing to their toxicity (Sophocleous, 2002; Paul, 2017; Tirink & Ozkoç, 2021; Azhari et al., 2022; Cüce et al., 2025). The discharge of untreated domestic and industrial wastewater constitutes a micro source of pollution, thereby effecting alterations to the hydrochemistry of water. Nevertheless, critical levels of potentially toxic elements (PTEs) entering surface waters have been shown to have adverse effects on the reproductive processes of aquatic organisms.

* Sorumlu Yazar: +90 (454) 3101740 Faks: +90 (454) 3101749

Gönderim Tarihi / Received : 25/01/2025

E-posta: huseyin.cuce@giresun.edu.tr (Cüce H.), mehmet.dereli@giresun.edu.tr (Dereli M.A.)
erkankalipc@gmail.com (Kalıpcı E.)

Kabul Tarihi / Accepted : 04/06/2025

Industrial discharges and agricultural runoff have often been found to contain toxic metals that have the capacity to threaten ecological life, especially the general dynamics of local fish populations (Kormoker et al., 2024; Din et al., 2023; Rakib et al., 2022). Because they can come from a variety of sources, withstand environmental changes, readily enter the food chain, and build up in large quantities within animals, these are the most common chemical contaminants. Potential harmful elements (PHEs) are naturally occurring elements that can be transported into surface waters as a result of various processes, including geological erosion, the separation of metals from sedimentary deposits, and the degradation of organic matter. Through rock pieces carried by erosion, the atmosphere, wind-borne dust, volcanic activity, forest fires, and plants, heavy metal(loid)s contaminate water and have an impact on the water system (Şeker et al., 1998; Bakan et al., 2010; Sancer & Tekin-Özan, 2016; Sibal & Espino, 2018; Findik & Aras, 2023). The establishment of a reliable monitoring programme is contingent upon an understanding of the spatial and temporal variations in water quality. In addition, many studies have reported that PHE accumulation rates together with environmental factors such as bedrock erosion and mineral oxidation at varying rates depending on climatic conditions can lead to significant deterioration in water quality under the cumulative effect (Bilgin & Konanç, 2016; Ustaoglu & Aydın, 2020; Cüce et al., 2022a; Muhammad et al., 2024; Cüce et al., 2022b; Yüksel et al., 2024).

Water pollution represents a significant challenge, particularly given its impact on both environmental and human health. The current context of uncontrolled industrialisation and urbanisation has led to a heightened risk to numerous water sources (Kucukosmanoglu & Filazi, 2020; Egbueri & Mgbenu, 2020; Taş & Şişman, 2020; Aras et al., 2024). Water resources and water quality are very important for urban development and ecological environment, especially in the serious water shortage area (Vörösmarty et al., 2010). Drought is causing Anatolia's water resources to dry up, making the effects of global warming more noticeable. Along with the effects of water pollution caused by humans, the lack of water for agriculture is also a major issue that is causing regional issues to arise. The quantification of pollutant loads from point sources is generally more controlled and manageable than non-point sources. In this respect, the fact that agricultural activities play a dominant role in the formation of diffuse pollution in surface waters makes it necessary to prevent pollution from these sources (Tepe et al., 2006; Mutlu et al., 2013; Kalipci et al., 2020; Tirink, 2021; Cüce et al., 2022c; Baki & Baki, 2023). Industrial effluents and sewage represent a significant source of environmental toxicity, posing a threat to aquatic life and degrading water quality. Because of their toxicological characteristics and ability to accumulate in aquatic biota, PHEs introduced into aquatic ecosystems from geogenic and anthropogenic sources have been shown to have negative effects on species diversity and ecosystem health (Türkmen et al., 2018; Türkmen & Aydın, 2021; Cüce et al., 2022d; Ustaoglu et al., 2022; Kalipci et al., 2023; Karadeniz et al., 2024). In addition to the detrimental impact on aquatic organisms, the continuous receiving environments of dam lakes are also adversely affected by environmental contamination to a significant extent. This contamination also has an impact on humans through the food chain. It is imperative that rivers, lakes, dams and wetlands are preserved and managed in a manner that maintains biological balance and ensures the effective utilisation of water resources. To this end, it is essential that water quality is monitored at designated intervals and that the key factors driving changes in pollution are identified, enabling the relevant authorities to take appropriate action. In particular, the sources of pollution in the vicinity of the dams, which are used as a source of drinking water, for irrigation and for utility purposes, should be subject to control measures (Yilmaz, 2004; Karadavut et al., 2012; Islam et al., 2015; Kalipci et al., 2017a; Kalipci et al., 2017b; Cüce et al., 2025). Çiçek et al. (2016) observed a considerable reduction in freshwater resources in Nevşehir as a result of field studies. Existing resources are generally dammed for purposes such as agricultural irrigation and are also threatened by pollution. The irregular and unconscious use of limited river resources in the Cappadocia region causes changes in the water regime, which results in habitat loss.

The objective of this study is to ascertain the heavy metal content and ecotoxicological effects of Damsa dam lake water through a comprehensive and multidimensional statistical analysis. Using various heavy metal parameters such as arsenic, cadmium, chromium, copper, iron, nickel, lead and zinc, the main objectives of this study are to conduct a multi-index assessment to examine the effects of anthropogenic activities on the water quality of Damsa dam lake in Cappadocia, which is the centre of tourism and recreational activities, and to contribute to local decision makers with recommendations for sustainable resource management. The main reasons for the surface water pollution in the dam are the domestic wastewater discharged into Damsa Stream without treatment, pesticide-derived agricultural drugs and their packaging used in agricultural activities, industrial wastes that are not disposed of properly and as a result are released into the environment in an inappropriate manner, and the flow of leachate resulting from improper storage of domestic solid wastes with chemical properties towards the lake basin. In this study, PHE levels were determined at a total of 12 points in the surface water of Damsa Dam Lake during the spring mixing period. Furthermore, the results will be compared with national and international criteria, the index status of the dam lake based on metallic pollution will be analysed using GIS, and the protection measures of this dam against climate change will be discussed, as these are important in terms of sustainable irrigation and recreational needs.

2. Material and Method

2.1. Study Area

The Damsa Dam was constructed on Damsa Stream in the Ürgüp District of Nevşehir Province between 1965 and 1971 for the purpose of agricultural irrigation. It is situated 30 km from the city centre and 9 km from the district centre. Damsa Dam Lake represents a significant inland water resource within Central Anatolia, particularly in the vicinity of Nevşehir. It plays a pivotal role in the region, serving as a vital source of irrigation and providing opportunities for recreational activities. The Damsa dam measures 862,000 m³ in volume and is an earth-fill structure. At normal water level, its lake volume is 7.12 hm³, and it is 31.50 m above the riverbed. At normal water levels, the lake's area is 0.82 km². 1,390 hectares are served by the dam's irrigation services (Findik et al., 2019; Kalıpcı et al., 2024). Although its quality has decreased in terms of fishing, Damsa Dam Lake is one of the highly recreational water resources of the Cappadocia region that plays an active role in agricultural irrigation. The most frequently caught fish species in the Dam Lake include *Cyprinus carpio*, *Leuciscus cephalus* etc. Furthermore, it has been claimed that *Atherine boyeri* was found in 2012, and *Oreochromis niloticus*, an invasive species of tropical climate fish, has been found in Damsa Dam (Treer et al., 2003; Mert & Çiçek, 2010). The map showing the study area and sampling stations is presented in Figure 1.

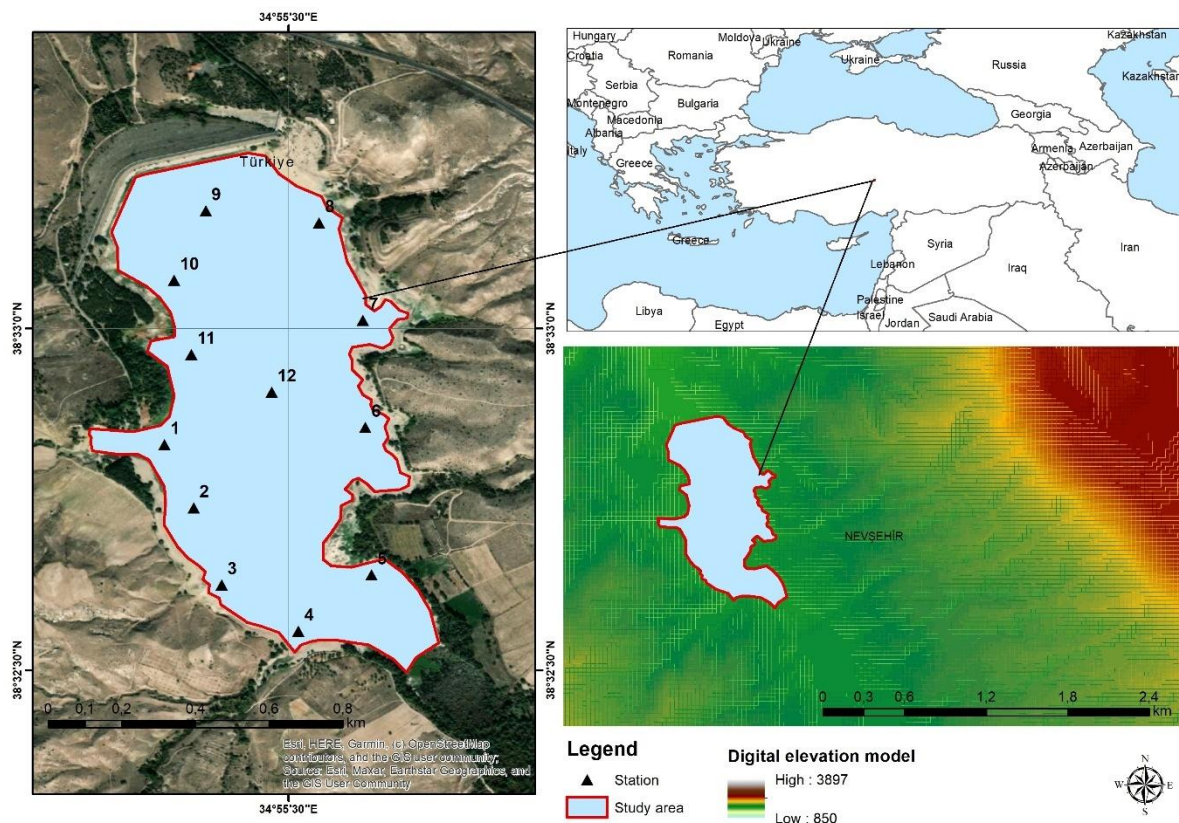


Figure 1: Map of Damsa Dam Lake and the sampling locations

2.2. Collection and Analysis of Surface Water Samples

Dam lake water samples were taken from 12 sampling stations (during spring mix period) in May 2020. The geographical coordinates of the sampling stations were taken by GPS (Magellan Exp710) and water samples were collected in 1.5 L plastic bottles as a composite sample from at least two points at each sampling station, with the objective of achieving optimal mixing. Potential toxic metal concentrations in the dam lake samples brought to the environmental chemistry laboratory and stored at +4 °C were determined in accordance with standard methods by American Public Health Association (American Public Health Association, 2007). Analytical purity chemicals were used in all analyses and the concentration of PHE in the dam water samples was determined by an ICP-MS (Agilent Corporation, 7700x-USA). Water samples were filtered into 10-mL Teflon tubes (0.45-µm Sartorius brand) and acidified with 65% nitric acid in order to determine the amounts of soluble metals. The autosampler pump was subjected to a three-step cleaning process between injections, comprising the following steps: The cleaning process was initiated with a 30-second wash with ultrapure water. This was followed by a 50-second rinse with 2% (v/v) nitric acid. The process was concluded with a further 50-second

wash with ultrapure water. For calibration of the instrument, set of standards was created from analytically pure solutions (approximately 95 percent precision and accuracy) for each metal and all of the measurements were repeated 3 times.

2.3. Statistical and Thematic Spatial Analysis

The application of diverse statistical methodologies was employed to assess the quantification of elements in water samples. Potential toxic metal levels in water samples were tested for significant correlations using the Pearson rank correlation coefficient and analysis of two-way cluster were applied to reveal theater-element/sampling station relationship. Multifaceted statistical analyses of all results obtained in the study were performed using a statistical program of (SPSS 22 package). Thematic spatial analyses of the PHEs detected at each station were created using ArcGIS 10.8 software. This involved the creation of a continuous surface for the study area, which was achieved through the utilization of the IDW technique (inverse distance weighted approach), within the domain of interpolation. The methodology employed in this study is predicated upon the assumption that surface water bodies distributed across the research area are interconnected (Shukla et al., 2020; Tercan et al., 2022).

3. Results and Discussion

3.1. Levels PHEs Detected in Surface Water of the Dam Lake

The results of the analyses of the concentration of the following elements (Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Hg, Pb) in the surface water samples of Damsa Dam are presented in Table 1 while heat mapping of PHEs values is illustrated in Fig. 2. The majority of the toxic metals discussed in this study are found in the biosphere, such as water, soil and rock, and are also released into the environment from anthropogenic sources, mostly commercial and industrial. Toxic heavy metals such as lead, cadmium and arsenic are common in many industrial processes and are important pollutants of the environment. The average PHE concentrations were presented in this order: Fe > Zn > As > Mn > Al > Cu > Se > Pb > Cr > Hg > Ni > Cd, and their average levels are 15.69 > 14.88 > 7.38 > 6.35 > 6.09 > 4.94 > 1.49 > 0.82 > 0.44 > 0.27 > 0.13 > 0.07 μL , respectively. The mean PHE concentrations of the surface water samples collected during the designated sampling period are presented in Table 1 and Fig. 2 alongside the established limit values set forth by the World Health Organization (WHO), U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), and Türkiye Standard Institute (TSE) (Table 2). The comparison of the average metal concentrations detected during the study period with the results of research in surface waters of similar nature in the international literature is given in Table 3.

Table 1: ICP results of potentially harmful elements (PHEs) for 12 stations (μL)

Sample Stations	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Hg	Pb
P1	2.77	0.1	0.2	5.21	0.40	0.50	2.08	6.51	1.85	0.08	0.22	0.29
P2	3.55	0.1	0.04	5.52	0.40	0.45	2.20	6.25	1.60	0.08	0.21	0.34
P3	11.85	0.06	5.4	44.72	0.17	0.10	6.40	10.17	1.70	0.08	0.27	0.38
P4	12.53	1.06	0.4	13.92	0.09	0.54	32.44	12.21	1.34	0.05	0.20	1.63
P5	2.38	0.42	0.26	7.14	0.01	1.71	16.66	5.83	1.39	0.06	0.24	0.82
P6	4.53	0.20	0.71	12.40	0.06	2.4	18.44	2.96	1.19	0.08	0.43	0.91
P7	3.65	0.32	0.65	12.22	0.0	2.79	18.82	3.09	1.44	0.08	0.39	0.78
P8	9.60	1.07	0.48	13.2	0.05	0.48	31.27	12.81	1.52	0.05	0.18	1.57
P9	5.60	0.66	0.19	10.80	0.09	0.12	14.39	6.24	1.85	0.05	0.31	0.97
P10	1.60	0.52	0.06	6.88	0.00	1.63	16.97	6.06	1.52	0.07	0.23	0.92
P11	12.24	0.1	5.42	45.46	0.19	0.14	4.43	10.59	1.37	0.08	0.33	0.35
P12	2.77	0.67	0.10	10.86	0.10	0.07	14.43	5.81	1.11	0.06	0.26	0.85
Mean	6.09	0.44	6.35	15.69	0.13	4.94	14.88	7.38	1.49	0.07	0.27	0.82

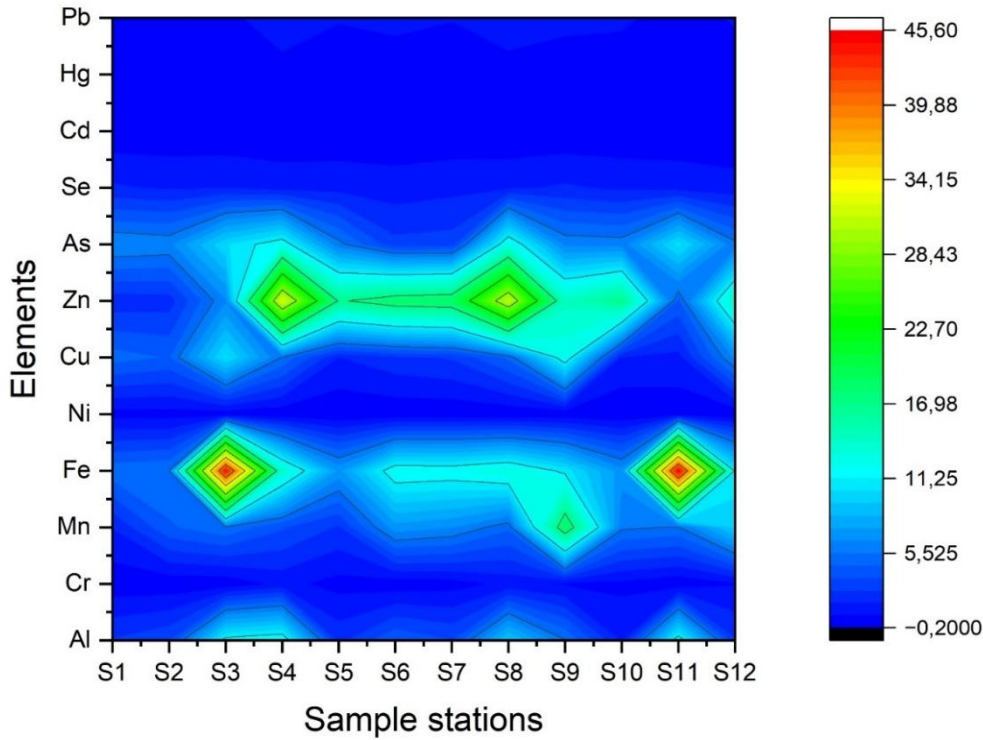


Figure 2: Heat map of PHE levels (μL) at 12 stations observed in Damsa Dam

Geographic information system (GIS) techniques were used in the study to look at patterns of spatial pollution distribution and pinpoint possible pollutant sources. The thematically spatial evaluation map showing the accumulation of PHEs (Al, Cr, Zn, As, Mn, Fe, Se, Cd, Ni, Cu, Hg, Pb) in the surface water of the dam is given in Fig. 3. As seen in Figure 3, Mn, Se and Cu concentrations in the northern part of the dam are relatively high in spring mixing period. During the sampling period, relatively high Cr, Zn, As and Pb concentrations were observed in the southeastern part of the lake, while the highest Hg values measured were in the southern regions, similarly high Ni values were measured in the west of the lake, and it is observed from thematic maps that Cd metal contents determined with relatively low concentrations are distributed throughout the lake.

Table 2. USEPA, WHO, and Türkiye Standard Institute surface water rules' permissible limits for surface waters

PHEs ($\mu\text{g/L}$)	This Study (mean)	World Health Organization (2017)	U.S. Environmental Protection Agency (2009)	Türkiye water quality standards provided drinking water (T.C. Resmi Gazete, 2019)			Türkiye surface water regulations (T.C. Resmi Gazete, 2015)				Turkish drinking water regulations (Turkish Standards Institute, 2005)
				A1	A2	A3					
As	1.08	10	10	10	40	100	≤ 20	50	100	> 100	10
Co	0.72	–	–	800	–	2600	≤ 20	50	200	> 200	–
Cr	3.71	50	100	50	500	1000	≤ 20	50	200	> 200	50
Cu	16.49	2000	1000	2000	5000	20000	≤ 300	1000	5000	> 5000	2000
Cd	1.37	3	5	5	15	50	≤ 100	500	1000	> 3000	5
Mn	85.71	400	50	50	100	250	≤ 20	50	200	> 200	50
Ni	2.83	70	–	20	30	200	≤ 10	20	50	> 50	20
Pb	15.24	10	15	10	50	100	≤ 200	500	2000	> 2000	10
Fe	591.78	300	300	200	1000	2000			100	> 100	200
Al	475.11	200	200	200	500	2000					200
Zn	11.43	5000	5000	3000	6000	12000					3000
Hg	0.51	6.0	2	1	2.5	5					1

Table 3: Comparison of average metal concentrations detected during the study period with similar research results

Water Supplies	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Cd	Hg	Pb	Reference
Damsa Dam, Türkiye	0.44	6.35	15.69	0.13	4.94	14.88	7.38	1.49	0.07	0.27	0.82	This study
Batman Dam, Türkiye	16.5	-	57.66	15.96	9.08	-	0.71	-	0.04	-	-	(Varol, 2013)
Bitter Lake, Egypt	-	-	-	-	7.06	7.56	-	-	0.05	-	2.20	(Shetaia et al., 2023)
Chaohu Lake, China	0.71	-	-	0.51	0.41	2.11	0.67	-	0.01	-	0.46	(Chen et al., 2024)
Damsa Dam, Türkiye	-	-	18.3	-	0.6	0.4	-	-	-	-	-	(Kalipci et al., 2017a)
Damsa Dam, Türkiye	6.28	6.46	-	2.08	230	2.46	8.24	-	0.02	0.09	0.09	(Findik & Aras, 2023)
Dicle Dam, Türkiye	18.58	-	62.07	15.86	2.12	-	1.61	-	0.03	-	-	(Varol, 2013)
Kızılırmak River, Türkiye	8.71	84.9	33.2	15.27	0.74	12.51	28.15	-	1.22	0.05	0.05	(Cüce et al., 2022a)
Kor River, Iran	20.63	-	-	7.63	8.95	37.93	11.12	-	6.12	-	-	(Mokarram et al., 2020)
Yeşilırmak River, Türkiye	1.1	12.5	260.9	1.7	3.09	29.8	3.1	0.3	0.02	0.01	0.5	(Üstün-Odabaşı & Ceylan, 2023)
World average	0.70	34.0	66	0.80	1.48	0.60	0.62	-	0.08	0.08	0.08	(Gaillardet et al., 2003)

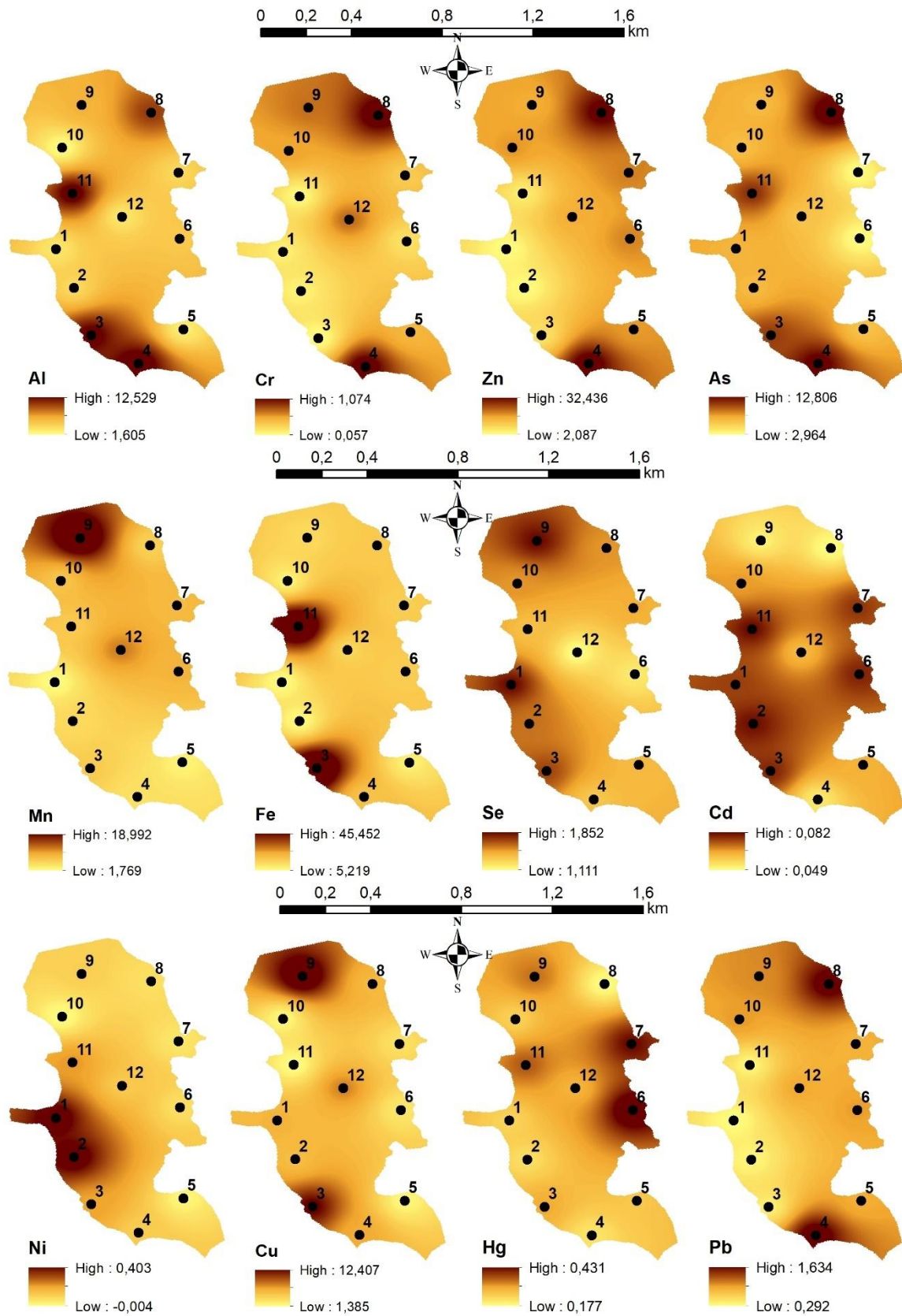


Figure 3: Spatial distribution map of PHEs levels (μ/L)

3.2. Assessment of Indexical Analysis

In recent years, various indices have been used to comprehensively assess pollution levels and ecological risk in lentic ecosystems. Pollution indices used in this study include the Water Quality Index (WQI), the Heavy Metal Pollution Index (HPI), and the Heavy Metal Evaluation Index (HEI). When assessing the acceptability of water quality for human consumption based on metal contamination and interpreting the harmful effects of water given its absolute nature regarding heavy metals, researchers might use the preliminary information gained from these indices.

The *Water Quality Index (WQI)* is a tool that synthesizes an array of factors into a concise statement, thereby facilitating an integrated and comprehensive assessment of water quality (Wang et al., 2017; Bilgin, 2018; Varol, 2020; Cüce et al., 2025). The weighted arithmetic water quality index is calculated using the following formula, Eq.1:

$$WQI = \sum \left[W_i \times \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \right] \quad (1)$$

According to Xiao et al. (2019), the water quality status was also classified using the WQI into the following categories: excellent (WQI < 50), good (WQI = 50-100), poor (WQI = 100-200), extremely poor (WQI = 200-300), and water unfit for drinking and irrigation (WQI > 300).

The *Heavy Metal Pollution Index (HPI)* is a valuation approach that considers the collective impact of each heavy metal on total water quality. It has been employed by the majority of scientists to comprehensively assess overall water quality. In this study, the HPI was calculated using Eq. 2, which were proposed by Mohan et al. (1996) as follows:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2)$$

In the formula, W_i represents the unit weight of metals, Q_i denotes the sub-index of the potentially toxic metal, S_i specifies the reference values of the factorial result, M_i signifies the screened values of potentially toxic metals, and n denotes the number of factors taken into account. Accordingly, when HPI is less than 100, it can be inferred that the heavy metal pollution in question is not of a level that is likely to be responsible for severe health risk situations (Saleh et al., 2019).

The *Heavy metal evaluation index (HEI)* is a useful tool for examining water quality in terms of heavy metal pollution. It can be used to interpret the degree of pollution of water (Edet & Offiong, 2002). In the present study, the HEI was calculated based on the following the formula (Eq. 3).

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{H_c}{H_{MAC}} \quad (3)$$

The maximum permissible concentration (MAC value) for each variable is represented by the H_{MAC} value, whereas the H_c value represents the concentration of each individual factor in the formula (World Health Organization, 2017). High metal concentrations in MAC further deteriorate water quality (Goher et al., 2014; Yüksel et al., 2021). In general, water should not be used if the concentration of a single heavy metal exceeds the MAC value ($HEI > 10$). Although the results of WQI, HPI and HEI analyses showed that the reservoir water was not significantly polluted by heavy metals (average index values; 11.44, 12.75 and 1.22, respectively), the Cu and As metal data indicated that this agricultural irrigation reservoir water showed pollution levels of heavy metals ranging from mild to severe (Figure 4).

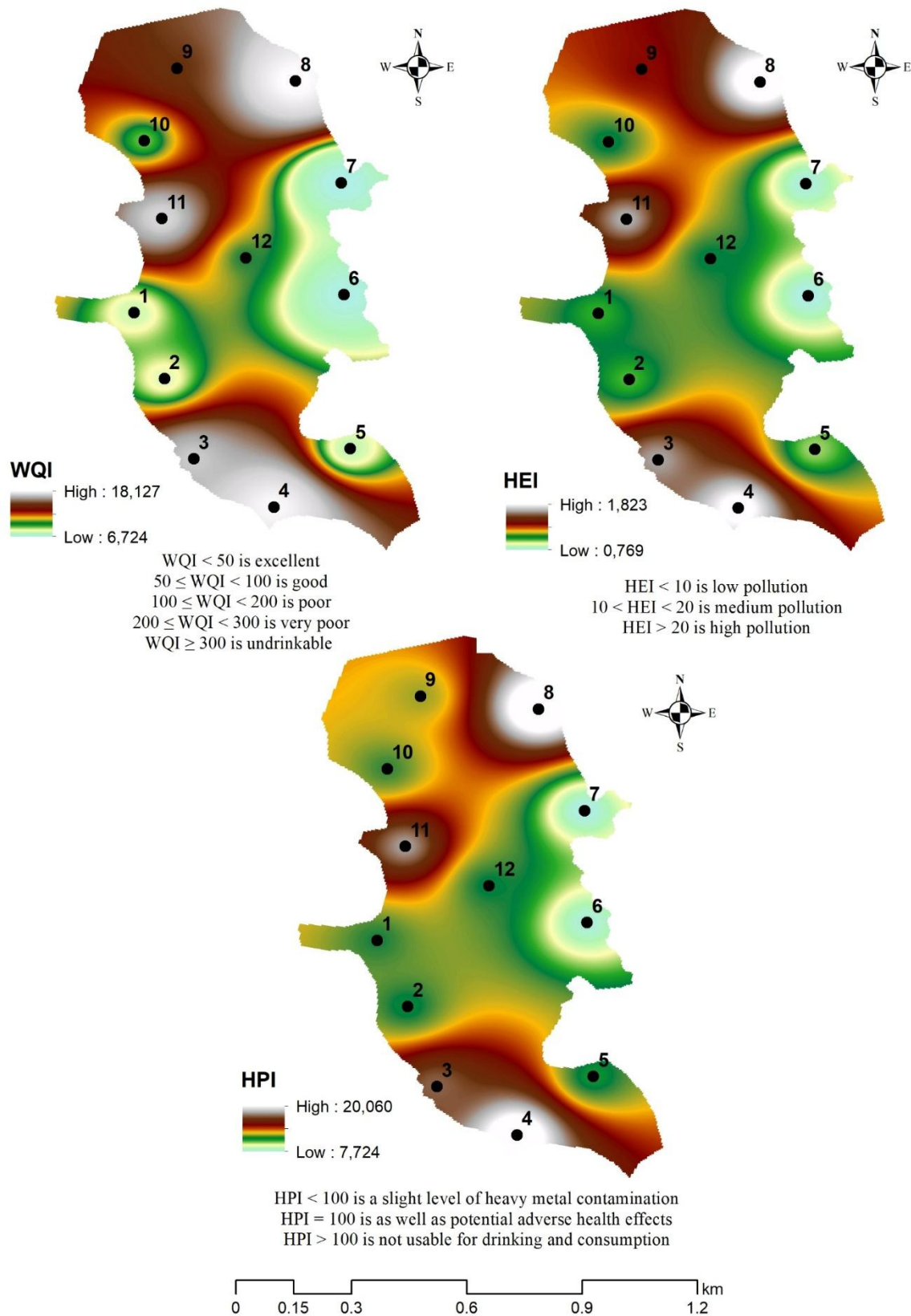


Figure 4: The map of indexical analysis of heavy metal pollution detected in Damsa Dam

3.3. Assessment of Correlation Analysis

Additional methods, like multivariate statistical analyses, have been employed to find possible heavy metal sources in order to improve the analysis's effectiveness and evaluation's power. The analysis of sources of heavy metals can facilitate an understanding of their distribution (Chai et al., 2017; Jiang et al., 2019; Huang et al., 2020). In this study, Pearson correlation analysis was therefore employed. The Pearson correlation coefficients for PHEs in surface water sampled at 12 different measurement stations on the dam lake are presented in Figure 5. In general, high positive correlation levels were detected among the measured metal(loid)s, Al, Fe and As (approximately $r=0.8$) due to the known geogenic rock structure of the region. According to Suresh et al. (2011), a high correlation coefficient across variables suggests that they have a common source, are dependent on one another, and behave identically when being transported. The highest positive correlation rates were found among Cd, Pb and Zn (approximately 0.9), while the relatively moderate positive correlation of Se metal with Ni and Cd can be considered as an indicator of the possibility of anthropogenic pollution. This finding is compatible with the results of the theme spatial analysis map of PHEs generated by GIS, which shows the accumulation distribution of the selected metals in the sample stations. Furthermore, these results are consistent with the PCA and HCA results (Figure 6-7).

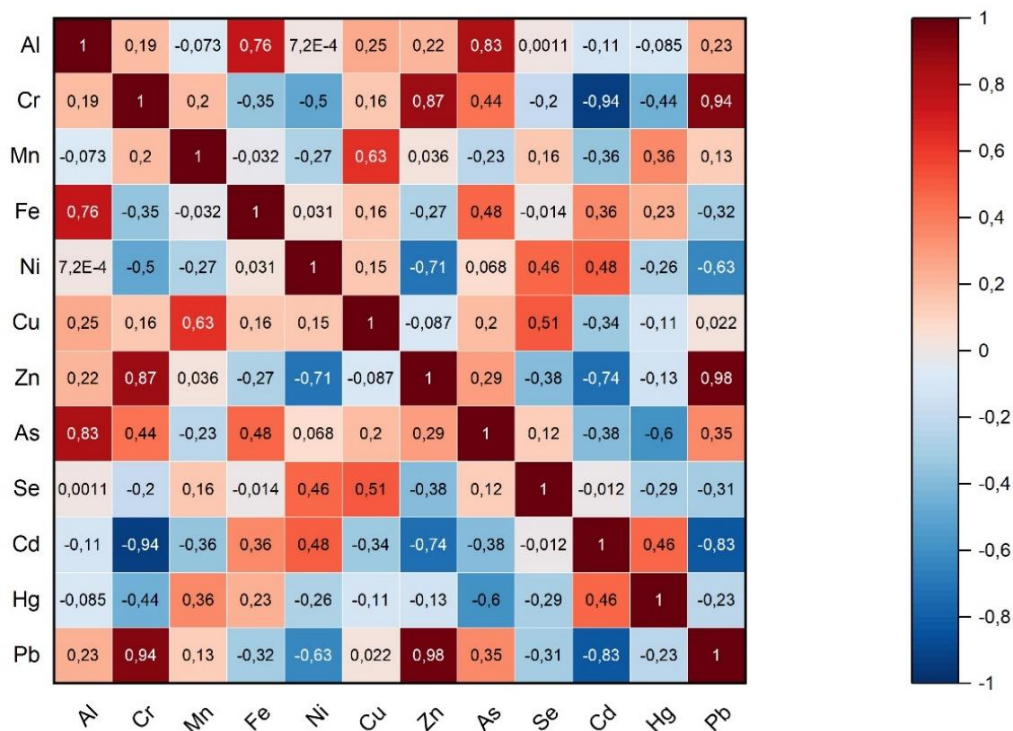


Figure 5: Correlations between heavy metal (loid)s detected in surface water samples

3.4. Assessment of Cluster and PCA Analysis

The principal component analysis (PCA) was used to observe whether the metal concentrations in the dam lake water were related to each other. The application of varimax rotation to the results of the aforementioned investigations enabled the determination of the factors that affected water quality. The diagram of the PCA results is presented in Figure 6. The significant connection between specific metals in surface water may be indicative of a shared source of contamination. As can be understood from Figure 6, Cr, Pb and Zn sources are quite close to each other in terms of origin according to the 1st principal component (PC1). The same situation is valid for As and Al metals. It can be said that other metals have contamination sources close to each other according to the 2nd principal component (PC2).

In this study, cluster analysis was performed to reveal the relationship network between the stations and both groups determined by PCA analysis. It can be said that the index based thematic map of PHEs produced with GIS and the two-way clustering analysis results are compatible with each other and there is a high similarity between them and the PCA results. Hierarchical clustering algorithm divides data into different clusters according to their similarity. Data similarity is measured by distance and correlation coefficient. Distance-based similarity indicates that two data points with a small distance have a large similarity, mainly including Euclidean distance, Mahalanobis distance, Minkowski distance. Hierarchical clustering algorithms include single linkage, complete linkage, average linkage, center point linkage and Ward's method (Cohen-Addad et al., 2019).

The Ward linkage technique and the Euclidean distance metric were used to create a cluster heat map and dendrogram of metal(loid)s findings of surface water sampled at stations (Figure 7). By forming a cluster of similar samplings, various samplings are placed in separate cluster packages, which helps to determine the pollution degree of surface waters with the same PHE concentration (Hossain et al., 2018). As seen in Figure 7, the dendrogram presented main cluster packages in the vertical section. The analysis results were grouped into two main clusters in terms of similar source distribution among heavy metals. Cluster 1 of these includes Al, As, Fe, Cr, Zn and Pb, while Cluster 2 includes other metals. Two main cluster structures were observed in the clusters made to reveal the similarity or closeness between the stations. The first main cluster includes stations S3 and S11. The other cluster forms two large categorical distributions within itself; While S1 and S2 are separated under the first subcluster, the predominant stations of this subcluster are S4-S8/S5-S10 and S6-S7/S9-S12 (Figure 7). In other words, the metal levels at stations S1 and S2 are close to each other. Again, there is no difference in terms of metal levels between S4 and S8 and between S5 and S10. The metal levels measured at S6, S7, S9 and S12 also show high similarity.

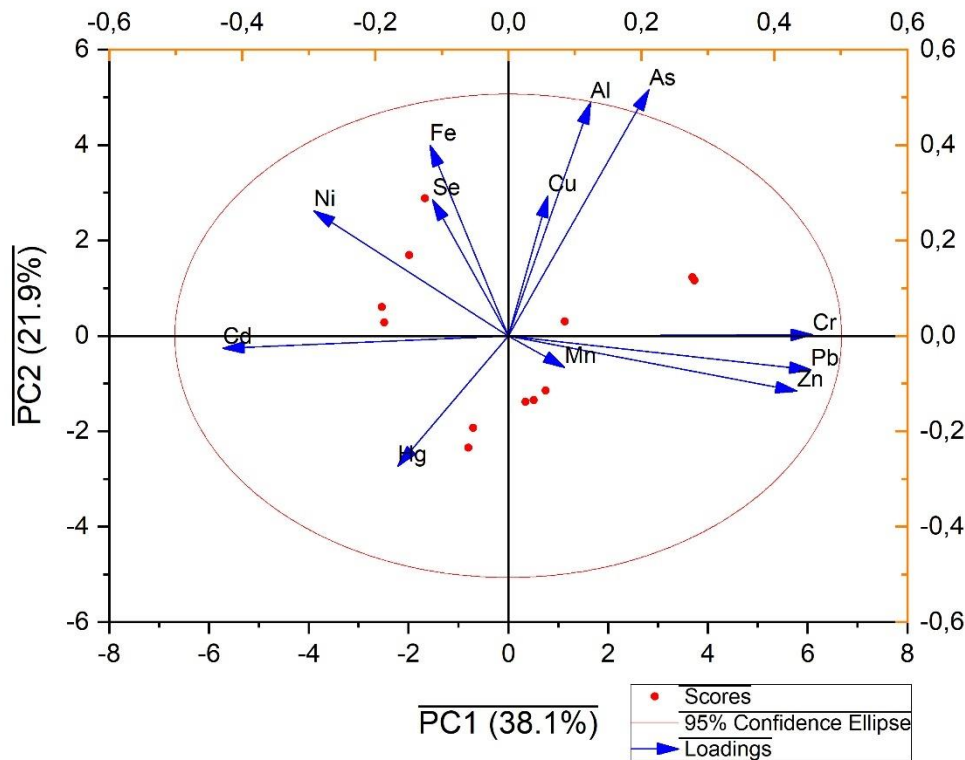


Figure 6: PCA analysis results of PHEs in lake water sampled stations

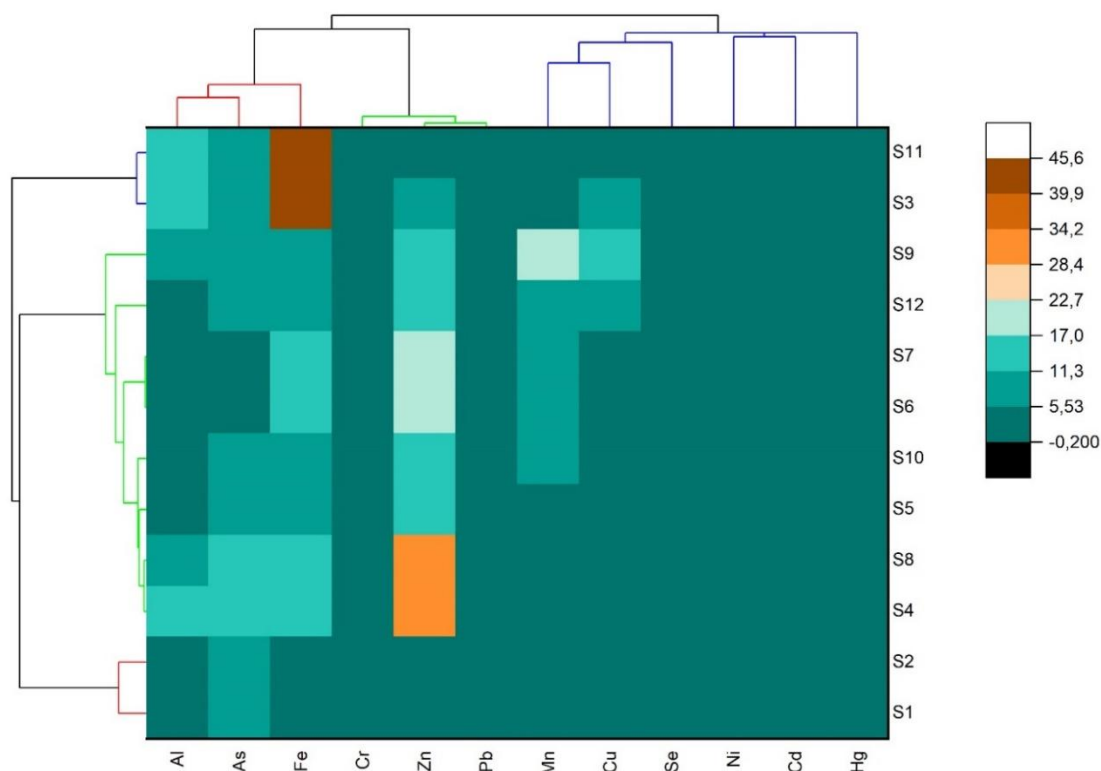


Figure 7: Two-way hierarchical cluster heat map of PHEs in lake water sampled stations

4. Conclusion

This study examined the direct metallic toxic effects of point and diffuse pollutant sources in the Damsa Dam in the Cappadocia region. The presence of possible climatic changes in water quality was considered, and multivariate statistical methods, principal component and cluster analysis, as well as water quality assessment indices, were used to address this issue. In this research, when the measured potential harmful elements (PHEs; Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Hg, Pb) levels were evaluated, the surface water of Damsa Dam was classified as 1st class water according to Türkiye surface water regulations. The indexical assessment results indicated that Damsa Dam Lake exhibited a low risk profile with respect to surface water quality. The WOI values, calculated based on metal measurement results obtained from 12 stations, demonstrated that the dam water was of excellent quality. However, the HPI and HEI values indicated a relatively low level of heavy metal contamination and low pollution, respectively. Source identifications made with PCA and HCA methods confirm that the metals in Damsa Dam Lake mainly originate from the drainage waters mixed with Damsa Stream that feeds the lake as a result of agricultural and small industrial activities carried out in the area. While the observation of high levels of Fe, Al and As elements is considered as a natural situation due to the formation that presents an example of the rock structure of the region, the presence of toxic elements of industrial origin such as Pb indicates that there may be serious contamination in the basin.

The findings of the present study may prove beneficial for the advancement of the dam lake and its surrounding environment. It is thought that the heavy metal pollution originating from industrial and agricultural waste obtained in this study originates from the main source feeding the dam (Damsa Stream) and other anthropogenic diffuse pollutant sources. Considering that the amount of sediment transported to the dam varies in the meteorological drought and sudden excessive rainfall conditions of the region, it should not be neglected that point heavy metal pollution may be the result of geogenic sediment transport. Although protecting water quality results in high costs for local governments, the best outcome is to expect benefits such as recreational and sustainable water abundance from investments made in protecting water quality, especially with the correction of eutrophication effects. Consequently, it is imperative to implement measures that can prevent the influx of heavy metals into the dam lake through direct discharge or agricultural drainage, as well as the entry of wastewater into drainage channels. This can be achieved by establishing dedicated systems for the collection and removal of these substances, thereby safeguarding the aquatic life within the lake and extending its lifespan. In addition, cost-effective, environmentally friendly adsorbents, remediation methods such as phytoremediation and bioremediation, and tools such as biosensors should be included in the dam lake management plans to reduce anthropogenic hazards.

In light of the recent dredging activities that have been conducted on the dam, it is imperative to monitor the water and sediment quality in order to ascertain the environmental status of the area. The monitoring of the dam water and sediment will provide insights into the changes that have occurred as a result of the dredging activities, which have altered the sediment structure. Such investigations must be repeated on a regular basis in terms of ecosystems due to the persistence of pollution elements and their dynamic structure with changes in quality. Determining the water quality criteria of water resources is crucial for guiding decision-making processes and ensuring efficient water management. This information will serve as a foundation for future studies (such as integrating GIS with multi-criteria assessment approaches and planning sustainable land and water resources using machine learning models and the Analytical Hierarchy Process (AHP) method) and will contribute to the understanding of the environmental impact of such activities.

References

- American Public Health Association. (2007). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (19th ed. Vol.6). Washington, DC: American Public Health Association, Water Environment Federation, and American Water Works Association.
- Aras, S., Yakut, Ş. M., & Dulkadiroğlu, H. (2024). The first study on the detection of microplastic in the tissues of *Cyprinus carpio*, *Capoeta tinca* and *Barbus anatolicus* in the Kızılırmak River (Nevşehir Region), Turkey. *Ecohydrology*, 17(8), Article e2725. <https://doi.org/10.1002/eco.2725>
- Azhari, H. E., Cherif, E. K., Sarti, O., Azzirgue, E. M., Dakak, H., Yachou, H., ... & Salmoun, F. (2022). Assessment of surface water quality using the water quality index (IWQ), multivariate statistical analysis (MSA) and geographic information system (GIS) in Oued Laou Mediterranean Watershed, Morocco. *Water*, 15(1), Article 130. <https://doi.org/10.3390/w15010130>
- Bakan, G., Özkoç, H. B., Tülek, S., & Cüce, H. (2010). Integrated environmental quality assessment of the Kızılırmak River and its coastal environment. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 10(4), 453–462.
- Baki, B., & Baki, O. G. (2023). Sea Cage Aquaculture in Marine Environments Trophic Index (Trix). In B. Doğanlar & Ş. Ellialtıoğlu (Eds.), *Academic Studies in Agriculture, Forestry and Aquaculture*. Gece Kitaplığı.
- Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1–11.
- Bilgin, A., & Konanç, M. U. (2016). Evaluation of surface water quality and heavy metal pollution of Coruh River Basin (Turkey) by multivariate statistical methods. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–18.
- Chai, L., Li, H., Yang, Z., Min, X., Liao, Q., Liu, Y., Men, S., Yan, Y., & Xu, J. (2017). Heavy metals and metalloids in the surface sediments of the Xiangjiang River, Hunan, China: distribution, contamination, and ecological risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 874–885. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7872-x>
- Chen, Q., Wu, L., Zhou, C., Liu, G., & Yao, L. (2024). A study of environmental pollution and risk of heavy metals in the bottom water and sediment of the Chaohu Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(13), 19658–19673.
- Cohen-Addad, V., Kanade, V., Mallmann-Trenn, F., & Mathieu, C. (2019). Hierarchical clustering: Objective functions and algorithms. *Journal of the ACM (JACM)*, 66(4), 1–42.
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Kaynar, I., Baser, V., & Türkmen, M. (2022a). Multivariate statistical methods and GIS based evaluation of the health risk potential and water quality due to arsenic pollution in the Kızılırmak River. *International Journal of Sediment Research*, 37(6), 754–765. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.06.004>
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Dereli, M. A., & Türkmen, A. (2022b). Integrated spatial distribution and multivariate statistical analysis for assessment of ecotoxicological and health risks of sediment metal contamination, Ömerli Dam (Istanbul, Turkey). *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(6), Article 199. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05670-1>
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Baser, V., & Türkmen, M. (2022c). Ecotoxicological health risk analysis of potential toxic elements accumulation in the sediments of Kızılırmak River. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11), 10759–10772. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03869-z>
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Dereli, M. A., & Türkmen, M. (2022d). Multivariate statistical and spatial assessment of water quality from a dam threatened by drought at the mid-Anatolia. Cappadocia/Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), Article 441. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09734-8>
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Dereli, M. A., Alkaya, S., & Türkmen, A. (2025). Spatial distribution of health risk assessment of a drinking water reservoir exposed to urban agglomeration and industrial lead contamination in Istanbul, Türkiye. *Water Environment Research*, 97(2), Article e70013. <https://doi.org/10.1002/wer.70013>
- Çiçek, E., Birecikligil, S., Öztürk, S., Seçer, B., & Celepoğlu, Y. (2016). Protection and monitoring program recommendations for fish fauna of Nevşehir Province. *Nevşehir Science and Technology Journal*, 5(1), 1–9.
- Din, I. U., Muhammad, S., Rehman, I. U., & Tokatli, C. (2023). Spatial distribution of potentially toxic elements contaminations and risk indices of water and sediments in the Darband and Samana streams, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), Article 1343. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11914-2>
- Edet, A. E., & Offiong, O. E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, lower cross river basin (southeastern Nigeria). *Geojournal*, 57(4), 295–304.
- Egbueri, J. C., & Mgbenu, C. N. (2020). Chemometric analysis for pollution source identification and human health risk assessment of water resources in Ojoto province, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 10(4), Article 98. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01180-9>
- Findik, O., Akin, E., & Aras S. (2019). Oligochaeta fauna of Damsa Dam Lake (Nevşehir, Turkey) and its relationship with some physicochemical parameters. *Acta Aquatica Turcica*, 15(4), 448–457. <https://doi.org/10.22392/actaqua.554425>

- Findik, Ö., & Aras, S. (2023). Application of the metal pollution indices on surface waters for assessment of environmental risk: a case study for Damsa reservoir (Cappadocia, Türkiye). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1689–1698. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04102-1>
- Gaillardet, J., Viers, J., & Dupré, B. (2003). Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*, 5, 225–272.
- Goher, M. E., Hassan, A. M., Abdel-Monie, I. A., Fahmy, A. H., & Elsayed, S. M. (2014). Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal, Nile River, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(3), 225–233.
- Hossain, M. B., Ahmed, A. S. S., & Sarker, M. S. I. (2018). Human health risks of Hg, As, Mn, and Cr through consumption of fish, Ticto barb (*Puntius ticto*) from a tropical river, Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(31), 31727–31736.
- Huang, Z., Liu, C., Zhao, X., Dong, J., & Zheng, B. (2020). Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China. *Environmental Sciences Europe*, 32, 1–9.
- Islam, M., Uddin, M. K., Tareq, S. M., Shamm, M., Kamal, A. K. I., Sugano, T., Kurasaki, M., Saito, T., Tanaka, S., & Kuramitz, H. (2015). Alteration of water pollution level with the seasonal changes in mean daily discharge in three main rivers around Dhaka City, Bangladesh. *Environments*, 2(3), 280–294. <https://doi.org/10.3390/environments2030280>
- Jiang, D., Wang, Y., Zhou, S., Long, Z., Liao, Q., Yang, J., & Fan, J. (2019). Multivariate analyses and human health assessments of heavy metals for surface water quality in the Xiangjiang River Basin, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(8), 1645–1657.
- Kalipci, E., Cüce, H., & Toprak, S. (2017a). Spatial Analysis of Damsa Dam Nevşehir Surface Water Quality with Geographic Information System. *Karalmas Journal of Science and Engineering*, 7(1), 312–319.
- Kalipci, E., Cüce, H., & Toprak, S. (2017b). Assessment of Surface Water Quality in Mamasın Dam Using Geographic Information Systems (GIS). *Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 351–361.
- Kalipci, E., Cüce, H., Ustaoglu, F., Dereli, M.A., & Türkmen, M. (2023). Toxicological health risk analysis of hazardous trace elements accumulation in the edible fish species of the Black Sea in Türkiye using multivariate statistical and spatial assessment. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 97, Article 104028. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.104028>
- Kalipci, E., Cüce, H., & Dereli, M. A. (2024). Assessment of ecological status of Damsa Dam (Nevşehir, Türkiye) using trophic classification indexes, geospatial and statistical techniques. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 9(4), 768–775.
- Kalipci, E., Varol, S., & Cüce, H. (2020). Evaluation of water quality and trophic condition of Yuvacık (Kocaeli-Turkey) drinking water dam reservoir. *Mugla Journal of Science and Technology*, 6(2), 128–139.
- Karadavut, S., Delibas, L., Kalipci, E., Ozdemir, C., & Karadavut, I.S. (2012). Evaluation of irrigation water quality of Aksaray region by using geographic information system. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(2), 71–182.
- Karadeniz, S., Ustaoglu, F., Aydın, H., & Yüksel, B. (2024). Toxicological risk assessment using spring water quality indices in plateaus of Giresun Province/Türkiye: a holistic hydrogeochemical data analysis. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(8), Article 285. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-02054-8>
- Kormoker, T., Karmoker, R., Uddin, M., Kabir, M. H., Siddique, M. A. B., Khan, R., ... & Idris, A. M. (2024). Toxic elemental abundances in the sediment of the Jamuna River, Bangladesh: pollution status, sources, toxicity, and ecological risks assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(17), 5904–5926.
- Kucukosmanoglu, A. G., & Filazi, A. (2020). Investigation of the metal pollution sources in Lake Mogan, Ankara, Turkey. *Biological Trace Element Research*, 198(1), 269–282.
- Mert, R., & Çiçek, E. (2010). Range Expansion of Introduced Tilapia Species (*Oreochromis niloticus*, L. 1758, Cichlidae) in Turkey. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9(12), 1753–1756.
- Mokarram, M., Saber, A., & Sheykhi, V. (2020). Effects of heavy metal contamination on river water quality due to release of industrial effluents. *Journal of Cleaner Production*, 277, Article 123380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro>
- Mohan, S. V., Nithila, P., & Reddy, S. J. (1996). Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 31(2), 283–289.
- Muhammad, S., Zeb, A., Ullah, R., Amin, S., Ahmad, A., & Tokatli, C. (2024). Spatial distribution of drinking, irrigation water quality, and health risk indices of high-altitude lakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, Article 103597. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103597>
- Mutlu, E., Yanik, T., & Demir, T. (2013). Monthly changes of water quality characteristics of Horohon Stream (Hafik-Sivas). *Alinteri Journal of Agricultural Sciences*, 25(B), 45–57.
- Paul, D. (2017). Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*, 15(2), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>
- Rakib, M. R. J., Jolly, Y. N., Begum, B. A., Choudhury, T. R., Fatema, K. J., Islam, M. S., ... & Idris, A. M. (2022). Assessment of trace element toxicity in surface water of a fish breeding river in Bangladesh: a novel approach for ecological and health risk evaluation. *Toxin reviews*, 41(2), 420–436.
- Saleh, H. N., Panahande, M., Yousefi, M., Asghari, F. B., Oliveri, C. G., Talaee, E., & Mohammadi, A. A. (2019). Carcinogenic and noncarcinogenic risk assessment of heavy metals in groundwater wells in Neyshabur Plain, Iran. *Biological Trace Element Research*, 190(1), 251–261.
- Sancer, O., & Tekin-Özan, S. (2016). Seasonal changes of metal accumulation in water, sediment and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel Growing in Lake Kovada (Isparta, Türkiye). *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 11(2), 45–60.
- Shetaia, S.A., Nasr, R.A., El Saeed, R.L., Dar, M.A., Al-Mur, B.A., & Zakaly, H. M. (2023). Assessment of heavy metals contamination of sediments and surface waters of Bitter Lake, Suez Canal, Egypt: Ecological risks and human health. *Marine Pollution Bulletin*, 192, Article 115096. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115096>
- Shukla, K., Kumar, P., Mann, G. S., & Khare, M. (2020). Mapping spatial distribution of particulate matter using kriging and inverse distance weighting at supersites of megacity Delhi. *Sustainable Cities and Society*, 54, Article 101997. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101997>

- Sibal, L. N., & Espino, M. P. B. (2018). Heavy metals in lake water: a review on occurrence and analytical determination. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 98(6), 536–554. <https://doi.org/10.1080/030673191481212>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52–67.
- Suresh, G., Ramasamy, V., Meenakshisundaram, V., Venkatachalapathy, R., & Ponnusamy, V. (2011). Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10), 1466–1474.
- Şeker, E., Özmen, H., & Aksoy, Ş. (1998). Investigation of heavy metal accumulations in Capoeta capoeta umbla (Heckel, 1843) caught from Elazığ Hazar Lake, Fırat University, *Journal of Science and Engineering Sciences*, 10(2), 13–20.
- Taş, B., & Şişman, H. E. (2020). Assessment of algal diversity and hydrobiological preliminary results in a high-mountain lake (Karagöl Lake, Giresun Mountains, Turkey). *Review of Hydrobiology*, 13(1-2), 11–38.
- T.C. Resmi Gazete. (2015). *Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik* (Resmi Gazete Tarih: 15.04.2015, Sayı: 29327). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150415-18.htm>
- T.C. Resmi Gazete. (2019). *İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Artırılması Hakkında Yönetmelik* (Resmi Gazete Tarih: 06.07.2019, Sayı: 30823). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/07/20190706-8.htm>
- Tercan, E., Dengiz, O., Özkan, B., Dereli, M.A., & Öztekin, Y.B. (2022). Geographic information system-assisted site quality assessment for hazelnut cultivation using multi-criteria decision analysis in the Black Sea region, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35908–35933. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18127-5>
- Tepe, Y., Ateş, A., Mutlu, E., & Töre, Y. (2006). Water quality of Hasan stream (Erzin-Hatay) and its monthly variations. *E.U. Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 23(1/1), 149–154.
- Tirink, S. (2021). Environmental effects and diffuse pollutant load calculation of animal wastes in Iğdır province and its districts. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 4(2), 43–50.
- Tirink, S., & Özkoç, H. B. (2021). Effects of toxic heavy metals on the environment and human health. In A.B. Özçınar (Ed.), *Highly Interconnected & Endless Puzzle: Agriculture* (pp.99–127). Iksad Publishing House.
- Treer, T., Varga, B., Safner, R., Aničić, I., Piria, M., & Odak, T. (2003). Growth of the common carp (*Cyprinus carpio*) introduced into the Mediterranean Vransko Lake. *Journal of Applied Ichthyology*, 19(6), 383–386.
- Turkish Standards Institute. (2005). *Sular - İnsanî tüketim amaçlı sular* (TS, 266). <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/StandardAra.aspx>.
- Türkmen, M., & Aydın, T. (2021). Seasonal and spatial accumulation of heavy metals in *Cystoseira barbata* C. Agardh 1820 from Northeastern Black Sea coast. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 50(04), 339–342.
- Türkmen, M., Mutlu, E., Zebel, S., & Türkmen, A. (2018). Evaluation of heavy metal accumulation in some fish species distributed in Batlama Creek in the Eastern Black Sea Coast. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 6(7), 858–862.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Risk assessment guidance for superfund (RAGS), Vol. 1: Human health evaluation manual (part E, supplemental guidance for dermal risk assessment) interim*. Washington, DC.
- Ustaoglu, F., Islam, M. S., & Tokatli, C. (2022). Ecological and probabilistic human health hazard assessment of heavy metals in Sera Lake Nature Park sediments (Trabzon, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), Article 597. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09838-1>
- Ustaoglu, F., & Aydın, H. (2020). Health risk assessment of dissolved heavy metals in surface water in a subtropical rivers basin system of Giresun (north-eastern Turkey). *Desalination and Water Treatment*, 194, 222–234.
- Üstün-Ödabaşı, S., & Ceylan Z. (2023). Water quality and health risk assessment of potentially toxic elements in water of Samsun Rivers of the Mid-Black Sea, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), Article 501. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11189-3>
- Xiao, J., Wang, L., Deng, L., & Jin, Z. (2019). Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 650, 2004–2012.
- Varol, M. (2013). Dissolved heavy metal concentrations of the Kralkızı, Dicle and Batman dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey. *Chemosphere*, 93(6), 954–962.
- Varol, M. (2020). Environmental, ecological and health risks of trace metals in sediments of a large reservoir on the Euphrates River (Turkey). *Environmental Research*, 187, Article 109664. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109664>
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., ... & Davies, P. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561.
- Wang, J., Liu, G., Liu, H., & Lam, P. K. (2017). Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China. *Science of the Total Environment*, 583, 421–431.
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., Vol. 38). World Health Organization.
- Yılmaz, F. (2004). Physicochemical properties of Mumcular Dam (Mugla-Bodrum). *Ecology*, 13(50), 10–17.
- Yüksel, B., Ustaoglu, F., & Arica, E. (2021). Impacts of a garbage disposal facility on the water quality of Çavuşlu stream in Giresun, Turkey: A health risk assessment study by a validated ICP-MS assay. *Aquatic Sciences and Engineering*, 36(4), 181–192.
- Yüksel, B., Ustaoglu, F., Aydın, H., Tokatli, C., Topaldemir, H., Islam, M. S., & Muhammad, S. (2024). Appraisal of metallic accumulation in the surface sediment of a fish breeding dam in Türkiye: A stochastic approach to ecotoxicological risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 203, Article 116488. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116488>

Yapay Zekâ Tabanlı Yöntemlerle Hava Kirliliği Araştırmalarının Gelişimi ve Gelecek Perspektifleri: Bibliyometrik Bir İnceleme

Olgu Aydın^{1*}, Hatice Kılar²

¹Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 06100, Ankara.

²Sakarya Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 54187, Sakarya.

Özet

Kentleşme, enerji tüketimi, sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte hava kirliliği ve hava kalitesindeki düşüş, halk sağlığı ve çevre üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Kirleticilerin tespiti ve kontrolü, günümüzün öncelikli sorunlarından biri haline gelmiş ve bu bağlamda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında artan önemi dikkat çekmiştir. Bu çalışma, 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanıldığı hava kirliliği araştırmalarındaki öncelikli temaların gelişimini ve gelecekteki araştırmalara yön verebilecek alanları kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bibliyometrik analiz ve atıf analizi yöntemleri kullanılarak yapılan bu araştırma, literatürün sistematik bir değerlendirmesini sunmuş ve hava kirliliği ile ilgili yapay zekâ uygulamalarının zamanla üstel bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Araştırma sonuçları, 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin literatürde bir paradigma değişimi yaratarak hava kirliliği tahminleri ve modellemelerinde merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Aynı zamanda, disiplinler arası iş birliği eğilimlerinin güçlenmekte olduğunu ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca yenilikçi bir çözüm sunmakla kalmayıp, aynı zamanda literatürdeki evrimi şekillendiren bir dönüşüm sağladığını ortaya koymaktadır. Bu analiz, alanın mevcut durumunu anlamak ve gelecekteki araştırma yönelimlerini belirlemek için değerli bir bilgi kaynağı sunmakta, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarında daha geniş ve etkili bir şekilde kullanılabileceğini güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kirliliği, Hava Kalitesi, Yapay Zekâ, Bibliyometrik Analiz

Development and Future Perspectives of Air Pollution Research Using Artificial Intelligence-Based Methods: A Bibliometric Review

Abstract

Urbanization, energy consumption, industrialization, and population growth, along with air pollution and the decline in air quality, pose a serious threat to public health and the environment. The detection and management of pollutants have become urgent global concerns, underscoring the growing significance of artificial intelligence (AI)-based methods in air pollution research. This study presents a thorough review of the evolution of key themes in AI-driven air pollution research from 2004 to 2024, highlighting areas for future investigation. Through bibliometric and citation analyses, the study systematically examines the literature, revealing an exponential growth in AI applications in air pollution research over time. The findings indicate that after 2014, AI-based methods have led to a paradigm shift, playing a critical role in air pollution forecasting and modeling. At the same time, the study reveals that interdisciplinary collaboration trends are strengthening and that AI-based approaches not only offer innovative solutions but also serve as a transformative force shaping the evolution of the literature. This analysis provides valuable insights into the current state of air pollution research and presents guidance for future directions, emphasizing the need for broader and more effective integration of AI techniques in this area.

Keywords

Air Pollution, Air Quality, Artificial Intelligence, Bibliometric Analysis

1. Giriş

Hava kirliliği, artan nüfus, trafik yoğunluğu, sanayileşme ve enerji kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte küresel bir sorun haline gelmiştir. İnsanlık, yüksek teknoloji ve akıllı sistemlere giderek daha fazla bağımlı hale geldiği hızlı bir gelişim çağını yaşarken, bu ilerleme enerji ve diğer kaynaklara olan talebi artırarak karbon emisyonları, ince partikül maddeler (PM_{2.5} ve PM₁₀), sera gazları ve kimyasal kirleticiler gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Chen vd., 2024). Bu durum, yalnızca çevresel problemlerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve ekolojik sistemler üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır (Feng vd., 2024). Dünya Sağlık Örgütü'ne (World Health Organization, WHO) göre, hava kirliliği her dakika dünya genelinde on üç kişinin hayatını tehdit etmektedir (World Health Organization, 2021a).

WHO'nun COP26 İklim Değişikliği ve Sağlık Özel Raporu'nda (COP26 Climate Change and Health Special Report), dünya nüfusunun %90'ından fazlasının büyük ölçüde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan sağlıksız hava soluduğu belirtilmiştir. Bu raporda, hava kirliliği ilk kez bir ölüm nedeni olarak tanımlanmış ve 2021 yılında WHO tarafından, "*Temiz Hava Soluyalım*" girişimini başlatmıştır (World Health Organization, 2021b). Hava kirliliği, yalnızca çevre sağlığı açısından değil, aynı zamanda halk sağlığı üzerinde yarattığı etkiler nedeniyle, dünya genelinde araştırmaların ve politika geliştirme süreçlerinin öncelikli konularından biri haline gelmiştir (Fan vd., 2020). Bu bağlamda, çeşitli ülkeler hava kirliliğiyle mücadele amacıyla kapsamlı yasal düzenlemeler ve stratejiler geliştirmiştir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde Temiz Hava Yasası 1990 yılında önemli değişikliklerle güçlendirilmiş; Çin'de ise 2000 yılında Çin Halk Cumhuriyeti Hava Kirliliği Önleme ve Kontrol Yasası yürürlüğe girmiştir (Chen vd., 2024). Avrupa Komisyonu'nun 2008/50/EC Direktifi (European Union, 2021), 250.000'den fazla nüfusa sahip şehirlerde hava kalitesinin ölçüm ve/veya modelleme yoluyla izlenmesini zorunlu kılmıştır. Norveç, Avrupa Ekonomik Alanı (European Economic Area, EEA) üyesi olarak, bu düzenlemeleri ulusal yasalarına entegre etmiştir (Hamer vd., 2020). Bu kapsamlı stratejiler, hava kalitesi standartlarının ve emisyon limitlerinin belirlenmesi, temiz enerji ve üretim teknolojilerinin teşvik edilmesi, endüstriyel ve ulaşım kaynaklı emisyonların kontrol altına alınması ve atmosferik çevre kalitesinin izlenmesi ve denetiminin güçlendirilmesi gibi temel unsurları içermektedir. Böylece, hava kirliliğiyle mücadelede etkili bir yönetim sistemi oluşturulması hedeflenmektedir.

Son yıllarda, veri erişilebilirliğindeki gelişmeler ve tahmin yöntemlerindeki ilerlemeler, hava kirliliği araştırmalarında giderek artan bir ilgi odağı haline gelmiştir. Chen vd. (2024), 2018 yılından bu yana hava kirliliği kontrolüne yönelik akademik çalışmalarda önemli bir artış olduğunu ve bu alandaki akademik katılımın sürekli olarak büyüdüğünü vurgulamıştır. Özellikle yapay zekâ tabanlı yöntemlerin (yapay zekâ (AI), makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL)) kullanımındaki artış, geleneksel yöntemlerin yerini daha hızlı ve ekonomik çözümler sunan akıllı sistemlere bıraktığını göstermektedir. Awasthi vd. (2024), bu dönüşümü eski bir bisikletten yüksek teknoloji ürünü bir elektrikli bisiklete geçişe benzetmiş ve yeni yöntemlerin hava kirliliğinin izlenmesini daha etkin hale getirdiğini belirtmiştir. Bu bağlamda, Rautela vd. (2024) Hindistan'da hava kirliliğiyle mücadelede AI ve ML teknolojilerinin entegrasyonunu PM_{2.5} tahmininde kullanarak yüksek doğruluk sağladıklarını ve bu teknolojilerin hava kirliliği yönetiminde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Menares vd. (2021), Şili'nin Santiago şehrinde PM_{2.5} seviyelerini tahmin etmek için DL tabanlı sinir ağları kullanmıştır. Çalışmada, 10 yıllık hava kirliliği ve meteorolojik verilerden faydalanılarak, Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) modeli ve Derin İleri Beslemeli Sinir Ağı (Deep Feedforward Neural Network, DFFNN) ile kritik kirlilik olaylarının tahmininde önemli başarılar elde edilmiştir. Özellikle LSTM modeli, sinoptik ölçekte kirlilik desenlerini yakalayarak, mevcut deterministik modellerden daha yüksek bir doğruluk oranı göstermiştir. Benzer şekilde, Ramadan vd. (2024), krom kaplama endüstrisi için gerçek zamanlı bir hava kirliliği izleme ve tahmin sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) sensörleri ve AI tabanlı yaklaşımlar kullanarak geniş bir yelpazedeki hava kirlileticilerini algılamakta ve LSTM ile Rastgele Orman (Random Forest, RF) modelleri aracılığıyla yüksek doğruluk oranıyla kirlilik seviyelerini tahmin etmektedir. Bu yenilikçi sistem, endüstriyel ortamlarda hava kalitesini artırmak ve dinamik müdahale imkânı sağlamak açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Li ve Sun (2021), ML yöntemlerinin Çin'deki şehir düzeyinde karbon dioksit (Carbon Dioxide, CO₂) emisyonlarının tahmininde etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, endüstriyel kirlilik göstergeleri gibi kritik değişkenler belirlenmiş ve bu yöntemler veri yetersizliği olan bölgelerde yüksek doğruluk oranlarıyla karbon (Carbon, C) emisyonlarını tahmin etmede başarılı bulunmuştur.

Clarivate Analitik Bilim Ağı (Clarivate Analytics Web of Science, WOS) veritabanında yapılan taramalar, AI, ML ve DL yöntemlerinin hava kirliliği çalışmalarında geniş bir uygulama alanı bulduğunu ve bu alandaki akademik yayın sayısında önemli bir artış yaşandığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin sistematik analizine yönelik kapsamlı değerlendirmelerin sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde bu açığı gidermeye yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, son yıllarda bu alandaki akademik ilginin arttığı görülmektedir (Masood & Ahmad, 2021; Mehmood vd., 2022; Guo vd., 2022; Li vd., 2023; Ansari & Quaff, 2024; Hau, 2024; Houdou vd., 2024). Masood & Ahmad (2021), AI tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki artan önemini vurgulayarak, bu tekniklerin hava kirliliği seviyelerini belirlemede ve modelleme süreçlerinde yüksek doğruluk sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalarında, hava kirliliği tahmininde yaygın olarak kullanılan AI yaklaşımlarını sistematik bir çerçevede ele alarak, farklı yöntemlerin başarı oranlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca, AI modellerinin güçlü genelleme yetenekleri ve hata toleransları sayesinde, geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla daha güvenilir sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Mehmood vd. (2022), AI ve ML tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmininde nasıl evrildiğini inceleyerek, literatürdeki büyüme eğilimlerini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, en çok kullanılan ML modellerini, araştırma iş birliklerini ve bölgesel dağılımı belirleyerek, hava kirliliği tahmininde yapay zekâ tekniklerinin küresel ölçekte nasıl benimsendiğini ortaya koymuşlardır. Li vd. (2023), ML uygulamalarının hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut durumunu değerlendirmek ve bu alandaki araştırma eğilimlerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, ML tabanlı modellerin hava kirliliği tahmininde nasıl kullanıldığını inceleyerek, öne çıkan araştırma konularını, iş birliklerini ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Ansari ve Quaff (2024), ML'nin hava kirliliği tahminindeki kullanımını, mevcut durumunu ve Hindistan'daki gelişim potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma, bibliyometrik analiz yöntemleriyle bu alandaki araştırma eğilimlerini, önde gelen akademik kaynakları ve en çok atıf alan çalışmaları inceleyerek, ML'nin hava kalitesi tahminindeki rolünü ve

gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeye odaklanmaktadır. [Hau \(2024\)](#), AI ve hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların akademik eğilimlerini değerlendirmek amacıyla 2012–2022 yılları arasındaki çalışmaları bibliyometrik bir analizle incelemiştir. Çalışma, yayımlanan makalelerin sayısındaki artış, atıf eğilimleri, önde gelen ülkeler, araştırma kurumları, finansman sağlayıcılar ve en çok atıf alan çalışmaları ele alarak, AI'nin hava kirliliği araştırmalarındaki rolünü ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeyi hedeflemektedir. [Guo vd. \(2022\)](#) de benzer şekilde, AI'nin hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut durumunu ve gelişim eğilimlerini analiz etmek amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. WOS veri tabanından elde edilen yayınları inceleyerek, ülkeler, kurumlar, yazarlar, anahtar kelimeler ve atıf yapılan referanslar açısından AI'nin hava kirliliği alanındaki rolünü değerlendirmişlerdir. Çalışma, AI'nin hava kirlileti konsantrasyonu tahmininde, çevresel izleme süreçlerinde ve düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin kullanımında nasıl bir etki yarattığını ortaya koyarak, bu alandaki araştırma dinamiklerini ve iş birliği ağlarını güçlendirmeye yönelik öneriler sunmayı amaçlamaktadır. [Houdou vd. \(2024\)](#), ML yöntemlerinin hava kirliliği tahminindeki kullanımını sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma, 2011–2023 yılları arasında yayımlanan araştırmaları değerlendirerek, hava kirliliği tahmini için kullanılan ML modellerini belirlemeyi ve bu modellerin doğruluğunu ve etkinliğini analiz etmeyi hedeflemiştir. Bunun yanı sıra, hava kirliliği ile ilgili farklı konulara odaklanan çeşitli bibliyometrik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Örneğin, hava kirliliği ile ilgili mekânsal-zamansal dağılım analizleri ([da Silva Filho vd., 2020](#)), ince partiküler maddeye kronik maruziyet ile kanser riski arasındaki ilişkiler ([Luo vd., 2022](#)), atmosferik kirlilik kaynakları ([Li vd., 2017a](#)), trafik kaynaklı hava kirliliği ([Lin, 2024](#)), iç mekân hava kalitesi ([Nazli vd., 2024](#)) ve iç mekân hava kalitesini etkileyen faktörler ([Türk, 2022](#)) üzerine yapılan çalışmalar bu alandaki önemli referanslar arasındadır. Bu çalışmalar, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki etkisini farklı açılardan ele almaktadır. Ancak mevcut araştırmaların büyük bir kısmı yalnızca belirli modelleme tekniklerine ve tahmin süreçlerine odaklanmaktadır. Buna karşın, bu çalışmada yapay zekâ tabanlı hava kirliliği araştırmalarının bilimsel gelişimi, akademik iş birlikleri ve araştırma trendleri bibliyometrik bir çerçevede sistematik olarak analiz edilmektedir. Çalışma, alanın evrimini disiplinler arası etkileşimler, atıf ilişkileri ve akademik üretkenlik bağlamında değerlendirerek, AI, ML ve DL yöntemlerinin hava kirliliği tahminindeki konumunu daha geniş bir perspektiften ortaya koymaktadır. Böylece, yalnızca model doğruluğu ve tahmin performansına değil, aynı zamanda yapay zekâ tabanlı tekniklerin uzun vadeli bilimsel gelişimine ve akademik iş birliklerine etkisine de odaklanarak bu alandaki araştırma boşluklarını belirlemeye katkı sağlamaktadır. Bu çerçevede, bibliyometrik analiz, bilimsel alanların gelişimini ve araştırma eğilimlerini anlamada güçlü bir yöntem olarak öne çıkmakta olup, bu çalışma da bu yöntemi kullanarak yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin bilimsel literatürdeki konumunu kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Bu yöntem, yayınlanmış araştırmaları tanımlamak, değerlendirmek ve izlemek için nicel yöntemler sunarak entelektüel yapılar, sosyal ağlar ve konuya olan ilgi alanlarının keşfedilmesine katkıda bulunmaktadır ([Zupic & Čater, 2015](#); [Koseoglu vd., 2016](#)). Ayrıca, araştırma alanının genel bir görünümünü elde etmek, önemli araştırma boşluklarını belirlemek, gelecekteki araştırma sorularını vurgulamak ve yeni fikirler önermek için değerli bir araçtır ([Donthu vd., 2021](#); [Marvi & Foroudi, 2023](#)). Bir makalenin araştırma alanına katkısı, zaman içinde biriken atıf sayısı ile değerlendirilebilir. Daha yüksek atıf alan çalışmalar, alan üzerinde daha büyük bir etki yaratmakta ve bilimsel bilginin çözülmesi, haritalanması ve önemli makalelerin evrimsel gelişimlerinin analiz edilmesinde önemli bilgiler sunmaktadır ([Marvi & Foroudi, 2023](#)). Bu bağlamda yürütülen araştırma, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin akademik etkisini ve literatürdeki konumunu derinlemesine inceleyerek, gelecekteki araştırmalara yön verecek bilimsel bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki yükselişini bibliyometrik analiz çerçevesinde ele alarak, bu alandaki mevcut eğilimleri, araştırma boşluklarını ve gelecekteki yönelimleri sistematik bir şekilde değerlendirmesi açısından özgündür. Literatürdeki temel gelişmeleri ve bilimsel katkıları nesnel bir bakış açısıyla analiz eden bu makale, bibliyometrik analiz ve atıf inceleme yöntemlerini bir araya getirerek, hava kirliliği ve yapay zekâ kesişimindeki çalışmaların bilimsel haritasını çıkarmakta ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici bir çerçeve çizmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Veri Toplama Süreci

Bu çalışma, dünya çapında kapsamlı bir içerik sunan WOS (<http://www.webofknowledge.com>) veri tabanı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. WOS, dergiler, bildiriler, kitaplar ve veri derlemelerini kapsayan seçkin bir atıf indeksidir ([Birkle vd., 2020](#)). İlk olarak Garfield tarafından 1964 yılında Bilimsel Atıf İndeksi (Science Citation Index, SCI) adıyla geliştirilen bu sistem, günümüzde WOS'un temelini oluşturmuştur. WOS, bugün itibarıyla bilimsel çalışmaların keşfi, analizi ve atıf araması için en önemli platformlardan biri olarak kabul edilmektedir ([Li vd., 2018](#)). İçerisinde yaklaşık 34.000 dergi barındıran bu veri tabanı, bilimsel araştırmaların dengeli ve titiz bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır ([Birkle vd., 2020](#)).

Pek çok alanda olduğu gibi, hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda da yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı geçmişe dayansa da, 2000'li yıllardan itibaren belirgin bir artış göstermiştir. Bu alandaki öncü çalışmalardan biri, [Song ve Hopke \(1996\)](#)'nin “*Solving the chemical mass balance problem using an artificial neural network*” başlıklı

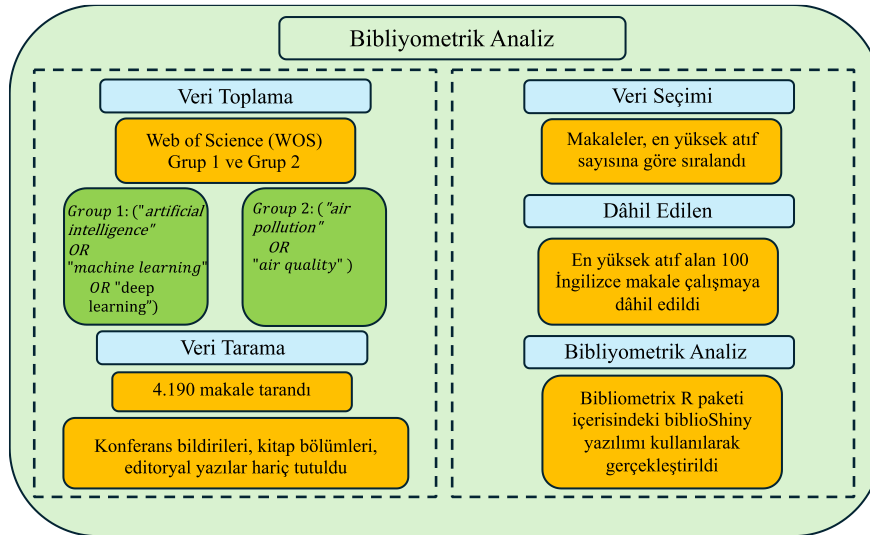
çalışmasıdır. Söz konusu çalışmada, aerosol kaynak belirleme problemlerinin çözümü için ilk kez Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı (Backpropagation Artificial Neural Network, BP-ANN) yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin geleneksel istatistik tekniklere kıyasla yüksek gürültülü verilerde (%5-15) daha etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu metodolojik atılımı takiben, yapay zekâ tabanlı uygulamaların hava kirliliği araştırmalarında giderek yaygınlaştığı gözlemlenmiş olup, çalışma kapsamı, 2004–2024 yılları arasındaki literatürü içerecek şekilde belirlenmiştir. Veri toplama süreci, 8 Ocak 2025 tarihinde Web of Science (WOS) veri tabanında, iki gruptan oluşan anahtar kelimeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sorgulama sonucunda, belirtilen yıllar arasında yayımlanmış toplam 4.190 İngilizce makale tespit edilmiştir. 2025 yılına ait yayınların atıf alma süreci henüz tamamlanmadığı ve yılın büyük bir bölümü değerlendirme dışında kaldığı için, bu yıla ait veriler analiz kapsamına dâhil edilmemiştir. Konferans bildirileri, kitap bölümleri, editoryal mektuplar çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çalışmada belirlenen anahtar kelimeler aşağıda verilmiştir.

Group 1: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning")

AND

Group 2: ("air pollution" OR "air quality")

Makale seçimi sürecinde, makaleler aldıkları atıf sayısına göre büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Araştırmaya, toplamda en yüksek atıf alan 100 makale dâhil edilmiştir. Tarama sürecinde belirlenen makaleler, çalışmanın amacına uygunluk açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özet ve/veya başlık bilgisi yeterli olmayan durumlarda, ilgili makalelerin tam metinlerine erişilerek kontrolü sağlanmıştır. Makale seçim sürecine ilişkin detaylı bilgi ve akış diyagramı Şekil 1'de sunulmaktadır.

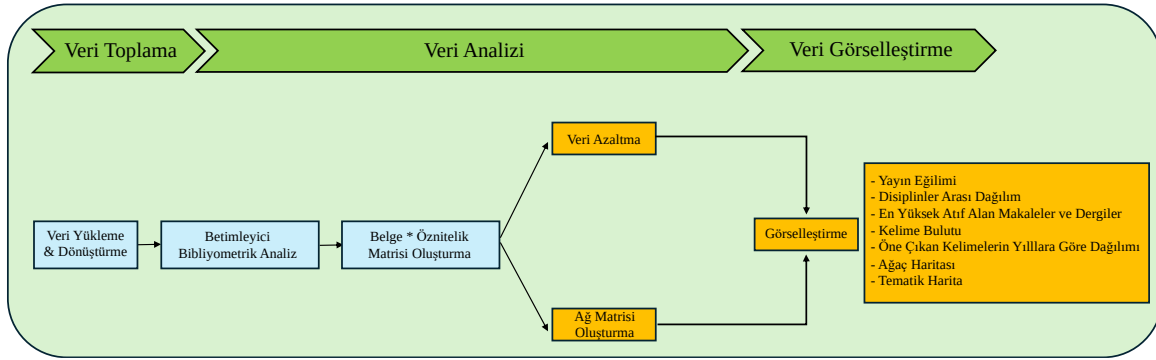


Şekil 1: Makalelerin tarama sürecine ait akış diyagramı

2.2. Veri Analizi Süreci

Bu çalışmada, en yüksek atıf alan makaleler belirlenerek ilgili veriler sisteme yüklenmiştir. Yayın yaşı ile atıf performansı arasındaki ilişki ve atıf sayısı ile atıf yoğunluğu arasındaki bağlantı, pearson korelasyon analizi ile değerlendirilmiştir. Pearson korelasyon analizi, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirlemek için kullanılan bir istatistiksel yöntem olup, bu çalışmada değişkenler arasındaki ilişkiyi ölçmek amacıyla uygulanmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için belirlenen dönem, 2004–2013 ve 2014–2024 olmak üzere iki farklı zaman dilimine ayrılmıştır. Her bir zaman dilimi için atıf sayıları ve atıf yoğunlukları incelenmiş, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki bilimsel etkisi ve bu etkinin zaman içerisindeki değişimi analiz edilmiştir. Bu kapsamda, zaman dilimi analiziyle elde edilen veriler, literatürün bilimsel etkisinin farklı dönemlerde nasıl değiştiğini anlamak ve araştırma dinamiklerini ortaya koymak için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Bibliyometrik analizler, RStudio programı kullanılarak, Bibliometrix R paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içerisindeki biblioShiny yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Aria & Cuccurulla, 2017). Açık kaynak kodlu ve R programlama dili ile geliştirilmiş olan bu paket, analiz süreçlerinde kullanılmış ve Aria ve Cuccurulla (2017) tarafından önerilen yönergeler temel alınarak uygulanmıştır. Bibliyometrik iş akış şemasına ait iş akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Bu yöntem, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki etkisini detaylı bir şekilde incelemek için önemli bir araç sağlamıştır.



Şekil 2: Bibliyometrik iş akış şeması (Aria & Cuccurullo (2017)'den uyarlanmıştır)

3. Bulgular ve Tartışma

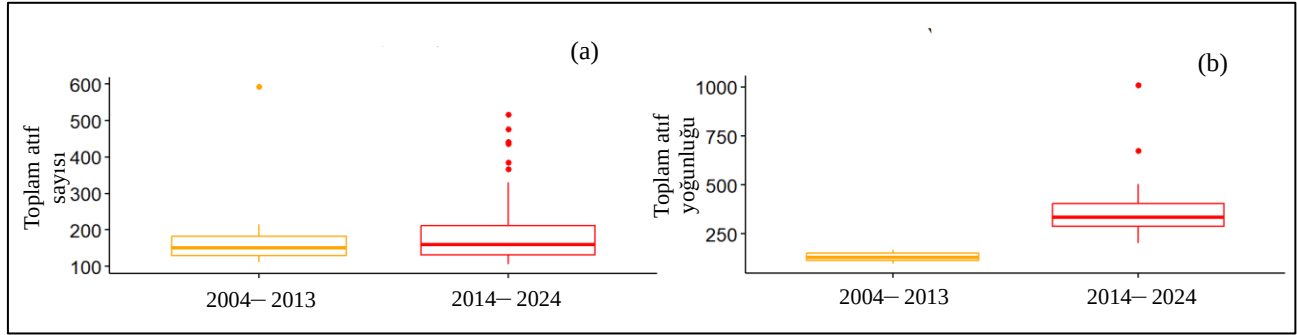
3.1. Yüksek Atıf Alan Yayınların Atıf Dinamikleri, Bilimsel İlişkileri ve Zaman Dilimlerine Göre Toplam Atıf Sayısı ve Atıf Yoğunluğundaki Eğilimleri

Bu çalışmanın temel amacı, hava kirliliği araştırmalarında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisini ve bu alandaki literatürün evrimini derinlemesine analiz etmektir. Hava kirliliği, hem çevresel hem de insan sağlığı açısından önemli bir sorun olmakla birlikte, bu sorunun anlaşılması ve çözümüne yönelik yenilikçi yaklaşımlar gerektirmektedir. Yapay zekâ tabanlı yöntemler, büyük veri setlerinin analizini kolaylaştırarak hava kirliliği çalışmalarına yeni bir boyut kazandırmıştır. Ancak, bu alandaki yöntemlerin nasıl evrildiği, hangi alanlarda yoğunlaştığı ve gelecekte hangi yönere odaklanılması gerektiği konuları detaylı incelemeyi gerektirmektedir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında gerçekleştirilen bibliyometrik analiz ve atıf analizi, iki ana hedefe hizmet etmektedir. İlk olarak, literatürde öne çıkan önemli bilimsel makaleleri ve bu makalelerin sunduğu katkıları belirlemek; ikinci olarak ise, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki gelişimini anlamak ve bu yöntemlerin bilimsel etkisini ölçmektir. Çalışmada, 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerini kapsayan iki ayrı zaman dilimi incelenmiş ve bu dönemlerde literatürün dinamikleri sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine ait toplam atıf sayısı Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen verilere göre, 2004–2013 döneminde makale başına ortalama atıf sayısı 196.8 iken, bu sayı 2014–2024 döneminde 191.4’e düşmüştür. Ancak toplam atıf sayısı, 2004–2013 döneminde 1,968, 2014–2024 döneminde ise 17,223 olarak hesaplanmıştır. Bu artış, 2014–2024 döneminde daha fazla sayıda makale yayımlanmasının etkisini göstermektedir. Şekil 3a, dönemler arasındaki toplam atıf sayısı dağılımını vermektedir. 2004–2013 döneminde atıflar 100–200 aralığında yoğunlaşmış, atıf dağılımı oldukça homojen bir yapı sergilemiştir. Bu dönemde yalnızca bir aykırı değer (~600 atıf) gözlenmiştir. Buna karşın, 2014–2024 döneminde atıf dağılımı daha geniş bir varyans göstermiş ve özellikle 500 üzerindeki aykırı değerler dikkat çekmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı çalışmaların hava kirliliği alanında artan etkisini ortaya koymaktadır. Atıf yoğunluğu açısından yapılan analizler, 2014–2024 döneminde önemli bir değişime işaret etmektedir (Tablo 1). 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğu ortalama 131.88 iken, bu değer 2014–2024 döneminde 379.1’e yükselmiştir. Ayrıca, 2014–2024 dönemindeki atıf yoğunluğu dağılımında çok daha geniş bir varyans gözlenmiştir. Şekil 3b, dönemler arasındaki atıf yoğunluğunun karşılaştırmasını göstermektedir. 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğu yaklaşık 250 civarında sabit bir dağılım sergilemiştir. Buna karşın, 2014–2024 döneminde atıf yoğunluğu belirgin şekilde artmış (~500) ve daha geniş bir varyans kaydedilmiştir. Bu dönemdeki aykırı değerler (~750 ve ~1000), belirli çalışmaların çok yüksek bir bilimsel etki yarattığını işaret etmektedir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca daha fazla ilgi görmekle kalmadığını, aynı zamanda literatüre derin etkiler bıraktığını ortaya koymaktadır. Özellikle 2014–2024 döneminde hem atıf sayısı hem de atıf yoğunluğunda gözlemlenen artış, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği araştırmalarının bilimsel katkısını ve önemini vurgulamaktadır.

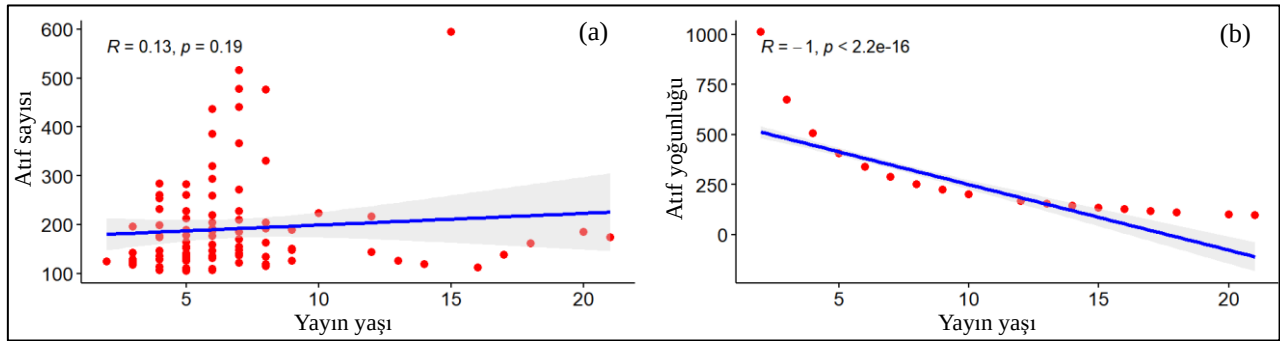
Tablo 1: 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine ait toplam atıf sayısı ve atıf yoğunluğu istatistikleri

Metrikler	2004–2013 (n = 10)	2014–2024 (n = 90)
Atıf sayısı (Ortalama)	196.8	191.4
En az-En çok	112–594	105–516
Toplam	1,968	17,223
Atıf yoğunluğu (Ortalama)	131.88	379.1
En az-En çok	95.43–167.75	201.5–1011.5
Toplam	1,318.77	34,114.93



Şekil 3: 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine göre toplam atıf sayısı ve atıf yoğunluğu karşılaştırması: a) makalelerin toplam atıf sayısı dağılımı, b) makalelerin toplam atıf yoğunluğu dağılımı

Yayın yaşı ile atıf sayısı arasındaki ilişki analiz edildiğinde, zayıf bir pozitif korelasyon ($R = 0.13, p = 0.19$) tespit edilmiştir (Şekil 4a). Eski yayınlar genellikle daha fazla atıf potansiyeline sahipken, bu etkinin zamanla kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki ilişki güçlü bir negatif korelasyon ($R = -1, p < 2.2e - 16$) göstermiştir (Şekil 4b). Yayın yaşı arttıkça atıf yoğunluğu düzenli olarak azalmış, yeni yayınlar (0–5 yaş aralığında) 500–1000 arasında yüksek atıf yoğunluğuna sahipken, daha eski yayınlar (15–20 yaş aralığında) neredeyse sıfıra düşmüştür. Bu bulgu, literatürdeki yeni çalışmaların bilimsel toplulukta daha fazla yankı uyandırdığını ve yenilikçi yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

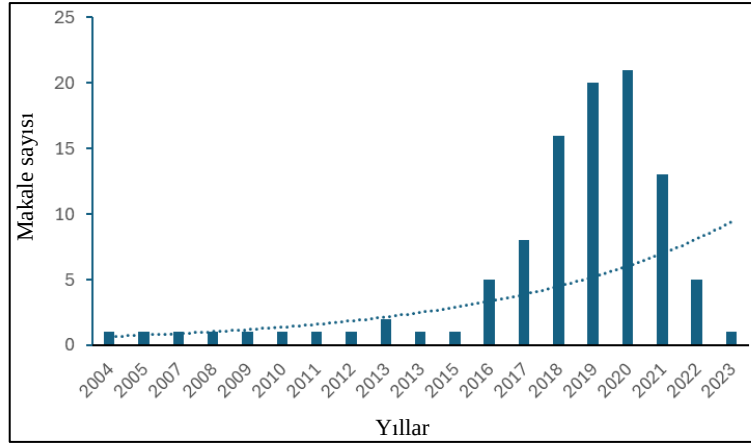


Şekil 4: Yayın yaşı ve atıf performansı ile ilgili atıf sayısı ve atıf yoğunluğu ilişkileri grafiği: a) Yayın yaşı ile atıf sayısı arasındaki ilişki, b) Yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki ilişki

3.2. Hava Kirliliği Araştırmalarındaki Akademik Yayın Eğilimleri

Şekil 5, 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı olarak hava kirliliği üzerine yapılan ve en yüksek atıf alan makalelerin yıllara göre eğilimini göstermektedir. Grafik, bu alandaki araştırmalarda zaman içinde belirgin bir artış yaşandığını yansıtmaktadır. 2004–2010 döneminde yıllık makale sayısı 0 ile 2 arasında değişmiştir. Bu durum, hava kirliliği konusundaki çalışmaların oldukça sınırlı olduğuna işaret etmektedir. Bu dönem, konuyla ilgili farkındalığın ve bilimsel ilginin düşük olduğu bir başlangıç evresi olarak değerlendirilebilir. 2011–2016 döneminde makale sayısında kademeli bir artış gözlenmiş, yıllık makale sayısı 1 ile 5 arasında seyretmiştir. Araştırma sayısındaki bu artış, hava kirliliğiyle ilgili problemlerin daha geniş bir bilimsel topluluk tarafından ele alınmaya başlandığını ve teknolojik gelişmelerin bu araştırmalara destek verdiğini göstermektedir. Bunun yanında, 2017–2020 yılları arasında dikkat çekici bir artış yaşanmıştır. 2017 yılında 7 olan makale sayısı, 2018’de 15’e, 2019’da 20’ye ve 2020’de zirve noktası olan 21’e ulaşmıştır. Bu dönem, hava kirliliğiyle ilgili araştırmaların yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği ve bu alanda yayımlanan makale sayısının hızlı bir şekilde arttığı bir dönemi temsil etmektedir. Söz konusu artışın, büyük ölçüde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarına entegrasyonu ve çevresel problemlerin küresel düzeyde daha fazla önem kazanmasıyla yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. 2020 yılındaki zirve sonrasında, 2021–2023 yılları arasında makale sayısında sırasıyla 13, 6 ve 1 olarak bir azalma eğilimi yaşanmıştır. Bu durum, en çok atıf alan yayın sayısının güncel makalelerde yeterli sayıya ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu dönemde de hava kirliliği konusuyla ilgili araştırmaların devam ettiği ve belirli bir düzeyde devamlılık gösterdiği gözlenmektedir. Grafikte 2024 yılına ait veriler yer almamaktadır. Bibliyometrik analizlerde, yayınların atıf alma süreçlerinin zamana yayıldığı ve bu nedenle ilgili yıl içerisinde yayımlanan çalışmaların henüz yeterli düzeyde atıf almadığı dikkate alınmalıdır. Akademik çıktıların görünürlük kazanarak etki yaratması zaman aldığından, bu döneme ait verilerin kapsamlı değerlendirilebilmesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bulgular, hava kirliliği konusundaki bilimsel çalışmaların yıllar içinde önemli bir evrim geçirdiğini ve özellikle 2017–2020 yılları arasında yıllık makale sayısı 3 katından fazla artarak büyük bir artış yaşandığını

göstermektedir. Bu eğilim, hava kirliliği sorunlarının bilimsel topluluk tarafından giderek daha fazla ele alındığını ve bu alandaki çalışmaların önem kazandığını ortaya koymaktadır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin ve büyük veri analiz araçlarının, söz konusu artışta önemli bir rol oynadığı söylenebilir. Ayrıca, çevresel problemler ve iklim değişikliği konularına yönelik küresel farkındalığın artması, hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların hızlanmasında etkili bir faktör olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5: 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı hava kirliliği araştırmalarında en çok atıf alan makale sayısındaki eğilim

3.3. Hava Kirliliği Araştırmalarının Disiplinler Arası Dağılımı

Hava kirliliği ile ilgili yapılan bilimsel çalışmaların disiplinler arası yapısını anlamak amacıyla, WOS kategorilerine göre makale dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 2, WOS veritabanında yer alan en çok makale içeren ilk 10 alanı göstermektedir. “Çevre Bilimleri (Environmental Sciences)” kategorisi incelenen toplam makalelerin %60’ını oluşturarak en yüksek paya sahiptir. Bu durum, hava kirliliği konusunun çevre bilimleri perspektifinden yoğun bir şekilde ele alındığını ve bu disiplinin çalışmalara önemli bir temel oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu kategoriyi, sırasıyla %17 ile “Çevre Mühendisliği (Engineering Environmental)” ve %16 ile “Elektrik Elektronik Mühendisliği (Engineering Electrical Electronic)” takip etmektedir. Bu oranlar, hava kirliliği sorunlarının çözümünde mühendislik disiplinlerinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle çevresel sorunların mühendislik çözümleriyle ele alındığını ve teknolojik yaklaşımların (örneğin, sensörler, elektrikli cihazlar) katkı sağladığını göstermektedir. %16’lık bir oranla 4. sırada yer alan “Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri (Meteorology Atmospheric Sciences)”, hava kirliliği ile atmosferik süreçlerin analizi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu kategori, hava kirliliği ile atmosferik süreçlerin analizinin sıkça ele alındığını ifade etmektedir. Özellikle hava kirliliği ile iklim değişikliği arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmaları da kapsamaktadır. “Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ (Computer Science Artificial Intelligence)” ve “Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri (Computer Science Information Systems)” kategorileri ise, yapay zekâ ve bilgi sistemlerinin hava kirliliği araştırmalarında giderek daha fazla kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler, özellikle hava kirliliği tahmini ve modellemesinde önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, %9 oranında katkı sağlayan “Yeşil ve Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (Green Sustainable Science Technology)” kategorisi, hava kirliliği araştırmalarında sürdürülebilir teknolojilere olan ilginin arttığını ve çevre dostu çözümlerin önem kazandığını göstermektedir.

Tablo 2: Hava kirliliği araştırmalarında WOS kategorilerine göre makale dağılımı

WOS Kategorileri	Makale Sayısı	% (100 Makale İçinde)
Çevre Bilimleri (Environmental Sciences)	60	60
Çevre Mühendisliği (Engineering Environmental)	17	17
Elektrik Elektronik Mühendisliği (Engineering Electrical Electronic)	16	16
Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri (Meteorology Atmospheric Sciences)	16	16
Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ (Computer Science Artificial Intelligence)	12	12
Yeşil ve Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (Green Sustainable Science Technology)	9	9
Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri (Computer Science Information Systems)	8	8
Halk Sağlığı, Çevre ve İş Sağlığı (Public Environmental Occupational Health)	7	7
Telekomünikasyon (Telecommunications)	5	5
Disiplinlerarası Mühendislik (Engineering Multidisciplinary)	4	4

%7'lik oranla yer alan “*Halk Sağlığı, Çevre ve İş Sağlığı (Public Environmental Occupational Health)*” kategorisi ise, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerine dair artan bir farkındalığı yansıtmaktadır. Bu kategori, hava kirliliği ile çeşitli hastalıklar arasındaki ilişkiye yönelik önemli araştırmaların yapıldığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar, hava kirliliği araştırmalarının disiplinler arası bir yaklaşımla ele alındığını ve özellikle çevre bilimleri, mühendislik ve yapay zekâ gibi alanların bu çalışmaların temelini oluşturduğunu açıkça sunmaktadır.

3.4. Hava Kirliliği Araştırmalarında Öne Çıkan Makalelerin Değerlendirilmesi

Bir makalenin aldığı atıf sayısı, o çalışmanın araştırma alanındaki önemini ve diğer disiplinlere olan potansiyel etkisini değerlendirmede önemli bir ölçüt olarak kabul edilmektedir (Vidal vd., 2022). Hava kirliliği araştırmalarında en çok atıf alan çalışmaların incelenmesi, alanın gelişiminde belirleyici rol oynayan araştırmaların tespit edilmesine ve bu çalışmaların odaklandığı temel konuların anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Tablo 3, yapay zekâ tabanlı yöntemlerle hava kirliliği üzerine yapılan ve en fazla atıf alan çalışmaları özetleyerek kullanılan yöntemlerin etkinliğini ve disiplinler arası katkılarının alana sunduğu önemi ortaya koymaktadır. Schneider vd. (2010) çalışması, küresel kentsel alanların haritalanmasını MODIS uydu verileri kullanarak gerçekleştiren önemli bir araştırmadır. Çalışma, iklim, bitki örtüsü ve kentsel topolojiye dayalı tabakalaşma yöntemini kullanarak, bir yıllık MODIS gözlemlerinden elde edilen zamansal ve spektral bilgileri değerlendirmiş ve Ensemble Karar Ağacı (Ensemble Decision Tree, EDT) algoritmasıyla sınıflandırma yapmıştır. Bu yöntem, kentsel ve yapılaşmış alanlarla diğer arazi türleri arasındaki karışıklığı minimize etmiş ve %93 doğruluk oranı sağlamıştır. Çalışma, kentleşmenin çevresel etkileri ile hava kirliliği gibi kritik sorunların anlaşılmasına olanak tanımakta ve literatürde 594 atıf alarak bu alandaki araştırmalara temel bir katkı sunmaktadır. Morawska vd. (2018), düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin hava kirliliği izleme ve maruziyet değerlendirme süreçlerindeki önemini vurgulamaktadır. Bu sensörler, standart/referans cihazlara kıyasla çok daha düşük maliyetle geniş katılımı ve hava kalitesi bilgisine erişimi mümkün kılarak hava kirliliği izleme süreçlerinde devrim yaratmıştır. Çalışma, bu sensörlerin farklı kullanım alanlarında (sabit dış ortam, mobil dış ortam, kapalı alanlar, kişisel izleme) belirli koşullar altında uygun olabileceğini göstermiştir. Çalışma, 516 atıf alarak literatürde bu alanda önemli bir referans haline gelmiştir. Bu çalışmalar, Tablo 2'deki verilere göre, toplam makalelerin %60'ını kapsayan “*Çevre Bilimleri*” kategorisinin, hava kirliliği araştırmalarında ana odak alanını temsil ettiğini göstermektedir. Huang ve Kuo (2018) çalışmasında, PM_{2.5} konsantrasyonunu tahmin etmek için Evrimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network, CNN) ve LSTM modellerini birleştiren bir DL modeli (Air Pollution Network, APNet) geliştirmişlerdir. Bu model, akıllı şehirlerde hava kirliliği tahmini ve kontrolü için etkin bir çözüm sunmakta ve literatürde 477 atıf bu alandaki önemini ortaya koymaktadır. Li vd. (2017), hava kirliliği konsantrasyonu tahmini için LSTM tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Pekin'deki 12 izleme istasyonundan elde edilen PM_{2.5} verileriyle test edilen model, bir saatlik tahminde %11.93 Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) değeri ile başarılı sonuçlar elde etmiştir. Çalışma, 476 atıf alarak literatürde önemli bir yere sahip olmuştur. Chen vd. (2018), Çin genelindeki PM_{2.5} seviyelerini tahmin etmek için Uzaktan Algılama (Remote Sensing, RS) verilerini ve ML yöntemlerini bir araya getiren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, 2005–2016 yılları arasındaki günlük PM_{2.5} konsantrasyonlarını yaklaşık 10 km çözünürlükte tahmin ederek, büyük veri analiz araçlarının hava kalitesi tahmini üzerindeki etkisini vurgulamış ve literatürde 441 atıf almıştır. Di vd. (2019), PM_{2.5} konsantrasyonlarını yüksek mekânsal (1 km×1 km) ve zamansal çözünürlükte tahmin eden bir model sunmuş ve literatürde 437 atıf almıştır. Çalışmada, uydu verileri (aerosol optik derinlik), meteorolojik değişkenler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem), arazi kullanım bilgileri ve kimyasal taşıma modeli tahminleri gibi veri kaynakları entegre edilmiştir. Sinir Ağı (Neural Network), RF ve Gradyan Artırma (Gradient Boosting) algoritmalarını birleştiren bir model kullanılmıştır. Bu model, PM_{2.5}'in sağlık üzerindeki etkilerini anlamak ve hava kirliliği yönetiminde kullanılmak üzere kapsamlı ve yüksek doğrulukta bir tahmin aracı sunarak disiplinler arası veri entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Qi vd. (2019), Grafik Konvolüsyonel Sinir Ağları (Graph Convolutional Neural Networks, GCNN) ve LSTM tabanlı hibrit bir modelle PM_{2.5} konsantrasyonlarının mekânsal ve zamansal değişimlerini tahmin etmiş ve 386 atıf almıştır. Çalışmada, farklı istasyonlardan elde edilen veriler graf sinyalleri olarak tanımlanmış ve model, 72 saatlik tahminlerde geri çağırma oranı (%68.45), yanlış alarm oranı (%4.65) ve R² (0.72) değerleriyle üstün bir performans sergilemiştir. Bu çalışma, hava kirliliği tahmininde yapay zekâ tekniklerinin uygulanabilirliğini göstermektedir. Zimmerman vd. (2018), düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin performansını iyileştirmek için daha güvenilir ölçümler sağlamak amacıyla RF algoritmasını kullanmışlardır. RF ile kalibre edilen sensörler, düşük maliyetli izleme ağlarının veri kalitesini artırmış ve kişisel maruziyet ölçümlerinde Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, EPA) standartlarını karşılayarak geniş bir uygulama potansiyeli sunmuştur. Çalışma, 366 atıf alarak literatürde bu alandaki önemli katkısını göstermiştir. Bu çalışmalar, hava kirliliği modellemesinde AI, ML, RS ve DL'nin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, “*Çevre Mühendisliği, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ ve Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri*” kategorilerinin yapay zekâ ve bilgi sistemlerinin hava kirliliği tahmini ve modellemesinde giderek artan önemine işaret etmektedir. Yüksek atıf alan bu makaleler, literatürdeki yönelimlerin anlaşılması ve gelecekteki araştırma alanlarının belirlenmesi için değerli bir temel sunmaktadır. Ayrıca, bu makaleler hava kirliliği araştırmalarında teknolojik yeniliklerin ve disiplinler arası yaklaşımların bilimsel topluluk tarafından giderek daha fazla benimsendiğini göstermektedir.

Tablo 3: Hava kirliliği araştırmalarında en yüksek atıf alan makaleler ve dergiler

Yazarlar/Referanslar	Makale Başlığı	Dergi Başlığı	Atıf Sayısı
(Schneider vd., 2010)	Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on “urban ecoregions”	Remote Sensing of Environment	594
(Morawska vd., 2018)	Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?	Environment International	516
(Huang & Kuo, 2018)	A deep CNN-LSTM model for particulate matter (PM _{2.5}) forecasting in smart cities	Sensors	477
(Li vd., 2017b)	Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: Method development and evaluation	Environmental Pollution	476
(Chen vd., 2018)	A machine learning method to estimate PM _{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information	Science of the Total Environment	441
(Di vd., 2019)	An ensemble-based model of PM _{2.5} concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution	Environment International	437
(Qi vd., 2019)	A hybrid model for spatiotemporal forecasting of PM _{2.5} based on graph convolutional neural network and long short-term memory	Science of the Total Environment	386
(Zimmerman vd., 2018)	A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring	Atmospheric Measurement Techniques	366
(Joharestani vd., 2019)	PM _{2.5} prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data	Atmosphere	319
(Li vd., 2017c)	Estimating ground-level PM _{2.5} by fusing satellite and station observations: A geo-intelligent deep learning approach	Geophysical Research Letters	330

3.5. Hava Kirliliği Araştırmalarında Literatürde Öne Çıkan Anahtar Kelimeler

Anahtar kelimeler, belgelerin başlıkları ve referans listelerinde sıkça kullanılan terimlere dayanarak bir bilgisayar algoritması tarafından türetilen indeks terimleridir (Yildirim vd., 2022). Bu terimler, bibliyometrik analizlerde belgelerin içeriklerini daha derinlemesine anlamak ve analiz etmek için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2015). Şekil 6, hava kirliliği üzerine yapılan bibliyometrik analizde, literatürde öne çıkan anahtar kelimelerin görselleştirilmesini sağlayan bir kelime bulutu grafiğini vermektedir. Kelime bulutu, bu alanda yapılan çalışmaların yoğunlaştığı konuları ve kullanılan yöntemleri metrik sıklıklarına göre farklı boyutlarda sunarak okuyuculara bir çerçeve çizmektedir. Şekilde en büyük boyutta yer alan kavramlar, literatürde en sık vurgulanan anahtar kelimelerdir (Mehmood vd., 2022). Bu çalışmada, “deep learning” ve “machine learning” yöntemlerinin hava kirliliği modelleme ve tahmininde daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Bu yöntemler, büyük veri analizlerini kolaylaştırarak hava kirliliği araştırmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, “air pollution” ve “air quality” çalışmalarının ana odak noktalarını temsil etmektedir. “PM_{2.5}” ve “particulate matter” hava kirliliği araştırmalarında en sık incelenen kirlenici türlerinden biridir. PM_{2.5}’in insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, bu terimlere literatürde sıkça karşılaşılmaktadır. Örneğin, Polezer vd. (2018), PM_{2.5} konsantrasyonlarının, sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel faktörlerle birlikte insan sağlığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANN yöntemini kullanmışlardır. Benzer şekilde, Rakholia vd. (2022) Vietnam’ın Ho Chi Minh Şehri’nde (HCMC) PM_{2.5} konsantrasyonlarının zamansal özelliklerini analiz ederek, hava kirliliğinin sağlığa zararlı etkilerini azaltmak ve vatandaşları uyarmak amacıyla yapay zekâ tabanlı birden çok adımlı PM_{2.5} tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Ayrıca, Chen vd. (2024), halk sağlığını korumak ve çevresel yönetimi desteklemek amacıyla, PM_{2.5}

konsantrasyonlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için yapay zekâ tabanlı yöntemleri kullanarak etkili bir model oluşturmuşlardır. Bu çalışmalar, literatürde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin PM_{2.5} konsantrasyonlarının tahmini ve hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması konusundaki etkinliğini vurgulayan birçok araştırmadan sadece birkaçını temsil etmekte ve bu yöntemlerin güçlü araçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Kelime bulutunda ayrıca, "China" gibi bölgesel odaklı anahtar kelimeler dikkat çekmektedir. Bu durum, Çin gibi bölgelerin hava kirliliği çalışmalarında öncü bir rol oynadığını ve bölgesel sanayileşme ile çevresel sorunların literatürde güçlü bir şekilde temsil edildiğini göstermektedir. Örneğin, Çin'in geniş coğrafyası ve hava kirliliğine ilişkin geniş veri setleri, yapay zekâ tabanlı tekniklerinin bu bölgedeki uygulamalarını artırmıştır. Bundan başka, "random forest", "neural networks", "artificial neural network", ve "long short-term memory", "recurrent neural network" gibi yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında sıkça kullanıldığı görülmektedir.

Bu kelime bulutu, araştırma eğilimlerinin zaman içinde nasıl geliştiğini de yansıtmaktadır. Örneğin, 2015 sonrası yapılan çalışmaların temaları, yapay zekâ ve büyük veri analiz araçlarının bu alanda giderek daha fazla benimsenmesiyle şekillenmiştir. Bu bulgu, hava kirliliği çalışmalarının teknolojik yeniliklerle paralel olarak nasıl evrildiğini göstermektedir. Şekil 4, hem araştırmacılara hem de politika yapıcılara hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut eğilimleri ve gelecekteki araştırma potansiyelini belirlemek açısından yol gösterici bir araçtır. Özellikle, "deep learning", "machine learning", ve "air pollution" gibi kavramların büyüklüğü, bu terimlerin literatürdeki merkezi rolünü ve bu alandaki araştırmalara olan katkısını vurgulamaktadır.

Bu kelime bulutu, hava kirliliği üzerine yapılan çalışmaların odaklandığı temel temaları özetlerken, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin bu alandaki rolünü belirtmektedir. Ayrıca, hava kirliliğiyle ilgili olarak insan sağlığı, atmosfer modelleme, ve sürdürülebilir çözümler gibi disiplinler arası yaklaşımların ön planda olduğunu ifade etmektedir. Şekil 4, hem araştırmacılara hem de politika yapıcılara hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut eğilimleri ve gelecekteki araştırma potansiyelini belirlemek açısından yol gösterici bir araçtır.



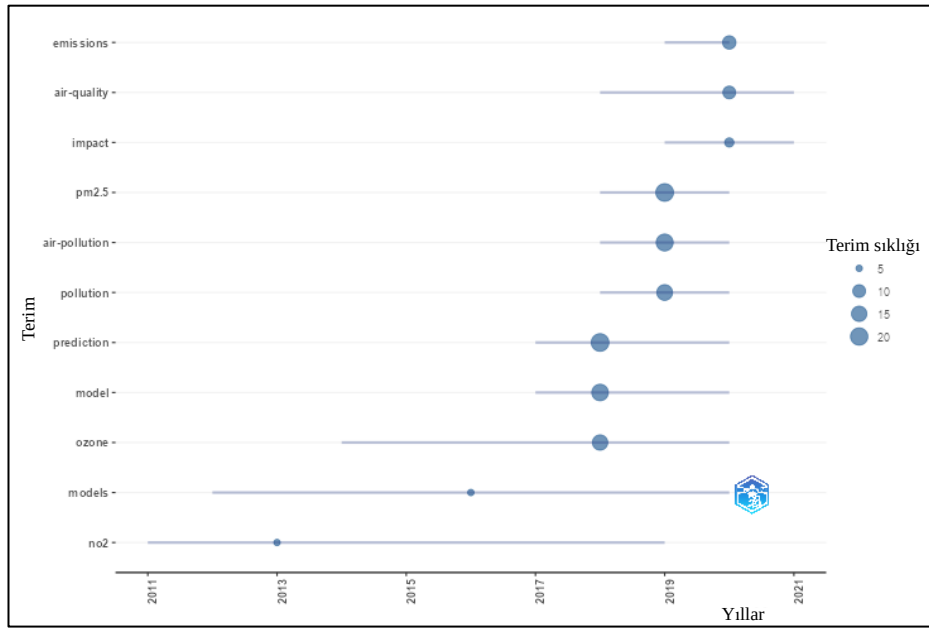
Şekil 6: Hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan anahtar kelimeler (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak üretilmiştir)

3.6. Hava Kirliliği Araştırmalarında Öne Çıkan Temalar ve Zaman İçindeki Eğilimleri

Trend konu analizi, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yıllar içinde artan etkisini ve literatürdeki temaların zamanla nasıl evrildiğini anlamak için ideal bir yöntem sunmaktadır. Şekil 7, 2011–2021 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan anahtar kavramların zaman içerisindeki dağılımını ve frekansını göstermektedir. Kelime bulutundan elde edilen bilgilerle paralel olarak, bu analiz, literatürde belirli temaların hangi dönemlerde ön plana çıktığını ve araştırma odaklarının nasıl evrildiğini görselleştirmektedir. Grafiğe göre, "air pollution" ve "air quality" gibi terimler, hava kirliliği araştırmalarının temelini oluşturmakta ve bu alanın literatürde sürekli bir odak noktası olduğunu vurgulamaktadır. "PM_{2.5}", 2015 sonrası dönemde sıklıkla kullanılan bir terimdir. Bu durum, PM_{2.5}'in, hava kirliliği çalışmalarında en önemli kirleticilerden biri olarak kabul edildiğini ve bu dönemde insan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili çalışmaların yoğunlaştığını ifade etmektedir. Bu bulgu, literatür taramaları ve kelime bulutu analiz sonuçları arasındaki örtüşmeyi desteklemekte ve araştırma trendlerinin tutarlılığını açıkça ortaya sermektedir. Çalışmada, "prediction" ve "models" gibi terimlerin sıklıkla kullanılması, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini ve modellemesi için giderek daha fazla benimsendiğini belirtmektedir. Özellikle 2017 sonrası bu terimlerin artış göstermesi, büyük veri ve algoritma bazlı yaklaşımların hava kirliliği araştırmalarında yaygın hale geldiğini işaret etmektedir. Grafikte dikkat çeken "emissions" terimi, hava kirliliğinin kaynağına yönelik çalışmaların önemini yansıtırken, "ozone" ve "NO₂" gibi terimlerin yer alması, spesifik kirleticilere odaklanıldığını ve bu kirleticilerin hava kalitesi üzerindeki etkilerinin ele alındığını vurgulamaktadır. Örneğin, Marrakchi vd. (2024), Tangier şehrinde troposferik ozon (O₃) konsantrasyonlarının tahmini ve olası risklerin azaltılmasında etkili olan

Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) ve LSTM modellerinin performansını araştırmıştır. Benzer şekilde, Mandal vd. (2024), azalan kentsel hava kalitesinin sosyoekonomik istikrar, halk sağlığı ve ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerini ele alarak, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamak amacıyla, O₃ ve öncül kirleticisi azot dioksitin (NO₂) eşzamanlı tahmini için Birleşik Spektral-Uzaysal Grafik Sinir Ağı (Unified Spectro-Spatial Graph Neural Network, USS-GNN) modelini geliştirmiştir. Uluocak vd. (2024), 2015–2022 yılları arasında İstanbul ve Ankara'dan elde edilen günlük NO₂ zaman serisi verilerini kullanarak, Türkiye'de hava kirliliğinin tahmini ve kontrolüne yönelik daha etkili modeller geliştirmek amacıyla, bir gün öncesinden NO₂ konsantrasyonunu tahmin etmek için hibrit modeller önermiştir. Literatürde, O₃ ve NO₂ gibi kirleticilerin tahminine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmaların ortak sonuçları, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

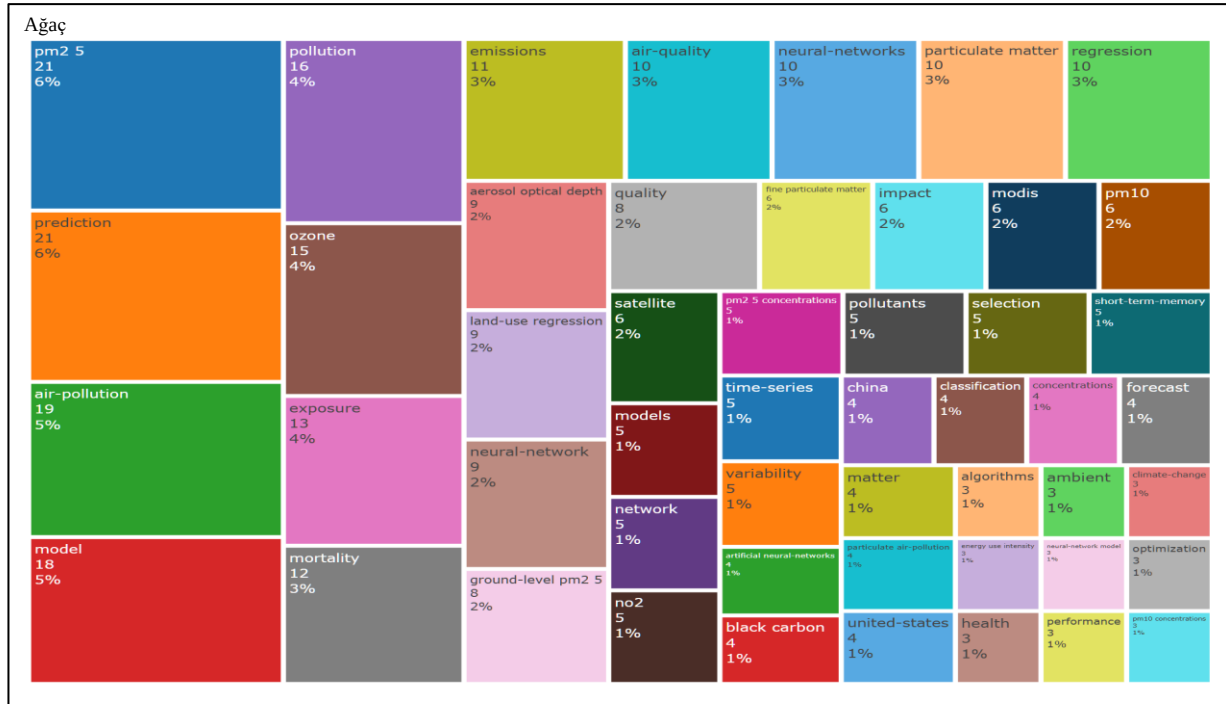
Bu sonuçlar, hava kirliliği araştırmalarının zaman içinde teknolojik yenilikler ve çevresel farkındalıkla birlikte nasıl geliştiğini yansıtmaktadır. Özellikle, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin literatürde daha fazla yer bulması, bu alandaki araştırma eğilimlerinin gelecekte de disiplinler arası bir yaklaşımla devam edeceğini işaret etmektedir. Şekil 5, literatürdeki bu dönüşümü ve araştırmaların yönelimlerini anlamak için değerli bir araçtır.



Şekil 7: Hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan terimlerin yıllara göre sıklık dağılımı (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak üretilmiştir)

3.7. Hava Kirliliği Araştırmalarında Ağaç Haritası Analizi İle Tematik Odaklarının İncelenmesi

Ağaç haritası analizi, verileri hiyerarşik bir yapı içinde görselleştirerek kategoriler arasındaki ilişkileri ve ağırlıkları net bir şekilde sunan bir veri görselleştirme yöntemidir. Özellikle bibliyometrik analizlerde, bir alandaki temaların veya kavramların önem sıralamasını ve bunların yüzdellik dağılımını görselleştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, her bir kategoriye veya anahtar kelimeye dikdörtgenler içinde temsil eder ve dikdörtgenlerin büyüklükleri, ilgili kavramın veri setindeki frekansına veya önemine göre değişir. Şekil 8, hava kirliliği araştırmalarında kullanılan yapay zekâ tabanlı yöntemler ve araştırma konularını görselleştiren bir ağaç haritası analizi sunmaktadır. Kelime bulutu ve trend konu analizi bulgularını tamamlayıcı bir nitelik taşımakta olup, çalışmalardaki temel anahtar kelimelerin önem sırasını ve yüzdesel dağılımını detaylandırmaktadır. Buna göre, “PM_{2.5}” (%6), “prediction” (%6), “air pollution” (%5), “model” (%5) ve “pollution” (%4) gibi anahtar kelimelerin sıklıkla kullanılan terimler arasında yer aldığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu bulgu, kelime bulutu analizinde de öne çıkan “deep learning” ve “machine learning” gibi yöntemlerin, özellikle PM_{2.5} tahmininde yaygın bir şekilde kullanıldığını desteklemektedir. Ayrıca, “neural networks” (%3), “particulate matter” (%3), ve “regression” (%3) gibi terimler, hava kirliliği modelleme çalışmalarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu durum, trend konu analizinde de görüldüğü üzere, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarına nasıl katkı sağladığını ortaya koymaktadır. “Emissions” (%3), “ozone” (%4), ve “exposure” (%4) gibi terimler ise, hava kirliliği kaynakları ve etkilerinin daha geniş bir çerçevede ele alındığını ve bu kapsamda sürdürülebilirlik ve insan sağlığı gibi disiplinler arası konuların da incelendiğini belirtmektedir. Örneğin, “ozone” ve “mortality” (%3) gibi terimler, hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileriyle ilgili önemli bir araştırma alanına işaret etmektedir.



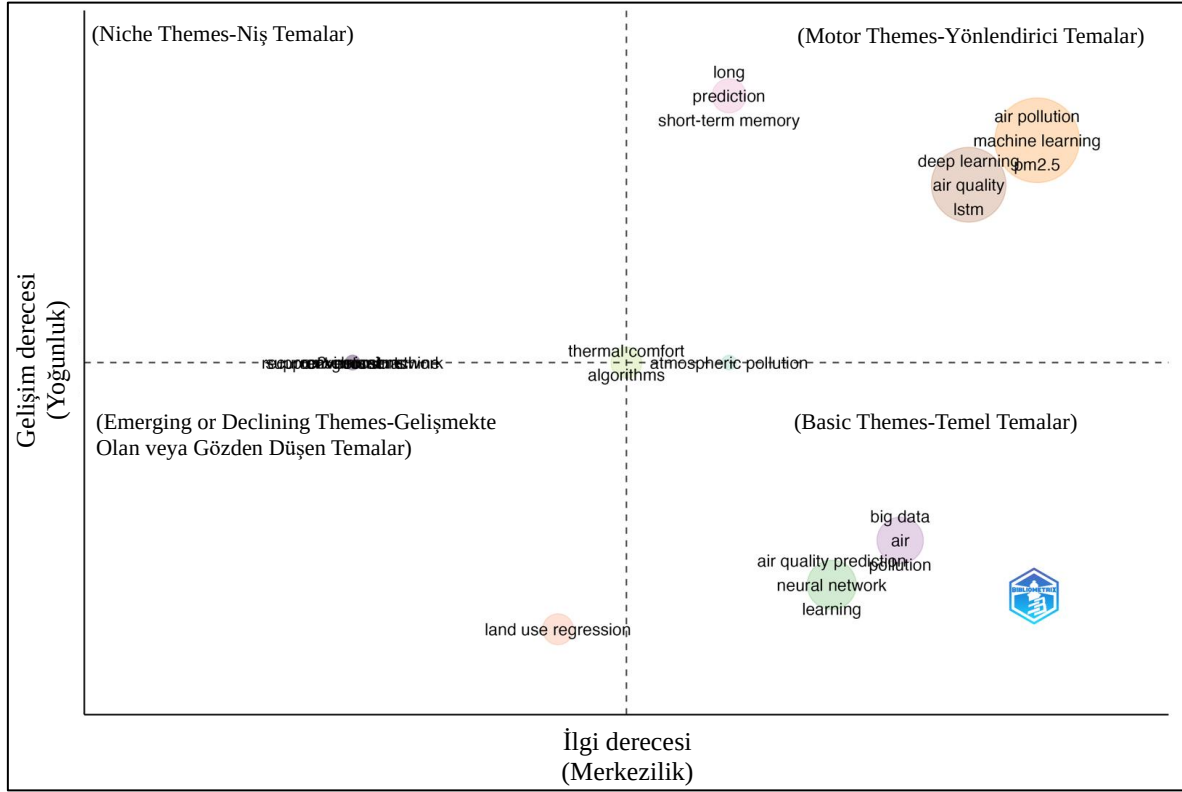
Şekil 8: Hava kirliliği araştırmalarında ağaç haritası analizi ile tematik anahtar kelimelerin yüzdesel dağılımı (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir)

3.8. Hava Kirliliği Araştırmalarında Tematik Konuların Görselleştirilmesi ve Sınıflandırılması

Hava kirliliği araştırmalarında, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisi ve bu yöntemlerle ilişkili araştırma temalarının belirlenmesi, alandaki mevcut eğilimlerin ve gelecekteki odak alanlarının anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, tematik haritalar, araştırma konularını görselleştirerek, ilişkili temalar arasındaki merkezilik ve etki düzeylerini değerlendirmek için etkili bir araçtır. Haritalardaki X eksen, bir temanın merkeziliğini (ilgi derecesi), Y eksen ise yoğunluk (gelişim derecesi) ile temanın literatürdeki gelişimini ölçmektedir (Yıldırım vd., 2022). Tematik haritalar, belirli bir konu veya temanın detaylarını ve dağılımını ortaya koyarak, araştırma alanındaki kritik noktaların anlaşılmasını sağlamaktadır.

Şekil 9, hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda tematik haritalar kullanılarak belirlenen araştırma odaklarını göstermektedir. Harita, literatürde öne çıkan temaları dört farklı çeyreğe ayırarak analiz etmiştir. Sağ üst çeyrekte yer alan "air pollution", "PM_{2.5}", "machine learning" ve "deep learning" gibi anahtar kelimeler, yüksek merkezilik ve yüksek yoğunluk düzeyine sahiptir. Bu durum, bu kavramların literatürdeki merkezi rolünü ve alandaki yönlendirici etkilerini vurgulamaktadır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin, hava kirliliği modelleme ve tahmin çalışmalarında giderek artan bir şekilde benimsendiğini doğrulamaktadır. Sağ alt çeyrekte "air quality prediction", "neural network", "big data" ve "learning" gibi anahtar kelimeler bulunmaktadır. Bu grup, yüksek merkezilik, düşük yoğunluk düzeyine sahip olup, literatürde temel yapıyı oluşturan ve birçok çalışma ile ilişkili olan kavramları temsil etmektedir. Ancak, yoğunluklarının daha düşük olması, bu konuların daha fazla derinleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Sol alt çeyrekte "land use regression" gibi konular yer alırken, bu temaların düşük merkezilik ve düşük yoğunluk düzeyine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, bu temaların literatürde sınırlı sayıda çalışıldığını ancak belirli niş alanlarda veya yeni gelişen çalışmalarda önemli olabileceğini göstermektedir. Bu tür konular, yenilikçi yaklaşımlar ile tekrar ele alındığında potansiyel kazanabilir. Son olarak, sol üst çeyrekte "long prediction" ve "short-term memory" gibi temalar yer almaktadır. Literatürde düşük merkezilik ve yüksek yoğunluk düzeyine sahip olan bu temaların daha az çalışıldığı, ancak bu alanların araştırma alanındaki önemini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu temalar, belirli uzmanlık alanlarına hitap etmekte ve daha dar bir çerçevede kullanıma sahiptir. Bundan başka, haritanın orta bölgelerinde yer alan "thermal comfort", "algorithms" ve "atmospheric pollution" gibi ara temalar, temel ve ileri araştırma konuları arasında bir köprü işlevi görebileceğini işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu tematik harita, hava kirliliği üzerine yapılan araştırmalarda mevcut eğilimlerin net bir haritasını sunarken, gelecekteki çalışmalara yön vermek için kapsamlı bir çerçeve sağlamaktadır. Motor temalar, mevcut bilgi birikimini derinleştirme ve uygulamalara yönlendirme açısından kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda, temel ve niş temaların daha ayrıntılı incelenmesi hem literatürdeki boşlukların doldurulması hem de yenilikçi çalışmaların teşvik edilmesi açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Araştırmacıların, düşük merkezilik düzeyine sahip alanlara odaklanarak yeni yaklaşımlar geliştirmesi, alandaki bilimsel ilerlemeyi destekleyecektir.



Şekil 9: Hava kirliliği araştırmalarında tematik konuların görselleştirilmesi (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sağ Üst Çeyrek: Araştırma alanında merkezi bir rol oynar ve genellikle bilimsel gelişmeleri yönlendiren temel konuları temsil eder. Sağ Alt Çeyrek: Araştırma alanının temel yapı taşlarını oluşturur ve diğer çalışmalar için bir başlangıç noktası niteliğindedir. Sol Alt Çeyrek: Yeni gelişmekte olan potansiyel alanlardır ya da literatürde önemini kaybetmiş konuları temsil eder. Sol Üst Çeyrek: Uzmanlaşmış konulara hitap eder. Belirli bir alanda derinlemesine çalışılmıştır, ancak genel araştırma alanı ile bağlantıları sınırlıdır)

4. Sonuç

Bu çalışma, hava kirliliği araştırmalarında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisi ve bu yöntemlerle ilişkili araştırma temalarının analizi açısından önemli bulgular sunmaktadır. Çalışmada özellikle 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarında giderek artan bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Masood ve Ahmad (2021) yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmininde geniş bir uygulama alanı bulunduğunu ve bu yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında bir paradigma değişimi yarattığını vurgulamışlardır. Özellikle, ANN'nin hem gaz hem de partikül kirlleticileri kabul edilebilir doğruluk seviyelerinde ve birkaç saatten birkaç güne kadar değişen zaman ölçeklerinde başarıyla tahmin ettiği belirlenmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yaklaşımların hava kirliliği tahminindeki etkinliğini ve bu yöntemlerin literatürdeki artan önemini güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Çalışma atıf yoğunluğu ve atıf sayıları bakımından değerlendirildiğinde, 2014–2024 dönemi, 2004–2013 dönemine kıyasla hem daha geniş bir dağılım hem de daha yüksek değerler sergilemiştir. Bu durum, bu dönemde yapılan çalışmaların daha fazla dikkat çektiğini ve bilimsel alandaki etkilerinin arttığını ortaya koymaktadır. 2004–2024 yılları arasındaki iki dönemin karşılaştırmalı analizi, ilgili alanda önemli bir artış yaşandığını belirginleştirmiştir. 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğunun sabit ve sınırlı bir düzeyde kalmasına karşın, 2014–2024 döneminde atıf yoğunluğu ve toplam atıf sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle, 2014 sonrası yayımlanan çalışmaların literatürde daha yüksek bir bilimsel etki yarattığı tespit edilmiştir. Bu durum, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin bu dönemde daha yaygın bir şekilde benimsenmesiyle ilişkilendirilmiştir.

Yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki negatif korelasyon bulunmaktadır. Bu da yayın yaşı arttıkça atıf yoğunluğunun belirgin şekilde azaldığını ifade eder. Özellikle, 0–5 yaş aralığındaki yeni yayınların yüksek atıf yoğunluğuna sahip olması, bu alandaki teknolojik yeniliklerin ve disiplinler arası yaklaşımların bilimsel topluluk tarafından hızla kabul gördüğünü göstermektedir. 2014–2024 dönemindeki atıf yoğunluğu analizinde gözlemlenen aykırı değerler, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanıldığı çalışmaların diğerlerinden çok daha yüksek bilimsel etki yarattığını ortaya koymaktadır. Çalışmalar, hava kirliliği araştırmalarında literatüre önemli katkılar sunarak temel yapı taşları haline gelmiştir.

Bibliyometrik analiz sonuçlarında, genellikle araştırmacı ağlarının oluşturulması, ülke ve kurum bazlı iş birliği haritaları, yazar ve kurumların üretkenlik analizleri, atıf ağlarının detaylı yapısal analizi ve belirli alt alanlarda derinlemesine tematik incelemeler gibi çıktılar yer alır. Ancak bu çalışmada, bu tür analizlere odaklanılmamış, bunun yerine özellikle yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı araştırmalardaki atıf eğilimleri, WOS kategorilerine göre makale dağılımı, en çok atıf alan makaleler ve dergiler, literatürde öne çıkan anahtar kelimeler, tematik konular ve zaman içindeki eğilimleri gibi alanlar üzerinde durulmuştur. Ayrıca, ağaç haritası analiziyle tematik odakların incelenmesi, tematik konuların görselleştirilmesi ve sınıflandırılması gibi görselleştirme teknikleri kullanılarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca yenilikçi yaklaşımlar olmadığını, aynı zamanda hava kirliliği araştırmalarında derin etkiler yaratarak literatürde önemli bir dönüşüm sağladığı vurgulanmaktadır.

Akademik yayın eğilimleri incelendiğinde, 2004–2024 yılları arasında belirgin bir artış kaydedilmiştir. Özellikle, 2017–2020 dönemi bu alandaki çalışmaların en yoğun şekilde gerçekleştirildiği ve makale sayısının zirveye ulaştığı bir dönemdir. Villacura vd. (2024), hava kirliliği çalışmalarında yayımlanan makalelerin 1980'lerden 2010'lara kadar 28 kat büyüdüğünü belirtmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerle yapılan araştırmalarda dikkat çekici bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarına entegrasyonu ve çevresel sorunların küresel düzeyde daha fazla önem kazanmasının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda makale sayısında küçük bir düşüş gözlemlense de, bu alana olan ilgi ve çalışmalar belirli bir seviyede devam etmektedir. Genel olarak bu eğilim, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında inovatif çözümler sunduğunu ve disiplinler arası yaklaşımların bu alandaki önemini artırdığını göstermektedir.

WOS kategorilerine göre yapılan analizler, bu çalışmaların büyük ölçüde çevre bilimleri (%60), mühendislik (%17 çevre, %16 elektrik-elektronik), meteoroloji ve atmosfer bilimleri (%16) gibi disiplinlere dayandığını işaret etmektedir. Ayrıca, yapay zekâ (%12) ve bilgi sistemleri (%8) kategorilerinin, hava kirliliği tahmini ve modellemesi için giderek daha fazla benimsendiği gözlemlenmiştir. Özellikle, en yüksek atıf alan yayınlar incelendiğinde "deep learning" ve "machine learning" yöntemleriyle yapılan çalışmaların PM_{2.5} ve diğer hava kirliliği unsurlarına yönelik tahminlerde öne çıktığı görülmektedir. Li vd. (2023) çalışmalarında PM_{2.5}'in en çok ilgi çeken kirlenici olduğunu ve 2017 yılından itibaren ML yöntemleriyle yapılan uygulamalarda belirgin bir artış yaşandığını belirtmişlerdir.

Araştırma bulgularına göre, literatürde öne çıkan temalar ve anahtar kelimeler değerlendirildiğinde, "deep learning" ve "machine learning" gibi teknolojilerin, hava kirliliği tahmini ve modellemesinde etkili bir şekilde kullanıldığı tespit edilmiştir. ML yöntemi hava kirliliği araştırmalarında uygulanması, olgunlaşma aşamasına ulaşarak özellikle kirlenitçilerin kimyasal özelliklerinin analizi, kısa vadeli kirlilik tahminleri, kirlenitçi tespit süreçlerinin iyileştirilmesi ve emisyon azaltımına yönelik tasarım optimizasyonu gibi alanlarda önemli bir odak noktası haline gelmiştir (Li vd., 2023). Masood ve Ahmad (2021), DL yöntemlerinin hava kirliliği tahmininde daha doğru uzun vadeli ve ani yoğun kirlilik tahminler sağladığını ve bu yöntemlerin önemli avantajlar sunduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, gelecekte bu tekniklerin doğrusal olmayan karmaşık tahmin problemlerine geniş bir yelpazede uygulanabileceği, optimizasyon algoritmalarındaki ilerlemeler ve model tasarımındaki iyileştirmelerle performanslarının daha da artırılabilirliği belirtilmiştir. "PM_{2.5}" ve "particulate matter" gibi anahtar kavramların sıkça çalışıldığı ve bu kavramların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin araştırmalara yön verdiği görülmüştür. Kelime bulutunda öne çıkan bir diğer anahtar kavram ise "China" olmuştur. Li vd. (2023) çalışmalarında da belirtildiği üzere, hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan araştırma grupları ağırlıklı olarak Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yer almakta olup, bu iki ülke tüm yayınların %50'sinden fazlasını üretmiştir. Bu bulgu, mevcut çalışmanın sonuçlarını destekler niteliktedir.

Tematik harita analizinden elde edilen bulgular, hava kirliliği ile ilgili çalışmaların yapay zekâ tabanlı yöntemlerle önemli ölçüde ilerlediğini ve bu yöntemlerin hava kalitesi modelleme ve tahmin süreçlerinde giderek daha yaygın hale geldiğini göstermektedir. Özellikle "air pollution", "PM_{2.5}", "machine learning" ve "deep learning" gibi motor temalar, literatürde merkezi bir role sahip olup, gelecekteki çalışmaların temel yönlendiricisi konumundadır. Bununla birlikte, "air quality prediction", "neural network" ve "big data" gibi temel temaların yoğunluk açısından daha fazla derinleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu konular, literatürde geniş bir uygulama alanı sunmakta ve araştırmacılara önemli bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Düşük merkezilik ve düşük yoğunluk ile karakterize edilen "land use regression" gibi temaların, literatürde sınırlı bir yer bulmasına rağmen niş alanlar ve yenilikçi yaklaşımlarla değerlendirildiğinde büyük bir potansiyel taşıdığı görülmektedir. Bu bağlamda, tematik harita, hava kirliliği araştırmalarında mevcut eğilimleri ve boşlukları ortaya koyarak, gelecekteki çalışmalar için hem derinleşme hem de yenilikçi yaklaşımlar geliştirme açısından kritik bir yol haritası sunmaktadır.

Hava kirliliği, çevresel ve halk sağlığı açısından küresel bir sorun olmaya devam ederken, bu alanda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin sağladığı yenilikçi çözümler giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler, hava kirliliği araştırmaları için gerekli bir araç haline gelmiş, etkili uygulamaları geniş çapta ilgi çekmiş ve aynı zamanda literatürdeki evrimi şekillendiren bir paradigma değişimi yarattığını göstermiştir.

Literatür analizi, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca zaman serisi tahmini ve kirlenitçi konsantrasyonları modellemesi gibi mevcut uygulamalarda değil, aynı zamanda gelecekteki disiplinler arası çalışmalarda da büyük bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Masood ve Ahmad (2021), yapay zekâ tabanlı yöntemlerin gelecekte hava kirliliği tahmin sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, Mehmood vd. (2022), optimizasyon algoritmalarındaki ilerlemeler ve model tasarımındaki gelişmelerin, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin performansını daha hassas hale getireceğini vurgulamışlardır. Gelişen

modelleme yaklaşımlarının, hava kalitesinin daha doğru tahmin edilmesine olanak sağlayarak karar vericilerin ve politika yapıcıların daha etkili çevresel önlemler almasına katkı sunacağı öngörülmektedir. Ayrıca, farklı hava koşulları (açık hava, yağmur, kar) ve ışık koşulları (gün ışığı, alacakaranlık, karanlık) altında başarılı sonuçlar verebilen hava kalitesi görüntü tanıma sistemlerinin geliştirilmesi, halkın hava kirliliği ile ilgili zamanında önlem almasına yardımcı olacak önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, Guo vd. (2022), hava kirletici konsantrasyonlarının tahmininde yapay zekâ tabanlı yaklaşımların giderek daha fazla benimsenmekte olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle, çevre bilimi yöntemleriyle yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonu, düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin kullanımı, iç mekân hava kalitesi izleme sistemleri ve termal konfor analizleri, günümüzde bu alandaki en önemli araştırma odakları arasında yer almaktadır. Bu bulgular, hava kirliliği tahmininde veri odaklı modellerin etkisini artırırken, disiplinler arası iş birliklerinin ve yenilikçi teknolojilerin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki etkisini değerlendirerek, literatürde sunulan bulguları destekler nitelikte bir çerçeve sunmaktadır. Yapay zekâ tekniklerinin hava kirliliği tahmininde giderek daha yaygın bir şekilde benimsendiği görülmektedir. Çalışma, bu tekniklerin hava kalitesi yönetiminde daha bilinçli kararlar alınmasına katkı sağladığını ve çevresel sürdürülebilirlik çabalarına önemli bir destek sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, hava kirliliği tahmin modellerinin geliştirilmesi, ilgili paydaşlara daha etkin ve uygulanabilir çözümler sunarak, çevresel planlamada veri odaklı stratejilerin benimsenmesini teşvik etmektedir. Bu bağlamda, çalışma hem bilimsel topluluk hem de politika yapıcılar için referans niteliği taşımakta ve hava kirliliği tahminine yönelik yapay zekâ tabanlı yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

Teşekkür

Verilerin analiz edilmesi ve anlamlı sonuçların elde edilmesinde güçlü istatistiksel ve grafiksel yetenekleriyle katkı sağlayan Bibliometrix R paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içerisindeki bibliShiny yazılımı geliştiricilerine, ayrıca araştırmanın temelini oluşturan kapsamlı bibliyometrik verileri sağlayan Clarivate Analytics Web of Science, WOS veritabanına teşekkür edilmektedir.

Kaynaklar

- Ansari, A., & Quaff, A. R. (2024). Bibliometric analysis of Indian research trends in air quality forecasting research using machine learning from 2007–2023 using Scopus database. *Environmental Research and Technology*, 7(3), 356–377. <https://doi.org/10.35208/ert.1434390>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Awasthi, A., Pattnayak, K. C., Tiwari, P. R., Panda, S. K., Gautam, S., Choudhury, T., & Sar, A. (2024). Air quality monitoring (AQM) and prediction. In A. Awasthi, K. C. Pattnayak, G. Dhiman, & P. R. Tiwari (Eds.), *Artificial intelligence for air quality monitoring and prediction* (Vol. 1, pp. 1–23). CRC Press.
- Birkle, C., Pendlebury, D., Schnell, J., & Adams, J. (2020). Web of science as a data source for research on scientific and scholarly activity. *Quantitative Science Studies*, 1, Article 3550, 1–14. https://doi.org/10.1162/qss_a_00018
- Chen, G., Li, S., Knibbs, L. D., Hamm, N. A. S., Cao, W., Li, T., Guo, J., Ren, H., Abramson, M. J., & Guo, Y. (2018). A machine learning method to estimate PM_{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information. *Science of the Total Environment*, 636, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.251>
- Chen, J., Chen, Q., Hu, L., Yang, T., Yi, C., & Zhou, Y. (2024). Unveiling trends and hotspots in air pollution control: a bibliometric analysis. *Atmosphere*, 15, Article 630. <https://doi.org/10.3390/atmos15060630>
- da Silva Filho, A. M., da Silva, I. J., Queila, K., Brito, D., Sobrinho, T. G., & Chaves, L. H. G. (2020). Air pollution: bibliometric analysis and space-temporal distribution of specialized scientific production. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(10), 331–341. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.710.38>
- Di, Q., Amini, H., Shi, L., Kloog, I., Silvern, R., Kelly, J., Sabath, M. B., Choirat, C., Koutrakis, P., Lyapustin, A., Wang, Y., Mickley, L. J., & Schwartz, J. (2019). An ensemble-based model of PM_{2.5} concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution. *Environment International*, 130, Article 104909. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104909>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- European Union. (2021). *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:en:PDF>
- Fan, H., Zhao, C., & Yang, Y. (2020). A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. *Atmospheric Environment*, 220, Article 117066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
- Feng, T., Sun, Y., Shi, Y., Ma, J., Feng, C., & Chen, Z. (2024). Air pollution control policies and impacts: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, Article 114071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114071>
- Guo, Q., Ren, M., Wu, S., Sun, Y., Wang, J., Wang, Q., Ma, Y., Song, X., & Chen, Y. (2022). Applications of artificial intelligence in the field of air pollution: a bibliometric analysis. *Frontiers in Public Health*, 10, Article 933665. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.933665>

- Hamer, P. D., Walker, S-E., Sausa Santos, G., Vogt, M., Vo Thanh, D., Lopez Aparicio, S., Schneider, P., Ramacher, M. O. P., & Karl, M. (2020). The urban dispersion model EPISODE v10.0– Part 1: an eulerian and sub-grid-scale air quality model and its application in Nordic winter conditions. *Geoscientific Model Development*, 13, 4323–4353. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4323-2020>
- Hau, Y. S. (2024). Artificial intelligence and air pollution: a bibliometric analysis from 2012 to 2022. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, 13(1), 48–56. <https://dx.doi.org/10.7236/IJASC.2024.13.1.48>
- Houdou, A., Badisy, I. E., Khomsi, K., Abdala, S. A., Abdulla, F., Najmi, H., Obtel, M., Belyamani, L., Ibrahimi, A., & Khalis, M. (2024). Interpretable machine learning approaches for forecasting and predicting air pollution: a systematic review. *Aerosol and Air Quality Research*, 24(1), Article 230151. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230151>
- Huang, C., & Kuo, P. (2018). A deep CNN-LSTM model for particulate matter (PM_{2.5}) forecasting in smart cities. *Sensors*, 18, Article 2220. <https://doi.org/10.3390/s18072220>
- Joharestani, M. Z., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., & Talebiesfandarani, S. (2019). PM_{2.5} prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere*, 10, Article 373. <http://doi.org/10.3390/atmos10070373>
- Koseoglu, M. A., Rahimi, R., Okumus, F., & Liu, J. (2016). Bibliometric studies in tourism. *Annals of Tourism Research*, 61, 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2016.10.006>
- Li, Y., Wang, Y., Rui, X., Li, Y., Li, Y., Wang, H., Zuo, J., & Tong, Y. (2017a). Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, 112, 1015–1045. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2421-z>
- Li, X., Peng, L., Yao, X., Cui, S., Hu, Y., You, C., & Chi, T. (2017b). Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: method development and evaluation. *Environmental Pollution*, 231, 997–1004. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.114>
- Li, T., Shen, H., Yuan, Q., Zhang, X. X., & Zhang, L. (2017c). Estimating ground-level PM_{2.5} by fusing satellite and station observations: a geo-intelligent deep learning approach. *Geophysical Research Letters*, 44(23), 985–993. <https://doi.org/10.1002/2017GL075710>
- Li, K., Rollins, J., & Yan, E. (2018). Web of science use in published research and review papers 1997–2017: a selective, dynamic, cross-domain, content-based analysis. *Scientometrics*, 115, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2622-5>
- Li, Y., & Sun, Y. (2021). Modeling and predicting city-level CO₂ emissions using open access data and machine learning. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 19260–19271. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12294-7>
- Li, Y., Sha, Z., Tang, A., Goulding, K., & Liu, X. (2023). The application of machine learning to air pollution research: a bibliometric analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 257, Article 114911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114911>
- Lin, H. (2024). Bibliometric analysis of traffic-related air pollution: using citeSpace to explore the knowledge structure and trends. *Environmental Research Communications*, 6, Article 022002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad2a92>
- Luo, X., Yang, Q., Zheng, D., Tian, H., Chen, L., Wu, J., Ji, Z., Chen, Y., & Li, Z. (2022). A bibliometric and visualization analysis on the association between chronic exposure to fine particulate matter and cancer risk. *Frontiers in Public Health*, 10, Article 1039078. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1039078>
- Mandal, S., Boppani, S., Dasari, V., & Thakur, M. (2024). A bivariate simultaneous pollutant forecasting approach by unified spectro-spatial graph neural network (USSGNN) and its application in prediction of O₃ and NO₂ for New Delhi, India. *Sustainable Cities and Society*, 114, Article 105741. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105741>
- Marrakchi, N., Bergam, A., Fakhouri, H., & Khomsi, K. (2024). Air quality predicting using lstm recurrent neural network in Tangier: a comparative analysis detecting ozone concentration peaks. *Palestine Journal of Mathematics*, 13(1), 209–221.
- Marvi, R., & Foroudi, M. M. (2023). Bibliometric analysis. In P. Foroudi & C. Dennis (Eds.), *Researching and analysing business: research methods in practice* (Vol. 3, pp. 43–54), Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003107774-4>
- Masood, A., & Ahmad, K. (2021). A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*, 322, Article 129072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>
- Mehmood, K., Bao, Y., Saifullah, C. W., Khan, M. A., Siddique, N., Abrar, M. M., Soban, A., Fahad, S., & Naidu, R. (2022). Predicting the quality of air with machine learning approaches: current research priorities and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 379, Article 134656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134656>
- Menares, C., Perez, P., Parraguez, S., & Fleming, Z. L. (2021). Forecasting PM_{2.5} levels in Santiago de Chile using deep learning neural networks. *Urban Climate*, 38, Article 100906. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100906>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyl, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, Md M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone?. *Environment International*, 116, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Nazli, S. N., Vilcins, D., Sly, P. D., Razak, A. A., Sabri, N., & Ibrahim, T. N. B. T. (2024). Indoor air quality: bibliometric analysis of the published literature between 2018 and 2023. *Environmental Quality Management*, 34, Article e22297. <https://doi.org/10.1002/tqem.22297>
- Polezer, G., Tadano, Y. S., Siqueira, H. V., Godoi, A. F. L., Yamamoto, C. I., de André, P. A., Pauliquevis, T., Andrade, M. F., Oliveira, A., Saldiva, P. H. N., Taylor, P. E., & Godoi, R. H. M. (2018). Assessing the impact of PM_{2.5} on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution*, 235, 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.111>
- Qi, Y., Li, Q., Karimian, H., & Liu, D. (2019). A hybrid model for spatiotemporal forecasting of PM_{2.5} based on graph convolutional neural network and long short-term memory. *Science of the Total Environment*, 664, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.333>
- Rakholia, R., Le, Q., Vu, K., Ho, B. Q., & Carbajo, R. S. (2022). AI-based air quality PM_{2.5} forecasting models for developing countries: a case study of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Urban Climate*, 46, Article 101315. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101315>
- Ramadan, M. N. A., Ali, M. A. H., Khoo, S. Y., Alkhedher, M., & Alherbawi, M. (2024). Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, Article 116856. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116856>

- Rautela, K. S., & Goyal, M. K. (2024). Transforming air pollution management in India with AI and machine learning technologies. *Scientific Report*, 14, Article 20412. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71269-7>
- Schneider, A., Friedl, M. A., & Potere, D. (2010). Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on 'urban ecoregions'. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1733–1746. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.003>
- Song, X. H., & Hopke, P. K. (1996). Solving the chemical mass balance problem using an artificial neural network. *Environmental Science & Technology*, 30, 531–535. <https://doi.org/10.1021/es950281o>
- Türk, B. (2022). Important factors affecting the quality of indoor air and a bibliometric analysis. *Sakarya University Journal of Science*, 26(3), 608–619. <https://doi.org/10.16984/sofenbilder.996443>
- Uluocak, I., Pinar, E., & Bilgili, M. (2024). Atmospheric NO₂ concentration prediction with statistical and hybrid deep learning methods. *Environmental and Ecological Statistics*, 32(1), 89–118. <https://doi.org/10.1007/s10651-024-00637-3>
- Vidal, M. S., Menon, R., Yu, G. F. B., & Amosco, M. D. (2022). Environmental toxicants and preterm birth: a bibliometric analysis of research trends and output. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), Article 2493. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052493>
- Villacura, L., Sánchez, L. F., Catalán, F., Toro A, R., & Leiva, G. M. A. (2024). An overview of air pollution research in Chile: bibliometric analysis and scoping review, challenger and future directions. *Heliyon*, 10(3), Article e25431. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25431>
- World Health Organization. (2021a). *Air pollution causes 13 deaths per minute worldwide*. <https://www.who.int/multi-media/details/air-pollution-climate-change>
- World Health Organization. (2021b). *COP26 special report on climate change and health*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036727>
- Yildirim, G., Rahman, A., & Singh, V. P. (2022). A bibliometric analysis of drought indices, risk, and forecast as components of drought early warning systems. *Water*, 14(2), Article 253. <https://doi.org/10.3390/w14020253>
- Zhang, J., Yu, Q., Zheng, F., Long, C., Lu, Z., & Duan, Z. (2015). Comparing keywords plus of WOS and author keywords: a case study of patient adherence research. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 67(4), 967–972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/asi.23437>
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Haurlyluk, A., Robinson, E. S., Robinson, A. L., & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>

Avrupa Birliği'nin Eko-Kent Yaklaşımı ve Türkiye Kentlerine Uygulanabilirliği Üzerine Bir Değerlendirme

Çiğdem Tuğaç^{1,*}

¹Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, 06500, Ankara.

Özet

Kentler günümüzde yaşanan çevresel, ekonomik ve toplumsal sorunlara kaynaklık etmenin yanı sıra, bu sorunlara yönelik çözümler üretilmesinde de aktif rol üstlenmektedir. Dünya'da kentleşme hızının en yüksek olduğu bölgelerden biri olan Avrupa Birliği'ndeki kentlerde söz konusu sorunların etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Birlik tarafından belirlenen politikalar sonucunda iddialı dönüşüm süreçleri öncelikle Avrupa'daki kentlerde yaşanmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunması konuları, her ne kadar 1992 tarihli Maastricht Anlaşması'ndan itibaren kentleşme politikalarının odağında yer alsada da 2019 yılında açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı, bu politikalar açısından köklü bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Avrupa Birliği, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, kentleşme politikalarını dönüştürerek, ilk iklim-nötr kata olma hedefi doğrultusunda Eko-kent yaklaşımını öne çıkarmıştır. Bu çalışmada, AB'nin kentleşme politikaları, Eko-kent uygulamaları ve bu uygulamaların Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesindeki rolü incelenmekte ve Eko-kent modelinin Türkiye bağlamında uygulanabilirliği değerlendirilerek, geleceğe yönelik öneriler sunulmaktadır. Çalışma, Eko-kent yaklaşımının sürdürülebilir kalkınmaya ve iklim dirençli kentleşmeye önemli katkılar sunduğunu ortaya koymaktadır. AB ile ticari ilişkileri, Yeşil Mutabakat'a uyum ve AB'ye adaylık süreci değerlendirildiğinde, Türkiye'nin kentleşme politikalarını Eko-kent yaklaşımı doğrultusunda şekillendirmesi, hem Yeşil Mutabakat'a uyum sürecini hem de net-sıfır emisyon ve yeşil kalkınma hedeflerine ulaşmayı destekleyecektir.

Anahtar Sözcükler

Avrupa Birliği, Kentleşme Politikaları, Eko-kent, Sürdürülebilirlik, Avrupa Yeşil Mutabakatı

An Assessment of the European Union's Eco-City Approach and Its Applicability to Turkish Cities

Abstract

Cities not only contribute to contemporary environmental, economic, and social challenges but also play an active role in developing solutions to these issues. In the European Union, one of the regions with the highest urbanization rates in the world, the effects of these challenges have become more pronounced. As a result of the policies set by the Union, ambitious transformation processes are primarily taking place in European cities. Although sustainable development and environmental protection have been at the core of urbanization policies since the Maastricht Treaty of 1992, the European Green Deal, announced in 2019, has brought about a fundamental transformation in these policies. In line with its objectives of combating climate change and achieving sustainable development, the European Union has restructured its urbanization policies and prioritized the Eco-city approach as part of its ambition to become the first climate-neutral continent. This study examines the European Union's urbanization policies, Eco-city practices, and their role within the European Green Deal while also assessing the applicability of the Eco-city model in the Turkish context and presenting future-oriented recommendations. The study demonstrates that the Eco-city approach makes significant contributions to sustainable development and climate-resilient urbanization. Considering Turkey's trade relations with the European Union, its Green Deal harmonization process, and its European Union candidacy, shaping urbanization policies in line with the Eco-city approach will support both Turkey's adaptation to the Green Deal and its achievement of net-zero emissions and green development targets.

Keywords

European Union, Urbanization Policies, Eco-city, Sustainability, The European Green Deal

1. Giriş

Dünyada kentleşme süreçleri oldukça hızlı bir biçimde ilerlemekte, kentler nüfus ve alan bakımından giderek büyümektedir. Kentlerin hem nüfuslarıyla hem de bünyelerindeki ekonomik faaliyetlerle büyük oranda kaynaklık ettikleri üretim ve tüketim süreçlerinin neden olduğu çevresel sorunlar, iklim değişikliği ve doğal kaynak tüketimi tarihin hiçbir döneminde görülmemiş bir düzeye gelmiş durumdadır (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Küresel çapta, kentleşme hızı ve kentsel nüfus oranları bakımından bir değerlendirme yapıldığında, Avrupa'nın öne çıkan

bölgelerden biri olduğu görülmektedir. Covid-19 pandemisinin etkisiyle 2020 ve 2021 yıllarında yaşanan düşüşün ardından, Avrupa Birliği'nin (AB) nüfusu artışa geçmiş ve 1 Ocak 2023'te 447,6 milyon kişi olan nüfus, 1 Ocak 2024'te 449,2 milyon kişiye yükselmiştir (Eurostat, 2024). Dünya Bankası verilerine göre, 2023 yılı itibarıyla söz konusu nüfusun %75,7'si kentsel alanlarda yaşamaktadır (Trading Economics, 2025). Eurostat (2021) tarafından yapılan projeksiyonlar, 2050 yılına kadar AB'de kentsel büyüme ve nüfus artışının devam edeceğini ve kırsal bölgelerin nüfusunda azalma olacağını göstermektedir. Söz konusu kentleşme oranları Birlik ülkeleri arasında değişkenlik göstermekle birlikte, 2050 yılında Birlik düzeyinde kentleşme oranının %83,7'ye çıkması öngörülmektedir (European Commission, 2020; Trading Economics, 2025).

AB'nin tarihsel gelişim sürecinde Birliğe farklı tarihlerde üye olan devletlerin kentlerinin, AB politikalarına ve uygulamalarına farklı şekillerde uyum sağladıkları ve elde ettikleri yeni bağlantılar ve fırsatlarla, sadece kendi ülkelerinde değil, Birlik içindeki politika geliştirme süreçlerinde de giderek daha fazla aktif rol üstlendikleri görülmektedir. Bu kapsamda Birlik üyesi ülkelerin başkentlerinin yanı sıra; sanayi, finans, turizm, sağlık, kültür gibi farklılaşan pek çok alanda uzmanlıklara sahip kentlerinin hizmetler, yenilikler, insan, sermaye ve fikir akışlarıyla birbirleriyle bağlantılı hale geldikleri ve kent kümeleri oluşturdıkları görülmektedir (Clark vd., 2018). Birliğin genişlemesiyle kentlerde yaşanan/yaşanabilecek çevresel, sosyal ve ekonomik sorunların çözülmesine yönelik yayımlanan farklı üst politika belgelerinde ortaklaşan husus; çevresel sürdürülebilirliği, sosyal eşitliği ve ekonomik kalkınmayı birleştiren bütünsel bir yaklaşımın geliştirilmesi olmuştur. Özellikle 21. yüzyılda kentleşmenin ortaya çıkardığı sorunların, AB'yi daha sürdürülebilir, dirençli ve iklim duyarlı kentleşme modellerine yönelttiği görülmektedir. Bu bağlamda, Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM-The European Green Deal) ve Akıllı Kent Girişimi (Smart Cities Initiative) gibi politika çerçeveleri, AB'nin kentsel vizyonunu somutlaştırmaktadır (European Commission, 2025a; 2025b).

Akıllı Kent Girişimi kapsamında gerçekleştirilen projelerden biri olan Eko-kent (Eco-city) yaklaşımı, sadece AB kentlerinde değil, bunun yanı sıra, AB'nin farklı ülkelerle kurduğu temiz enerji ve enerji verimliliği iş birlikleri kapsamında dünyanın çeşitli kentlerinde de uygulanmış bir kentleşme modeli olarak öne çıkmaktadır. Eko-kent yaklaşımı; kentsel sürdürülebilirlik ve dirençliliğin sağlanmasını, kentsel biyoçeşitliliğin korunmasını ve geliştirilmesini, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlanmasını içeren unsurlarıyla iklim değişikliğiyle mücadeleyi destekleyen bir kentleşme modelidir (European Union, 2013; 2024).

AB tarafından AYM kapsamında belirlenen; Avrupa'nın 2050 yılında ilk iklim-nötr ve toplum-dirençli kıta olması hedefinin gerçekleştirilmesi başta olmak üzere, günümüzde diğer ülkelerin de uluslararası alanda açıklamış oldukları çevresel sorunlarla ve iklim değişikliği kriziyle mücadeleye dönük taahhütlerini yerine getirebilmeleri açısından önemli fırsatlar sunan AB Eko-kent yaklaşımının temel kriterlerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi, Türkiye'de kentsel politika geliştirme süreçlerinde de bu yaklaşımdan yararlanılması açısından oldukça önemlidir.

Zira Türkiye, AB'ye üyelik hedefi olan bir ülke olmasının yanı sıra, 2023 yılı rakamlarına göre yaklaşık 206 milyar Avro'luk ticaret hacmiyle AB'nin beşinci büyük ticaret ortağıdır ve uluslararası ticaretinin %42'sini AB ile yapmaktadır. Türkiye, 2021 yılında Paris İklim Anlaşması'na taraf olmuş ve bu doğrultuda 2053 yılında net-sıfır emisyon ve yeşil kalkınma hedefini açıklamıştır (T.C. Resmî Gazete, 2021; Ticaret Bakanlığı, 2021; Avrupa Komisyonu, 2024). Türkiye'nin, AYM'ye uyumunun yanı sıra, 2053 yılı hedeflerine ulaşmasında kentleşme politikalarının ulusal hedefleri desteklemesi elzemdir. Eko-kent kriterlerinin değerlendirilmesi ve Türkiye'de uygulanma koşullarının ortaya konulması aynı zamanda rekor bir düzeye gelmiş olan iklim değişikliğiyle ilişkili aşırı hava olayları ve afetlerde önemli can ve mal kayıpları yaşayan Türkiye'deki yerleşimlerin (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024) çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik ve dirençliliklerinin sağlanması bağlamında da önemli bir gerekliliktir.

Bu doğrultuda bu çalışmanın amacı; AB'nin kentleşme politikalarını, Eko-kent uygulamalarını ve bu uygulamaların AYM çerçevesindeki rolünü incelemek ve Eko-kent modelinin Türkiye'ye uygulanabilirliğini değerlendirerek, geleceğe yönelik öneriler sunmaktır. Çalışmada aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

- AB'nin kentleşme politikalarının gelişimi ve bu politikaların AYM sonrasındaki güncel durumu nasıldır?
- AB Eko-kent yaklaşımı, iklim değişikliğine dirençli ve sürdürülebilir kentleşme amacıyla Türkiye'de uygulanabilir mi?

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada, özellikle AYM sonrasındaki süreçte AB'nin kentleşme politikaları ile AB'nin Eko-kent modeli arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilişkisel araştırma yöntemi ve literatür analizi yöntemi birlikte kullanılmıştır.

İlişkisel araştırma yöntemi, değişkenler arasındaki mevcut ilişkileri belirlemeye yönelik bir yöntemdir (Creswell, 2014; Yalçın, 2019). Bu çalışmada, AB'nin kentleşme politikaları ile Eko-kent modeli arasındaki ilişki, AYM'nin bu ilişki üzerindeki etkisi ve Eko-kent modelinin Türkiye'ye uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, AYM'nin AB kentleşme politikalarını nasıl şekillendirdiği, Eko-kent modelinin AYM hedefleriyle ne kadar uyumlu olduğu ve Türkiye'nin bu modelden nasıl yararlanabileceği sorularına yanıt aranmıştır.

Literatür analizi, konuyla ilgili mevcut bilgi birikimini sistematik bir şekilde inceleyerek, araştırma sorularına yanıt aramayı ve yeni bir bakış açısı geliştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir (Yavuz, 2022; NYU Abu Dhabi Library, 2025). Bu çalışmada, AB'nin kentleşme politikalarının tarihsel gelişimi, Eko-kent modelinin temel kriterleri, AYM'nin kentleşme

politikalarına etkisi ve Türkiye'deki güncel kentleşme politikaları üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu süreçte AB Eko-kent kriterleri ve AYM politikaları ile ilgili kaynaklar, Avrupa Komisyonu (EC) ve AB resmi yayınlarının yanı sıra, Scopus, Web of Science ve Google Scholar gibi akademik veri tabanlarından elde edilen makalelerden ve kitaplardan veri ve kaynak materyali olarak yararlanılmıştır. Literatür taramasında "ECO-City", "Avrupa Yeşil Mutabakatı", "AB Kentleşme Politikaları" ve "Eko-kent" anahtar kelimeleri kullanılmıştır. Bu anahtar kelimeler ışığında elde edilen literatür, masa başı çalışması ile incelenmiş ve kavramlar arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Elde edilen literatür, tematik bir yaklaşımla sınıflandırılmıştır. AB'nin kentleşme politikalarının gelişimi, Eko-kent modelinin kriterleri ve Türkiye'ye uygulanabilirlik potansiyeli olmak üzere üç ana tema belirlenmiştir. Her bir tema için ilgili literatür detaylı bir şekilde incelenmiş, temel kavramlar, yaklaşımlar ve bulgular özetlenmiştir. Elde edilen bilgiler, ilişkisel araştırma yöntemi çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve çalışmanın araştırma sorularına yanıtlar aranmıştır.

Çalışmanın Bulgular ve Tartışma bölümünde yukarıda açıklanan metodoloji çerçevesinde değerlendirmeler üç ana başlık altında yapılmıştır. İlk olarak, AB'nin kentleşme politikalarının gelişimi; Maastricht Sözleşmesi'nden AYM'ye kadarki süreç ve AYM sonrasındaki süreç olmak üzere iki dönem halinde ele alınmıştır. Ardından, AB'nin kentleşme politikaları kapsamında önemli bir yere sahip olan Eko-kent yaklaşımının temel kriterleri incelenmiş ve AYM hedefleri bağlamındaki katkısı irdelenmiştir. Son olarak, Türkiye'de AB Eko-kent modelinin uygulanma potansiyeli, mevcut politikalar ışığında ele alınmış ve Eko-kent yaklaşımına ilişkin proje örnekleri değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, Türkiye'nin kentleşme politikalarının AB ile uyumlu hale getirilmesi için önemli bir çerçeve sunmaktadır. Sonuç ve Değerlendirme bölümünde, çalışma bütüncül bir perspektifle ele alınmış, gelecekte yapılacak daha kapsamlı araştırmalara ışık tutacak çıkarımlar ve Türkiye'de eko-kentleşmeye yönelik politika önerileri sunulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1: AB Eko-kent modelinin Türkiye'ye uygulanabilirliği: metodolojik çerçeve

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. AB'de Kentleşme Politikalarının Gelişimi

AB'nin kentleşme politikaları, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda zamanla dönüşerek şekillenmiştir. Bu politikalar, Maastricht Anlaşması ile resmî bir çerçeve kazanmış ve AYM ile kapsamlı bir değişim sürecine girmiştir. Aşağıdaki başlıklarda öncelikle Maastricht Anlaşması'ndan AYM'ye kadar olan süreçte AB'nin kentleşme politikalarının nasıl geliştiği ele alınmış, ardından AYM sonrasında kentleşme politikalarının hangi yönde evrildiği ve sürdürülebilir kentleşme yaklaşımlarına nasıl yön verdiği incelenmiştir.

3.1.1. Maastricht Anlaşması'ndan AYM'ye Dek Kentleşme Politikaları

AB'nin kentleşme politikalarının merkezinde yer alan sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunması, 1992 tarihli Maastricht Anlaşması ile Birliğin resmi hedefleri arasına alınmıştır (Butt vd., 2014). Avrupa'nın bütünleşme sürecinde hızlandırıcı bir etken olarak görülen kentsel politikalar açısından, 1992 yılında Avrupa Konseyi tarafından kabul edilen Avrupa Kentsel Şartı (*European Urban Charter*) önemli bir gelişme olmuştur. Bu belgede kentli hakları tanımlanarak, kentlerde sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları vurgulanmıştır (Fedeli, 2015; Erbay vd., 2023).

2000'li yıllara gelindiğinde AB'nin Altıncı Çevre Eylem Programı kapsamında AB Kentsel Çevre Stratejisi yayımlanmış ve kentsel sürdürülebilirlik için bütüncül bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu Strateji ile, kentlerin çevresel etkilerinin azaltılması hedeflenmiştir (European Union, 2006).

2008'de, Avrupa Kentsel Şartı'nın yayımlanmasının ardından geçen 15 yıl içinde ortaya çıkan yeni sosyal, ekonomik ve çevresel koşullar göz önünde bulundurularak Avrupa Konseyi tarafından, Avrupa Kentsel Şartı-II: Yeni Bir Kentlilik İçin Manifesto (*European Urban Charter II: Manifesto for a New Urbanity*) kabul edilmiştir. Bu belgede, kentlerde yönetim ve kentli katılımının öneminin vurgulandığı ve yaşanan çevresel sorunlara kaynaklık eden kentlerde

sürdürülebilir kentsel gelişmeye önem verilmesinin gelecek kuşakların hakları bağlamında da önemli bir gereklilik olduğunun altının çizildiği görülmektedir (Council of Europe, 2008).

2015 yılında Birleşmiş Milletler (BM) Genel Kurulu'nda kabul edilen BM 2030 Gündemi ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) (SKA11, Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar başlığını taşımaktadır) ve 2016 yılında düzenlenen BM Konut ve Sürdürülebilir Kentsel Gelişim Konferansı'nın (Habitat III) sonucunda kabul edilen Yeni Kentsel Gündem belgesi, AB kentsel politikaları üzerinde önemli etkiler oluşturmıştır (United Nations, 2017; European Commission, 2025c).

Söz konusu uluslararası politika belgelerinin AB düzeyinde etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamak amacıyla, 2016 yılında Amsterdam Paketi kapsamında AB İçin Kentsel Gündem (Urban Agenda for EU) kabul edilmiştir. Bu belgeyle, sürdürülebilir kentsel gelişme politikalarının desteklenmesi ve kentler arasında iş birliğinin artırılması hedeflenmiştir. Gündem kapsamında konut, hava kalitesi, iklim değişikliğine uyum, sürdürülebilir arazi kullanımı ve döngüsel ekonomi gibi 12 tematik alanda ortaklıklar (Şekil 2) kurulması hedeflenmiştir (European Union, 2025; United Nations, 2025).



Şekil 2: AB için Kentsel Gündem kapsamında kurulan tematik ortaklıklar (European Union, 2025)

Amsterdam Paketi ile kentlerin politika yapım süreçlerine daha aktif katılımlarını sağlamak ve yerel düzeyde uygulanabilir çözümler geliştirilmesi amaçlanmıştır. AB İçin Kentsel Gündem ile kentsel yeniliklerin ve en iyi uygulamaların paylaşılması teşvik edilerek, kentler için Horizon Europe ve LIFE Programı gibi finansman mekanizmaları sunulmuştur (European Union, 2025; United Nations, 2025).

Kentsel gelişme süreçleri kapsamında yürütülen bu önemli çalışmaların ardından, 2019 yılında kabul edilen AYM, AB'nin önceki ekonomi yol haritaları ile kıyaslandığında tüm sektörlerde ve özellikle de kentsel gelişme politikaları bağlamında köklü değişiklikler öngören yeni bir dönemi başlatmıştır. AYM, sürdürülebilirliği tüm AB politikalarında ana akımlaştırmayı ve iklim-nötr kentler oluşturmayı temel hedef haline getirmiştir.

3.1.2. AYM Sonrasındaki Süreçte AB'nin Kentsel Gelişim Politikaları

Önceki AB kentsel politikaları ağırlıklı olarak sürdürülebilir kalkınma, çevre yönetimi ve bütüncül planlama çerçevesinde şekillenirken, AYM, kentlerin iklim-nötr dönüşüm sürecinde merkezi bir rol üstlenmesini öngörmektedir. Avrupa için çevresel sorunların ve iklim değişikliğinin varoluşsal bir tehdit olarak ele alınması sonucunda AYM ile, AB'nin 2050 yılına kadar ilk iklim-nötr kıta haline getirilmesi amaçlanmıştır. AYM'nin uygulanmasıyla modern, kaynak açısından verimli, çevre dostu ve sürdürülebilir yeşil dönüşümü odağına alan bir Avrupa ekonomisi oluşturulması hedeflenmiştir. Mutabakat'ın özellikle enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, sürdürülebilir ulaşım ve döngüsel ekonomi gibi alanlardaki kapsamı kentlerin rolünü vurgulamaktadır. Bu doğrultuda yeşil altyapı projeleri, kentsel dirençlilik, akıllı kent ve ulaşım

uygulamaları, AB politikalarında öncelikli alanlar haline gelmiştir (Chodkowska-Miszczuk & Lewandowska, 2024; European Commission, 2025d).

AYM'nin hayata geçirilmesinde Birlik vatandaşlarının sürece katılımını sağlamak amacıyla İklim Paketi kabul edilmiş, kentlilerin ve özel sektörün AYM kapsamında sağlanan dönüşüm sürecinden yararlanması hedeflenmiştir. AYM'nin 2019 yılında açıklanmasından bu yana pek çok önemli mevzuat ve politika belgesi yayımlanmıştır. AB'nin temiz enerji, enerji dönüşümü, akıllı ulaşım, sanayi, döngüsel ekonomi ve adil geçiş gibi konulara odaklanan belgeleri şunlardır (Erbay vd., 2023; Ticaret Bakanlığı, 2023; Avrupa Birliği Başkanlığı, 2024; European Commission, 2025e; 2025f; 2025g; 2025h; Net Zero Cities, 2025):

- 2020 yılında AB, öncelikle Yeni Sanayi Stratejisi'ni, ardından Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'nı açıklamıştır.
- Ortak Tarım Politikaları, AYM doğrultusunda güncellenmiş, Avrupa Komisyonu tarafından Çiftlikten Çatala ve Biyoçeşitlilik Stratejileri 2020 yılında duyurulmuştur.
- 2021 yılında ilk Avrupa İklim Yasası kabul edilmiştir.
- 2021 yılında, AB'nin 1990'a kıyasla 2030 yılına kadar %55 emisyon azaltım hedefi açıklanmıştır.
- 2021 yılında, ekosistemlerin ve biyoçeşitliliğin korunması amacıyla, 2050 yılında hava, su ve toprak kaynaklarında sıfır kirlilik vizyonu ile Sıfır Kirlilik Eylem Planı yayımlanmıştır.
- 2021 yılında AB'nin Akıllı Hareketlilik Stratejisi ve Eylem Planı yayımlanmıştır.
- 2022 yılında AYM'nin hedefleri doğrultusunda İklim-Nötr ve Akıllı Kentler misyonu başlatılmış, aralarında İstanbul ve İzmir'in de bulunduğu 112 kent, iklim-nötrlük hedeflerine uyum sağlamak için genel bir plan ve yatırım planlarını içeren İklim Kenti Sözleşmeleri (*Climate City Contract*) geliştirmeye yönlendirilmiştir. Mart 2024 itibarıyla 20 kentin AB Misyon Etiketi almasıyla, bu etikete sahip kent sayısı 53 olmuştur.
- 2023 yılında AYM Sanayi Planı, Kritik Hammaddeler Yasası ve Net Sıfır Endüstri Yasası kabul edilmiştir.
- 2023 yılında, AYM'nin sera gazı azaltımı hedefi doğrultusunda temel amaçlardan biri olan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması, raporlama yükümlülüğü ile sınırlı olarak uygulamaya girmiş ve 2023-2025 dönemini kapsayan bir geçiş süreci tanımlanmıştır (Mekanizma, 2026 itibarıyla tam olarak uygulanacaktır).
- AB'nin enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılması ve temiz enerji dönüşümü doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilişkin çok sayıda strateji ve eylem planı yayımlanmıştır.
- 2023 yılında Avrupa Kentsel Şartı II'nin 2015 yılında kabulünden sonra geçen 8 yıllık süreçte yaşanan gelişmeler, iklim değişikliğinin etkileri, AYM'nin getirdiği yeşil yeni düzen ve Covid-19 pandemisinin etkileri göz önüne alınarak güncellenmesi gündeme gelmiş ve Şart'ın dijital dönüşüm, sürdürülebilirlik ve dirençlilik temalarını kapsayacak şekilde yenilenmesiyle Avrupa Kentsel Şartı III kabul edilmiştir.
- 2024 yılında AB'nin sera gazı azaltım hedefi 2040 itibarıyla %90 azaltım olarak güncellenmiştir.

Sonuç olarak, AB tarafından AYM kapsamında, kentlerle doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili çeşitli politika ve stratejilerin belirlendiği görülmektedir. AYM'nin hedeflerine ulaşılabilmesi için AB tarafından 10 yıl boyunca, 1 trilyon avro tutarında finansman desteği ve yatırımın sağlanması planlanmaktadır (Avrupa Birliği Başkanlığı, 2024).

Bu süreci desteklemek amacıyla kentlerle ilişkili pek çok inisiyatif ve proje hayata geçirilirken, AB'nin AYM kapsamında belirlediği hedeflerin, AB'nin Eko-kent yaklaşımı çerçevesinde şekillendiği görülmektedir. Eko-kent yaklaşımı, hem Birlik kentlerinde hem de Birlik dışındaki ülkelerin kentlerinde uygulanan projelerle öne çıkan bir kentleşme yaklaşımı olmuş, sürdürülebilir ve dirençli kentleşme politikalarının temel unsurlarından biri haline gelmiştir.

3.2. Eko-Kent Kavramı ve AB Kentleşme Politikalarındaki Yeri

AB'nin sürdürülebilir kentleşme hedefleri doğrultusunda, Eko-kent modeli çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla ön plana çıkan bir yaklaşım haline gelmiştir. Bu bölümde, öncelikle eko-kent kavramı ve temel ilkeleri ele alınmış, ardından AB'nin eko-kent yaklaşımı, belirlenen kriterler, uygulama örnekleri ve AYM'nin karbon-nötr hedefleriyle bağlantısı bağlamlarında incelenmiştir.

3.2.1. Eko-Kent Tanımı ve Temel İlkeleri

Eko-kent kavramı, 1970'li yıllardan itibaren kullanılmasına rağmen, 1990'larla birlikte kentlerin ekolojik ve bütünsel bir yaklaşımla planlanması ve tüm kentsel süreçlere kentli katılımının sağlanması gibi unsurları da kapsayacak şekilde kapsamı genişletilmiştir. Dünya Bankası gibi uluslararası kuruluşlar, eko-kent inisiyatiflerini kent stratejisi girişimlerine dahil etmiştir. Bununla birlikte, eko-kent kavramının bir kent yaklaşımı olarak tanınırlığının ve uygulanmasının artışı, AB'nin Akıllı Kent Girişimi kapsamında gerçekleştirilen önemli projelerden biri olmasıyla gerçekleşmiştir. Eko-kent yaklaşımı, AB'deki ve farklı ülkelerdeki kentlerde uygulanmış; sürdürülebilirlik, kentsel ekosistemlerin korunması, biyoçeşitliliğin geliştirilmesi, enerji verimliliği, temiz enerji dönüşümü gibi önemli ilkeleri içinde barındıran, kentlerde iklim değişikliğiyle mücadele ve dirençliliğe odaklanan bir yaklaşım olarak öne çıkmıştır (Jabareen, 2006; Suzuki vd., 2010; European Union, 2013).

Eko-kentlerde kentsel yoğunluk ve form açısından belirli kurallar bulunmamakla birlikte, doğal ekosistemlerin fonksiyonlarını yerine getirmesi; kentin sürdürülebilirliği ve kendine yeterliliği açısından önemli görülmüştür (Jabareen, 2006; Özcan, 2012; Ecocity Standards, 2022). Eko-kentlerin temel ilkeleri ise şu şekilde sıralanmaktadır (Suzuki vd., 2010; Ecocity Standards, 2022):

- Kentsel politikaların ve planların uzun vadeli perspektiflerle hazırlanması,
- Kentle ilgili çalışmalarda bütünsel bir yaklaşımın benimsenmesi,
- Kentlilerin ve paydaşların yerel süreçlere aktif katılımının sağlanması,
- Yerel yönetimlerin, yenilikçi kentsel gelişime öncülük etmesi, yerel kaynakları ve potansiyelleri verimli şekilde kullanması,
- Doğal kaynakların korunması ve ekolojik yaklaşımın, gelecek nesillerin hakları gözetilerek sürdürülmesi,
- Toplumsal anlamda dürüstlük, eşitlik, adalet ve uzlaşmayı sağlayan bir yaşam biçiminin benimsenmesi,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasıyla insan sağlığının korunması,
- Atıkların kaynağında önlenmesi ve geri dönüşüm süreçlerinin etkin yönetilmesi,
- Kentsel çalışmaların düzenli olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi.

3.2.2. AB Eko-Kent Yaklaşımının Genel Özellikleri

AB'nin iklim değişikliğine ve çevresel sorunlara dirençli kentlerin planlanmasına yönelik önde gelen çalışmaları arasında 2005-2012 döneminde uygulanan ECO-City (Eko-kent) Projesi yer almaktadır. Bu projede, sürdürülebilir ve ekolojik bakış açısının kentlerdeki çeşitli sorunların çözümüne katkı sağlaması hedeflenmiştir. Proje, kentsel büyüklükleri farklılık gösteren çeşitli kentlerde, ortak ve yerele özgü sorunların çözülmesine yönelik önemli ilkeler sunmuştur (ECO-City, 2012).

AB, Avrupa'daki kentsel gelişme süreçlerinin sürdürülebilirlik göz önünde bulundurulmadan ilerlediğini ve bunun sonucunda kentsel yayılma, banliyöleşme, kentsel fonksiyonlar arasında kopukluk, düşük ekolojik çeşitlilik ve tarihi kent merkezlerinin terk edilerek çöküntü alanlarına dönüşmesi gibi sorunların ortaya çıktığını vurgulamıştır. Ayrıca, bu gelişmelerin trafik hacminin artmasına yol açtığı ifade edilmiştir. Kentlerdeki nüfus artışı, alansal yayılma ve kentsel faaliyetlerin çevresel sorunlara (özellikle hava kirliliği ve iklim değişikliği) yol açmasıyla mücadele etmek için sürdürülebilir bir kentsel gelişme yaklaşımına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir. Artan kentsel alanlar, daha fazla ulaşım ve fosil yakıt tüketimi ihtiyacı doğururken; artan nüfusun taleplerini karşılamak için ekonomik sektörlerde fosil yakıtlardan sağlanan enerji kullanımı, doğal kaynakların aşırı tüketilmesine, sera gazı emisyonlarının artmasına ve iklim değişikliğinin kötüleşmesine neden olmaktadır (Gaffron vd., 2008; ECO-City, 2012).

Söz konusu problemlerle mücadele edilmesi ve sürdürülebilir kentsel gelişim süreçlerinin sağlanması için AB tarafından kabul edilen temel prensipler şunlardır (Gaffron vd., 2008; Lehmann, 2010; ECO-City, 2012);

- Arazinin, enerjinin ve doğal kaynakların kullanımının en aza indirilmesi,
- Kentsel alanların kırsal alanlara doğru yayılmasının önlenmesi ve kompakt bir kent formu oluşturulması,
- Kentlerde çok merkezliliğe olanak veren bir planlama anlayışının uygulanması,
- Kentsel alanlarda dengeli bir karma kullanım yaklaşımıyla; konut, iş yeri, ticaret, rekreasyon gibi kentsel donatılar arasında ilişki kurulması,
- Kentsel donatılara erişimde özel araç kullanımını azaltan, yaya dostu ve kısa yolculuk mesafelerini mümkün kılan bir yaklaşımla planlama yapılması.

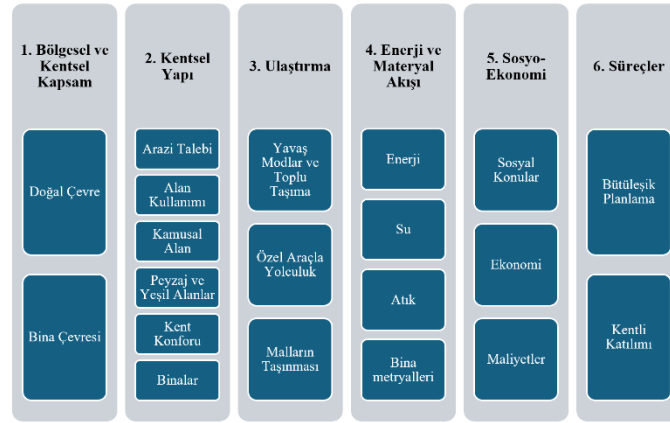
AB tarafından bu prensiplerin bütün kentsel düzeylerde uygulanmasının öneminin altı çizilmiştir. Ayrıca, Eko-kent modeliyle sürdürülebilir, enerji etkin ve dengeli bir kent sisteminin yanı sıra, doğal kaynakları etkin kullanan bir yerleşim deseninin desteklendiği belirtilmiştir (ECO-City, 2012). Bu sayede çevresel, sosyo-kültürel ve ekonomik boyutlarda şu hedeflerin gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır (Gaffron vd., 2008):

- **Çevresel Boyut:** Arazi kullanımını iyileştirme, ekosistemlerin korunması, doğal kaynakların tükenmesini önleme, bölgesel materyal akışının etkin yönetimi, çevre duyarlılığının ve ekolojik farkındalığın artması, karbon salımının azaltılması.
- **Sosyo-Kültürel Boyut:** Sağlık ve yaşam kalitesini iyileştirme, toplumsal farkındalığı artırma, katılımcı ve şeffaf yönetim süreçlerinin desteklenmesi.
- **Ekonomik Boyut:** Krizlere dayanıklı yerel ekonomiler geliştirme, yaşam döngüsü maliyetlerini azaltarak mali verimliliğin artırılması.

Bu hedeflerin gerçekleştirilmesiyle, Eko-kent modeli kentlerin çevreye duyarlı, sürdürülebilir ve iklim dirençli şekilde gelişmesini desteklemektedir.

3.2.3. AB Eko-Kent Kriterleri

Farklı alanlardaki kentsel hedeflere ulaşılması ve kentlerin ekolojik gelişimlerinin de desteklenmesinde AB Eko-kent yaklaşımı kapsamında yer verilen ve bir kentin Eko-kent olarak değerlendirilebilmesi için sağlaması gereken kriterler tanımlanmıştır. Bu kriterler altı tema altında (Şekil 3) gruplandırılmıştır (Gaffron vd., 2008).



Şekil 3: Eko-kent temaları ve alt tema başlıkları (Gaffron vd., 2008)

Her bir tema kapsamında ele alınan değerlendirme kriterleri ve bu kriterlere ilişkin açıklamalar ise Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: AB Eko-Kent kriterleri (Gaffron vd., 2008; ECO-City, 2012)

1. BÖLGESEL VE KENTSEL KAPSAM	
Alt tema/Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
DOĞAL ÇEVRE	
Kent çevresi peyzajının ve doğal bileşenlerin korunması	- Kent sınırı gözetilerek kent ve çevresi arasındaki ekolojik ilişkilerin (su döngüsü, vejetasyon, yaban hayatı, rekreasyon) korunması, - Plansız ve kontrolsüz kentsel yayılımın önüne geçecek ölçütlerin belirlenmesi, - Nüfusu azalan kentler ve sanayi bölgelerinde rekreasyon alanlarının teşvik edilmesi, - Kent çevresindeki biyoçeşitliliğin ve doğal habitatların korunması - Yeşil koridorların korunması ve yeniden oluşturulması, - Kent çevresinde sürdürülebilir rekreasyon alanlarının planlanması ve kentle bütünleştirilmesi, - Bölgesel tarımın sürdürülebilirliği için doğrudan satış alanlarının oluşturulması, - Tarım ve ormancılık atıklarından biyokütle enerjisi üretilmesi.
İklimsel, topografik ve jeolojik uyumlu planlama	- Kentin iklimsel dengesine katkı sağlayan doğal unsurların (ormanlar, göller, vadiler) korunması ve planlamada yer alması, - Sanayi gibi hava kirliliği yaratan faaliyetlerin, hâkim rüzgâr yönü ve yerleşim alanları göz önüne alınarak konumlandırılması, - Kamusal alan ve bina tasarımında rüzgâr, güneş ve yağmur gibi iklimsel faktörlerin dikkate alınması, - Yürüyüş ve bisiklet yollarının, su yönetim sistemlerinin ve yerleşim planlarının topografik yapıya uygun şekilde tasarlanması, - Jeolojik oluşumların yağmur suyu yönetimi, bina yapımı ve kentsel yeşillendirme süreçlerinde dikkate alınması.
BİNA ÇEVRESİ	
Çok merkezli, kompakt ve ulaşım odaklı kent yapısı	- Temel hizmetlere kolay erişimi sağlayacak çok merkezli bir kentsel yapı oluşturulması, - Kentin karakteristik dokusunun korunması, karma kullanımlı alanlar oluşturulması, - Yeni yerleşim alanlarının, toplu taşıma ağıyla kente bütüleşik olarak planlanması, - Ulaşım ve iletişim sistemlerinin yerel, bölgesel ve ulusal ölçeklerde birbiriyle bütüleşik olması, - Arazi yönetimi ve kentsel büyümenin ekonomik teşvikler ve düzenlemeler ile yönlendirilmesi.
Tedarik ve satış sisteminde merkezi ve yerel dengelerin gözetilmesi	- Bölgesel ısıtma ağları gibi merkezi olmayan sistemlerin geliştirilmesi, - Yenilenebilir enerji kaynaklarının yerel potansiyel doğrultusunda en verimli şekilde kullanılması, - Atık su arıtımında merkezi olmayan sistemlerin teşvik edilmesi ve gri suyun bina ölçeğinde yeniden kullanılması, - Atık sudan biyogaz üretilmesi ve enerjiye dönüştürülmesi, - Organik atıkların geri dönüştürülmesi ve kompost uygulamalarının yaygınlaştırılması.
Kültürel mirasın korunması, kullanılması ve yeniden canlandırılması	- Kent dokusunun ve tarihi sokak dokusunun korunması, - Yerel ve bölgesel konut tipolojilerinin, geleneksel zanaatların ve el işçiliğinin desteklenmesi, - Tarihi yapıların, açık alan elemanlarının ve altyapıların korunarak yeniden kullanılması.
2. KENTSEL YAPI	
Alt tema/Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
ARAZİ TALEBİ	
Mevcut alanların ve binaların tekrar kullanılması yoluyla	- Kompakt bir yapıda kent içinde gelişimin teşvik edilmesi, aşırı yoğunluk oluşturmaktan ve yeterli yeşil alanlarla kentin planlanması, - Kullanılmayan veya atıl durumdaki alanların kent içinde yeniden işlevlendirilmesi,

yeni alan ihtiyacının azaltılması	Terk edilmiş yapıların kente kazandırılması ve kullanılabilir hale getirilmesi.
Dengeli ve yoğun yapılaşmanın teşvik edilmesi	- Kentsel alan kullanımının verimli hale getirilmesi, ulaşılması kolay ve sosyal açıdan yaşanabilir alanlar oluşturulması, - Güneş ışığından maksimum fayda sağlamak, açık alanları artırmak ve hava koridorları oluşturmak için yoğunluğun kontrol altında tutulması, - Toplu taşıma noktalarına yakın bölgelerde yüksek yoğunluklu yapılaşmaya öncelik verilmesi, - Karma kullanım barındıran çok katlı binaların tercih edilmesi.
ALAN KULLANIMI	
Konut, işyeri ve sosyal alanların dengeli dağılımı	- İş alanları ve konut bölgeleri arasında bir denge sağlanması, - Günlük ihtiyaçlara yönelik ticari alanların konut bölgeleriyle uyumlu planlanması, - Kamuya açık binaların yeni yerleşim alanlarında erişilebilir şekilde konumlandırılması.
Karma kullanımın teşvik edilmesi	- Kent içindeki yapıların zaman içinde değişen ihtiyaçlara uyum sağlayacak şekilde tasarlanması, - Ticaret ve konut alanlarının kat bazında veya blok düzeyinde dengeli bir şekilde yerleştirilmesi.
KAMUSAL ALAN	
Aktif ve kullanışlı kamusal alanlar oluşturulması	- Çalışma ve yaşam alanlarına yakın, işlevsel kamu alanları (yeşil alanlar, meydanlar gibi) oluşturulması, - Güçlü bir kimliğe sahip çok amaçlı kamusal mekânların geliştirilmesi, - Yaya yolları ile bağlantılı, erişimi kolay ve mimari engeller içermeyen kamu alanlarının tasarlanması, - Yüksek yoğunluklu bölgelerde sosyal etkileşimi artıracak açık alanların sağlanması, - Açık alanlarda taşıt trafiğinin engellenmesi.
PEYZAJ/YEŞİL ALANLAR	
Doğal unsurların kent yaşamıyla bütünleştirilmesi	- Kentsel alanlarda bitki örtüsünün korunması ve geliştirilmesi, - Ekolojik bağlantılar sağlamak için yeşil koridorların oluşturulması, - Kentsel su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesi, - Doğal unsurların, çocukların bilinçli şekilde doğayla iç içe olmalarına imkân verecek şekilde tasarlanması, - Kentteki geçirgen olmayan yüzeylerin mümkün olduğunca azaltılması, - Kent tarımı uygulamaları yapılması.
KENT KONFORU	
Açık alanlarda konforun artırılması	- Açık alanların mevsimsel koşullara uygun şekilde planlanması, - Rüzgâr ve güneş yönleri dikkate alınarak yapılaşmanın düzenlenmesi, - Su yüzeylerinin ısı dengesine katkı sağlaması için planlamaya dahil edilmesi, - Yağmur suyu geçirgen yüzey kaplamaları kullanılması, - Enerji ve iletişim hatlarının ve raylı sistemler gibi teknik altyapı ve araçların insan sağlığı üzerine etkilerinin önlenmesi.
Gürültü ve hava kirliliğinin azaltılması	- Gürültü kirliliğini kaynağında önleyici tedbirler alınması, - Trafik, sanayi ve enerji üretiminden kaynaklanan hava kirliliğinin azaltılması için pasif önlemler (mesafe oluşturma, peyzajla perdeleme gibi) uygulanması, - Yapım süreçlerinin kent konforuna olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi.
BİNALAR	
Kaynakların korunması ve bina içi konforun sağlanması	- Mevcut binaların bakımının yapılması ve yeni fonksiyonlarla kullanımının teşvik edilmesi, - Enerji verimli, düşük tüketimli, pasif enerjili yapıların teşvik edilmesi, - Sağlıklı, dayanıklı ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanılması, - Tersine mühendisliğe imkân veren (sonradan ekipman eklenmesini mümkün kılan) yapılar geliştirilmesi.
Esnek, bütünleşik ve erişilebilir binalar	- Kullanım değişikliklerine olanak tanıyan adaptif bina tasarımları yapılması, - Kamusal alanlarla güçlü ilişkiler kuran binalar tasarlanması, - Binalarda yenilikçi fikirlerin bütünleşik şekilde uygulanması, - Farklı yaş gruplarının konut alanlarında birlikte yaşamasının sağlanması, - Karma kullanımları mümkün kılan binalar tasarlanması.

3. ULAŞIM

Alt tema/ Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
YAVAŞ MODLAR VE TOPLU TAŞIMA	
Aktiviteler arası mesafenin azaltılması ve yolculuk talebinin düşürülmesi	- Yaya odaklı kentsel yapıların kısa mesafelerde planlanmasıyla uzun süreli trafik yoğunluğunun, özellikle ana arterlerde önlenmesi, - Önemli erişim noktalarının (okul, alışveriş merkezi, işyerleri vb.) karma kullanımlı komşuluk çevrelerinde, toplu taşıma duraklarına yakın konumlandırılması, - Açık alanların (meydanlar, parklar, cadde peyzajları) yerleşimlere yakın olmasıyla boş zaman aktiviteleri için seyahat süresinin kısaltılması.
Komşuluk içi ulaşımda yaya ve bisiklet yollarına öncelik verilmesi	- Yoğun nüfuslu alanlarda yaya ve bisiklet erişiminin sağlanması, ancak güzergâhların güvenli olmasına dikkat edilmesi, - Kamu mekânlarının ve cadde peyzajının yüksek mekânsal kaliteye sahip olması, - Güvenli, sürekli ve hızlı erişim sağlayan bisiklet yolu ağlarının oluşturulması, - Motorlu araç trafiğinin yayalar ve bisikletliler için tehlike oluşturmasını engelleyen düzenlemeler yapılması, - Engelsiz ulaşım olanaklarının sağlanması, - Hava koşullarına karşı korumalı yürüyüş yolları, oturma alanları ve bisiklet parklarının geliştirilmesi.
Komşuluk çevresi ölçeğinde toplu taşımaya erişim önceliğinin sağlanması	- Düzenli ve bütünleşik toplu taşıma hatları ve koridorlarının oluşturulması, - Toplu taşımada aktarmasız ve kolay bağlantı sağlayan sistemlerin geliştirilmesi, - Toplu taşıma duraklarının erişilebilir mesafelerde konumlandırılması, - Durakların önemli kamusal alanlara yakın olması.

Hareketlilik yönetiminin çevre dostu ulaşım modellerine geçişi teşvik etmesi	• Toplu taşıma için bilgi noktalarının oluşturulması, • Gerçek zamanlı ulaşım bilgisi sunan panoların sağlanması, • Yeni taşınan sakinlere ulaşım alternatifleri hakkında bilgilendirme yapılması, promosyonlu bilet uygulamaları sunulması, • Araç paylaşımı gibi sürdürülebilir ulaşım paketlerinin geliştirilmesi, • Toplu taşıma kullanımını teşvik eden bilinçlendirme kampanyalarının düzenlenmesi.
--	---

ÖZEL ARAÇLA YOLCULUK

Özel araç kullanımının miktar ve hız olarak azaltılması	• Trafik yönetimi ile araç hızlarının kontrol altına alınması, • Yol hiyerarşisinin oluşturulması ve konut, okul gibi alanlarda araç yoğunluğunun azaltılması, • Araçsız veya kısıtlı araç erişimli bölgelerin tasarlanması, • Kent içinde araç trafiğine ayrılan alanın azaltılması, • Araç paylaşımının teşvik edilmesi, • Belirli bölgelere yalnızca toplu taşıma araçlarının girişine izin verilmesi.
Park yönetimi ile araç trafiğinin azaltılmasının desteklenmesi	• Konut ve iş alanlarında yeterli ancak aşırı olmayan park alanlarının sağlanması, • Kent merkezlerinde aşırı park yeri arzından kaçınılması ve park talebinin ücretlendirme yoluyla dengelenmesi, • Kamu alanlarında park yerlerinin sınırlı tutulmasıyla kamusal mekân kalitesinin korunması, • Konut bölgelerinde kapı önü parkı yerine merkezi toplu park alanlarının sağlanması.

MALLARIN TAŞINMASI

Komşuluk ölçeğinde lojistik ve dağıtım sistemlerinin geliştirilmesi	• Elektrikli araçlar gibi alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan dağıtım sistemlerinin oluşturulması, • Atık depolama ve geri dönüşüm konteynerlerinin konumlandırılması, • Kent içi lojistik malzeme taşıma mesafelerinin kısaltılması, • Bilgi teknolojilerinin kullanımıyla dağıtım rotalarının ve atık yönetiminin optimize edilmesi.
Yapı malzemeleri lojistiğinin etkinleştirilmesi	• Yerel yapı malzemelerinin kullanımının teşvik edilerek taşıma ihtiyacının azaltılması, • Yıkılan binalardan elde edilen malzemelerin geri dönüştürülmesi, • Yapı malzemelerinin taşınmasını en az düzeye getirecek planlamalar yapılması.

4. ENERJİ VE MATERYAL AKIŞI

Alt tema/ Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
ENERJİ	
Binalarda enerji etkinliğinin sağlanması	• Güneş ışığını en verimli şekilde kullanan kompakt yerleşimler ve bina tasarımları oluşturulması, • Pasif ısıtma/soğutma teknikleriyle binaların güneşe erişiminin sağlanması, • Bölgesel ısıtma sistemlerini destekleyecek yoğunlukta kentsel gelişim sağlanması.
Binaların enerji talebinin azaltılması	• Yüksek izolasyon standartlarıyla enerji kayıplarının en az düzeye indirilmesi, • Soğuk iklimlerde pasif güneş enerjisinden yararlanılması ile ısıtma ihtiyacının düşürülmesi, • Doğal gün ışığını ve etkin aydınlatma sistemlerini kullanarak elektrik tüketiminin azaltılması, • Su tasarruf sistemleriyle su tüketiminin düşürülmesi, • Doğal havalandırma ve iç mekân bitkilendirmesi gibi etkin havalandırma yöntemlerinin kullanılması, • Isı emme pompaları ve yeşil çatı uygulamalarıyla soğutma ihtiyacının azaltılması.
Enerji arz ve talebinde etkinliğin sağlanması	• Isıtma, havalandırma, soğutma amaçlı elektrikli araçların enerji verimliliği açısından denetlenmesi, • Enerji tasarruflu aydınlatma sistemlerinin yaygınlaştırılması, • Bölgesel ısıtma için uygun ölçekte kojenerasyon ünitelerinin (CHP) oluşturulması.
Enerji için yenilenebilir kaynakların kullanılması	• Bina ısıtma ve soğutmasında güneş, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, • Fotovoltaik paneller (PV), rüzgâr türbinleri ve biyokütle sistemleriyle kojenerasyon ünitelerinin bütünleştirilmesi, • Çatılar ve bina cephelerinde aktif güneş enerjisi sistemlerine uygun yüzeyler oluşturulması.
SU	
Birincil su tüketiminin azaltılması	• Banyo, mutfak ve tuvaletlerde su tasarruflu ekipmanların kullanılması, • Yağmur suyunun tuvaletlerde, bahçe sulamasında ve araç yıkamada değerlendirilmesi, • Gri suyun geri dönüşümünün sağlanarak belirli alanlarda yeniden kullanılması, • Yeşil alanlar için verimli sulama sistemlerinin geliştirilmesi.
Doğal su döngüsünün korunması	• Kent topraklarının ve sert zeminlerin geçirgenliğinin artırılması, • Mevcut sert kaplamaların uygun alanlarda kaldırılması, • Yağmur suyu yönetimiyle doğal su dengesinin korunması ve atık su arıtma tesislerinin yükünün azaltılması, • Kirlenici yüzeylerin yağmur suyuyla temasının önlenmesi, • Su kütlelerinin korunması ve temizlenmesi, • Yağmur suyu beslemeli peyzaj elemanlarıyla kamusal alan kalitesinin artırılması, • Siyah ve gri suyun doğal sulak alanlarda temizlenmesi.
ATIK	
Atık hacminin azaltılması	• Mal takası ve kiralama sistemleriyle eşya ve araç paylaşımının teşvik edilmesi, • Atıkların geri dönüşümüne yönelik sistemlerin yaygınlaştırılması, • Biyolojik atıkların kompost sistemleriyle geri dönüştürülmesi, • Artılmamış atık suların doğaya zarar vermesinin önlenmesi, • Hafriyat malzemelerinin ve bina artıklarının yeniden kullanımının teşvik edilmesi.
BİNA MATERYALLERİ	
Birincil bina malzemesi tüketiminin azaltılması ve geri dönüşümün artırılması	• Binaların ve bileşenlerinin tekrar kullanılabilir şekilde tasarlanması, • Müstakil konutlar yerine kompakt yerleşimlerin tercih edilmesi, • Yapım malzemelerine olan talebin azaltılması ve çevre dostu doğal malzemelerin kullanılması, • Geri dönüştürülmüş malzemelerin yapı sektöründe kullanılması, • Yapım, kullanım ve yıkım süreçlerini dikkate alan malzeme seçimlerinin yapılması,

Çevre dostu ve zehirli olmayan yapı malzemelerinin kullanımı	- Bina yapım envanter sistemi oluşturulması. - Yerel ve bölgesel malzemelerin tercih edilmesi, - Yüksek dayanıklılığa sahip ve uzun ömürlü malzemelerin kullanılması, - Geri dönüştürülebilir malzemelerin bina yapımında kullanılmasının artırılması, - Zararlı ve toksik maddelerden kaçınılması, - Yenilenemeyen enerji kaynakları içeren yapı malzemelerinin kullanımının azaltılması.
--	---

5. SOSYO-EKONOMİ

Alt tema/ Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
SOSYAL KONULAR	
Sosyal çeşitliliğin desteklenmesi ve dengeli bir toplumsal yapı oluşturulması	- Farklı gelir grupları, yaş grupları, kültürel geçmişler ve yaşam tarzlarına sahip bireylerin bir arada bulunmasını teşvik eden bir yapı oluşturulması, - Konut tiplerinde ve sahiplik modellerinde çeşitliliğin sağlanması, - Planlama sürecinin erken aşamalarından itibaren sosyal bütünleşmenin göz önünde bulundurulması, - Kent sakinlerinin karar alma süreçlerine katılımının artırılması.
Sosyal hizmetlere ve altyapıya erişimin kolaylaştırılması	- Çocuk bakımı, yaşlı bakımı ve sosyal destek hizmetlerinin etkin bir şekilde sağlanması, - Günlük ihtiyaçların karşılanabilmesi için temel hizmet ve perakende noktalarının yürüme mesafesinde konumlandırılması.
EKONOMİ	
Girişimciliğin teşvik edilmesi ve ekonomik fırsatların artırılması	- Yerel ve bölgesel kaynakların, girişimciliği destekleyecek şekilde kullanılması, - Mevcut iş dünyası temsilcilerinin ekonomik gelişim süreçlerine dahil edilmesi, - Küçük ve orta ölçekli işletmeler için yerel finansman seçeneklerinin araştırılması, - Piyasa erişimini kolaylaştıracak bilgi ve kaynakların sağlanması, - Küçük ve orta ölçekli girişimcilerin desteklenmesi, - Ulaşım, iletişim ve bilgi ağlarına erişimin güçlendirilmesi.
İş gücü kaynaklarının etkin kullanımı	- Yerel iş gücü potansiyelinin ve sektörel ihtiyaçların analiz edilmesi, - Çalışanların, iş yerlerine yakın bölgelerde istihdam edilmesi için teşvikler sağlanması, - İş yerlerine yakın bölgelerde konut ediniminin teşvik edilmesi, - Üniversiteler ve eğitim kurumlarının, kentsel çekiciliği artıran faktörler olarak değerlendirilmesi.
MALİYETLER	
Uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliğin desteklenmesi	- Arazi fiyatlarının piyasa koşullarına uygun seviyede tutulması, - Mülkiyet haklarıyla ilgili olası sorunların önceden değerlendirilmesi, - Altyapı yatırımlarının yaşam döngüsü maliyet analizlerine dayanarak planlanması, - Enerji ve su tasarrufunu teşvik eden, kompakt kent modeline uygun bir yapılaşmanın desteklenmesi, - Bölgesel ısıtma sistemleri gibi teknik altyapı projeleri için sözleşme modellerinin geliştirilmesi.
Konut, iş yeri ve sosyal amaçlı yapılar için düşük maliyetli alanlar sunulması	- Yapıların yaşam döngüsü maliyetlerinin en az düzeye indirilmesi, - Yüksek yoğunluklu kompakt bina tipolojileri ile inşaat maliyetlerinin düşürülmesi, - Düşük maliyetli konutların üretimi için uygun bölgelerin belirlenmesi, - Uygun yapı malzemeleri ve enerji verimli sistemlerin kullanılmasıyla inşaat maliyetlerinin azaltılması, - Hane halkı harcamalarını azaltacak çözümlerin (örneğin; enerji tasarruflu binalar, etkili toplu taşıma sistemleri) hayata geçirilmesi, - Konut kooperatiflerinin kurulmasına yönelik destek sağlanması, - Mevcut veya yeni binaların yenilenerek, düşük gelir gruplarına ve kâr amacı gütmeyen kuruluşlara tahsis edilmesi.

6. SÜREÇLER

Alt tema/ Değerlendirme kriteri	Açıklamalar/Önlemler
Bütünleşik planlama	- Farklı disiplinlerden uzmanların yer aldığı bir planlama ekibinin kurulması, - Planlama süreçlerinin döngüsel bir yaklaşımda ele alınması, - Senaryo odaklı planlama yöntemlerinin uygulanması.
Kentli katılımı	Kentlilerin planlama süreçlerine dahil olma düzeyini ve katılım kalitesini ölçen envanterlerin oluşturulması.

Yukarıda belirtilen kriterler, Eko-kent yaklaşımının, Avrupa kentleri ve diğer ülke kentlerinde uygulanabilir olmasını desteklemekte ve aynı zamanda Eko-kent uygulamalarının yerel koşullar ve çevresel gereksinimlere bağlı olarak farklılaşabileceğini göstermektedir. Bu kriterler, AYM'nin de temel unsurları olan sürdürülebilirlik, çevresel etkiler, toplumsal katılım, enerji etkinlik ve ekonomik verimlilik gibi konuları kapsamlı bir şekilde ele almakta ve AB Eko-kent modelinin AYM kapsamındaki kentsel politikaları desteklediğini ortaya koymaktadır. Söz konusu kriterleri sağlayarak, farklı kentsel ölçeklerde hayata geçirilen Eko-kent örneklerine aşağıdaki başlıklarda yer verilmiştir.

3.2.4. Eko-Kent Uygulamalarına Örnekler

AB Eko-kent yaklaşımı geliştirilirken pilot kentlerin seçiminde, Avrupa'daki ve diğer ülkelerdeki kentlerin kendilerine yakın örnekler bulabilmeleri doğrultusunda farklı ölçeklerde kentler ve bölgeler seçilmiştir. Söz konusu kentler, Eko-kent kriterlerini farklı derecelerde karşılasa da her birinin kendine özgü güçlü yönleri ve karşılaştıkları güçlükler bulunmaktadır. Aşağıdaki başlıklarda Eko-kent yaklaşımının uygulandığı söz konusu kentlere örnekler verilmiştir.

3.2.4.1. Almanya/Tübingen

Tübingen, Almanya'nın güneybatısında yer alan bir üniversite kentidir ve kentteki yüksek konut talebi nedeniyle sürdürülebilir planlama stratejilerine ihtiyaç duyulmuştur. 2010 yılı için yapılan projeksiyonlar, 6.000 yeni konut biriminin gerektiğini ortaya koymuş; kent çevresindeki yerleşim alanlarının halihazırda oldukça fazla gelişmiş olması, yeni yapılaşmanın ekolojik ve demografik koşullar göz önünde bulundurularak yönlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu doğrultuda, kent büyümesinin mevcut demiryolu hattı çevresinde yoğunlaştırılması ve planlanan hafif raylı sistem ile bütünleştirilmesi hedeflenmiştir (Gaffron vd., 2005).

Tübingen'de uygulanan Eko-Kent projesi, Avrupa'daki başarılı örneklerden ilham alınarak geliştirilmiş ve 2002'de Avrupa Kent ve Bölge Planlama Ödülü'ne layık görülmüştür. Projenin temel amacı; karma kullanımlı, yüksek yoğunluklu ve ulaşım odaklı bir kent modeli oluşturmaktır. Planlama süreci, geniş tabanlı halk katılımıyla desteklenmiş, yerel paydaşların görüşleri doğrultusunda geliştirilmiştir. Nihai plan; sanayi bölgelerinin dönüşümü, yoğunlaştırma bölgeleri ve yeşil alanlar olmak üzere üç temel konuya odaklanmıştır (Gaffron vd., 2005; ECO-City, 2012):

- **Kent Yapısı ve Ekolojik Denge:** Proje kapsamında Mühlbachäcker bölgesi yoğunlaştırma alanı olarak belirlenmiş, hafif raylı sistem durağı etrafında karma kullanımlı ve yüksek yoğunluklu konut alanları planlanmıştır. Yeşil altyapı, su yönetimi ve güneş enerjisinden maksimum fayda sağlama prensipleri gözetilerek kentsel gelişim yönlendirilmiştir (Şekil 4). Eski sanayi bölgeleri, kompakt ve ticari fonksiyonlarla yeniden değerlendirilmiş, terk edilmiş fabrika alanları ekonomik ve sosyal açıdan kente kazandırılmıştır.



Şekil 4: a) Tübingen enerji verimli konut, b) Tübingen yüksek yoğunluklu konut alanları ve peyzaj (Chaudhary, 2022)

- **Ulaşım ve Araçsız Alanlar:** Proje, motorlu taşıt kullanımını azaltmayı hedefleyerek, yaya ve bisiklet ulaşımına öncelik vermiştir. Kentin hafif raylı sistemle bütünleştirilmesi sağlarken, Saiben bölgesinde araç girişinin yasak olduğu alanlar oluşturulmuştur. Otopark alanlarının kısıtlanması, bireyleri toplu taşımaya yönlendiren bir strateji olarak benimsenmiştir. Ayrıca, evden çalışma modeli teşvik edilerek, günlük iş seyahatlerinin azaltılması planlanmıştır. Bu ulaşım modeli toplu taşıma durakları, araç paylaşım sistemleri ve bisiklet yolları ile desteklenmiş, böylece kent içi hareketlilik sürdürülebilir bir yapıya kavuşturulmuştur. Araçsız yaşam alanlarında, düşük hız uygulamaları ve yaya dostu kamusal alan tasarımları ön plana çıkmıştır. Kentin genişlemesi kontrollü bir şekilde planlanarak ekolojik denge korunmuş, tarım alanları ve su kaynaklarını içeren bir yeşil kuşak oluşturulmuştur. Özellikle Mühlbach peyzaj alanı, kentsel yeşil altyapının temel unsuru olarak planlanmış ve farklı bölgelerle bağlantıyı sağlayan bir yeşil omurga işlevi görmüştür.
- **Sürdürülebilir Su Yönetimi:** Projede, yağmur suyunun etkin kullanımına ve hidrojeolojik duyarlılığa dayalı bir su yönetimi modeli geliştirilmiştir. Taban suyu nötr bir kent bölgesi oluşturularak, gri su kullanımı artırılmış ve yağmur suyu infiltrasyonu teşvik edilmiştir. Su yönetimi stratejileri, aynı zamanda kamusal alan tasarımlarıyla bütünleştirilerek, doğal su öğeleri ve peyzaj unsurlarıyla kentin ekolojik dengesine katkı sağlanmıştır.

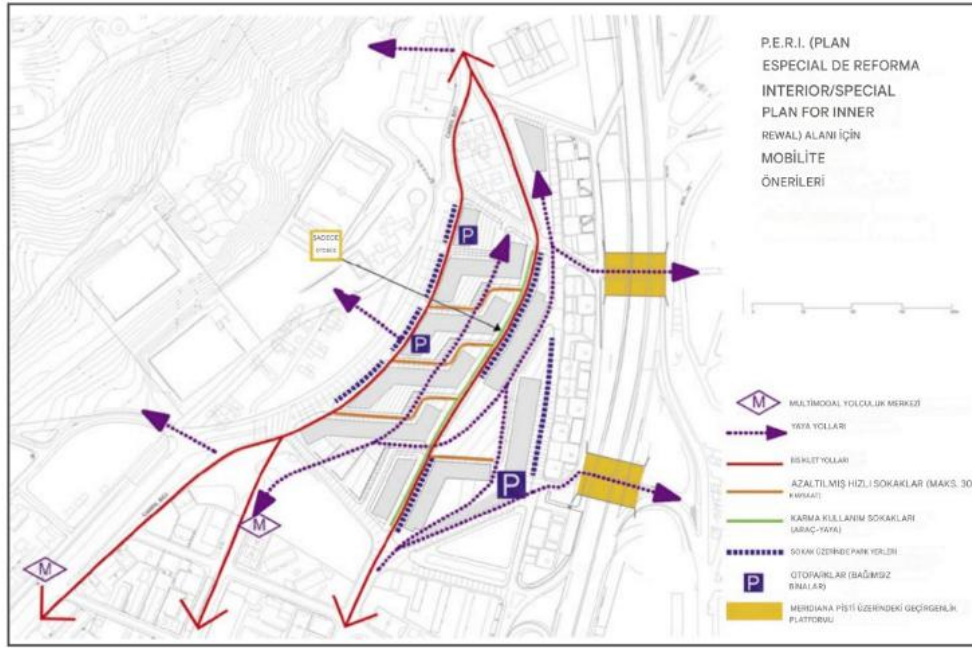
Özetle, Tübingen Eko-kent projesi, yüksek yoğunluk, ulaşım odaklılık, ekolojik sürdürülebilirlik ve sosyal katılım prensipleri temelinde şekillendirilmiş, Avrupa'daki en başarılı kentsel dönüşüm projelerinden biri olmuştur. Yeşil altyapı, toplu taşıma ve enerji verimli tasarım ilkeleriyle şekillenen bu proje, kent içi yaşam kalitesini artırırken çevresel etkileri en alt düzeye indiren bir model sunmaktadır.

3.2.4.2. İspanya/Barcelona-Trinitat Nova

Trinitat Nova, Barcelona'nın kuzeydoğusunda yer alan bir mahalle olup, 1.045 yeni konut inşa edilerek eski 891 konut birimin yıkılması planlanmıştır. Bu kentsel dönüşüm süreci, mahalle sakinlerinin katılımıyla başlatılmış ve kentsel sosyal ve ekonomik yapının iyileştirilmesini amaçlayan bir topluluk planlama sürecine dayanmıştır. Bu çerçevede, Trinitat Nova'nın bir eko-mahalleye dönüştürülmesi için teknik çalışmalar yapılmış ve mevcut imar planı ekolojik prensiplere göre yeniden ele alınmıştır. Eko-kent projesi kapsamında, kentsel ve çevresel planlama ile ilgili unsurlar geliştirilmiş ve

ulaşım ve erişilebilirlik ile kamusal alan tasarımı üzerine sektörel çalışmalar yapılmıştır (Gaffron vd., 2005; ECO-City, 2012):

- **Kentsel Yapı ve Mahalle Planlaması:** Trinitat Nova'da, karma kullanımlı ve yüksek yoğunluklu bir kentsel dönüşüm modeli benimsenerek, toplu taşımaya yakın yaşam alanları oluşturulması amaçlanmıştır. Topografik koşullar göz önünde bulundurularak, erişilebilirliği artırmak için kentsel engellerin azaltılması hedeflemiştir. Ana caddeler boyunca ticari alanlar ve sosyal donatılar planlanarak günlük ihtiyaçların yerel düzeyde karşılanması sağlanmıştır. Dört ila altı katlı konut birimleri tasarlanmış, bu binaların zemin katları ticari ve sosyal kullanımlara ayrılmıştır. Yüksek yoğunluklu ancak dengeli bir kentsel yapı oluşturularak, yürüme mesafesinde ulaşılabilir hizmetler sunulmuştur. Mahalle, 1.000 metre x 500 metrelik bir alanda planlandığından, en uzun yürüme mesafesi yaklaşık 10 dakikadır. Bu model, Akdeniz iklim koşullarına uygun olarak geliştirilmiş, kamusal alanlar yaz-kış kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Meydanlar, avlular ve sokaklar, sosyal etkileşimi teşvik eden mekanlar olarak düzenlenmiş, güvenliği artırmak için canlı kent yaşamı desteklenmiştir. Mahallenin konumu nedeniyle deniz ve dağ manzaralı yeşil alanlar korunarak, planlama sürecine dahil edilmiştir.
- **Ulaşım ve Sürdürülebilir Hareketlilik:** Trinitat Nova Eko-kent projesinin ulaşım stratejileriyle sürdürülebilir hareketliliğin artırılması hedeflemiştir. Mevcut otobüs hatları ve metro istasyonu korunmuş, yeni yapılan hafif raylı sistem ile kuzeydeki mahallelerle bağlantı güçlendirilmiştir. Metro hattının genişletilmesi planlanmış ve mahallenin daha fazla noktaya erişimi sağlanmıştır. Yeni bisiklet yolları, mevcut ve planlanan kent bisiklet ağıyla bütünleştirilerek mahalle sakinlerinin sürdürülebilir ulaşım seçenekleri artırılmıştır. Mahalle genelinde trafiğin yatıştırılması (*traffic calming*) uygulanarak yaya ve bisiklet kullanımının teşvik edilmesi amaçlanmıştır. Araçların mahalle merkezine girişini önlemek için, eğimli topografyadan faydalanılarak yarı yeraltı otoparkları oluşturulmuş ve yüzey otoparkları en aza indirilmiştir. Bu ulaşım modeli, araç bağımlılığını azaltarak toplu taşıma, bisiklet ve yaya yollarının bütünleştirilmesini sağlamaktadır (Şekil 5).



Şekil 5: Trinitat Nova Eko-kent projesi için sürdürülebilir hareketlilik planı (Gaffron vd., 2005).

- **Enerji, Su Yönetimi ve Ekolojik Tasarım:** Trinitat Nova projesi, Barcelona'nın yeni güneş enerjisi düzenlemelerine uygun olarak inşa edilen ilk konut projelerinden biri olmuştur. Pasif tasarım prensipleri, yaz aylarında aşırı ısınmayı önleyecek şekilde geliştirilmiştir. Enerji verimliliğini artırmak amacıyla merkezi kojenerasyon sistemi (ısı ve elektrik üretimini birleştiren sistem) kurulmuş, kolektif yönetim modeli benimsenmiştir ve çatılarda güneş paneli uygulaması yapılmıştır. Su yönetimi açısından, mahallede su dağıtım verimliliği artırılmış, yağmur suyunun toplanarak yeniden kullanımı teşvik edilmiştir. Kent içi su döngüsünü desteklemek için sızma ve geri dönüşüm sistemleri oluşturulmuştur (Şekil 6).



Şekil 6: a) Trinitat Nova'da çatı güneş paneli uygulaması (Azimut360, 2019), b) Trinitat Nova'da su geçirgen yüzey kaplamaları ve bitkilendirme (Socotec, 2019)

- **Katılımcı Planlama ve Sosyal Etki:** Projenin en dikkat çekici unsurlarından biri, sosyal konutların yenilenmesi sürecinde katılımcı ve bütünleşik bir planlama modeli benimsenmiş olmasıdır. Mahalle sakinlerinin sürece doğrudan katılımı sağlanarak toplumsal beklentiler planlamaya yansıtılmıştır. Farklı uzmanlık alanlarından danışmanlık hizmeti alınarak, sosyal, ekonomik ve çevresel faktörleri bütünleştiren bir model oluşturulmuştur.

Özetle, Trinitat Nova projesi, kentsel yenileme, sürdürülebilir ulaşım, enerji verimliliği ve katılımcı planlama açısından Avrupa'da eski mahallelerin sürdürülebilir dönüşümü için önemli bir örnek olarak öne çıkmaktadır. Mahallenin fiziksel yapısı modernize edilirken, sosyal bağlar ve yerel kimlik korunmuştur. Sürdürülebilir ulaşım stratejileriyle yaya hareketliliği desteklenmiş, araç bağımlılığı en aza indirilmiştir. Yeşil altyapı, yağmur suyu yönetimi ve enerji verimli tasarımlarla, çevresel sürdürülebilirlik ve dirençlilik hedeflenmiştir. Sakinlerin doğrudan katılımıyla geliştirilen bu proje, eski sosyal konut bölgelerinin dönüşümü için önemli bir referans olmuştur.

3.2.4.3. Hindistan/Bengaluru, Bhubaneswar, Chennai, Mumbai, Pune

Eko-kentler Hindistan (*Eco-Cities India*), 2016 yılında başlatılan AB-Hindistan Temiz Enerji ve Enerji Verimliliği İş Birliği kapsamında, çok yıllık bir teknik danışmanlık programı olarak hayata geçirilmiştir (European Union, 2019a). Program, Hindistan'ın beş büyük metropol bölgesi; Bengaluru, Bhubaneswar, Chennai, Mumbai ve Pune çevresinde şekillendirilmiştir (European Union, 2019b). Amaç; kentsel politikalar aracılığıyla iklim değişikliğiyle mücadelede katkı sağlamak, Hindistan'ın Paris Anlaşması kapsamında belirlediği emisyon azaltım hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmak ve iklim dirençli kalkınmayı teşvik etmektir. 2050 yılına kadar Hindistan'daki kentlere 400 milyon kişinin gelmesi öngörülmektedir. Hindistan'ın hızlı kentleşme sürecine uyum sağlaması için en az 1 trilyon Amerikan doları tutarında yatırım yapılması gereklidir. Eko-kentler Hindistan programıyla, ülkenin hızla büyüyen kentlerinin karşı karşıya olduğu çevresel ve altyapısal zorluklara bütüncül bir yaklaşımla çözüm üretilmesi amaçlanmıştır. Program kapsamında; sürdürülebilir ulaşım, yeşil binalar, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji, su ve atık yönetimi gibi kritik alanlarda somut projeler geliştirilerek, Hindistan düşük karbonlu ve iklim dirençli kentler oluşturma süreci desteklenmektedir (Şekil 7). Ayrıca, kamu-özel sektör iş birlikleri ve uluslararası fonların etkin kullanımı ile sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması hedeflenmiştir (European Union, 2019c; 2019d).



Şekil 7: AB Eko-kentler Hindistan programı kapsamındaki projelerin temel sektörleri (European Union, 2019d)

Eko-kent Hindistan programı kapsamında, IFC (Uluslararası Finans Kurumu) ve AB iş birliğiyle Hindistan hükümetinin sürdürülebilir kentleşme hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmak için üç temel alanda ölçeklenebilir projeler geliştirilmiştir (European Union, 2019c):

- **İklim Akıllı Altyapı:** Pilot beş kentte kamu-özel ortaklıkları aracılığıyla temiz teknoloji ve enerji verimliliği projeleri uygulanmıştır. Bengaluru'daki sokak aydınlatma projesi kapsamında 465 bin geleneksel aydınlatma ünitesinin enerji tasarruflu LED lambalarla değiştirilmesi, yaklaşık 70 milyon dolarlık yatırım yapılmasıyla su ve atık yönetimi, kentsel hareketlilik ve ulaşım sistemlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.
- **Yeşil Binalar Pazarı:** Program kapsamında hızla artan kentsel nüfusun konut ihtiyacını sürdürülebilir yöntemlerle karşılamak için çevre dostu yapı standartları teşvik edilmiştir. Dünya Bankası kuruluşu olan IFC (International Finance Corporation) tarafından Hindistan'daki inşaat sektörüne EDGE (Daha Yüksek Verimlilik için Tasarımda Mükemmellik) sertifikasyon sistemi tanıtılmıştır.
- **Rekabetçi KOBİ'lerin Teşviki:** Küçük ve orta ölçekli işletmelere enerji verimli teknolojilere yatırım yapmaları için finansman sağlanmıştır. Sanayi kümelerinde sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi teşvik edilmiştir.

Eko-kentler Hindistan programı, Avrupa'daki eko-kent projeleriyle benzerlikler taşısa da Hindistan ölçeğinde, daha büyük bir kentsel dönüşüm ihtiyacı ve finansal yatırım gerekliliği söz konusu olduğundan, daha çok özel sektör yatırımlarının ve kamu-özel ortaklıklarının merkezde olduğu bir yapıdadır.

Sonuç olarak, yukarıdaki başlıklarda ele alınan Eko-kent örnekleri, bu kentleşme yaklaşımının uygulandığı kentlere iklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarını azaltmaları, iklim-nötrlük hedeflerini gerçekleştirmeleri ve kentsel sürdürülebilirlik ve dirençliliklerini sağlamaları doğrultusunda önemli fırsatlar sunduğunu göstermektedir.

3.2.5. Eko-Kent Yaklaşımının AB'nin AYM'deki Karbon-Nötr Hedefine Katkısı

AB, AYM kapsamında 2050 yılına kadar karbon-nötr olmayı hedeflerken, sürdürülebilir kentleşme politikalarına oldukça önem vermektedir. Bu bağlamda, Eko-kentler, AB'nin hedeflerine ulaşmasında kilit bir rol üstlenmektedir. Eko-kentler, enerji verimliliğini artıran, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik eden, karbon salımlarını azaltan, kent içindeki terk edilmiş alanların yeniden farklı fonksiyonlarla kullanımını içeren, kompakt, yenilikçi ve katılımcılığı esas alan kentleşme yaklaşımlarını içermektedir. Bu kentleşme yaklaşımları AYM'nin hedefleriyle uyumlu olup, AB'nin karbon-nötr geleceğine katkı sağlamak için kapsamlı bir temel oluşturmaktadır. Eko-kentlerin, AB'nin AYM'de ortaya koyduğu hedeflere katkısı çevresel, ekonomik ve sosyal alanlara işaret eden üç ana boyutta ele alınabilir (Hurtado, 2021; Sessa vd., 2022; European Environment Agency, 2023; Chodkowska-Miszczuk & Lewandowska, 2024):

- **Enerji Dönüşümü ve Karbon Azaltımı:** Eko-kentler, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı sistemlerle fosil yakıt bağımlılığını en aza indirerek karbon salımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğin, güneş enerjisi panelleri, rüzgâr türbinleri ve enerji depolama teknolojileri eko-kentlerin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Ayrıca, akıllı şebeke sistemleri sayesinde enerji tüketimi optimize edilerek enerji kayıpları en alt seviyeye düşürülmektedir. Bu dönüşüm, AB'nin 2030 iklim hedefleri için sera gazı emisyonlarının %55 oranında azaltılmasına doğrudan katkı sunmaktadır.
- **Sürdürülebilir ve İklim Dirençli Kentsel Planlama:** Eko-kentlerde, kent planlaması düşük karbonlu bir yaşam tarzını destekleyecek şekilde tasarlanmaktadır. Toplu taşıma sistemlerinin yaygınlaştırılması, bisiklet yollarının ve yaya dostu alanların artırılması, araç kaynaklı emisyonların azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, yeşil çatı uygulamaları, kentsel tarım ve geniş yeşil alanlar, karbon yutak alanı miktarını artırarak kentlerin ekolojik ayak izini küçültmektedir. Eko-kentlerde atığın kaynağında önlenmesi ve atık geri dönüşümünün sağlanması, AB'nin AYM kapsamındaki döngüsel ekonomi yaklaşımını desteklemektedir. Eko-kent yaklaşımı aynı zamanda yüksek kaliteli, dirençli ve sürdürülebilir kentleşmeyi teşvik etmekte ve kentlerde kullanılmayan/terk edilmiş alanlar dahil olmak üzere yeniden yapılandırmayı içermektedir. Bu kentleşme stratejileri, AB'nin AYM'de öne çıkardığı kentlerdeki sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumludur. Eko-kentler, AB'nin karbon-nötr hedeflerine yalnızca teknik çözümler sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma politikalarının birer pilot alanı olarak hizmet etmektedir. Bu kentler, düşük karbon ekonomisine geçişte yol gösterici örnekler sunarken, kentlerin dirençliliğini artırmaktadır.
- **Toplumsal Farkındalık ve Davranışsal Değişim:** AYM'nin temel hedeflerinden olan karbon-nötrlüğün temelinde yatan unsurlardan biri de AB'nin doğal kaynaklarının korunmasının yanı sıra, vatandaşlarının sağlığını ve refahını çevresel risklerden ve etkilerden koruma isteğidir. Eko-kent yaklaşımının kapsamındaki kriterler söz konusu hedefleri desteklemekte ve sürdürülebilir yaşam biçimlerinin benimsenmesi için bireyleri teşvik etmektedir. Eğitim programları, toplumsal katılım mekanizmaları ve yenilikçi projeler sayesinde bireylerin karbon ayak izlerini azaltmaları desteklenmektedir. Örneğin, atık yönetimi sistemleri ve geri dönüşüm politikaları, bireylerin yaşam alışkanlıklarını değiştirmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, Eko-kentler, AB'nin AYM'de ortaya koyduğu karbon-nötr hedeflerine ulaşmasında sağladıkları somut sonuçlarla oldukça büyük öneme sahiptir. Yenilikçi teknolojiler, kapsayıcı planlama süreçleri ve toplumsal farkındalık artırıcı uygulamalar sayesinde bu kentler, düşük karbonlu bir gelecek için sürdürülebilir ve iklim dirençli bir model sunmaktadır.

3.3. AB Eko-Kent Yaklaşımının Türkiye Kentlerinde Uygulama Olanakları

Türkiye’de iklim değişikliği ile ilişkili aşırı hava olaylarının ve afetler önemli can ve mal kayıplarına neden olmaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024). Bu olaylar yalnızca insan yaşamını değil, aynı zamanda ekosistemleri, ekonomik faaliyetleri ve kalkınmayı ve ulusal güvenliği de etkilemektedir. Bu bağlamda, kentler başta olmak üzere tüm idari ölçeklerde iklim duyarlı politikaların benimsenmesi ve acil eylemlerin uygulanması gereklidir. Türkiye, 27 Eylül 2021 tarihinde 2053 net-sıfır emisyon ve yeşil kalkınma hedefini açıklamış ve bu doğrultuda Paris Anlaşması’nı onaylamıştır (T.C. Resmî Gazete, 2021).

Türkiye’nin uluslararası alandaki söz konusu taahhütleri ve 2024-2028 dönemine yönelik olarak *Strateji ve Bütçe Başkanlığı* (2023) koordinasyonunda hazırlanan On İkinci Kalkınma Planı değerlendirildiğinde, esasen AB Eko-kent yaklaşımı ile uyumlu politikaların hayata geçirilmesinin hedeflendiği görülmektedir. Plan, yeşil kalkınma ve yeşil dönüşüm yaklaşımlarına dayanmaktadır ve bunlar aynı zamanda AYM’nin de temel yaklaşımlarıdır. Plan ’da Türkiye’nin yeşil kalkınma ve net-sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda yeşil dönüşüm ve yaşanabilir çevre hakkını sağlamaya dönük potansiyelinin harekete geçirilmesinde, çevre ve iklim duyarlı, sürdürülebilir kentsel gelişmenin önemli fırsatlar sunduğunun altı çizilmektedir. Kentsel sektörlerde sera gazı azaltımının yapılmasının yanı sıra, iklim değişikliğinin etkilerine uyum ve dirençlilik sağlanması ve yerel yönetimlerin bu alanlardaki rolünün artırılması Plan’ın diğer önemli hedefleridir. Plan’da AYM’nin Türkiye için önemli sonuçlar ortaya çıkardığı belirtilmiş ve sektörel dönüşümlerin yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

Plan’da kentlerin akıllı, dirençli ve sürdürülebilir bir şekilde gelişmesini destekleyen politikalar yer almaktadır (*Strateji ve Bütçe Başkanlığı*, 2023). Bu kapsamda; iklim dostu, düşük/sıfır karbonlu kentsel sistemlerin ve yeşil altyapıların geliştirilmesinin teşvik edildiği, dolayısıyla esasen Plan’ın çevresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğiyle mücadele ve uyum temelinde ekolojik kentselmeye işaret ettiği görülmektedir. Plan’ın, AB Eko-kent kriterleriyle uyumlu hedefleri daha detaylı olarak Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2: On İkinci Kalkınma Planı’nda Eko-kent kriterleriyle uyumlu politika ve hedefler (Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023)

Konu/Tema	Politika/Hedef
Karma Kullanımlı Kentsel Planlama	Ulaşımda yakıt tüketiminin azaltılması için, kentlerde yeni yerleşim alanlarının yoğunluklarının planlanmasında raylı sistemlerin transit özelliği ve kapasitesinden yararlanılarak, yürüme veya bisiklet amaçlı karma kullanım alanlarının ve planlama kararlarının oluşturulmasının teşvik edilmesi,
Kentlerde Yeşil Altyapının Geliştirilmesi	Kentlerde yeşil alanların artırılması, doğal yaşam alanlarının korunması, kent ormanlarının oluşturulması ve mevcut ekosistemlerin korunması. Bu süreçte, biyolojik çeşitliliğin korunması, arazi tahribatının önlenmesi ve kentsel ekosistem hizmetlerinin korunmasına yönelik araştırma, izleme ve değerlendirme yapılması,
Düşük Karbonlu Ulaşım Sistemleri	Kentlerde bireysel araç kullanımı yerine sürdürülebilir, çevreci, verimli ve düşük emisyonlu toplu taşıma sistemleri ile mikro-mobilite çözümlerinin teşvik edilmesi, toplu taşımanın yaygınlaştırılması, bisiklet yollarının artırılması ve elektrikli araç şarj altyapısının geliştirilmesi,
Dirençli Kentsel Altyapı	Su yönetimi, kanalizasyon sistemleri ve elektrik şebekeleri gibi kritik altyapıların iklim değişikliği etkilerine dayanıklı hale getirilmesi,
Binalarda Enerji Verimliliğinin Artırılması	Enerji verimli bina uygulamalarının yaygınlaştırılması, mevcut binalarda enerji performansının iyileştirilmesi için teşviklerin sağlanması, akıllı bina tasarımlarının yaygınlaştırılması, yenilenebilir enerjinin ve düşük karbonlu yapı malzemelerinin kullanılması, Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nSEB) kriterlerinin geliştirilmesi ve Türkiye’nin yeşil bina sertifika sistemi olan YeS-TR’nin yaygınlaştırılması,
Su Yönetimi	Su kaynaklarının koruma-kullanma dengesi gözetilerek sürdürülebilir, bütünselik, etkin ve verimli şekilde yönetilmesi, iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin tespit edilmesi ve iklim değişikliğine uyum sağlanmasına yönelik faaliyetler gerçekleştirilmesi, deniz suyunun artırılması, yağmur suyu hasadı ve gri suyun yeniden kullanımı gibi hususlarda mevzuat geliştirilmesi,
Atık Yönetimi	Ulusal Döngüsel Ekonomi Eylem Planı hazırlanması, atıkların geri dönüşümünün sağlanması,
İklim Direnci ve Afet Yönetimi	Kentlerde su kaynaklarının etkin yönetimi, sel ve kuraklık gibi afetlere karşı dirençli altyapının oluşturulması, kent içi ulaşımın afetlere karşı dirençli olmasının sağlanması, deprem ve diğer doğa kökenli afet risklerinin azaltılması için altyapı yatırımları yapılması, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve kentsel dönüşüm süreçlerinin hızlandırılması,
Kentsel Dönüşüm ve Akıllı Kentler	Kentsel dönüşüm projelerinin sürdürülebilirlik ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmesi ve akıllı kent teknolojilerinin yaygınlaştırılması,
Yerel Yönetimlerin Güçlendirilmesi	Belediyelerin yerel iklim değişikliği eylem planlarını (YİDEP) hazırlaması ve uygulamaları için teknik ve finansal desteklerin artırılması,
Mekânsal Planlama	Mekânsal planlama anlayışının sürdürülebilirlik ve dirençlilik ilkeleri çerçevesinde geliştirilebilmesi için kurumsal, teknik ve beşerî kapasitenin geliştirilmesi,
Toplumsal Çevre ve İklim Değişikliği Farkındalığı	İklim değişikliğiyle mücadelede kurumsal kapasitelerin ve toplumsal bilincin artırılması,
Kentsel Hizmetlere Eşit Erişimin Sağlanması	İklim değişikliğine ve afetlere dirençli, kültürel ve tarihi yapıyla uyumlu yerleşimlerde herkese erişilebilir kentsel hizmet sunumu yapılması,
Emisyon Azaltım Stratejileri Geliştirilmesi	SKA’lar doğrultusunda iklim değişikliğinin etkilerine karşı dirençli ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçişin sağlanması, kentlerin ve kentlerdeki sektörlerin karbon ayak izini azaltacak yenilikçi teknolojilerin ve enerji verimli sistemlerin kullanımının ve geliştirilmesinin teşvik edilmesi,
Kurumlar Arası İş Birliği	İklim risklerine karşı, uluslararası iklim değişikliği müzakereleri, Paris Anlaşması ve Türkiye’nin Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkısı (NDC) çerçevesinde ulusal koşullar gözetilerek, azaltım ve uyum eylemlerinin güçlendirilmesinde tüm paydaşlarla iş birliği ve kurumlar arası eşgüdüm sağlanması ve mevzuat düzenlemeleri yapılması,

Tablo 2'nin devamı

Konu/Tema	Politika/Hedef
Yeşil Mutabakat Eylem Planı	Yeşil Mutabakat Eylem Planı ile uyumlu olarak sektörel yol haritalarının güncellenmesi, izleme ve değerlendirme sistemleri geliştirilmesi ve mevzuat çalışmaları yürütülmesi,
Sürdürülebilir Kırsal Kalkınma	Doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması ve kırdan kente göçün önlenmesi,
Finansman ve Uygulama Mekanizmaları	Ekolojik kentleşme politikalarının uygulanabilirliğini artırmak için yenilikçi finansman araçları ve uluslararası fonların kullanımı teşvik edilmesi, yeşil finansmana erişim sağlanması, özel sektörün bu süreçlere daha fazla dahil olması, yerel yönetimlerin teknik ve mali kapasitelerinin geliştirilmesi,
Uluslararası İş Birlikleri Kurulması	Küresel kalkınma gündemindeki iklim değişikliği, yeşil dönüşüm, yenilenebilir enerji, sürdürülebilir gıda sistemleri, afet risklerinin azaltılması, dijitalleşme, sürdürülebilir atık yönetimi gibi konulardaki uluslararası çalışmalara aktif katılım sağlanması.

Özetle On İkinci Kalkınma Planı, kentsel politikaların Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamındaki net-sıfır hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamasını ve kentlerin ekolojik bir temelde ve sürdürülebilir kalkınma ilkelerine göre yeniden şekillendirilmesini önermektedir. Söz konusu hedefler gerek AB Eko-kent kriterleriyle gerek AYM'nin hedefleriyle örtüşmektedir. On İkinci Kalkınma Planı, ekolojik kentleşmeyi sadece çevresel bir gereklilik olarak değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal kalkınmayı destekleyecek bir araç olarak ele almaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda Türkiye'nin kentlerini yeşil ve dirençli bir geleceğe hazırlamayı amaçlamaktadır.

AB Eko-kent yaklaşımı, On İkinci Kalkınma Planı'nın hedefleriyle uyum içinde Türkiye'de sürdürülebilir ve dirençli kentleşme uygulamalarına yol gösterebilecek, başarısı kanıtlanmış önemli unsurlar içermektedir. Türkiye'nin kentleşme sürecinde karşı karşıya olduğu hızlı nüfus artışı, düzensiz yapılaşma ve çevresel bozulma gibi sorunlar, AB'nin Eko-kent modeli kapsamında gerçekleştirdiği iyi uygulama örneklerinden öğrenme ihtiyacını artırmaktadır. Türkiye'nin mevcut planlama ve uygulama süreçlerinin, AB'nin Eko-kent politikalarıyla bütünleştirilmesi, yerel yönetimlerin kapasitelerini artırarak daha dirençli kentler oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda AYM'ye uyumlu politikaların yerel düzeyde benimsenmesi, Türkiye için AB ile ilişkiler için de kritik öneme sahiptir.

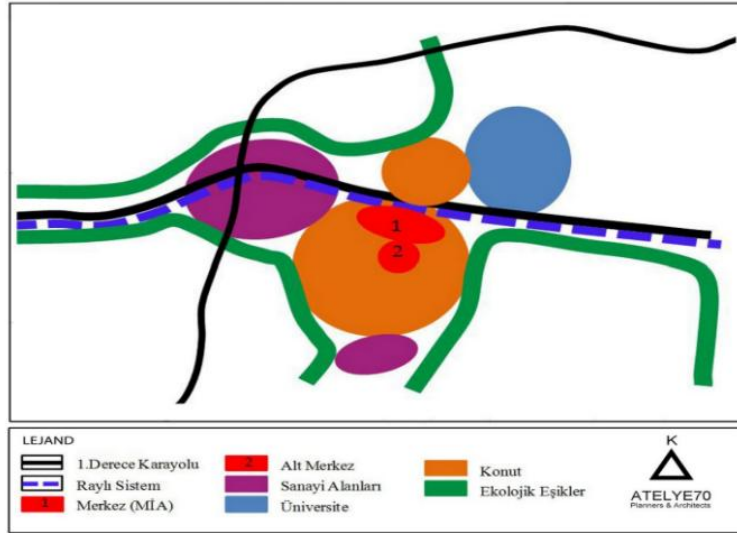
Bu doğrultuda, Türkiye'de bazı yerel yönetimler tarafından AB'nin Eko-kent modeliyle uyumlu kentleşme projeleri geliştirildiği görülmektedir. Aşağıdaki başlıklarda bu çalışmaların en kapsamlı örneklerinden olan Bursa/Nilüfer Eko-kent Projesi ve Eskişehir/Kocakır Eko-kent Projesi ele alınmıştır.

3.3.1. Bursa/Nilüfer Eko-Kent Projesi

Bursa/Nilüfer Eko-kent Projesi, Bursa Çevre Düzeni Planı'nda kentin batı yönündeki gelişme aksında planlanmış bir projedir ve Nilüfer Belediyesi sınırları kapsamında yer almaktadır. Proje, Bursa'da 2020 yılına yönelik olarak "yaşanabilir ve sürdürülebilir bir kentsel çevre oluşturulması" hedefi kapsamında geliştirilmiştir. Bursa/Nilüfer Belediyesi, Nilüfer Eko-Kent Projesi, 1/1.000 Ölçekli Uygulama İmar Planı Raporu'nda, Eko-kentlerin AB tarafından Avrupa'daki farklı iklim özellikleri gösteren bölgelerde kentsel sürdürülebilirliğin sağlanması doğrultusunda geliştirilen bir yerleşme modeli olduğuna değinilmiştir. Rapor'da, söz konusu modelin uygulanması için geliştirilen projenin "yaklaşık 2.150 ha alanda yapılaşmış alanlar (proje alanının %47'si), tarım alanları (%12), boş alanlar (%33), orman alanları (%6) ve yanı sıra 8,7 ha'lık dere ve 2 ha'lık askeri alanı içeren bir konumda" gerçekleştirileceği ifade edilmiştir. Proje'nin amacı, "proje alanının 1/5.000 ve 1/1.000'lik Plan revizyonları aracılığıyla ekolojik hassasiyetleri gözeterek ve işlevsel anlamda kentsel bütünlüğü hedefleyen bir planlama yaklaşımı içinde yeniden düzenlenmesi" olarak belirtilmiştir. Bu kapsamda önerilen Eko-kent yerleşim modeli Şekil 8'de yer almaktadır. Proje alanının içinde tanımlanan 1.212 ha büyüklüğündeki planlama alanında 200 bin nüfusun, Eko-kent proje alanının tamamında ise yaklaşık 250 bin kişinin yaşayacağı öngörülmüştür (Nilüfer Belediyesi, 2015).

Söz konusu planlama alanındaki çalışmalarda ise özetle aşağıdaki ilkelerin ve yaklaşımların temel alındığı belirtilmiştir (Nilüfer Belediyesi, 2015):

- **Yerleşim özellikleri:** Mahalle kavramı (5.000-10 bin nüfuslu komşuluk üniteleri öngörülmüştür), topografyaya uyum (güneşe ve manzaraya yönelim), yaşama-çalışma birlikteliği.
- **Kent merkezi ve merkezi iş alanı (MİA) fonksiyonları:** Taşıt-yaya dengesinin sağlandığı yürüme mesafesindeki mahalle merkezleri.
- **Ulaşım:** Bütünleşik ulaşım sistemi, Bursa'nın merkezi ile güçlü bağlantı, hafif raylı toplu taşıma sistemi, bisiklet yolları ve yayalaştırma (okula ve yeşil alanlara erişim sağlamak için).
- **Enerji:** Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve bu kapsamda güneşten yararlanma.
- **Ekolojik yaklaşım:** Doğal eşiklere duyarlılık, çevreye uyum, su yönetimi ve yağmur suyu hasadı, atık yönetimi.
- **Sosyal yaklaşım:** Toplumsal gelişim, eşitlikçi sosyal çevre.
- **Ekonomik yaklaşım:** Sürdürülebilir ekonomik gelişme, kendine yeterlilik.



Şekil 8: Bursa-Nilüfer Eko-kent yerleşim modeli (Nilüfer Belediyesi, 2015)

AB Eko-kent kriterleri açısından değerlendirildiğinde, Bursa/Nilüfer Eko-kent Projesi'nin temel planlama ve tasarım ilkelerinin, bu kriterlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Proje kapsamında sera gazı emisyonlarının azaltılmasına, enerji ve su verimliliğine yönelik hedefler belirlenmesi, atık yönetiminin ve yenilenebilir enerji kullanımının amaçlanması, yağmur suyu hasadının planlanması, ulaşımda düşük/sıfır karbonlu modların (hafif raylı ulaşım, yaya ve bisiklet kullanımının) hedeflenmesi, iş yeri-konut mesafesinin azaltılmasının yanı sıra, gündelik ihtiyaçlara dönük alt merkezlerin tasarlanması öne çıkan unsurlar arasındadır. Ayrıca, komşuluk ünitesi/mahalle yaklaşımının benimsenmesi, iklim ve çevre duyarlı yaklaşımların bütünleştirilmesi ve ekonomik ve sosyal boyutlara yönelik çalışmalar yapılması hususları da proje kapsamında yer almıştır. Ancak söz konusu projenin uygulamaya geçirilemediği görülmektedir.

Projenin geçmişi 2012 yılına dayansa da Eko-kent planı, Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından İmar Kanunu çerçevesinde değerlendirilmiş ve revizyon taleplerine konu olmuştur. Bu süreçte Bursa Büyükşehir Belediyesi'nin, 1/1.000 ölçekli Nilüfer Eko-kent Planı'nı, mecliste uzun süre beklettiği yönünde eleştiriler yöneltilmiş (Nilüfer Belediyesi, 2013) ve ardından İl Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü'nün, planın tarımsal arazilere doğru büyüme riski taşıdığına dair görüş bildirmesi üzerine, plan 2015 yılında Nilüfer Belediye Meclisi'ne yeniden değerlendirilmek üzere iade edilmiştir. Nilüfer Belediye Meclisi'nde tekrar görüşülen plan, üst gelir gruplarına yönelik olduğu ve Nazım Plan'daki nüfus büyüklüğüyle uyumsuz olduğu gerekçeleriyle 2015 yılında oy çokluğu ile kabul edilerek, Bursa Büyükşehir Belediyesi'ne sunulmuştur (Emlak Kulisi, 2015; Başar, 2019). Plan, Büyükşehir Belediyesi tarafından farklı gerekçelerle iade edilmesine rağmen, Nilüfer Belediye Meclisi tarafından tekrar onaylanmış ve nihayet 2022 yılında Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından onaylanmıştır (Bursaport, 2022; Kaya, 2024). Ancak plana yapılan itirazların yargıya taşınması sonucunda, 2024 yılında bilirkişi raporları doğrultusunda 1/5.000 ve 1/1.000 ölçekli planlar iptal edilmiştir (Kaya, 2024).

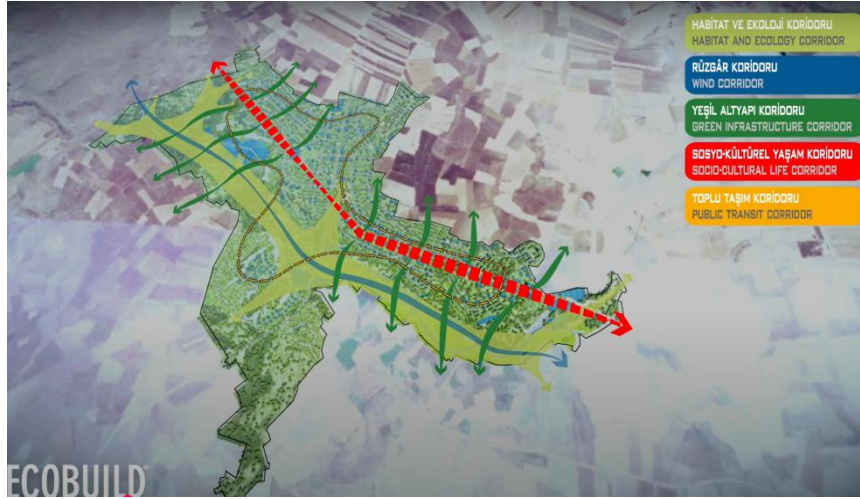
Nilüfer Eko-kent Projesi'nin 2025 yılı itibarıyla hala uygulanamamış olmasının temelinde çeşitli planlama, hukuk ve yönetim sorunları bulunmaktadır. Planlama alanındaki yapılaşmış bölgelerde (halihazırda 18. madde görmüş alanlarda) mahalle kavramı çerçevesinde yeniden organizasyonun, kesinleşmiş ada-parcel mülkiyetleri nedeniyle kapsamlı bir mutabakat gerektirdiği belirtilmektedir (Nilüfer Belediyesi, 2015). Bunun yanı sıra siyasi görüş ayrılıkları (Nilüfer Belediyesi, 2013), eko-kent yaklaşımının bazı unsurlarının Türkiye'deki mevcut planlama mevzuatıyla tam olarak örtüşmemesi (büyük imar adaları, farklı emsallerin tanımlanmasıyla eşitlik ilkesinin etkilenmesi, ulaşım planlamasında kademelenme esaslarına uyulmaması) (Kaya, 2024), projesi alanındaki yatırımcıların ve arazi sahiplerinin yüksek rant beklentileri ile projeyi bir yatırım aracı olarak değerlendirmeleri (Bursa'da Bugün, 2022) projenin uygulanmasını zorlaştıran etmenler arasında yer almıştır.

3.3.2. Eskişehir/Kocakır Eko-Kent Projesi

Eskişehir/Kocakır Eko-kent Projesi, 2013 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından Eskişehir-Kocakır Mevkii'nde 6303 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun kapsamında 770 ha'lık hazine arazisinin rezerv alan olarak ilan edilmesi ve bu alanda ekolojik bir yerleşme kurulmasına ilişkin olarak İstanbul Teknik Üniversitesi ile iş birliği yapılmasıyla başlatılmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2013). Proje kapsamında pilot il olarak seçilen Eskişehir/Kocakır'da, 838 ha'lık alanda 75 bin nüfusa yönelik planlama yapılması hedeflenmiştir (Şekil 9) ve projede Bakanlıkça geliştirilen yeşil şehircilik ve kentsel dönüşüm normu olan Sürdürülebilir Performanslı Kentsel Dönüşüm Normu kullanılacağından, proje "Süper Kent" olarak nitelendirilmiştir (Terzi vd., 2016; Aliyeva, 2019; Doğru, 2019; Uçak, 2024).

Söz konusu proje kapsamında özetle aşağıdaki ilkelerin ve yaklaşımların temel alındığı görülmektedir (Mimarizm, 2016; Terzi vd., 2016; Uçak, 2024):

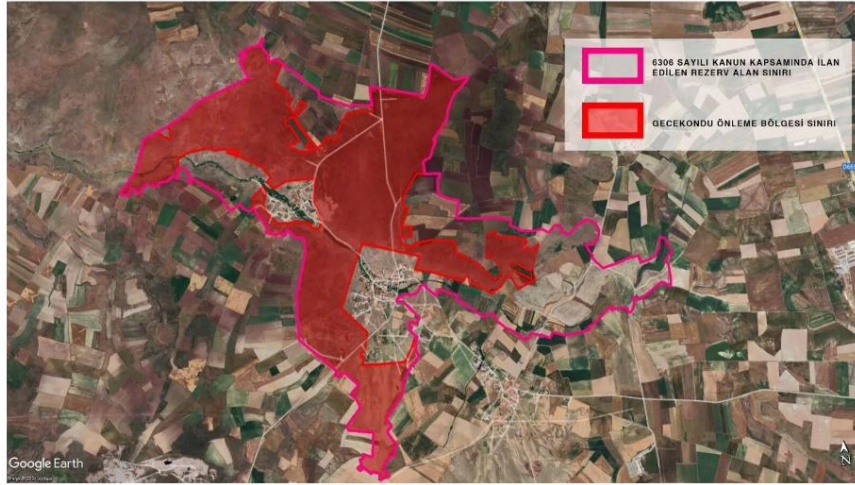
- **Yerleşim özellikleri:** Kentin afet direncinin artırılması, ısı adası etkisinin azaltılması, kompakt kentleşme (belirli sınırlar içinde yüksek yoğunluklu yerleşme) ilkeleri çerçevesinde planlanması, habitat ve ekoloji koridoru aracılığıyla kentin doğal havalandırmasının sağlanması, doğrusal bir aks boyunca konut birimleri (18 bin 775 konut) ve ticaret birimleri (1342 adet) ve sosyal donatılar (hastane, kültür merkezi, aile sağlığı merkezleri, okullar ve diğer donatılar) oluşturulması.
- **Ulaşım:** Bütünleşik ulaşım sistemi, bisiklet yolları ve yayalaştırma ve hibrit yakıtlı toplu taşıma sistemi.
- **Enerji:** Enerji üretimi, enerji tasarrufunu artırma ve enerji verimli binalar, doğalgaza dayalı kojenerasyon sistemi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve güneş enerjisi kullanımı, bölgesel ısıtma ve soğutma sistemleri, atıktan enerji üretimi.
- **Kentsel tarım:** Yerel organik gıdanın sağlanması (konut başına 36 m² tarım alanı öngörülmüştür).
- **Ekolojik yaklaşım:** Kent-çevre etkileşiminin artırılması, biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atık yönetimi, yeşil altyapı koridoru aracılığıyla su yönetimi ve yağmur suyu hasadı, kendine yeterlilik.
- **Sosyal yaklaşım:** Sosyo-kültürel yaşam koridoru aracılığıyla kentin farklı bölgeleri arasındaki ilişkilerin güçlendirilmesi.
- **Ekonomik yaklaşım:** Ekonomik büyüme sağlanması ve kendine yeterlilik.



Şekil 9: Eskişehir-Kocakır Eko-kent yerleşim modeli (ECOBUILD, 2020)

Planlama ve tasarım çalışmaları 2016 yılında tamamlanan Proje değerlendirildiğinde, AB Eko-kent kriterlerinin önemli bir bölümünü sağladığı görülmektedir. Özellikle bölgesel ısıtma sistemleri, atık yönetimi ve atıktan enerji elde edilmesi, yenilenebilir enerji kullanımı, doğal havalandırmaya imkân sağlayan karma kullanımlı kompakt kentsel gelişme hedeflenmesi, su yönetimi ve yağmur suyu hasadı kapsamında yeşil altyapıların kullanımı, yaya, bisiklet ve toplu taşımaya dayalı ulaşım sisteminin kurgulanması, habitat ve ekoloji koridorlarının ön görülmesinin yanı sıra, ekonomik ve sosyal gelişmeye dönük hedeflerin de bulunması projede öne çıkan yönlerdir. Bununla birlikte, projenin uygulama aşamasına geçilememiştir.

2016 yılında planlama süreci tamamlanan projenin planları Eskişehir Büyükşehir Belediye Meclisi tarafından onaylanarak, 1/25.000 ölçekli Nazım İmar Planına işlenmiş olmakla birlikte, 13 Şubat 2024 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından, 838 ha'lık rezerv alanın 475 ha'lık bölümü, Eskişehir'in deprenselliğinin önemli bir sorun olduğu belirtilerek, Gecekonduların Önleme Bölgesi ilan edilmiş ve Toplu Konut İdaresi Başkanlığı'na (TOKİ) devredilmiştir (Şekil 10). Ardından Bakanlığın İlk Evim İlk Arsam projesi kapsamında hak sahiplerine teslimi yapılmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024; Uçak, 2024; 2025; İhlas Haber Ajansı, 2025).



Şekil 10: Eskişehir-Kocakır Eko-kent yerleşim modeli (Eskişehir.net, 2025)

Özetle, Türkiye’de Eko-kent modelinin hayata geçirilmesi çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamada kritik bir adım olacaktır ve buna ilişkin önemli girişimler mevcuttur. Bununla birlikte bu modelin başarısı, devletin, yerel yönetimlerin, özel sektörün ve halkın iş birliğiyle şekillendirilecek politikalarla mümkündür. Ekolojik dengeyi gözetken, sürdürülebilir, dirençli, düşük/sıfır karbonlu ve enerji verimli kentler inşa etmek, Türkiye’nin geleceği için önemli fırsatları beraberinde getirecektir.

4. Sonuç ve Öneriler

Dünya’nın en hızlı kentsel oranlarına sahip bölgelerinden biri olan Avrupa’da kentlerin enerji tüketimi, sera gazı emisyonları ve doğal kaynak kullanımları giderek artmaktadır. Eurostat verilerine göre, AB’nin toplam nüfusunun %75’ten fazlası kentlerde yaşamaktadır ve bu oranın 2050 yılına kadar %80’in üzerine çıkması beklenmektedir. Bu durum, kentlerin sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğine uyum ve dirençlilik konularında daha büyük bir sorumluluk üstlenmesini gerektirmektedir. AB’deki bu eğilim, sürdürülebilir kentsel politikalarının geliştirilmesini ve özellikle Eko-kent modelinin yaygınlaştırılmasını beraberinde getirmektedir.

AB’nin 2050 yılına kadar iklim-nötr olma hedefi, 2019 yılında AYM ile somut bir politika çerçevesine oturtulmuştur. Söz konusu hedef, özellikle kentsel politikalarını ve kentsel dönüşüm projelerini yeniden şekillendirmiştir. Bu bağlamda, Eko-kent yaklaşımı, iklim-nötr hedefine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada başlangıçta belirtilen araştırma soruları kapsamında, AB’nin kentsel politikalarının evrimi ve AYM bağlamında Eko-kent yaklaşımının katkısı incelenmiş ve bu kentsel modelinin Türkiye kentlerine uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

AB, 1992 Maastricht Anlaşması’ndan itibaren sürdürülebilir kalkınma ve çevrenin korunmasını kentsel politikalarının merkezine yerleştirmiş, ancak 2019’da açıklanan AYM ile kentsel politikalar bağlamında çok daha iddialı bir süreç başlatmıştır. AYM’de kentlerin, iklim-nötr dönüşüm sürecinde merkezi bir rol üstlenmesi öngörülmektedir. AYM, AB kentlerini 2050’ye kadar karbon-nötr hale getirmeyi amaçlamakta ve enerji verimliliği, temiz ulaşım, döngüsel ekonomi gibi temel unsurlara dayanan AB Eko-kent modelini desteklemektedir. Bu çerçevede, AB kentlerinde akıllı ulaşım, enerji verimliliği, yeşil altyapı ve döngüsel ekonomi gibi konuları içeren bütüncül planlama stratejileri geliştirilmektedir.

AB’de halihazırda hayata geçirilen Eko-kent projeleri, karbon salınımı azaltma, enerji etkinliğini artırma ve kentsel yaşam kalitesini iyileştirme konularında önemli kazanımlar sağlamıştır (Bottero vd., 2019; Bramly, 2024). Tübingen (Almanya), Trinitat Nova (Barselona, İspanya) gibi örnekler, dengeli yoğunluktaki ancak düşük emisyonlu kent yapılarının, temiz enerji ve doğal kaynak yönetimi ile nasıl bütünleştirilebileceğini göstermiştir (ECO-City, 2012; Gaffron vd., 2005). Hindistan gibi AB dışı ülkelerin kentlerinde benzer Eko-kent yaklaşımlarının uygulanması, bu modelin evrensel çözüm potansiyelini ortaya koymaktadır (European Union, 2019b). AB’deki başarılı uygulamalar, Türkiye’nin kentsel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşması için bir yol haritası oluşturabilecek niteliktedir.

Türkiye, 2053 net-sıfır emisyon hedefi ve Paris Anlaşması’na taraf olmasıyla yeşil kalkınma ve yeşil dönüşüm sürecini resmen başlatmış olup, kentsel süreçlerinde AB Eko-kent yaklaşımından faydalanması oldukça önemlidir. Bunun için On İkinci Kalkınma Planı gibi üst politika belgeleriyle temel sağlanmış ve farklı yerel yönetimlerce Eko-kent oluşturulması doğrultusunda girişimler yapılmıştır. Türkiye kentlerinde eko-kent modelinin uygulanabilmesi için Tablo 3’te belirtilen geleceğe yönelik politika önerilerinin hayata geçirilmesi oldukça önemlidir.

Tablo 3: Türkiye'de Eko-kent yaklaşımının geliştirilmesi için geleceğe yönelik politika önerileri

Politika Önerisi	Açıklama
Yerel Yönetimlerin Güçlendirilmesi	Yerel yönetimlerin beşerî, finansal ve teknik kapasitelerinin artırılması, sürdürülebilir kentleşme politikalarının uygulanmasında önemli bir adımdır (Peters & Fudge, 2008; De Duque, 2016; UN-Habitat, 2022). Avrupa'daki başarılı eko-kent projeleri, yerel yönetimlerin liderlik rolünü vurgulamaktadır (Gaffron vd., 2005; ECO-City, 2012).
Kentsel Planlama Süreçlerinde Bütünleşik Yaklaşım	Eko-kent ilkelerinin mekânsal planlama süreçleriyle bütünleştirilmesi, Türkiye'deki kentlerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını kolaylaştıracaktır. Bu kapsamda kentsel planlamada yeşil altyapıların geliştirilmesine, pasif enerji ve yenilenebilir enerji kullanımına öncelik verilmelidir (Bibri, 2020; Kenworthy, 2020).
Kentsel Dönüşüm	Türkiye kentlerinde gerçekleştirilen kentsel dönüşüm faaliyetleri Eko-kentleşme için önemli bir fırsat olarak değerlendirilmeli ve yeni oluşturulan yerleşimlerde Eko-kent kriterleri sağlanmalıdır (Tuğaç & Dalır, 2023).
Sürdürülebilir Altyapı Yatırımlarının Artırılması	Eko-kent modelinin temel bileşenlerinden biri, çevreye duyarlı ve enerji verimli kentsel altyapıların inşa edilmesidir (Merk vd., 2012; Bibri, 2020; Kenworthy, 2020). Türkiye kentlerinde su yönetimi, kanalizasyon sistemleri ve elektrik şebekeleri gibi kritik altyapıların iklim değişikliği etkilerine dirençli ve enerji verimli hale getirilmesi elzemdir.
Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı	Kentlerin ekolojik ve sürdürülebilir gelişimi için yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması önemli faydalar sağlamaktadır (Kiani vd., 2023; Skandalos vd., 2023; Bâk & Sompolska-Rzechuła, 2024; Bauermann vd., 2024). Bu kapsamda kentlerde güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kent altyapısında etkin bir şekilde kullanılması teşvik edilmelidir. Özellikle binaların çatılarında güneş enerjisi panelleri kullanımı gibi uygulamaların yaygınlaştırılmasına dönük mevzuat ve teknik altyapı sağlanmalıdır.
Yeşil Binaların Yaygınlaştırılması	Eko-kentlerde binalarda enerji verimliliğinin sağlanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, ekolojik ayak izini azaltmak ve düşük/sıfır karbon amaçlarına erişmek için temel bir gerekliliktir (Akıncı & Pouya, 2019; Bibri, 2020; World Green Building Council, 2025). Türkiye'de bu kapsamda geliştirilmiş olan YeS-TR gibi ulusal yeşil bina sertifikalarının yaygınlaştırılmasıyla, kentlerde çevre ve iklim dostu yapılar teşvik edilmelidir (Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023).
Yeşil Çatılar ve Duvarlar	Eko-kent kriterleri doğrultusunda sürdürülebilir ve dirençli kentler için kentlerdeki binaların çatılarında ve dış duvarlarında yeşil alanlar oluşturulması önemli bir stratejidir (Akıncı & Pouya, 2019; Williamson, 2024). Bu uygulama, çevreye katkı sağlarken, aynı zamanda Türkiye kentlerinde farklılaşan ısıtma ve soğutma döngülerini dengeleyecektir.
Sıfır Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi	Eko-kentlerin başarılı olabilmesi için atık yönetimi ve kaynakların verimli kullanımı kritik önemdedir (Bibri, 2020; European Parliament, 2024). Belediyeler, sıfır atık yönetimi sistemini benimsemeli, geri dönüşüm oranlarını artırmalıdır. Her evde geri dönüşüm kutuları sağlanmalı ve atık ayrıştırma konusunda farkındalık çalışmaları yapılmalıdır. Atıkların yeniden işlenmesi ve ekonomik değeri olan hammaddeye dönüştürülmesi teşvik edilmelidir. Bu hususlar çevreyi korurken, kent ekonomisine de fayda sağlayacaktır.
Sürdürülebilir Ulaşım Sistemlerinin Geliştirilmesi	Kentlerde sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi için elektrikli/alternatif yakıtlı otobüsler ve tramvay hatları gibi çevre dostu toplu taşıma araçları yaygınlaştırılmalıdır. Ayrıca bisiklet yolları ve yaya yolları oluşturulmalı, vatandaşlar daha sağlıklı ve çevre dostu ulaşım türlerini kullanmaları yönünde teşvik edilmelidir. Elektrikli araçlar için şarj istasyonları ve gerekli diğer altyapılar kurulmalıdır (Bibri, 2020; Kenworthy, 2020).
Akıllı Su Yönetimi	Eko-kentler için su kaynaklarının verimli bir şekilde yönetilmesi, yağmur suyu toplama sistemleri ve atık su geri dönüşüm sistemlerinin kurulması gereklidir. Bu tür sistemler, kentlerde su kıtlığının önlenmesine ve su güvenliğine katkı sağlayacaktır (Bibri, 2020; Gates, 2023).
Yeşil Alanların Artırılması ve Biyoçeşitliliğin Korunması	Kent içinde büyük yeşil alanlar, yürüyüş yolları, bisiklet parkurları, kent ormanları ve doğal yaşam alanları oluşturulmalıdır (Kenworthy, 2020; Hergül & Göker, 2021). Böylece, hem karbon yutak alanlarının oluşturulması, hem doğal yaşam alanlarının korunması, hem de vatandaşların doğa ile iç içe bir yaşam sürmeleri sağlanabilecektir.
Uluslararası İş Birlikleri ve Fonlar	Eko-kent projelerinin hayata geçirilmesinde uluslararası iş birliklerinin sağlanması ve böylelikle finansal ve teknik destek sağlanması önemli bir stratejidir (Cotella & Rivolin, 2015). Türkiye, AB fonlarından ve uluslararası iş birliği mekanizmalarından yararlanarak Eko-kent projelerini finanse edebilir ve iyi uygulama örneklerinden yararlanabilir. Bu kapsamda Horizon Europe, LIFE Programı ve Katılım Öncesi Mali Yardım Aracı (IPA) gibi AB fonları, bu tür girişimler için önemli bir destek kaynağıdır (European Union, 2025; United Nations, 2025).
Eko-Kentlerin Planlanmasında Katılımcı Yaklaşım	Eko-kent projelerinin başarıya ulaşabilmesi için toplumun tüm kesimlerinin katılımı sağlanmalıdır (Casas vd., 2019). Kentsel planlama ve politika geliştirme süreçlerinde yerel halkın görüşlerine başvurulmalı, katılımcı demokrasi ilkeleri doğrultusunda kararlar alınmalıdır (Foth, 2018).
Farkındalık Geliştirme Çalışmaları	Eko-kentlerin başarılı bir şekilde hayata geçebilmesi için halkın ve diğer paydaşların sürece dahil edilmesi gerekmektedir. Ancak bunun öncesinde kentlilerin eko-kentlere neden ihtiyaç duyulduğuna ilişkin farkındalığını artırmaya yönelik eğitim programları ve kampanyalar düzenlenmesi bu süreçte kritik bir rol oynayacaktır (Middlemiss & Parrish, 2010; C40 CITIES, 2018).

Tablo 3'ün devamı

Politika Önerisi	Açıklama
Pilot Projeler ve Ölçeklenebilirlik	Ekolojik ve düşük karbonlu kentleşme süreçlerinde yerel yönetim çalışmalarından öğrenilen dersler önemli sonuçlar ortaya çıkarmakta ve diğer kentler için örnek teşkil etmektedir (Peters & Fudge, 2008; Zheng vd., 2021; Yang vd., 2022). Türkiye’de Eko-kent modellerini test etmek için pilot projeler hayata geçirilmelidir. Bu projelerden elde edilen veriler ışığında, başarılı uygulamalar diğer kentlere ölçeklendirilebilir.
Sosyal ve Ekonomik Sürdürülebilirlik	Eko-kentlerin sadece çevresel değil, sosyal ve ekonomik açıdan da sürdürülebilir olması gereklidir. Bu kapsamdaki temel stratejiler şunlardır (John, 2008; Bibri & Krogstie, 2020; Kenworthy, 2020): • Ekonomik Çeşitlenme ve İstihdam Fırsatları: Eko-kent projeleri, yerel ekonominin çeşitlenmesine katkı sağlamalı ve yeni istihdam fırsatları oluşturmalıdır. Örneğin, yeşil inşaat sektörünün desteklenmesi, eko-turizm ve çevre dostu ürünlerin üretimi gibi alanlarda istihdam artışı sağlanabilir. • Eşitlik ve Sosyal İlişkiler: Eko-kentlerde, gelir seviyesinden bağımsız olarak herkesin kaliteli yaşam koşullarına ulaşması sağlanmalıdır. Sosyal altyapı yatırımları ve toplum sağlığını iyileştirecek projeler bu bağlamda önemlidir.
Yeşil Finansman ve Teşviklerin Sağlanması	Eko-kent projelerinin hayata geçmesi için ulusal ve yerel finansman kaynaklarının da oluşturulması gerekmektedir. Bu kapsamda ele alınabilecek temel stratejiler şunlardır (Merk vd., 2012; Tang & Huang, 2024; United Nations Environment Programme, 2025): • Yeşil Tahviller ve Kamu-Özel Ortaklıkları: Yeşil projelere yönelik finansman sağlamak için yeşil tahviller ve kamu-özel sektör iş birlikleri kullanılabilir. • Vergi İndirimleri ve Teşvikler: Eko-kent yatırımları için vergi indirimleri ve teşvikler sağlanarak, çevre dostu teknolojilerin yaygınlaşması desteklenebilir.
İmar Mevzuatında Düzenlemeler Yapılması	Kentleşme politikalarının ekolojik yaklaşımla geliştirilmesi ve yerel yönetimlerin bu kapsamda teşvik edilmesi için yasal düzenlemelerin ve üst politika belgelerinin varlığı oldukça önemlidir (Reckien vd., 2018; Kociuba & Wajs, 2021; Otto vd., 2021). Bu doğrultuda, sürdürülebilir ve dirençli kentleşmeyi teşvik eden yasal düzenlemeler ilgili Kanun ve Yönetmelikler’de gerçekleştirilmelidir.
Teknoloji ve Yeniliklerle Veriye Dayalı Akıllı Eko-Kent Uygulamaları Geliştirilmesi	Eko-kentlerin temel ilkeleri ekolojik ayak izini azaltmaya dönük pek çok unsuru kapsarken, akıllı kent yaklaşımında ise yapay zekâ, nesnelerin interneti, büyük veri analitiği gibi gelişmiş teknolojilerin kullanımı esastır. Bu iki yaklaşımın bütünleşik olarak ele alınması daha fazla kentsel sürdürülebilirlik potansiyeli ortaya çıkaracaktır (Foth, 2018; Bibri, 2020; 2022; Bauermann vd., 2024). Bu doğrultuda oluşturulacak Eko-kentlerde, akıllı kent uygulamaları, enerji verimli yapılar ve yenilenebilir enerji kullanımı artırılmalıdır. Dijital kent yönetimi sistemleri ve veri tabanlı çözümlerle kentsel hizmetler optimize edilmelidir.

Bu çalışma, AB eko-kent modelinin Türkiye’de uygulanabilirliğini inceleyerek, Türkiye’nin yeşil dönüşüm ve karbon-nötr kent hedeflerine katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye’nin kentsel politikalarını yeniden şekillendirmesi ve AB ile uyumlu bir sürdürülebilir kentleşme stratejisi oluşturması için önemli bir yol haritası sunmaktadır.

Gelecekte yapılacak araştırmalar, Türkiye’deki büyükşehir belediyelerinin AB Eko-kent ilkelerini benimseme kapasitesini ve sürdürülebilir kent uygulamalarının etkinliğini daha ayrıntılı bir şekilde analiz edebilir. Ayrıca, Türkiye’nin yeşil finansman olanaklarını nasıl geliştirebileceği ve özel sektör iş birlikleriyle sürdürülebilir ve dirençli kentleşmeyi nasıl destekleyebileceği konularında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Türkiye’nin AB ile olan ekonomik ve politik bütünleşme sürecinde Eko-kent modelinin benimsenmesi, hem ulusal hem de uluslararası düzeyde çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Avrupa Birliği Başkanlığı. (2024, Haziran 11). *Avrupa yeşil mutabakatı*. 1 Ocak 2025’te <https://www.ab.gov.tr/53729.html> adresinden alındı.
- Akıncı, İ., & Pouya, S. (2019). The eco-city proposal as a sustainable city model. *Türkiye Peyzaj Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 96–107.
- Aliyeva, N. (2019). *Eco-city planning and design criteria – Assessment of Kocakır, Eskişehir project* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Avrupa Komisyonu. (2024, Ekim 30). *AB genişleme politikasına ilişkin 2024 bildirimi: 2024 Türkiye raporu*. 18 Ocak 2025’te https://www.ab.gov.tr/siteimages/birimler/kpb/2024_trkiye_report_tr.pdf adresinden alındı.
- Azmut360. (2019). *Instal·lació per a l’Autoconsum a l’Institut Escola Trinitat Nova, Barcelona*. Retrieved March 18, 2025, from <https://azmut360.coop/projectes/autoconsum-a-l-institut-escola-trinitat-nova-barcelona/?privacy=updated>
- Bak, I., & Sompolska-Rzechuła, A. (2024). Urban development and sustainable energy in EU countries. *Sustainability*, 16(14), Article 6107. <https://doi.org/10.3390/su16146107>
- Başar, Ö. (2019). *Yaşanabilir kente katkısı bağlamında eko-kentler: Bursa/Nilüfer belediyesi eko-kent projesi örneği* [Yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Bauermann, B. F. C., Bussador, A., Bauermann, H. B., & Matrakas, M. D. (2024). Connecting the green to the digital: Integrating eco cities and smart regions. *Eco-Cities*, 5(1), Article 2755. <https://doi.org/10.54517/ec.v5i1.2755>

- Bibri, S. E. (2020). The eco-city and its core environmental dimension of sustainability: green energy technologies and their integration with data-driven smart solutions. *Energy Informatics*, 3, Article 4. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-00107-7>
- Bibri, S. E. (2022). Eco-districts and data-driven smart eco-cities: Emerging approaches to strategic planning 1” design and spatial scaling and evaluation by technology. *Land Use Policy*, 113, Article 105830. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105830>
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2020). Smart eco-city strategies and solutions for sustainability: the cases of Royal Seaport, Stockholm, and Western Harbor, Malmö, Sweden. *Urban Science*, 4(1), Article 11. <https://doi.org/10.3390/urbansci4010011>
- Bottero, M., Caprioli, C., Cotella, G., & Santangelo, M. (2019). Sustainable cities: A reflection on potentialities and limits based on existing eco-districts in Europe. *Sustainability*, 11, Article 5794. <https://doi.org/10.3390/su11205794>
- Bramly, E. (2024, July 30). *Top 10 sustainable cities in Europe: Examples and insights*. Retrieved March 19, 2025, from <https://thinkz.ai/top-10-sustainable-cities-europe/>
- Bursa'da Bugün. (2022, Ağustos 30). *Ekokent İmar Planı askıya çıktı, Görükleliler ikiye bölündü!* 18 Mart 2025'te <https://www.bursadabugun.com/haber/ekokent-imar-planı-askıya-çikti-gorukleliler-ikiye-bolundu-ozel-haber-1540400.html> adresinden alındı.
- Bursaport. (2022, Mayıs 12). *Nilüfer'in 'Ekokent' Projesi bir kez daha onaylandı*. 18 Mart 2025'te <https://www.bursaport.com/belediye/nilufer-in-ekokent-projesi-bir-kez-daha-onaylandi-123341> adresinden alındı.
- Butt, T. E., Gouda, H. M., Baloch, M. I., Paul, P., Javadi, A. A., & Alam, A. (2014). Literature review of baseline study for risk analysis — The landfill leachate case. *Environment International*, 63, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.015>
- C40 CITIES. (2018, May). *Raising awareness of sustainability in an urban society*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.c40.org/case-studies/raising-awareness-of-sustainability-in-an-urban-society/>
- Casas, L., Scorza, F., & Murgante, B. (2019). *New urban agenda and open challenges for urban and regional planning*. Retrieved March 18, 2025, from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92099-3_33
- Chaudhary, S. (2022, March 21). *Tübingen: Europe's fiercely vegan, fairy-tale city*. Retrieved March 18, 2025, from <https://www.bbc.com/travel/article/20220320-tbingen-europes-fiercely-vegan-fairy-tale-city>
- Chodkowska-Miszczuk, J. M., & Lewandowska, A. (2024). Cities facing the European green deal: Urban policy and locals' perspective in the post-socialist area. *Environmental Science & Policy*, 159, Article 103823. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103823>
- Clark, G., Moonen, T., & Nunley, J. (2018, October 31). *The story of your city: Europe and its urban development, 1970 to 2020*. European Investment Bank. Retrieved January 18, 2025, from <https://www.eib.org/en/essays/the-story-of-your-city>
- Cotella, G., & Rijovin, U. J. (2015). *Transferring 'good' territorial governance across Europe: opportunities and barriers*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315716220-27/transferring-good-territorial-governance-across-europe-opportunities-barriers-giancarlo-cotella-umberto-janin-rivolin>
- Council of Europe. (2008, May 29). *European urban charter II: Manifesto for a new urbanity*. Retrieved December 12, 2024, from <https://rm.coe.int/168071a1b5>
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative and mixed methods approaches (4th ed.)*. SAGE.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2013, Eylül 27). *Bakanlıkça Eskişehir'de yeni bir yaşam alanı ilan edildi*. 19 Mart 2025'te <https://eskisehir.csb.gov.tr/bakanlikca-eskisehirde-yeni-bir-yasam-alani-ilan-edildi.-haber-10109> adresinden alındı.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Eskişehir ili Odunpazarı ilçesi aşağı çağlan ve Kayapınar mahalleleri 1 no'lu gecekondulu önleme bölgesi 1/100.000 ölçekli çevre düzeni planı plan değişikliği açıklama raporu*. 19 Mart 2025'te https://webdosya.csb.gov.tr/db/mpgm/icerikler/100000_cdp_rapor_eskisehir_acaglan2_240328_114920-20240503142742.pdf adresinden alındı.
- De Duque, S. H. (2016). *The role of local governments in sustainable urbanisation*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.urbanet.info/local-governments-sustainable-urbanisation/>
- Doğru, N. (2019, Ağustos 30). *Eskişehir Kocakır Projesi*. 19 Mart 2025'te <https://www.ecobuild.com.tr/post/2019/08/30/eski%C5%9Fehir-kocak%C4%B1r-projesi> adresinden alındı.
- ECOBUILD. (2020). *ECOBUILD'in yaptığı Türkiye'nin ilk yeşil planlama ve şehircilik projesi Eskişehir Kocakır*. 19 Mart 2025'te <https://www.youtube.com/watch?v=kF8znHZtJQk&lc=UgzANf1DngbrswyXhtR4AaABAg> adresinden alındı.
- ECO-City. (2012). *Urban development towards appropriate structures for sustainable transport final report*. Retrieved January 2, 2025, from http://www.rma.at/sites/new.rma.at/files/ECOCITY%20%20_%20Final%20Report.pdf
- Ecocity Standards. (2022). *Assessing and guiding progress towards ecologically healthy cities*. Retrieved January 2, 2025, from <https://ecocitystandards.org/>
- Emlak Kulisi. (2015, Şubat 3). *Nilüfer Eko-Kent projesi oy çokluğuyla kabul edildi!* 18 Ocak 2025'te <https://emlakkulisi.com/nilufer-eko-kent-projesi-oy-cokluguyla-kabul-edildi/341701> adresinden alındı.
- Erbay, Y., Arapgirlioglu, K., & Alataş, Z. (2023). *Yenilenen Avrupa kentsel şartı ve belediyeler*. Marmara Belediyeler Birliği Kültür Yayınları.
- Eskişehir.net. (2024, Eylül 28). *TOKİ Kocakır hak sahiplerinden Kurt'a tepki: 150 m2'den villa mı olur?* 19 Mart 2025'te https://www.eskisehir.net/toki-kocakir-hak-sahiplerinden-kurta-tepki-150-m2den-villa-mi-olur?fbclid=IwY2xjawJHb_JleHRuA2FlbQIxMAABHb1209aN_aJ39t9rjmepgeuuna9_qrPZhjp86X07Db21av6a1rQ14WkA_aem_1cWHYFm0uru9ySTi1MyKEw adresinden alınmıştır.
- European Commission. (2020, July 3). *Urbanisation in Europe*. Retrieved December 12, 2024, from https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/continuing-urbanisation/urbanisation-europe_en
- European Commission. (2025a). *The European green deal*. Retrieved January 12, 2025, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Commission. (2025b). *Smart cities marketplace: Investing in a sustainable and green urban future*. Retrieved January 12, 2025, from <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/>
- European Commission. (2025c). *Nations-common goals for a sustainable future*. Retrieved January 12, 2025, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/sustainable-development-goals/eu-and-united-nations-common-goals-sustainable-future_en#:~:text=In%20September%202015%2C%20at%20the,people%20enjoy%20peace%20and%20prosperity

- European Commission. (2025d). *The European green deal: A growth strategy that protects the climate*. Retrieved January 12, 2025, from <https://ec.europa.eu/stories/european-green-deal/>
- European Commission. (2025e). *The European green deal: A growth strategy that protects the climate*. Retrieved January 12, 2025, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/story-von-der-leyen-commission/european-green-deal_en
- European Commission. (2025f). *Mobility strategy*. Retrieved January 12, 2025, from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en
- European Commission. (2025g). *EU mission: Climate-neutral and smart cities*. Retrieved January 22, 2025, from https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en
- European Commission. (2025h). *Zero pollution action plan*. Retrieved January 22, 2025, from https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en
- European Environment Agency. (2023, April 14). *How can cities transform to become more sustainable?* Retrieved December 22, 2024, from <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/urban-sustainability/how-can-cities-transform-to-become-more-sustainable>
- European Union. (2006, January 11). *Thematic strategy on the urban environment*. Retrieved January 22, 2025, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM:l28171&frontOfficeSuffix=%2F>
- European Union. (2013). *ECO-City*. Retrieved January 10, 2025, from <https://www.ecocity-project.eu/>
- European Union. (2019a). *About the partnership*. Retrieved January 10, 2025, from <https://www.cecp-eu.in/>
- European Union. (2019b). *About the program*. Retrieved January 11, 2025, from <https://www.cecp-eu.in/resource-center/post/eco-cities/home>
- European Union. (2019c). *More about the program*. Retrieved January 11, 2025, from <https://www.cecp-eu.in/resource-center/post/eco-cities/about>
- European Union. (2019d). *Eco-cities India program*. Retrieved January 10, 2025, from <https://www.cecp-eu.in/uploads/documents/ecocities/Eco-cities%20India%20Program%20Brochure.pdf>
- European Union. (2024). *Eco-cities India program: More about the program*. Retrieved January 10, 2025, from <https://www.cecp-eu.in/resource-center/post/eco-cities/about>
- European Union. (2025). *The urban agenda for the EU*. Retrieved January 13, 2025, from <https://www.urbanagenda.urban-initiative.eu/urban-agenda-eu>
- European Parliament. (2024, March 21). *Sustainable waste management: what the EU is doing*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180328STO00751/sustainable-waste-management-what-the-eu-is-doing>
- Eurostat. (2021, May 20). *Population projections: urban growth, rural decline*. Retrieved December 13, 2024, from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210520-1>
- Eurostat. (2024, July 11). *EU population increases again in 2024*. Retrieved January 3, 2025, from <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240711-1>
- Fedeli, V. (2015). EU urban agenda: An open and complex debate. *The Planning Review*, 50(4), 71-77.
- Foth, M. (2018). Participatory urban informatics: towards citizen-ability. *Smart and Sustainable Built Environment*, 7(1), 4-19. <https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2017-0051>
- Gaffron, P., Huismans, G. & Skala, F. (2005). *Ecocity book I: A better place to live*. Oekostadt. Retrieved December 23, 2024, from https://www.oekostadt.at/root/img/pool/files/book_1.pdf
- Gaffron, P., Huismans, G. & Skala, F. (2008). *Ecocity book II: How to make it happen*. Gea21. Retrieved January 23, 2025, from <https://www.gea21.com/archivo/ecocity-book-ii-how-to-make-it-happen/>
- Gates, E. G. (2023). *10 Most sustainable cities: Leaders in water management practices*. Retrieved March 19, 2025, from <https://tappwater.co/en-us/blogs/blog/10-sustainable-cities-water-management?srsId=AfmBOoqDmaNX6ExA0a0xqnbiLLiZSI88cxsIvhYg9Qdf06sgfoFq7QPM>
- Hergül, Ö. C., & Göker, P. (2021). Evaluating Eco-Cities with a sustainable perspective in human-nature interaction. *European Journal of Science and Technology*, 21, 561–567. <https://doi.org/10.31590/ejosat.822062>
- Hurtado, S.G. (2021). *A green deal for the urban age: A new role for cities in EU climate action*. Retrieved December 13, 2024, from https://www.cidob.org/sites/default/files/2024-07/25-38_SONIA%20DE%20GREGORIO%20HURTADO_ANG.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- İhlas Haber Ajansı. (2025, Şubat 13). *AK Parti İl Başkanı Albayrak'tan Başkan Ünlüce'nin 'Rezerv Alanı' sözlerine tepki*. 19 Mart 2025'te <https://www.ihb.com.tr/eskisehir-haberleri/ak-parti-il-baskani-albayraktan-baskan-unlucenin-rezerv-alani-sozlerine-tepki-191135549> adresinden alındı.
- Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26, 38–52. <https://doi.org/10.1177/0739456X05285119>
- John, D. (2008). Opportunities for economic and community development in energy and climate change. *Economic Development Quarterly*, 22(2), 107–111. <https://doi.org/10.1177/0891242408315579>
- Kaya, Y. (2024, Nisan 25). *Nilüfer'deki 590 hektarlık dev planla ilgili flaş iptal kararı!* 18 Mart 2025'te <https://www.baskagazete.com/yazarlar/yaman-kaya-1/nilufer-deki-590-hektarlik-dev-planla-ilgili-flas-iptal-karari-1077.html> adresinden alındı.
- Kenworthy, J. R. (2020). *Ten key dimensions for eco city development in theory and practice*. Retrieved March 18, 2025, from https://www.isocarp-institute.org/wp-content/uploads/2020/08/Review12_Ten-key-Dimensions-for-Eco-City-Development.pdf
- Kiani, H., Najafi, M., Gharibvand, H., Nazari, M. H., Gharehpetian, G. B., & Hossienian, S. H. (2023). *Optimal design and economic comparison of a hybrid energy system in Iran and Switzerland with sensitivity analysis*. Retrieved March 19, 2025, from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10459308>

- Kociuba, D., & Wajs, K. (2021). *Impact of the implementation of EU, national and local policies and legislation on the transition towards eco-cities in Poland*. Retrieved March 19, 2025, from <https://apcz.umk.pl/BGSS/article/view/34882>
- Lehmann, S. (2010). Green urbanism: Formulating a series of holistic principles. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, 3(2), 1–10.
- Merk, O., Saussier, S., Staropoli, C., Slack, E., & Kim, J. H. (2012). *Financing Green Urban Infrastructure*, OECD Publishing.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024, Eylül). *Türkiye 2024 yılı erken iklim değerlendirmesi*. 12 Ocak 2025'te <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2024-iklim-raporu.pdf> adresinden alındı.
- Middlemiss, L., & Parrish, B. D. (2010). Building capacity for low-carbon communities: The role of grassroots initiatives. *Energy Policy*, 38(12), 7559–7566. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.003>
- Mimarizm. (2016, Kasım 8). *İTÜ'den Eskişehir'e Süper Kent Projesi*. 19 Mart 2025'te https://www.mimarizm.com/haberler/gundem/itu-den-eskisehir-e-super-kent-projesi_127604 adresinden alındı.
- Net Zero Cities. (2025). *Meet the 112 mission cities paving the way to climate neutrality by 2030*. Retrieved January 3, 2025, from <https://netzerocities.eu/mission-cities/>
- Nilüfer Belediyesi. (2013). *Bozbey sert çıktı: "Eko Kent'i kasıtlı bekletiyorlar"*. 18 Ocak 2025'te <https://www.nilufer.bel.tr/haber/bozbey-sert-cikti-eko-kent-i-kasitli-bekletiyorlar> adresinden alındı.
- Nilüfer Belediyesi. (2015). *Nilüfer Eko-kent Projesi, 1/1000 ölçekli uygulama imar plan raporu ve hükümleri*. 18 Ocak 2025'te https://www.nilufer.bel.tr/dosya_yoneticisi/icerik/ekokent.pdf adresinden alındı.
- NYU Abu Dhabi Library. (2025). *Literature reviews in the social sciences*. Retrieved March 17, 2025, from <https://guides.nyu.edu/litreviews>
- Otto, A., Kern, K., Haupt, W., Eckersley, P., & Thieken, A. (2021). Ranking local climate policy: assessing the mitigation and adaptation activities of 104 German cities. *Climatic Change*, 167, Article 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03142-9>
- Özcan, K. (2012). Sürdürülebilir kent modeli, sürdürülebilir kentsel gelişme. In Melih Ersoy (Ed.), *Kentsel Planlama Ansiklopedik Sözlük*. Ninova Yayıncılık.
- Peters, M., & Fudge, S. (2008). *Motivating individual carbon reduction through local government-led community initiatives in the UK*. Retrieved March 19, 2025, from http://www.score-network.org/files/24121_CF2_session_3-4.pdf#page=20S
- Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J.M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., d'Alonzo, V., Foley, A., Simoes, S. G., Lorencová, E. K., & Orru, H. (2018). How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *Journal of Cleaner Production*, 191, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.220>
- Sessa, M. R., Russo, A., & Sica, F. (2022). Opinion paper on green deal for the urban regeneration of industrial brownfield land in Europe. *Land Use Policy*, 119, Article 106198. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106198>
- Skandalos, N., Kapsalis, V., Ma, T., & Karamanis, D. (2023). Towards 30% efficiency by 2030 of eco-designed building integrated photovoltaics. *Solar*, 3(3), 434–457. <https://doi.org/10.3390/solar3030024>
- Socotec. (2019). *Masterplan for the redevelopment Trinitat Nova, Nou Barris district*. Retrieved March 18, 2025, from <https://www.socotec.es/en/client-project/masterplan-redevelopment-trinitat-nova-nou-barris-district>
- Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *On İkinci Kalkınma Planı*. Strateji ve Bütçe Başkanlığı. 19 Mart 2025'te https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf adresinden alındı.
- Suzuki, H., Dastur, A., Moffatt, S., Yabuki, N., & Maruyama, H. (2010). *Eco2 Cities*. The World Bank.
- Tang, J., & Huang, K. (2024). Eco-cities of tomorrow: how green finance fuels urban energy efficiency—insights from prefecture-level cities in China. *Energy Informatics*, 7, Article 148. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00455-8>
- T.C. Resmî Gazete. (2021, Ekim 7). *Milletlerarası antlaşma*. 23 Aralık 2024'te <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/10/20211007M1-1.pdf> adresinden alındı.
- Terzi, F., Ocakçı, M., Yılmaz, Z., Türkoğlu, H., Okumuş, G., Gürler, E. E., Madanoğlu, T. O., Tanık, A., Güven, H., Böke, Y. E., Gerçek, H., Erkan, M., & Bağrıyanık, M. (2016). Ekolojik yerleşme planlaması ve tasarımı: Eskişehir Kocakır rezerv yapı alanı örneği. *Kentli Dergisi, Temmuz, Ağustos, Eylül*(2016), 79–82.
- Ticaret Bakanlığı. (2021). *Yeşil Mutabakat Eylem Planı*. 23 Aralık 2024'te <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf> adresinden alındı.
- Ticaret Bakanlığı. (2023). *AB SKDM bilgi notu*. 23 Aralık 2024'te <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/ab-sinirda-karbon-duzenleme-mekanizmasi/ab-skdm-bilgi-notu> adresinden alındı.
- Trading Economics. (2025). *European Union-Urban population*. Retrieved January 3, 2025, from <https://tradingeconomics.com/european-union/urban-population-percent-of-total-wb-data.html>
- Tuğaç, Ç., & Dalır, B. M. (2023). Kentlerde iklim değişikliğiyle mücadelede kentsel dönüşümün rolü ve Türkiye için yaklaşımlar. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25, 21–42. <https://doi.org/10.26745/ahbvuiibf.1363627>
- Uçak, A. K. (2024, Mayıs 31). *"Süper kent" oldu süper yalan!* 19 Mart 2025'te <https://www.eskisehir.net/super-kent-oldu-super-yalan> adresinden alınmıştır.
- Uçak, A. K. (2025, Şubat 14). *Büyükşehir'in rezerv alan mücadelesine bilirkisiden olumsuz yanıt!* 19 Mart 2025'te <https://www.eskisehir.net/buyuksehirin-rezerv-alan-mucadelesine-bilirkisiden-olumsuz-yanit> adresinden alındı.
- United Nations. (2017). *New urban agenda, Habitat III*. United Nations.
- United Nations. (2025). *Urban agenda for the EU*. Retrieved January 23, 2025, from <https://sdgs.un.org/partnerships/urban-agenda-eu>
- United Nations Environment Programme. (2025). *Green financing*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.unep.org/regions/asia-and-pacific/regional-initiatives/supporting-resource-efficiency/green-financing>
- UN-Habitat. (2022). *Unions of municipalities as enablers of local economic development*. Retrieved March 20, 2025, from <https://unhabitat.org/unions-of-municipalities-as-enablers-of-local-economic-development-urban-community-al-fayhaa>
- Williamson, J. (2024, August 20). *Green roofs and living walls: urban sustainability*. Retrieved March 19, 2025, from <https://www.jameswilliamson.archi/post/green-roofs-living-walls-urban-sustainability#:~:text=Benefits%20of%20Green%20Roofs%20and%20Living%20Walls&text=Green%20roofs%20and%20living%20walls%20provide%20habitats%20for%20various%20plant,natural%20habitats%20are%20often%20scarce.>

- World Green Building Council. (2025). *Green building: Improving the lives of billions by helping to achieve the UN Sustainable Development Goals*. Retrieved March 19, 2025, from <https://worldgbc.org/article/green-building-improving-the-lives-of-billions-by-helping-to-achieve-the-un-sustainable-development-goals/>
- Yalçın, S. (2019). *Bilimsel araştırma yöntemleri: Yöntem*. 17 Mart 2025'te https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/113496/mod_resource/content/0/konu6.pdf adresinden alındı.
- Yang, S., Wang, W., Feng, D., & Lu, J. (2022). Impact of pilot environmental policy on urban eco-innovation. *Journal of Cleaner Production*, 341, Article 130858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130858>
- Yavuz, N. (2022). Sosyal bilimlerde sistematik literatür analizi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 51(1), 347–360.
- Zheng, J., Shao, X., Liu, W., Kong, J., & Zuo, G. (2021). The impact of the pilot program on industrial structure upgrading in low-carbon cities. *Journal of Cleaner Production*, 290, Article 125868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125868>

Progressive Collapse Analysis of a Reinforced Concrete Structure Using the Enhanced Local Resistance (ELR) Method: A Comparison of UFC 4-023-03 and the Turkish Earthquake Code (TEC 2018)

Saffet Kılıçer^{1,*} 

¹Artvin Coruh University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 08100, Artvin.

Abstract

Disasters cause significant damage to structural elements in the affected regions throughout the service life of buildings. This damage typically manifests as the loss of structural elements or a reduction in load-bearing capacity. Many countries conduct research and publish regulations and analytical methods to minimize such damage. One of the primary references in this context is the UFC 4-023-03 guide, titled "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse," issued by the United States Department of Defense. This guide addresses the phenomenon where a structure experiences element loss due to various disasters, potentially leading to progressive collapse. The guide proposes three methodologies for assessing the progressive collapse resistance of structures: the Alternative Path method (AP), the Tie Force method (TF), and the Enhanced Linear Resistance method (ELR). In developing countries such as Türkiye, there are no specific regulations addressing the progressive collapse phenomenon. As a result, structures of critical importance are constructed without such provisions. In this study, a reinforced concrete building was analysed using the Enhanced Linear Resistance method, following the UFC 4-023-03 guidelines and the Turkish Earthquake Code (TEC). The objective is to identify the differences and commonalities between the UFC and the regulatory framework in Türkiye, where structures are not explicitly designed to resist progressive collapse. At the conclusion of the study, shear demand values of structural elements and other relevant parameters were comparatively presented.

Keywords

Progressive Collapse, UFC 4-023-03, TBDY-2018, Earthquake, Reinforced Concrete Structure, Disaster

Geliştirilmiş Yerel Dayanım (GLD) Yöntemi ile Betonarme Bir Yapının Aşamalı Göçme Analizi: UFC 4-023-03 ve Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Karşılaştırması

Özet

Afetler meydana geldikleri bölgede, yapıların hizmet süresi boyunca yapısal elemanlara büyük zarar vermektedirler. Bu zarar genellikle yapısal eleman kaybı ya da taşıma gücünün zayıflaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok ülke bu zararları asgari düzeye indirebilmek için çeşitli araştırmalar ve yönetmeliklerinde ifadeler ile analiz metotları yayınlamaktadırlar. Bunlardan ilki çeşitli afetler sonucu yapının eleman kaybıyla başlayan ve aşamalı göçme ile süreci tamamlanan/tamamlanmayan fenomen için Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığının yayınladığı UFC 4-023-03 'Design of Buildings to Resist Progressive Collapse' kılavuzudur. Kılavuz, yapıların aşamalı göçme direncini belirleyebilmek için Alternatif Yol metodu (AP), Bağ Kirişler metodu (BK) ve Geliştirilmiş Lineer Dayanım (GLD) metodudur. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise aşamalı göçme fenomenine ait bir düzenleme bulunmamaktadır. Bu tür ülkelerde kritik öneme sahip yapılar bu eksiklikle inşa edilmektedir. Bu çalışmada, betonarme bir yapı örneğinin Geliştirilmiş Lineer Dayanım yöntemi kullanılarak UFC 4-023-03 ile Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY2018) esas alınarak analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sayede Türkiye gibi yapıları aşamalı göçmeye karşı direnci bulunmayan ülkenin UFC ile arasındaki farklar ve ortak noktalar belirlenmiş olacaktır. Çalışma sonunda, yapı elemanlarının kesme talebi ve diğer parametreler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler

Aşamalı Göçme, UFC 4-023-03, TBDY-2018, Deprem, Betonarme Yapı, Afet

1. Introduction

Since the beginning of its existence, humankind has needed shelter to withstand natural conditions. In the early periods, although humans attempted to shelter in open spaces or caves, the necessity for enclosed spaces increased over time. By the present day, various construction materials and structural systems have been utilized to meet housing needs. Notably, with the emergence of concrete in the late 18th century and the construction of the first reinforced concrete structure in

1852, a solution was found to address humanity's demand for more durable and organized housing ([Batçim, 2025](#)). In the following years, concrete production and the construction of reinforced concrete structures rapidly increased worldwide, making concrete one of the primary building materials driving urbanization.

Reinforced concrete structures and their behaviour, one of the primary research areas in structural engineering, have long attracted the interest of researchers. Studies on their construction and load-bearing elements have increased over time. In recent years, particularly in Türkiye, regulations have been updated to address the impact of earthquakes—one of the most significant natural disasters—on reinforced concrete structures. Buildings in seismic regions are designed in accordance with the Turkish Earthquake Code ([T.C. Resmi Gazete, 2018](#)). Structural design engineers utilize TS 498 ([Turkish Standards Institute, 1997](#)): Design Loads for Buildings and TS 500 ([Turkish Standards Institute, 2002](#)): Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures in their design processes. Although regulations and standards provide realistic and accurate guidelines, reinforced concrete structures, like other construction materials, have both advantages and disadvantages. In particular, poor workmanship and low-quality materials significantly increase the level of damage sustained by structures exposed to earthquakes.

Disasters are not solely caused by natural events; human-induced disasters can also occur. The structural damage caused by such disasters began to gain attention after the 1950s and was introduced into the literature as progressive collapse. As the scale of human-induced disasters increases, structural elements experience a loss of load-bearing capacity, leading to instability in the structural system and an attempt to regain equilibrium. If the structure fails to re-establish balance or redistribute the load, localized or total collapse of the structural system may occur. Although this is not an imminent destruction, when it happens, it can result in significant political and economic losses for nations. The first documented example of progressive collapse occurred in 1968 at the Ronan Point apartment building in London. A gas explosion caused damage to the balcony and part of the kitchen, leading to a progressive collapse (Figure 1).



Figure 1: The Ronan Point disaster ([Hashemi, 2013](#))

Following the disaster at Ronan Point, researchers began investigating the concept of progressive collapse. Recognized as the first documented case of progressive collapse in the literature, the Ronan Point disaster prompted developed countries such as Canada, the United Kingdom, and the United States to incorporate the concept of progressive collapse into their structural design codes in subsequent years. However, beyond merely defining the phenomenon, analytical methods for progressive collapse were later included in guidelines published in the United States, such as the General Services Administration (GSA) "Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance" and the Unified Facilities Criteria (UFC 4-023-03) "Design of Structures to Resist Progressive Collapse". These guidelines recommend several analytical methods for progressive collapse assessment, including the Alternate Path (AP) Method, Tie Force (TF) Method, and Enhanced Linear Resistance (ELR) Method. The Alternate Path Method is based on load redistribution within the structural system, relying on plastic hinge formation in beams due to rotational deformations following the loss of a primary structural element. The Tie Force Method, on the other hand, is based on mechanically connecting structural components. This method involves separately calculating peripheral, internal, and vertical tie forces, which determine additional reinforcement requirements in columns, slabs, and beam-adjacent regions. The Enhanced Linear Resistance Method, which is also used in this study, is based on the shear force capacity of structural elements. However, research on the Enhanced Linear Resistance Method in the literature remains quite limited. [Zhang et al. \(2023\)](#) reported that fibre-reinforced polymer (FRP) strips have been widely used to retrofit existing reinforced concrete (RC) frame structures to enhance their resistance to progressive collapse. [Yuzbasi \(2024\)](#) presents an experimental and numerical study on the collapse behavior of a 60-meter-high cement silo structure subjected to blast loading.

The collapse mechanism was simulated using SAP2000 (FEM-NDA) and LS-DYNA (FEM-NDA with explicit code) models. Kılıçer (2025) investigated structures damaged by Ukrainian attacks using modern weapons such as UAVs and kamikaze drones during the Russia–Ukraine war, specifically in Russia’s Belgorod Oblast, within the context of progressive collapse. Hamad et al. (2021) examined the impact of the proposed method on progressive collapse resistance in multi-story reinforced concrete frames. To accurately model structural behavior and evaluate progressive collapse resistance under sudden column loss scenarios, they conducted dynamic nonlinear analysis following ASCE 41-17 (American Society of Civil Engineers, 2017a) and General Services Administration (2016) guidelines. Yuzbasi (2025) presents a study on the failure of a 63-meter-high (206 feet) reinforced concrete (RC) building subjected to blast loading followed by progressive column removals. The analysis encompasses the entire sequence, beginning with the detonation of the explosive charge and concluding with the building’s demolition. LS-DYNA was employed to simulate blast wave propagation and structural interaction, while SAP2000 was used to model the subsequent column removals. Both analyses focused on the most critically loaded columns at the base of the structure, using nonlinear dynamic analysis (NDA). Three explicit methods—Load Blast Enhanced (LBE), Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), and Coupling—were evaluated for their applicability. Although the LBE method is time-efficient, it presents challenges in accurately limiting the affected surface or volume. Shaheen et al. (2023) aimed to enhance frame resilience by improving the rotational capacity of connections. Their proposed method involved inserting a hollow steel sleeve with a predetermined wall curvature between a washer and an end plate. The effect of soil-structure interaction on the behavior of reinforced concrete structures was investigated by Kılıçer (2018). In addition to the rigid base assumption, the influence of subsoil was considered using both the Winkler and Vlasov models. Demir (2022) numerically investigated the progressive collapse response of reinforced concrete buildings designed for the 'government buildings' occupancy class. For this purpose, two reinforced concrete frame buildings were initially designed in accordance with the Turkish Earthquake Code (2018). Subsequently, their progressive collapse behavior was assessed using the Alternate Path Method, as defined in the GSA-2016 and UFC 4-023-03 guidelines. Three different column removal scenarios were independently examined through nonlinear dynamic analysis. Ozgan et al. (2023) considered soil-structure interaction in progressive collapse analyses. They analyzed a reinforced concrete school building under different soil conditions using a MATLAB (2018)-based interface with SAP2000 (2018). Yuzbasi & Arslan (2025) compared the Finite Element Method (FEM) and the Applied Element Method (AEM) in analyzing the progressive collapse (PC) behavior of a reinforced concrete (RC) structure. The novelty and significance of this study lie in its comprehensive investigation of the effects of slab thickness, slab type, and damping ratio on failure behavior across 54 different scenarios. These scenarios were generated by combining two analysis methods, six slab models, three slab thicknesses, and three damping ratios. A five-span, five-bay RC structure was analyzed using the SAP2000 and ELS software programs. Kılıçer (2024) compared progressive collapse responses of reinforced concrete and steel structures under various structural types and soil conditions using the Alternate Path Method. The plastic hinge formations from SAP2000 for this comparison are shown in Figure 2.

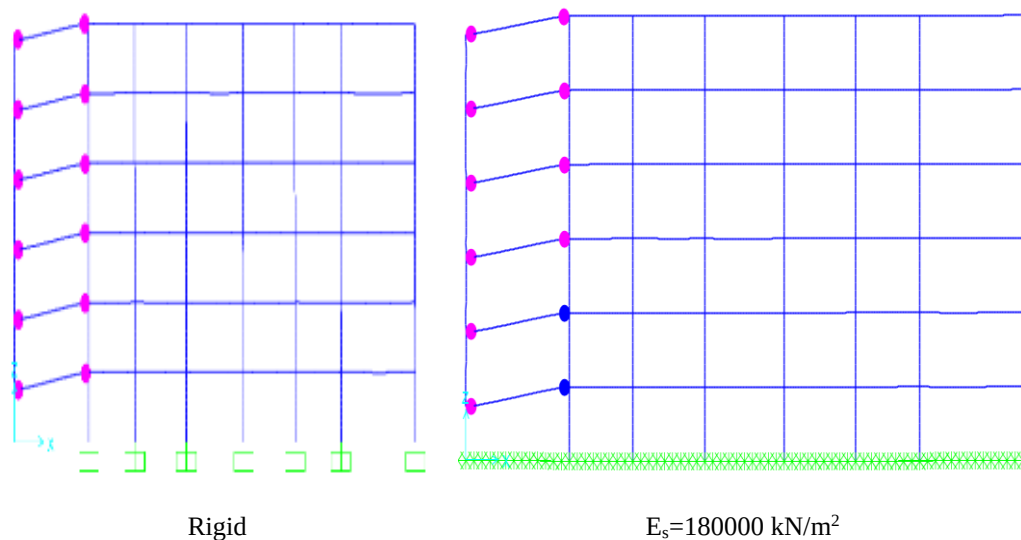


Figure 2: SAP2000 plastic hinge formation for Rigid and $E_s = 180,000 \text{ kN/m}^2$ conditions

To demonstrate the effectiveness of the proposed method, end plate connections with different sleeve parameters were numerically analysed using validated finite element models. The proposed system enhances the ductility and strength of the connection by 2.6 and 2.5 times, respectively, compared to standard connections. Additionally, without modifying the connection configuration, different ductile responses can be achieved depending on the sleeve parameters.

In this study, the progressive collapse resistance of a reinforced concrete structure was evaluated based on shear forces using Enhanced Linear Resistance method, as outlined in UFC 4-023-03 guideline. The results were presented comparatively using UFC 4-023-03 and Turkish Earthquake Code.

2. Methodology

In the literature, studies on progressive collapse using Enhanced Linear Resistance method are significantly fewer compared to other methods. This method, which has not received sufficient attention to date, is crucial for comparing shear forces and identifying deficiencies in structural designs across different countries. In this study, progressive collapse analysis of a reinforced concrete structure was conducted using Enhanced Linear Resistance method. The analyses were performed following the UFC 4-023-03 guideline and Turkish Earthquake Code. The methodologies used in this study are explained in detail in a sequential manner.

2.1. Enhanced Local Resistance

Enhanced Local Resistance method is one of the three progressive collapse analysis methods outlined in UFC guidelines. It produces element-based results by verifying the shear capacity of structural elements to develop a ductile failure mechanism. ELR aims to prevent shear failure before the structure reaches its flexural capacity. Therefore, shear force was selected as the most meaningful and direct parameter for comparison. This method applies to structures classified under Risk Categories II, III, and IV. However, if a structure has been designed with a specific threat scenario in mind, the application of this method is not required.

The LRFD approach is design Load and Resistance Factor Design for Enhanced Local Resistance. LRFD approach in UFC;

$$\phi R_n \geq R_u \quad (1)$$

ϕR_n , Design strength, ϕ , Strength reduction factor and shall be 1.0, R_n , Nominal strength, including over-strength factors, R_u , Required strength, shear demand shall be determined for the horizontal out-of-plane direction (i.e., perpendicular to the building perimeter façade). Columns at building corners or re-entrant corners shall be evaluated in both directions normal to building perimeter façade (U.S. Department of Defense, 2016).

Axial load (P_{axial}) of the selected column for ELR method is calculated. This axial load:

$$P_{axial} = N[1.2D + 0.5Q] \times \frac{L_{long}}{2} \times \frac{L_{short}}{2} \quad (2)$$

Is calculated as follows. P_{axial} represents axial load, N denotes the number of stories, D refers to the dead load, Q represents the live load, and L indicates the spans of the slabs connected to column. Thus, axial force of selected column is determined using Equation 2.

In UFC, required shear strength can be found using methods in plastic structural design references or in Table 4-4 of PDC TR-06-01 (U.S. Army Corps of Engineers, 2008): Methodology Manual for the Single-Degree-of-Freedom Blast Effects Design Spreadsheets (SBEDS). Re-arranging yields;

$$V_u = 7.5 \frac{M_n}{L} \quad (3)$$

Where, V_u , shear demand, M_n , Nominal flexural strength, accounting for axial load, L , column height. In UFC, shear capacity carried by concrete;

$$V_c = 2 \times \left(1 + \frac{N_u}{2000A_g}\right) \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (4)$$

V_c , shear capacity carried by concrete, N_u , axial load, A_g , gross area, f'_c , the concrete strength. In TEC, shear capacity carried by concrete (Doğangün, 2018);

$$V_{cr} = 0.65 \times f_{ctd} \times b \times d \times \left(1 + 0.07 \times \frac{N_d}{A_c}\right) \quad (5)$$

V_{cr} , shear crack resistance, f_{ctd} , Design tensile strength, N_d , axial load, A_c , cross-section area of concrete in a column. In UFC, shear force carried by the steel is

$$\phi(V_n) = \phi(V_c + V_s) \geq V_u \quad (6)$$

Where, V_u , shear demand, V_c , shear capacity carried by concrete, V_s , the shear force carried by the steel, Φ , strength reduction factor, V_n , Nominal shear force. In TEC, shear force carried by the steel is

$$V_r = V_c + V_w \geq V_d \quad (7)$$

Where, V_r , shear strength of the column, V_c , shear capacity carried by concrete, V_w , shear force carried by steel, V_d , design shear force.

The procedures followed in the study using Enhanced Local Resistance method are presented in Figure 3.

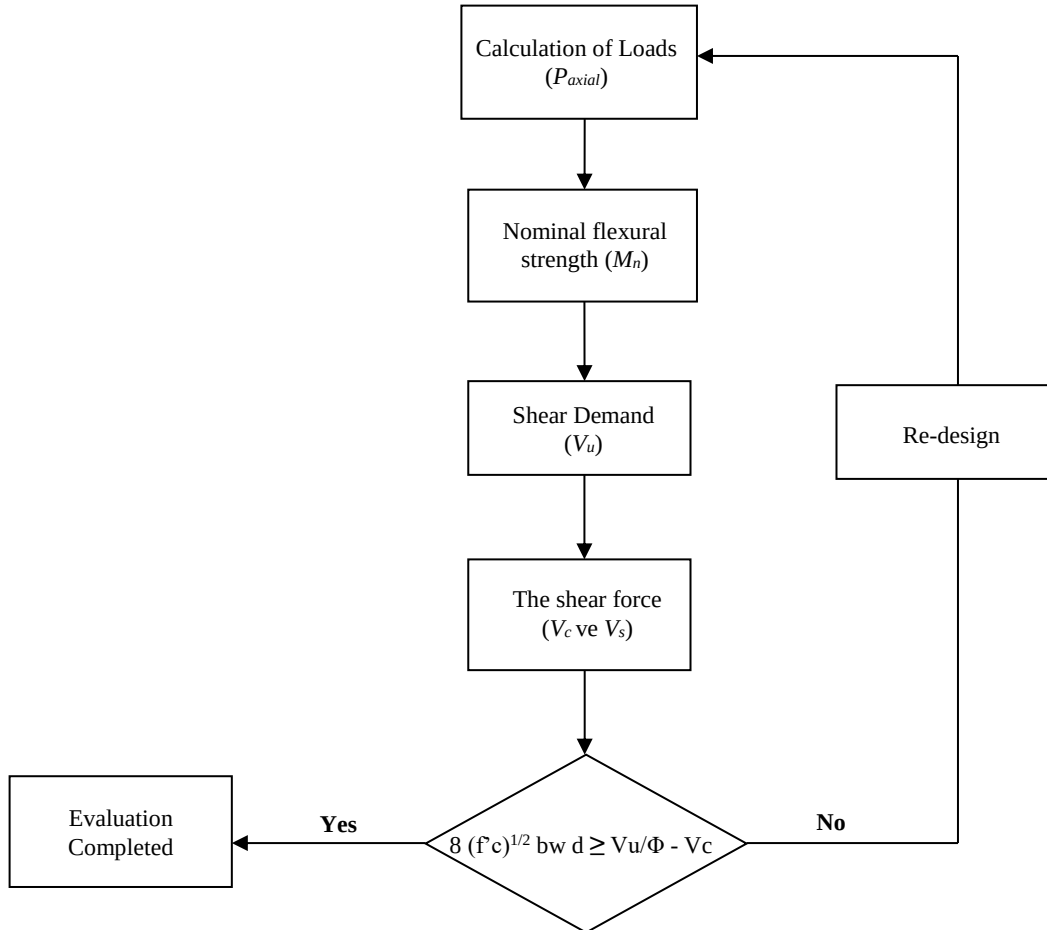


Figure 3: Flow diagram

This flowchart outlines the steps used to assess shear strength of a structural element. The process begins with the calculation of loads, where the vertical and horizontal loads acting on the element are determined to establish the fundamental values for further calculations. Following the load calculations, the nominal flexural strength of the element is determined. This step helps in evaluating the bending capacity of the element. Next, shear demand on the element is calculated, representing shear forces induced by applied loads. Once shear demand is established, the existing shear capacity of the element is assessed. In this step, the components contributing to shear resistance are considered to verify the element's design. Finally, a specific condition is checked to determine whether the shear capacity meets the design requirements. If the condition is satisfied, the evaluation is completed, and element is considered suitable. However, if condition is not met, redesign is necessary. In the redesign process, measures are taken to enhance element's shear strength, improving its load-carrying capacity. Once these modifications are made, steps in the flowchart are repeated to reassess the suitability of the element.

2.2. Turkish Earthquake Code

Countries design their structures by considering their own building codes and a set of guidelines. Each country develops its regulations based on its geographical conditions, material quality, and workmanship standards. For example, Eurocode 8 (European Committee for Standardization, 2024) includes tsunami loads, whereas countries like Türkiye do not have such a load definition in their regulations. This highlights the fact that building codes are tailored to the specific

geographical conditions of each country. In Türkiye, earthquakes are the primary natural disaster of concern. The Anatolian Plateau is located on an active fault line. Particularly, the 1999 Marmara Earthquake and the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes have served as constant reminders of the vulnerability of Türkiye's building stock and the importance of life safety.

In Türkiye, the seismic accelerations considered in structural design vary depending on the seismic zone where the structure will be built. The Türkiye Earthquake Hazard Map, which is designed to ensure the safe design of buildings and all other structures against earthquake effects, is presented in Figure 4.

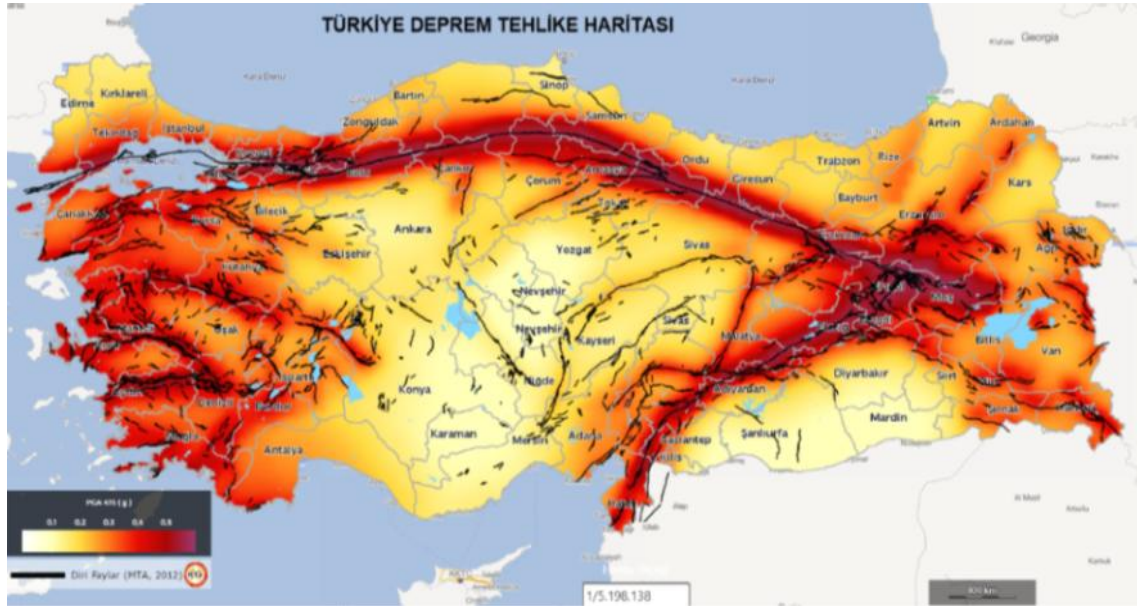


Figure 4: Earthquake hazard map of Türkiye (General Directorate of Disaster Affairs, 2019)

TS 498: Design Loads for Buildings, TS 500: Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures, and Turkish Earthquake Code are the regulations used in the design of reinforced concrete structures. However, since there is no specific regulation for progressive collapse analysis in Türkiye, the procedural steps from UFC 4-023-03 guideline were followed using TS 498, TS 500, and TEC 2018.

2.3. UFC 4-023-03

Currently, specialized analysis methods for progressive collapse are provided in UFC 4-023-03 and GSA guidelines. These analysis methods play a crucial role in understanding structural behavior following column loss and in assessing resistance to progressive collapse. In this study, UFC 4-023-03 "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse" guideline, frequently referenced in literature and published by the U.S. Department of Defense (2016), was utilized. This guideline provides engineers with both direct and indirect approaches and proposes three different analysis methods, as illustrated in Figure 5.

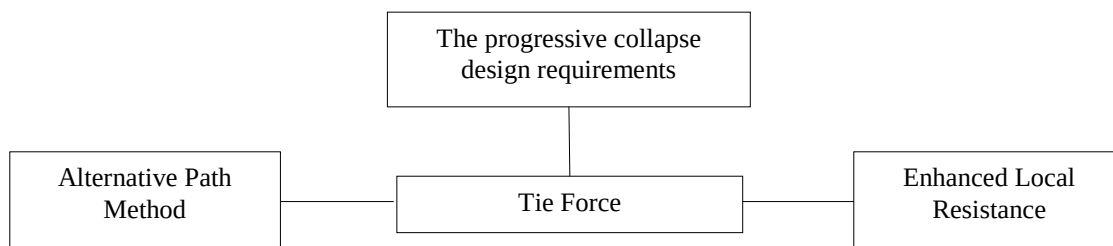


Figure 5: Progressive collapse design requirements

The first of these methods is Alternative Path method, which is based on the principle of continuous load redistribution and structural continuity. The second method is Tie Force method, which assumes mechanical connections between structural elements and aims to ensure sufficient tie forces between them. The final analysis method is Enhanced Local Resistance method, which is based on verifying shear strength of structural elements. In this study, Enhanced Local Resistance Method was used, as it is relatively less explored in the literature.

2.4. Reinforced Concrete Structure

The seven-story reinforced concrete structure has a slab thickness of 12 cm, column dimensions of 30×60 cm, and beam dimensions of 60 cm in width and 30 cm in depth. The concrete compressive strength is C25, while the reinforcement material is S420. The reinforced concrete model consists of three spans along both axes, with a story height of 3 meters for each floor. The structure is assumed to be fixed at the base, and soil effects are not considered. The building is symmetrical in both directions, with a total length of 16.20 meters. The live loads have been considered according to the building codes of each respective country. The formwork plan of the structure is presented in Figure 6.

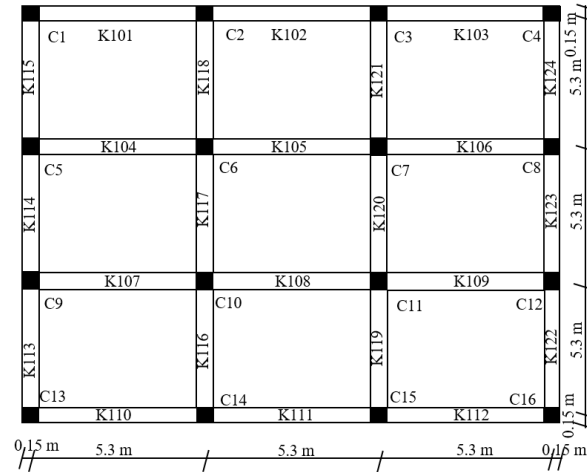


Figure 6: Formwork plan of 7-story reinforced concrete building

The concrete cover is 5 cm. The columns are reinforced with $3\phi 20$ rebars on each face, with three reinforcement bars per surface. Building is primarily used as an archive facility. Dead load has been calculated as 5.94 kN/m^2 . Live load has been considered as 7.2 kN/m^2 according to the ASCE 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017b) 7 kN/m^2 , and 5 kN/m^2 according to Turkish Earthquake Code and TS 498. The analysis was carried out by considering only vertical loads (dead and live loads). The main reason for this approach is the procedure recommended by the UFC 4-023-03 guideline. The guideline clearly states that only vertical loads should be considered in progressive collapse analyses. According to UFC, the purpose of such analyses is to evaluate the load redistribution capacity of the structure following the sudden loss of a vertical load-bearing element (e.g., a column).

3. Findings and Discussions

A seven-story reinforced concrete structure was modelled in the SAP2000 v16 software based on the material and geometric properties specified in Section 2.4. The structure was assumed to be fixed at the base, and soil properties were not included in the analysis. The natural vibration periods of the model were obtained as $T_1 = 0.86 \text{ s}$, $T_2 = 0.64 \text{ s}$, and $T_3 = 0.61 \text{ s}$, respectively. A view of the structure in SAP2000 is presented in Figure 7, while the mode shapes corresponding to the first three modes are shown in Figure 8.

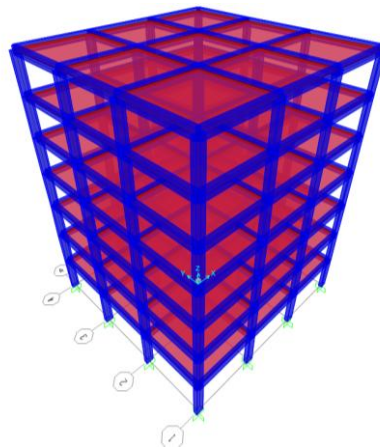


Figure 7: View of the SAP2000

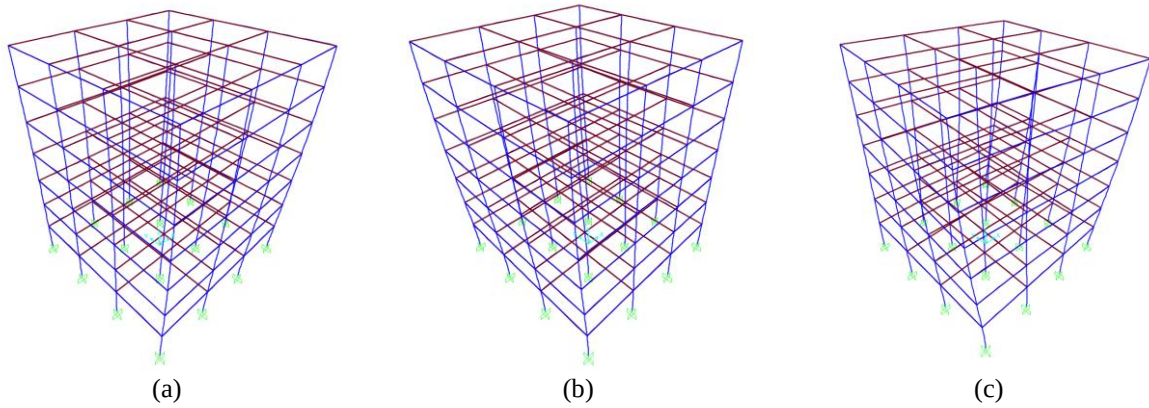


Figure 8. Mode shapes: a) Model 1 b) Mode 2 c) Mode 3

Structural vulnerability to shear failure can lead to sudden and brittle collapse, which is an undesirable condition in earthquake engineering. Similarly, in the construction of progressive collapse-resistant structures, ensuring ductile behaviour is essential. Therefore, in progressive collapse analyses, failure should be prevented before the structure reaches its flexural capacity. Enhanced Local Resistance method is used to evaluate shear strength of structure. However, this method can also be applied to assess structures in different countries. In this study, as mentioned in the previous sections, a seven-story reinforced concrete structure was analysed using the UFC guideline and the Turkish Earthquake Code.

For ELR method, a column is selected from Figure 6 to initiate the scenario. Similar to Alternative Path Method, a corner column is typically chosen. Figure 9 presents the selected column and its representation on the formwork plan.

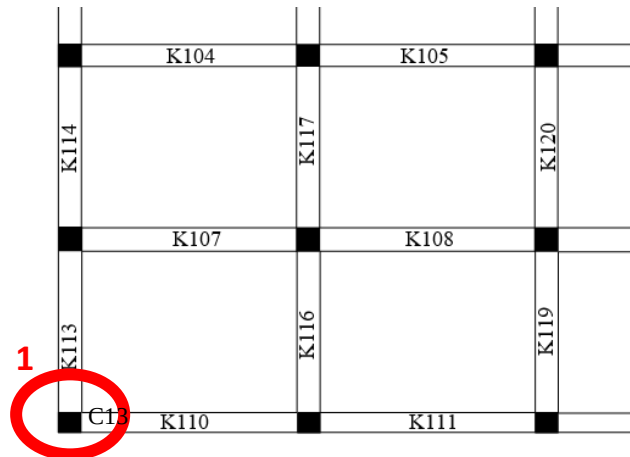


Figure 9: Column specified for the scenario

For ELR analysis, the corner column labelled as Column 1, located at the intersection of beams K110 and K113, C13, is selected. Axial load of column is calculated using Equation 2 based on ELR method. Axial load values computed for Column 1, considering UFC guideline and Turkish Earthquake Code, are presented in Table 1.

Table 1: Paxial load calculation according to UFC and TEC

	N	Dead Load (kN/m ²)	Live Load (kN/m ²)	L _{Long} (m)	L _{short} (m)	P _{axial} (kN)
UFC 4-023-03	7	5.94	7.2	5.3	5.3	527.36
TEC	7	5.94	5.0	5.3	5.3	540.90

Axial load calculations for both UFC 4-023-03 and TEC regulations using ELR method are presented in the table above. For selected corner column shown in Figure 7, axial load calculations were performed considering the dead load, live load, and span lengths as defined in Equation 2. In both regulations, the number of stories (N) is 7, and the dead load is calculated as 5.94 kN/m². However, live load values differ, with UFC 4-023-03 considering 7.2 kN/m², while TEC defines this value as 5.0 kN/m².

The axial load obtained according to the TEC is approximately 2.6% higher than that calculated using the UFC. The long (L_{long}) and short (L_{short}) spans of the column are determined as half of the adjacent slab spans in both directions. The column influence area for these slabs is illustrated in Figure 10.

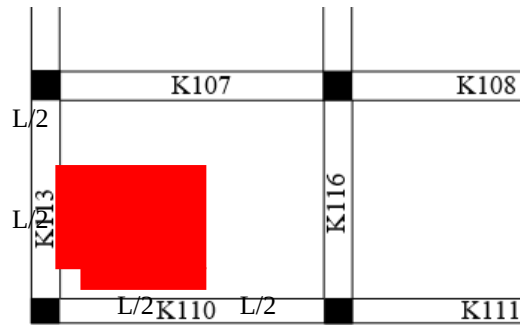


Figure 10: Tributary area of column

According to Equation 2, the axial load is calculated as 527.36 kN based on UFC 4-023-03 regulation and 540.90 kN according to TEC regulation. The difference in axial load between the two methods arises due to variations in live load values. The bending moment of the column is determined using a biaxial moment calculation. The bending capacity (M_n) is calculated separately for each regulation. M_n values computed according to both regulations are presented in Table 2.

Table 2: Moment calculation according to UFC and TEC

	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	Each face (item)	A_s (mm ²)	a (mm)	P_{axial} (kN)	M_n (kNm)
UFC 4-023-03	25	420	3	942	144.78	527,36	188.96
TEC	25	420	3	942	124.87	540.90	192.90

The moment calculations based on UFC 4-023-03 and TEC regulations are presented comparatively. In both regulations, concrete compressive strength and steel yield strength are considered same. The number and diameter of reinforcement bars are also identical in both regulations, with three reinforcement bars (3Ø20) per face. The total reinforcement area is 942 mm², and the same reinforcement detailing is assumed for both standards. However, due to different coefficients in the regulations, the concrete compression depth (a) values differ, leading to variations in results. For example, β_1 is a coefficient used to determine the height of the stress block formed in the compression zone of concrete. In other words, it is used to calculate the height of the idealized rectangular compression block measured from the neutral axis. According to ASCE 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017b), it is generally considered constant and taken as 1.0, whereas in TS500, it varies depending on the concrete grade. In this study, it is taken as 0.85. The compression depth (a) is calculated as 144.78 mm according to UFC 4-023-03, whereas it is 124.87 mm according to TEC. When comparing bending moment (M_n) values, the moment calculated according to UFC 4-023-03 is 188.96 kNm, while the moment according to TEC is 192.90 kNm, resulting in a slightly higher moment in TEC. A difference of approximately 2% is observed between the two regulations.

After calculating the bending moment according to ELR method, the shear force analysis was performed. First, the ultimate shear force was determined using Equation 3. The shear demand values were calculated separately for UFC and TEC, and the results were compiled in Table 3.

Table 3: Shear force calculation according to UFC and TEC

	P_{axial} (kN)	M_n (kNm)	V_u, V_d (kN)
UFC 4-023-03	527.36	188.96	472.40
TEC	540.90	192.90	482.25

Using Equation 3, the ultimate shear force (V_u) calculated according to UFC is 471.40 kN. In the calculations, the height from the foundation to the first floor was considered approximately 3 meters. Shear force is obtained by dividing 7.5 times the bending moment by column length. According to TEC, shear force was calculated as 482.25 kN, which is approximately 2.1% higher than the value obtained using UFC.

Shear force carried by the column was calculated separately for each regulation and is presented in Table 4. Equation 4 was used for UFC, while Equation 5 was used for TEC.

Table 4: The shear capacity carried by concrete according to UFC and TEC

	P_{axial} (kN)	V_u, V_d (kN)	V_{cr} (kN)	V_c (kN)
UFC 4-023-03	527.36	472.40	---	1652.42
TEC	540.90	482.25	2835.90	2268.72

According to TS 500, the contribution of concrete is assumed to be 80% of the shear cracking capacity (Turkish Standards Institute, 2002). In the table, according to TEC, shear cracking capacity is calculated as 2835.90 kN, and contribution of concrete to the shear capacity is determined as 2268.72 kN. According to UFC guideline, V_{cr} is not calculated; instead, using Equation 4 directly, shear capacity by concrete is determined to be 1652.42 kN.

Shear force carried by the reinforcement was calculated separately for each regulation and is presented in Table 5. Equation 6 was used for UFC, while Equation 7 was used for TEC.

Table 5: Shear force carried by the steel according to UFC and TEC

	V_u, V_d (kN)	V_c (kN)	Φ	V_s (kN)	V_w (kN)
UFC 4-023-03	472.40	1652.42	1.0	NaN	---
TEC	482.25	2268.72	---	---	NaN

Shear force to be carried by the reinforcement (V_s, V_w) was calculated by considering design shear force and shear capacity by concrete for both UFC and TEC. The analysis results indicate that the required shear force is fully carried by concrete, making it unnecessary to calculate the shear force contribution from the reinforcement. However, when examining the shear force values carried by the concrete, a difference of approximately 37% was observed between the two regulations. According to TEC, both design shear force and shear capacity carried by concrete were found to be higher compared to UFC guideline.

As another scenario, one of the middle columns, the C6 column, was selected. The C6 column is one of the columns with the largest spans. Figure 11 presents the selected column and its representation on the formwork plan.

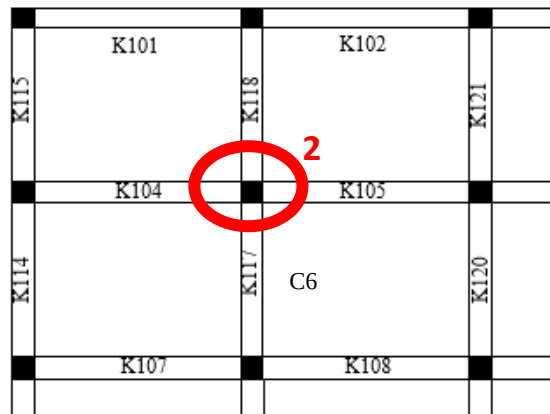


Figure 11: Column specified for the scenario

For ELR analysis, the corner column labelled as Column 2, located at the intersection of beams K104 and K105, C6, is selected. the number of stories (N) is 7, and the dead load is calculated as 5.94 kN/m². However, live load values differ, with UFC 4-023-03 considering 7.2 kN/m², while TEC defines this value as 5.0 kN/m². The long (L_{long}) and short (L_{short}) spans of the column are determined as half of the adjacent slab spans in both directions. In both regulations, concrete compressive strength and steel yield strength are considered same. The number and diameter of reinforcement bars are also identical in both regulations, with three reinforcement bars (3 Φ 20) per face. The total reinforcement area is 942 mm², and the same reinforcement detailing is assumed for both standards. However, due to different coefficients in the regulations, the concrete compression depth (a) values differ, leading to variations in results.

The compression depth (a) is calculated as 392.96 mm according to UFC 4-023-03, whereas it is 341.23 mm according to TEC. The shear force carried by the steel is given in Table 6 according to the UFC and TEC.

Table 6: Shear force carried by the steel according to UFC and TEC

	P_{axial} (kN)	M_n (kNm)	V_u, V_d (kN)	V_c (kN)	Φ	V_s (kN)	V_w (kN)
UFC 4-023-03	2109.45	139.87	349.68	---	1.0	NaN	---
TEC	2163.60	150.10	375,25	8766.01	---	---	NaN

The results obtained for the middle column according to the ELR method are presented in Table 6. The analysis showed that the required shear force is amply resisted by the concrete. Similar values of V_s and V_w were obtained as in the corner column scenario.

According to ELR method, progressive collapse shear force of a selected column in a reinforced concrete structure can be determined by following the procedural steps outlined above. While each country includes shear force calculations in its respective building codes, specialized analysis methods are required for progressive collapse assessments. In this study, as mentioned earlier, TEC and UFC were compared to observe the numerical differences in shear force calculations on the same structural example, rather than focusing on the advantages or disadvantages of each regulation. Understanding how shear force values diverge between different codes is crucial for design engineers and structural practitioners.

4. Conclusions and Recommendations

The shear demand of a reinforced concrete structure was compared using ELR method, considering both TEC and UFC approaches. In the analyses, corner column of structure was selected, and UFC guideline's procedural steps were followed to compare the shear demand according to ELR method. The results and recommendations of this study are presented below.

- Although the design shear demand obtained from TEC and UFC differ, they are generally within a close range. TEC is approximately 2.1% higher than that of UFC, likely due to the fact that Turkey is situated in a high seismicity region.
- The variation in live load values between the two regulations primarily contributes to the differences in axial load calculations, which subsequently influence the shear force calculations. UFC 4-023-03 considers a live load of 7.2 kN/m², while the Turkish Earthquake Code specifies 5.0 kN/m². This discrepancy in live loads is a key factor in the initial divergence of values between the two codes and significantly affects the structural design outcomes.
- The shear capacity carried by concrete was consistently higher in TEC-based calculations, indicating a stronger emphasis on shear resistance in TEC.
- TEC lacks explicit design criteria for progressive collapse, which represents a critical gap in the code.
- The ELR method, though scarcely represented in the literature, has demonstrated potential in enhancing shear resistance and mitigating brittle failure in structural elements.
- The contribution of reinforcement to shear resistance could not be calculated in this study, as the concrete alone was found to carry sufficient shear.
- Only vertical loads were considered in the progressive collapse analysis; the exclusion of lateral loads likely led to underestimated shear design forces.
- While results vary based on the selected column scenario, TEC generally yields higher shear values compared to UFC.
- Designs based on TEC anticipate approximately 2–3% higher shear forces compared to UFC. This may require more reinforcement and/or larger cross-sections for structural elements. As a result, construction costs may increase directly. However, this increase leads to safer and more durable structures. In the long term, it can reduce indirect costs such as structural damage, maintenance, and loss of life. Therefore, from a cost-benefit perspective, the conservative approach of TEC may be more advantageous.

The results of study are presented above. The recommendations and future planned studies are listed below.

- The concept of progressive collapse has been widely incorporated into codes of developed countries since the early 2000s. It is recommended that this concept and its analysis methodologies be integrated into the seismic and building codes of developing countries, such as Turkey.
- To prevent sudden collapse following column removal, brittle failure must be avoided. Shear force checks should be incorporated into progressive collapse design procedures in developing countries.

- Structural safety is not solely dependent on the load-bearing system. The use of ductile materials is recommended to facilitate the redistribution of loads in the event of local failure.
- More extensive research should be conducted on ELR, Tie Force, and Alternative Path methods. These methods, along with new approaches, should be adapted to the design standards of developing countries to ensure the safety of critical infrastructure.
- Critical structures in Turkey, including hospitals, military facilities, public buildings, and emergency response centers, should be designed to resist progressive collapse. Existing structures should be reassessed based on progressive collapse criteria.
- Since soil-structure interaction significantly affects structural behavior, further investigation is needed into the influence of progressive collapse mechanisms under varying ground conditions.
- Given the limited number of studies on ELR in the literature, more analytical and experimental research is necessary to validate and develop this method.
- Structural assessments in Turkey should not be limited to seismic considerations alone; progressive collapse potential must also be evaluated to ensure comprehensive structural safety.
- Numerous studies have shown that soil-structure interaction significantly affects the superstructure; since the ability of a structure to effectively redistribute loads after column loss varies between structures with and without soil interaction, further research is needed on progressive collapse considering soil-structure interaction.
- The effects of shear force differences between codes on structural safety, member sizing, and cost should be examined in more detail from an engineering perspective in future studies.

References

- American Society of Civil Engineers. (2017a). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*. ASCE 41-17. <https://doi.org/10.1061/9780784414859>
- American Society of Civil Engineers. (2017b). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. ASCE 7-16. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Batıçım. (2025, Şubat 11). *Çimentonun tarihçesi*. <https://www.baticim.com.tr/cimento-hakkinda-bilgiler/cimentonun-tarihcesi>
- Demir, A. (2022). Progressive collapse response of reinforced concrete buildings designed according to Turkish Earthquake Code. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 694–705. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1094003>
- Doğangün, A. (2018). *Betonarme yapıların hesap ve tasarımı: TBDY 2018-Deprem Yönetmeliği 2018'e uygun* (15. baskı). Birsan Yayınevi.
- European Committee for Standardization. (2004). *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings* (EN 1998-1:2004). European Committee for Standardization. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
- General Directorate of Disaster Affairs. (2019). *Earthquake hazard map of Türkiye*. Ministry of Public Works and Settlement of Türkiye. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>
- General Services Administration. (2016). *Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance* (GSA-2016). US General Services Administration. https://www.gsa.gov/system/files/Progressive_Collapse_2016.pdf
- Hamad, K., Lotfy, I., & Naiem, M. (2021, December 17–19). Enhancing progressive collapse resistance in existing buildings [Conference presentation]. Joint International Conference on Design and Construction of Smart City Components, Cairo, Egypt.
- Hashemi, A. (2013). Review of the UK housing history in relation to system building. *Alam Cipta Journal*, 6(1), 47–58.
- Kılıçer, S. (2018). Effects of soil structure interaction on behavior of reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 1(1), 28–33. <https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01028033>
- Kılıçer, S. (2024). *Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak yapıların aşamalı göçme riskinin belirlenmesi* [Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Kılıçer, S. (2025). The Impact of Weapon Systems on Structural Damage and Progressive Collapse: A Case Study of Belgorod Oblast. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(1), 215–234. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1511907>
- MATLAB. (2018). (Version R2018a) [Computer software]. The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Ozgan, K., Kılıçer, S., & Daloglu, A. T. (2023). Evaluation of progressive collapse potential of a RC school building considering soil–structure interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(5), 1199–1213. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00562-5>
- SAP2000. (2018). *Integrated software for structural analysis and design* (Version 21) [Computer software]. Computers and Structures, Inc. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- Shaheen, M., Atar, M., & Cunningham, L. (2023). Enhancing progressive collapse resistance of steel structures using a new bolt sleeve device. *Journal of Constructional Steel Research*, 203, Article 107843. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107843>
- T.C. Resmi Gazete. (2018). *Turkey building earthquake regulations* (Official Gazette of the Republic of Turkey Date: 18.03.2018, Number: 30364). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>
- Turkish Standards Institute. (1997). *Design loads for buildings (TS 498)*. TSE. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- Turkish Standards Institute. (2002). *Requirements for design and construction of reinforced concrete structures (TS 500)*. TSE. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2008). *Methodology manual for the single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets (SBEDS)*. Protective Design Center, U.S. Army Corps of Engineers. <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p16021coll11/id/4213/>

- U.S. Department of Defense. (2016). *Design of structures to resist progressive collapse* (UFC 4-023-03). U.S. Department of Defense, Unified Facilities Criteria. https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c4.pdf
- Yuzbasi, J., & Arslan, H. M. (2025). Applied element method and finite element method for progressive collapse assessment: A comparative study on the influence of slab types, thicknesses, and damping via three incremental column removals. *Structures*, 73, Article 108358. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108358>
- Yuzbasi, J. (2024). Experimental verification of full-scale silo structure demolition: Investigating successive column removal with finite element method and progressive collapse simulation through blast load. *Structural Concrete*, 25(6), 4408–4427. <https://doi.org/10.1002/suco.202400017>
- Yuzbasi, J. (2025). Controlled demolition: vowel monitoring and experimental validation of blast-induced full-scale existing high-rise building implosion using numerical finite element simulations. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 15, 891–914. <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00849-y>
- Zhang, Y., Cheng, X., Diao, M., Li, Y., Guan, H., & Sun, H. (2023). FRP retrofit for RC frame substructures against progressive collapse: Scheme optimisation and resistance calculation. *Engineering Structures*, 289, Article 116289. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116289>

G7 Ülkelerinde İklimsel ve Çevresel Faktörlerin Doğal Afetlerin Meydana Gelme Sıklığı Üzerindeki Etkisinin Sigortacılık Sektörüne Yansımaları

Serap Yörübulut^{1,*}

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstatistik Bölümü, 71450, Yahşihan / Kırıkkale.

Özet

Bu çalışmada, 1989-2022 yılları arasında G7 ülkelerinde meydana gelen doğal afetlerin sıklığı üzerinde, sıcaklık, yağış, sera gazı emisyonları ve çevresel sürdürülebilirlik endekslerinden olan yük kapasite faktörünün (LCF) etkileri panel veri analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, iklim değişikliği sebebiyle artan seragazı emisyonları, yağış ve sıcaklık miktarının doğal afet sayısını artırdığı, LCF faktörünün azalması ise meydana gelen doğal afet sayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Pedroni ve Kao eşbütünleşme testleri, değişkenler arasında uzun vadeli bir ilişkinin varlığını ortaya koyarken, Driscoll-Kraay standart hatalarıyla düzeltilmiş Panel Hata Düzeltme Modeli (ECM) sonuçları, kısa vadede etkisiz gibi görünen sera gazı emisyonları ve LCF faktörünün uzun vadede doğal afet sıklığı üzerinde belirleyici hale geldiğini göstermektedir. İklim değişikliği ve çevresel faktörlerin etkisiyle artan doğal afet sıklığı ve şiddeti, sigorta sistemlerinin bu tür olaylar karşısında önemli bir risk yönetim aracı olduğunu ortaya koymaktadır. G7 ülkeleri bağlamında, sigorta sektörünün iklim değişikliğine adaptasyonunu sağlamak için düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi, kamu-özel iş birliklerinin artırılması ve gelişmiş risk modelleme tekniklerinin benimsenmesi önerilmektedir. Bu çalışma, afet dinamiklerinin incelenmesinde yenilikçi bir faktör olarak LCF kullanımı ve sigortacılık sektörüne yönelik uzun vadeli risk yönetimi politikalarının geliştirilmesine yönelik öneriler sunarak literatüre katkı sağlamaktadır.

Anahtar Sözcükler

Doğal Afet Sıklığı, Yük Kapasite Faktörü, Sıcaklık, Yağış, İklim Değişikliği, Sigorta

The Impact of Climatic and Environmental Factors on the Frequency of Natural Disasters in the Insurance Sector in G7 Countries

Abstract

In this study, the effects of temperature, precipitation, greenhouse gas emissions and load capacity factor (LCF), which is one of the environmental sustainability indices, on the frequency of natural disasters occurring in G7 countries between 1989-2022 were evaluated by panel data analysis method. The findings obtained show that increasing greenhouse gas emissions, precipitation and temperature due to climate change increase the number of natural disasters, while the decrease in the LCF factor increases the number of natural disasters. While Pedroni and Kao cointegration tests reveal the existence of a long-term relationship between the variables, the Panel Error Correction Model (ECM) results corrected with Driscoll-Kraay standard errors show that greenhouse gas emissions and the LCF factor, which seem to be ineffective in the short term, become determinants of the frequency of natural disasters in the long term. The increasing frequency and severity of natural disasters due to the impact of climate change and environmental factors reveal that insurance systems are an important risk management tool against such events. In the context of G7 countries, it is suggested that regulatory frameworks should be strengthened, public-private partnerships should be increased and advanced risk modeling techniques should be adopted to ensure the adaptation of the insurance sector to climate change. This study contributes to the literature by using LCF as an innovative factor in examining disaster dynamics and by presenting suggestions for the development of long-term risk management policies for the insurance sector.

Keywords

Natural Disaster Frequency, Load Capacity Factor, Temperature, Rainfall, Climate Change, Insurance

1. Giriş

İklim değişikliği, küresel ölçekte çevresel ve ekonomik dengeleri tehdit eden en büyük sorunlardan biri haline gelmiştir. Küresel sıcaklık artışları, değişen yağış rejimleri ve sera gazı emisyonlarının yükselmesi, doğal afetlerin sıklığını ve şiddetini önemli ölçüde artırmaktadır (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021; Emanuel, 2005). Aşırı hava olayları, seller, kasırgalar, orman yangınları ve kuraklık gibi afetlerin sayısındaki artış, iklim değişikliğinin doğrudan bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, doğal afetleri tetikleyen faktörlerin belirlenmesi, afet risk yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır.

İklim değişikliğinin etkileri, sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik alanlarda da önemli yansımalar yaratmaktadır. Artan afet sıklığı, sigorta sektöründe büyük mali yükler oluşturarak, sektörü yeniden şekillendirmektedir. Sigorta şirketleri, iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkmak için risk modellerini gözden geçirmekte ve fiyatlandırma stratejilerini yeniden belirlemektedir. Sigorta sektörü için bu değişiklikler, hem afet sonrası tazminat ödemelerini artırmakta hem de sigorta poliçelerinin daha yüksek primlerle fiyatlandırılmasına yol açmaktadır (Singh & Madaan, 2023). Dolayısıyla, iklim değişikliğine bağlı afetlerin artışı, sigorta sektöründe risk yönetimi ve strateji geliştirme süreçlerini derinden etkilemektedir.

Son otuz yılda doğal afetlerin sayısında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. EM-DAT verilerine göre, 1980'lerde yılda ortalama 200 civarında rapor edilen doğal afet sayısı, 2000'li yıllarda 400'ün üzerine çıkmış, 2010'lu yıllarda ise bu rakam daha da yükselmiştir. İklim değişikliği, bu artışın temel nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir (Herring vd., 2021). Bunun yanı sıra, kentleşme, arazi kullanımı değişiklikleri ve sanayileşmenin de afetlerin etkisini artırdığı bilinmektedir (Birkmann vd., 2015). Ancak, afet oluşumunda enerji altyapısının ve çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin rolü literatürde yeterince incelenmemiştir. Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirlik değişkenlerinin, özellikle LCF, doğal afetler üzerindeki etkileri daha ayrıntılı bir şekilde ele alınması gereken önemli bir konudur.

Bu çalışma kapsamında G7 ülkeleri (Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Birleşik Krallık, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya) incelenmektedir. Bu ülkeler, yüksek sanayileşme seviyeleri nedeniyle dünyanın en büyük sera gazı emisyon kaynakları arasında yer almakta olup, küresel ekonomik faaliyetlerde belirleyici bir rol oynamaktadır. G7 ülkelerinin seçilmesindeki bir diğer neden, gelişmiş altyapıları sayesinde iklim değişikliği ve doğal afetlerle ilgili kapsamlı ve güvenilir veri setlerine sahip olmalarıdır. Ayrıca, doğal afetlerin ekonomik maliyetlerinin oldukça yüksek olması, bu ülkelerde geliştirilen afet yönetimi stratejilerinin küresel ölçekte yol gösterici olmasını sağlamaktadır. Sigorta sektörü, bu ülkelerdeki afet risklerini yönetirken, aynı zamanda iklim değişikliği ile mücadelede de aktif bir rol oynamaktadır. Sigorta şirketleri, gelişmiş iklim modellerini kullanarak afet risklerini değerlendirir ve prim fiyatlandırmalarını buna göre ayarlar.

Araştırmada 1989-2022 yılları arasının seçilmesi, küresel iklim politikalarının gelişimi açısından önem arz etmektedir. 1988 yılında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) kurulması ve sonrasında 1997 yılında Kyoto Protokolü ile 2015 yılında Paris Anlaşması gibi uluslararası anlaşmalar, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli dönüm noktaları olmuştur. Ayrıca, bu dönemde iklim değişkenleri ve doğal afetler üzerine elde edilen veriler daha güvenilir hale gelmiş, özellikle 2000'lerden sonra gelişen teknolojiler sayesinde sıcaklık, yağış ve sera gazı emisyonları gibi faktörler daha hassas bir şekilde ölçülebilmektedir. Bu nedenle, seçilen dönem, iklim değişikliğinin doğal afetler üzerindeki etkilerini uzun vadeli bir perspektiften değerlendirmek için uygun bir çerçeve sunmaktadır. Bu dönemde, sigorta sektöründeki yenilikler ve gelişmeler de iklim değişikliğine karşı daha dirençli modeller geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Doğal afetler, küresel ölçekte ciddi ekonomik kayıplara neden olmakta ve bu kayıpların yönetilmesinde sigorta sektörü kritik bir rol oynamaktadır. Sigortalı zarar miktarları, afetlerin finansal etkisinin ne ölçüde karşılanabildiğini gösterirken, toplam zarar ile arasındaki fark sigorta sistemlerinin etkinliğini değerlendirmeye imkân tanımaktadır. Bu durum, G7 ülkeleri özelinde de geçerli olup, söz konusu ülkelerde meydana gelen afet sayıları, toplam zarar ve sigortalı zarar miktarları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: 1989-2022 yılları G7 ülkeleri doğal afet sayısı, toplam zarar ve sigortalı zarar miktarı

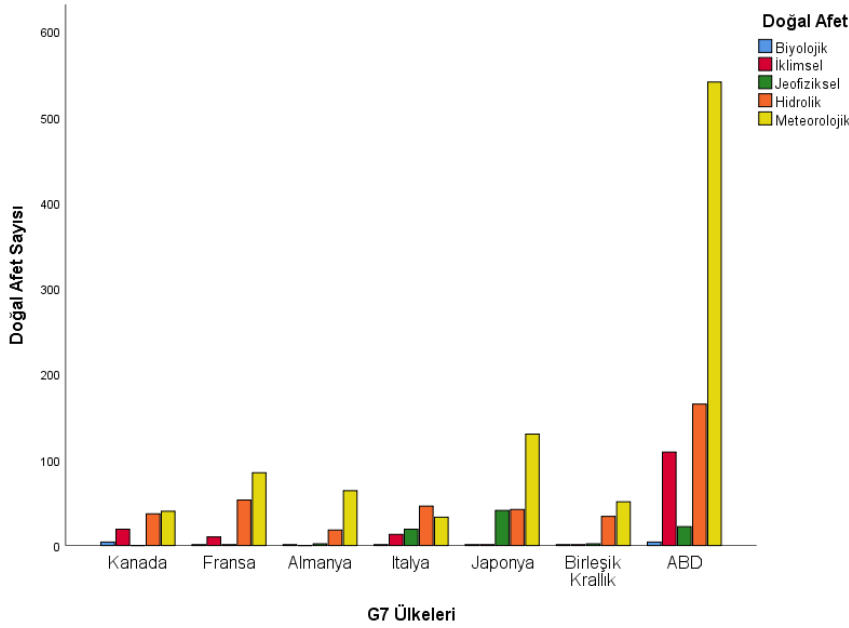
	Kanada	Fransa	Almanya	İtalya	Japonya	Birleşik Krallık	ABD
Doğal Afet Sayısı	107	161	90	112	225	91	887
Sigortalı Zarar	13766503	29287722	43012522	5187897	162316717	33183111	901519714
Toplam Zarar	50801550	78811271	137462353	109367834	861361233	60625785	1998943620

Kaynak: EM-DAT ('000 US\$2)

Tablo 1'de sunulan veriler, G7 ülkelerinde doğal afetlerin sıklığı ve bunların ekonomik etkileri açısından önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle ABD ve Japonya gibi ülkelerde doğal afet sayısının yüksek olması, bu afetlerin yol açtığı toplam zararların da oldukça büyük boyutlara ulaşmasına neden olmaktadır. Ancak, sigortalı zarar oranları incelendiğinde, toplam ekonomik kayıpların yalnızca belirli bir kısmının sigorta sektörüne karşılanabildiği görülmektedir. Bu durum, sigorta şirketlerinin doğal afetlerin yol açtığı ekonomik yükü hafifletme noktasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle ABD'de sigortalı zarar oranının görece yüksek olması, gelişmiş bir sigorta sistemine işaret etse de, toplam zararların büyüklüğü sigorta açığının hâlâ önemli seviyelerde olduğunu göstermektedir. Japonya'da ise afetlerin sıklığına rağmen sigorta kapsamının daha sınırlı olduğu ve büyük ekonomik kayıpların sigortalanamadığı görülmektedir. Bu bulgular, iklim değişikliği ve çevresel faktörlerin doğal afet sıklığını artırdığı bir dönemde, sigorta sektörünün risk yönetimi stratejilerini güçlendirmesi gerektiğine işaret etmektedir. Aynı zamanda, sigorta sektörünün afet zararlarını karşılama kapasitesini artırmak için kamu ve özel sektör iş birliğinin geliştirilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Özellikle iklim değişikliği nedeniyle afetlerin gelecekte daha sık ve yıkıcı hale gelmesi beklenirken, sigortacılık sektörünün bu değişime uyum sağlayarak daha geniş kapsamlı ve erişilebilir poliçeler sunması büyük önem taşımaktadır. Doğal afetlerin türleri ve sıklıkları ülkeler arasında farklılık göstermekte olup, bu durum sigorta sistemlerinin risk

yönetimindeki önemini vurgulamaktadır. Şekil 1, G7 ülkelerinde meydana gelen doğal afetlerin biyolojik, iklimsel, jeofiziksel, hidrolik ve meteorolojik olmak üzere türlerine göre dağılımını göstermektedir. Özellikle meteorolojik ve hidrolik afetlerin öne çıktığı görülmekte olup, bu afetlerin sigorta sektörü üzerindeki etkileri ülkeden ülkeye değişiklik göstermesi gösterebilmektedir.



Şekil 1: 1989-2022 yılları arasında G7 ülkelerinde doğal afet türlerinin dağılımı

Şekil 1'e göre ABD, açık ara farkla en fazla doğal afet yaşayan ülke olup, özellikle meteorolojik ve hidrolik afetlerin baskın olduğu görülmektedir. Bu durum, ABD'nin geniş coğrafi yapısı, farklı iklim kuşaklarına sahip olması ve kasırga, fırtına gibi ekstrem hava olaylarına yatkınlığı ile açıklanabilir. Japonya da yüksek afet frekansına sahip ülkelerden biri olup, özellikle jeofiziksel (deprem ve tsunamiler) ve meteorolojik afetlerin yaygın olduğu gözlemlenmektedir.

Avrupa'daki G7 ülkeleri olan Almanya, Fransa, İtalya ve Birleşik Krallık'ta ise meteorolojik ve hidrolik afetlerin daha yaygın olduğu, jeofiziksel afetlerin ise nispeten daha az gerçekleştiği görülmektedir. Kanada'da ise doğal afet sayısının daha düşük olmasına rağmen, meteorolojik olayların belirgin bir yer tuttuğu gözlemlenmektedir.

Bu dağılım, iklim değişikliği ve çevresel faktörlerin etkisiyle doğal afetlerin sıklığında ve türlerinde farklılaşmaların yaşandığını ortaya koymaktadır. Özellikle meteorolojik afetlerin birçok ülkede en yüksek orana sahip olması, küresel ısınma ve atmosferik değişimlerin doğal afetler üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir. Sigortacılık sektörü açısından değerlendirildiğinde, meteorolojik ve hidrolik afetlerin artış göstermesi, sigorta şirketlerinin risk hesaplamalarında ve poliçe kapsamlarında bu eğilimleri dikkate alması gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle ABD ve Japonya gibi yüksek afet riski taşıyan ülkelerde sigorta kapsamlarının genişletilmesi ve afetlere karşı finansal dayanıklılığın artırılması önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde afet riskine yönelik birçok sıcaklık, yağış ve sera gazı emisyonları gibi değişken incelenmiş olmasına rağmen, LCF faktörü gibi çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin doğal afetler üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. LCF, çevresel sürdürülebilirliği ölçmek için kullanılan bir endeks olup, kişi başına düşen biyokapasitenin kişi başına düşen ekolojik ayak izine oranlanmasıyla elde edilmektedir (Siche vd., 2010; Pata, 2021). LCF, ekolojik ayak izinin tek başına yeterli bir çevresel değerlendirme ölçütü olmadığını ileri sürerek geliştirilmiş ve en kapsamlı çevresel kalite göstergelerinden biri olarak kabul edilmiştir. Bir ülkenin LCF değeri 1'den büyükse, biyokapasitesi ekolojik ayak izinden fazla olup, doğal kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetildiği anlamına gelmektedir. Ancak, LCF değeri 1'in altına düştüğünde, ekolojik sürdürülebilirliğin tehlikede olduğu ve ülkenin doğal kaynaklarını yenileyemediği anlaşılmaktadır (Pata & Samour, 2023).

LCF'nin doğal afetler üzerindeki etkisini incelemek, sigorta sektörünün risk yönetimi stratejilerinde de önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü, ekolojik sürdürülebilirliği daha düşük olan ülkeler, doğal afetlere karşı daha kırılgan olabilir ve bu da sigorta sektörünün risk profilini olumsuz yönde etkileyebilir. Sigorta şirketleri, LCF gibi çevresel göstergeleri kullanarak, gelecekteki riskleri daha doğru tahmin edebilir ve buna göre prim hesaplamalarını yapabilirler. Mevcut literatür, doğal afetlerin meydana gelmesinde iklim değişkenlerinin rolünü tartışırken, ekolojik sürdürülebilirlik kavramı genellikle göz ardı edilmektedir. Oysa, bir ülkenin ekolojik kapasitesinin düşmesi, doğal afetlere karşı direncini azaltabilir ve afet sonrası toparlanma sürecini olumsuz etkileyebilir.

LCF'nin bu bağlamda değerlendirilmesi, doğal afet risk yönetimi stratejileri için yeni bir perspektif sunacaktır. Bu çalışma, LCF'nin doğal afet sıklığı üzerindeki etkisini inceleyerek bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. LCF'nin bu

bağlamda değerlendirilmesi, doğal afet risk yönetimi stratejileri için yeni bir perspektif sunacaktır. Ayrıca, iklim değişikliğinin sigorta sektörüne etkisini değerlendirirken, çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin daha sistematik bir şekilde dahil edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

İklim değişkenlerinin doğal afetler üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Emanuel (2005) sıcaklık artışlarının kasırga şiddeti üzerindeki etkisini vurgularken, Herring vd. (2021) iklim değişikliğine bağlı aşırı hava olaylarının sıklığındaki artışa dikkat çekmiştir. Ayrıca, Birkmann vd. (2015) ve Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) gibi çalışmalar, sera gazı emisyonlarının yükselmesiyle birlikte afet riskinin arttığını göstermektedir.

Bununla birlikte, çevresel sürdürülebilirlik değişkenleri ile doğal afetler arasındaki ilişkiye dair çalışmalar yetersizdir. Ekolojik ayak izi (EF) ve biyokapasite gibi göstergeler, çevresel sürdürülebilirliği değerlendirmek için kullanılmıştır ancak doğal afetlerle doğrudan ilişkilendirilmemiştir (Siche vd., 2010; Pata 2021; Shang vd., 2022). LCF'nin çevresel kaliteyi ölçmek için en kapsamlı gösterge olduğunu vurgulamış, ancak doğal afetlerle bağlantısını doğrudan analiz etmemiştir.

Bu çalışma, LCF'yi afet riski analizine dahil ederek, mevcut literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. LCF'nin doğal afet sıklığı üzerindeki etkisini ortaya koyarak, afet yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma politikaları açısından yeni bakış açıları sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, G7 ülkeleri özelinde gerçekleştirilecek analiz, gelişmiş ekonomilerde çevresel sürdürülebilirlik ve afet riski arasındaki dinamikleri anlamak ve sonuçların sigortacılık sektörüne yansımalarını ortaya koyma anlamında önemli olacaktır.

2. Literatür Taraması

Doğal afetlerin ekonomik ve insani etkileri üzerine yapılan çalışmalar, afetlerin küresel ekonomi ve toplumsal yapı üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koymaktadır (Von Peter vd., 2024). Doğal afetlerin ekonomik etkileri üzerine yapılan incelemeler, afete maruz kalan bölgelerin ekonomik toparlanma süreçlerinin karmaşıklığını ve afetlerin uzun vadeli ekonomik büyüme üzerindeki olumsuz etkilerini vurgulamaktadır (Botzen vd., 2019). Özellikle gelişmiş ekonomilerde afetlere karşı alınan önlemler ve risk paylaşımı mekanizmaları, afet sonrası toparlanma sürecini belirleyen önemli unsurlardır (Von Peter vd., 2024).

İklim değişikliği bağlamında afetlerin artan sıklığı ve şiddeti üzerine yapılan çalışmalar, sera gazı emisyonları ve sıcaklık artışı gibi faktörlerin doğal afet risklerini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Kossin vd., 2020; Ferreira, 2024). Yağış rejimlerindeki değişimler ise özellikle sel ve toprak kaymaları gibi afetlerin artışına neden olmaktadır (Kundzewicz vd., 2014). Nguyen vd. (2025) ve Giuzio vd. (2024) ise afetlerin makroekonomik etkilerine odaklanarak, doğal afetlerin ekonomik büyüme, sigorta sektörü ve yatırım dinamikleri üzerindeki uzun vadeli etkilerini incelemiştir.

Sigorta sektörü, doğal afetlerin etkilerini azaltmak ve ekonomik kayıpları minimize etmek adına kritik bir rol oynamaktadır. Sigorta şirketleri, afet riski yönetimi ve finansal destek sağlama konusunda önemli bir yer tutmaktadır (Mechler & Bouwer, 2015). Doğal afetlerin sıklığı ve şiddetindeki artış, sigorta sektörünün stratejik yaklaşımlarını ve risk modelleme yöntemlerini yeniden şekillendirmektedir (Kousky, 2017). Afet risklerinin sigorta primleri üzerindeki etkisi, sigorta şirketlerinin piyasa stratejilerini ve uzun vadeli sürdürülebilirliklerini doğrudan etkilemektedir (Browne vd. 2022).

Sigorta sektörü üzerine yapılan çalışmalarda, iklim değişikliği ile ilişkili afetlerin sigorta şirketlerinin rezervlerinin yeterliliği ve poliçe fiyatlandırma stratejileri üzerinde önemli etkiler yarattığı vurgulanmaktadır (Botzen vd., 2019). Ayrıca, iklim risklerinin sigorta poliçelerinde nasıl fiyatlandırılacağı ve sigorta kapsamının genişletilmesi gerektiği üzerine yapılan tartışmalar, sektördeki inovasyonlara ve yeni finansal ürünlerin gelişimine yön vermektedir (Linnerooth-Bayer & Mechler, 2022). Sigorta sektörünün afet risklerini etkin bir şekilde yönetebilmesi için çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin kullanımı, özellikle LCF dikkate alınması gerektiği savunulmaktadır (Pata & Samour 2023). Yılmaz (2009) çalışmasında, Türkiye'de iklim değişikliği risklerinin sigorta sektörü üzerindeki etkileri incelenmiş ve sektörün bu risklere karşı duyarlılığı vurgulanmıştır. Çalışmada, sigorta sektörünün iklim değişikliğine bağlı riskleri yönetmede yeterli düzeyde gelişmediği ve risk transfer mekanizmalarının güçlendirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Alkan (2019), Türkiye'de iklim değişikliğinin katastrofik riskler üzerindeki etkilerini inceleyerek, sigorta sektörü açısından doğrudan sonuçları değerlendirmekte ve iklim değişikliğine bağlı risk artışının sigorta sektörü açısından önemini vurgulamakta ve sektörün bu değişimlere uyum sağlaması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Torusdag vd. (2024) çalışmasında, Türkiye örneği üzerinden iklim değişikliğinin sigorta sektörü üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışma, iklim değişikliğinin doğal afetlerin sıklığını ve şiddetini nasıl etkilediğini ve bunun sigorta sektörü üzerindeki finansal etkilerini analiz etmektedir. Özellikle, Türkiye'deki sigorta piyasasının iklimle ilişkili risklere nasıl adapte olduğu, sigorta poliçelerinin kapsamı ve fiyatlandırma stratejilerindeki değişiklikler ele alınmıştır. Araştırma, iklim değişikliğinin sigorta sektörü üzerindeki olası ekonomik ve operasyonel etkilerini değerlendirerek, sektördeki risk yönetimi ve adaptasyon stratejilerine dair politika önerileri sunmaktadır.

Bununla birlikte, çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin afet riskleri üzerindeki etkisi hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Shang vd. (2022) ve Pata (2021), LCF'nin çevresel kaliteyi ölçmek için kapsamlı bir gösterge olduğunu belirtirken, doğal afetlerle olan ilişkisini doğrudan ele almamıştır.

Bu eksiklik, çalışmamızın önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız LCF gibi sürdürülebilirlik göstergelerinin doğal afetlerle ilişkilendirilmesine yönelik yeni bir çerçeve sunmaktadır. Önceki çalışmaların çoğu ekonomik ve meteorolojik değişkenler üzerine yoğunlaşırken, bu araştırma LCF'yi de dahil ederek afet risk analizini daha kapsamlı hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Doğal afetlerin ekonomik ve insani etkileri üzerine yapılan çalışmalar, afetlerin küresel ekonomi ve toplumsal yapı üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koymaktadır (Von Peter vd., 2024). Doğal afetlerin ekonomik etkileri üzerine yapılan incelemeler, afete maruz kalan bölgelerin ekonomik toparlanma süreçlerinin karmaşıklığını ve afetlerin uzun vadeli ekonomik büyüme üzerindeki olumsuz etkilerini vurgulamaktadır (Botzen vd., 2019). Özellikle gelişmiş ekonomilerde afetlere karşı alınan önlemler ve risk paylaşımı mekanizmaları, afet sonrası toparlanma sürecini belirleyen önemli unsurlardır (Von Peter vd., 2024).

İklim değişikliği bağlamında afetlerin artan sıklığı ve şiddeti üzerine yapılan çalışmalar, sera gazı emisyonları ve sıcaklık artışı gibi faktörlerin doğal afet risklerini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Kossin vd., 2020; Ferreira, 2024). Yağış rejimlerindeki değişimler ise özellikle sel ve toprak kaymaları gibi afetlerin artışına neden olmaktadır (Kundzewicz vd., 2018).

Bununla birlikte, çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin afet riskleri üzerindeki etkisi hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Shang vd. (2022) ve Pata (2021), LCF'nin çevresel kaliteyi ölçmek için kapsamlı bir gösterge olduğunu belirtirken, doğal afetlerle olan ilişkisini doğrudan ele almamıştır. Bu eksiklik, çalışmamızın önemini artırmaktadır. Bu bağlamda, çalışmamız LCF gibi sürdürülebilirlik göstergelerinin doğal afetlerle ilişkilendirilmesine yönelik yeni bir çerçeve sunmaktadır. Önceki çalışmaların çoğu ekonomik ve meteorolojik değişkenler üzerine yoğunlaşırken, bu araştırma LCF'yi de dahil ederek afet risk analiz sürecinde çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin de dikkate alınmasını öngörmektedir.

3. Veri Seti, Yöntem ve Bulgular

Bu çalışmada, G7 ülkelerine ait veriler 1989-2022 yıllarını kapsamaktadır. Çalışmada yıllık doğal afet sayısı (NDIS), aralık ayı yıllık ortalama sıcaklık (TEMP), kişi başına sera gazı emisyonları (GHG), aralık ayı yıllık yağış miktarı (PREC) ve LCF değişkenlerine ait veri kaynakları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Veri tanımları ve kaynakları

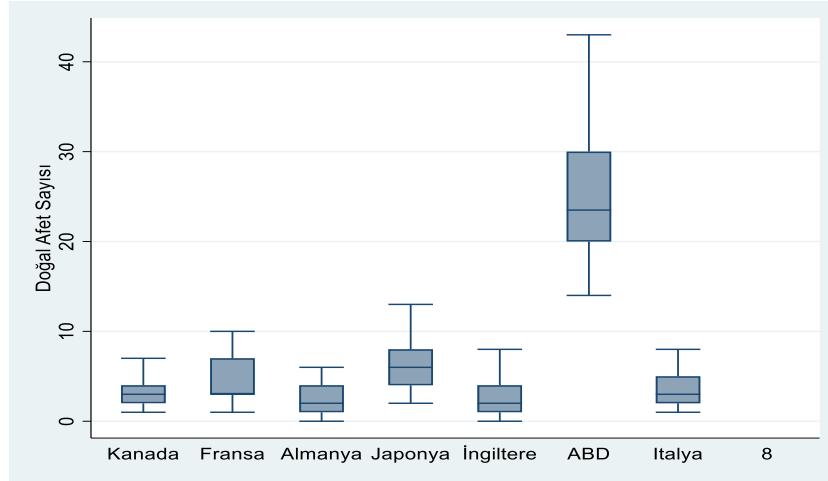
Değişken	Birim	Kaynak
Doğal Afet Sayısı (NDIS)	Adet	Acil Durum Olayları Veritabanı (EM-DAT) – CRED
Sıcaklık (TEMP)	°C	Dünya Bankası İklim Verileri (World Bank)
Sera Gazı Emisyonları (GHG)	Ton	Karbon Dioksit Bilgi Analiz Merkezi (CDIAC)
Yağış(PREC)	mm	Dünya Bankası İklim Verileri (World Bank)
Yük Kapasite Faktörü (LCF)	Adet	Küresel Ayak İzi Ağı (Global Footprint Network)

Değişkenlere ait betimsel istatistikler Tablo 3 ile aralarındaki ilişkiler ise Tablo 4 ile aşağıda verilmiştir.

Tablo 3: Betimsel istatistikler

Değişkenler	n	$\bar{x}$	Std. S.	Min	Max
NDIS	236	6.746	8.117	0	43
TEMP	238	8.675	5.458	-5.23	14.38
GHG	238	13.529	6.018	5.767	26.117
PREC	238	925.559	359.634	530.26	1930
LCF	238	.54	.595	.121	2.373

Tablo 3'e göre; ortalama yıllık doğal afet sayısı ($\bar{x} = 6.75$, $SD = 8.12$) dikkate alındığında, ülkeler arasında ve yıllar içinde belirgin bir farklılık olduğu görülmektedir. En düşük değer 0 iken en yüksek değer 43 olup, bu durum bazı ülkelerde doğal afetlerin oldukça sık yaşandığını göstermektedir. G7 ülkelerinde doğal afet sayısının dağılımını gösteren kutu grafiği Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2: Doğal afet sayısının ülkelere göre dağılımı

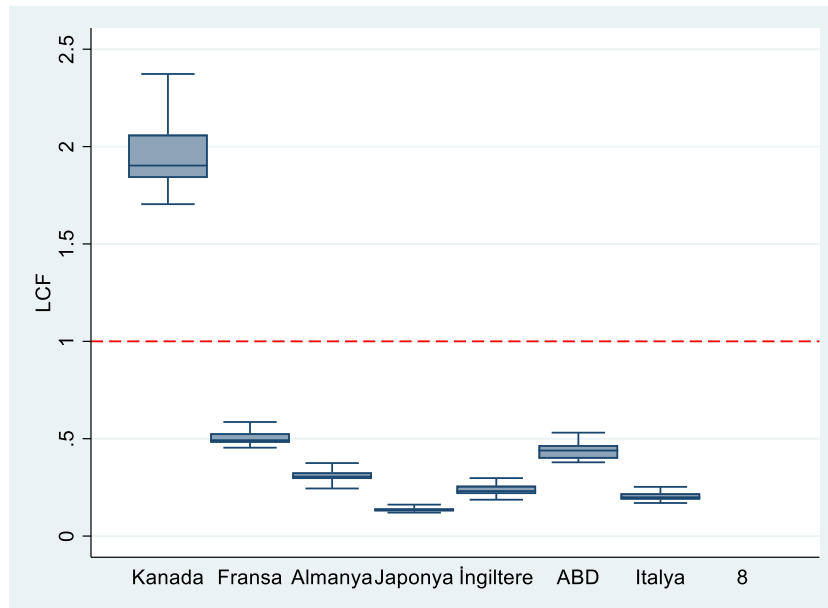
Şekil 2 ile ABD'nin diğer ülkelere kıyasla doğal afet sıklığının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. ABD'deki doğal afetlerin medyan değeri diğer ülkelerden belirgin şekilde yüksektir ve dağılım genişliği, olayların büyük ölçüde değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Japonya, Fransa ve Almanya gibi ülkelerde ise afet sayısının nispeten daha düşük olduğu ve dağılımın daha dar olduğu görülmektedir. Kanada, İngiltere ve İtalya'da da afet sayılarında düşük bir medyan değeri gözlemlenmektedir. Bu farklılıklar, ülkelerin coğrafi konumları, iklimsel koşulları ve afet yönetimi stratejileriyle ilişkilendirilebilir.

Bağımsız değişkenler incelendiğinde, ortalama sıcaklık değeri ($\bar{x} = 8.68$, $SD = 5.46$) ülkeler arasında sıcaklık farklarının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Minimum sıcaklık değeri -5.23°C ile bazı ülkelerde soğuk iklim koşullarının varlığını gösterirken, maksimum sıcaklık 14.38°C ile daha ılıman veya sıcak bölgeleri işaret etmektedir.

Sera gazı emisyonları (GHG) için ortalama değer 13.53 metrik ton olup, standart sapma 6.02 olarak hesaplanmıştır. Minimum 5.77 ve maksimum 26.12 değerleri, G7 ülkeleri arasında sera gazı salınımlarında ciddi bir farklılık olduğunu göstermektedir. Bu farklılık, ekonomik büyüklük, sanayi yoğunluğu ve enerji politikalarındaki çeşitlilikten kaynaklanıyor olabilir.

Yağış miktarı ($\bar{x} = 925.56$ mm, $SD = 359.63$) değişkeni, ülkeler arasında yağış rejimlerinin oldukça değişken olduğunu göstermektedir. Minimum yağış miktarı 530.26 mm, maksimum ise 1930 mm olup, bazı G7 ülkelerinde yıllık yağış miktarının belirgin derecede yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Son olarak, LCF ($\bar{x} = 0.54$, $SD = 0.60$) değişkeni, ülkeler arasındaki biyokapasite ve ekolojik ayak izi dengesinde belirgin farklılıklar olduğunu Şekil 3 de kutu grafiği ile verilmiştir. Minimum değer 0.12 ve maksimum değer 2.37 olup, G7 ülkelerinin biyokapasitelerinin çevresel talepleri karşılamada ne kadar farklılıklar olduğu Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 3: LCF'nin ülkelere göre dağılımı

Şekil 3 incelendiğinde; Kanada'nın diğer ülkelere kıyasla en yüksek LCF'e sahip olduğunu göstermektedir. Kanada'nın LCF değeri 2'nin üzerinde olup, bu durum ülkenin biyokapasitesinin ekolojik ayak izinden oldukça fazla olduğunu işaret etmektedir. Diğer G7 ülkelerinde ise LCF değerleri 1'in altında seyretmekte, bu da ekolojik sürdürülebilirlik açısından daha düşük bir kapasiteye işaret etmektedir. Özellikle ABD, Almanya, İngiltere ve Japonya'nın düşük LCF değerlerine sahip olması, bu ülkelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından daha fazla baskı altında olduğunu göstermektedir. Her iki grafik bir arada değerlendirildiğinde, doğal afet sıklığının yüksek olduğu ABD ve Japonya gibi ülkelerde LCF'nin düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, ekolojik sürdürülebilirlik göstergelerinin doğal afet sıklığıyla ilişkili olabileceğini ve çevresel politikaların afet riskini azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Tablo 4'deki korelasyon analizi, doğal afetlerin sıklığı ile sıcaklık, yağış, sera gazı emisyonları ve yük kapasite faktörü arasındaki ilişkileri değerlendirmektedir.

Tablo 4: Korelasyon matrisi

Değişkenler	NDIS	LCF	TEMP	PREC	GHG
NDIS	1.000				
LCF	-0.310**	1.000			
TEMP	0.421**	-0.949***	1.000		
PREC	-0.178	-0.535**	0.445***	1.000	
GHG	0.577***	0.550***	-0.623***	-0.427***	1.000

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Sonuçlara göre, doğal afetlerin sıklığı ile sera gazı emisyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif bir korelasyon ($r = 0.577$, $p < .01$) bulunmaktadır. Bu durum, sera gazı emisyonlarının artmasının doğal afetlerin sıklığını artırabileceğini göstermektedir. Sıcaklık ile doğal afetler arasındaki ilişki pozitif ve anlamlıdır ($r = 0.421$, $p < .05$). Yağış ile doğal afetler arasında anlamlı bir ilişki gözlemlenmemiştir ($r = -0.178$, $p > .05$). Öte yandan, LCF ile doğal afetlerin sıklığı arasında negatif bir ilişki olduğu görülmektedir ($r = -0.310$, $p < .05$). Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinin afet sıklığı üzerinde potansiyel olarak azaltıcı bir etkisi olabileceğini göstermektedir.

Değişkenler arasındaki ilişkiler göz önüne alınarak; iklim değişikliği bağlamında sıcaklık, yağış, sera gazı emisyonlarının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinden olan LCF'nin meydana gelen doğal afet sayısı üzerindeki etkisini analiz etmek için panel veri analizi kullanılmıştır. Elde edilen tahmin sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Panel veri analizi, zaman serisi ve kesitsel verilerin birleşimini içeren bir yapıya sahip olması nedeniyle, geleneksel regresyon analizlerine kıyasla daha yüksek açıklayıcılık ve güvenilirlik sağlamaktadır (Baltagi, 2008). Ayrıca, gözlemler arasındaki heterojenliği kontrol etme kapasitesi sayesinde, ülkeler arasındaki yapısal farklılıkları dikkate alarak daha doğru tahminler elde edilmesine olanak tanımaktadır (Hsiao, 2014). Öncelikle panel veri setinde yatay kesit bağımlılığının varlığını test etmek amacıyla Breusch-Pagan LM testi uygulanmıştır. Test sonucu ($\chi^2(1)=31.01$, $p < .01$), bireysel etkilerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, rastgele etkiler modelinin panel veri yapısı için uygun olduğunu ve ülkeler arası heterojenliğin doğal afet sayısını etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Yatay kesit bağımlılığı tespit edildiğinden, modelin güvenilirliğini artırmak için Driscoll-Kraay sağlam standart hataları kullanılarak tahmin gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5: Rasgele etkiler yöntemi ile model tahmini

NDIS	Katsayı	Dayanıklı St.Hata.	t-Testi	p-Değeri
TEMP	1.448	.3	4.82	.000
GHG	.653	.117	5.58	.000
PREC	.0035	.002	1.77	.080
LCF	-7.739	2.491	-3.11	.002
Sabit	-13.888	5.373	-2.89	.003
NDIS Ortamala	6.689		NDIS St. Sapma	8.107
R-Kare	0.742		n	238
Chi-Kare	37.326		Prob > chi2	0.000
R-Kare Grup İçi	0.012		R-Kare Gruplar Arası	0.816

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Tablo 5 incelendiğinde; Driscoll-Kraay sağlam standart hata rasgele etkiler modeliyle yapılan tahmin sonuçları, sıcaklık, sera gazı GHG, yağış miktarı ve LCF doğal afet sayısı üzerindeki etkisini istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Model sonuçlarına göre sıcaklık ve sera gazı emisyonları doğal afet sayısını artırıcı yönde etkilerken, LCF doğal afet sayısını azaltıcı bir etkiye sahiptir. Yağış değişkeni ise %10 anlamlılık düzeyinde pozitif bir etki gösterse de istatistiksel olarak nispeten daha zayıf bir ilişkiye sahiptir.

Modelin genel anlamlılığını test eden ki-kare (χ^2) istatistiği ($\chi^2 = 37.326$, $p < 0.01$) modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Modelin açıklayıcılık gücü yüksek olup, genel R^2 değeri 0.742 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, iklim değişikliğinin ve çevresel sürdürülebilirlik kriteri olan LCF'nin doğal afetlerin oluşumunda önemli belirleyiciler olduğunu göstermektedir.

Ayrıca panel veri analizinin uygulanabilirliği açısından değişkenlerin durağan olup olmadığı test edilmiştir. Bu amaçla Im-Pesaran-Shin (IPS) ve Fisher tipi birim kök testleri uygulanmış ve sonuçlar Tablo 6 ile verilmiştir (Im vd., 2003).

Table 6: IPS ve Fisher birim kök testi

	IPS		Fisher	
	I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
NDIS	-4.8702**	-8.8867**	24.9241**	23.3436**
TEMP	-4.1449**	-9.2348**	17.0382**	18.0332**
GHG	0.0161	-6.0696**	-2.4488	-2.2355**
PREC	-5.3613**	-8.9287**	30.8529**	32.1476**
LCF	-0.0795	-6.5477*	-1.46047	-0.3154**

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Test sonuçlarına göre doğal afet sayısı sıcaklık ve yağış değişkenleri durağan (I(0)) bulunmuş ve doğrudan modele dahil edilmiştir. Ancak GHG ve LCF değişkenleri durağan değildir (I(1)), bu nedenle modele eklenmeden önce birinci farkları alınarak durağan hale getirilmiştir. Bu işlem, sahte regresyon sorununu önlemek ve modelin güvenilirliğini artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada serilerin durağanlık analizinin ardından, değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkilerin belirlenmesi ve değişkenlerin bütünleşik olup olmadıklarının tespit edilmesi amacıyla eşbütünleşme testleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, panel veri analizlerinde yaygın olarak kullanılan Pedroni ve Kao eşbütünleşme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen eşbütünleşme test sonuçları Tablo 7'de sunulmaktadır.

Table 7: Eşbütünleşme testleri

NDIS=f(TEMP, GHG, PREC, LCF)		
Pedroni Panel Eşbütünleşme Testi		
	t-Testi	Olasılık
Panel v	-7.0753	0.000***
Panel v	-7.0753	0.000***
Panel rho	-7.1528	0.000***
Panel P.P	-6.3963	0.000***
Panel ADF	-6.3889	0.000***
Group P	-3.2594	0.000***
Group PP	-8.8786	0.000***
Group ADF	-9.0193	0.000***
Kao Panel Eşbütünleşme Testi		
	t-Testi	Olasılık
ADF	-3.2459*	0.006***

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Elde edilen eşbütünleşme testi sonuçları, doğal afet sayısı ile iklim ve çevresel faktörler arasında uzun dönemde önemli bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Pedroni ve Kao testlerinin tümü, %1 anlamlılık düzeyinde eşbütünleşme ilişkisini desteklemektedir. Pedroni testinin panel ve grup düzeyindeki sonuçları, çevresel faktörlerle doğal afet sayısı arasındaki ilişkinin güçlü bir şekilde var olduğunu gösterirken, Kao testi, ilişkiyi doğrulamakla birlikte daha zayıf bir tespit yapmaktadır. Bu bulgular, çevresel faktörlerin doğal afet sayısı üzerinde uzun vadeli etkilerinin bulunduğunu ve bu ilişkinin daha fazla incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen eşbütünleşme bulguları, değişkenlerin uzun dönemde birlikte hareket ettiğini ve herhangi bir dengesizlik oluştuğunda sistemin tekrar dengeye dönme eğiliminde olduğunu göstermektedir (Engle & Granger, 1987). Bu doğrultuda, Driscoll-Kraay standart hatalarıyla düzeltilmiş Panel Hata Düzeltme Modeli (ECM) kullanılarak uzun ve kısa dönem ilişkileri analiz edilmiştir ve sonuçları sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9 ile verilmiştir. Ayrıca, değişkenler arasındaki nedensellik ilişkileri belirlenerek, uzun vadede hangi faktörlerin doğal afet sayısını etkilediği incelenmiştir.

Tablo 8: Uzun dönem tahmini

NDIS	Katsayı	Dayanıklı St.Hata	t-Testi	p-değeri
TEMP	2.105	.179	11.74	.000***
GHG	1.543	.061	25.40	.000***
PREC	.003	.001	3.45	.001***
LCF	-9.302	1.625	-5.72	.000***
Sabit	-12.461	3.299	-3.26	.000***
NDIS Ortalaması	6.746	NDIS Std. Sapması		8.117
R-Kare	0.746	n		236
F-test	170.030	Prob > F		0.000
Akaike crit. (AIC)	1343.259	Bayesian crit. (BIC)		1360.578

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Panel eşbütünleşme testleri, değişkenler arasında uzun dönemli bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir. Uzun dönem katsayı tahminleri, sıcaklık, sera gazı emisyonları, yağış ve yük kapasite faktörü kullanımındaki değişikliklerin doğal afet sayısı üzerinde anlamlı etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Özellikle sera gazı emisyonları ve yük kapasite faktörü değişkenlerinin uzun dönemde anlamlı çıkması, bu faktörlerin iklim dinamiklerini zaman içinde değiştirerek doğal afetlerin sıklığını artırdığına işaret etmektedir.

Tablo 9: Kısa dönem tahmini

D.NDIS	Katsayı	Dayanıklı St.Hata	t-Testi	p-değeri
D.Temp	.97	.353	2.75	.006***
D.GHG	.157	.653	0.24	.810
D. PREC	.004	.002	2.22	.027**
D. LCF	-3.163	5.918	-0.53	.594
Hata Düzeltme Terimi (ECM-1)	-.476	.058	-8.17	.000***
D.NDIS Ortalaması	0.123	D.NDIS Std. Sapması		3.998
R-Kare	0.266	n		228
F-test	16.058	Prob > F		0.000
Akaike crit. (AIC)	1219.584	Bayesian crit. (BIC)		1240.160

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Ancak, kısa dönem hata düzeltme modeli (ECM) sonuçlarına göre, sera gazı emisyonları ve yük kapasite faktörü kısa vadede doğal afet sayısını doğrudan etkilememektedir. Bu bulgu, karbon salınımı ve arazi kullanımındaki değişikliklerin anlık etkiler yaratmaktan ziyade, uzun vadede kümülatif olarak doğal afet oluşumunu artırdığını göstermektedir. Diğer yandan, sıcaklık ve yağış değişkenlerinin kısa dönemde de anlamlı olması, bu faktörlerin doğal afetleri tetikleyici kısa vadeli etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

Hata düzeltme katsayısının negatif ve anlamlı olması (-0.4757, $p < 0.01$), uzun dönem denge ilişkisine işaret etmektedir. Bu sonuç, doğal afetlerin zaman içinde belirli temel iklimsel faktörlere bağlı olarak dengeye yöneldiğini, ancak kısa dönemde sera gazı salınımındaki veya yük kapasite faktörü değişikliklerin bu sürece anlık bir katkı sunmadığını göstermektedir.

Bu bulgular, literatürdeki bazı çalışmalara paralellik göstermektedir. Örneğin, Tol (2002) ve Nordhaus (2013) gibi çalışmalar, sera gazı emisyonlarının doğal afetler üzerindeki etkisinin genellikle uzun vadeli olduğunu ve kısa vadede doğrudan bir etki yaratmadığını öne sürmektedir.

Dumitrescu ve Hurlin (2012) tarafından geliştirilen panel Granger nedensellik testi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10: DH nedensellik testi

Ho Hipotezi	Z-Bar	Olasılık
TEMP ≠NDIS	4.813	0.000***
NDIS≠ TEMP	0.567	0.534
GHG ≠NDIS	4.789	0.000***
NDIS ≠ GHG	0.312	0.688
PREC≠NDIS	1.345	0.090**
NDIS≠ PREC	0.213	0.671
LCF ≠NDIS	9.456	0.000***
NDIS ≠ LCF	1.534	0.105

*** $p < .01$, ** $p < .05$, * $p < .1$

Nedensellik testi sonucunda; sıcaklık, sera gazı emisyonları, yük kapasite faktörü ve yağış değişkenleri, doğal afet sayısını anlamlı bir şekilde etkilemektedir. Özellikle sıcaklık, sera gazları ve karbon ayak izi, %1 anlamlılık seviyesinde doğal afet sayısının belirleyicisi olarak öne çıkarken, yağış değişkeni %10 anlamlılık seviyesinde etkili bulunmuştur. Bununla birlikte, doğal afet sayısının bu değişkenler üzerinde ters yönde anlamlı bir etkisinin olmaması, iklim değişikliğinin doğal afetler üzerindeki tek yönlü nedensel etkisini desteklemektedir. Bu bulgular, mevcut literatürde ifade edilen, iklim değişikliğine bağlı çevresel faktörlerin doğal afetlerin sıklığını ve şiddetini artırdığı yönündeki bulgularla (Emanuel, 2005; Nordhaus, 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021) tutarlıdır. Özellikle, sera gazı emisyonları ve karbon ayak izi gibi insan faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel faktörlerin, doğal afetleri tetikleyici bir unsur olarak rol oynadığı bu çalışma ile de doğrulanmaktadır.

Bu çalışmada, değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkisinin varlığı Pedroni (1999) ve Kao (1999) eşbütünleşme testleri ile analiz edilmiş ve doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, bağımsız değişkenlerin tamamının uzun vadede doğal afet sayısını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilediğini göstermektedir. Ancak, Dumitrescu ve Hurlin (2012) panel Granger nedensellik testi sonuçlarına göre, kısa dönemde sera gazı emisyonları ve yük kapasite faktörü ile doğal afet sayısı arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmemiştir. Buna karşın, uzun dönem sonuçları, bu değişkenlerin zaman içinde doğal afet oluşum dinamiklerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, iklim değişikliğinin doğal afetler üzerindeki etkisinin kümülatif ve uzun vadeli süreçler aracılığıyla gerçekleştiğini desteklemektedir (Nordhaus, 2013; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Çalışmada uygulanan Driscoll-Kraay standart hatalarıyla düzeltilmiş Panel Hata Düzeltme Modeli (ECM) sonuçları, hata düzeltme teriminin negatif ve istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.01$) olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, sistemin uzun dönem dengesine yönelimini ve kısa vadeli şokların zamanla dengelendiğini göstermektedir (Engle & Granger, 1987). Kısa dönem etkisinin anlamlı olmadığı değişkenler için ek bir model tahminine ihtiyaç duyulmamış, uzun dönem denklemi nihai model olarak kabul edilmiştir. Literatürde de doğal afetlerin oluşum dinamiklerinin ani ve geçici şoklardan ziyade, uzun vadede birikimli çevresel değişikliklerle şekillendiği vurgulanmaktadır (Tol, 2002; Stern, 2007). Bu bağlamda, sigorta sektörünün uzun dönem risk yönetim stratejilerini geliştirmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır ve doğal afet risklerinin yönetilmesi ve sigorta sektörünün sürdürülebilir politikalar önerileri aşağıda verilmiştir.

Sigorta sektörünün sürdürülebilirliğini artırmak için öncelikle ileri düzey iklim risk modellemeleri ve büyük veri analizlerinin kullanılması gereklidir. İklim değişikliğiyle artan belirsizlikler, geleneksel risk değerlendirme yöntemlerinin yetersiz kalmasına yol açmaktadır (Michel-Kerjan & Kousky, 2010). Bu nedenle, sigorta şirketlerinin, uydu verileri, yapay zeka destekli tahmin modelleri ve meteorolojik büyük veri setleri gibi kaynaklardan yararlanarak iklim risklerini daha doğru şekilde ölçmeleri ve fiyatlamaları kritik bir öneme sahiptir.

Sürdürülebilir sigorta politikalarının bir diğer ayağı, devlet ve özel sektör arasında kurumsallaşmış iş birliklerinin oluşturulmasıdır. Özellikle aşırı hava olayları ve büyük afetler gibi yüksek zarar potansiyeline sahip riskler için, kamu destekli yeniden sigorta mekanizmalarının geliştirilmesi gerekmektedir (Kunreuther vd., 2013). Bu tür mekanizmalar, sigorta şirketlerinin risk yükünü paylaşmalarına ve piyasadan çekilme riskini azaltmalarına yardımcı olur.

Sigorta sektörünün sürdürülebilirliğini desteklemek adına, düşük sigorta penetrasyonuna sahip bölgelerde teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi önemlidir. Mikro-sigorta ürünleri aracılığıyla, özellikle düşük gelirli kesimlerin afet risklerine karşı korunması sağlanabilir. Surminski ve Oramas-Dorta (2014), bu tür kapsayıcı sigorta ürünlerinin iklim adaptasyonu stratejilerinde etkili bir araç olduğunu belirtmektedir.

Avrupa Birliği'nin "Yeşil Finans" stratejileri örneğinde olduğu gibi, sigorta sektörünün iklim değişikliğiyle mücadelede aktif bir rol üstlenmesi beklenmektedir. Bu kapsamda, düşük karbonlu yatırımları teşvik eden sigorta ürünlerinin geliştirilmesi ve sigorta şirketlerinin portföylerinde çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) kriterlerine uyumlu yatırımlara öncelik vermeleri önerilmektedir (Linnerooth-Bayer & Hochrainer-Stigler, 2015).

Son olarak, sigorta şirketlerinin sadece zarar telafisine odaklanmak yerine, afet önleyici altyapı projelerine yatırım yapmaları da sürdürülebilir bir sigorta sisteminin temelini oluşturur. Örneğin, sel riskini azaltmaya yönelik baraj ve drenaj sistemleri gibi altyapı yatırımlarının desteklenmesi, uzun vadede hem sigortalı zararları azaltır hem de sektörün finansal dayanıklılığını güçlendirir (Botzen vd., 2019).

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, G7 ülkelerinde iklimsel ve çevresel faktörlerin doğal afetlerin meydana gelme sıklığı üzerindeki etkisi, panel veri analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Pedroni ve Kao eşbütünleşme testleri sonucunda, bağımsız değişkenlerin uzun vadede doğal afet sayısını anlamlı şekilde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle GHG ve LCF gibi çevresel değişkenlerin kısa vadede anlamlı bir etkisinin bulunmamasına rağmen, uzun vadede doğal afet sayısının önemli belirleyicileri olduğu tespit edilmiştir. Driscoll-Kraay standart hatalarıyla düzeltilmiş Panel Hata Düzeltme Modeli (ECM) bulguları, uzun dönem denge ilişkisine dönüşün sağlandığını ve çevresel değişkenlerin zamanla afet dinamikleri üzerindeki etkilerini artırdığını göstermektedir. Bu sonuçlar [Intergovernmental Panel on Climate Change \(2021\)](#), [Nordhaus \(2013\)](#) ve [Stern \(2007\)](#) gibi literatürdeki öncü çalışmalarla tutarlıdır ve iklim değişikliğinin etkilerinin zamana yayıldığını desteklemektedir.

Sigortacılık sektörü açısından elde edilen bulgular, uzun vadeli risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Doğal afetlerin sıklığı ve şiddetindeki artış, sigorta sektörünün hasar maliyetlerini yükseltmekte ve bu durum doğrudan sigorta primlerinde artışa yol açmaktadır. Artan maliyetler, sigorta şirketlerinin sadece mevcut riskleri değil, gelecekteki iklim risklerini de içerecek şekilde kapsamlı ve ileriye dönük modeller yapmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, sigorta şirketlerinin sürdürülebilir sigorta ürünleri tasarlamaları, risk bazlı fiyatlandırma stratejilerini iklimsel değişkenleri dikkate alarak güncellemeleri ve yeniden sigortalama mekanizmalarını daha aktif şekilde kullanmaları önem arz etmektedir ([Kunreuther vd., 2013](#)).

G7 ülkeleri bağlamında değerlendirildiğinde, bu ülkelerin sigorta sektörleri doğal afet risklerini yönetme konusunda gelişmiş düzenleyici çerçevelere sahip olmakla birlikte, iklim değişikliğinin getirdiği yeni ve karmaşık risk yapıları karşısında daha proaktif, önleyici ve adaptif politikalar benimsemeleri gerektiği anlaşılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde FEMA'nın (Federal Emergency Management Agency) risk paylaşımı odaklı modelleri ve Kanada'nın sigorta penetrasyonunu artırıcı teşvik mekanizmaları örnek olarak gösterilebilir ([Surminski & Thieken, 2017](#)). Ayrıca Japonya'nın iklim kaynaklı afetlere yönelik kamu destekli sigorta sistemleri ve Almanya'nın iklim risklerini özel sektörle entegre eden sigorta politikaları da başarılı uygulamalardır. Ancak, bu ülkelerde dahi sigorta sistemlerinin uzun vadeli iklim projeksiyonlarını daha kapsamlı şekilde içerecek şekilde güçlendirilmesi ve risk havuzlarının iklim değişikliği senaryolarına göre yeniden yapılandırılması gerekmektedir ([Botzen vd., 2019](#)).

Sigorta sektörünün iklim değişikliğine karşı daha dirençli hale gelebilmesi için ileri düzey veri analitiği ve iklim modelleme tekniklerinin kullanımı kaçınılmazdır. Sigorta şirketlerinin, özellikle G7 ülkelerinde geliştirilen iklim risk modelleme tekniklerini benimseyerek poliçe tasarımlarında ve prim hesaplamalarında bu riskleri daha görünür hale getirmeleri gerekmektedir ([Michel-Kerjan & Kousky, 2010](#)). Bununla birlikte, devletlerin sigorta sektörü ile iş birliği içinde afet risk yönetimi fonlarını güçlendirmesi ve sigorta penetrasyonunun düşük olduğu bölgelerde özellikle küçük ölçekli tarım işletmeleri gibi savunmasız gruplara yönelik özel destek mekanizmaları oluşturması büyük önem taşımaktadır ([Surminski & Oramas-Dorta, 2014](#)).

Avrupa Birliği'nin "Yeşil Finans" stratejileri çerçevesinde, sigorta sektörünün iklim risklerini finansal sistemin geneline entegre etmesi desteklenmekte ve bu model, küresel ölçekte sigortacılık sektörü için örnek teşkil etmektedir. Sigorta şirketleri, sadece riskin finansmanı ile yetinmeyip, aynı zamanda iklim değişikliğinin etkilerini azaltıcı (örneğin altyapı dayanıklılığı artırıcı) yatırımlara yönelmelidir ([Linnerooth-Bayer & Hochrainer-Stigler, 2015](#)). Özellikle sürdürülebilir altyapı projelerine yatırım yapılması, afet kaynaklı hasarları azaltarak uzun vadeli sigorta maliyetlerini düşürmeye katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, çalışmanın bulguları, sigorta sektörünün iklim değişikliği kaynaklı risklerin uzun vadeli ve dinamik doğasını göz önüne alarak, daha esnek ve ileriye dönük stratejiler geliştirmesi gerektiğini göstermektedir. G7 ülkeleri bu konuda öncü rol üstlenerek, küresel sigorta sektörüne iklim değişikliğiyle uyumlu yeni iş modelleri geliştirilmesi yönünde liderlik yapabilir. Bu nedenle, sigorta sistemlerinin hem mevcut risklere hem de gelecekteki belirsizliklere daha duyarlı hale getirilmesi, sektörün finansal sürdürülebilirliğini sağlamak açısından kritik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Kaynaklar

- Alkan, G. (2019). *İklim değişikliğinin katastrofik riskler üzerinde yarattığı etkilerin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Baltagi, B. H. (2008). *Econometric analysis of panel data* (4. basım). John Wiley & Sons.
- Birkmann, J., Cutter, S. L., Rothman, D. S., Welle, T., Garschagen, M., Van Ruijven, B., ... & Pulwarty, R. (2015). Scenarios for vulnerability: Opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk. *Climatic Change*, 133, 53–68.
- Botzen, W. W., Deschenes, O., & Sanders, M. (2019). The economic impacts of natural disasters: A review of models and empirical studies. *Review of Environmental Economics and Policy*, 13(2), 167–341.
- Browne, M. J., Hoyt, R. E., & Marais, J. C. (2022). *A reexamination of excess returns and the underwriting cycle in the property-liability insurance market*. https://www.fox.temple.edu/sites/fox/files/documents/Cummins%20Conference%202022/xs_returns_uw_cycle_0328-paper.pdf
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. (2004). *Global fossil carbon emissions*. <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2025). *Emergency Events Database (EM-DAT)*. <https://www.emdat.be/>

- Dumitrescu, E. I., & Hurlin, C. (2012). Testing for Granger non-causality in heterogeneous panels. *Economic Modelling*, 29(4), 1450–1460.
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688.
- Engle, R. F., & Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276.
- Ferreira, S. (2024). Extreme weather events and climate change: Economic impacts and adaptation policies. *Annual Review of Resource Economics*, 16, 207–231.
- Giuzio, M., Kapadia, S., Kumar, H., Mazzotta, L., Parker, M., Rousová, L., & Zafeiris, D. (2024). *Climate change, catastrophes, uninsurability and the macroeconomy*. https://www.comp-net.org/fileadmin/_compnet/user_upload/Finpro_4/Protection_gap__1__1_-_Linda_Rousova_2_.pdf
- Global Footprint Network. (2022). *National footprint accounts, ecological footprint*. California, United States. <https://data.footprintnetwork.org/>
- Herring, S. C., Christidis, N., Hoell, A., Hoerling, M. P., & Stott, P. A. (2021). Explaining extreme events of 2019 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(1), 1–115.
- Hsiao, C. (2014). *Analysis of panel data*. Cambridge University Press.
- Im, K. S., Pesaran, M. H., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115(1), 53–74.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kao, C. (1999). Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data. *Journal of Econometrics*, 90(1), 1–44.
- Kossin, J. P., Knapp, K. R., Olander, T. L., & Velden, C. S. (2020). Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 11975–11980.
- Kousky, C. (2017). Disasters as learning experiences or disasters as policy opportunities? Examining flood insurance purchases after hurricanes. *Risk Analysis*, 37(3), 517–530.
- Kunreuther, H. C., Pauly, M. V., & McMorrow, S. (2013). *Insurance and behavioral economics: Improving decisions in the most misunderstood industry*. Cambridge University Press.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28.
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ø., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1–8.
- Linnerooth-Bayer, J., & Hochrainer-Stigler, S. (2015). Financial instruments for disaster risk management and climate change adaptation. *Climatic Change*, 133, 85–100.
- Mechler, R., & Bouwer, L. M. (2015). Understanding trends and projections of disaster losses and climate change: Is vulnerability the missing link? *Climatic Change*, 133(1), 23–35.
- Michel-Kerjan, E. O., & Kousky, C. (2010). Come rain or shine: Evidence on flood insurance purchases in Florida. *Journal of Risk and Insurance*, 77(2), 369–397.
- Nguyen, H., Feng, A., & Garcia-Escribano, M. M. (2025). *Understanding the macroeconomic effects of natural disasters* (WP/25/46). International Monetary Fund.
- Nordhaus, W. D. (2010). The economics of hurricanes and implications of global warming. *Climate Change Economics*, 1(1), 1–20.
- Nordhaus, W. D. (2013). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Pata, U. K. (2021). Do renewable energy and health expenditures improve load capacity factor in the USA and Japan? A new approach to environmental issues. *European Journal of Health Economics*, 22(9), 1427–1439.
- Pata, U. K., & Samour, A. (2023). Assessing the role of the insurance market and renewable energy in the load capacity factor of OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 48604–48616.
- Pedroni, P. (1999). Critical values for cointegration tests in heterogeneous panels with multiple regressors. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61(S1), 653–670.
- Shang, Y., Razzaq, A., Chupradit, S., An, N. B., & Abdul-Samad, Z. (2022). The role of renewable energy consumption and health expenditures in improving load capacity factor in ASEAN countries: Exploring new paradigms using advanced panel models. *Renewable Energy*, 191, 715–722. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.013>
- Siche, R., Pereira, L., Agostinho, F., & Ortega, E. (2010). Convergence of ecological footprint and emergy analysis as a sustainability indicator of countries: Peru as case study. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(10), 3182–3192.
- Singh, A., & Madaan, G. (2023). Sustainable climate change and its impact on the insurance sector. In K. Sood, S. Grima, P. Young, E. Ozen, & B. Balusamy (Eds.), *The impact of climate change and sustainability standards on the insurance market* (pp. 143–163). Wiley.
- Stern, N. (2008). The economics of climate change. *American Economic Review*, 98(2), 1–37.
- Surminski, S., & Oramas-Dorta, D. (2014). Flood insurance schemes and climate adaptation in developing countries. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 7, 154–164.
- Tol, R. S. (2002). Estimates of the damage costs of climate change. Part 1: Benchmark estimates. *Environmental and Resource Economics*, 21, 47–73.
- Torusdag, T., Tepeci, M., & Metin, İ. (2024). İklim değişikliğinin sigorta sektörü üzerindeki etkileri: Türkiye örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(2), 409–423.
- Von Peter, G., von Dahlen, S., & Saxena, S. (2024). Unmitigated disasters? Risk sharing and macroeconomic recovery in a large international panel. *Journal of International Economics*, 149, Article 103920. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2024.103920>
- World Bank. (2024). *Climate change knowledge portal: Historical precipitation and temperature data*. 3 Ekim 2024'te <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/> adresinden alındı.
- Yılmaz, Z. (2009). *İklim değişikliği risklerinin sigorta sektörüne etkileri açısından incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>

Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri İle Samanlı Dağları Kütlesinde Heyelan Duyarlılık Analizi

S. Murat Uzun^{1,*} 

¹Marmara Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 34744, İstanbul.

Özet

Can ve mal kaybına yol açan, oluşum sıklığı yüksek ve birçok faktörden etkilenerek meydana gelen heyelanların Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla duyarlılık analizlerin oluşturulması, olası heyelanların tahmininde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada Marmara Denizi'nin doğu kesimindeki Samanlı Dağları kütlesinin heyelan duyarlılık analizi Frekans Oranı (FO) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Araştırmada ilk olarak farklı heyelan veri tabanları, uydu görüntüleri ve arazi çalışmalarından elde edilen bilgiler kullanılarak heyelan envanteri üretilmiştir. Daha sonra jeoloji, eğim, göreceli rölyef, topografik nemlilik indisi (TWI), faylara mesafe, akarsulara mesafe, Normalleştirilmiş Fark Bitki İndisi (NDVI), topografik pürüzlülük indisi (TRI), yağış ve yollara mesafe parametreleri kullanılarak FO ve YSA yöntemleri ile sahanın heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Samanlı Dağları heyelan duyarlılık sonuçları her iki yöntemde de 5 seviyeli olarak üretilmiştir. Modellerin doğruluk analizi için alıcı çalışma karakteristiği (ROC) kullanılmıştır. Frekans Oranı yöntemine göre çalışma sahasının %38'i çok düşük-düşük, % 43'ü orta, % 19'u yüksek-çok yüksek düzeyde heyelan duyarlılığını barındırmaktadır. YSA modeline göre ise çalışma sahasının %27'i çok düşük-düşük, % 45'i orta, % 27'i yüksek-çok yüksek düzeyde heyelan duyarlılığını sahiptir. Her iki modelde de heyelan duyarlılığın yüksek olduğu sahalar, Çınarcık-Yalova-Karamürsel arasındaki havzalarda, Gölcük-Karamürsel kıyı kuşağı ve İznik-Pamukova-Geyve-Arifiye hattında yoğunlaşmaktadır. Çalışma sahasında heyelanı tetikleyen temel parametreler ise tortul litolojik birimler, fay ve yollara yakınlık ile eğim değerleridir. Araştırmada ROC doğruluk modeline göre örneklem sahası olan Samanlı Dağları kütlesi kapsamında heyelan duyarlılık modellerinden YSA'nın FO'ya göre daha başarılı olduğu saptanmıştır.

Anahtar Sözcükler

Heyelan Duyarlılık Analizi, Frekans Oranı (FO), Yapay Sinir Ağları (YSA), Samanlı Dağları, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

Landslide Susceptibility Analysis in Samanlı Mountains Massif by Frequency Ratio and Artificial Neural Networks Methods

Abstract

Susceptibility analyses of landslides, which cause loss of life and property, have a high frequency of occurrence and are affected by many factors, play an important role in the prediction of possible landslides with the help of Geographic Information Systems (GIS). In this study, the landslide susceptibility analysis of the Samanlı Mountains massif in the eastern part of the Marmara Sea was created using Frequency Ratio (FR) and Artificial Neural Networks (ANN) methods. Firstly, landslide inventory was produced by using information obtained from different landslide databases, satellite images and field studies. Then, landslide susceptibility analysis of the site was carried out with FR and ANN methods using geology, slope, relative relief, topographic moisture index (TWI), distance to faults, distance to streams, Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), topographic roughness index (TRI), rainfall and distance to roads parameters. Samanlı Mountains landslide susceptibility results were produced with 5 levels in both methods. Receiver operating characteristic (ROC) was used for accuracy analysis of the models. According to the Frequency Ratio method, 38% of the study area has very low-low landslide susceptibility, 43% has medium landslide susceptibility and 19% has high-high landslide susceptibility. According to ANN model, 27% of the study area has very low-low landslide susceptibility, 45% has medium landslide susceptibility, and 27% has high-high landslide susceptibility. In both models, the areas with high landslide susceptibility are concentrated in the basins between Çınarcık-Yalova-Karamürsel, Gölcük-Karamürsel coastal belt and İznik-Pamukova-Geyve-Arifiye line. The main parameters that trigger landslides in the study area are sedimentary lithological units, proximity to faults and roads and slope values. In the study, according to the ROC accuracy test, ANN was found to be more successful than FO among the landslide susceptibility models within the scope of the Samanlı Mountains mass, which is the sample area.

Keywords

Landslide Susceptibility Analysis, Frequency Ratio (FR), Artificial Neural Networks (ANN), Samanlı Mountains, Geographic Information Systems (GIS).

1. Giriş

Dünyada doğa ve insan kaynaklı olarak her yıl sayısız afet meydana gelmekte, bu afetlerin etkilerinden kaynaklı olarak büyük oranlarda can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Afetler oluşum mekanizması açısından jeolojik-jeomorfolojik, hidro-meteorolojik, klimatolojik, antropojenik, karma süreçlerle tetiklenen, biyolojik ve teknolojik afetler olarak sınıflandırılabilir (Şahin & Sipahioğlu, 2007). Aynı zamanda afetler doğa ve insan kaynaklı ya da ani ve yavaş gelişen afetler olarak da sınıflandırılmaktadır. Kütle hareketleri içerisinde yer alan heyelanlar, farklı litolojik birimlerin ya da bunların kombinasyonundan oluşan malzemenin, doğal ve antropojenik tetikleyicilerle meydana gelen süreçle belirli bir yamaç eğiminden hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır (Varnes, 1978; Chen vd., 2016; Sharma vd., 2024). Heyelanlar, ani ve ekstrem yağışlar, volkanik faaliyetler, depremler ve antropojenik olarak özellikle topografyaya yapılan müdahalelerle tetiklenebilmektedir (Lee & Talib, 2005; Cihangir & Görüm, 2016; Alvioli vd., 2024).

Yıllık frekansı yüksek olan sıklıkla meydana gelen ve sonucunda katastrofik etkilerle birlikte can, mal ve sosyo-ekonomik kayıplara yol açan heyelanları duyarlılık, tehlike ve risk analizleri açısından incelemek oldukça önem taşımaktadır (Meten vd., 2015; Froude & Petley, 2017). Bu tür çalışmalarda nitel ve nicel birçok yöntem kullanılmakta, aynı zamanda heyelanı etkileyebilecek farklı parametreler temel alınmaktadır (Gong vd., 2021; Mao vd., 2024). Bu kapsamda heyelanı etkileyen birçok ana ve alt kriterlerin bulunması, yapılacak heyelan duyarlılık çalışmalarında doğru parametrenin seçilmesini önemli hale getirir (Guzzetti vd., 1999; Gökçeoğlu & Ercanoğlu, 2001; Cihangir vd., 2018). Heyelanı etkileyen kriterlerin etki faktörü ve kantitatif etki değeri ise geçmişte meydana gelmiş heyelanlı sahalar üzerinden tespit edilebilmektedir. Heyelan envanterleri, geçmişte meydana gelmiş heyelanların, tipi, lokasyonu, tarihi, etki parametreleri ve yol açtığı can ve mal kayıplarının bilgisini içermektedir (Huang vd., 2024). Dünyada ve Türkiye’de özellikle heyelan envanterinin incelenmesi ve değerlendirmelerin yapılması birçok duyarlılık çalışmasında uygulanan sistematiklerin başında gelir (Fidan & Görüm, 2020).

Heyelanın meydana gelme potansiyelini birçok farklı parametrenin farklı kombinasyonları üzerinden dağılışı olarak ortaya konması ve bu analizin haritalanması, heyelan duyarlılık haritaları olarak nitelendirilmektedir (Aleotti & Chowdhury, 1999). Heyelan duyarlılık analizlerinin yapılmasında istatistiksel, sezgisel ve deterministik yöntemler kullanılmaktadır (Wang vd., 2024). Son yıllarda gelişen teknolojik imkanlar ile yersel ve zamansal çözünürlüğü yüksek veriler, heyelan araştırmaları ve duyarlılık haritaların üretilmesinde önemli işlevlere sahip olduğu tespit edilmiştir (He vd., 2023; Basheer & Oommen, 2024). Heyelan duyarlılık araştırmalarında kullanılan yöntemler genel olarak şunlardır; analitik hiyerarşi süreci (AHS), iki ve çok değişkenli analizler, lojistik regresyon, rastgele orman, olasılık yöntemi, bulanık mantık ve diğerleridir (Akgün vd., 2008; Akıncı vd., 2015; Özşahin, 2015; Dağ vd., 2020; Ado vd., 2022; Aydoğan & Dağ, 2023; Gulbet & Getahun, 2024; Rodrigues Neto & Bhandary, 2024; Khan vd., 2024; Güneş & Kömüşcü, 2025).

Heyelan duyarlılık analizi yöntemlerinden biri olan Frekans Oranı (FO)’da, geçmiş dönemli meydana gelmiş heyelanlı sahalardaki etki-faktör kriterlerinin piksel sayısı ve oranına dayanan bir yöntem olup birçok heyelan duyarlılık çalışmasında kullanılmıştır (Lee & Talib, 2005; Shu vd., 2021; Ali, 2024; Oyda vd., 2024). Yöntemin varsayımsal teorisi geçmiş verilerin gelecekte de en duyarlı sahalara olacağı, bu sahalara etkileyen parametrelerin önem derecesinin heyelanlı topografyalardaki değerlerin büyüklüğü ile ilişkisidir (Bisht vd., 2024). Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ise insan beyninin işleyiş dinamiğini temel almakta ve heyelanı etkileyen faktörler arasındaki bağlantısal ilişkilerin nöronları andıran yapılarla eğitilmesi sonucu çıktı (duyarlılık haritaları) verilerini ortaya koymaktadır (Bragagnolo vd., 2020; Zhao vd., 2022).

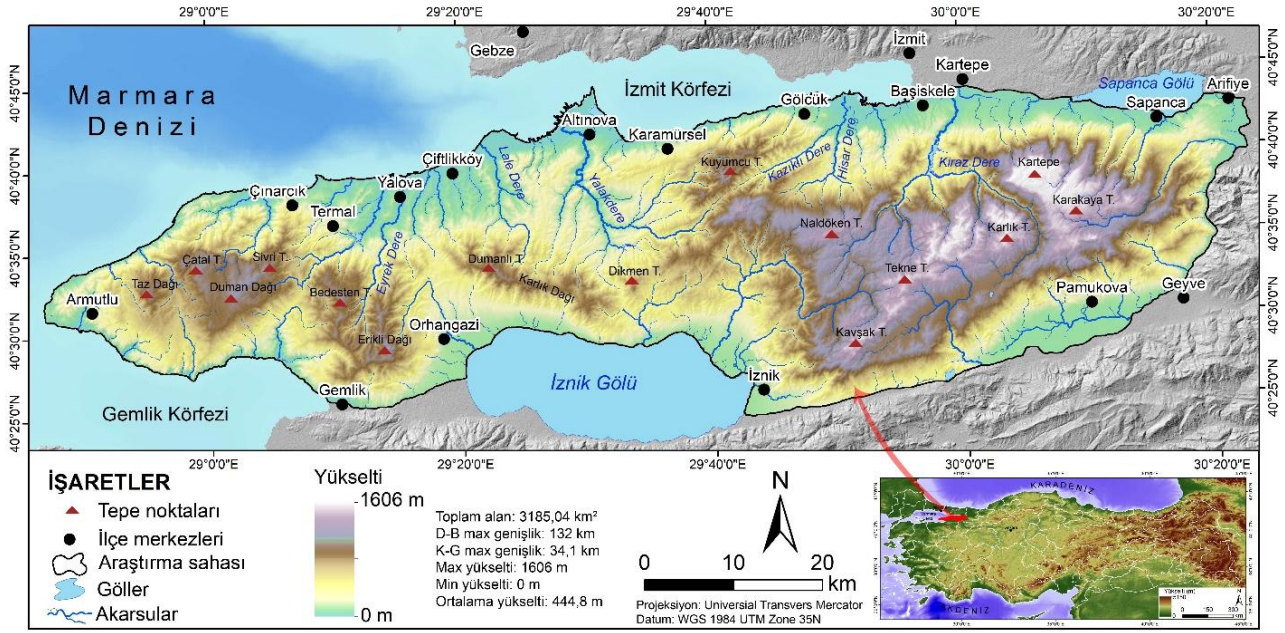
Türkiye’nin ani değişen yükselti, eğim değerleri ile arızalı morfolojik görünümü, farklı ve özellikle duyarlı litolojik birimlerin varlığı, ani, ekstrem ve sağanak şeklinde düşen yağış, antropojenik olarak topografyaya müdahale unsurları geçmişten günümüze birçok heyelanın yaşanmasına neden olmuştur (Bayrakdar & Görüm, 2012; Akıncı vd., 2015; Fidan & Görüm, 2020; Günini & Öztürk, 2021; Karaman vd., 2022; Demirbilek & Turoğlu, 2024). Bu heyelanlarda birçok insan hayatını kaybetmiş, maddi zararlar ortaya çıkmış hatta meydana gelen heyelan afeti bazı yerleşim sahalalarının yer değiştirmesine neden olmuştur (Gorum vd., 2008; Akıncı vd., 2017). Bu bakımdan heyelan duyarlılık çalışmalarının gelişen teknolojik imkanlarla daha yüksek çözünürlük, daha yüksek doğruluk oranı sahip olarak yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada da Marmara Bölgesi’nin doğusunda yer alan Samanlı Dağları kütlesinin heyelan duyarlılığı Frekans Oranı (FO) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Araştırma, hem heyelan duyarlılığı açısından iki farklı yöntemin karşılaştırmasını ve sonuçlarının değerlendirilmesini içermekte hem de çalışma sahasında önlem alınması gereken başlıca alanları ortaya koymaktadır. Çalışmada çok kriterli etmenlerin farklı yöntemlerle heyelan etki durumunun belirlenmesi, YSA’nın bu tür çalışmalarda çok fazla kullanılmaması (Zhao vd., 2022), FO’ya göre karşılaştırmaların yapılması, araştırmadaki özgün bulguların ortaya konma amacına karşılık gelmektedir.

1.1. Çalışma Sahası

Çalışma sahasını oluşturan Samanlı Dağları kütlesi, Türkiye’nin kuzeybatısındaki Marmara Bölgesi’nin doğusunda yer alır. Dağ kütlesinin kuzey sınırını İzmit Körfezi, kuzeydoğusunu İzmit-Sapanca alüvyal dolgu sahası, doğusunu Sakarya Nehri ve Geyve boğazı, güneyini Pamukova, İznik-Mekece fay zone ile İznik Gölü, güneybatısını Gemlik Körfezi,

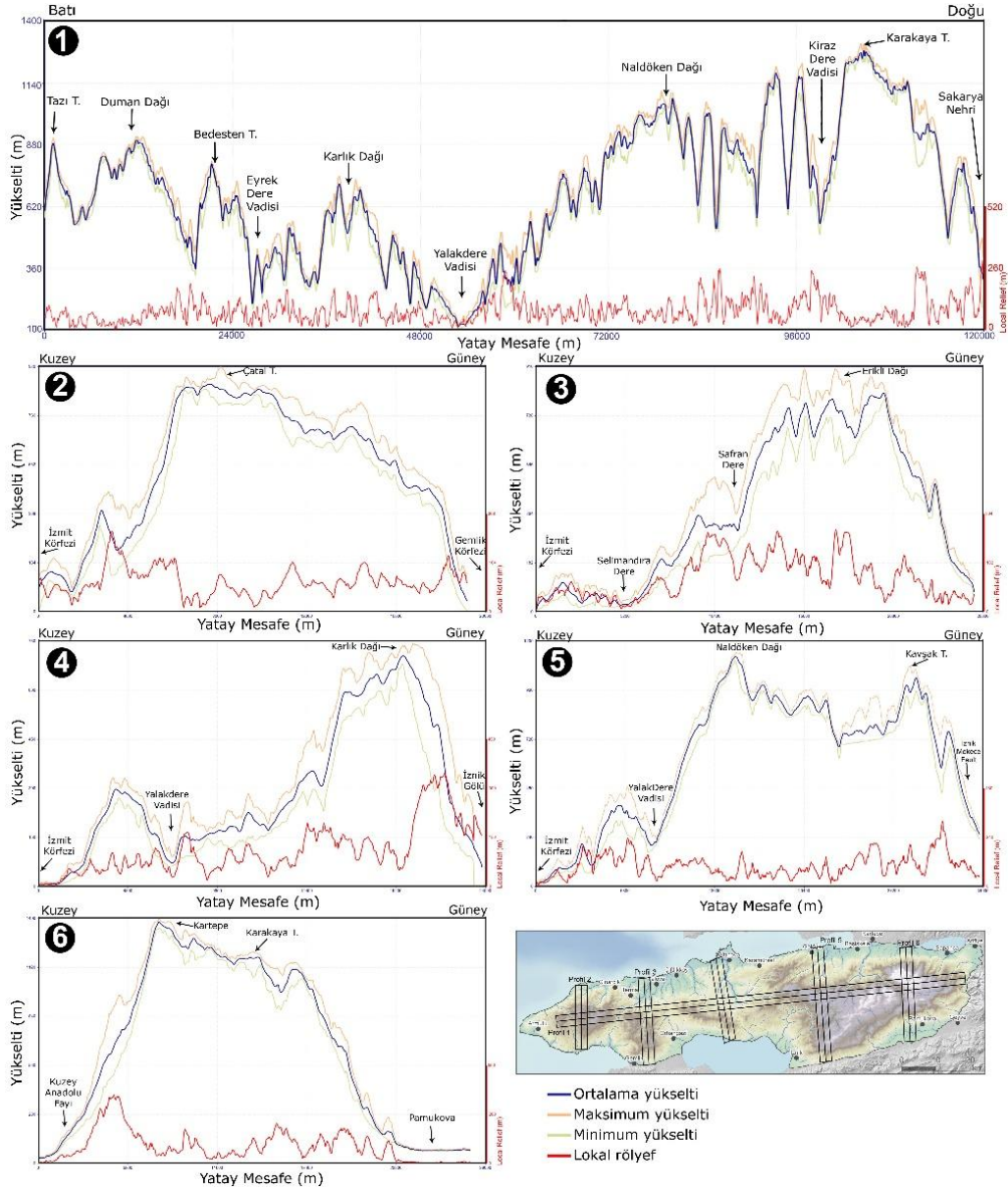
batisını Marmara Denizi oluşturmaktadır (Şekil 1). Sınırları belirtilen çalışma sahası toplam 3185 km²'lik alan kaplamaktadır.

Samanlı Dağları kütlesi doğuda Armutlu yarımadasındaki Taz Dağı'ndan itibaren doğu-batı doğrultusunda farklı yükselti seviyelerinde uzanış göstermekte, Kartepe ile en yüksek noktasına ulaşmakta ve Sakarya Nehri ile doğu sınırı sonlanmaktadır (Şekil 1). Tektonik etkenlerin yoğun yaşandığı çalışma sahasının kuzey sınırını Kuzey Anadolu Fay Hattı, güney sınırını ise İzmit-Mekece fay zone, İzmit Gölü kuzey kıyıları ve Gemlik fayı oluşturmaktadır. Polinejik özellikler gösteren çalışma sahasında farklı zamanlara ait birçok litolojik birim bulunmaktadır (Bilgin, 1967). Prekambriyen'e ve Paleozoyik'e ait yaşlı araziler özellikle çalışma sahasının doğusunda şist, mermer, metabazit, amfibolit, gnays birimleri ile gözlemlenmektedir. Mesozoyik birimleri karasal ve denizel kırıntılar, fasiyesler olarak Pamukova çevresi ile Kiraz Dere, Yalak Dere, Hisar Dere, Eyrek Dere havzalarının yukarı çıkışlarında gözlemlenir (Bilgin, 1967). İzmit Gölü kıyıları, Hersek deltası, Yalova çevresinde Miyosen-Pliyosen depoları ve alüvyonlar yer almaktadır. Tektonizmanın yoğun şekilde etkili olduğu çalışma sahasında litolojik birimler faylarla dokanaklı olarak gözlemlenmektedir (Hoşgören, 1995).



Şekil 1: Çalışma sahasının lokasyon haritası ve sayısal yükselti modeli (SYM)

Çalışma sahasında yükselti amplitüdü 1606 m olup en yüksek yer Kartepe'dir. Araştırma sahasının ortalama yükseltisi 444 m, ortalama eğim 14,1°'dir. Araştırma sahası neo-tektonic etkenler, östatik hareketler ve lokal deniz seviyesi değişimleri, flüvyal jeomorfik unsurların etkisi ile arızalı bir topografik görünüm sunmaktadır (Bilgin, 1967; Bargu, 1997) (Şekil 1 ve 2). Tektonik olarak İzmit Körfezi'ndeki graben yapısının güneyinde Samanlı Dağları doğrultusu özellikle Gölcük-Karamürsel hattında kıydan ani şekilde yükselmektedir (Erol & Kayacılar, 1994). Bunun dışındaki diğer alanlarda flüvyal jeomorfoloji koşullarının etkisinde gelişen erozif faaliyetler sahada birçok konsekant akarsu varlığının oluşmasına ve sonucunda dar vadilerin, yüksek eğimli yerlerin morfolojik olarak gözlemlenmesine neden olmuştur (Hoşgören, 1995) (Şekil 2). Araştırma sahasının orta, kuzey kesimi ve büyük çoğunluğu Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Csa, doğu kesimi Cfb ve Cfa, güneybatı kesimi Csb iklim sınıfı çerisinde yer almaktadır (Taşoğlu vd., 2024). Çalışma sahasının yıllık ortalama yağış miktarı 850 mm olup en yüksek yağışlar Kartepe dağlık bölgesi kuzey yamaçlarında 1500 mm'nin üzerinde gözlemlenmektedir. Bitki örtüsü yoğunluğu yüksek kesimlerde özellikle Kartepe çevresinde yoğundur. Yerleşim alanları çalışma sahasının kuzeyinde İzmit Körfezi kıyıları ile ova alanlarında yoğunlaşmıştır. Bu kesim aynı zamanda yol ağı ve yoğunluğunun da fazla olduğu sahalardır.



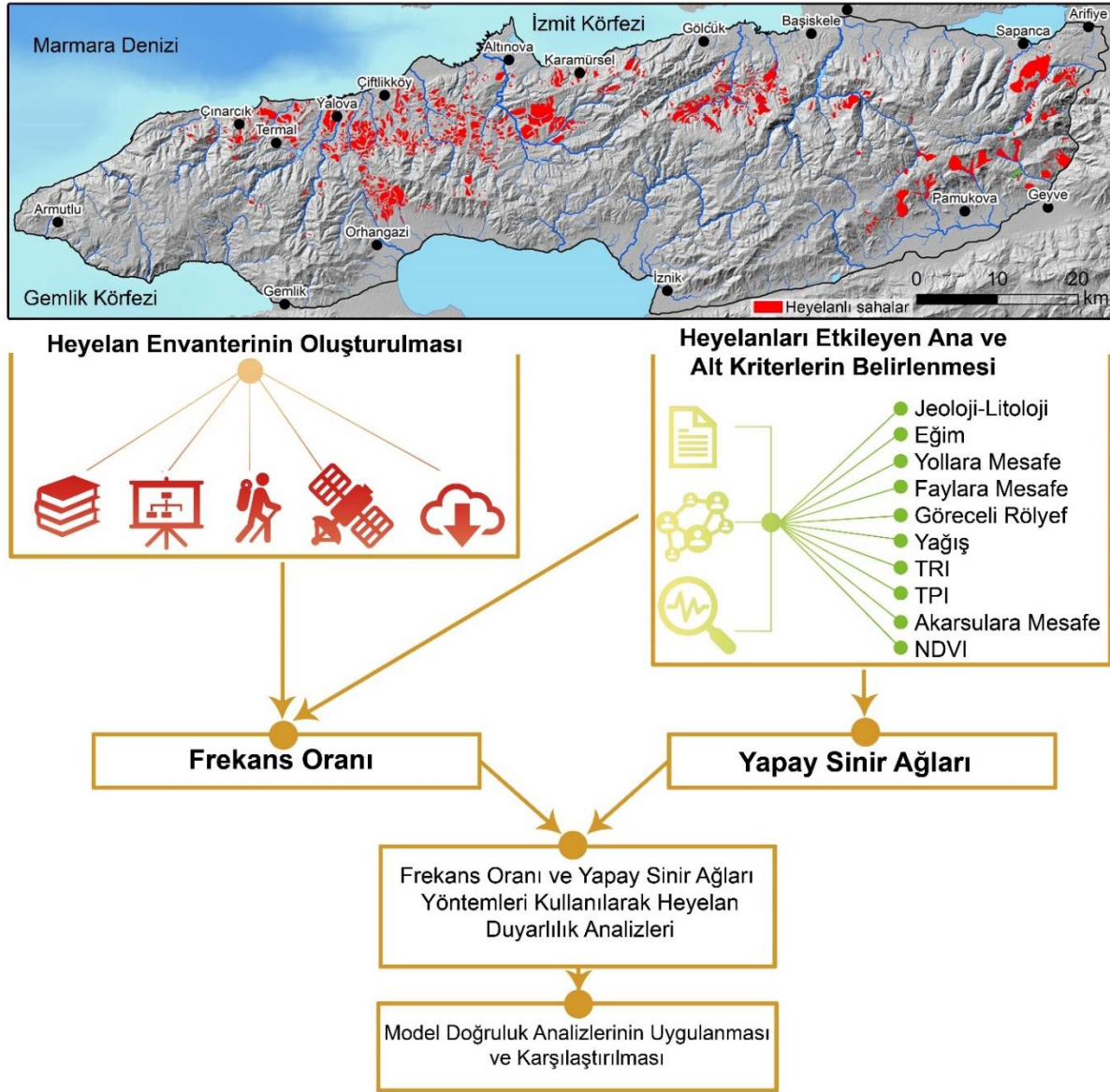
Şekil 2: Çalışma sahasının farklı doğrultularından alınmış SWATH profilleri

2. Veri ve Yöntem

2.1. Verilerin Kapsamı ve Heyelan Envanterinin Oluşturulması

Çalışmada veri olarak, Harita Genel Müdürlüğü'nden alınan 1:25.000 ölçekli topografya paftaları, MTA'dan alınan 1:250.000 ölçekli jeoloji haritası, heyelan envanteri ve diri fay verileri, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'nden alınan Kocaeli ili jeoloji verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden çalışma sahası kapsamında 15 farklı istasyona ait meteorolojik veriler, OpenStreetMap (OSM) üzerinden indirilen yol ağı verileri ile USGS'den temin edilen 28.07.2024 tarihine ait Landsat OLI, Copernicus'dan alınan 02.07.2024 tarihli Sentinel 2 MSI uydü görüntüleri kullanılmıştır.

Heyelanların karmaşık oluşum sistematığı ve farklı dinamikleri barındırması birçok faktörden etkilenebilir. Heyelanı etkileyen, kayma, akma ve kütle hareketlerinin tetiklenmesine sebep olan etmenleri jeolojik, jeomorfolojik, iklimik ve antropojenik faktörler oluşturmaktadır (Pham vd., 2020; Cihangir, 2024; Huang vd., 2024). Samanlı Dağları kütesindeki duyarlılık analizinde; çalışma sahasının özellikleri ve uzman görüşüne dayalı bir temel alınarak heyelanı etkileyen 10 ana faktör belirlenmiştir (Van Westen, vd., 2008; Samia vd., 2017; Cihangir vd., 2018; Hong vd., 2020) (Şekil 3). Bunları; jeoloji-litoloji, eğim, topografik (göreceli) rölyef, topografik nemlilik indisi (TWI), faylara mesafe, akarsulara mesafe, Normalleştirilmiş Fark Bitki Yoğunluğu (NDVI), topografik pürüzlülük indisi (TRI), yağış ve yollara mesafe verileri oluşturur (Şekil 4, 5 ve 6).



Şekil 3: Araştırmanın iş-akış şeması ve heyelan envanteri

Araştırmada ana verilerin oluşturulması için ilk olarak topografya paftalarından ArcGIS 10.5 yazılımı kullanılarak çalışma sahasının Sayısal Yükselti Modeli (SYM) oluşturulmuştur. SYM üzerinden eğim, topografik rölyef (Mark, 1975) verileri üretilmiştir. Daha sonra SYM verisine hidrolojik analiz uygulanarak akarsu ağı çıkarılmış, buffer (tampon) tekniği ile akarsuya mesafe verisi üretilmiştir. SYM verisi üzerinden aşağıdaki formüller kullanılarak, topografik nemlilik indisi (TWI) (Parker, 1982) (denklem 1) ve topografik pürüzlülük indisi (TRI) (Riley vd., 1999) (denklem 2) verileri ortaya konmuştur.

$$TWI = \frac{([FA]+1)}{([E]+1).Log} \quad (1)$$

$$TRI = Grid(H_{mean} - H_{min}) / Grid(H_{max} - H_{min}) \quad (2)$$

TWI denkleminde (1) FA eğim değerini, e kümülatif akışı ifade eder (Parker, 1982). TRI denkleminde (2) H_{mean} grid birim içerisindeki ortalama yükseltiyi, H_{min} grid birim içerisindeki minimum yükseltiyi ve H_{max} grid birim içerisindeki maksimum yükseltiyi ifade etmektedir (Riley vd., 1999).

MTA ve Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilen jeoloji verileri, sayısallaştırmış, düzenlenmiş ve çalışma sahasının jeoloji haritası üretilmiştir. Diri fay verilerine buffer tekniği uygulanarak faya mesafe verisi ortaya konmuştur. Yağış dağılışı verisi, çalışma sahası kapsamında ölçüm yapan 15 farklı meteoroloji istasyonunun toplam yıllık yağış miktarı verilerinin yükselti ile değişim ilişkisi hesaplanarak (lapse rate), thissen çokgenleri ve cokriging yöntemi ile ortaya konmuştur. Yollar uzaklık verisi OpenStreetMap üzerinden araştırma sahası kapsamında temin edilmiş ve buffer tekniği

ile mesafe analizi yapılmıştır. USGS'den alınan 28.07.2024 tarihli Landsat uydu görüntüsünün 4. (Pred) ve 5. (P_{NIR}) bandları kullanılarak aşağıdaki denklem 3 üzerinden Normalleştirilmiş Bitki Fark İndisi (NDVI) verisi üretilmiştir (Myneni, 1995).

$$NDVI = \frac{(P_{NIR} - P_{red})}{(P_{NIR} + P_{red})} \quad (3)$$

NDVI denkleminde (3) P_{NIR} yakın kızılötesi bandı, P_{red} ise kırmızı bandı ifade etmektedir (Myneni, 1995).

Yukarıda kapsamı ve oluşturulma aşaması belirtilen 10 farklı ana parametre verisi, uzman görüşü ile araştırma sahasının coğrafi ve jeomorfolojik özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş ve heyelan duyarlılık analizi için uygun hale getirilmiştir (Lee & Talib, 2005; Sun vd., 2020; Guzzetti, vd., 2012; Pourghasemi vd., 2020; Shano vd., 2021; Cantarino vd., 2023; Ke vd., 2023; Bhandari, vd, 2024). Ana kriterlerin alt parametre sınıflandırmasında doğal kırılım (natural breaks) algoritması kullanılmıştır. Belirtilen sınıflandırma yöntemi, verilere ait maksimum ve minimum değerler arasındaki mevcut doğal kırılmaları kullanmakta ve istenilen kategorik ayrımı ortaya koymaktadır (Gong vd., 2021). Alt parametrelerin kategori sayısında ise çalışma sahasının kendine has coğrafi özellikleri daha önce yapılmış araştırmaların incelenmesi sonucu revize edilerek belirlenmiştir (Pham vd., 2020; Cihangir, 2024; Huang vd., 2024).

İstatistiksel olarak heyelana etki eden faktörlerin derecesini özellikle frekans oranı yönteminde kantitatif değer olarak hesaplamak için heyelan envanteri verilerine ihtiyaç vardır. Heyelan envanterleri, araştırma sahası kapsamında daha önce meydana gelmiş heyelanlarının dağılışının tespit edilmesidir (Fidan & Görüm, 2020). Bu kapsamda birçok kaynak üzerinden yapılacak incelemeler duyarlılık çalışmalarında oldukça önem taşımaktadır. Bu çalışmada, MTA'dan alınan heyelan envanteri verileri, AFAD verileri, Em-DAT, FATAL-DOT verileri, 02.07.2024 tarihli Sentinel 2 MSI uydu görüntüleri analizi, Google Earth Pro analizleri, geçmişe dönük heyelan haberi verileri, belediye ve yerel halktan alınan bilgiler ile arazi çalışması sonucu elde edilen bulgular sonucunda Samanlı Dağları'nın güncel heyelan sahaları tespit edilmiş ve ArcGIS yazılımı kullanılarak sayısallaştırma işlemi yapılmıştır (Şekil 3).

2.2. Frekans Oranı (FO) Yöntemi

Afet duyarlılık analizlerinde istatistiksel, deterministik, sezgisel, niceliksel analizler vb. birçok yöntem kullanılmaktadır. Heyelan duyarlılık başta olmak üzere birçok afet duyarlılık analizinde kullanılan yöntemlerden biri de Frekans Oranı (FR) yöntemidir (Lee & Talib, 2005). İki değişkenli olan yöntem, istatistiksel verilerle kantitatif bulgular ortaya koyması, kolay uygulanabilirlik özellikleri neticesinde taşkın, heyelan, kaya düşmesi gibi afet duyarlılık analizlerinde çokça kullanılmaktadır (Wang vd., 2020; Aydoğan & Dağ, 2023; Oyda vd., 2024). Frekans oranı yöntemi, daha önce meydana gelmiş heyelan alanlardaki etki faktör değerlerinin kantitatif olarak belirlenmesi ve bu değerlere göre geçmiş dönemli heyelan alanlarında daha fazla heyelanın gerçekleşebilme olasılık prensibini temel almaktadır (Silalahi vd., 2019; Liu vd., 2022; Utlu, 2023). Yöntemde meydana gelmiş heyelanlı sahaların belirlenmesi ve etki faktörlerin seçimi oldukça önemlidir. Frekans Oranı yöntemi aşağıdaki formüller (denklem 4 ve 5) üzerinden uygulanmaktadır.

$$FR = \frac{\frac{Np(LXi)}{\sum_{i=1}^m}}{\frac{Np(Xj)}{\sum_{j=1}^m Np(Xj)}} \quad (4)$$

Formüldeki simgelerden, Np(LXi), etki-faktör değişkeni X'in i sınıfı içerisindeki heyelanlı piksel alanlarının değeri, Np(Xj), etki-faktör değişkeni, Xj içerisindeki heyelan piksel değeri, m faktör değişkeni Xi, içerisindeki kategorilerin değeri, n ise kullanılan etki-faktörlerin oranını ifade eder (Lee & Talib, 2005; Utlu, 2023). Frekans Oranı yöntemine göre heyelan duyarlılık dağılışın hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$FSI_{FR} = \sum FR \quad (5)$$

Formülde, FSI_{FR} heyelan duyarlılık analizini, FR ise duyarlılık analizinde kullanılan her bir pikselin değerini ifade etmektedir (Sonker vd., 2022). Formüle göre Frekans Oranı yöntemi kapsamında etki faktörlerinin her birine ait sınıfların FR değeri hesaplanmaktadır. Çalışmada, Frekans Oranı yöntemindeki çıkan sonuç değerleri arasındaki tutarsızlıkların giderilmesi amacıyla her bir faktör verisine ait FR değerlerinin normalizasyonu (NFR) yapılmıştır. Normalleştirilme işlemi genel olarak veriler arasındaki tutarsızlıkları ortadan kaldırmak amacıyla tercih edilir. Normalizasyon için aşağıdaki formül kullanılmaktadır (denklem 6).

$$NFR = \frac{(FR - FR_{min})}{(FR_{max} - FR_{min})} \times 100 \quad (6)$$

NFR formülünde, FR_{max}, en yüksek değeri, FR_{min}, en düşük değeri temsil eder. NFR sonuçları 0-100 arasında değişkenlik göstermektedir.

2.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi

Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi insan beyninin işleyişini temel alarak, sistemsal olarak işletim ve analiz mekanizmalarının eğitilmesi ile yapılan işlemler bütünüdür. Yapay Sinir Ağları yöntemi, özellikle insanın nörolojik (beyinsel) işleyişi ve öğrenmesini ön plana alarak geliştirilmiş yapay öğrenme, veri girişi ve çıktıların analizi üzerinden işlenmesi, etkileşimlerinin derecelendirilmesi, ilişkisel boyut yapıların tekrar ve istatistiksel komut verilmesiyle sağlanmaktadır (Lippman, 1987; Livingstone, 2009). YSA yöntemi, matematiksel modellerle insan beynini taklit eder ve doğal ortamı modelleyen yapay zekâ tabanlı bir analiz metodudur (Kohonen, 1988; Livingstone, 2009). YSA, esnek ve parametrik olmayan modelleme aracı olarak da nitelendirilebilmektedir (Tang & Chi, 2005). YSA'nın temel yapısı, girdi katmanı, bağlantılar, ara (gizli) katmanlar ve çıktı katmanından oluşur. YSA'da insan beynindeki nöronları yansıtan katmanlar birbirlerine hiyerarşik bir biçimde bağlanmaktadır (Zhao vd., 2022). Çeşitli özellik ve alt parametrelere sahip giriş katmanındaki bilgiler, bağlantılar vasıtasıyla bir öğrenme kuralı ile gizli (ara) katmana iletilir. Gizli katmanda sayısal olarak analiz edilen veriler, toplama fonksiyonundan sonra bağlantısal yapılarla eğitilir ve istenilen model sonucu çıktı katmanında ortaya konur (Livingstone, 2009). Bu çalışmada ileri beslemeli YSA modeli kullanılmıştır. Modelin girdi verileri 10 ana ve 65 alt parametreden oluşmaktadır. YSA modelindeki geçiş olasılıkları, girdi verilerinin ana ve alt parametreleri üzerinden korelasyon analizi ile hesaplanmıştır. YSA'da heyelan duyarlılık parametreleri arasındaki ilişkiler, bağlantılar vasıtasıyla ortaya konmuş, ara katmanda sayısal olarak işlenmiş eğitilmiş ve bütün etken faktörlerle model çıktısı ortaya konmuştur.

YSA'da toplam fonksiyonu, girdi ağırlıklarını, etkisini ve bir hücredeki net girdiyi hesaplamaktadır. Belirtilen işlemler aşağıdaki formül ile uygulanmaktadır (denklem 7).

$$NET = \sum_{i=1}^n W_{ij}X_i + B \quad y_i = f(NET) = \frac{1}{1+e^{-net}} \quad (7)$$

Formülde NET, hücredeki toplanan net girdinin tümünü; n, bir hücreye gelen toplam girdi sayısını; X_i , sinir hücresi girdi değerini; W_{ij} , ağırlık katsayılarını ve B, eşik değerini ifade eder (Livingstone, 2009). Çalışmadaki YSA içerisinde aktivasyon fonksiyonu ise toplam fonksiyonundan elde edilen net girdiyi bir işlemde geçirerek hücre ve tahmin durumunu belirlemektedir. Bu işlemde yukarıda belirtilen $f(NET)$ formülü kullanılmaktadır (Livingstone, 2009).

2.4. Doğruluk Analizleri – Alıcı İşlem Karakteristiği (ROC) Yöntemi

Çalışmada son olarak Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile ortaya konan duyarlılık analizi değerleri, sonuçların doğruluk oranının değerlendirilmesi ve sorgulanabilmesi amacıyla Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) yöntemine tabi tutulmuştur. ROC eğrisi ve analizi özellikle farklı kapsamlarda üretilen duyarlılık haritalarının verimliliğini ölçen yöntemlerden biridir (Tehrany vd., 2013). Analiz genel olarak yaşanan olay verisinin envanteri ile yapılan duyarlılık verilerinin eğitim ve test verisi olarak karşılaştırma üzerinden hesaplanmaktadır. ROC yöntemi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Denklem 8).

$$FPR = \frac{FP}{FP+TN} \quad TPR = \frac{TP}{TP+FN} \quad (8)$$

Formülde, FP yanlış pozitif vakaların sayısını, TN doğru negatif vakaların sayısını, TP doğru pozitif vakaların sayısını ve FN yanlış negatif vakaların sayısını ifade eder (Utlü, 2023). ROC eğrisi yanlış pozitif ve doğru pozitif değerleri düşeyde ve yatayda x ve y eksenlerine dağıtır. Elde edilen ROC eğrisi üzerinde kalan değer (bu değere AUC denmektedir) 1'e yaklaşması model doğruluğunun yüksek olduğunu 0'a yaklaşması ise doğruluğun düşük olduğunu ortaya koyar. Bu çalışmada modelleri doğruluk analizlerinde, 6398 adet envanter verisi kullanılmıştır (noktasal olarak). Analizinde kullanılan bu verilerin %70'i (4479 veri) eğitim, %30'u (1919 veri) ise test verisi olarak rastgele bir şekilde seçilmiştir. Elde edilen ROC sonuçları her iki model açısından karşılaştırılmış verimlilikleri değerlendirilmiştir.

3. Bulgular

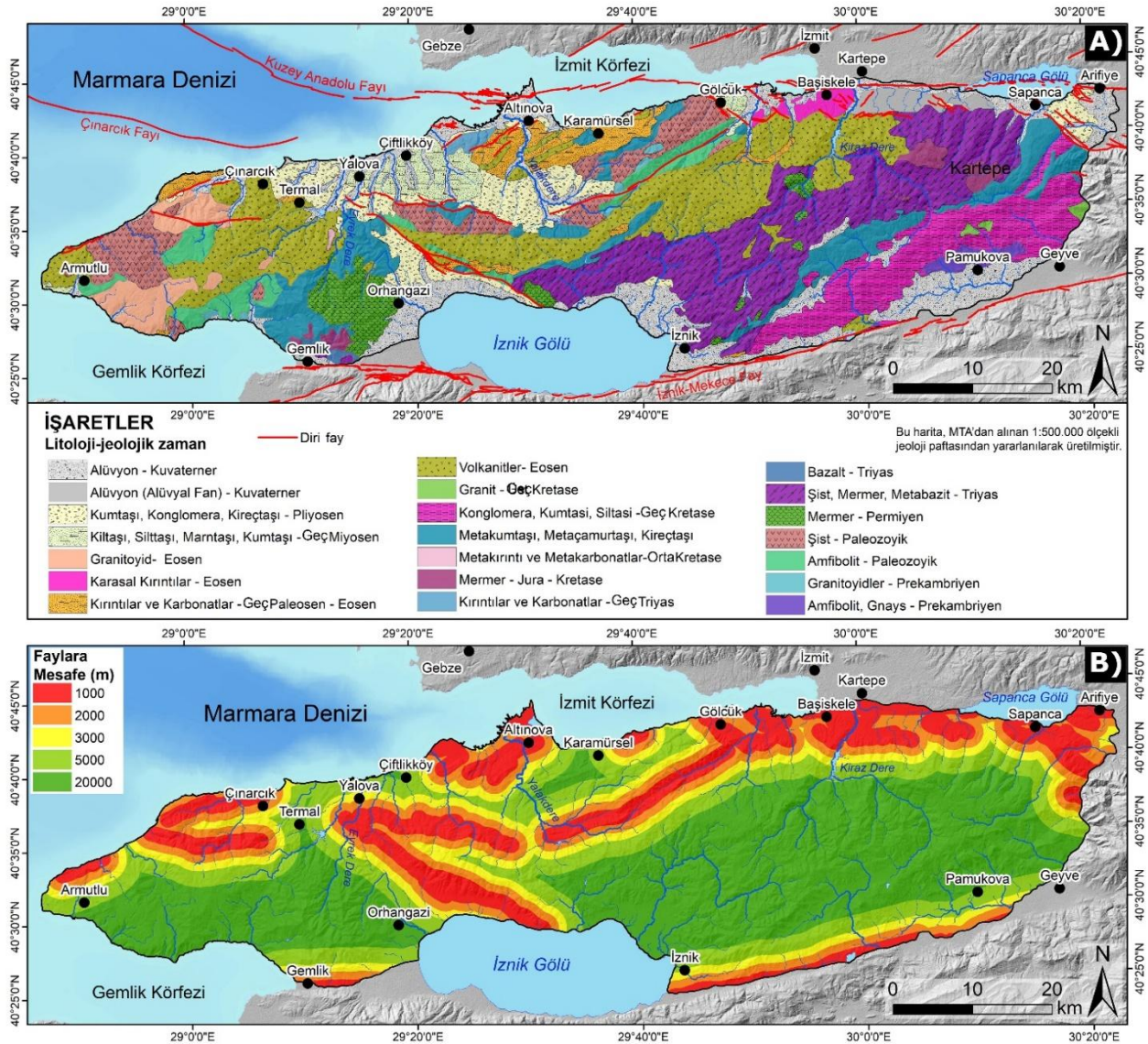
3.1. Samanlı Dağları Kütlesinin Heyelan Envanteri ve Heyelanı Etkileyen Faktörler

Çalışma sahasında MTA heyelan envanteri verileri, arazi çalışmaları, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri üzerinden heyelanlı alanlar tespit edilmiş ve haritalandırılmıştır. Daha önce meydana gelmiş heyelanların, Yalova-Çınarcık-Termal arasında, Yalakdere havzasında, Orhangazi'nin kuzeyinde, Karamürsel yerleşmesinin güney kesiminde, Gölcük ve Hisar Dere havzasında, Pamukova-Geyve-Sapanca arasındaki sahada yoğunlaştığı saptanmıştır. Araştırmada, çalışma sahası kapsamında 1127 farklı heyelan sahasının olduğu tespit edilmiştir. Bu sahaların bir kısmında eski ve aktif heyelanların aynı alanlarda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Samanlı Dağları kütlesinde 138 adet akma, 989 adet kayma şeklinde heyelan tespit edilmiştir. Heyelanlar alansal büyüklük açısından da sınıflandırılmıştır (Cihangir, 2024). Kayma şeklindeki heyelanlar toplam heyelan sayısının %87,7'sini oluşturmaktadır. Çalışmada, Samanlı Dağları kütlesinin %5,2'sinin (165

km²) heyelanlı alandan oluştuğu saptanmıştır. Heyelanların en geniş alan kaplayanı 9,14 km², en küçük alan kaplayanı 6,96 m²'dir. Göreceli büyüklük olarak Samanlı Dağları kütleinde 1 heyelan (12,3-5,1 km²) çok büyük, 29 adet heyelan büyük (5,1-1,0 km²), 485 heyelan orta (1,0-0,1 km²), 594 heyelan küçük (0,1-0,001 km²) ve 18 heyelan ise (<0,001 km²) çok küçük olarak belirlenmiştir.

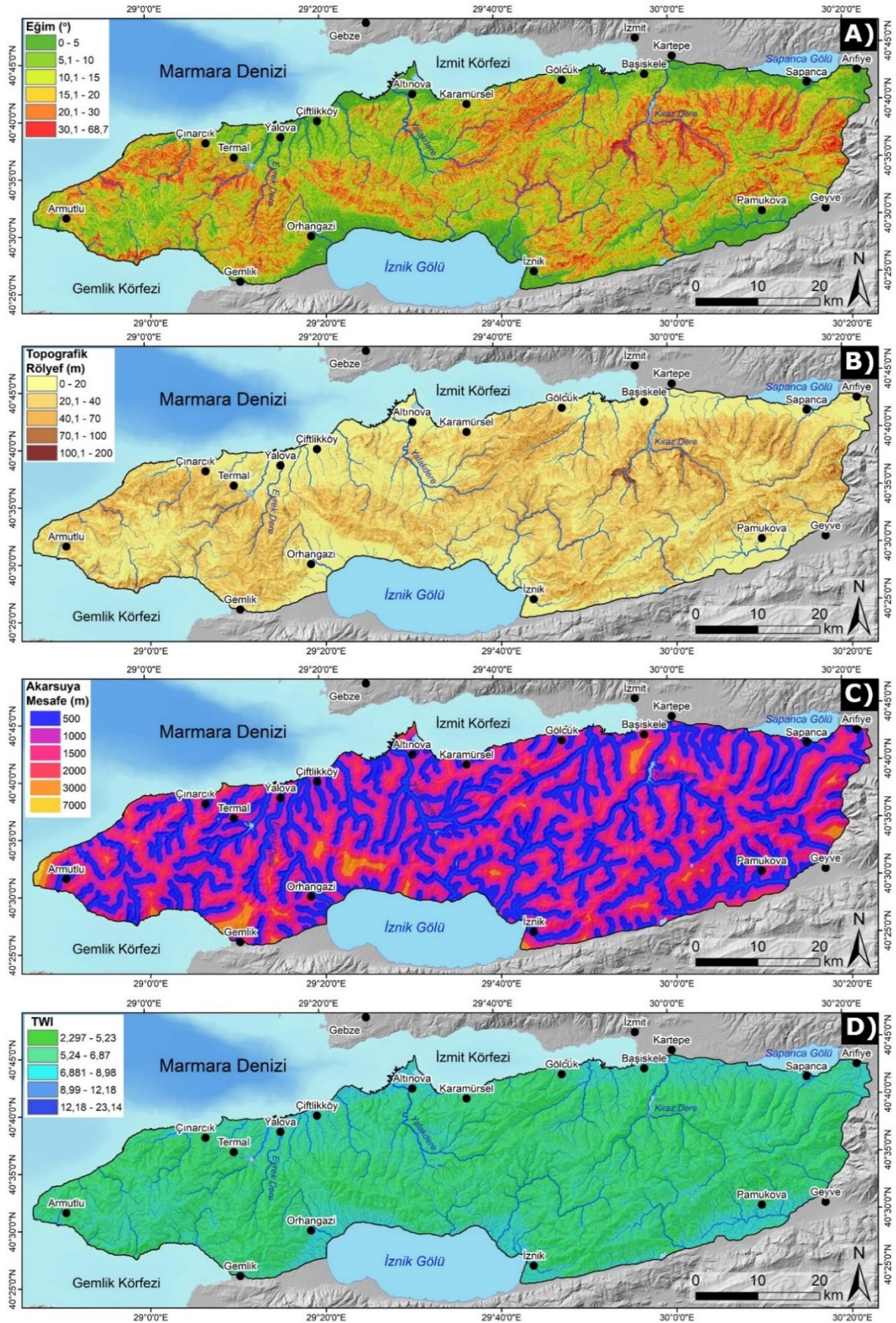
Heyelanların oluşum mekanizmasında rol oynayan, bu süreçleri tetikleyen birçok ana faktörler ve bunlara ait birçok alt parametreler bulunmaktadır. Çalışmada, Samanlı Dağları kütleğinde heyelan duyarlılık analizi için 10 ana kriter ve bunlara ait toplam 65 alt parametre belirlenmiş, bu parametreler Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları yöntemlerinde kullanılmıştır. Böylece çalışmada niceliksel ve niteliksel olarak analizler birlikte ele alınmıştır.

Araştırma sahasının özellikle alçak kesimlerinde tortul birimler, yüksek kesimlerinde ise zamansal açıdan daha yaşlı ve dayanıklı birimlerin olduğu tespit edilmiştir. Samanlı Dağları kütlesi kuzeyden Kuzey Anadolu Fayı, Çınarcık fayı, güneyden Geyve-Pamukova fayı, İznik-Mekece fay ve Gemlik fay ile sınırlanmıştır (Şekil 4).



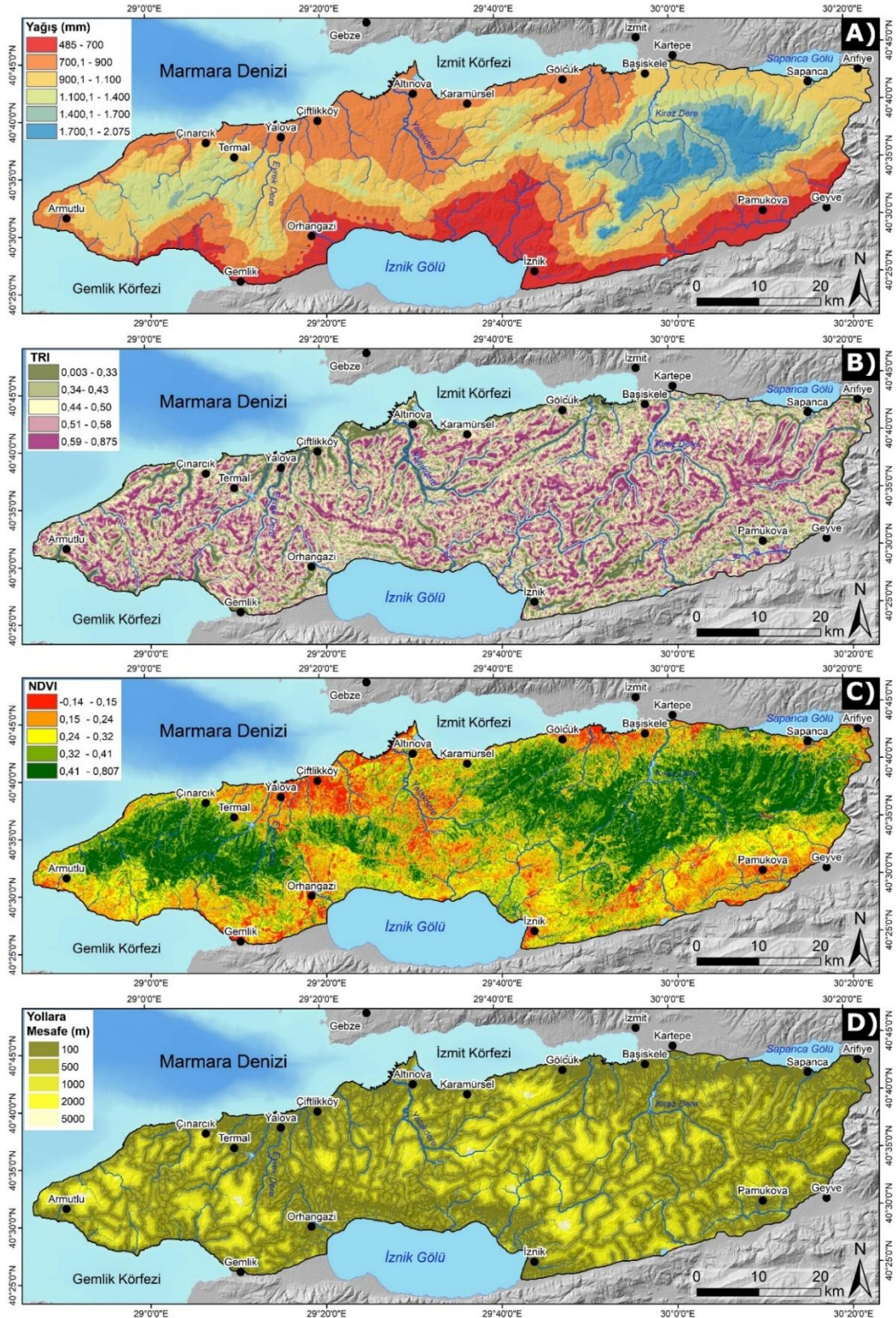
Şekil 4: Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan: a) jeoloji ve b) faylara mesafe verileri

Ayrıca kütlenin farklı alanlarında da birçok diri fay olup özellikle İzmit Körfezi kıyıları çevresinde fay mesafe verileri oldukça yakındır. Araştırma sahasında eğim değerlerin yüksek olduğu alanları doğu ve batı kesimdeki yüksek dağlık alanlarda erozif faaliyetlerle derin aşındırmalar yapan akarsu vadilerinde gözlemlenmektedir. Göreceli rölyef değerlerin dağılışı incelendiğinde eğim verileri ile paralellikler göstermektedir. Göreceli rölyef değerinin yüksek olduğu sahaları G-K doğrultusunda akış gösteren akarsuların yukarı çıkışları ile yüksek dağlık alanlar oluşturur (Şekil 5). TWI değerlerinin yüksek olduğu sahaları akarsu vadileri oluşturmaktadır. TRI değerlerinde ise eğim değeri yüksek, tektonik olarak çizgiselliklerin görüldüğü alanlar oluşturmaktadır. TRI açısından engebeliği yüksek alanlar, jeomorfolojik açıdan sırtları ve muhtelif birçok dağlık-tepelik sahaya denk gelmektedir.



Şekil 5: Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan: a) eğim, b) topografik rölyef, c) akarsulara mesafe ve d) TWI verileri

Araştırma sahasında yağış değerleri incelendiğinde, en düşük yağışların bakı yönelimi güney olan kesimlerde özellikle de Pamukova, Geyve, İzmit ve Orhangazi yerleşmeleri çevresinde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek yağış miktarları ise yükselti, bakı yönelimi ve orografik koşulları sağladığı etki ile Kartepe kütesinin çevresinde gözlemlenmektedir (Şekil 6). NDVI analizi sonuçlarına göre araştırma sahasının kuzey kesimi özellikle Yalova-Karamürsel-Gölcük hattı arasındaki kıyı şeridinde ve hemen gerisinde bitki yoğunluğunun az olduğu tespit edilmiştir. Bitki yoğunluğun fazla olduğu alanları Kartepe, Naldöken Dağı, Karlık Dağı'nı 700 m seviyesinden sonraki kuşakta ve Duman Dağı çevresinde tespit edilmiştir (Şekil 6A). Sahadaki arızalı topografik görünüme rağmen yol dağılışı ve yoğunluğunun yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6: Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan: a) yağış, b) TRI, c) NDVI ve d) yollara mesafe verileri



Şekil 7: a) Halıdere (Gölcük) güney kesimindeki heyelan sahası, b) Kartepe-Maşukiye'deki heyelan sahası, c) Altınova ilçesi batısında (Yalova) heyelanlı alan, d) Karamürsel yerleşmesinde 24.03.2021'de gerçekleşmiş heyelan, e) Karamürsel batı kesimi D130 karayolu mevkiinde 04.02.2012 meydana gelmiş heyelan alanı (Özgür Kocaali, 2018), f) Karamürsel-Ulaşlı arasındaki heyelan sahası ve sonrasında (30.12.2016) D130 karayoluna etkileri (Yeni Gölcük, 2016), g) Yalova Çınarcık ilçesindeki heyelan alanı (Sabah Gazetesi, 2022)

3.2. Frekans Oranı Yöntemine Göre Samanlı Dağları Kütlelerinin Heyelan Duyarlılık Analizi

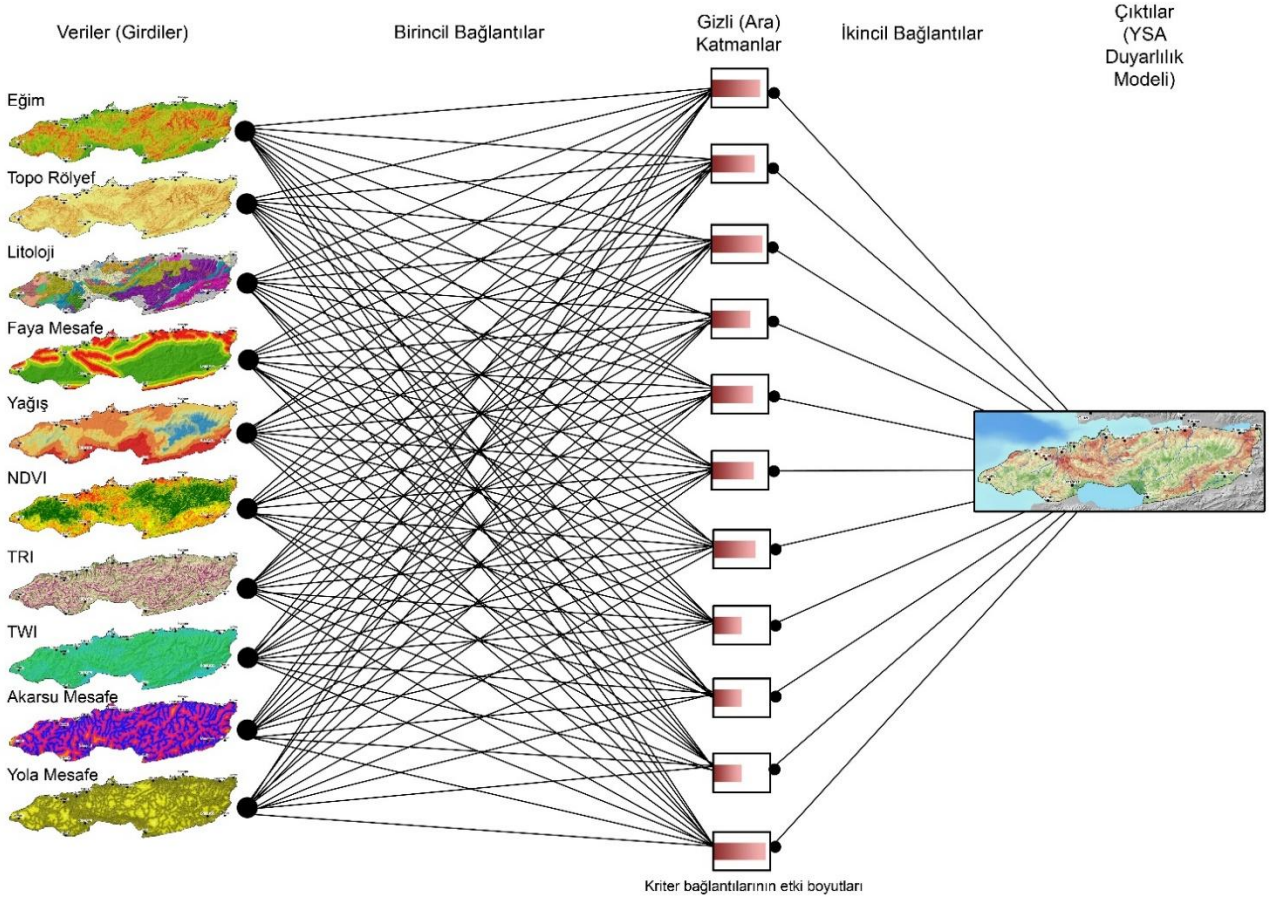
Samanlı Dağları kütleleri kapsamında belirlenen çalışma sahası için 10 ana kriter faktörü ile Frekans Oranı yönteminin uygulanması sonucu sahanın heyelan duyarlılık analizi 5 kategorik sınıf olarak (doğal kırılım algoritması ile) belirlenmiştir (Tablo 1 ve Şekil 8). Elde edilen bulgulara göre araştırma sahasının %5'i çok düşük, % 33'ü düşük, % 43'ü orta, % 17'si yüksek ve %2'si çok düzeyde heyelan duyarlılığı barındırmaktadır (Şekil 8). Heyelan duyarlılığının yüksek düzeyde olduğu alanlar 552,8 km² ve çok yüksek düzeyde olduğu alanlar 57,2 km²'lik saha kaplamaktadır. Veriler, heyelan duyarlılığın yüksek düzeyde olduğu alanların oransal açısından Samanlı Dağları kütlelerinde 1/5'inden az yer kapladığını gösterir. Lakin toplam yüksek-çok yüzey düzeyde duyarlılığa sahip alanların 600 km²'den fazla sahada görülmesi dikkat çekmektedir.

Tablo 1: Araştırma sahasının frekans oranı yöntemi heyelan duyarlılık analizindeki parametre değerleri

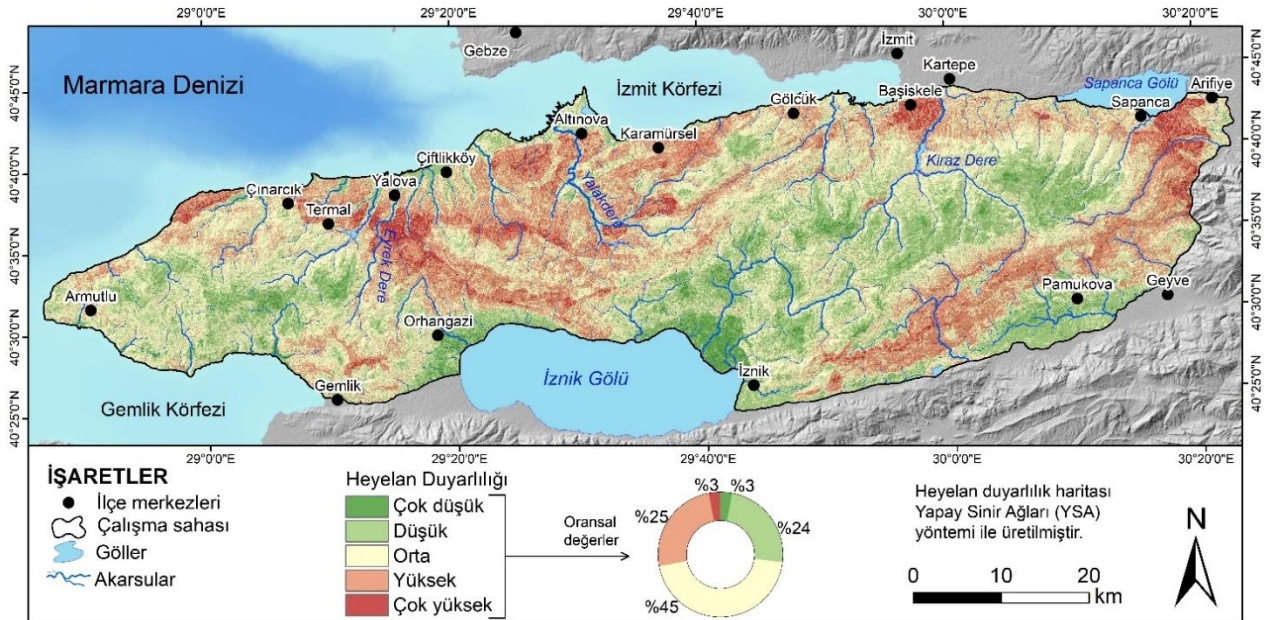
Faktörler	Alt Kriterler	Faktör Alanı		Heyelanlı Alanlar		FR	NFR %
		Piksel Sayısı	Piksel Oranı %	Piksel Sayısı	Piksel Oranı %		
Eğim ^o	0-5	863545	18	253205	9.8	0.25	12.8
	5-10	1022556	21	886438	34.9	0.86	100
	10-15	970811	20	683823	27	0.70	77.1
	15-20	799439	16	354482	14	0.44	40
	20-30	922536	19	306456	12.3	0.37	14.7
	30-68	310463	6	50641	2	0.16	0
Topografik (Göreceli) Rolyef	0-20	2119833	42,8	919052	36.1	0.48	63.6
	20-40	1867149	37,9	1421324	55.7	0.66	100
	40-70	847627	17,1	188287	7	0.2	30.3
	70-100	75055	2	5065	0.2	0.06	9.09
	100-200	5623	0,2	0	0	0	0

Tablo 1'in devamı

Faktörler	Alt Kriterler	Piksel Sayısı	Piksel Oranı %	Piksel Sayısı	Piksel Oranı %	FR	NFR %
Jeoloji-Litoloji	Alüvyon-Kuvaterner	536535	16	151956	6	0.28	8.7
	Alüvyal Fan-Kuvaterner	41366	1,2	0	0	0	0
	Kumtaşı, Konglomera - Pliyosen	221620	6	709128	28	3.19	100
	Kiltaş, Silttaş, Mam -Üst Miyosen	89621	3	278594	11	3.1	97.1
	Granitoyid- Eosen	103847	2,9	0	0	0	0
	Kırıntılar ve Karbonatlar - Üst Paleosen	119724	3,2	177282	7	1.48	46.3
	Volkanitler- Eosen	645271	18,7	405216	16	0.62	19.4
	Granit - Üst Kretase	8610	0,2	2532	1	0.29	9.1
	Konglomera, Kumtasi -Üst Kretase	289053	8,6	379902	15	1.31	41
	Metakırıntı ve karbonatlar- Üst Kretase	1798	0,1	0	0	0	0
	Metakumtaşı, Metaçamurtaşı, Kireçtaşı	308100	8,8	253267	10	0.82	25.7
	Kırıntılar ve Karbonatlar - Üst Triyas	11988	0,3	2530	1	0.21	6.5
	Şist, Mermer, Metabazit - Triyas	589247	17	75978	3	0.12	3.7
	Mermer - Permian	110290	3	0	0	0	0
	Şist - Paleozoyik	215093	6	25326	1	0.11	3.4
	Amfibolit - Paleozoyik	129498	4	2533	1	0.01	0.3
	Amfibolit, Gnays - Prekambriyen	27125	1	0	0	0	0
TWI	2,297 - 5,23	1707629	35	759804	30.1	0.44	0
	5.24 - 6.87	1735255	36	962418	37.6	0.55	57.8
	6.88 - 8.98	971491	20	531862	20.9	0.54	47.3
	8.99 - 12.18	360487	7	227941	9.4	0.63	100
	12.19 - 23.14	114488	2	50653	2	0.44	0
TRI	0.003 - 0.33	372104	8	582516	23.1	1.56	100
	0.34 - 0.43	992791	20	1038366	40.8	1.04	64.6
	0.44 - 0.50	1534462	31	683802	27	0.44	23.8
	0.51 - 0.58	1344640	28	126634	5	0.09	0
	0.59 - 0.875	651645	13	101307	4.1	0.15	4
Yollara Mesafe (m)	100	1207290	34	987714	39	0.81	100
	500	1522734	43	1241013	48.8	0.81	100
	1000	575705	16	278586	11.2	0.48	59.2
	2000	221099	6	25326	1.1	0.11	13.5
	5000	12089	1	0	0	0	0
Faylara Mesafe (m)	1000	571761	16	478661	18.9	0.83	58.9
	2000	466201	13	384955	15.2	0.82	57.6
	3000	397928	11	460933	18.2	1.15	100
	5000	659622	19	660931	26.1	1	80.7
	10000	1443405	41	547041	21.6	0.37	0
NDVI	-0.14 - 0.15	280375	8	25326	10	0.09	0
	0.16 - 0.24	657892	19	686334	27.1	1.04	100
	0.25 - 0.32	842004	24	605291	23.9	0.71	65.2
	0.33 - 0.41	901918	25	526780	20.8	0.58	51.5
	0.42 - 0.80	856770	24	460933	18.2	0.53	46.3
Yağış (mm)	485-700	507590	14	103836	4.1	0.2	6.7
	700-900	1152700	33	1352408	53.4	1.17	100
	900-1100	989932	28	724323	28.6	0.73	57.6
	1100-1400	491111	14	276053	10.9	0.56	41.3
	1400-1700	203472	6	50652	2	0.24	10.5
	1700-2100	194028	5	25326	1	0.13	0
Akarsuya Mesafe (m)	500	1386536	39	954781	0.71	0.71	91
	1000	1135406	32	886438	0.78	0.78	100
	1500	699905	19,1	514134	0.73	0.73	93.5
	2000	243913	7	124097	0.5	0.5	64.1
	3000	67790	2	50116	0.73	0.73	93.5
	7000	5283	0,1	0	0	0	0



Şekil 9: Çalışma sahasının yapay sinir ağları (YSA) heyelan duyarlılık modeli



Şekil 10: Samanlı Dağları kütlesinin yapay sinir ağları (YSA) yöntemine göre heyelan duyarlılık analizi sonuçları

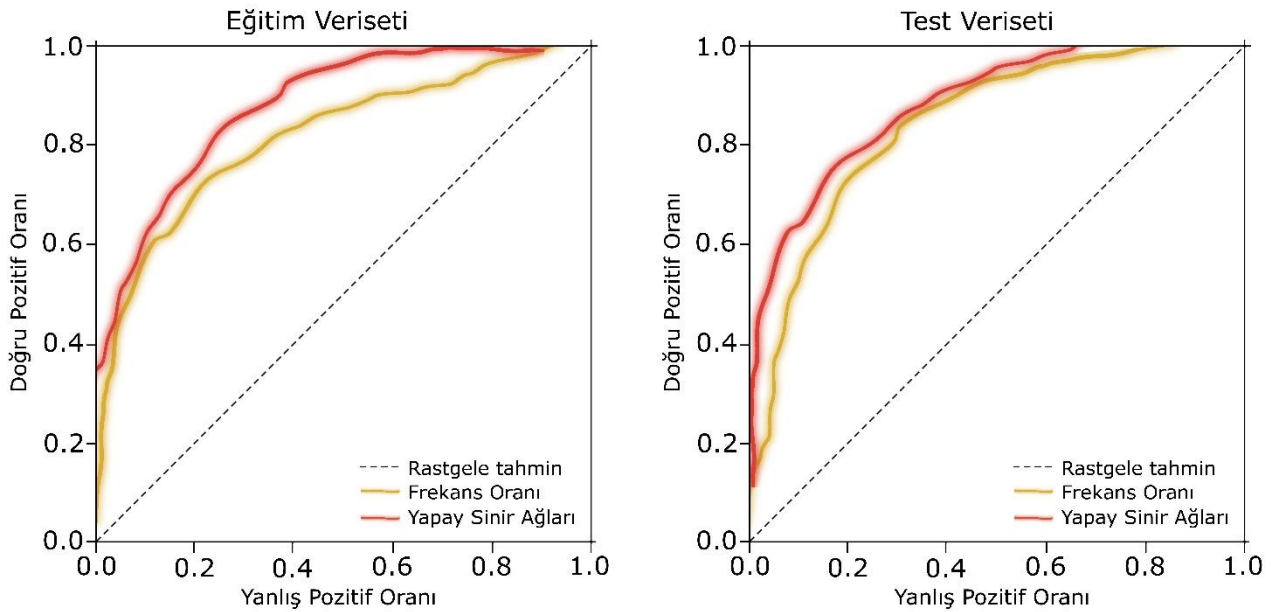
Samanlı Dağları kütlesinin YSA yöntemine göre heyelan duyarlılığının yüksek ve çok yüksek düzeyde olduğu sahalarda Yalova şehir merkezinin güneyinde Eyrek Dere havzasında, Çiftlikköy, Altınova ve Karamürsel arasındaki engebeli plato sahasında, Yalakdere havzasının yukarı çıkışında, Gölcük-Karamürsel arasında, Başiskele ilçe merkezi ve güneyinde, Arifiye-Geyve-Pamukova hattında özellikle dağların güneye bakan yamaçlarında, Çınarcık-Armutlu arasındaki dik ve

engebeli kıyı kuşağında, İzmit Gölü'nün kuzeyinde GD-KB fay zone uzanımında ve Gemlik'in kuzeyinde olduğu saptanmıştır (Şekil 10). YSA modeline göre heyelan duyarlılığının düşük-çok düşük olduğu sahalara özellikle Kartepe ve civarındaki yüksek, yoğun bitki örtüsünün olduğu alanlar ile Hersek deltası, İzmit Körfezi kıyılarındaki dar alanlı deltalar, İzmit Gölü kıyısındaki alüvyal sahalara, Duman Dağı yüksek kesimleri ile Pamukova depresyonun alçak kesimlerinde olduğu tespit edilmiştir.

Samanlı Dağları kütesinin YSA modeline göre heyelan duyarlılığını en yüksek düzeyde etkileyen faktörlerin jeolojik-litolojik birimler, eğim, yollara uzaklık ve topografik rölyef verileri olduğu belirlenmiştir. Bu veriler özellikle çalışma sahasında doğal koşulların tetiklediği heyelan olayında antropojenik etmenlerinde büyük pay sahibi olduğunu ortaya koymaktadır.

3.3. Heyelan Duyarlılık Analiz Modelleri Performans Doğruluğu

Çalışmada ortaya konan heyelan duyarlılık analizi model sonuçlarının doğruluğu Alıcı İşlem Karakteristiği (ROC) yöntemi ile test edilmiştir. Belirtilen yöntem (ROC) kapsamında Samanlı Dağları kütesinde mevcut heyelan alanlarının olduğu sahalara rastgele 6398 nokta verisi eklenmiştir. Modelin doğruluğunu analiz etmek için veri noktalarının %70'i eğitim verisi, %30'u ise test verisi olarak belirlenmiştir. Çalışmada eğitim verisi için 4479 nokta test verisi için 1919 nokta işaretlenmiştir. ROC eğrisi analizine göre oluşturulan eğitim verisinde Frekans Oranı (FO) yöntemi 0,752, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi 0,879 değerine sahiptir. Değerleri her iki duyarlılık analizinin de yüksek doğruluğu olduğunu ortaya koymuştur. Test envanter verisine göre Frekans Oranı (FO) yöntemi 0,793, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi 0,895 değerine sahiptir. Her iki duyarlılık analizi değerleri ROC eğrisi ve AUC değerine göre yüksek verimliliğe sahiptir. Ancak bu çalışma kapsamında Samanlı Dağları kütesi örneklem sahası için Yapay Sinir Ağları (YSA) duyarlılık modelinin Frekans Oranı (FO) yöntemine göre daha doğru ve verimli sonuçlar ortaya koyduğu tespit edilmiştir.



Şekil 11: Heyelan duyarlılık analizi performansının veri setlerine bağlı olarak AUC temelli doğrulanması ve ROC eğrisi

4. Tartışma ve Sonuç

Türkiye arazisinin jeolojik, jeomorfolojik çeşitliliği, heyelanı tetikleyici antropojenik unsurların yoğunluk ve etki farklılıkları, yağış değişkenliği ve şağanak yağış sıklığı, nüfus yoğunluğu ve antropojenik baskı yoğunluk dağılışındaki farklılıklar, Türkiye'de heyelanların duyarlılık, tehlike ve risk açısından farklı dağılışlar göstermesine yol açmıştır (Taşkanat, 2012; Akıncı vd., 2017; Kılıçoğlu, 2020; Görüm & Fidan, 2021; Karaman vd., 2022; Cihangir, 2024; Demirbilek & Turoğlu, 2024). Bu durum, belirtilen unsurlar kapsamında özellikle heyelan duyarlılığının Türkiye sınırları içerisinde belli alanlarda yoğunlaşmasına neden olmuştur. Görüm ve Fidan (2021) tarafından yapılan çalışmada, özellikle ölümcül heyelanların Karadeniz ve Marmara kıyı bölgelerine yakın alanlarda yoğunlaştığını ortaya koymuştur (Görüm & Fidan, 2021). Bu nedenden dolayı çalışmada farklı kaynaklara dayanılarak yapılan heyelan envanter incelemesi, arazi çalışmaları, uydu görüntüleri incelemesi sonucu Marmara Bölgesi içerisinde heyelan duyarlılığının yüksek yoğunlukta olduğu alanların başında Samanlı Dağları'nın olduğu göstermektedir (Bilgin, 1967). Bu kapsamda, çalışma sahasının heyelan duyarlılığının literatüre ve sahanın kendi fiziki ve beşeri coğrafya koşullarına dayanılarak 10 ana kriter temelinde Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile heyelan duyarlılık analizi daha detaylı verilerle tespit edilmiştir.

Frekans Oranı heyelan duyarlılık analizi sonuçlarına göre Samanlı Dağları kütlesinin % 19'unun (610 km²'si) yüksek-çok yüksek kategoride heyelan duyarlılığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada farklı datalar kullanılarak tespit edilen heyelan envanteri verisine göre Samanlı Dağları kütlesinin %5,2'si (165 km²) heyelanlı alandan oluşmaktadır. Heyelan envanteri verileri ile Frekans Oranı yöntemi ile ortaya konan duyarlılık verileri incelendiğinde, yüksek-çok yüksek düzey heyelana duyarlı alanların mevcut heyelanlı sahalarının 3,7 katı olduğu saptanmıştır. Çalışma sahasının Yapay Sinir Ağları yöntemine göre üretilen heyelan duyarlılık verilerin de ise yüksek-çok yüksek duyarlılığa sahip alanların toplam çalışma sahasının %28'ini oluşturduğu (883 km²'si) saptanmıştır. YSA ile saptanan yüksek-çok yüksek duyarlılığa sahip alanların heyelan envanterinin 5,3 katı olduğu, FO yöntemi verilerinin ise 1,4 katı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu kantitatif sonuçlar çalışma sahası heyelan duyarlılığının yüksek boyutlarda olduğunu başka bir açıdan ortaya koymaktadır. Bu bakımdan Türkiye'nin farklı bölgelerindeki çalışmalarda olduğu gibi (Karaman vd., 2022; Cihangir, 2024) bu çalışmada da elde edilen heyelan duyarlılık değerleri özellikle MTA ve AFAD heyelan verisinden çok yüksek çıkmıştır. Bu durum mevcut heyelan envanter verilerinin ve duyarlılık analizlerinin güncellenmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Araştırma sahasında her iki model kapsamında heyelana duyarlılığı yüksek alanlar özellikle tortul litolojik birimlerin olduğu, antropojenik olarak yol müdahalesinin fazla olduğu sahalara denk gelmektedir. Bunun yanında eğim, fay hatlarına yakınlık ve NDVI değerleri de heyelan duyarlılığını etkileyen diğer faktörlerdir. Çalışma sahasında özellikle tortul birimlerin olduğu sahaların hem heyelan envanterinde hem de FO ve YSA modelleri duyarlılık analizlerinden temel belirleyici faktörlerden biri olduğu dikkat çekmektedir. Daha önce yapılan çalışmalar duyarlılık modellerinde jeolojik-litolojik birimlerin özellikle de kütle hareketine maruz kalan yamaçların malzeme veya malzemelerin mineralojik, strüktürel ve zamansal özellikler heyelanları denetleyen temel faktörlerdir (Gökçeoğlu & Ercanoğlu, 2001). Bu bakımdan araştırma sahasının özellikle kuzey kesiminde (Yalova-Karamürsel-Gölcük arasında) gözlemlenen tortul birimler (konglomera, marn, kila vb.) Samanlı Dağları'nda heyelan duyarlılığını denetleyen temel parametrelerden biri olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Çalışma sahası kapsamında yapılan daha önceki bazı çalışmalarda da belirtilen litolojik birimlerin tetikleyici faktör olduğunu açıklanmıştır (Bilgin, 1967; Uzun, 2021a).

Fidan ve Görüm (2020) yaptığı Türkiye geneli heyelan envanteri çalışmasında, Samanlı Dağları ve çevresinde meydana gelen heyelan olaylarında antropojenik etkinin fazla olduğu ve bu bakımdan Samanlı Dağları yöresinin Türkiye'de antropojenik tetikleyici heyelanların yoğunluk merkezlerinden birini oluşturduğunu ortaya koymuştur (Fidan & Görüm, 2020). Bu çalışmada da heyelanı tetikleyen faktörlerin başında özellikle yol çalışmaları nedeniyle topografik yüzeyin değiştirilmesinin etkili olduğu saptanmıştır. Yakın geçmişte D130 karayolu ile D595 karayolu ve yakın çevresinde birçok heyelan olayının meydana geldiği bilinmektedir (Uzun, 2021a). Araştırmada özellikle Gölcük-Karamürsel-Yalova arasındaki D130 karayolu çevresi ve Karamürsel-İznik (Boyalıca) D595 karayolu çevresinde yüksek heyelan duyarlılığın olduğu geçmiş dönemli verileri desteklemektedir (Bilgin, 1967; Uzun, 2021b). Belirtilen sahalarda ve yakın çevresi heyelan duyarlılığının en yüksek olduğu alanların başında gelmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalar ve araştırmada kullanılan SWATH profilleri inceleme sahasının yoğun bir tektonik aktivite ile yükseldiğini, fay deformasyonları ile ani yükselti değişimleri yaşandığını, eğim değerlerinin yükseldiğini göstermektedir (Gönençgil & Halis, 2021). Bu sahalara denk gelen karasal-denizel tortullar ile yamaç molozlarının ani ve yüksek değerlerdeki yağışlarla kütle hareketlerine geçmesi olasıdır. Çalışmanın heyelan duyarlılık analiz sonuçları incelendiğinde özellikle Çınarcık-Yalova-Karamürsel arasındaki çizgisel saha ve su bölümünün güneye çekildiği saha, Karamürsel-Gölcük kıyı hattında yüksek heyelan duyarlılıklarının olduğu dikkat çeker. FO ve YSA heyelan duyarlılık verileri çalışma sahasında tektonik jeomorfoloji unsurları ile tektonizmanın heyelana etki eden diğer önemli faktör olduğunu göstermektedir. 17 Ağustos 1999 Marmara depreminin Gölcük-Değirmendere kıyı ve deniz altında heyelanı tetiklemesi (Uzun, 2021a), ayrıca Gölcük'ün birçok kırsal kesiminde heyelanların deprem sonrasında gözlemlenmesi bu durumun diğer bir kanıtı olarak dikkat çekmektedir.

Araştırmada heyelan duyarlılık modellerinin doğruluk analizi için ROC testi kullanılmıştır. Dünyada ve Türkiye belirtilen test, heyelan duyarlılık analizlerinin doğruluğunun saptanmasında çokça kullanılmaktadır (Dalkes & Korkmaz, 2023; Demirbilek & Turoğlu, 2024; Huangfu vd., 2024). Bu çalışmada Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları yöntemlerinin her ikisinin de doğruluk değerlerinin yüksek olduğu saptanmıştır. Ancak çalışmada Yapay Sinir Ağları yönteminin Frekans Oranı yöntemine göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Çalışmadaki ROC değerleri analizin yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu ve jeolojik, jeomorfolojik, afet ve risk yönetimi ile planlama çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Türkiye'nin önemli sanayi alanlarından birini kıyı kuşağında barındıran çalışma sahasında nüfus yoğunluğu da bu alanlarda toplanmıştır. Arızalı topografik yapı nedeniyle kıyıda yoğunlaşan yerleşim sahaları deprem nedeniyle (özellikle 2000 yılından sonra) kıyıdan güneye doğru ilerleme göstermektedir. Bu nedenle yol yapımı, topografik deformasyon ve eğimi yüksek alanların çakışması, çalışma sahasında diğer faktörlerle birlikte antropojenik tetikleyici heyelanların daha çok oluşmasına neden olmuştur. Çalışmada ortaya konan heyelan duyarlılık modelleri de özellikle Samanlı Dağları kuzey kesiminde yüksek duyarlılığın olduğunu ve bu durumun nüfus, yerleşme ve sanayi alanları ile yolları etkileyebileceğini ve sosyo-ekonomik zararların oluşabileceğini sonucunu ortaya koymuştur. Bu bakımdan çalışmada Frekans Oranı ve Yapay Sinir Ağları yöntemleri ile üretilen heyelan duyarlılık modelinin gelecek planlamalarında dikkate alınması faydalı olacaktır. Ayrıca çalışma sahası kapsamında daha mikro ölçekli alanlarda daha yüksek çözünürlüklü (1-5 m arası) veriler kullanılarak heyelan duyarlılık analizlerin yapılması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z. & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: a literature survey. *Remote Sensing*, 14(13), Article 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>
- Akgün, A., Dağ, S., & Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54, 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0882-8>
- Akinci, H., Yavuz Özalp, A., & Temuçin Kılıçer, S. (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve AHP yöntemi kullanılarak planlı alanlarda heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi: Artvin örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1–2), 40–53. <https://doi.org/10.21324/dacd.20952>
- Akinci, H., Doğan, S. & Kılıçoğlu, C. (2017). Landslide susceptibility mapping of Canik (Samsun) district using bayesian probability and frequency ratio models. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(3), 283–299. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.89>
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. N. (1999). Landslide hazard assessments: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Ali, A. (2024). Landslide susceptibility mapping using modified frequency ratio method in Correb area, South Wollo, North-Western Ethiopia. *Discover Geoscience*, 2, Article 45. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00053-x>
- Alvioli, M., Loche, M., Jacobs, L., Grohmann, C. H., Abraham, M. T., Gupta, K., Satyam, N., Scaringi, G., Bornaetxea, T., Rossi, M., Marchesini, I., Lombardo, L., Moreno, M., Steger, S., Camera, C. A. S., Bajni, G., Samodra, G., Wahyudi, E. E., Susyanto, N., & Rivera-Rivera, J. (2024). A benchmark dataset and workflow for landslide susceptibility zonation. *Earth-Science Reviews*, 258, Article 104927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104927>
- Aydoğan, E., & Dağ, S. (2023). İstatistiksel Yöntemlerle Yukarı Karasu Havzası'nın Kuzeydoğu Bölümünün (Erzurum) Heyelan Duyarlılık Analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 4(1), 64–82. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1202140>
- Bargu, S. (1997). İzmit Körfezindeki pleistosen taraçaları ve tektonik özellikler. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 10, 1–33.
- Basheer, M., & Oommen, T. (2024). PyLandslide: A python tool for landslide susceptibility mapping and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 177, Article 106055. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106055>
- Bayraktar, C., & Görüm, T. (2012). Yeşil Göl heyelanının jeomorfolojik özellikleri ve oluşum mekanizması. *Türk Coğrafya Dergisi*, (59), 1–10. <https://doi.org/10.17211/tcd.06398>
- Bhandari, B. P., Dhakal, S., & Tsou, C.-Y. (2024). Assessing the prediction accuracy of frequency ratio, weight of evidence, shannon entropy, and information value methods for landslide susceptibility in the Siwalik Hills of Nepal. *Sustainability*, 16(5), Article 2092. <https://doi.org/10.3390/su16052092>
- Bilgin, T. (1967). *Samanlı Dağları: Coğrafi Etüd*. İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayını.
- Bisht, S., Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2024). Earth observation data and GIS based landslide susceptibility analysis through frequency ratio model in lesser Himalayan region, India. *Quaternary Science Advances*, 13, Article 100141. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100141>
- Bragagnolo, L., da Silva, R. V., Grzybowski, J. M. V. (2020). Landslide susceptibility mapping with r Landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks, *Environmental Modelling and Software*, 123, Article 104565. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104565>
- Cantarino, I., Carrion, M. A., Martínez-Ibáñez, V., & Gielen, E. (2023). Improving landslide susceptibility assessment through frequency ratio and classification methods—case study of Valencia Region (Spain). *Applied Sciences*, 13(8), Article 5146. <https://doi.org/10.3390/app13085146>
- Cihangir, M. E., & Görüm, T. (2016). Kelkit vadisinin aşağı çıkışında gelişmiş heyelanların dağılım deseni ve oluşumlarını kontrol eden faktörler. *Türk Coğrafya Dergisi*, (66), 19–28. <https://doi.org/10.17211/tcd.84731>
- Cihangir, M. E., Görüm, T., & Nefeslioğlu, H. A. (2018). Heyelan tetikleyici faktörlerine bağlı mekânsal hassasiyet değerlendirmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (70), 133–142. <https://doi.org/10.17211/tcd.410998>
- Cihangir, M. E. (2024). Aras Nehri havzasında lojistik regresyon yöntemiyle kayma ve akma tip heyelan duyarlılığı değerlendirmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (85), 55–68. <https://doi.org/10.17211/tcd.1475065>
- Chen, W., Wang, J., Xie, X., Hong, H., Van Trung, N., Bui, D.T., Wang, G., & Li, X. (2016). Spatial prediction of landslide susceptibility using integrated frequency ratio with entropy and support vector machines by different kernel functions. *Environmental Earth Sciences*, 75 (20), Article 1344. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6162-8>
- Dağ, S., Akgün, A., Kaya, A., Alemdağ, A., & Bostancı, H. T. (2020). Medium scale earthflow susceptibility modelling by remote sensing and geographical information systems based multivariate statistics approach: an example from Northeastern Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79, Article 468. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09217-7>
- Dalkes, M., & Korkmaz, M. S. (2023). Analitik Hiyerarşi Süreci ve Frekans Oranı yöntemlerinin heyelan duyarlılık analizinde karşılaştırılması: Trabzon İli Akçaabat ve Düzköy İlçeleri Örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1), 16–38. <https://doi.org/10.21324/dacd.1105000>
- Demirbilek, S., & Turoğlu, H. (2024). Frekans Oranı yöntemi kullanılarak Arsuz Çayı Havzası heyelan duyarlılık analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 13, 23–39. <https://doi.org/10.46453/jader.1496249>
- Erol, O., & Kayacılar, C., (1994). İzmit Körfezi Güneyi Karamürsel-Halıdere Çevresinin Jeomorfolojisi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 29, 11–17.
- Froude M. J., & Petley D. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161–2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Fidan, S., & Görüm, T. (2020). Türkiye’de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 74, 123–134. <https://doi.org/10.17211/tcd.731596>

- Gong, W., Hu, M., Zhang, Y., Tang, H., Liu, D. & Song, Q. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using ensemble methods for Fengjie County in the Three Gorges Reservoir Region, China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 7803–7820. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03572-z>
- Gökçeoğlu, C., & Ercanoğlu, M., (2001). Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Yerbilimleri*, 23, 189–206.
- Gönençgil, B., & Halis, O. (2021). Samanlı Dağları'nın jeomorfolojik gelişimine ve uzun dönemli erozyon süreçlerine morfometrik yaklaşım. *Türk Coğrafya Dergisi*, 78, 109–126. <https://doi.org/10.17211/tcd.1008678>
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., & Nefeslioglu, H. A. (2008). Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards*, 46(3), 323–351. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9190-6>
- Görüm, T., & Fidan, S. (2021). Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides* 18, 1691–1705. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01580-7>
- Gulbet, E., & Getahun, B. (2024). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy process method in Awabel Woreda, Ethiopia. *Quaternary Science Advances*, 16, Article 100246. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100246>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, H. P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112, 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Güneş, B., & Kömüşçü, A. Ü. (2025). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı AHS yöntemi ile Erzincan-Sivas Karayolu ve Çevresinin Heyelan Duyarlılık Analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(1), 89–103. <https://doi.org/10.21324/dacd.1478173>
- Günini, N. Ü., & Öztürk, D. (2021). Van ili heyelan duyarlılığının frekans oranı yöntemiyle analizi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 865–884. <https://doi.org/10.17482/uumfd.969246>
- He, W., Chen, G., Zhao, J., Lin, Y., Qin, B., Yao, W., & Cao, Q. (2023). Landslide susceptibility evaluation of machine learning based on information volume and frequency ratio: A Case Study of Weixin County, China. *Sensors*, 23(5), Article 2549. <https://doi.org/10.3390/s23052549>
- Hong, H., Junzhi, L. & Xing, A. Z., (2020). Modeling landslide susceptibility using logit Boost alternating decision trees and forest by penalizing attributes with the bagging ensemble. *Science of The Total Environment*, 718, 3–15.
- Huang, F., Mao, D., Jiang, S.-H., Zhou, C., Fan, X., Zeng, Z., Catani, F., Yu, C., Chang, Z., Huang, J., Jiang, B., & Li, Y. (2024). Uncertainties in landslide susceptibility prediction modeling: A review on the incompleteness of landslide inventory and its influence rules. *Geoscience Frontiers*, 15(6), Article 101886. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101886>
- Hoşgören, M. Y. (1995). İzmit Körfezi Havzasının Jeomorfolojisi. In E. Meriç (Ed.), *İzmit Körfezi Kuvaterner İstifi* (pp. 343-348), Deniz Harp Okulu Komutanlığı Basımevi.
- Huangfu, W., Qiu, H., Wu, W., Qin, Y., Zhou, X., Zhang, Y., Ullah, M. & He, Y. (2024). Enhancing the performance of landslide susceptibility mapping with frequency ratio and gaussian mixture model. *Land*, 13(7), Article 1039. <https://doi.org/10.3390/land13071039>
- Karaman, M.O., Çabuk, S.N., & Pekkan, E. (2022). Utilization of frequency ratio method for the production of landslide susceptibility maps: Karaburun Peninsula case, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 91285–91305. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21931-2>
- Ke, C., He, S., & Qin, Y. (2023). Comparison of natural breaks method and frequency ratio dividing attribute intervals for landslide susceptibility mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, Article 384. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03392-0>
- Khan, I., Kainthola, A., Bahuguna, H., & Asgher, M. S., (2024). Comparative landslide susceptibility assessment using information value and frequency ratio bivariate statistical methods: a case study from Northwestern Himalayas, Jammu and Kashmir, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 17, Article 231. <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12022-2>
- Kılıçoğlu, C. (2020). Frekans Oranı Metodu ve Bayesyen Olasılık Modeli Kullanılarak Samsun İli Vezirköprü İlçesinin Heyelan Duyarlılık Haritasının Üretilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1), Article 138. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.658662>
- Kohonen T. (1988). An Introduction to Neural Computing. *Neural Networks*, 1, 3–6.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982–990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
- Lippman, R. (1987). An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*, 4, 4-22.
- Liu, L. L., Zhang, Y. L., & Xiao, T. (2022). A frequency ratio-based sampling strategy for landslide susceptibility assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, Article 360. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02836-3>
- Livingstone, D. J. (2009). *Artificial Neural Networks Methods and Applications*. Humana Totowa, NJ.
- Mao, Y., Li, Y., Teng, F., Sabonchi, A. K. S., Azarafza, M., & Zhang, M. (2024). Utilizing hybrid machine learning and soft computing techniques for landslide susceptibility mapping in a drainage basin. *Water*, 16(3), Article 380. <https://doi.org/10.3390/w16030380>
- Mark, D.M. (1975). Geomorphometric Parameters: A Review and Evaluation, *Geografiska Annaler*, 57, 165-177.
- Meten, M., Bhandary, N. P. & Yatabe, R., (2015). GIS-based frequency ratio and logistic regression modelling for landslide susceptibility mapping of debre sina area in Central Ethiopia. *Journal of Mountain Science*, 12(6), Article 1355. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3464-3>
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 481–486.
- Oyda, Y., Jothimani, M. & Regasa, H. (2024). Assessing landslide susceptibility in Lake Abya catchment, Rift Valley, Ethiopia: a GIS-based frequency ratio analysis. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(3), Article 5885. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.113.5885>

- Özşahin, E., (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Kullanılarak Tekirdağ Şehrinin Heyelan Duyarlılık Analizi. *Eurasian Academy of Sciences Social Sciences Journal*, 6, 50–71. <http://doi.org/10.17740/eas.soc.2015-V6-4>
- Özgür Kocaali. (2018, Ekim 29). İlçe halkı heyelan faciasıyla burun buruna yaşıyor. <https://www.ozgurkocaali.com.tr/haber/4571076/ilce-halki-heyelan-faciasiyla-burun-buruna-yasiyor>
- Parker, A. J. (1982). The topographic relative moisture index: an approach to soil moisture assessment in mountain terrain. *Physical Geography*, 3(2), 160–168.
- Pham, B.T., Nguyen-Thoi, T., Qi, C., Phong, T.V., Dou, J., Ho, L.S., Le, H.V., & Prakash, I. (2020). Coupling RBF neural network with ensemble learning techniques for landslide susceptibility mapping. *Catena* 195, Article 104805. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104805>
- Pourghasemi, H.R., Kornejady, A., Kerle, N., & Shabani, F. (2020). Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping. *Catena* 187, Article 104364. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104364>
- Riley S. J, De Gloria S. D, & Elliot R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 23–27.
- Rodrigues Neto, J. M. d. S., & Bhandary, N. P. (2024). Landslide Susceptibility Assessment by Machine Learning and Frequency Ratio Methods Using XRAIN Radar-Acquired Rainfall Data. *Geosciences*, 14(6), Article 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060171>
- Sabah Gazetesi. (2022, Şubat 11). Çınarcık-Armutlu yolundaki heyelan kaldırma çalışmalarına ara verildi. <https://www.sabah.com.tr/yalova/2022/02/11/cinarcik-armutlu-yolundaki-heyelan-kaldirma-calismalarina-ara-verildi>
- Samia, J., Temme, A., Bregt, A., Wallinga, J., Guzzetti, F., Ardizzone, F., & Rossi, M. (2017). Characterization and quantification of path dependency in landslide susceptibility. *Geomorphology*, 292, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.039>
- Shano, L., Raghuvanshi, T.K., & Meten, M. (2021). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, Article 623. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06995-7>
- Sharma, A., Sajjad, H., & Rahaman, M.H. (2024). Effectiveness of hybrid ensemble machine learning models for landslide susceptibility analysis: Evidence from Shimla district of North-west Indian Himalayan region. *Journal of Mountain Science*, 21, 2368–2393. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-8651-7>
- Silalahi, F. E. S., Pamela, P. & Arifianti, Y. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Official Journal of the Asia Oceania Geosciences Society*, 6, Article 10. <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>
- Sonker, I., Tripathi, J. N., & Swarnim. (2022). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. *Quaternary Science Advances*, 8, Article 100067. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2022.100067>
- Shu, H., Guo, Z., Qi, S., Song, D., Pourghasemi, H.R., & Ma, J. (2021). Integrating Landslide Typology with Weighted Frequency Ratio Model for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study from Lanzhou City of Northwestern China. *Remote Sensing*, 13, Article 3623. <https://doi.org/10.3390/rs13183623>
- Sun, D. L., Wen, H. J., Wang, D. Z., & Xu, J. H. (2020). A random forest model of landslide susceptibility mapping based on hyperparameter optimization using Bayes algorithm. *Geomorphology*, 362, Article 107201. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107201>
- Şahin, C., Sipahioğlu, Ş. (2007). *Doğal afetler ve Türkiye*. Gündüz Eğitim ve Yayıncılık.
- Tang, T. C., & Chi, L. C. (2005). Neural networks analysis in business failure prediction of chinese importers: a between-countries approach. *Expert Systems with Applications*, 29, 244–255. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.03.003>
- Taşkanat, T. (2012, 17–19 Kasım). *Frekans Oranı ve Kanıt Ağırlığı Metotları Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Analizi, Kayseri Küpeli Mahallesi Örneği* [Bildiri sunumu]. VIII. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu, Ankara.
- Taşoğlu, E., Öztürk, M. Z., & Yazıcı, Ö. (2024). High Resolution Köppen-Geiger Climate Zones of Türkiye. *International Journal of Climatology*, 44(14), 5248–5265. <https://doi.org/10.1002/joc.8635>
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332–343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>
- Utlü, M. (2023). Frekans Oranı ve Shannon Entropisi Yöntemi Kullanarak Ezine Çayı Havzası Taşkın Duyarlılık Analizi (Kastamonu-Bozkurt). *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi (11)*, 160–178. <https://doi.org/10.46453/jader.1358845>
- Uzun, M. (2021a, 17–18 Haziran). *Gölcük ve Karamürsel’de (Kocaali) Antropojenik Kökenli Jeomorfolojik Değişimlerin Potansiyel Risk Analizi* [Bildiri sunumu]. 2. İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi, İstanbul, Türkiye.
- Uzun, M. (2021b). Human-Induced Geomorphological Changes and Processes on the Coasts of the Gulf of İzmit. *Journal of Geomorphological Researches*, 7, 61–81. <https://doi.org/10.46453/jader.983465>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. Special report, 176, 11–33.
- Wang, Y., Sun, D., Wen, H., Zhang, H., & Zhang, F. (2020). Comparison of Random Forest Model and Frequency Ratio Model for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Yunyang County (Chongqing, China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, Article 4206. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124206>
- Wang, X., Nie, W., Xie, W. & Zhang, Y., (2024). Incremental learning-random forest model-based landslide susceptibility analysis: A case of Ganzhou City, China. *Earth Science Informatics*, 17, 1645–1661. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01229-2>
- Yeni Gölcük. (2016, Aralık 30). *Ulaşı'da heyelan nedeni ile yol kapalı*. <https://www.yenigolcuk.com/ulasida-heyelan-nedeni-ile-yol-kapali-21690-haberi>
- Zho, Z., He, Y., Yao, S., Yang, W., Wnag, W., Zhang, L., Sun, Q., (2022). A comparative study of different neural network models for landslide susceptibility mapping. *Advances in Space Research*, 70, 383–401. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.055>

Taş Ocağında Patlatmalı Kazı Kaynaklı Zemin Titreşimleri, Hava Şoku ve Şev Duraylılığının İncelenmesi: Örnek Bir Uygulama

İbrahim Çavuşoğlu^{1,*}, Selçuk Alemdağ²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane.

²Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane.

Özet

Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren bir taşocağında gerçekleştirilen patlatmalı kazıların çevresel etkileri, kazı sonrası ve sismik yük etkisindeki duraylılığı ve buna ek olarak özellikle en yakın yerleşim yerinde oluşturabileceği titreşim ve hava şoku değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları sürecinde, InstanTEL Micromate marka sismograf ile beş farklı patlatma sırasında ölçümler alınmış ve veriler analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, 2022 yılında yenilenen “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği” (ÇGKY) kapsamında maden ve taş ocakları için belirlenen yeni sınır değerlerle karşılaştırılmış; ayrıca eski Türk standardı, USBM RI 8507 (USA) ve DIN 4150-3 (Alman) standartlarıyla karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, ölçülen yer sarsıntısı ve hava şoku düzeylerinin her bir patlatma için ilgili yönetmelik sınırlarının altında kaldığı, arazide yapılan gözlemler sonucunda da en yakın yerleşim alanlarındaki yapılarda yapısal hasara yol açmayacağı belirlenmiştir. Karşılaştırmalı analizler ise yeni Türk standardı ile DIN 4150-3 ve USBM standartlarının daha koruyucu yaklaşımlar sunduğunu göstermiştir. Taş ocağı işletmesi için tasarlanan şev geometrisi kazı sonrası mevcut durumda ve sismik yük etkisinde duraylılık değerlendirmesi yapılmış ve güvenlik sayısının $SRF > 1.5$ olduğu belirlenmiştir. Böylece duraylılık değerlendirmesinde elde edilen güvenlik sayısı ve deformasyonlar, işletme sınırlarında yapılacak patlatmalı kazı işleminden etkilenmeyeceği öngörülmektedir. Bu çalışma, taşocaklarında gerçekleştirilen patlatmalı kazıların çevresel etkilerinin yasal sınırlar çerçevesinde sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ve ocak duraylılığına yönelik örnek bir uygulama sunmakta olup, benzer projeler için “Çevresel Etki Değerlendirme” (ÇED) süreçlerinde kaynak olarak değerlendirilebilir.

Anahtar Sözcükler

Çevresel Etki, Hava Şoku, Patlatmalı Kazı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Şev Duraylılığı, Titreşim Ölçümü

Investigation of Blast-Induced Ground Vibrations, Air Overpressure, and Slope Stability in a Quarry: A Case Study

Abstract

This study investigates the environmental impacts and slope stability conditions associated with blasting activities conducted at a quarry located in Araklı district, Trabzon province, Türkiye. Ground vibration and air overpressure data from five separate blasts were recorded using an InstanTEL Micromate seismograph during field investigations. The collected data were analyzed and compared against the regulatory threshold limits specified in the updated 2022 Environmental Noise Control Regulation (ÇGKY) for mining and quarrying operations. Furthermore, comparative evaluations were made with the former Turkish standard, the USBM RI 8507 criteria from the United States, and the DIN 4150-3 standard used in Germany. The results show that vibration and air shock levels recorded from each blast remained within the permissible limits defined by all referenced standards. Field observations further confirm that the blasts did not induce structural damage in nearby residential buildings. Comparative analysis revealed that USBM RI 8507 and DIN 4150-3 standards offer more conservative protection thresholds than the current Turkish regulation. In addition, numerical slope stability analyses were conducted for the proposed quarry bench geometry under both static and dynamic (seismic) loading conditions. The calculated Safety Factor (SRF) exceeded 1.5, indicating that the slope is stable and not expected to be adversely affected by planned blasting operations within the quarry boundaries. Overall, this study provides a representative case for the systematic and comparative assessment of the environmental and geotechnical impacts of blasting operations in open-pit quarries, offering valuable insights for Environmental Impact Assessment (EIA) processes in similar projects.

Keywords

Environmental Impact, Air Shock, Explosive Excavation, Finite Element Method, Slope Stability, Vibration Measurement

1. Giriş

Delme ve patlatma yöntemi, başta madencilik ve taş ocakçılığı olmak üzere tünel, otoyol, baraj ve metro inşaatlarında yaygın olarak kullanılan, özellikle sert kaya ortamlarında vazgeçilmez bir kazı tekniğidir. Ancak bu yöntemin çevre

üzerindeki en önemli yan etkileri, yer titreşimi (zemin sarsıntısı) ve hava şoku (airblast) olarak ortaya çıkmaktadır. Patlatma sırasında üretilen enerjinin yalnızca %20–30'u kayaçları parçalamaya harcanmakta, geri kalan enerji ise yer titreşimi, hava şoku, gürültü ve toz gibi istenmeyen çevresel etkiler şeklinde açığa çıkmaktadır (Konya & Walter, 1990; Kuzu, 2008).

Bu etkiler, özellikle patlatma alanına yakın konumda bulunan yerleşim birimlerinde yapısal hasar, insan sağlığı üzerinde stres etkileri ve yaşam kalitesinde düşüş gibi önemli sorunlara neden olabilmektedir. Yer sarsıntısının yoğunluğu; kullanılan patlayıcı miktarı, gecikme süresi, patlatma geometrisi ve jeolojik koşullar gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir (Venkatesh, 2005; Kahriman vd., 2006). Hava şoku ise, yapılar üzerinde mekanik titreşim yaratabilmekte, pencere camlarının kırılması veya rezonansa giren duvar yüzeylerinde çatlak oluşumu gibi fiziksel zararlara neden olabilmektedir (Mesec vd., 2018). Bahsedilen nedenlerden ötürü, patlatma kaynaklı etkilerin çevresel boyutunun değerlendirilmesi hem yapı güvenliği hem de insan sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır (Feher vd., 2021). Çeşitli ülkelerde bu etkileri sınırlamak amacıyla USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980), DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) ve ulusal yönetmeliklerde belirlenen sınır değerlere dayalı standartlar geliştirilmiştir. Türkiye'de bu konuda temel başvuru kaynağı olan “Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği” (T.C. Resmi Gazete, 2022) 2022 yılında güncellenmiş ve patlatma kaynaklı titreşim ile ses şiddeti sınır değerleri yeniden tanımlanmıştır.

Literatürde, bu etkilerin modellenmesi ve izlenmesi için pik parçacık hızı (Peak Particle Velocity - PPV) başta olmak üzere çeşitli parametreler kullanılmıştır. PPV, patlatma titreşiminin yapılar üzerindeki hasar potansiyelini belirlemede yaygın olarak kullanılan temel ölçütlerden biridir (Siskind vd., 1980; Singh vd., 2007). Bu parametre; patlatma alanından mesafe, gecikme başına maksimum şarj miktarı ve kaya ortamının özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Blair, 1990; Khandelwal & Singh, 2006). Ayrıca, düşük frekanslı (<40 Hz) titreşimlerin rezonans etkisi nedeniyle daha yüksek hasar riski taşıdığı bilinmektedir (Singh vd., 1997).

Patlatma kaynaklı yer titreşimleri ve hava şoklarının izlenmesinde Instanetel Micromate gibi yüksek hassasiyetli sismograflar kullanılarak yapılan ölçümler hem mevcut çevresel koşulların değerlendirilmesinde hem de ilerleyen patlatmalarda optimum patlatma tasarımı geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Sismik verilerin analizi sayesinde, gecikme süresi, ateşleme deseni ve şarj miktarı gibi parametrelerin optimize edilerek çevresel etkilerin azaltılması mümkün hale gelmektedir (Özer, 2008; Jug & Grabar, 2020).

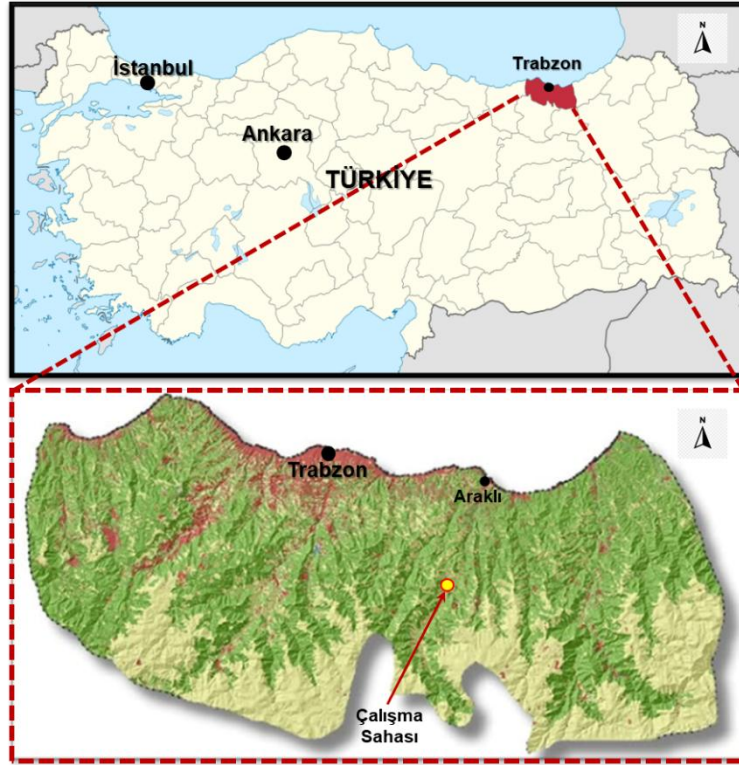
Genellikle taş ocaklarında gerçekleştirilen patlatmalı kazılar, istenilen kaya kırılmasını sağlarken, aynı zamanda çevreye dinamik yükler ve titreşimler yayar. Bu titreşimler, özellikle zayıf jeolojik yapılar veya mevcut süreksizlikler içeren şevlerde, zamanla stabilite sorunlarına yol açabilir (Özer, 2008; Jiang vd., 2017; Jiang vd., 2023; Taiwo vd., 2023; Fu vd., 2024). Yapılan çalışmalar, patlatma kaynaklı titreşimlerin, şevlerdeki kaya kütlelerinin dayanımını azaltarak, potansiyel kayma yüzeylerinin oluşumuna zemin hazırlayabileceğini göstermektedir. Özellikle, patlatma sırasında oluşan PPV gibi parametreler, şev stabilitesinin değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Yüksek PPV değerleri, şevlerdeki süreksizliklerin açılmasına ve birleşik yüzeylerin zayıflamasına neden olabilir. Bu durum, şevin taşıma kapasitesinin azalmasına ve potansiyel heyelan riskinin artmasına yol açabilir (Su & Ma, 2022; Singh & Jayanthu, 2024). Bu nedenle, taş ocaklarında patlatma tasarımı yapılırken, şev stabilitesi analizlerinin de entegre edilmesi gerekmektedir. Bu analizler, patlatma parametrelerinin optimize edilmesi ve şev güvenliğinin sağlanması açısından önemlidir. Ayrıca, düzenli titreşim izleme ve şev davranışının gözlemlenmesi, olası stabilite sorunlarının erken tespiti ve müdahalesi için kritik bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma, Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren bir taş ocağının patlatmalı kazı sonrası ve sismik yük etkisindeki duraylılığı ve gerçekleştirilen patlatmalı kazıların yerleşim alanlarına olan etkilerini yer titreşimi ve hava şoku açısından değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, güncellenmiş ÇGKY sınır değerleri esas alınarak elde edilen ölçümler analiz edilmiş; ayrıca, eski ve yeni sınır değerler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Ayrıca tasarlanan şev geometrisi için kazı sonrası mevcut durumda ve sismik yük etkisinde duraylılık değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, taş ocaklarında gerçekleştirilen patlatmalı kazıların çevresel etkilerinin sınırlandırılmasına yönelik olarak yapılacak mühendislik uygulamalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Trabzon ili Araklı ilçesi sınırlarında, Kayaici Köyü mevkiinde yer alan ve özel sektör tarafından işletilmesi planlanan patlatmalı taş ocağı sahasında yürütülmüştür. İnceleme alanı, Karadeniz Sahil Yolu'ndan itibaren Araklı-Bayburt grup yolunun yaklaşık 36. kilometresi üzerinden ulaşılabilen, toplam 9.9 hektar büyüklüğündeki bir proje sahasını kapsamaktadır (Şekil 1). Çalışma alanı, Karadeniz Bölgesi'nin tipik sarp topografyası içerisinde yer almakta olup, yamaç eğim açıları genellikle 45°–50° arasında değişmektedir.

Ocak alanı, orman örtüsüyle kaplı eğimli bir arazide konumlanmış olup, çevresinde farklı mesafelerde birçok yerleşim birimi ve enerji üretim tesisleri (ör. Akocak HES, Lale HES) bulunmaktadır. En yakın yapı, patlatma alanına yaklaşık 59 metre mesafededir. Alanın içinden geçen Karadere, proje sahasının güneydoğu sınırından geçmekte olup, vadi boyunca Karadeniz'e ulaşmaktadır.



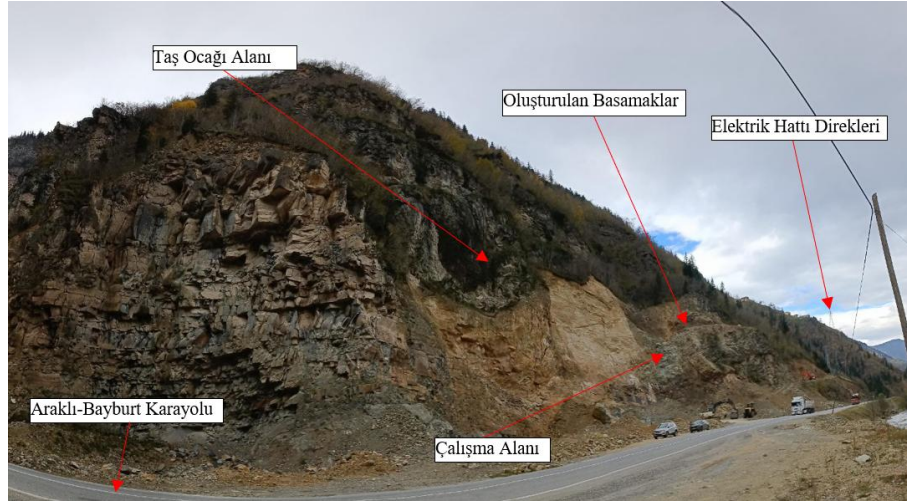
Şekil 1: Çalışma alanı

Trabzon G43-C2 paftası içinde yer alan proje alanının uydu görüntüsü ve etrafındaki yerleşim yerleri Şekil 2’de verilmiştir. Çalışma alanı, yaklaşık 470 metre zemin genişliğe ve 300 metre dikey uzunluğa sahip eğimli bir topoğrafyada yer almakta olup, üretim faaliyetleri kademeli açık işletme yöntemi ile planlanmıştır. Şekilden de görülebileceği üzere, taş ocağı sahası Araklı-Bayburt karayolu ile doğrudan komşudur. Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sınırlarının kuzeyinde, her biri yaklaşık 18 metre mesafede bulunan bir trafo merkezi ve HES işletme binası yer almakta; trafo merkezinin içinde ayrıca bir sosyal tesis bulunmaktadır.



Şekil 2: Çalışma alanını içine alan bölgenin uydu görüntüsü

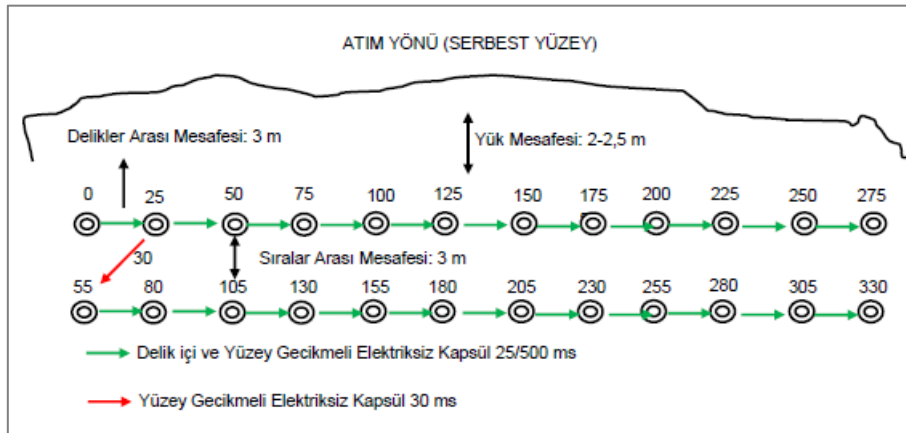
Ayrıca çalışma alanının yaklaşık 300 metre kuzeybatısında, Kayaici Köyü’ne ait yerleşim yapıları yer almakta olup (Şekil 4), taş ocağı alanının kuzey yönünde, patlatmalı kazı alanına yaklaşık 20 metre mesafede ise elektrik iletim hatlarına ait direkler bulunmaktadır (Şekil 3). Söz konusu altyapı ve yerleşim birimlerinin konumsal yakınlığı göz önüne alınarak, patlatma faaliyetleri çevresel sınır değerleri aşmayacak şekilde planlanmış ve saha tasarımı buna göre optimize edilmiştir.



Şekil 3: Taş ocağı alanından görüntü

2.1. Taş Ocağı Patlatmalı Kazısı Teknik Verileri

Çalışma sahasına konu olan taş ocağında, üretimin kademeli açık işletme yöntemi ile gerçekleştirilmesi planlanmış ve bu doğrultuda patlatmalı kazı teknik verileri oluşturulmuştur. Yerleşim yerlerine olan mesafeler ve önceki saha deneyimleri dikkate alınarak, emniyetli patlatma koşullarını sağlayacak şekilde patlayıcı kullanımına ilişkin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, patlayıcıların yerleştirileceği deliklerin çapı 89 mm olarak planlanmış ve her bir gecikme aralığında kullanılacak patlayıcı miktarı, 19,5 kg ANFO + 0,5 kg dinamit olmak üzere toplam 20 kg şeklinde düzenlenmiştir. Her bir patlatma operasyonunda 36 delik ve 2 sıra yer almakta olup, toplam 720 kg patlayıcı madde kullanımı öngörülmüştür. Çalışma sahasında patlatmalı kazıda kullanılması düşünülen patlatma paterni örneği Şekil 4'te görülmektedir. Delikler arası ve sıralar arası gecikmeli elektriksiz kapsüller kullanılmıştır.



Şekil 4: Patlatmalı kazı uygulamasına ait tipik ateşleme bağlantı düzeni

Taş ocağında yapılan patlatmalı kazı için bazı tasarım verileri Tablo 1'de verilmiştir. Basamak yüksekliğinin 10 metre olduğu yerde 1 metre dip delgi yapılmıştır. Delikler; 3,7 m taban şarjı, 4,3 m orta (kolon) şarjı ve 3 m sıkılama içerecek biçimde tasarlanmıştır. Bu konfigürasyona göre, her bir delikte 8 metrelik bir patlayıcı yerleşim alanı bulunmakta ve bu alana toplam 20 kg patlayıcı madde yerleştirilmektedir. Delikler arası mesafe 3 metre, sıra aralığı ise 3 metre olacak şekilde tasarlanmış olup, bu düzenleme hem delik başına verimliliği artırmakta hem de kontrollü bir kırılma sağlamaktadır.

Patlatma işlemi, 2 sıra delikten oluşan bir patlatma deseni ile yürütülecek şekilde planlanmıştır. Bu tasarıma göre yapılan hesaplamalar sonucunda, delik başına düşen özgül şarj miktarı yaklaşık 0,22 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, patlayıcının bulunduğu hacme göre oldukça ideal bir enerji yoğunluğunu ifade etmekte olup, sert ve dayanıklı kayaların etkin şekilde kırılmasını sağlayacaktır. Aynı zamanda, çevresel titreşim sınırlarını aşmamak adına delik içi gecikmeli ateşleme uygulanarak enerji yayılımı kontrol altına alınmaktadır.

Tablo 1: Patlatma tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Delik çapı	89 mm
Basamak yüksekliği	10 m
Basamak eğimi	80°
Delik sıra sayısı	2
Azami yük mesafesi	2,5-3 m
Delikler arası mesafe	3 m
Sıralar arası mesafe	3 m
Dip delgi	1 m
Delik boyu	10 m
Toplam delik boyu	11 m
Toplam patlayıcı miktarı	20 kg/delik
Taban şarj	3,7 m
Orta şarj	4,3 m
Sıkılama	3 m

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada bir taş ocağında yapılan patlatmalı kazı sonrası sismograf ile elde edilen veriler yakın bölgede bulunan yapıların güvenliği açısından değerlendirilmiştir. Aynı zamanda patlatmalı kazılar sonrası ortaya çıkan etkin yer ivmesine bağlı olarak bölgede şevlerde oluşabilecek duraysızlık problemleri de değerlendirilmiştir.

3.1. Titreşim ve Hava Şoku Ölçüm Yöntemi

Patlatma kaynaklı yer titreşimlerinin belirlenmesi amacıyla saha ölçümleri, Instantel Micromate marka dijital sismograf kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz, patlatma sonrası oluşan titreşim değeri (PPV) ve hava şoku gibi patlatma kaynaklı dinamik yüklerin ölçümünde uluslararası standartlara uygun yüksek hassasiyetli bir sistemdir. Sismograf, patlatma alanına yaklaşık 200-240 metre mesafede (5 adet patlatma), çevresel duyarlılığı yüksek olan bir yapı kompleksi olan trafo merkezi binasının yakınına konumlandırılmıştır (Şekil 5). Bu nokta, yerleşim birimlerine olan mesafe ve topoğrafik konum itibarıyla saha ölçümleri açısından en kritik değerlendirme noktalarından biri olarak seçilmiştir. Ölçüm noktası olarak trafo merkezi çevresinin seçilmesinde, hem bu yapının taşocağına olan kısa mesafesi (yaklaşık 200–240 m) hem de yerleşim alanlarına en yakın ve topoğrafik olarak patlatma alanıyla aynı vadisel hizada yer alması belirleyici olmuştur.



Şekil 5: Patlatmalı kazı uygulamasına ait tipik ateşleme bağlantı düzeni

Cihaz, üretici talimatlarına uygun şekilde sabitlenmiş, üç eksenle titreşim ölçebilecek biçimde kalibre edilerek yerleştirilmiştir. Ölçüm süreci, her bir patlatma öncesi cihazın aktive edilmesi ve patlatma sonrası otomatik veri kaydı ile yürütülmüştür. Ölçülen veriler, Türk standartlarında belirtilen eşik sınır değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu yöntem, patlatma sonrası oluşan dinamik etkilerin yapılar üzerindeki potansiyel zarar riskinin değerlendirilmesinde temel veri sağlamıştır.

Elde edilen PPV ve hava şoku verileri, ölçüm yapılan konumdaki yapılar üzerinde potansiyel etkilerin analiz edilmesi için kullanılır. Instantel Micromate marka cihazı kullanılarak yapılan ölçümlerle, patlatmalı kazılar sonucu ortaya çıkan dinamik yükler zamana bağlı olarak üç temel veri türü halinde kaydedilmektedir; i) Yer titreşimi (Ground Vibration), ii) Hava şoku (Air Overpressure) ve iii) Yer ivmesi (Peak Acceleration) şeklindedir. Yer titreşimi verisi yerleştirilen jeofonlar sayesinde üç eksenle yani X-axis (Transverse: Patlatma yönüne dik yatay hareket), Y-axis (Longitudinal: Patlatma yönüne paralel yatay hareket) ve Z-axis (Vertical: Düşey hareket (aşağı-yukarı)) elde edilir. Bu ölçümlerin yanında titreşimin frekansı da ölçülür; düşük frekanslı (<40 Hz) titreşimlerin rezonans nedeniyle daha zararlı olduğu kabul edilir.

3.2. İnceleme Alanındaki Saha ve Laboratuvar Çalışmaları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha incelemelerinde süreksizliklerin mühendislik özellikleri ve araziden derlenen blok örnekleri laboratuvarda ISRM 2007 (Ulusay, 2015) deney standartlarında hazırlanarak birim hacim ağırlık ve tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri belirlenmiştir (Şekil 6).

Bu veriler kullanılarak, kaya kütlelerinin davranışını tanımlamak amacıyla Hoek-Brown yenilme kriterine dayalı kaya kütle ve malzeme sabitleri hesaplanmış ve bu parametreler RS2 (Rocscience, 2024a) 11.023 yazılımında doğrudan giriş verisi olarak kullanılmıştır. Yapılan sayısal analizler sayesinde, çalışma alanına özgü mühendislik ve jeolojik koşulları yansıtan, gerçekçi ve sahaya özgü güvenlik katsayısı ve deformasyonlar elde edilmiştir. Böylece, açık ocak işletme tasarımının güvenliğini değerlendirmeye yönelik mühendislik temelli bir şev tasarımı belirlenmiştir.



Şekil 6: Taş ocağından elde edilen malzemeye yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar: a) karot örneklerinin alınması, b) standartlara uygun silindirik numunelerin hazırlanması, c) tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyi, d) birim hacim ağırlık tayini

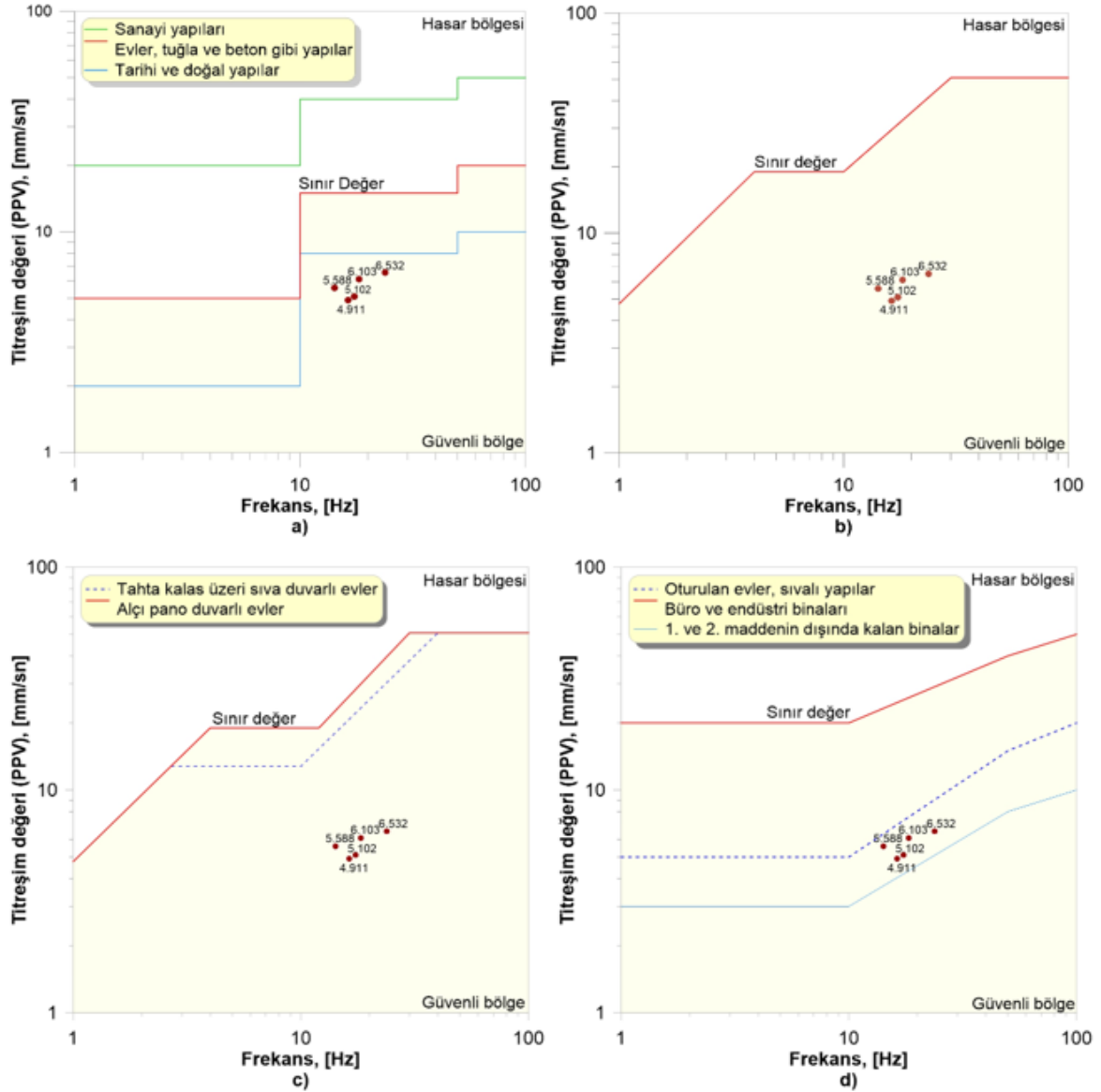
4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Titreşim ve Hava Şoku Sonuçları ve Değerlendirmesi

Taş ocağında farklı zamanlarda gerçekleştirilen beş patlatmaya ait veriler Tablo 2’de sunulmuştur. Tabloda; her patlatma sonrası ölçülen titreşim hızı (PPV), hava şoku (dB(L)), ivme (g) ve frekans değerleri yer almaktadır. Bu veriler, ülkemizde yürürlükte olan Türk standardı (T.C. Resmi Gazete, 2022) ile yürürlükten kaldırılan eski standart (T.C. Resmi Gazete, 2010) ve uluslararası USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980) ve DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) standartlarına göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 7).

Tablo 2: Patlatmadan elde edilen titreşim ve hava şoku verileri

Ölçüm No	PPV (mm/sn)	Hava şoku (dB(L))	İvme (g)	Frekans (Hz)
1	5.588	104.1	0.064	14.2
2	6.532	115.5	0.075	16.3
3	6.103	121.2	0.070	17.4
4	5.102	107.3	0.057	18.3
5	4.911	106.4	0.055	23.8



Şekil 7: Farklı ulusal ve uluslararası standartlara göre titreşim değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi; a) ÇGKY, b) ÇGDYY, c) USBM RI 8507, d) DIN 4150-3

Yeni Türk standardına göre (T.C. Resmi Gazete, 2022), yapı türlerine göre titreşim sınır değerleri frekans-temelli olarak farklılaştırılmıştır: i) sanayi yapıları için en yüksek sınır değer tanımlanırken, ii) evler (tuğla, betonarme) için orta düzeyde sınırlar, iii) tarihi ve doğal yapılar için ise en düşük sınır değerler geçerlidir. Ölçülen titreşim değerlerinin tamamı, her üç yapı türü için tanımlanan sınır değerlerin altında kalmakta; bu da patlatma sonucu oluşan titreşimin hem modern hem de hassas yapılarda zarar oluşturmayacak düzeyde olduğunu göstermektedir (Şekil 7a).

Ülkemizde maden ve taşocakları patlatmalı kazılarına yönelik önceki yıllarda değerlendirmeler, 2010 yılında yürürlüğe giren “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” (T.C. Resmi Gazete, 2010) kapsamında gerçekleştiriliyordu. Bu mevzuat, yapı türlerine göre ayırım yapmaksızın tekil bir sınır eğrisi tanımlamakta olup, frekans arttıkça izin verilen titreşim (PPV) değerinin yükseldiği bir yapıdadır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen tüm titreşim değerlerinin, bu standardın belirlediği sınır eğrisinin altında kaldığı görülmektedir (Şekil 7b). Bu durum, geçmişteki mevzuatlara göre de mevcut patlatma faaliyetlerinin güvenli sınırlar içinde olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, yapı türlerine özel eşik değerler içermemesi nedeniyle, bu standardın koruma düzeyi açısından sınırlı olduğu değerlendirilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu (U.S. Bureau of Mines, 1980) tarafından yayımlanan RI 8507 standardı, özellikle konut ve hafif yapıların titreşime duyarlılığı üzerine kuruludur. Ahşap ve alçıpan duvarlı evler gibi kırılmalı yapı türleri için daha düşük eşikler, daha dayanıklı yapılar için ise yüksek sınırlar tanımlar. Ölçüm değerlerinin tamamı hem alçıpan/ahşap yapılar hem de diğer konut yapıları için belirlenen sınır değerlerin altında yer almaktadır (Şekil 7c). Bu durum, konut yapıları açısından riski minimal göstermektedir. USBM standardı, yapısal zarar yerine daha çok konfor ve rahatsızlık eşiği açısından değerlendirme yapar.

Alman DIN 4150-3 standardı (German Institute for Standardisation, 1999), üç farklı yapı türü için sınır eğrileri tanımlar: i) oturan binalar, ii) endüstriyel yapılar, iii) karma nitelikli diğer yapılar şeklindedir. Bu standardın temel özelliği hem frekans hem de yapı tipi temelli esnek sınırlar sunmasıdır. Beş ölçüm verisinin tamamı, iki yapı kategorisinin de altında kalmakta olup, oturan evler gibi hassas yapılarda dahi herhangi bir yapısal hasar riski oluşturmadığını ortaya koymaktadır (Şekil 7d). Ölçüm verileri Şekil 7d’de mavi çizgi ile işaretli alanın üstünde yani hasar bölgesinde kalmaktadır. Ancak bu alan 1 ve 2’nin dışında kalan çok hassas yapıları tarif etmektedir.

Sonuç olarak çalışmaya konu olan taş ocağında yapılan kontrollü patlatma sonrası ölçülen beş adet titreşim değeri hem ulusal hem de uluslararası dört farklı standarda göre değerlendirilmiş ve her biri açısından güvenli bölge içinde kaldığı tespit edilmiştir. Frekans değerlerinin genellikle 14.2–23.8 Hz aralığında ve PPV değerlerinin 4.9–6.5 mm/s aralığında olması hem yapısal hasar riski oluşturmadığını hem de rahatsızlık eşiği açısından kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Bu karşılaştırmalı analiz, patlatma tasarımının başarılı olduğunu ve çevresel etkilerin öngörülen sınırlar dahilinde tutulduğunu göstermektedir.

Tablo 3’te değerlendirmeye alınan tüm standartların karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Bu analizde titreşim değerleri için kullanılan eski Türk standardının yapı türü ayırımı ve hassas yapıların korunmasında oldukça zayıf kaldığı, endüstriyel yapılar içinse herhangi bir üst sınır değer bulunmadığını göstermektedir. Aynı zamanda farklı yapı türlerinin korunması açısından yeni Türk standardı ile DIN 4150-3 ve USBM standartlarının daha koruyucu yaklaşımlar sunduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu standartların frekans aralığına duyarlı sınır değerler içermesi ve yapı türlerine göre ayrı eşik tanımlamaları yapmasından kaynaklanmaktadır. Bu yönüyle, özellikle hassas yapılar için daha güvenli bir değerlendirme zemini oluşturmaktadır.

Tablo 3: Standartların titreşim sınır değerlerinin karşılaştırmalı analizi

Kriter	Yeni Türk Std.	Eski Türk Std.	USBM RI 8507	DIN 4150-3
Yapı türü ayırımı	✓ Evet	✗ Hayır	✓ Evet	✓ Evet
Frekans bazlı eşik	✓ Evet	✓ Evet	✓ Evet	✓ Evet
Hassas yapı koruması	✓ Orta düzey	✗ Zayıf	✓ Yüksek	✓ Yüksek
Endüstriyel yapılar için	✓ Ayırım var	✗ Yok	✗ Yok	✓ Ayırım var
Ölçüm verilerinin sonucu	✓ Güvenli	✓ Güvenli	✓ Güvenli	✓ Güvenli

Patlatmalı kazılar sırasında oluşan hava şoku genellikle L (A-weighted) ölçüm ağırlığı ile kaydedilmekte olup, bu parametrenin belirli eşik değerleri aştığında hangi yapısal ve çevresel etkileri oluşturabileceği literatürde tanımlanmıştır (Hoek & Bray, 1981). Söz konusu eşikler; yapısal hasar oluşumu, pencere kırılmaları, cam ve tabakaların titreşmesi, insan algısında rahatsızlık yaratma ve işitme sağlığına etkiler gibi birçok düzeyi kapsamaktadır. Bu bağlamda, çalışmada ölçülen hava şoku (dB(L)) değerleri, patlatma kaynaklı ani ses düzeylerinin etkilerini sınıflandıran bu literatür bilgileriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları ile bu eşik düzeyler arasındaki ilişki, Tablo 4’te detaylı şekilde sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 4: Gürültünün (ses dalgalarının) farklı seviyelerine insanların ve yapıların tepkileri (Hoek & Bray,1981)

Desibel [dB]	lb/in ²	Tanım (İngilizce)	Tanım
180	3	Structures damaged	Yapılar hasar alır
160	1	Most windows break	Çoğu pencere camı kırılır
140	0.1	Some windows break	Bazı pencere camları kırılır
~134	~0.03	“No damage” level	Hasarsız seviye
120	0.003	Threshold of pain	Acı eşiği
115	0.0002	Threshold of complaints (dishes/windows rattle)	Şikayet eşiği (tabakalar/camlar titrer)
100	0.0003	Riveter	Dikkat kesilme (endüstriyel gürültü eşiği)
80	$\approx 3 \times 10^{-5}$	—	—
60	$\approx 3 \times 10^{-6}$	Ordinary conversation	Normal konuşma
40	$\approx 3 \times 10^{-7}$	Hospital room	Hastane ortamı
20	$\approx 3 \times 10^{-8}$	Whisper	Fısıltı
0	$\approx 3 \times 10^{-9}$	Level of hearing	Duyuma eşiği

Ölçülen hava şoku değerlerinin Hoek & Bray (1981) sınıflamasındaki değerlendirilmesi Tablo 5’te verilmiştir. Hiçbir ölçüm 134 dB’lik “hasarsız seviye” sınırını aşmamaktadır, yani yapı hasarı beklenmez. Ancak bazı değerler (özellikle 121.2 dB) şikayet sınırını (120 dB) aşmakta veya oldukça yakın olup rahatsızlık, cam titremesi veya ani gürültü tepkileri gibi etkiler yaratabilir. Bu bağlamda, standartlara göre ölçülen hava şoku değerleri fiziksel zarar eşiğinin altında, ancak insan algısı açısından dikkat gerektiren seviyededir denebilir. Patlatma kaynaklı hava şoku yalnızca yapılar üzerinde değil, belirli düzeyleri aştığında insan sağlığı üzerinde de etkili olabilmektedir. Literatürde, 120 dB(L) üzerindeki ani ses basınçlarının özellikle hassas bireylerde rahatsızlık yaratabileceği, 140 dB(L) ve üzerindeki seviyelerin ise işitme sağlığı açısından zarar oluşturabileceği belirtilmektedir (Hoek & Bray, 1981). Bu çalışmada ölçülen en yüksek hava şoku değeri 121.2 dB(L) olup, işitme kaybı sınırının altında kalmaktadır. Ölçülen hava şoku ve titreşim değerlerinin bazı durumlarda şikayet eşiğine yaklaşması nedeniyle, patlatmaların özellikle gündüz saatlerinde veya mesai dışı zamanlarda yapılmaması, yerleşim alanlarında oluşabilecek rahatsızlıkları azaltmak açısından önem arz etmektedir.

Tablo 5: Ölçülen hava şoku değerlerinin sınıflandırılması

Ölçüm No	Hava Şoku (dB)	Sınıf	Değerlendirme
1	104.1	Şikayet eşiğinin altında	Hafif rahatsızlık yaratabilir
2	115.5	Şikayet eşiği	Yüksek ses algısı, rahatsızlık mümkün
3	121.2	Acı eşiğine çok yakın	Şiddetli gürültü, cam titremesi olası
4	107.3	Şikayet eşiğine yakın	Camlarda titreşim veya rahatsızlık olabilir
5	106.4	Şikayet eşiğine yakın	Düşük düzeyde etki, şikayet oluşabilir

4.2. Açık Ocak İşletmesinin Duraylılık Değerlendirmesi

Çalışma alanında taş ocağı işletmesine ait kesit hattındaki topoğrafyada gelişebilecek duraysızlığı belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi RS2 (Rocscience, 2024a) 11.023 programından yararlanılmış ve kritik SRF (Gerilme azaltma faktörü) değeri ile toplam yer değiştirme miktarları belirlenmiştir. Oluşturulan modellerde Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yenilme kriteri kullanılarak gerilme-deformasyon analizleri yapılmış ve plastik yenilmeler araştırılmıştır. Sayısal analizlerde sismik yükler de dikkate alınmış ve bölgenin depremselliği dikkate alınarak “Türkiye Deprem Tehlike Haritasından” elde edilen maksimum yatay yer ivmesi değeri indirgenerek (Marcuson & Franklin, 1983) analizlerde 0.057g olarak kullanılmıştır.

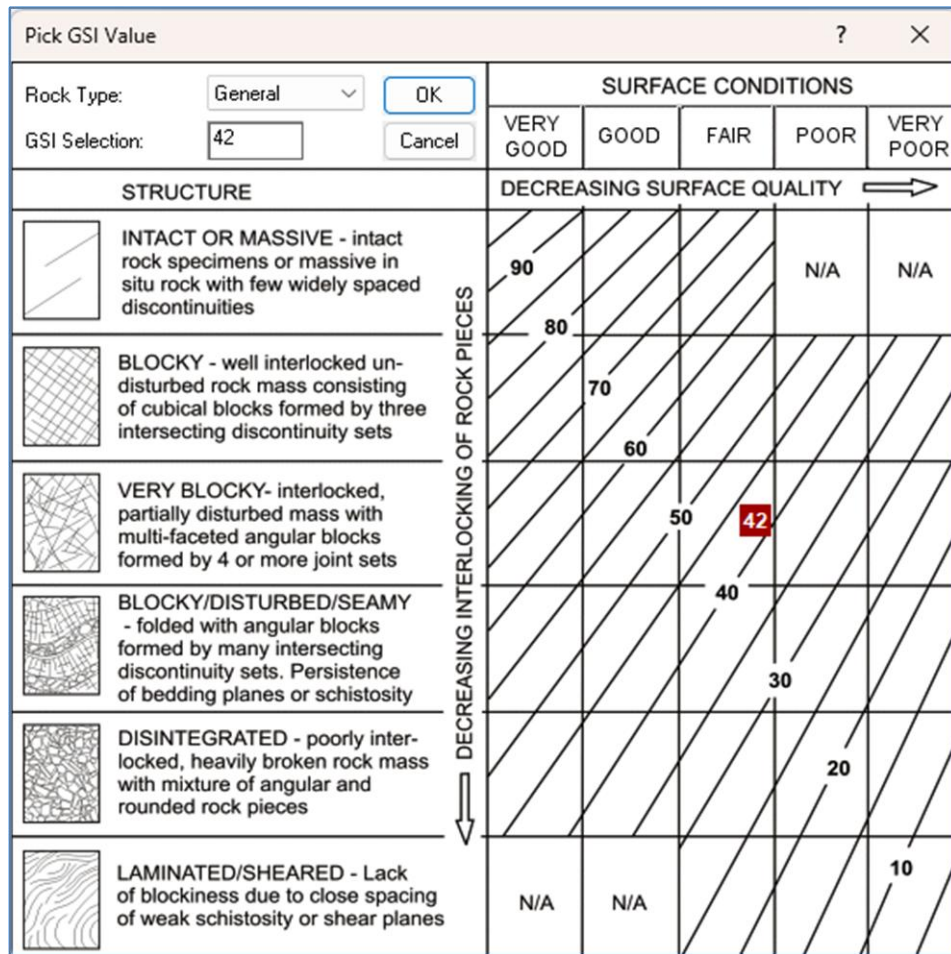
İnceleme alanından alınan blok örnekler laboratuvarında deney standartlarında hazırlanıp, Gümüşhane Üniversitesi Kaya Mekaniği Laboratuvarında deneyleri yapılmış olup, deney sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Buna göre yapılan tek eksenli basınç dayanımları ortalamasının yaklaşık 75 MPa ve birim hacim ağırlık deneyi sonrası malzemenin ortalama 26 kN/m³ birim hacim ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir.

Çalışma sahasında yüzeyleyen litolojik birimler, Üst Kretase dönemine ait Bakırköy Formasyonu içerisinde yer alan marnlardan oluşmaktadır. Gözlemler, bu kayaların gri renkli, yüksek çatlak yoğunluğuna sahip, ince ile orta kalınlık arasında değişen tabakalardan meydana geldiğini ve yer yer piroklastik katkılar içerdiğini göstermektedir. Söz konusu

kaya ortamı, mühendislik açısından orta ila yüksek dayanımlı, bloklu karakterde bir yapı sergilemektedir. Kaya kütlelerinin dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla [Hoek & Marinos \(2000\)](#) tarafından geliştirilen GSI değerlendirme abağı kullanılmış ve analiz sonucunda kütlelerin Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerinin 40 ila 45 aralığında (42) olduğu belirlenmiştir. Bu değer, kütlelerin “çok bloklu kaya” sınıfı içinde değerlendirilebileceğini göstermektedir (Şekil 8).

Tablo 6: Kayacın mekanik ve fiziksel özellikleri

Jeolojik Birim	Tek eksenli basınç dayanımı, σ_c (MPa)	Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)
Andezit	67.80	25.10
	72.43	27.50
	76.35	26.80
	80.19	23.90
	78.48	26.70
Ort.	≈ 75	≈ 26



Şekil 8: [Hoek & Marinos \(2000\)](#) yaklaşımına göre kaya kütlelerinin GSI değerine ilişkin değerlendirme abağı

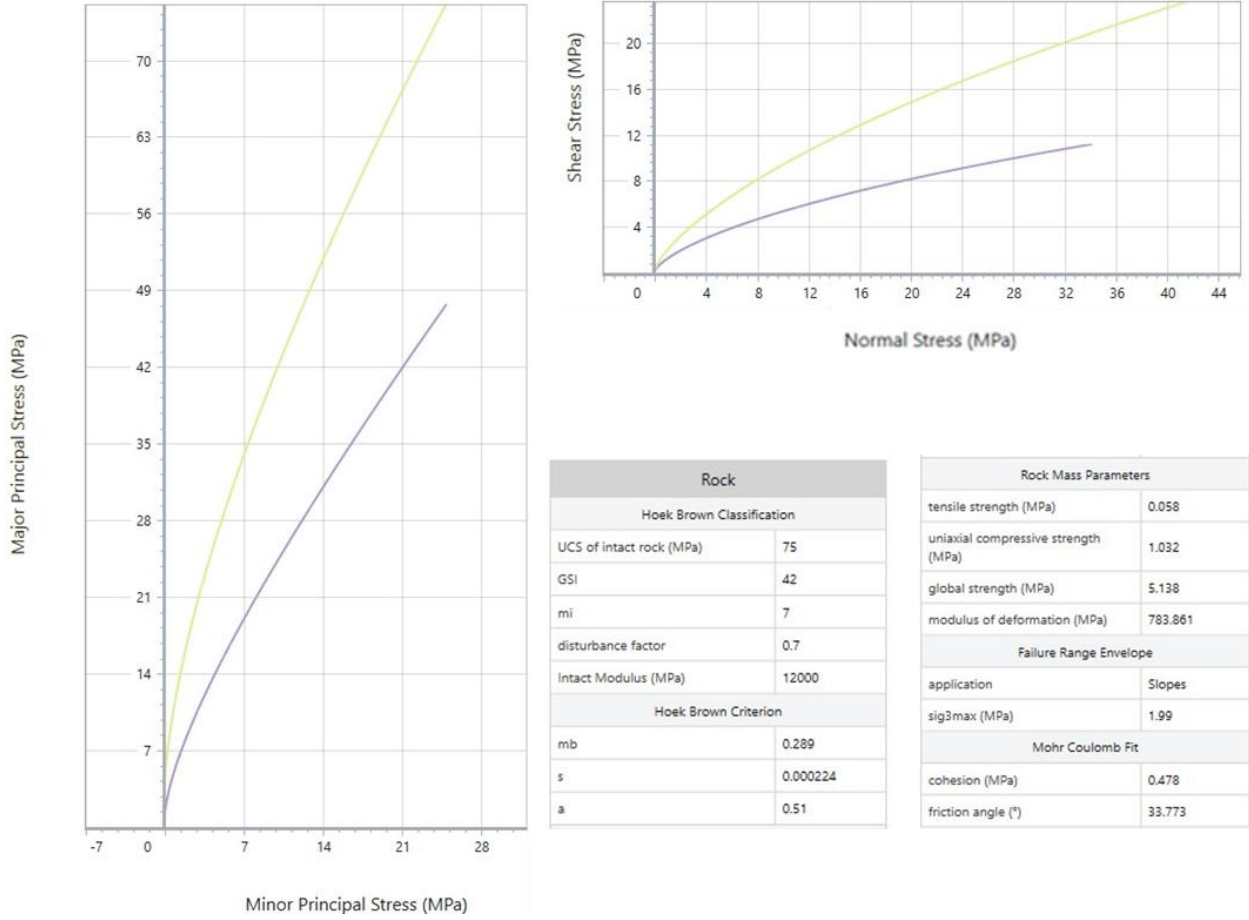
Kaya kütlelerinin dayanım parametreleri, [Hoek vd. \(2002\)](#) tarafından geliştirilen Hoek-Brown yenilme kriteri esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, kaya kütleleri sabitleri olan m_b , s ve a değerlerinin hesaplanmasında RSDData ([Rocscience, 2024a](#)) bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Burada; m_i , bozulmamış kayaç malzemesine özgü bir malzeme sabitidir. D ise, kaya kütlelerinin patlatma etkileri veya gerilme rahatlaması nedeniyle maruz kaldığı yapısal bozulma düzeyini temsil eden bir faktör olup, örselenmemiş kaya kütlelerinde 0, ileri düzeyde bozulmuş kayaçlarda ise 1'e kadar değer alabilir. Bu çalışmada şevlerin tasarımında patlatmalı kazı yapılacağı için örselenme faktörü D: 0.7 alınmıştır. Söz konusu formüllerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen değerler Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7: Şev duraylılığı analizlerinde kullanılan jeomekanik parametreler

GSI	σ_c (MPa)	m_i	γ (kN/m ³)	D	E_m (MPa)	Yatay yer ivmesi (g)	Düşey yer ivmesi (g)	Hoek-Brown sabitleri		
								m_b	s	a
42	75	7	26	0.7	784	0.057	0.029	0.289	0.0002	0.510

Söz konusu GSI değeri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı ($\sigma_{ci} = 75$ MPa) kullanılarak, RSData (Rocscience, 2024a) yazılımı ile Hoek-Brown kırılma kriterine dayalı kaya kütlesi parametreleri hesaplanmış ve grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9: Kaya kütlesi dayanım analizine yönelik giriş verileri ve σ_1 - σ_3 ile σ - τ diyagramları

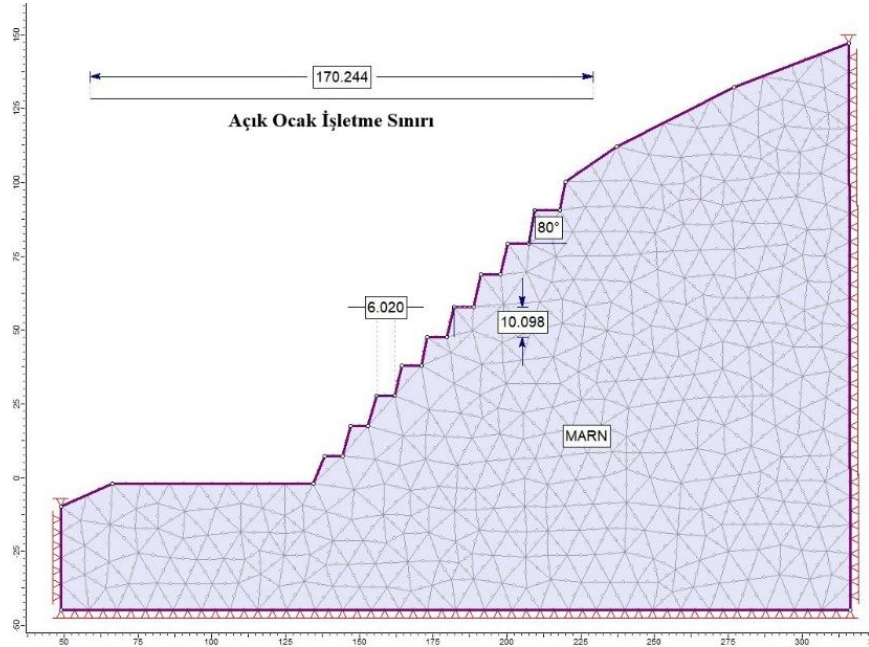
Elde edilen bu dayanım parametreleri, çalışma sahasında önerilen patlatmalı kazı işlemleri ve şev tasarımı açısından kritik önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, şev stabilite analizleri, sayısal yöntemle modelleme imkânı sunan RS2 (Rocscience, 2024b) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, 10 metre yüksekliğinde ve 80° eğim açısına sahip üretim kademeleri temel alınmış ve elde edilen Hoek-Brown kaya kütle sabitleri şev modeline entegre edilmiştir. Ocak alanı için belirlenen kritik şev tasarımı altı düğüm noktalı üçgen ağ modeli ile tasarlanmış (Şekil 10) olup, taş ocağı şev tasarımı için elde edilen parametreler kullanılarak, şevin kazı sonrasında ve kazı sonrası sismik yük etkisinde duraylılık değerlendirmeleri yapılmıştır (Şekil 11-13).

Taş ocağı duraylılık değerlendirmesinde Sonlu Elemanlar Tabanlı Kayma Dayanımı Azaltma Yöntemi (FE-SSR) ile tasarı kesiti analiz edilmiş olup, kazı sonrası kayma gerilmesi azaltma analizi (Şekil 11), kazı sonrası sismik yük etkisinde kayma gerilmesi azaltma analizi (Şekil 12) ve kazı sonrası sismik yük etkisinde toplam yer değiştirme analizi (Şekil 13) gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre kazı sonrası tasarı şevi analiz edildiğinde, güvenlik sayısı SRF= 1.8 olarak belirlenmişken, sismik yük etkisinde ise SRF=1.65 olarak belirlenmiştir. Açık ocak işletmelerinde şevlerin güvenliği için belirlenen SRF değerinin 1.5'den büyük olması işletme aşamasında şevlerin duraylı olduğunu ifade etmektedir.

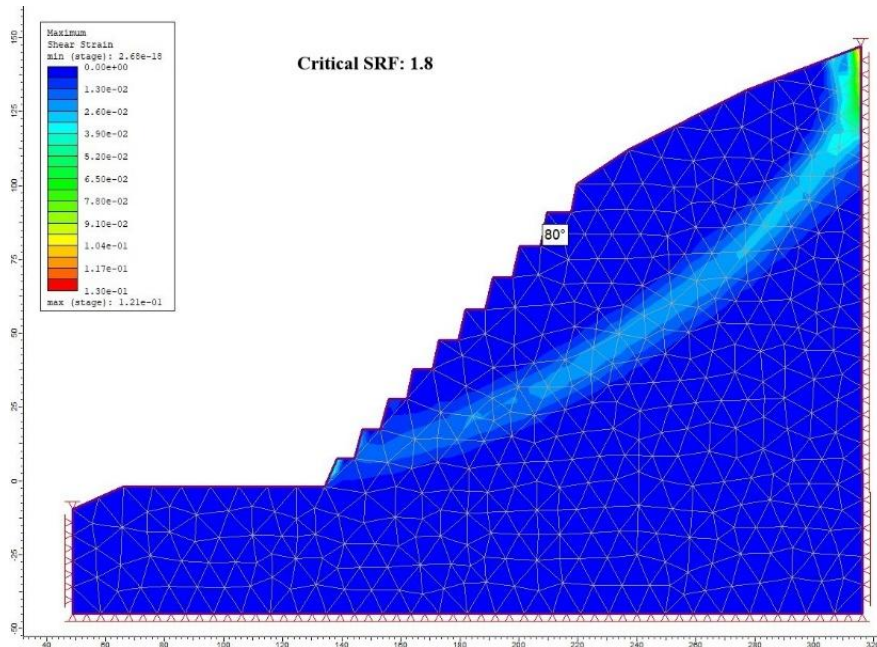
İncelenen şev kesitinde yapılan toplam yer değiştirme analizinde (şev yüzeyi deformasyon analizi) 1.72 cm-8.60 cm aralığında yüzeysel bir deformasyon belirlenmiş olup, şev yüzeyinde bir duraysızlık oluşturması beklenmemektedir. Yapılan analizlerde genel bir değerlendirme yapıldığında elde edilen güvenlik sayıları ve deformasyonlar incelendiğinde,

SRF değeri birçok ülkede geçerli olan minimum güvenlik katsayısı önerisi olan 1.5'in üzerinde bulunmuştur (Hoek vd., 2002). Ayrıca elde edilen toplam yer değiştirme değerleri, şevde herhangi bir makroskobik duraysızlık gelişmeyeceğini, yüzeyel deformasyonların da oldukça sınırlı kalacağını göstermektedir.

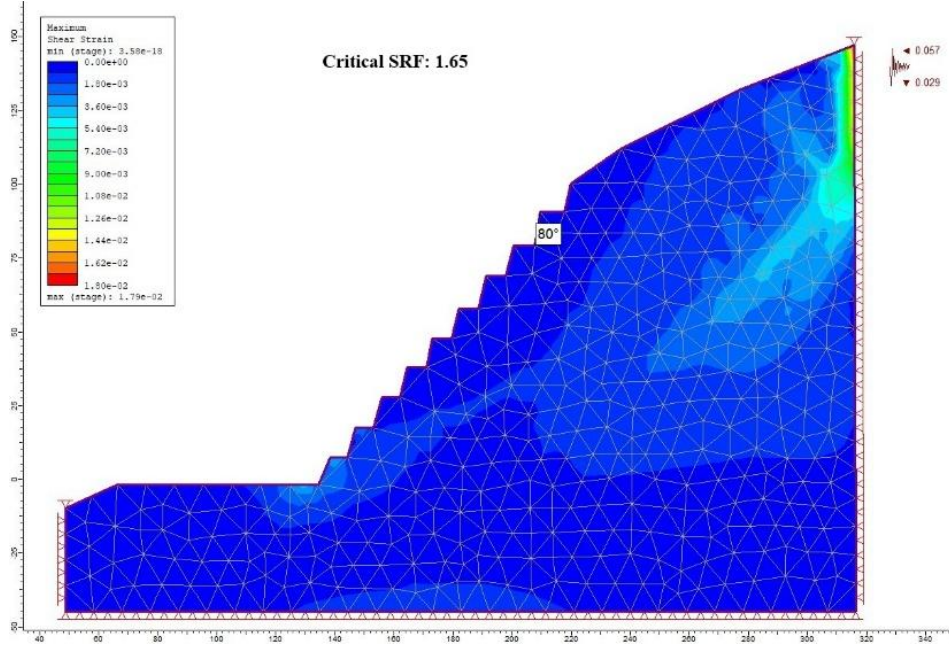
Bu çalışmada, yapılan analizler mevcut patlatma koşulları altında şev stabilitesinin sağlandığını ($SRF > 1.5$) göstermektedir. Ancak uzun vadede, tekrarlayan patlatmaların kaya kütlelerinde birikimli hasar, mikro çatlak gelişimi ve zemin parametrelerinde zayıflamaya yol açabileceği bilinmektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalarda uzun süreli izleme verileri ve zamanla değişen şev davranışına yönelik analizlerin de değerlendirilmesi önerilmektedir.



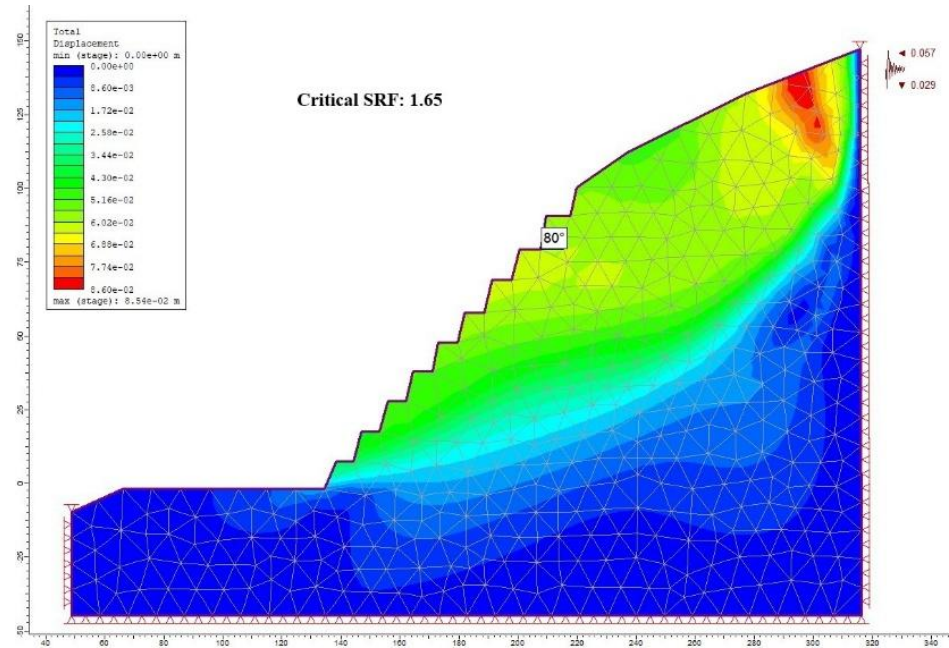
Şekil 10: Taş ocağında sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuş şev tasarımına ait ağ modeli



Şekil 11: İşletme alanındaki yamaçta, kazı sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen kayma gerilmesi azaltma (SSR) analizi



Şekil 12: İşletme alanındaki yamaçta, kazı sonrası sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen kayma gerilmesi azaltma (SSR) analizi (Sismik yük etkisinde)



Şekil 13: İşletme alanındaki şev kesitine ait toplam yer değiştirme dağılımı

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Trabzon ili Araklı ilçesinde faaliyet gösteren bir taş ocağında yürütülen patlatmalı kazı uygulamalarının çevresel etkileri ile kazı sonrası ve sismik yük etkisindeki şev duraylılığı, deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Beş farklı patlatma için Instanetel Micromate sismografi ile alınan yer titreşimi ve hava şoku verileri, güncel (T.C. Resmi Gazete, 2022) ve önceki Türk mevzuatları (T.C. Resmi Gazete, 2010) ile birlikte DIN 4150-3 (German Institute for Standardisation, 1999) (Almanya) ve USBM RI 8507 (U.S. Bureau of Mines, 1980) (ABD) standartları kapsamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, her bir patlatmanın tüm referans standartlara göre güvenli eşik değerlerin altında kaldığını ortaya koymuş; özellikle yeni Türk standardı, DIN 4150-3 ve USBM standartlarının daha koruyucu eşikler sunduğu belirlenmiştir.

Yer sarsıntılarının yanı sıra, hava şoku analizleri de yapılmış ve bazı değerlerin insan algısı açısından rahatsızlık eşiğine yakın seyrettiği, ancak yapısal hasar oluşturacak seviyelere ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, çevresel etkilerin etkin bir biçimde kontrol altında tutulduğunu göstermektedir.

Patlatmalı kazı işlemlerinden ve bölgenin depremselliğinden kaynaklanabilecek titreşimlerin oluşturduğu dinamik yükler analizlere etki ettirildiğinde elde edilen güvenlik sayısı SRF: 1.65 olup, işletme esnasında herhangi bir duraysızlık sorununa yol açmayacağı belirlenmiştir. Ayrıca sismik yük etkisinde yapılan deformasyon analizinde şev yüzeyinde oluşan deformasyonun maksimum 8.6cm olduğu belirlenmiş olup, bu durumun tasarlanan şevde bir duraysızlık sorunu oluşturmayacağı, ancak patlatma sonrası süreksizliklerde meydana gelen gevşeme sonucu lokal blok düşmelerine sebep olabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, patlatma sonrası palyelerde kalan askıdaki bloklar temizlenmelidir.

Sonuç olarak, saha verileri ve sayısal analizler ışığında yapılan değerlendirmeler, patlatmalı kazıların hem çevresel hem de yapısal açıdan uygun sınırlar içinde gerçekleştirildiğini, ayrıca tasarlanan şev geometrisinin mevcut jeolojik koşullar altında mühendislik açısından güvenli olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, taş ocaklarında yürütülecek benzer üretim faaliyetlerinde hem çevresel etki değerlendirmesi (ÇED) süreçlerine hem de şev tasarımı optimizasyonuna yönelik önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın arazi ölçümleri sürecinde verdikleri destek ve iş birliği için taş ocağı işletmesinde görevli teknik personel ve saha çalışanlarına içten teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- Blair, D. P. (1990, August 26–31). *Some problems associated with standard charge weight vibration scaling laws* [Symposium presentation]. 3rd International Symposium on Fragmentation by Blasting, Brisbane Queensland, Australia.
- Fehrer, J., Cambal, J., Pandula, B., Kondela, J., Sofranko, M., Mudarri, T., & Buchla, I. (2021). Research of the technical seismicity due to blasting works in quarries and their impact on the environment and population. *Applied Sciences*, 11, Article 2118. <https://doi.org/10.3390/app11052118>
- Fu, B., Ji, H., Pei, J., & Wei, J. (2024). Numerical computation-based analysis of blasting vibration effects and slope stability in an open-pit quarry. *Fire*, 7, Article 420. <https://doi.org/10.3390/fire7110420>
- German Institute for Standardisation. (1999). *DIN 4150-3: Structural vibration – Part 3: Effects of vibration on structures*. Beuth Verlag GmbH.
- Hoek, E. & Marinos, P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. Tunnels and Tunneling International, Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000. <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/Predicting-Tunnel-Squeezing-Problems-in-Weak-Heterogeneous-Rock-Masses-2000.pdf>
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (Revised 3rd edition). Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., & Corkum, B. (2002, July 7–10). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition* [Symposium presentation]. 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.
- Jiang, N., Lyu, G., Wu, T., Zhou, C., Li, H., & Yang, F. (2023). Vibration effect and ocean environmental impact of blasting excavation in a subsea tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, Article 104855. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104855>
- Jiang, N., Zhou, C., Lu, S., & Zhang, Z. (2017). Propagation and prediction of blasting vibration on slope in an open pit during underground mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.005>
- Jug, J., & Grabar, K. (2020). Methods for reducing the environmental impact of rock mass excavation. *Environmental Engineering – EnvEng-IO*, 7(1), 29–38.
- Kahriman, A., Özer, U., Aksoy, M., Karadoğan, A., & Tuncer, G. (2006). Environmental impacts of bench blasting at Hisarcik Boron open pit mine in Turkey. *Environmental Geology*, 50(7), 1015–1023. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0274-5>
- Khandelwal, M., & Singh, T. N. (2006). Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine—a neural network approach. *Journal of Sound and Vibration*, 289, 711–725. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.02.044>
- Khandelwal, M., & Singh, T. N. (2009). Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 1214–1222.
- Khan, M. F. H., Hossain, M. J., Ahmed, M. T., Monir, M. U., Rahman, M. A., Sweet, T. S., Akash, F. A., & Shovon, S. M. (2025). Ground vibration effect evaluation due to blasting operations. *Heliyon*, 11(2), Article e41759. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41759>
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Surface blast design*. Prentice Hall.
- Kuzu, C. (2008). The mitigation of the vibration effects caused by tunnel blasts in urban areas: a case study in Istanbul. *Environmental Geology*, 54, 1075–1080. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0875-7>
- Marcuson, W. F., & Franklin, A. G. (1983). Seismic design, analysis and remedial measures to improve the stability of existing earth dams - Corps of Engineers approach. In T.R. Howard (Ed.), *Seismic Design of Embankments and Caverns*. ASCE.
- Mesec, J., Težak, D., & Jug, J. (2018). Reducing the adverse effects of blasting on the cave ecosystem near the future exploitation field Gradusa. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 33(4), 45–54. <https://doi.org/10.17794/rgn.2018.4.4>
- Özer, U. (2008). Environmental impacts of ground vibration induced by blasting at different rock units on the Kadikoy–Kartal metro tunnel. *Engineering Geology*, 100(1–2), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.006>
- Rocscience. (2024a). *RS2 finite element analysis for excavations and slopes*. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada. <https://www.rocsience.com/help/rs2/tutorials>

- Rocscience. (2024b). *RSData Strength and Stress Analysis Software*. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada. <https://www.rocscience.com/software/rsdata>
- Singh, P. K., Vogt, W., Singh, R. B., Singh, M. M., & Singh, D. P. (1997). Response of surface structures to rock blasting. *Mineral Resource Engineering*, 6(4), 185–194. <https://doi.org/10.1142/S0950609897000176>
- Singh, P., & Jayanthu, S. (2024). Pseudo-static and dynamic analysis of mine rock slope under the influence of production blasting. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41, 3197–3209. <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01112-0>
- Singh, P. K., Roy, P. P. & Singh, R. B. (2007). Ground vibration assessment under varying circumstances in a limestone quarry in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 121(1–3), 121–123.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting* (Report of Investigations 8507). U.S. Bureau of Mines, Washington, D.C.
- Su, H., & Ma, S. (2022). Study on the stability of high and steep slopes under deep bench blasting vibration in open-pit mines. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 990012. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990012>
- Taiwo, B. O., Yewhalashet, F., Ogunyemi, O. B., Babatuyi, V. A., Okobe, E. I., & Orhu, E. A. (2023). Quarry slope stability assessment methods with blast induced effect monitoring in Akoko Edo, Nigeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, 2553–2571. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02414-8>
- T.C. Resmi Gazete. (2010). *Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 04.06.2010, Sayı: 27601). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100604-5.htm>
- T.C. Resmi Gazete. (2022). *Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 11.06.2022, Sayı: 31863). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/06/20220611-4.htm>
- Ulusay, R. (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- U.S. Bureau of Mines. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting (RI 8507)*. U.S. Department of Interior, Bureau of Mines.
- Venkatesh, H. S. (2005). Influence of total charge in a blast on the intensity of ground vibrations – field experiment and computer simulation. *Fragblast*, 9(3), 127–138. <https://doi.org/10.1080/13855140500332260>

Giresun İlinin 2018-2023 Yılları İçerisindeki Katı Atık Performansının Ölçülmesi

Hatice Doğan^{1*}

¹Giresun Üniversitesi, Giresun Meslek Yüksekokulu, Pazarlama ve Reklamcılık Bölümü, 28049, Giresun.

Özet

Günümüzde sanayinin gelişmesi, nüfusun hızla artması, şehirlerde yaşayan insan sayısının hızlı bir artış göstermesi ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi beraberinde atık miktarlarının da artmasına neden olmuştur. Atık miktarlarındaki yaşanan artışlar küresel bir sorun haline gelmiştir. Atıkların ortaya çıkardığı en önemli sorun çevre kirliliği ve sebep olduğu sağlık problemleridir. Diğer yandan kaynakların kıt olması oluşan atıkların geri dönüşümünün sağlanmasını elzem kılmıştır. Kullanımlar sonucunda ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesi ve daha da önemlisi oluşabilecek atık miktarının en düşük seviyelerde tutulması hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisindeki katı atık performansının ölçülmesi amaçlanmıştır. Yapılan literatür araştırması sonucunda katı atık performansını ölçmek amacıyla; il nüfusu (kişi), toplam katı atık geri kazanım ve bertaraf miktarı (kg), toplam atık işletme tesisi sayısı (adet), sıfır atık kapsamında il genelinde eğitim alan kişi sayısı (kişi), sıfır atık yönetimi kapsamında geri dönüşüm miktarı (kg), sıfır atık kapsamında yerleştirilen kumbara sayısı (adet), sıfır atık kapsamında yerleştirilen konteyner sayısı (adet), sıfır atık kapsamında elde edilen kompost miktarı (kg), sıfır atık kapsamında yapılan enerji tasarrufu (kWh), sıfır atık yönetimi kapsamında atık depolama alanı tasarrufu (m³), toplam katı atık miktarı (ton/gün), kişi başı ortalama belediye katı atık miktarı (kg/kişi-gün), tıbbi atık miktarı (ton), atık pil ve akü miktarı (kg) olmak üzere 14 kriter belirlenmiştir. Belirlenmiş olan bu kriterlerin ağırlıklarını ölçmek amacıyla diğer nesnel ağırlıklandırma yöntemlerin göre oldukça yeni olan LOPCOW yöntemi kullanılmıştır. Bu kriter ağırlıkları MARCOS yöntemine entegre edilerek yıllar içerisindeki performans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan bütünlük model karar vericilerin önyargılarından bağımsız bir çözüm sunmaktadır. Elde edilen sonuçların kriter ağırlıklarından nasıl etkilendiğini değerlendirmek amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizi kapsamında MEREC, ENTROPI yöntemi ve Eşit Ağırlıklandırma ile kriterler ağırlıklandırılmış ve MARCOS yöntemine entegre edilerek çözülmüştür. Yapılan bütün analizlerin benzer sonuçlar verdiği, en iyi performansın 2021 yılında gösterildiği ve en düşük performansın ise 2018 yılında gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Katı Atık, LOPCOW, MARCOS, MEREC, ENTROPI

Measurement of Solid Waste Performance of Giresun Province in 2018-2023

Abstract

Today, industrial development, rapid population growth, urbanization, and changing consumption habits have led to an increase in the amount of waste. The increase in waste has become a global problem. The most important problems caused by waste are environmental pollution and health issues. On the other hand, the scarcity of resources has made it essential to ensure the recycling of waste. Recycling waste generated from usage and, more importantly, keeping the amount of waste that may be generated at the lowest possible level is of vital importance. This study aims to measure the solid waste performance of Giresun province between 2018 and 2023. As a result of the literature review, the following indicators were identified to measure solid waste performance: provincial population (persons), total solid waste recovery and disposal amount (kg), total number of waste management facilities (units), number of persons trained in zero waste management across the province (persons), the amount of recycling under the zero-waste management framework (kg), the number of bins installed under the zero-waste framework (units), the number of containers installed under the zero-waste framework (units), the amount of compost obtained under the zero-waste framework (kg), the energy savings achieved under the zero-waste framework (kWh), the waste storage area savings under the zero-waste management framework (m³), total solid waste amount (tons/day), average municipal solid waste amount per person (kg/person-day), medical waste amount (tons), and waste battery and accumulator amount (kg). The LOPCOW method, which is relatively new compared to other objective weighting methods, was used to measure the weights of these criteria. These criteria weights were integrated into the MARCOS method to measure performance over the years. The integrated model used in the study provides a solution independent of decision-makers' biases. A sensitivity analysis was conducted to evaluate how the results were affected by the criterion weights. Within the scope of the sensitivity analysis, the criteria were weighted using the MEREC, ENTROPY and Equal Weighting methods and integrated into the MARCOS method for solution. It was determined that all analyses yielded similar results, with the best performance observed in 2021 and the lowest performance in 2018.

Keywords

Solid Waste, LOPCOW, MARCOS, MEREC, ENTROPY

1. Giriş

Günümüzde sanayileşmenin ve nüfusun gün geçtikçe artması, insanların yaşam tarzındaki değişiklikler, modern teknolojinin sınırsız kullanımı dünyada üretim ve tüketim miktarının artmasına neden olmuştur. Üretim ve tüketimdeki bu artışlar doğal kaynakların her geçen gün azalmasına neden olmaktadır. Tüketimin sürekli artış göstermesi sonunda atık miktarları ve atık çeşidi de artmakta ve dünyadaki yaşamı tehdit eder boyuta ulaşmaktadır. Atık miktarındaki artış hem çevre hem de insan sağlığı üzerine olumsuz etkiler yaratmaktadır (Minghua vd., 2009). Atık en basit tanımıyla “sahibi için hiçbir değeri olmayan veya marjinal değeri olan ve sahibinin atmak istediği artık, gereksiz bir ürün veya malzeme” olarak ifade edilmektedir (Christensen, 2011). Ekonominin çok hızlı büyümesi, kentlerde yaşayan insan sayısının artması, atık toplama ve arıtma tesislerinin yetersiz olması ve düşük performansla çalışması sonucunda büyük miktarlarda atık oluşumuna yol açmaktadır (Chen vd., 2020). Oluşan bu atıklar ciddi çevre kirliliğine ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır.

Dünyada yaklaşık olarak 8 milyar civarında insan yaşamakta ve bu sayı giderek artmaktadır. Birleşmiş Milletler (BM) 2050 yılında dünya nüfusunun 10 milyara yaklaşacağını belirtmiştir. Bu nedenle oluşacak atık miktarında da ciddi artışlar yaşanacağı bilinmektedir. Dünyada yılda 2,1 milyar ton kentsel katı atık üretilmekte olup, bu miktarın 2050 yılına kadar % 80 artması beklenmektedir (Cheapa Waster Skips, 2025). Dünyada yılda yaklaşık 2,01 milyar ton belediye katı atığı üretildiği bilinmekte ve bu atıkların yaklaşık % 33’üne yakınının geri dönüştürülemediği için çevreye ciddi zararlar vermektedir. Dünya çapında, kişi başına üretilen günlük atık miktarının 0,74 kg olduğu, ancak bu miktarın 0,11 kg ile 4,54 kg arasında değiştiği bilinmektedir. Ülkelerin gelir seviyeleri yükseldikçe ürettikleri atık miktarları da artış göstermektedir. Dünyadaki nüfusun yaklaşık % 16’sını oluşturan yüksek gelirli ülkeler dünya atık miktarının % 34’ünü üretmektedir. 2050 yılına kadar yüksek gelirli ülkelerde kişi başına atık üretiminin % 19 artacağı, orta ve düşük gelirli ülkelerde ise yaklaşık % 40 artacağı tahmin edilmektedir. Düşük gelirli ülkelerde üretilen toplam atık miktarının daha hızlı arttığı belirlenmiştir. Düşük gelire sahip olan ülkelerde üretilen atık miktarının yaklaşık % 48’i toplanabilmekte ve toplam atık miktarının yalnızca yaklaşık % 16’sı geri dönüştürülebilmektedir. Yüksek gelire sahip ülkelerde ise atıkların yaklaşık % 90’ı toplanabilmektedir (Kaza vd., 2018).

İnsanların tüketim alışkanlıklarının değişmesine ve artmasına bağlı olarak doğal kaynakların ve ürünlerin kullanımı katlanarak artış göstermiştir. Bu sebeple de her gün büyük miktarlarda farklı türde katı atık üretilmekte ve bunların bertarafı endişe verici bir sorun haline gelmektedir. Giderek artış gösteren bu sorunla mücadele edebilmek için proaktif bir yöntemin gerekli olduğu, yani sadece bertaraf etmeye odaklanmak yerine katı atık üretiminin azaltılması, katı atıkların etkin bir şekilde toplanması ve katı atıkların değerlendirilmesini sağlayacak katı atık yönetiminin oluşturulması gerekmektedir (Nag & Vizayakumar, 2005). 2 Nisan 2015 tarihli 29314 sayılı resmi gazetede atık yönetimi, “atığın oluşumunun önlenmesi, kaynağında azaltılması, yeniden kullanılması, özelliğine ve türüne göre ayrılması, biriktirilmesi, toplanması, geçici depolanması, taşınması, ara depolanması, geri dönüşümü, enerji geri kazanımı dâhil geri kazanılması, bertarafı, bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi faaliyetlerini” ifade etmektedir (T.C. Resmi Gazete, 2015). Oluştukları alanlara göre farklılık gösteren atıldıkları ortamda belirli bir süre sonra insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek katı atıkların yönetilmesi büyük önem arz etmektedir (Bilgili, 2020). Bu nedenle, katı atık yönetimi, ekonomik, estetik ve enerji tasarrufu ilkelerini benimseyerek çevreye uyumlu bir üretim sistemini içermesi gerekmektedir. Üretim yapılırken depolama, toplama, aktarma ve taşıma, yeniden kullanım ve geri dönüşüm, işleme ve bertarafı ile ilgili faaliyetlerin yönetimini de dikkate almalıdır (Nag & Vizayakumar, 2005).

Katı atık yöntemi, dünyada yaşayan bütün insanları etkileyen evrensel bir çevresel sorundur. Atıkların doğru bir şekilde yönetilmemesi, deniz ve havayı kirliletmekte, atıkların yakılması sonucunda ciddi solunum yolu hastalıkları ortaya çıkmakta ve ekonomik gelişmeleri olumsuz etkilemektedir. Kişilerin gelir seviyelerindeki artış ve insanların kente göçmeleri sonucunda kişi başına oluşan atık miktarı da artış göstermiştir. Hızlı kentleşmenin sonucunda atıkların toplanması ve bertarafı için gerekli olan arazinin temin edilmesini güçleştirmektedir. Atık yönetiminin uygulanabilmesi özellikle gelir seviyesi düşük olan ülkelerde pek çok yerel yönetim için ciddi bir bütçeyi gerekli kılmaktadır. Belediye bütçelerinin yaklaşık % 20’si atık yönetimi için ayrılmaktadır. Orta gelir seviyesine sahip ülkelerde bu oran % 10’da fazla, yüksek gelirli ülkelerde ise yaklaşık % 4’ünü oluşturmaktadır. Katı atık yönetim sistemlerinin kurulması için yüksek miktarlarda finansal kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır. Tesislerin kurulum aşamasındaki finansal ihtiyaçtan ziyade süreç içerisinde devam edecek olan operasyonel faaliyetlerin maliyetleri oldukça yüksektir (Kaza vd., 2018). Oluşan atıkların geri dönüştürülmesi ve ayrıştırılması noktasında bireysel olarak ve hükümetler tarafından çeşitli kararlar alınmış ancak istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Hala büyük miktarlarda atık çevreye dökülmektedir. Çevrede oluşan çöp yığınları insanlar açısından ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Alshehre & Ameen, 2021).

İnsanların günlük yaşamalarında ortaya çıkan atıkların insan sağlığını tehlikeye sokmadan bertaraf edilmesi atık yönetim uygulamalarının en temel amacını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda atıklara uygulanan geri dönüşüm, geri kazanım, yakma, depolama ve gömme gibi uygulamaların insan ve çevre üzerinde pek çok olumsuz etkileri mevcuttur. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak veya minimum seviyeye indiregebilmek için ortaya çıkan bu atıkların geri kazanımının sağlanması gerekmektedir (Bilgili, 2023). Bu nedenle de her gün büyük miktarlarda farklı türeden katı atıklar üretilmekte ve bu atıkların bertarafı endişe verici bir sorun oluşturmaktadır. Artık sadece bertaraf etmeye odaklanmak yetersiz kalmaktadır. Aynı zamanda katı atık üretiminin de azaltılması, atıkların etkin bir şekilde toplanması ve katı atıkların değerlendirilmesi gerektiği kabul edilmektedir (Nag & Vizayakumar, 2005).

Türkiye’deki atık verileri incelendiğinde 2022 yılında toplanan belediye atık miktarı 30.283.757 (Ton/yıl) olarak belirlenmiştir. Kişi başına ortalama belediye atık miktarı ise 1.03 (kg/kişi-gün) olarak belirlenmiş olup, bu rakamın dünya ortalamasının üzerinde olduğu görülmektedir. Özellikle Türkiye’de son zamanlarda kentlerde nüfusun hızla artması belediye atık miktarlarının artmasına neden olmuştur. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de atıkların nasıl değerlendirileceği önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Türkiye’de katı atıkların toplanmasında, depolanmasında, geri dönüşümünün sağlanmasında ve bertarafında genel olarak belediyeler sorumludur. Belediyelerin yeterli teknik ve finansal altyapıya sahip olmamalarından dolayı atık yönetimi doğru bir şekilde yönetilememektedir. Dolayısıyla belediyelerin dönemsel olarak atık performanslarını ölçmeleri büyük önem arz etmektedir. [Demirarslan ve Başak \(2018\)](#) çalışmalarında Doğu Karadeniz Bölgesi’nde yer alan iller içerisinde kişi başına atık miktarının en fazla olduğu ilin Giresun olduğunu ifade etmişlerdir. Giresun orta büyüklükte bir şehir olmasına rağmen kişi başına atık miktarının Ordu ya da Trabzon’a göre fazla olması dikkat çekici bir durumdur. Şekil 1’de Türkiye haritası üzerinde Giresun ilinin konumu gösterilmiştir.



Şekil 1: Türkiye haritasında Giresun ilinin konumu

Giresun’da Görele ilçesi Çavuşlu Mevkiinde yaklaşık 9.11 hektar alana sahip katı atık düzenli depolama alanı ve 3 adet aktarma istasyonu mevcuttur. Ancak mevcut atık tesisleri ortaya çıkan atıkların bertarafı için yetersiz kalmaktadır. Giresun’da bütün yerleşim birimlerinde katı atık konusunda ciddi sıkıntılar yer almaktadır.

Bu çalışmada da, Giresun ilinin 2018-2023 yılı içerisindeki katı atık performansının ölçülmesi amaçlanmıştır. Dönemin 2018 yılı ile sınırlandırılmasındaki neden ise analiz kapsamında kullanılan bazı kriterlere ilişkin verilere ulaşılamamış olmasındandır. Katı atık yönetimine ilişkin yapılan literatür araştırması sonucunda performans ölçümünde 14 kriter kullanılmıştır. Giresun ilinin katı atık performansının değerlendirilmesi için literatürde diğer Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerine göre daha yeni ağırlıklandırma yöntemi olan LOPCOW ve sıralama yöntemi olan MARCOS kullanılmıştır. Kriterlerin sıfırdan büyük ya da küçük olmasından etkilenmemesi, veri boyutundan kaynaklanan boşluğu kapatması, daha rasyonel ağırlıklar oluşturmayı sağlaması LOPCOW yönteminin en önemli özelliğidir. Bunların yanı sıra logaritmik dönüşümlerle oluşabilecek küçük değişiklikleri belirleyebilmesinden dolayı kriter ağırlıklandırılmasında LOPCOW yöntemi tercih edilmiştir ([Guo vd., 2024](#)). MARCOS, esnek bir yöntem olmakla birlikte çok fazla kriterin/alternatifin bir arada kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda kriter/alternatif sayısı artarken içerisinde bulundurduğu basit algoritmanın karmaşık bir algoritmaya dönüşmesini önlemektedir. Karmaşık olmayan bir matematiksel hesaplama sahiptir. MARCOS yöntemi, TOPSIS, VIKOR ve COPRAS gibi yöntemlerde olduğu gibi hem fayda hem de maliyet kriterlerinin kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Diğer yöntemlerden farklı olarak fayda ve maliyet kriter ayrımının net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Yöntem ideal ve anti ideal çözümleri dikkate almaktadır. TOPSIS yöntemi de benzer şekilde işlemektedir ancak TOPSIS yönteminde sıralama yapılırken ideal çözüme uzaklık baz alınmaktadır. MARCOS yönteminde ise ideal ve anti ideal çözüme göre fayda katsayısı hesaplanmaktadır. MARCOS yönteminde alternatiflerin fayda derecelerinin ve fayda fonksiyonlarının değerlendirilmesinden dolayı diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha kapsamlı bir analiz yapmaktadır. Diğer yandan MARCOS yöntemi kriter ağırlıklarına karşı oldukça duyarlıdır. Yöntemde belirlenen ideal ve anti ideal değerler tahmini olarak belirlendiği için bazı durumlarda gerçekleri yansıtmayabilmektedir ([Ecer, 2020](#); [Stevic vd., 2020a](#)).

Günümüzde tüm dünyada atıkların ciddi bir sorun olarak görülmesine bağlı olarak katı atık yönetimine yönelik çalışmalara olan ilgiyi arttırmıştır. Hem ulusal hem uluslararası literatürde katı atık yönetimine ilişkin birçok çalışma yer almaktadır. ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı katı atık yönetimi çalışmalarından bazılarını aşağıda yer verilmiştir.

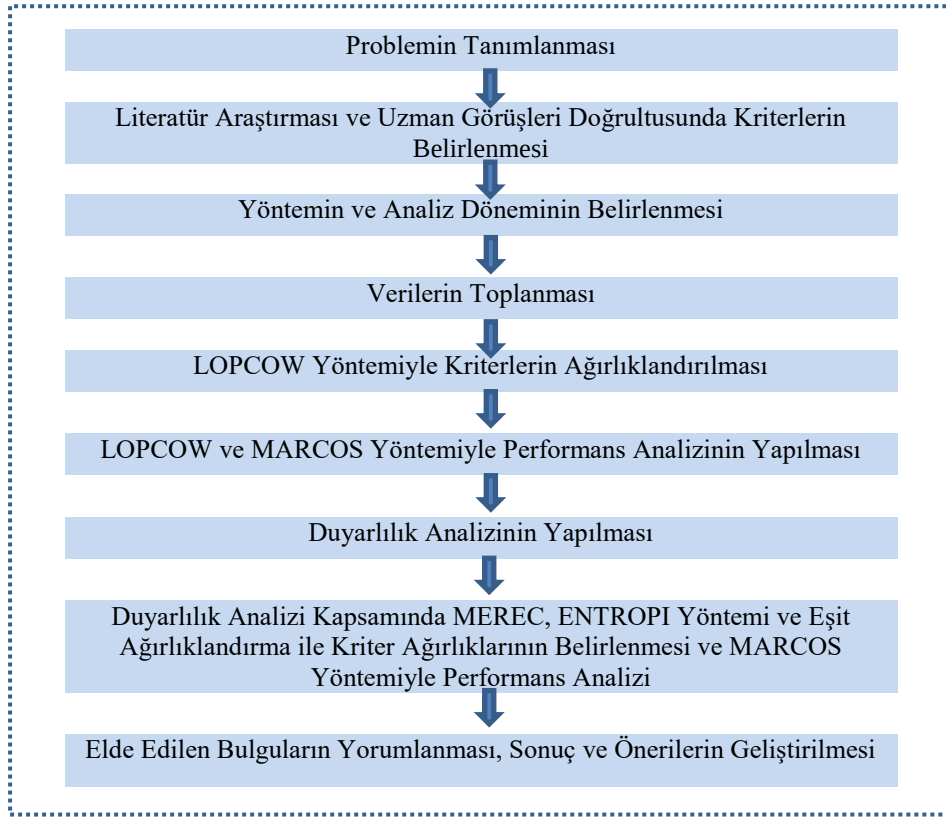
[Tseng \(2008\)](#) çalışmasında Analitik Ağ Süreci (AAS) ve DEMATEL yöntemlerini kullanarak katı atık yönetimindeki sorunlara çözüm önerilerinde bulunmuştur. [Vego vd. \(2008\)](#) çalışmalarında PROMETHEE ve GAIA yöntemlerinden yararlanarak belediyelerin katı atık yönetimini değerlendirmişlerdir. [Balaban ve Baki \(2010\)](#) Trabzon ilinin katı atık sorunlarının değerlendirilmesi için AAS yöntemini kullanarak uzman görüşleri alınarak en uygun bertaraf etme yöntemini belirlemeye çalışmışlardır. [Guerrero vd. \(2013\)](#) çalışmalarında faktör analizi kullanarak 4 kıtadan 22 ülke üzerinde atık yönetim performansını etkileyen faktörleri belirlemeye çalışmışlardır. [Zaman \(2014\)](#) Avustralya’daki Adelaide eyaletinin 2003-2010 yılları arasındaki atık yönetim performansını sıfır atık endeksini kullanarak ölçmüştür.

Parekh vd. (2015), belediyelerin katı atık yönetim sistemlerinin performanslarını Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemiyle belirlemeyi amaçlamışlardır. Demirarslan ve Başak (2018) yaptıkları çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan illerin katı atık miktarları ve yöntemlerini incelemişlerdir. Toplanan katı atık miktarının en fazla Ordu, kişi başına atık miktarının en fazla Giresun ve tıbbi atığın ise en fazla Trabzon ilinde olduğu tespit edilmiştir. Tüzüner ve Alp (2018) çalışmalarında 2006-2012 yılları içerisinde Türkiye ve AB ülkelerinin katı atık yönetim performanslarını iki farklı model kurarak Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Malmquist Endeksi ile ölçmüşlerdir. Yang vd. (2018) çalışmalarında Çin'de belediye katı atıkları yönetiminde verimliliği üç aşamalı VZA yöntemiyle değerlendirmişlerdir. Özkan (2018) çalışmasında, baskılı devre kartları içerisinde yer alan değerli metallerin geri kazanımın nasıl sağlanabileceğini AAS ve PROMETHEE yöntemleriyle değerlendirmiştir. Fores vd. (2019), çalışmalarında gelişmekte olan ülkelerde belediye katı atık yönetim sistemlerinin sosyal performanslarını değerlendirmişler ve çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. Bahçelioğlu vd. (2020), Orta Doğu Teknik Üniversitesi kampüsü için entegre katı atık yönetimini destekleyecek sürdürülebilir stratejiler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Şaşmaz vd. (2020) çalışmalarında Türkiye'deki Düzey 1 bölgelerine ait belediyelerin katı atık yönetimindeki etkinliklerini üç farklı VZA yöntemiyle (Girdi yönelimli, Çıktı yönelimli ve Süper Etkinlik) incelemişler, ardından elde ettikleri sonuçları TOPSIS yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Venkiteela (2020), çalışmasında Tirupati şehrinin katı atık gelişimini incelemiş, katı atık yöntemlerinin seçimini ve bu atıkların arıtılması için farklı seçenekleri araştırmıştır. Alshehrei ve Ameen (2021) çalışmalarında katı organik atıkların azaltılmasında solucan gübrelemesinin bir yöntem aracı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Aydın Temel ve Turan (2022) çalışmalarında, TÜİK verilerinde yola çıkarak Giresun merkez ilçede kentsel katı atıkların kompozisyonunu "İşlem Görmemiş Kentsel Katı Atıkların Kompozisyonunun Belirlenmesinde Kullanılan Standart Test" yöntemiyle incelemişlerdir. Yapılan araştırma sonucunda, katı atık geri dönüşümün, potansiyelinin çok altında bir geri dönüşüm sağlandığı ifade edilmiştir. Evin ve Özdemir (2022), çalışmalarında 30 büyükşehirin katı atık yönetiminin etkinliğini iki girdi ve iki çıktı değişkeni kullanarak VZA ile değerlendirmişlerdir. Saraç vd. (2023), Türkiye'deki 30 büyükşehirin sıfır atık yönetim etkinliğini 3 girdi ve 2 çıktı kullanarak VZA ile incelemişlerdir. Seyhan (2023), çalışmasında 2017-2019 yılları içerisinde AB üyesi ülkelerin atık yönetim performanslarını VZA ve Yapay Sinir Ağları yöntemleriyle incelemiştir. Doğdu Yüce Türk ve Alkan (2024), Türkiye'nin 7 bölgesinde en kalabalık olan yedi il için kötümser ve iyimser iki senaryoya göre 2035 yılı için sıfır atık indeksi değerlerini hesaplamışlardır. Derse ve Göçmen Polat (2025), Tunceli'nin 8 ilçesini dikkate alarak Bulanık AHS ve TOPSIS yöntemleriyle en uygun belediye katı atık depo yer seçimi yapmışlar ve Tunceli il merkezini en uygun düzenli katı atık tesis yeri olarak belirlemişlerdir. Iqbal vd. (2025) çalışmalarında atık sektöründe kamu harcamalarını azaltmak ve ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla bir atık yönetim modeli önerisinde bulunmuşlardır. Susanti vd. (2025), Pangkalpinang şehrinde sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesini desteklemek için döngüsel ekonomiye dayalı bir atık yönetim stratejisini AHS yöntemiyle incelemişlerdir. Yazdani vd. (2025) çalışmalarında atık bertaraf tesisleri için en uygun yer seçimini belirlemek için AHS ve CoCoSo yöntemini kullanarak öneride bulunmuşlardır. Anwar vd. (2025), Endonezya'daki çok katmanlı plastik atık yönetiminin sürdürülebilirliğini araştırmak amacıyla Çok Yönlü Sürdürülebilirlik Analizi yöntemini kullanmışlardır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, analizde kullanılan ÇKKV yöntemlerine ilişkin uygulama adımlarına, çalışmada kullanılan verilere ilişkin bilgilere, performans analizine, elde edilen sonuçlara, duyarlılık analizine ve son olarak sonuç ve öneriler kısmına yer verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın bu kısmında Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisindeki katı atık performansını değerlendirmek için LOPCOW, MARCOS ve duyarlılık analizi kapsamında kullanılan MEREK ve ENTROPI yöntemine ilişkin teorik açıklamalara yer verilmiştir. Analizde yapılan literatür araştırması ve Giresun Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nde yetkili kişilerle yapılan görüşmeler sonucunda 14 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin ağırlıklarını belirlemek amacıyla literatürde diğer objektif ağırlıklandırma yöntemlerine göre oldukça yeni olan LOPCOW yöntemi kullanılmıştır. Hesaplanan bu kriter ağırlıkları diğer ÇKKV yöntemlerine göre oldukça yeni olan ve literatürde diğer yöntemlere göre kullanılma sıklığının az olduğu MARCOS yöntemine entegre edilerek belirlenen dönemler içerisinde Giresun ilinin atık performansı ölçülmüştür. Diğer yandan LOPCOW ve MARCOS yöntemleriyle elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda sıralama yönteminin etkisini ölçmek amacıyla MEREK, ENTROPI yöntemi ve Eşit Ağırlıklandırma MARCOS yöntemine entegre edilerek analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada izlenen yol Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Çalışmada izlenen yöntemin iş akışı

2.1. LOPCOW Yöntemi

Yüzde Değişimine Dayalı Objektif Ağırlıklandırma (Logarithmic Percentage Change-driven Objective Weighting – LOPCOW) yöntemi 2022 yılında [Ecer ve Pamucar \(2022\)](#) tarafından literatüre kazandırılmıştır. LOPCOW yönteminin kendine özgü algoritması sayesinde, diğer objektif ağırlıklandırma yöntemlerine göre kriter ağırlıkları arasında büyük farklılıklar oluşmasını önlemektedir. Diğer bir ifadeyle kriterler ağırlıkları nispeten eşit dağılım göstermektedir. Bazı Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri yalnızca pozitif kriter değerlerinin çözümüne imkân vermektedir. Ancak LOPCOW yönteminde kriterler pozitif veya negatif değerler alabilmektedir. Aynı zamanda LOPCOW yönteminde kriter sınırlaması yoktur. Hem fayda hem de maliyet kriterleri için uygun çözümler sunmaktadır. Çok sayıda kriter ve alternatifle verimli bir şekilde çalışabilmektedir. LOPCOW yönteminin aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir ([Ecer & Pamucar, 2022; Biswas vd., 2022](#)):

1. Adım: m alternatif ve n kriterden oluşan başlangıç karar matrisi Eşitlik (1)'deki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (1)$$

2. Adım: Doğrusal max-min tipi normalizasyon tekniği kullanılarak karar matrisinde yer alan maliyet (M) yönlü kriterler diğer bir ifadeyle minimum yönlü kriterler Eşitlik (2), Fayda (F) yönlü diğer bir ifadeyle maksimum yönlü kriterleri Eşitlik (3) yardımıyla hesaplanarak normalize karar matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{x_{max} - x_{ij}}{x_{max} - x_{min}} \quad , \quad j \in M \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad , \quad j \in F \quad (3)$$

3. Adım: Her bir kriter için yüzde değerleri olan PV_{ij} Eşitlik (4) yardımıyla hesaplanır. Bu adımda, her bir kriterin standart sapmalarının yüzdesi olarak ortalama kare değeri, verilerin büyüklüğünden kaynaklanan farkı (boşluğu) ortadan kaldıracak ölçüde hesaplanır.

$$PV_{ij} = \left| \ln \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}{m}}}{\sigma} \right) \right| \cdot 100 \quad (4)$$

Burada σ , standart sapmayı ve m ise alternatif sayısını göstermektedir.

4. Adım: Son olarak her bir kriter için ağırlık değerleri (w_j) Eşitlik (5)'teki gibi hesaplanır.

$$w_j = \frac{PV_{ij}}{\sum_{i=1}^n PV_{ij}} \quad (5)$$

Burada kriter ağırlıkları toplamının 1'e eşit olması gerekmektedir.

2.2. MEREC Yöntemi

MEREC yöntemi (Method based on the Removal Effects of Criteria – Kriterlerin Çıkarılma Etkilerine Dayalı), 2021 yılında [Keshavarz-Ghorabae vd. \(2021\)](#) tarafından geliştirilmiştir. MEREC yönteminde kullanılan kriterlerden biri çıkarıldığında, geriye kalan kriterlerin alternatiflerin performansına etkisi dikkate alınmaktadır. Burada amaç, alternatiflerin genel performansı üzerinde en fazla etkiye sahip olan kriteri tespit etmek ve bu kritere en büyük ağırlığı atamaktır. MEREC yönteminde alternatiflerin performansını ölçmek için bir logaritmik fonksiyon kullanılmaktadır. MEREC yönteminin uygulama aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir ([Keshavarz-Ghorabae vd., 2021](#); [Aytekin, 2022](#)).

1. Adım: İlk olarak Eşitlik (6)'daki gibi başlangıç karar matrisi oluşturulur. $i = 1, 2, \dots, n$ alternatifleri, $j = 1, 2, \dots, m$ kriterleri ve x_{ij} kara matrisinin elemanlarını göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Burada her bir x_{ij} elemanlarının sıfırdan büyük yani pozitif olması gerekmektedir. Eğer x_{ij} negatif değer almış ise gerekli dönüşümler yapılarak pozitif hale getirilir.

2. Adım: Bu adımda başlangıç karar matrisindeki elemanlar kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Fayda kriterleri (F) için Eşitlik (7), maliyet kriterleri (M) için Eşitlik (8) kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilir.

$$n_{ij}^x = \begin{cases} \frac{\min_k x_{kj}}{x_{ij}}, & j \in F \end{cases} \quad (7)$$

$$n_{ij}^x = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max_k x_{kj}}, & j \in M \end{cases} \quad (8)$$

3. Adım: Burada logaritmik bir fonksiyon kullanılarak alternatiflerin genel performans değerleri Eşitlik (9)'daki gibi hesaplanır.

$$S_i = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^x)| \right) \right) \quad (9)$$

4. Adım: Burada her bir adımda bir kriteri problemten çıkarılarak alternatiflerin genel performans değerleri Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanır.

$$S'_{ij} = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^x)| \right) \right) \quad (10)$$

5. Adım: Kriterlerin problemde çıkarılma etkisini gösteren E_j değerleri Eşitlik (11)'deki gibi hesaplanır.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (11)$$

6. Adım: Son adımda kriter ağırlıklarını gösteren w_j değerleri Eşitlik (12)'deki gibi hesaplanır.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad (12)$$

2.3. ENTROPI Yöntemi

Entropi, termodinamiğin temel kavramları içinde yer alan kavramlardan biridir. Bu kavramı 1948 yılında Shannon tarafından Matematiğin İletişim Kuramı içerisinde ifade edilmiş ve bu kuramda entropi kavramı belirsizliğin bir ölçüsü olarak kullanılmıştır (Wang & Zhan, 2012; Wang & Lee, 2009). Shannon'un belirttiği entropi kavramını dikkate alarak Wang ve Lee 2009 yılında Entropi ağırlıklandırma yöntemini geliştirmişlerdir. Entropi yönteminde, kriterler içerisindeki düzensizlikler göz önünde bulundurularak ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Entropi yöntemine ilişkin uygulama aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir (Wang & Lee, 2009; Aytekin, 2022).

1. Adım: İlk olarak Eşitlik (13)'teki gibi $m \times n$ boyutunda X karar matrisi oluşturulur. Burada x_{ij} , i 'nci alternatifin j 'inci kriterine göre değerini göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

2. Adım: Eşitlik (13)'deki karar matrisi kullanılarak Eşitlik (14) yardımıyla normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (14)$$

3. Adım: E_j ile gösterilen Entropi değerleri Eşitlik (15) kullanılarak hesaplanır.

$$E_j = \frac{-(\sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij})}{\ln(m)} \quad (15)$$

Burada E_j değerinin 0-1 arasında bir değer alması gerekmektedir.

4. Adım: Bu adımda kriter ağırlıklarını gösteren w_j değerleri Eşitlik (16) kullanılarak hesaplanır.

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (16)$$

2.4. MARCOS Yöntemi

İngilizce Measurement of Alternatives and Ranking According to COMpromise Solution olan, Türkçeye Uzlaşık Çözüme Göre Alternatifleri Değerlendirme ve Sıralama olarak çevrilen ve MARCOS olarak adlandırılan bu yöntem Stevic vd. tarafından 2020 yılında ÇKKV literatürüne kazandırılmıştır. MARCOS yönteminin temelini, alternatifler ve referans değerler (ideal ve anti - ideal alternatifler) arasındaki ilişkinin tanımlanması oluşturmaktadır. Tanımlanan ilişkilerde, alternatiflerin fayda fonksiyonları belirlenir, ideal ve anti-ideal çözümlere göre uzlaşma sıralaması yapılır. Karar tercihleri fayda fonksiyonları temelinde tanımlanmaktadır. Fayda fonksiyonları, bir alternatifin ideal ve anti- ideal bir çözüme göre konumunu temsil etmektedir. En iyi alternatif, ideal çözüm noktasına en yakın ve bununla birlikte anti- ideal çözüm noktasına en uzak olan alternatiftir. MARCOS yönteminde kriterlerin ağırlıkları performansın belirlenmesinde oldukça önemlidir çünkü performans sıralamasında hatalı sonuçlar elde edilebilir. Diğer yandan genişletilmiş karar matrisi oluşturulurken ideal ve anti ideal olmak üzere iki yapay alternatif vektörü eklenmektedir.

Dolayısıyla bu durum gerçeği yansıtmayabilmektedir. Kriterin maliyet mi yoksa fayda kriteri mi olduğunun doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. MARCOS yönteminin aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir (Stevic vd., 2020b):

1. Adım: İlk olarak m alternatif ve n kriterden oluşan başlangıç karar matrisi Eşitlik (17)'deki gibi oluşturulur.

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

2. Adım: Karar matrisine ideal (AI) ve anti-ideal (AAI) çözümler tanımlanarak Eşitlik (18) yardımıyla genişletilmiş karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} AAI \\ A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \\ AI \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{aa1} & x_{aa2} & \dots & x_{aan} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \\ x_{ai1} & x_{ai2} & \dots & x_{ain} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

Anti-ideal çözüm (AAI) en kötü alternatif iken ideal çözüm (AI) en iyi özelliğe sahip alternatif iken ideal çözüm (AI) en iyi özelliğe sahip alternatiftir. Kriterlerin niteliğine bağlı olarak AAI Eşitlik (19), AI Eşitlik (20)'deki gibi belirlenir.

$$AAI = \min_i x_{ij} \quad \text{eğer } j \in F \text{ ve } \max_i x_{ij} \quad j \in M \quad (19)$$

$$AI = \max_i x_{ij} \quad \text{eğer } j \in F \text{ ve } \min_i x_{ij} \quad j \in M \quad (20)$$

Burada F fayda kriterlerini, M maliyet kriterlerini temsil etmektedir.

3. Adım: Genişletilmiş karar matrisi (X) normalize edilir. Normalize işleminin yapıldığı $N = [n_{ij}]_{m \times n}$ matrisinin elemanları Eşitlik (21) ve Eşitlik (22) kullanılarak elde edilir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ai}} \quad \text{eğer } j \in F \quad (21)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ai}}{x_{ij}} \quad \text{eğer } j \in M \quad (22)$$

4. Adım: Bu adımda genişletilmiş normalize edilmiş karar matrisi N 'nin elemanları ile kriterlerin önem ağırlıklarının yer aldığı ağırlık matrisi $V = [v_{ij}]_{m \times n}$ Eşitlik (23)'teki gibi çarpılarak genişletilmiş karar matrisi ağırlıklandırılır.

$$v_{ij} = n_{ij} \times w_j \quad (23)$$

5. Adım: Alternatiflerin fayda değerini gösteren K_i değerleri hesaplanır. Alternatiflerin ideal çözüme göre fayda dereceleri K_i^+ , Eşitlik (24), anti-ideal çözüme göre fayda dereceleri K_i^- , Eşitlik (25) yardımıyla hesaplanır.

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (24)$$

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad (25)$$

Burada S_i değerleri, Eşitlik (26)'da gösterilen ağırlıklandırılmış karar matrisinin elemanlarının toplamından oluşmaktadır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (26)$$

6. Adım: Bu adımda alternatiflerin fayda fonksiyonları $f(K_i)$ 'ler belirlenir. İdeal ve anti-ideal çözüm değerleri kullanılarak Eşitlik (27)'deki gibi fayda fonksiyonları hesaplanır.

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (27)$$

Burada $f(K_i^+)$, ideal çözüme göre fayda fonksiyonunu göstermekte olup Eşitlik (28) yardımıyla, $f(K_i^-)$ ise anti-ideal çözüme göre fayda fonksiyonunu göstermekte olup Eşitlik (29) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (28)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (29)$$

7. Adım: Son aşamada ise fayda fonksiyon değeri $f(K_i)$ 'lere göre alternatifleri sıralanır. En yüksek $f(K_i)$ değerine sahip alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

2.5. Kullanılan Veriler

Bu çalışmada Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisindeki katı atık kapsamında performansını ölçmek amacıyla 14 kriter kullanılmıştır. Söz konusu bu kriterler Giresun Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nde atık birinde çalışan yetkili kişilerle yapılan görüşmeler ve literatür araştırmasından yola çıkılarak belirlenmiştir. Yetkilerle yapılan görüşmelerde ikincil veri olarak sistemde hangi verilerin olduğu ve hangi verilere ulaşılabileceği sorulmuş olup, herhangi bir sübjektif değerlendirme yapılmamıştır. Kullanılan kriterler; “K₁: İl Nüfusu (Kişi)”; “K₂: Toplam Katı Atık Geri Kazanım ve Bertaraf Miktarı (Kg)”; K₃: Toplam Atık İşletme Tesisi Sayısı (Adet)”; “K₄: Sıfır Atık Kapsamında İl Genelinde Eğitim Alan Kişi Sayısı (Kişi)”; “K₅: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Geri Dönüşüm Miktarı (Kg)”; “K₆: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Kumbara Sayısı (Adet)”; “K₇: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Konteyner Sayısı (Adet)”; “K₈: Sıfır Atık Kapsamında Elde Edilen Kompost Miktarı (Kg)”; “K₉: Sıfır Atık Kapsamında Yapılan Enerji Tasarufu (Kwh)”; “K₁₀: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Atık Depolama Alanı Tasarrufu (m³)”; “K₁₁: Toplam Katı Atık Miktarı (Ton/gün)”; “K₁₂: Kişi Başı Ortalama Belediye Katı Atık Miktarı (Kg/kişi-gün)”; “K₁₃: Tıbbi Atık Miktarı (Ton)”; “K₁₄: Atık Pil ve Akü Miktarı (Kg)” şeklinde sıralanmaktadır. Çalışmada bu kriterler kullanılarak Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisindeki katı atık performansı ölçülmüştür. Belirlenmiş olan kriterlerden K₁ kriterine ilişkin veri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) veri tabanından elde edilmiş, diğer bütün kriterlere ilişkin verileri ise Giresun Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan bütün veriler ikincil veri olmasından dolayı herhangi bir etik kurul kararına ihtiyaç duyulmamıştır. Analizlerde kullanılacak olan verilere ilişkin başlangıç karar matrisi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Başlangıç karar matrisi

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
2018	453912	1740511	3	776	198037	513	5	11	836198	496	637,79	1,17	483	8978
2019	448400	3085199	3	17376	878299	2878	138	3	3729026	2176	630,04	1,13	502	40533
2020	448721	1609631	4	14463	599167	1186	287	578	2513149	1440	630,49	1,02	668	24457
2021	450154	5471689	9	25775	2986909	1848	545	916	12823185	7366	632,51	0,80	758	5279
2022	450862	4886151	9	4769	1733770	418	1651	11	6784826	4244	670,1	0,96	686	14298
2023	461712	6411319	14	1847	1628451	268	64	30	6769638	3943	833,26	1,18	554	29929

Tablo 1'de gösterilen başlangıç karar matrisindeki 14 kritere ilişkin değerler incelendiğinde yıllar içerisinde bazı kriterlerde ciddi farklılıkların olduğu görülmektedir. 2018 yılında uygulamaya konulmuş olan Sıfır Atık Yönetmeliği kapsamı çerçevesinde sonraki yıllarda ciddi artışları beraberinde getirmiştir. Alınan politik kararlar özellikle 2021 yılı ve sonrasında kriterlerin artış göstermesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle “K₄: Sıfır Atık Kapsamında İl Genelinde Eğitim Alan Kişi Sayısı (Kişi)”; “K₆: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Kumbara Sayısı (Adet)” ve “K₇: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Konteyner Sayısı (Adet)” kriterlerinde 2021 yılında ciddi artışlar yaşanmıştır. Bu artışların yerel yönetimin başarısında ziyade alınan politik kararlardan kaynaklandığı söylenebilir. Ancak 2021 yılındaki bu artış 2022 ve 2023 yılında sürdürülememiştir. Artışlarda sürekliliğin sağlanamaması alınan yasal ve politik kararların yeteri kadar uygulanmadığını göstermektedir.

Bu çalışmada yasal ve politik kararlar birer dışsal faktör olarak değerlendirilmiş ancak analizde kullanılmamıştır. Kullanılan kriterlere ilişkin yıllar içerisindeki ciddi farkların olması nedeniyle aykırı değerlerin olup olmadığını tespit etmek amacıyla z-skor normalizasyonu kullanılmıştır. Kriterlere ilişkin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma, değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Kriterlerin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma, değerleri

	Min	Max	Ortalama	Standart Sapma
K ₁	448400	461712	452293,50	5017,50
K ₂	1609631	6411319	3867416,67	2015744,86
K ₃	3	14	7	4,43
K ₄	776	25775	10834,33	9979,12
K ₅	198037	2986909	1337438,83	1001659,58
K ₆	268	2878	1185,17	1018,49
K ₇	5	1651	448,33	620,06
K ₈	3	916	258,17	393,55
K ₉	836198	12823185	5576003,67	4258305,17
K ₁₀	496	7366	3277,50	2466,55
K ₁₁	630,04	833,26	672,37	80,28
K ₁₂	0,8	1,18	1,04	0,15
K ₁₃	483	758	608,50	111,32
K ₁₄	5279	40533	20579	13481,45

Z-skor normalizasyonu Eşitlik (30) yardımıyla hesaplanmaktadır. Skor aralığı ± 2 aralığındaki değerler genelde normal olarak ifade edilmekte olup, %97,7’lik yüzdelik dilime karşılık gelmektedir (Curtis vd., 2016; Chubb & Simpson, 2012).

$$Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (30)$$

Burada x = gözlemlenen gerçek değeri, μ = ortalama değeri ve σ = standart sapmayı göstermektedir. Eşitlik (30) kullanılarak z-skor değerleri hesaplanmış ve Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3: Kriterlerin z-skor değerleri

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
2018	0,32	-1,06	-0,99	-1,01	-1,14	-0,66	-0,71	-0,63	-1,11	-1,13	-0,43	0,87	-1,13	-0,86
2019	-0,78	-0,39	-0,99	0,66	-0,46	1,66	-0,50	-0,65	-0,43	-0,45	-0,53	0,60	-0,96	1,48
2020	-0,71	-1,12	-0,74	0,36	-0,74	0,00	-0,26	0,81	-0,72	-0,74	-0,52	-0,13	0,53	0,29
2021	-0,43	0,80	0,49	1,50	1,65	0,65	0,16	1,67	1,70	1,66	-0,50	-1,60	1,34	-1,13
2022	-0,29	0,51	0,49	-0,61	0,40	-0,75	1,94	-0,63	0,28	0,39	-0,03	-0,53	0,70	-0,47
2023	1,88	1,26	1,73	-0,90	0,29	-0,90	-0,62	-0,58	0,28	0,27	2,00	0,93	-0,49	0,69

Tablo 3’te kriterlerin z-skor değerleri incelendiğinde bütün kriterlerin ± 2 aralığında olduğu, K₁₁ kriterinin 2023 yılında tam sınırdaki kaldığı görülmektedir. Kriterlerin gerçek değerleri arasında yıllar içerisinde ciddi farklılıklar görülmesine rağmen aykırı değer aralıkları normal olarak kabul edilmektedir.

Çalışmada kullanılan K₁₁, K₁₂, K₁₃ ve K₁₄ kriterleri maliyet (minimum) yönlü diğer bütün kriterler ise fayda (maksimum) yönlü olarak alınmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada kriterlerin yönü belirlenirken kriterlerin amacına göre değerlendirilmesi gerekmektedir. K₁₁ (toplam katı atık miktarı) kriteri, sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi, çevre açısından olumsuzlukların giderilebilmesi ve verimlilik için minimum seviyede tutulması gerekmektedir. K₁₂ (kişi başına ortalama belediye atık miktarı) kriteri, çevresel performans açısından düşük olması istenir. Çünkü bu kriterin düşük olması kaynakların verimli kullanıldığının ve israfın en düşük seviyede olduğunun bir göstergesidir. K₁₃ (tıbbi atık miktarı) ve K₁₄ (atık pil ve akü miktarı), insan sağlığı çevresel etkiler bakımında oldukça riskli atıklardır. Dolayısıyla bu atıkların minimum seviyede olması istenen durumdur. Diğer bütün kriterlerin ise atık performansı açısından yüksek olması istendiğinden maksimum olarak alınmıştır.

3. Analiz ve Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde söz konusu yöntemler kullanılarak elde edilen analiz bulguları ve bu bulguları gösteren tablolara yer verilmiştir. Çalışmada ilk olarak LOPCOW yöntemi kullanılarak 14 kriterin ağırlıkları belirlenmiştir. Analizin ilk adımında Tablo 1’de verilmiş olan başlangıç karar matrisi Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen normalize karar matrisi Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4: Normalize edilmiş karar matrisi

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
2018	0,4141	0,0273	0,0000	0,0000	0,0000	0,0939	0,0000	0,0088	0,0000	0,0000	0,9619	0,0263	1,0000	0,8951
2019	0,0000	0,3073	0,0000	0,6640	0,2439	1,0000	0,0808	0,0000	0,2413	0,2445	1,0000	0,1316	0,9309	0,0000
2020	0,0241	0,0000	0,0909	0,5475	0,1438	0,3517	0,1713	0,6298	0,1399	0,1374	0,9978	0,4211	0,3273	0,4560
2021	0,1318	0,8043	0,5455	1,0000	1,0000	0,6054	0,3281	1,0000	1,0000	1,0000	0,9878	1,0000	0,0000	1,0000
2022	0,1849	0,6824	0,5455	0,1597	0,5507	0,0575	1,0000	0,0088	0,4963	0,5456	0,8029	0,5789	0,2618	0,7442
2023	1,0000	1,0000	1,0000	0,0428	0,5129	0,0000	0,0358	0,0296	0,4950	0,5017	0,0000	0,0000	0,7418	0,3008

Normalize edilmiş karar matrisi dikkate alınarak Eşitlik (4) kullanılarak her bir kriter için yüzde değerlerini gösteren PV_{ij} değerleri, Eşitlik (5) kullanılarak kriter ağırlıklarını gösteren w_j değerleri hesaplanmış ve Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5: PV_{ij} ve w_j değerleri

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
PV_{ij}	18,075	36,808	25,028	30,740	37,742	24,865	14,803	11,306	36,432	37,216	78,954	26,255	48,481	55,330
w_j	0,0375	0,0764	0,0519	0,0638	0,0783	0,0516	0,0307	0,0235	0,0756	0,0772	0,1638	0,0545	0,1006	0,1148
Sıra	12	6	10	8	4	11	13	14	7	5	1	9	3	2

Tablo 5’te de görüldüğü üzere LOPCOW yöntemine göre yapılan analiz sonucunda en önemli kriterin 0,16379 skoru ile “K₁₁: Toplam Katı Atık Miktarı (Ton/gün)” kriteri olduğu tespit edilmiştir. Bu kriteri sırasıyla: “K₁₄: Atık Pil ve Akü Miktarı (Kg)”; “K₁₃: Tıbbi Atık Miktarı (Ton)”; “K₅: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Geri Dönüşüm Miktarı (Kg)”; “K₁₀: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Atık Depolama Alanı Tasarrufu (m³)”; “K₂: Toplam Katı Atık Geri Kazanım ve Bertaraf Miktarı (Kg)”; “K₉: Sıfır Atık Kapsamında Yapılan Enerji Tasarrufu (Khw)”; “K₄: Sıfır Atık Kapsamında İl Geneline Eğitim Alan Kişi Sayısı (Kişi)”; “K₁₂: Kişi Başı Ortalama Belediye Katı Atık Miktarı (Kg/kişi-gün)”; “K₃: Toplam Atık İşletme Tesisi Sayısı (Adet)”; “K₆: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Kumbara Sayısı (Adet)”; “K₁: İl Nüfusu (Kişi)”; “K₇: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Konteyner Sayısı (Adet)” ve “K₈: Sıfır Atık Kapsamında Elde Edilen Kompost Miktarı (Kg)” kriteri izlemektedir.

Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra MARCOS yöntemi kullanılarak Giresun ilinin 2018-2023 dönemi için katı atık yöntemine ilişkin performans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de verilmiş olan başlangıç karar matrisi dikkate alınarak Eşitlik (18), (19) ve (20) kullanılarak genişletilmiş karar matrisi hesaplanmış ve Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6: Genişletilmiş karar matrisi

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
AAI	448400	1609631	3	776	198037	268	5	3	836198	496	833,26	1,18	758	40533
2018	453912	1740511	3	776	198037	513	5	11	836198	496	637,79	1,17	483	8978
2019	448400	3085199	3	17376	878299	2878	138	3	3729026	2176	630,04	1,13	502	40533
2020	448721	1609631	4	14463	599167	1186	287	578	2513149	1440	630,49	1,02	668	24457
2021	450154	5471689	9	25775	2986909	1848	545	916	12823185	7366	632,51	0,8	758	5279
2022	450862	4886151	9	4769	1733770	418	1651	11	6784826	4244	670,1	0,96	686	14298
2023	461712	6411319	14	1847	1628451	268	64	30	6769638	3943	833,26	1,18	554	29929
AI	461712	6411319	14	25775	2986909	2878	1651	916	12823185	7366	630,04	0,8	483	5279

Genişletilmiş karar matrisi hesaplandıktan sonra Eşitlik (21) ve (22) kullanılarak genişletilmiş normalize karar matrisi hesaplanmış ve Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7: Genişletilmiş normalize karar matrisi

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
AAI	0,9712	0,2511	0,2143	0,0301	0,0663	0,0931	0,0030	0,0033	0,0652	0,0673	0,7561	0,6780	0,6372	0,1302
2018	0,9831	0,2715	0,2143	0,0301	0,0663	0,1782	0,0030	0,0120	0,0652	0,0673	0,9878	0,6838	1,0000	0,5880
2019	0,9712	0,4812	0,2143	0,6741	0,2940	1,0000	0,0836	0,0033	0,2908	0,2954	1,0000	0,7080	0,9622	0,1302
2020	0,9719	0,2511	0,2857	0,5611	0,2006	0,4121	0,1738	0,6310	0,1960	0,1955	0,9993	0,7843	0,7231	0,2158
2021	0,9750	0,8534	0,6429	1,0000	1,0000	0,6421	0,3301	1,0000	1,0000	1,0000	0,9961	1,0000	0,6372	1,0000
2022	0,9765	0,7621	0,6429	0,1850	0,5805	0,1452	1,0000	0,0120	0,5291	0,5762	0,9402	0,8333	0,7041	0,3692
2023	1,0000	1,0000	1,0000	0,0717	0,5452	0,0931	0,0388	0,0328	0,5279	0,5353	0,7561	0,6780	0,8718	0,1764
AI	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

LOPCOW yöntemiyle hesaplanmış olan kriter ağırlıkları Eşitlik (23) kullanılarak genişletilmiş normalize karar matrisi ağırlıklandırılmış ve elde edilen veriler Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8: Genişletilmiş normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₁₄
AAI	0,0364	0,0192	0,0111	0,0019	0,0052	0,0048	0,0001	0,0001	0,0049	0,0052	0,1238	0,0369	0,0641	0,0149
2018	0,0369	0,0207	0,0111	0,0019	0,0052	0,0092	0,0001	0,0003	0,0049	0,0052	0,1618	0,0372	0,1006	0,0675
2019	0,0364	0,0367	0,0111	0,0430	0,0230	0,0516	0,0026	0,0001	0,0220	0,0228	0,1638	0,0386	0,0968	0,0149
2020	0,0364	0,0192	0,0148	0,0358	0,0157	0,0213	0,0053	0,0148	0,0148	0,0151	0,1637	0,0427	0,0727	0,0248
2021	0,0366	0,0652	0,0334	0,0638	0,0783	0,0331	0,0101	0,0235	0,0756	0,0772	0,1632	0,0545	0,0641	0,1148
2022	0,0366	0,0582	0,0334	0,0118	0,0454	0,0075	0,0307	0,0003	0,0400	0,0445	0,1540	0,0454	0,0708	0,0424
2023	0,0375	0,0764	0,0519	0,0046	0,0427	0,0048	0,0012	0,0008	0,0399	0,0413	0,1238	0,0369	0,0877	0,0202
AI	0,0375	0,0764	0,0519	0,0638	0,0783	0,0516	0,0307	0,0235	0,0756	0,0772	0,1638	0,0545	0,1006	0,1148

Geniştirilmiş normalize karar matrisi ağırlıklandırıldıktan sonra Eşitlik (24) kullanılarak K_i^+ , Eşitlik (25) kullanılarak K_i^- ve Eşitlik (26) kullanılarak S_i değerleri hesaplanmıştır. Ardından son olarak Eşitlik (27), (28) ve (29) kullanılarak $f(K_i)$ değerleri hesaplanmış ve bu değerlere göre performans sıralaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9: Hesaplanan S_i , K_i^+ , K_i^- , $f(K_i)$ değerleri ve performans sıralaması

	S_i	K_i^-	K_i^+	$f(K_i)$	Sıralama
AAI	0,32873	---	---	---	---
2018	0,46264	1,40734	0,46264	0,42784	6
2019	0,56339	1,71380	0,56339	0,52101	4
2020	0,49713	1,51226	0,49713	0,45974	5
2021	0,89317	2,71698	0,89317	0,82599	1
2022	0,62098	1,88899	0,62098	0,57427	2
2023	0,56973	1,73311	0,56973	0,52688	3
AI	1,00000	---	---	---	---

Tablo 9'da de görüldüğü gibi en yüksek fayda fonksiyon değerine sahip olan yılın 2021 yılı olduğu görülmektedir. 2021 yılını sırasıyla; 0.57427 fayda fonksiyon değeri ile 2022, 0.52688 fayda fonksiyon değeri ile 2023, 0.52101 fayda fonksiyon değeri ile 2019, 0.45974 fayda fonksiyon değeri ile 2020 ve 0.42784 fayda fonksiyon değeri ile 2018 yılı takip etmiştir. Analizler sonucunda 2021 yılına kadar olumlu gelişmeler göstermiş iken, 2021 yılından sonra performanslarda gerilemeler olduğu görülmüştür.

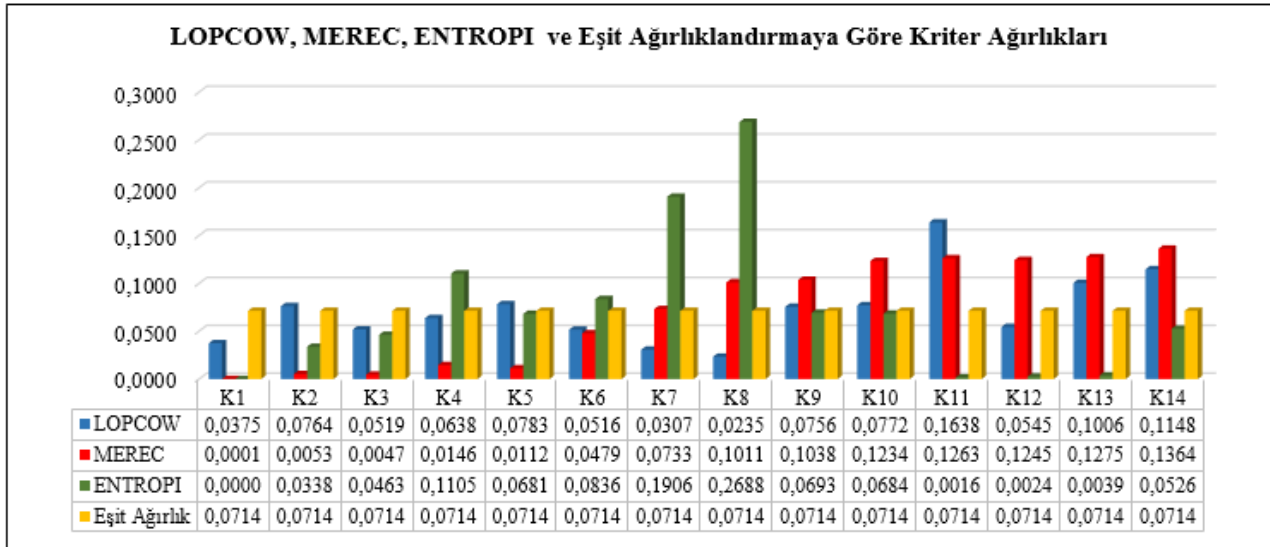
3.1. Duyarlılık Analizi

Bütünleşik LOPCOW ve MARCOS yönteminin kullanılması sonucunda elde edilen performans sonuçların, farklı kriter ağırlıklandırma yöntemlerin uygulanması durumunda sonuçları nasıl etkileyeceğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu kapsamda LOPCOW yöntemi gibi objektif ağırlıklandırma yöntemleri içerisinde yer alan MEREC ve ENTROPI yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca kriterlerin eşit ağırlıklı olması durumunda performansın nasıl değişeceğini görmek amacıyla kriterleri Eşit Ağırlıklandırma ile de çözülerek performanslar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 10'da ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo 10: LOPCOW, MEREC, ENTROPI ve eşit ağırlıklandırmaya göre kriter ağırlıkları

	LOPCOW	Sıra	MEREC	Sıra	ENTROPI	Sıra
K_1	0,03750	12	0,00007	14	0,00001	14
K_2	0,07636	6	0,00527	12	0,03379	10
K_3	0,05192	10	0,00466	13	0,04630	9
K_4	0,06377	8	0,01456	10	0,11045	3
K_5	0,07830	4	0,01125	11	0,06814	7
K_6	0,05158	11	0,04786	9	0,08362	4
K_7	0,03071	13	0,07326	8	0,19062	2
K_8	0,02345	14	0,10110	7	0,26878	1
K_9	0,07558	7	0,10383	6	0,06930	5
K_{10}	0,07721	5	0,12344	5	0,06843	6
K_{11}	0,16379	1	0,12632	3	0,00158	13
K_{12}	0,05447	9	0,12449	4	0,00243	12
K_{13}	0,10058	3	0,12751	2	0,00393	11
K_{14}	0,11478	2	0,13639	1	0,05262	8

Tablo 10'da görüldüğü gibi LOPCOW yöntemine göre en önemli kriter " K_{11} : Toplam Katı Atık Miktarı (Ton/gün)", MEREC yöntemine göre en önemli kriter " K_{14} : Atık Pil ve Akü miktarı (Kg)", ENTROPI yöntemine göre en önemli kriter ise " K_8 : Sıfır Atık Kapsamında Elde Edilen Kompost Miktarı (Kg)" kriteri olmuştur.



Şekil 3: LOPCOW, MEREC, ENTROPI ve Eşit Ağırlıklandırmaya göre kriter ağırlıkları

Ağırlıklandırma yöntemlerin sonuçlar değerlendirildiğinde, LOPCOW yöntemi K₁₁, K₁₄ ve K₁₃ kriterlerine diğer kriterlere göre yüksek ağırlık değerleri atamıştır. MEREC yönteminde de yine bu kriterler en yüksek ağırlığa sahip olmakla birlikte LOPCOW yöntemine göre önem sırasında bir değişiklik olduğu görülmektedir.

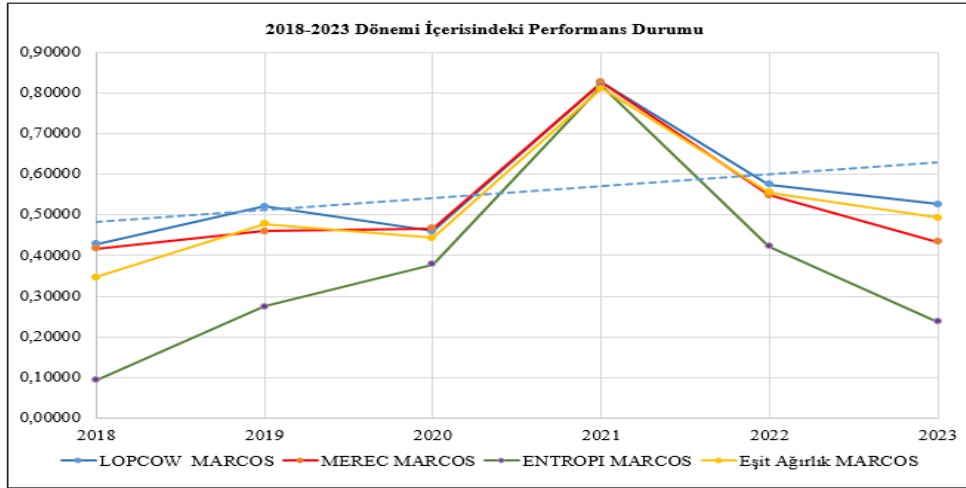
ENTROPI yönteminde ise K₈, K₇ ve K₄ kriterlerine diğer kriterlere göre yüksek ağırlık değerleri atanmıştır. Ancak ENTROPI yönteminde özellikle K₈ kriterinin ağırlığı 2,688 değeriyle dikkat çekmekte olup, diğer kriterlerin ağırlıklarına göre oldukça yüksek bir ağırlık değeri olduğu görülmektedir.

Duyarlılık analizi kapsamında kriter ağırlıklarının hesaplanmasının ardında söz konusu ağırlıklandırma yöntemleri MARCOS yöntemine entegre edilerek performans ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 11’de ve Şekil 4’te gösterilmiştir.

Tablo 11: 2018-2023 Yılları içerisindeki performans durumu

	LOPCOW MARCOS	Sıra	MEREC MARCOS	Sıra	ENTROPI MARCOS	Sıra	Eşit Ağırlık MARCOS	Sıra
2018	0,42784	6	0,41703	6	0,09260	6	0,34625	6
2019	0,52101	4	0,46025	4	0,27459	4	0,47785	4
2020	0,45974	5	0,46659	3	0,37806	3	0,44376	5
2021	0,82599	1	0,82651	1	0,81696	1	0,81185	1
2022	0,57427	2	0,54791	2	0,42202	2	0,55502	2
2023	0,52688	3	0,43335	5	0,23718	5	0,49255	3

Tablo 11’de görüldüğü gibi bütün performans ölçümünde, en iyi performansın gösterildiği yıl 2021 yılı olmuştur. En düşük performansın gösterildiği yıl ise 2018 yılı olduğu görülmüştür.



Şekil 4: 2018-2023 yılları içerisindeki performans durumu

Kullanılan tüm yöntemlere göre en yüksek performans düzeyinin gerçekleştiği yılın 2021 olduğu görülmektedir. 2021 yılında Giresun’da katı atık yönetiminde belirgin şekilde olumlu gelişmeler olduğu söylenebilir. 2018-2020 yılları içerisinde genel olarak bir artış olduğu görülmektedir. 2022-2023 yılları içerisinde ise 2021 yılına göre düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. Özellikle ENTROPİ yönteminde bu düşüş daha belirgin olarak kendini göstermiştir. Yöntem bazında bir değerlendirme yapıldığında ise LOPCOW-MARCOS ve Eşit Ağırlık-MARCOS yöntemiyle elde edilen sıralamaların birebir aynı olduğu, diğer taraftan MEREC-MARCOS ve ENTROPİ-MARCOS yöntemiyle elde edilen sıralamaların birebir aynı olduğu tespit edilmiştir. Bütün yöntemlerdeki sıralama farklılıkları yalnızca 2020 ve 2023 yıllarındaki sıralamaların farklılaşmasından kaynaklanmıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

Günümüzde sanayinin gelişmesi, kentleşmeyle birlikte şehirlerdeki nüfusunun, üretimin ve tüketimin artması, tüketim alışkanlıklarının değişmesi atık miktarlarının hızla artmasına yol açmıştır. Tüm dünyada artan atık miktarları ciddi sağlık ve çevre sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Üretim ve tüketim sonrasında ortaya çıkan atıkların nasıl değerlendirileceği ve nasıl geri dönüştürüleceği konusu önemli bir sorun olarak görülmektedir. Katı atık yönetiminin doğru yapılmaması kaynakların yok olmasına, canlıların zarar görmesine, ciddi sağlık sorunlarına ve ülke ekonomisinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle ortaya çıkacak olan atık miktarını minimum seviyede tutmak ve oluşan atıkların ise geri dönüşümünü sağlamak oldukça önemlidir. Ülkelerin atık performanslarını belirli dönemlerde incelemesi ve bu doğrultuda önlemler alması oldukça elzem bir konudur. Bu çalışmada Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisinde katı atık performansının ölçülmesi amaçlanmıştır. Performans ölçümünün yapılması amacıyla 14 kriter belirlenmiş, bu kriterler LOPCOW ve MARCOS yöntemlerinde kullanılarak Giresun ilinin 2018-2023 yılları içerisindeki katı atık performansı ölçülmüştür.

Kriterlerin ağırlıklarını belirlemek amacıyla yapılan LOPCOW yönteminde katı atıkta etkili olan en önemli kriterin “K₁₁: Toplam Katı Atık Miktarı (Ton/gün)” kriteri olduğu tespit edilmiştir. Bu kriteri sırasıyla: “K₁₄: Atık Pil ve Akü Miktarı (Kg)”; “K₁₃: Tıbbi Atık Miktarı (Ton)”; “K₅: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Geri Dönüşüm Miktarı (Kg)”; “K₁₀: Sıfır Atık Yönetimi Kapsamında Atık Depolama Alanı Tasarrufu (m³)”; “K₂: Toplam Katı Atık Geri Kazanım ve Bertaraf Miktarı (Kg)”; “K₉: Sıfır Atık Kapsamında Yapılan Enerji Tasarrufu (Kwh)”; “K₄: Sıfır Atık Kapsamında İl Genelinde Eğitim Alan Kişi Sayısı (Kişi)”; “K₁₂: Kişi Başı Ortalama Belediye Katı Atık Miktarı (Kg/kişi-gün)”; “K₃: Toplam Atık İşletme Tesisi Sayısı (Adet)”; “K₆: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Kumbara Sayısı (Adet)”; “K₁: İl Nüfusu (Kişi)”; “K₇: Sıfır Atık Kapsamında Yerleştirilen Konteyner Sayısı (Adet)” ve “K₈: Sıfır Atık Kapsamında Elde Edilen Kompost Miktarı (Kg)” kriteri izlemektedir.

Kriterlerin ağırlıkları LOPCOW yöntemiyle belirlendikten sonra bu ağırlıklar MARCOS yönteminde kullanılarak Giresun’un katı atık performansı ölçülmüştür. Yapılan analiz sonucunda belirlenen dönem içerisinde en iyi performansın 2021 yılında, en düşük performansın ise 2018 yılında olduğu belirlenmiştir. 2021 yılına kadar genel olarak performansta bir gelişme gözlemlenirken, 2021 yılı sonrasında bir gerileme olduğu görülmüştür.

Analiz sonuçları gösteriyor ki, ortaya çıkan katı atık miktarı oldukça önem arz etmektedir. Diğer bir ifade ile katı atık yönetiminin de ilk hedefi olan başlangıçta orta çıkabilecek atık miktarını en düşük seviyede tutmak temel amaç olmalıdır. Katı atık miktarının azaltılabilmesi için insanların sürdürülebilir atık yönetimi ve çevre konularında eğitilmesini ve bilgilendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmayı destekler nitelikte Bilgili (2023) yapmış olduğu çalışmada atığın kaynağında önlenmesi, minimum seviyede tutulması, geri dönüşümünün sağlanmasını vurgulamıştır.

Saraç vd. (2023) ve Bulut ve Şengül (2023) çalışmalarında atıkların kaynağında geri kazanımın için eğitim ve farkındalığın önemini vurgulamışlardır. Aynı zamanda sürdürülebilir atık yönetiminin sağlanabilmesi için kaynağında üretilen atık miktarlarının en düşük seviyede tutulması gerektiğini ifade etmişlerdir. Desa vd. (2012) insanların atık yönetimi ile ilgili sorunları azaltmaya yönelik tutum ve isteklerinin geliştirilmesi ve iyi bir atık eğitiminin verilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte bu eğitimlere öncelikle çocuklarla başlanması gerektiğini vurgulamışlardır.

Katı atıkların minimum seviyeye indirgenebilmesi için atığın ilk ortaya çıktığı yerde yani kaynağında geri dönüşümün sağlanması gerekmektedir. Bütün bunların sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için ise toplumun atık yönetimi hakkında bilgilendirilmesi, gerekli eğitimlerin verilmesi oldukça önemlidir. Modern çağın getirmiş olduğu tek kullanımlık ürünler ve her ürünün ambalaj içerisine girmesi katı atık miktarını önemli ölçüde artırmıştır. Sağlam ve Aydın (2024) çalışmalarında İstanbul'da toplam 42 okulda (anaokulu, ilkokul, ortaokul ve lise) öğrencilerin atıkları ayrıştırma oranlarını incelemişlerdir. Anket sonuçlarında katılımcıların % 93'ünün geri dönüşümün önemli olduğunu ve % 71'inin atıkları uygun atık kutularına attıklarını belirtmişlerdir. Özellikle Covid-19 salgını ve sonrasında hijyen bir ortamın sağlanabilmesi için insanlar tek kullanımlık ürünleri daha fazla tercih etmişlerdir. Tek kullanımlık ürünlere talebin artması atık miktarının da artmasına neden olmuştur. Aydın ve Çifçi (2022) Covid-19 süresinde nüfus ile belediye atığı oluşu arasındaki ilişkide ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 3 senaryo oluşturmuşlardır. Bütün senaryo sonuçlarında katı atık miktarının zamanla arttığını ve acil olarak alternatif katı atık bertaraf tesisinin kurulması gerektiğini belirtmişlerdir. Özellikle plastik içerikli ürünlerin kullanımının azaltılması, onun yerine geri dönüşümünün daha kolay olduğu cam ve kağıt gibi ambalajlarının kullanılması gerekmektedir.

Katı atıkların büyük bir çoğunluğunu evsel atıkların oluşturduğu düşünüldüğünde hane halkının atıkları ayrıştırması (kağıt, cam, plastik, pil gibi) ve ayrıştırılmış olan bu atıkların uygun şekilde konteynerlerde depolanması gerekmektedir. Aynı zamanda insanların ayrıştırdıkları her katı atık için de uygun konteynerlerin yerleşim yerlerinin her alanına konması gerekmektedir. İnsanlar atıkları doğru şekilde ayrıştırırsa bile bu atıkların toplanma ve depolanma noktasında titiz davranması gerekmektedir. Türkiye'de katı atıkların toplanmasında, depolanmasında, geri dönüşümünün sağlanmasında ve bertarafında genel olarak belediyeler tarafından sağlanmaktadır. Belediyeler atıkların toplanması ve dönüştürülmesi süreçlerinde ciddi bütçeler kullanmaktadır. Ancak kullanılan bu bütçeler yeterli gelmemekte ve belediyeler atık yönetimi konusunda çoğu zaman yetersiz kalmaktadırlar. Bugün mevcut atık depolarında kapasitenin, teknolojik alt yapısının yetersiz kalması ve katı atık yönetimi için bütçede yeterli payın ayrılmaması katı atık problemlerini her geçen gün artırmaktadır. Ciplak ve Barton (2012) çalışmalarında sağlık atıklarının zaman içerisinde artış göstereceğini, ancak sağlık tesislerinde etkin ayrıştırma uygulamalarıyla bu miktarların azaltılmasının mümkün olabileceğini belirtmişler ve gelecekte sağlık atığı bertaraf kapasitesinin planlanması ve seçimi için bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Katı atık yönetim projeleri yüksek yatırımlar gerektirmesi nedeniyle gereken özen gösterilmemektedir. Ancak uzun vadece gelecekte daha fazla kaynak harcanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle atık yönetimiyle ilgili yasal düzenlemeler tekrar gözden geçirilmelidir. Atık yönetiminden sorumlu olan kurum ve kuruluşların gerekli düzenlemeleri yapması ve etkin bir atık yönetim sistemini geliştirmesi gerekmektedir. Torkayes vd. (2021) çalışmalarında tıbbi atıkların ciddi riskler oluşturabileceğini vurgulamışlar, bu atıklar için sürdürülebilir düzenli depolama alanlarının belirlenmesinin önemi vurgulamışlardır. Katı atık yönetiminde uygulanacak olan katı atık politikaların neler olması gerektiği ve nasıl uygulanacağı detaylı bir şekilde belirtilmesi gerekmektedir. Mevcut depolama alanlarının artan atık miktarı için yeterli gelmemektedir. Bu nedenle yeni teknolojilerin ve modern yöntemlerin kullanıldığı yeni depolama alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Atık yönetimi için bütçeden daha fazla kaynak ayrılması ve modern depolama tesislerinin kurulması gerekmektedir.

Çalışmada analiz sonuçları değerlendirilirken bazı kısıtlar olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. İlk kısıt Giresun ilinin katı atık performansı değerlendirilirken sınırlı sayıda kriter analize dâhil edilebilmiştir. Buradaki en önemli sorun ise atık verilerine ilişkin detaylı bir kayıt alt yapısının olmasıdır. Katı atık çeşitlerine ilişkin (kâğıt, plastik, cam, karton vb.) ayrı ayrı atık miktarları yıllar içerisinde düzenli tutulmadığından kriter olarak sadece toplam atık miktarı alınabilmiştir. Çalışma sadece Giresun ili özelinde yapılmış, gelecekte yapılacak çalışmalarda diğer illerde çalışmaya dâhil edilerek karşılaştırmalar yapılabilir. Diğer bir kısıt ise çalışmanın 2018-2023 yılı ile sınırlandırılmasıdır. Çalışmada kullanılan kriterlere ilişkin bazı yıllara ait verilere ulaşılamadığından analiz dönemi 2018 yılıyla başlatılmak zorunda kalmıştır. Özellikle sıfır atık verilerine ilişkin kayıtlar düzenli olarak 2018 yılı ve sonrasında kayıt altına alınmaya başlanmıştır. Diğer bir kısıt ise yasal ve politik kararlar sonucunda oluşan dışsal faktörler analize dâhil edilmemiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda dışsal faktörlerinde analize dâhil edilerek performans ölçümünün yapılması önerilmektedir. Çalışmada söz konusu kriterler göz önünde bulundurularak ya da yeni kriterler eklenerek farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak farklı sonuçlara ulaşılabileceği unutulmamalıdır. Çalışmada kullanılan yöntemler diğer ÇKKV yöntemlerine göre oldukça yeni yöntemlerdir. Literatürde Giresun ili özelinde performans ölçümü yapılan bir çalışmaya rastlanmamış olunması nedeniyle bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

Alshehrei, F., & Ameen, F. (2021). Vermicomposting: A management tool to mitigate solid waste. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28, 3284–3293. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.072>

- Anwar, M. A., Suprihatin, S., Sasongko, N. A., Najib, M., Pranoto, B., Firmansyah, I. & Soekotjo, E. S. (2025). Sustainable waste management strategies for multilayer plastic in Indonesia. *Cleaner and Responsible Consumption*, 16, Article 100254. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100254>
- Aydın, N., & Çifçi, D. İ. (2022). Exploring the effect of Covid-19 on municipal waste generation with system Dynamics modelling. *Environmental Engineering and Management Journal*, 21(8), 1415–1425. <https://doi.org/10.30638/eemj.2022.125>
- Aydın Temel, F., & Turan, N. G. (2022). Giresun ilinde kentsel katı atıkların miktarı, kompozisyonu ve yönetiminin incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 479–491. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1102936>
- Aytekin, A. (2022). *Çok kriterli karar analizi* (2. Basım). Nobel Bilimsel Eserler.
- Bahçelioglu, E., Buğdaycı, E. S., Doğan, N. B., Şimşek, N., Kaya, S. Ö. & Alp, E. (2020). Integrated solid waste management strategy of a large campus: A comprehensive study on METU campus, Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 265, Article 121715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121715>
- Balaban, Y., & Baki, B. (2010). Analitik ağ süreci yaklaşımıyla en uygun katı atık bertaraf sisteminin belirlenmesi: Trabzon ili örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 24(3), 183–196.
- Bilgili, M. Y. (2020). *Sürdürülebilir yükseköğretim kurumlarında çevre bilinci, katı atık ve enerji yönetimi uygulamaları*. (1. Baskı). Ekin Yayınevi.
- Bilgili, M. Y. (2023). Sıfır atık yönetiminin çevre etiği yaklaşımları açısından incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 64, 21–28. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.1173752>
- Biswas, S., Bandyopadhyay, G., & Mukhopadhyaya, J. N. (2022). A multi-criteria based analytic framework for exploring the impact of Covid-19 on firm performance in emerging market. *Decision Analytics Journal*, 5, Article 100143. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100143>
- Bulut, A., & Şengül, H. (2023). Atık yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: İstanbul ili örneği. *Sağlık ve Sosyal Refah Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 85–97. <https://doi.org/10.55050/sarad.1224470>
- Chen, T., Zhang, S., & Yuan, Z. (2020). Adoption of organic waste composting products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 272, Article 122712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122712>
- Cheapa Waste Skips. (2025, 04 Mart). *Global Waste Statistics*. <https://cheapawasteskips.com.au/global-waste-statistics-2022/#glob>
- Christensen, T. H. (2011). *Solid waste technology & management*. Wiley.
- Chubb, H., & Simpson, J. M. (2012). The use of Z-scores in paediatric cardiology. *Annals of Pediatric Cardiology*, 5(2), 179–184.
- Ciplak, N., & Barton, J. (2012). A system Dynamics approach for healthcare waste management: a case study in İstanbul metropolitan city, Turkey. *International Solid Waste Association: Waste Management & Research*, 30(6), 576–586.
- Curtis, A. E., Smith, T. A., Ziganshin, B. A. & Elefteriades, J. A. (2016). The mystery of the Z-Score. *Aorta*, 4(4), 124–130. <http://dx.doi.org/10.12945/j.aorta.2016.16.014>
- Demirarslan, K. O., & Başak, S. (2018). Doğu Karadeniz Bölgesi illeri katı atık yönetimi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(3), 117–132.
- Derse, O., & Göçmen Polat, E. (2025). Municipal Solid Waste Landfill Site Selection: Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods and Mathematical Modelling - A Case Study. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(1), 147–158.
- Desa, A., Kadir, N. B. A., & Yusooif, F. (2012). Waste education and awareness strategy: towards solid waste management (SWM) program at UKM. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 59, 47–50. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.244>
- Doğdu Yüçetürk, G., & Alkan, S. N. (2024). Sıfır atık indeksi kullanılarak Türkiye’deki kentsel katı atık yönetiminde sıfır atık yaklaşımının incelenmesi. *Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 60–88.
- Ecer, F. (2020). *Çok kriterli karar verme, Geçmişten günümüze kapsamlı bir yaklaşım*. Seçkin Yayıncılık.
- Ecer, F., & Pamucar, D. (2022). A novel LOPCOW-DOBI multi-criteria sustainability performance assessment methodology: An application in developing country banking sector. *Omega*, 112, Article 102690. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102690>
- Evin, H., & Özdemir, A. (2022). Büyükşehirlerin katı atık yönetimi etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi kullanılarak ölçülmesi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (42), 389–421. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.1195544>
- Fores, V. I., Bovea, M. D., Coutinho-Nobrega, C., & Medeiros, H. R. (2019). Assessing the social performance of municipal solid waste management systems in developing countries: Proposal of indicators and a case study. *Ecological Indicators*, 98, 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.031>
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33, 220–232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Guo, Z., Liu, J., Liu, X., Meng, Z., Pu, M., Wu, H., Yan, X., Yang, G., Zhang, X., Chen, C., & Chen, F. (2024). An integrated MCDM model with enhanced decision support in transport safety using machine learning optimization. *Knowledge-Based Systems*, 301, Article 112286. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112286>
- Iqbal, A., Haider, R. Yasar, A., & Nizami, A. (2025). A governance model for sustainable municipal solid waste management: Aligning the sector with Pakistan’s economic goals. *Waste Management Bulletin*, 3, 107–127. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.12.010>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. V. (2018). *What a waste 2.2, A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group.
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights a new method based on the removal effects of criteria (MERECE). *Symmetry*, 13, Article 525. <https://doi.org/10.3390/sym13040525>
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., Giusti, A., & Yi, L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong New Area, China. *Waste Management*, 29, 1127–1233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.016>
- Nag, A., & Vizayakumar, K. (2005). *Environmental education and solid waste management*. New Age International Limited.
- Özkan, A. (2018). Atık baskılı devre kartlarından değerli metal geri kazanım yöntemlerinin çok ölçütlü karar verme teknikleri ile değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 529–537.
- Parekh, H., Yadav, K., Yadav, S., & Shah, N. (2015). Identification and assigning weight of indicator influencing performance of municipal solid waste management using AHP, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 36–45. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-2356-3>

- T.C. Resmi Gazete. (2015). *Atık Yönetimi Yönetmeliği* (Resmi Gazete Tarih: 02.04.2015, Sayı: 29314). <https://resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>
- Sağlam, B. S. & Aydın, N. (2024). Investigation of waste characteristics and recycling behaviour at educational institutes. *Waste Management*, 180, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.036>
- Saraç, B., Gündoğdu, H. G. & Aytekin, A. (2023). Sıfır atık yönetimi etkinliğinin veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi: Büyükşehir örneği. *Politik Ekonomik Kuram, özel sayı*, 238–256, <https://doi.org/10.30586/1332939>
- Seyhan, N. (2023). AB ülkelerinin çevre ve atık yönetimi performanslarının değerlendirilmesi: Veri zarflama analizi ve yapay sinir ağlarının birlikte uygulanması. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(1), 343–355.
- Susanti, L. D., Reniati, R., & Altin, D. (2025). Sustainable waste management strategy based on circular economy in Pangkalpinang City. *Journal of Multidisciplinary Academic Business Studies (JoMABS)*, 2(2), 449–462.
- Stevic, Z., Pamucar, D., Zavadskas, E. K., & Puska, A. (2020a). MARCOS: A novel method for rational decision-making under uncertainty. *Symmetry*, 12(3), Article 455. <https://doi.org/10.3390/sym12030455>
- Stevic, Z., Pamucar, D., Puska, A., & Chatterjee, P. (2020b). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, Article 106231. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>
- Şaşmaz, E., Avcı, S., & Aladağ, Z. (2020). Türkiye istatistiki bölge birimleri sınıflamasına göre 1. düzey’de yer alan belediyelerin katı atık yönetiminin değerlendirilmesi. *Veri Bilimi Dergisi*, 3(1), 33–40.
- Torkayesh, A. E., Zolfani, S. H. Kahvand, M., & Khazaelpour, P. (2021). Landfill location selection for healthcare waste of urban areas using hybrid BWM-grey MARCOS model based on GIS. *Sustainable Cities and Society*, 67, Article 102712, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102712>
- Tseng, M. L. (2008). Application of ANP and DEMATEL to evaluate the decision-making of municipal solid waste management in Metro Manila. *Environmental Monitoring and Assessment*, 156, 181–197.
- Tüzüner, Z., & Alp, İ. (2018). Comparison of solid waste management performances of Turkey and EU countries associated with Malmquist Index. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 75–81. <https://doi.org/10.2339/politeknik.386857>
- Wang, T. C., & Lee, H. D. (2009). Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights. *Expert Systems with Applications*, 36, 8980–8985. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.035>
- Wang, Z., & Zhang, W. (2012). Dynamic engineering multi-criteria decision making model optimized by entropy weight for evaluating bid. *Systems Engineering Procedia*, 5, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.sepro.2012.04.008>
- Vego, G., Kucar-Dragicevic, S., & Koprivanac, N. (2008). Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Management*, 28, 2192–2201. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.002>
- Venkiteela, L. K. (2020). Status and challenges of solid waste management in Tirupati city. *Materials Today: Proceedings*, 33, 470–474. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.044>
- Yang, Q. Fu, L., Liu, X., & Cheng, M. (2018). Evaluating the efficiency of municipal solid waste management in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), Article 2448. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112448>
- Yazdani, M., Ye, C., Shaayesteh, M. T., & Zarate, P. (2025). Decision making model for waste management: Fuzzy group AHP-CoCoSo. *Production Management and Engineering*, 13(1), 77–92. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2025.21558>
- Zaman, A. U. (2014). Measuring waste management performance using the ‘Zero Waste Index’: the case of Adelaide, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 66, 407–419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.032>

MIKE Hidrolojik Model Programı ile Alanya İlçesi Oba Çayı Taşkın Bölgesinin Modellenmesi

Zübeyde Demirel^{1,*}, Mehmet Dikici¹

¹Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 74050, Antalya.

Özet

Günümüzde küresel ısınmanın etkisi ile kuraklık ve taşkınlar ciddi bir sorun haline gelmiştir. İklim değişikliği dünyanın var oluşundan itibaren devam eden bir süreç olmasına rağmen, günümüzde insani faaliyetler nedeniyle oldukça hızlı bir değişime sahiptir. İklim değişikliği ile birlikte sıcak hava dalgaları, seller, tayfunlar gibi birçok meteorolojik olay hayatı olumsuz etkilemektedir. İklim değişikliği birçok bölgede yağış rejimlerinin değişmesine neden olmuştur. Yağışların büyük bir kısmının sağanak şeklinde yağmaya başladığı görülmektedir. Sağanak yağışlar sonucunda suların dere yataklarının dışına çıkarak taşkınları meydana getirdiği görülmektedir. Bu sebeple, dere yataklarına ait taşkın yayılım alanlarının önceden belirlenmesi taşkına bağlı zararların azaltılması açısından oldukça önemlidir. Önceden belirlenen taşkın yayılım haritalarına göre dere ve nehir yatakları taşkın anındaki debiyi taşıyacak kapasiteye getirilerek can ve mal kayıplarının yaşanmasının önüne geçilebilmektedir. Taşkın olayının matematiksel olarak modellenmesi için HEC-RAS ve MIKE gibi birçok farklı taşkın modelleme yazılımı kullanılmaktadır. Bu programlar, taşkın hadisesinin analizi ve riskinin tespiti konusunda oldukça yarar sağlamaktadırlar. Bu çalışma, Antalya ilinin Alanya ilçesinde bulunan Oba Çayı'nın taşkın risklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. DSİ (Devlet Su İşleri) 13. Bölge Müdürlüğü tarafından elde edilen hidrograf verilerinde bulunan tekrerrür sürelerine sahip debiler kullanılarak MIKE programı yardımı ile taşkın risk analizi yapılmış ve taşkın dağılımları incelenmiştir. Bu doğrultuda risk potansiyeli yüksek ve taşkın oluşturabilecek sahalar tespit edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları, taşkın öncesi afet risklerini öngörmek ve yönetebilmek için önem arz etmektedir.

Anahtar Sözcükler

İklim Değişikliği, Taşkın, MIKE Hidrolojik Model Programı, Taşkın Analizi

Modeling of Alanya District Oba Çayı Flood Zone with MIKE Hydrological Model Program

Abstract

Today, droughts and floods have become serious problems due to the effects of global warming. Although climate change has been an ongoing process since the beginning of the world, it is currently undergoing rapid change due to human activities. Along with climate change, many meteorological events such as heat waves, floods, and typhoons are negatively affecting life. Climate change has caused changes in rainfall patterns in many regions. It has been observed that a large portion of rainfall now occurs in the form of heavy rainfall. As a result of heavy rainfall, water flows outside riverbeds, causing floods. For this reason, determining flood-prone areas belonging to riverbeds in advance is very important in terms of reducing flood-related damage. By enhancing the capacity of river and stream beds to accommodate flood flows during floods based on pre-determined flood inundation maps, it is possible to prevent loss of life and property. Various flood modeling software programs, such as HEC-RAS and MIKE, are used to mathematically model flood events. These programs provide significant benefits in analyzing flood events and identifying risks. This study aims to assess the flood risks of the Oba Çayı River located in the Alanya district of Antalya province. Flood risk analysis was conducted and flood distributions were examined using the MIKE program with the help of discharge data with recurrence intervals obtained from the hydrograph data obtained by the 13th Regional Directorate of the State Hydraulic Works. In this context, areas with high risk potential and capable of causing floods were identified. The results of the analysis are significant for predicting and managing flood-related disaster risks prior to a flood event.

Keywords

Climate Change, Flood, MIKE Hydrological Model Program, Flood Analysis

1. Giriş

İklim değişikliği, iklimin durumunda uzun yıllar boyunca meydana gelen değişimler olarak tanımlanabilir. İklim değişikliği, doğal süreçler ve dış etmenler ile oluşabilir. İnsan etkileri sonucunda atmosferi oluşturan gazların oranlarında ortaya çıkan önemli değişiklikler sonucunda her yılın bir önceki yıldan daha sıcak olduğu ve sıcaklık rekorlarının kırıldığı görülmektedir (Türkeş, 2012).

Türkiye sahip olduğu coğrafi, atmosferik ve iklim koşulları nedeniyle küresel iklim değişikliğinden en çok etkilenecek ülkeler arasında yer almaktadır (Cebeci vd., 2019). Küresel ısınma; şiddetli fırtına, kuvvetli yağış gibi meteorolojik olaylara ve bu olaylara bağlı oluşan seller, taşkınlar gibi hidrolojik olaylara sebep olmaktadır (Türkeş vd., 2000). Ülkemizde en fazla yağış alan yerler arasında Akdeniz bölgesinde Antalya ili yer almaktadır (Er & Şener, 2023; İşler vd., 2016). Aşırı yağmur sebebiyle akarsuların taşması ve taşkına sebebiyet vermesi zaman zaman görülen doğal afetlerdendir. Havzada eğim değerlerinin yüksek olması yağışla düşen suların hızlı akışa geçerek taşkın oluşturma potansiyelini arttırmaktadır. Bu durum taşkın riskini arttırmaktadır (Demir, 2014; İşler vd., 2016).

Taşkın; nehir yatağının normal yapısının korunmasına rağmen normalden daha fazla yağış alarak nehir yatağı dışarısına çıkmasıyla da kaynaklanabilmektedir. Taşkın, barajlardan normalden fazla su bırakılması, nehir yatağının kesitinin daraltılarak yapılaşmaya açılması gibi nedenlerle akarsuyun yatak kesitine sığmayarak çevresine zarar vermesidir (Karataş, 2019; Demir & Keskin, 2022). Taşkınlar oluşum sürelerine göre; yavaş gelişen taşkınlar, hızlı gelişen taşkınlar, ani taşkınlar, oluşum yerlerine göre ise dere ve nehir taşkınları, dağlık alan taşkınları, şehir taşkınları ve kıyı taşkınları şeklinde sınıflandırılmaktadır (Gülbaz, 2019). Taşkın olayı hem dünyada hem de ülkemizde sıklıkla yaşanan olaylar arasında yer almaktadır. Taşkınlar bir veya bir kaç gün sürebilmekte, taşkına sebep olan suyun çekilmesi belirli bir zaman alabilmektedir. Taşkınlar düzensiz kentleşme ile birlikte artmaktadır.

Artan nüfusun barınma ihtiyacının karşılanması için hızlı ve kontrolsüz kentleşme tahribata sebebiyet vererek topoğrafyayı etkilemektedir. Bu sebeple iklim değişikliği ve doğal örtünün bozulmasından kaynaklı yağış ve dere yatakları kapasitesi ters orantılı bir şekilde ilerleyerek sel ve taşkın gibi olaylara zemin hazırlayarak hayatı olumsuz etkilemektedir. Meydana gelecek kayıpların önlenmesi için özellikle kentsel alanlardan geçen derelerin modellenmesi ve taşkın yayılım haritalarının oluşturulması gerekmektedir (Gülcü, 2021).

Taşkın yönetimi, taşkın etkilerinin neler olacağını tespit etmek ve taşkın zararlarını minimuma indirmek için yapılan çalışmaların tamamı şeklinde tanımlanmaktadır (Ertürk & Nihat, 2019; Dikici & Aksel, 2019). Taşkına karşı önlem alınabilmesi için akarsu havzasında oluşabilecek maksimum taşkın debisinin bilinmesi çok önemlidir (Dikici & Aksel, 2019). Taşkın debilerinin ve etki alanlarının belirlenmesinde birçok hidrolojik program kullanılmakta olup HEC-RAS, MIKE bunlardan bazılarıdır (Brunner, 2016). MIKE 21 serbest yüzeyli akışlar için tasarlanmış bir modelleme sistemidir (Kadam & Sen, 2012). Körfezlerde, akarsu ağızlarında, kıyı bölgelerinde ve göllerde meydana gelen hidrolik ve çevresel olayların simülasyonu için kullanılabilir (Gündemir, 2006).

Taşkınla mücadele önlemlerinin başında dere yatağı ıslahı, dere yataklarının düzenlenmesi, dere yatağından kaçınmak, dere yataklarını ve dere kenarlarında kot seviyesi çok düşük arazileri yerleşime açmamak, ulaşım ağlarını bu kesimlerden geçirmemek gibi tedbirler gelmektedir. Bu tedbirleri uygulayabilmek için hidrolojik model programları kullanılmaktadır (Üyüklüoğlu vd., 2015).

Bu çalışma kapsamında MIKE hidrolojik model programı kullanılarak Alanya Oba Çayı hidrolojik modeli oluşturulmuştur. Oba Çayı'nda herhangi bir taşkın anında taşkın oluşma olasılığı ve etkilerinin neler olacağını inceleyerek taşkın yaşanmadan önce alınacak tedbirlerle ilgili öneriler sunmak bu çalışmanın temel amacıdır. MIKE hidrolojik model programı çalışmasında kullanılacak debi değerleri Antalya ili, Alanya ilçesi Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'den talep edilmiştir. MGM'den belirli yılları kapsayan yağış verileri temin edilmiş, Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı yardımıyla tekerrür debileri ve hidrograflar oluşturulmuştur. Analiz sonucu 5 adet gözlem istasyonuna ait yağış verilerinden WMS 11.0 programı ile tekerrür analizi yapılarak Q_{50} , Q_{100} , Q_{200} ve Q_{500} senelik tekerrür aralıklarına ait hidrograflar belirlenmiştir (Dikici & Kazezyılmaz-Alhan, 2018). Elde edilen hidrograflar ile bir taşkın modeli kurulup taşkın yayılım alanları belirlenmiştir. 50, 100, 200 ve 500 yıllık tekerrür debileri kullanılarak MIKE hidrolojik programı ile Oba Çayı taşkın model haritaları üretilmiştir.

2. Materyal ve Metot

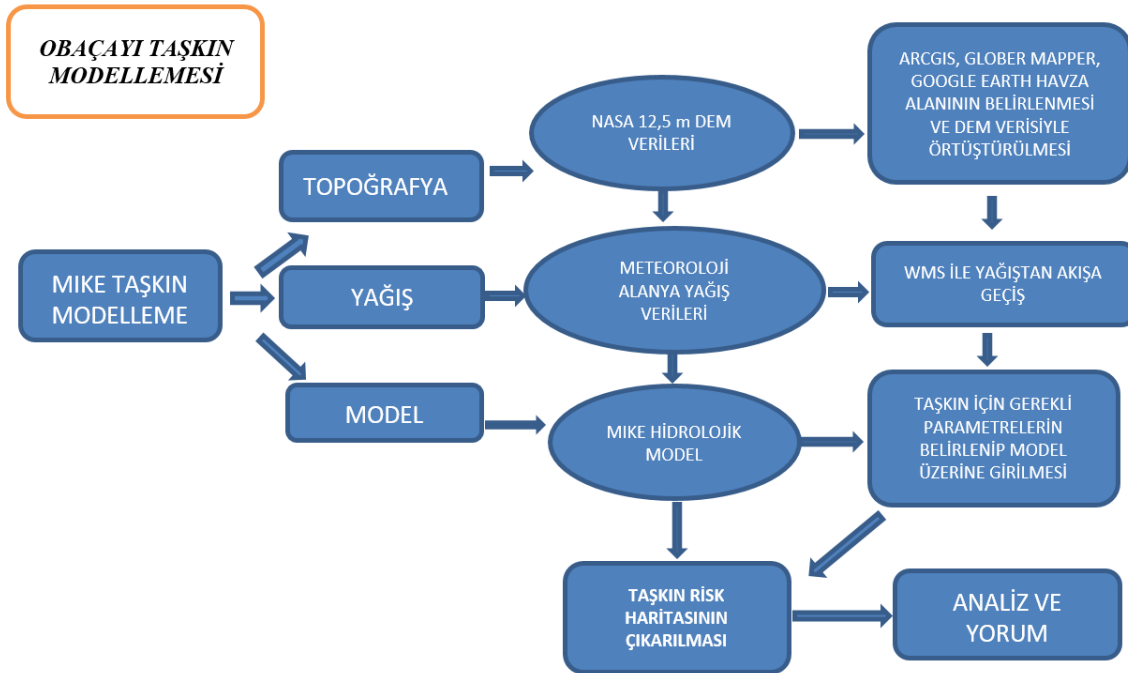
2.1. Kullanılan Veriler

Oba çayına ait havzanın hidrolojik modellemesi için akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Alanya ilçesinde Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne ait Oba yağış gözlem istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyona ait 1941-2023 yılları arasındaki günlük toplam yağış miktarları ile 1964-2020 yılları arasında standart sürelerde gözlenen en büyük yağışlar (mm) ve tekerrür analiz değerleri alınmış ve debi hesaplamalarında kullanılmıştır.

Modellemelerde kullanılacak olan SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) verisi ise NASA DEM Elevation Data (1-arc second Resolution SRTM/ASTER DEM)'dan alınmıştır. DEM verilerinin çözünürlüğü 12,5'dir. Hızlı ve kolay bir şekilde elde edildiği için çalışmada NASA DEM verisinin kullanılması tercih edilmiştir. Harita Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan 5 m çözünürlüklü DEM verileri kullanılarak taşkın yayılım alanlarını daha hassas bir şekilde incelenebilmektedir.

ArcMap ve Global Mapper Programları yardımıyla öncelikli olarak kırpma işlemi yapılarak çalışma alanına ait DEM .tif formatında kaydedilmiş, sonrasında veriyi .xyz formatına çevirmek için Global Mapper programı kullanılmıştır. MIKE programı .xyz uzantılı DEM verileri üzerinde işlem yaptığı için format dönüşümü (.tif to .xyz) gerçekleştirilmiştir.

Meteorolojik verilerden akış verilerini hesaplamak için Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı kullanılmıştır. Bu program akarsu havzası modellerinin oluşturulması, düzenlenmesi ve analiz edilmesini kolaylaştırmayı amaçlayan birçok hidrolik modelin tek bir arayüzde toplanmış halidir.

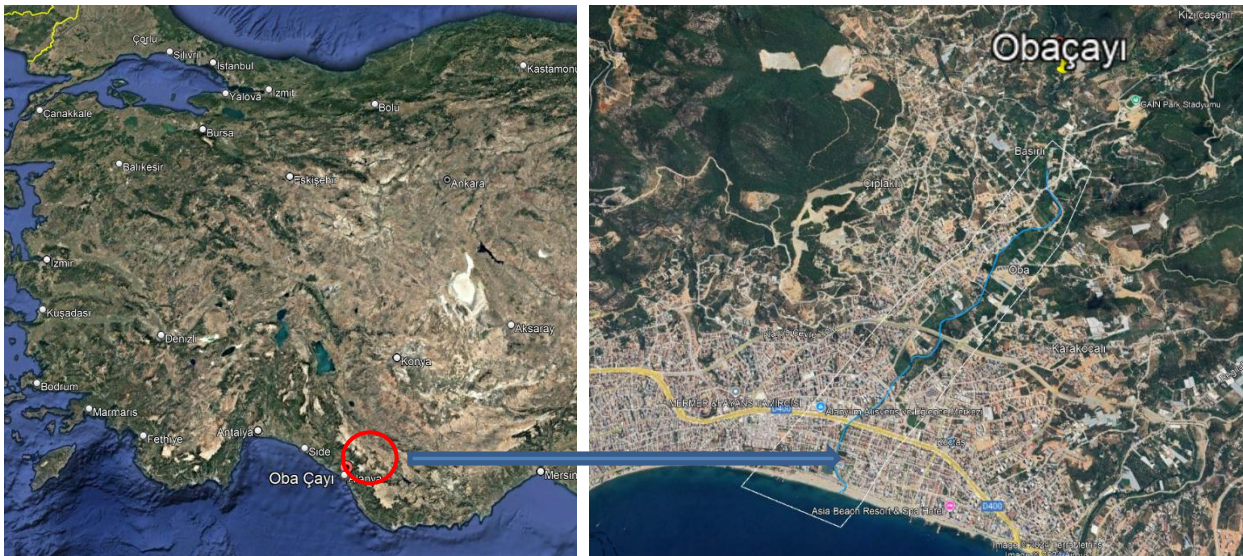


Şekil 1: Akış şeması

2.2. Çalışma Alanı: Oba Çayı

Alanya ilçesinde bulunan Oba Çayı ülkemizin 25 nehir havzasından biri olan Antalya havzası içerisinde yer almaktadır. Havza yaklaşık 90 km²'lik bir alanı kaplamaktadır. Küresel iklim değişikliğiyle beraber kıyı şeridinin yağış rejiminde ve sıcaklıkta önemli değişimler gözlenmeye başlanmıştır. Bölgesel olarak nüfusun artışı, yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaç nedeniyle yaşanan doğa tahribatı olası taşkın tehlikesinde can ve mal kaybı riskini arttırmaktadır. Bölgede yazlar sıcak ve kurak geçerken, kış mevsimi yağışlı ve ılık geçmektedir. Oba Çayı debisi özellikle kış aylarında yağın yağmurla beraber yüksek debiye ulaşmaktadır.

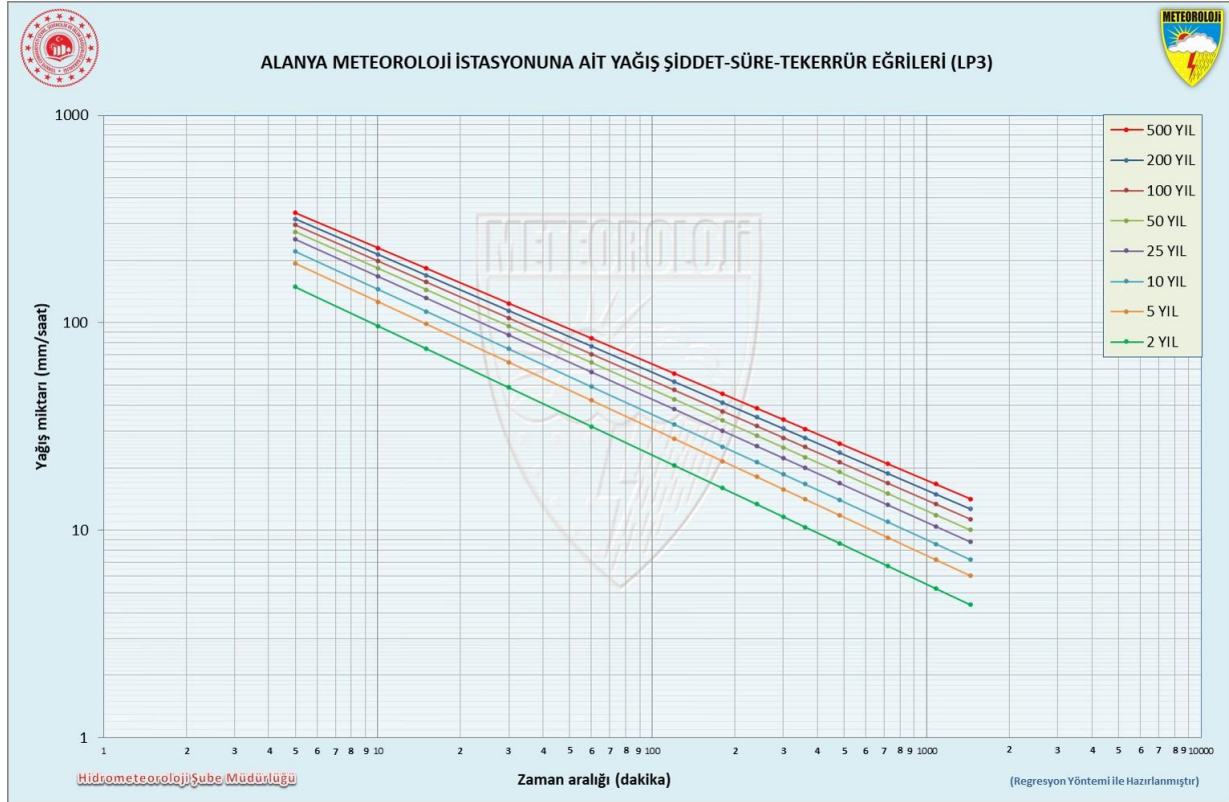
Çalışma alanı olan Oba Çayı Antalya havzası içerisinde yer almakta olup Alanya ilçesinin kuzeydoğusunda Oba Mahallesi sınırlarında yer almaktadır. Şekil 1’de Türkiye’de ki konumu ($36^{\circ}32'30.00''\text{K}$ - $32^{\circ}2'11.63''\text{D}$), Şekil 2’de çalışma alanı gösterilmiştir.



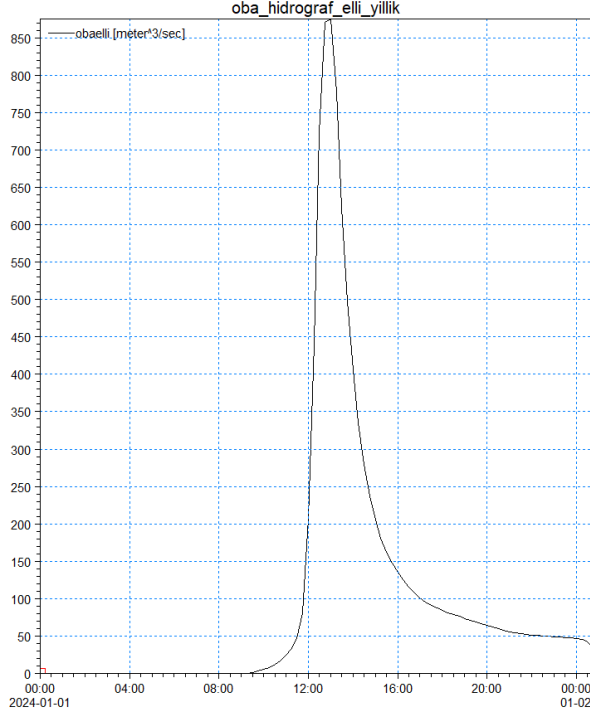
Şekil 2: Çalışma alanı ve Oba Çayı havzası

2.3. Hidrolojik Modelleme Yöntemi

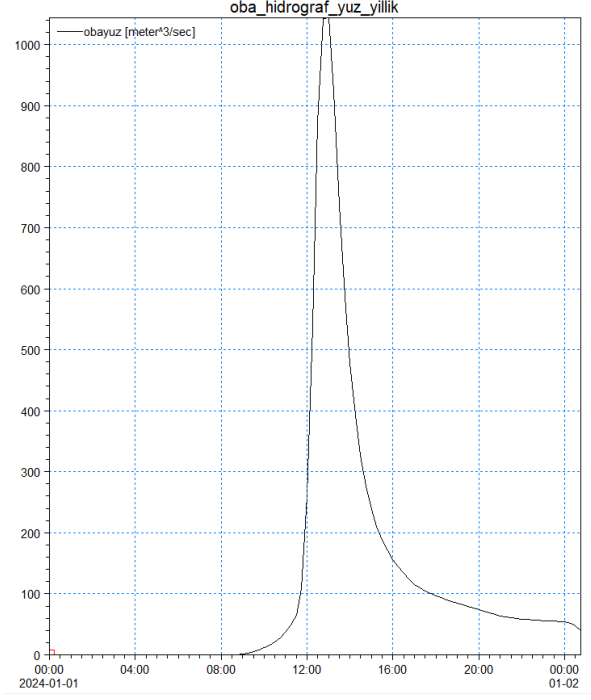
MIKE hidrolojik model programıyla Antalya ili, Alanya ilçesi, Oba mahallesinde bulunan Oba Çayı'nın, Devlet Su İşleri (DSİ)'nden alınan ve hesaplanan maksimum debi ile olası taşkın riski analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı için gerekli yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır. Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı yardımıyla tekerrür debileri ve hidrograflar oluşturulmuştur. WMS su havzaları ve su kaynakları yönetimi için geliştirilmiş bir yazılımdır. WMS, su havzaları üzerinde çeşitli hidrolojik modelleri çalıştırmak ve analiz etmek için kullanılmaktadır. Programa havzanın topoğrafik ve jeolojik özellikleri girilmiş, ardından hidrograf çıktılarına erişilmiştir. Havzaya ait yağış verileri girilerek akış hidrografları elde edilmiştir. Şekil 4, 5, 6 ve 7'de farklı tekerrür yıllarına ait hidrograflar gösterilmiştir.



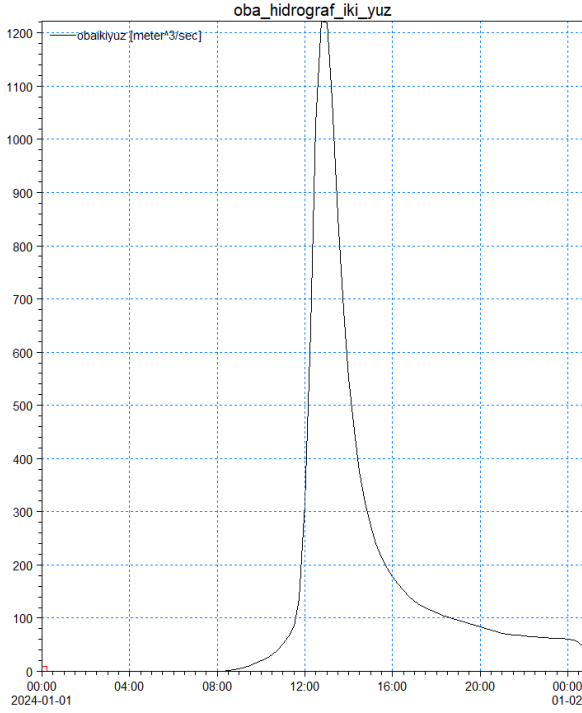
Şekil 3: Alanya meteoroloji istasyonu yağış şiddet-süre-tekerrür eğrileri



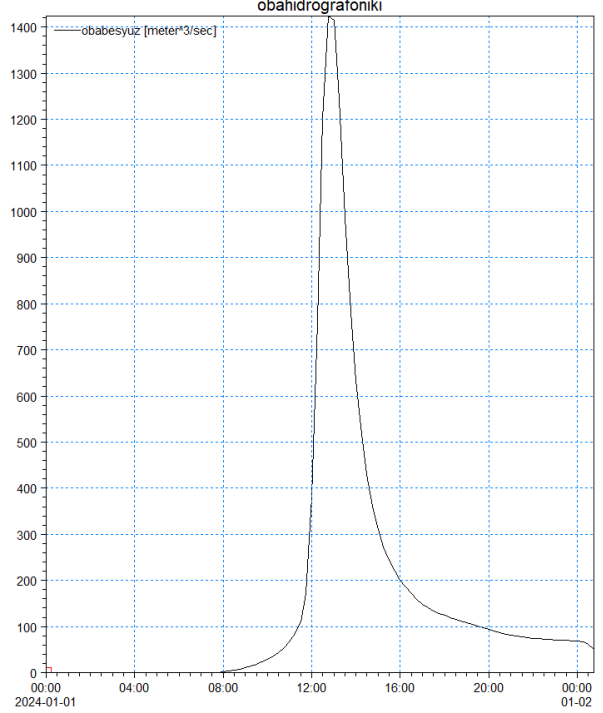
Şekil 4: Oba Çayı 50 yıllık hidrograf grafiği



Şekil 5: Oba Çayı 100 yıllık hidrograf grafiği

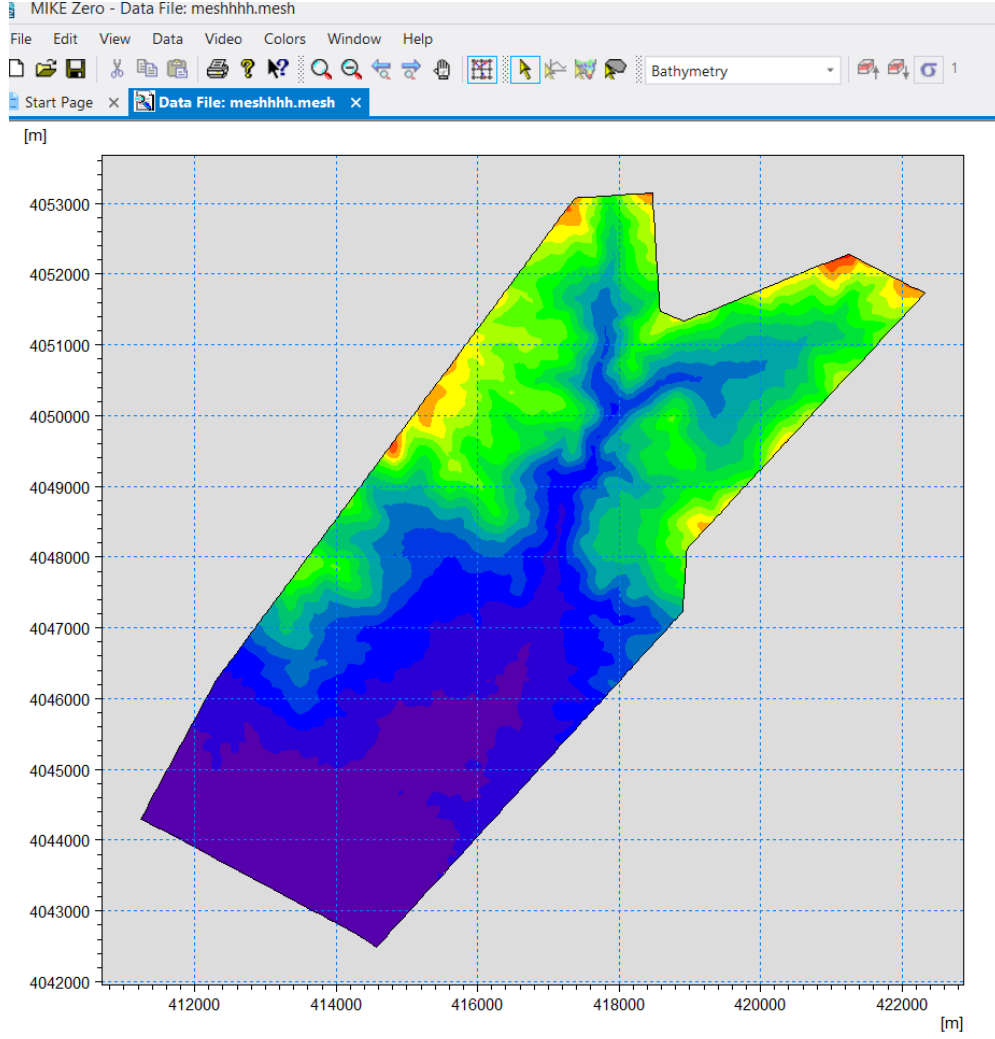


Şekil 6: Oba Çayı 200 yıllık hidrograf grafiği



Şekil 7: Oba Çayı 500 yıllık hidrograf grafiği

ArcMap ve Global Mapper Programları yardımıyla MIKE hidrolojik model programlarına uygun formata getirilen DEM verisi kullanılarak MIKE üzerinde oluşturulan 2 boyutlu modelde sıvı su denklemi kabulleri yapılmıştır. Memba sınır şartı olarak programa tekerrür hidrografları tanımlanarak, mansap sınır şartı olarak ise programda ki serbest akış sınır şartı seçilmiştir. Akdeniz'e dökülen serbest bir akış gözlemlenmektedir. MIKE manning pürüzlülük katsayısı 0,032 alınmış ve çalışma alanının her bölgesinde aynı manning katsayısı kullanılmıştır. Model hesap adım süresi 1 saniye alınmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi MIKE 21 ile akışkan modeli oluşturulmuş ve girdiler analiz edilmiştir. Sonuç olarak, farklı yıllarda hesaplanan tekerrür debilerinin belirli zaman aralığında oluşturacağı taşkın simülasyonuna ulaşılmıştır.



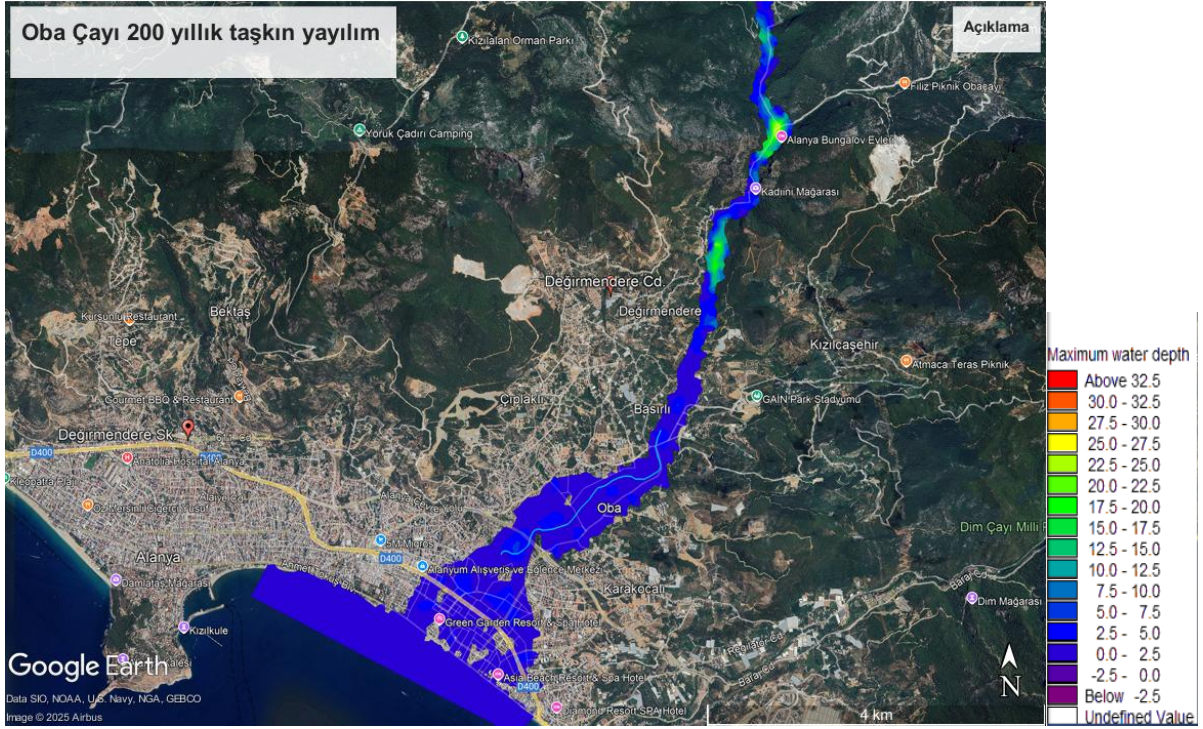
Şekil 8: MIKE taşkın modelleme yazılımında çalışma alanı

3. Bulgular ve Sonuç

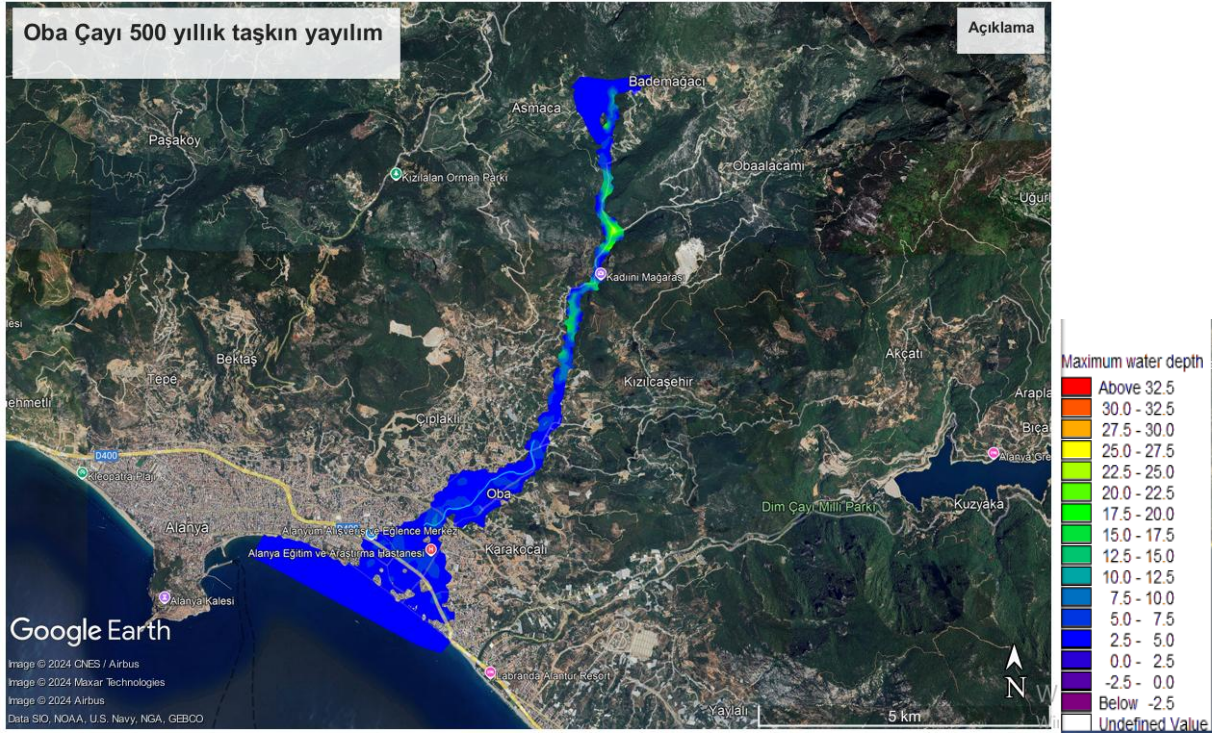
Bu çalışma kapsamında, Akdeniz Bölgesi'ne bağlı Antalya ili, Alanya ilçesi, Oba Mahallesi'nde bulunan Oba Çayı üzerinde taşkın analizi hidrolojik model programı MIKE ile simüle edilmiştir. Bu çalışma için NASA Earth Data'dan temin edilen DEM verileri, Global Mapper ve ArcMap programları ile MIKE programında kullanılacak eşyükselti verisi haline getirilmiştir. NASA Earth Data'dan alınan 12,5 m'lik DEM verileri daha kolay ulaşılabilir olduğu için hesaplamalarda kullanılmış olup yapılan çalışma basit bir modele indirgenerek köprü ve zanaat yapıları göz ardı edilmiştir.

DEM verisi topoğrafyanın doğal ve yapay unsurlarını da barındıran ve genellikle .tif uzantılı harita altlığıdır. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan yağış verilerini akışa geçirmek ve yıllara göre hidrograf grafiklerini üretmek için Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı kullanılmıştır. Son olarak elde edilen hidrolik hesaplar MIKE programına aktarılmış ve taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir. Oluşturulan haritalar uydu görüntüsü üzerinde gösterilerek hangi bölgelerin taşkın riski taşıdığı belirlenmiştir. Dolayısıyla mevcut ve gelecekteki koşulları analiz ederek bu bölge için taşkın yönetimi planlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilecek taşkın tehlike haritası elde edilmiştir. Taşkın modelleme alanı belirlenirken havza sınırlarının tamamı modellemeye dahil edilip bölgenin jeolojik yapısı ve yükseklik verileri bu havzaya entegre edilerek hesaplamalar tek bir ana kol üzerinden yapılmıştır. Mansap kısmında birlikte deniz kıyısından denize doğru devam eden taşkın aslında bir su yüksekliğine sahip olmamakla birlikte deniz kotunu simgelediği lejantta da görülmektedir.

50, 100, 200 ve 500 yıllık hidrograf verileri kullanılarak maksimum debide meydana gelebilecek taşkın yayılım haritaları elde edilmiştir. Şekil 9, 10, 11 ve 12'de tekerrür yıllarına göre analiz sonucu taşkın riski taşıyan bölgeler gösterilmiştir. Bu olası senaryo incelendiğinde taşkın ana kol üzerinden hesaplanmıştır. Yan kollar hesaplamalara dahil edilmemekle birlikte olası senaryoya yaklaşık değerler öngörülmüştür. Bölgenin karstik ve engebeli yapısı dolayısıyla çukur ve vadi kesimlerinde su birikintilerinin yüksek seviyelere ulaşabileceği analiz sonucu görülmüş olup daha detaylı bir inceleme ile yan kollar ilave edilerek çalışma yapılsa debinin artması durumunda taşkın yayılım alanları ve



Şekil 11: 200 yıllık tekerrür debisine göre taşkın yayılım haritası



Şekil 12: 500 yıllık tekerrür debisine göre taşkın yayılım haritası

Oba Çayı çevresi özellikle son dönemlerde yapılaşmanın arttığı bir bölgedir. Olası taşkın ihtimalleri değerlendirilip bu bölgelerde taşkın risk analizi için planlamalar yapılmalıdır. Sonuç olarak Oba Çayı havzası plansız kentleşme ile birlikte önemli bir taşkın riski altında olup, 500 yıllık taşkın debisine göre olası taşkın Oba Mahallesinde geniş bir alana yayılacaktır. Bu durum, 500 yıllık bir tekerrür aralığındaki yağışa göre hesaplanmış olsa dahi gerçekleşme riski taşımaktadır. Oba Çayı havzasında bulunan Alanya Eğitim ve Araştırma Hastanesinin taşkın durumunda zarar görmemesi ve sağlık hizmetlerine devam edebilmesi için taşkına karşı tedbirler alınması gerekmektedir.

Taşkın zararlarının azaltılması için Oba Çayı kenarına yapılan konutların kaldırılması, su akış alanının genişletilmesi, dere ıslah ve genişletme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Ayrıca, havza alanında yaşayan insanların taşkın konusunda bilinçlendirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) ve Alanya ilçesine ait 1941-2023 yılları arasındaki günlük toplam yağış miktarları ile 1964-2020 yılları arasında standart sürelerde gözlenen en büyük yağışlar (mm) ve tekerrür analiz değerlerinin elde edilmesinde katkı sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) Alanya Şubesi ekiplerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0*. US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Cebeci, İ., Demirkıran, O., Doğan, O., Sezer, K. K., Öztürk, Ö., & Elbaşı, F. (2019). Türkiye'nin iller bazında kuraklık değerlendirilmesi. *Toprak Su Dergisi (Özel Sayı)*, 169–176. <https://doi.org/10.21657/topraksu.655613>
- Demir, F. (2014). *Aşağı Sakarya Nehri Adapazarı Kesimi Taşkın Risk Tayini* [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Demir, V., & Keskin, A. Ü. (2022). Yeterince akım ölçümü olmayan nehirlerde taşkın debisinin hesaplanması ve taşkın modellemesi (Samsun, Mert Irmağı örneği). *Geomatik*, 7(2), 149–162. <https://doi.org/10.29128/geomatik.918502>
- Dikici, M., & Aksel, M. (2019). Havza büyüklüğüne göre en uygun taşkın debisi hesap yönteminin bulunması–Doğu Akdeniz Havzası örneği. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(3), 120–131. <https://doi.org/10.46740/alku.582794>
- Dikici, M., & Kazezyılmaz-Alhan, C. M. (2018). Alibeyköy havzası için farklı hidrolojik modelleme yöntemleri ile taşkın debilerinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 919–928.
- Er, A., & Şener, Ş. (2023). Alanya (Antalya) alt havzası yeraltı sularının hidro-kimyası ve kullanım özelliklerinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(4), 1607–1623. <https://doi.org/10.21923/jesd.1397513>
- Demir, V., & Keskin, A. Ü. (2022). Yeterince akım ölçümü olmayan nehirlerde taşkın debisinin hesaplanması ve taşkın modellemesi (Samsun, Mert Irmağı örneği). *Geomatik*, 7(2), 149–162. <https://doi.org/10.29128/geomatik.918502>
- Dikici, M., & Aksel, M. (2019). Havza büyüklüğüne göre en uygun taşkın debisi hesap yönteminin bulunması–Doğu Akdeniz Havzası örneği. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(3), 120–131. <https://doi.org/10.46740/alku.582794>
- Ertürk, E., & Kaya, N. (2019). Taşkın tehlike alanlarının oluşturulması: Trabzon ili Vakıfkebir ilçesi Kirazlı Deresi örneği. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 337–344. <https://doi.org/10.35341/afet.897364>
- Gülbaz, S. (2019). Sayısal modeller ile taşkın yayılım haritasının oluşturulması ve risk altında olan alanların belirlenmesi: Türkköşe Deresi örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 335–349. <https://doi.org/10.21324/dacd.491529>
- Gülcü, G. (2021). *Kentsel alanlarda yağmur suyu yönetiminin mekânsal bileşenlerinin Üsküdar Meydanı Havzası üzerinden değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Gündemir, S. (2006). *İki boyutlu kıyı alanı hidrodinamik model kalibrasyonu MIKE 21 HD örneği* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- İşler, S., Oğuz, E., & Durmuş, O. (2016, 21–24 Kasım). *Antalya Kemer ilçesi için sentetik yöntemlerle taşkın analizi* [Bildiri sunumu]. 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, Rize, Türkiye.
- Kadam, P., & Sen, D. (2012). Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal Of Hydraulic Engineering*, 18(2), 129–141. <https://doi.org/10.1080/09715010.2012.695449>
- Karataş, B. (2019). *Sivas 4 Eylül Barajının Yıkılma Senaryolarına Göre Taşkın Analizi ve Taşkın Tehlike Raporunun Hazırlanması* [Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Türkeş, M. (2012). Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 1–32. https://doi.org/10.1501/Csaum_00000000063
- Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. (2000). *Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri*. Turkish State Meteorological Service.
- Üyüküoğlu, M., Ünal, B., & Turan, B. (2015, 19–21 Kasım). *HEC-RAS Paket Programı İle Manavgat İlçesi Ilıca Deresi Taşkın Bölgesinin Modellenmesi*. 4. Su Yapıları Sempozyumu, Antalya, Türkiye.