ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ

DOĞAL AFETLER UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ

DOĞAL AFETLER VE ÇEVRE DERGİSİ

Journal of Natural Hazards and Environment



Cilt/Volume: 11 Sayı/Issue: 1 Yıl/Year: 2025 e-ISSN: 2528-9640

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Doğ Afet ve Çev Derg, (2025), Cilt:11 · Sayı:1 · Ocak 2025

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. 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)
Doç. Dr. Sedat DOĞAN (Ondokuz Mayıs 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)

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Doğ Afet ve Çev Derg, (2025), Cilt:11 · Sayı:1 · Ocak 2025

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ
RESEARCH ARTICLES

Bartın İlinde İçme/Kullanma Suları Üzerine Ön Çalışma
Preliminary Study On Drinking/Utility Water in Bartın Province
Niyazi Erdem Delikanlı ..... ***1 - 13***

Afet Lojistiği Kapsamında CBS ile Depo Yeri Belirleme: Kilis İli Örneği
Warehouse Location Determination with GIS within the Scope of Disaster Logistics: Example of Kilis Province
Büşra Kaya Zelzele, Mustafa Ergün ..... ***14 - 33***

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Konumsal ve Zamansal Analizi
Spatial and Temporal Analysis of Earthquake Events in Kahramanmaraş on 6 February 2023
Özer Akyürek ..... ***34 - 43***

MIKE Hidrolojik Model Programı ile Alanya İlçesi Demirtaş-Sedre Çayı Taşkın Bölgesinin Modellenmesi
Modeling of Alanya District Demirtaş-Sedre Stream Flood Zone with MIKE Hydrological Model Program
Mehmet Dikici, Tasvire Gökce ..... ***44 - 57***

Deprem Sonrası Adıyaman Gölbaşı'na Dair Gözlemler ve Mimarlık
Observations on Adıyaman Gölbaşı after the Earthquake and Architecture
Rojat Aksoy Işık ..... ***58 - 69***

Katı Atık Depolama Sahalarındaki Stabilite Sorunlarının Araştırılması
Investigating Stability Problems in Solid Waste Landfills
Gökçe Buse Güner Karaca, Şeyma Ordu, Ertuğrul Ordu ..... ***70 - 88***

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı AHS yöntemi ile Erzincan-Sivas Karayolu ve Çevresinin Heyelan Duyarlılık Analizi
Analysis of Landslides Susceptibility of the Erzincan-Sivas Road and Its Surrounding Region by the AHP Method based on Geographic Information Systems (GIS)
Betül Güneş, Ali Ümran Kömüşcü ..... ***89 - 103***

Depremde Hasar Gören Tarihi Yapıların Temsiliyetine Yönelik Bir Öneri: Pnömatik Sistem Kullanımı
Using Pneumatic Systems in the Representation of Historical Buildings Damaged in Earthquakes: The Case of Hatay
Esra İmamoğlu Yılmaz, Güray Yusuf Baş, Tayfur Emre Yavru, Semih Yılmaz ..... ***104 - 114***

MUSLE Yöntemi Kullanılarak Selin Sebep Olduğu Toprak Erozyonunun Tahmin Edilmesi: İğneada (Kırklareli) Seli Örneği (5.9.2023)
Estimation of Soil Erosion Caused by Flash Floods Using MUSLE Method: The Case of Igneada (Kırklareli) Flash Flood (5.9.2023)
Emre Özşahin, Mikayil Öztürk ..... ***115 - 134***

Kaya Düşmeleri Risklerine Karşı Esnek Kaya Bariyerlerinde Enerji Kapasitesi Tayini ve Uygun Yer Seçim Kriterleri
Determination of Energy Capacity and Suitable Location Selection Criteria in Flexible Rock Barriers Against Rockfall Risks
Eroltan Durmuş, Özkan Coruk, Ahmet Karakaş ..... ***135 - 156***

Nehir Ağzı Sediment Birikiminin Taşkın Riskine Etkisi: Sakarya Nehri Örneği
The Impact of River Mouth Sediment Deposition on Flood Risk: The Case Study of the Sakarya River
Osman Sönmez, Temel Temiz, Beytullah Demirci ..... ***157 - 169***

Deprem ve Türkiye Bağlamında Bibliyometrik Analiz
Bibliometric Analysis in the Context of Earthquake and Türkiye
İbrahim Halil Çelik ..... ***170 - 180***

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Doğ Afet ve Çev Derg, (2025), Cilt:11 · Sayı:1 · Ocak 2025

ARAŞTIRMA MAKALELERİ
RESEARCH ARTICLES

Bursa'nın Hava Kalitesi: IDW Jeoistatistik Tekniğini Kullanarak PM10, PM2.5, NO2 ve SO2 Kirleticilerinin Zamansal ve Mekansal Değerlendirilmesi
Air Quality of Bursa: Temporal and Spatial Evaluation of PM10, PM2.5, NO2 and SO2 Pollutants Using IDW Geostatistical Technique
***Duygu Arıkan İspir, Ferruh Yıldız* ..... 181 - 193**

İklim Krizinde Hidrometeorolojik Afetler: Türkiye'de Bölgesel Bir Afet Envanter Çalışması
Hydrometeorological Disasters in the Context of the Climate Crisis: A Regional Disaster Inventory Study in Türkiye
***Mustafa Kemal Yaşar, Mahnaz Gümrükçüoğlu Yiğit*..... 194 - 205**

Afetlerde Aydınlatma, Haberleşme ve Enerji İhtiyacının Tek Noktadan Karşılanması için Şebeke ve Direk Tasarımı
Design of Network and Pole for Meeting Lighting, Communication, and Energy Needs from a Single Source in Disasters
***Levent Aksoy, İlknur Yardımcı Coşkun* ..... 206 - 219**

Antalya İlinde Yüzey Sıcaklıklarındaki Değişimler ve Orman Yangınları ile İlişkisi
Changes in Surface Temperatures and Their Relationship with Forest Fires in Antalya Province
***Yasin Furkan Şenlik, Erkan Yılmaz* ..... 220 - 248**

Ankara'da Partikül Madde (PM_{10}) ve Kükürt Dioksit (SO_2) Konsantrasyonlarının İklim Parametreleri İle Mekânsal-Zamansal Analizi
Spatial-Temporal Analysis of Particulate Matter (PM_{10}) and Sulphur Dioxide (SO_2) Concentrations in Ankara Using Climate Parameters
***Olgu Aydın, Nussaïbah Begum Raja*..... 249 - 267**

Meriç Nehir Havzası'ndaki Hidrometeorolojik Değişkenlerin Uzun Dönem Eğilimleri için Karşılaştırmalı Mekansal ve Zamansal Analizi
A Comparative Spatiotemporal Analysis for Long-Term Trends of Hydrometeorological Variables in Maritsa River Basin
***Mehmet Seren Korkmaz, Kevser Merkür Başkesen, Ertuğrul Sunan* ..... 268 - 289**

3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin İncelenmesi
Investigation of the Effect of Restitution Coefficient on 3-Dimensional Rockfall Analyses
***İbrahim Uykun, Mutluhan Akın, Ogün Ozan Varol* ..... 290 - 317**

İstanbul Asya Yakası'nda DMA Tabanlı Fizikî Su Kayıpları Yönetimi ve Altyapı Sızıntı Endeksi Analizi
DMA Based Physical Water Loss Management and Infrastructure Leakage Index Analysis in Asian Side of Istanbul
***Mehmet Melih Koşucu* ..... 318 - 326**

İçmesuyu Şebekelerinde Su Kayıplarının Azaltılması İçin Basınç Kontrol Yönetimi Stratejisinde Basınç Dalgalanmalarının En Uygun Seviyesinin Tanımlanması
Defining the Optimal Level of Pressure Fluctuations at Pressure Control Management Strategy for Reducing Water Losses in Water Networks
***Talha İbrahim Arduçoğlu, Furkan Boztaş, Mahmut Fırat*..... 327 - 339**

Afet ve Acil Durum Toplanma Alanlarının İncelenmesi ve Potansiyel Alanların Önerilmesi: Trabzon Akçaabat Örneği
Examination of Disaster and Emergency Assembly Areas and Recommendation of Potential Areas: The Case of Akçaabat Trabzon
***Gülten Kara, Kadir Kaan Yavruoğlu* ..... 340 - 353**

DERLEME
REVIEW

Dirençli Kentler: Mekânsal Planlama ve Ulaşım
Resilient Cities: Spatial Planning and Transportation
***Arzu Maltaş Erol*..... 354 - 365**

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 1–13, DOI: 10.21324/dacd.1428528

Bartın İlinde İçme/Kullanma Suları Üzerine Ön Çalışma

Niyazi Erdem Delikanlı[1,*]

[1]*Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın.*

Özet

İçme suları şebeke hatlarındaki problemler, su kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, arıtma tesisi çıkışında elde edilen uygun kalitedeki su, uç noktada kabul edilemeyecek düzeye ulaşabilir. Su kaynaklı mikrobiyal kirlenmenin önüne geçebilmek adına dezenfeksiyon yöntemleri uygulanmaktadır. Klor ile dezenfeksiyon, mikrobiyal kirlenmeyi önlerken su içerisinde bulunan kirleticilerle etkileşime girerek çeşitli problemlere sebep olabilir. Bartın ili hizmet alanı içerisinde yer alan 20 farklı mahalleden, tesadüfi olarak seçilmiş ev, cami, gıda işletmeleri ve sanayi işletmelerinden Mart ve Haziran ayları içerisinde aynı gün su numuneleri alınarak, bulanıklık, renk, toplam çözünmüş katı, serbest ve toplam klor analizleri yapılmıştır. Bulanıklık değeri, 17 noktada "TS 266" ve "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" sınır değeri olan 1 NTU değerinden yüksek bulunmuştur. Renk parametreleri incelendiğinde en yüksek renk, 17 PtCo değeri ile Cumhuriyet Mahallesi'nde bulunmuştur. 8 mahallede serbest klor miktarı mevzuat sınır değeri olan 0,2 mg/L değerinden düşüktür. Ayrıca, 4 mahallede serbest klor miktarları 2,8 - 3,48 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, aynı su dağıtım şebekesinde bulunan farklı noktalardaki ölçüm parametreleri arasında belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Bunun nedeninin şebeke hatlarındaki bozukluklar olduğu düşünülmektedir. Şebeke hatlarının onarımı ve yenilenmesi yerine klorlama miktarının artırılarak halk sağlığının korunmasının amaçlanması, ancak geçici bir çözüm olacaktır.

Anahtar Sözcükler
İçme Suyu, Kullanma Suyu, Şebeke Problemleri, Bartın İli Şebeke Suyu

Preliminary Study On Drinking/Utility Water in Bartın Province

Abstract

Problems in drinking water network lines can affect water quality. For this reason, the water of appropriate quality obtained at the outlet of the treatment plant may reach unacceptable levels at the end point. Disinfection methods are applied to prevent waterborne microbial contamination. While disinfection with chlorine prevents microbial contamination, it may cause various problems by interacting with pollutants in the water. Turbidity, color, total dissolved solids, free and total chlorine analyses were performed by taking water samples on the same day in March and June from randomly selected houses, mosques, food establishments, and industrial establishments from 20 different neighborhoods within the service area of Bartın province. The turbidity value was found to be higher than 1 NTU, which is the limit value of "TS 266" and the "Regulation on Water Intended for Human Consumption" at 17 points. When the color parameters were examined, the highest color was found in Cumhuriyet Neighborhood with a value of 17 PtCo. In 8 neighborhoods, the amount of free chlorine is lower than the regulatory limit value of 0.2 mg/L. In addition, in 4 neighborhoods, free chlorine amounts were determined in the range of 2.8 - 3.48 mg/L. When the results are analyzed, there are significant differences between the measurement parameters at different points in the same water distribution network. The reason for this is thought to be the defects in the network lines. Instead of repairing and renewing the network lines, it is recommended to increase the amount of chlorination to protect public health.

Keywords
Drinking Water, Potable Water, Pipeline Problems, Bartın Main Pipeline

1. Giriş

Ülkemiz su kaynakları açısından; kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 2000 yılında 1652 m³, 2009 yılında 1544 m³, 2021 yılında ise 1323 m³, 2022 yılında 1322 m³ ile günümüzde su kısıtı bulunan ülkeler kategorisinde yer almaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2022). Buna karşın, hızlı kentleşmenin ülkemizi hazırlıksız yakalaması ve plansız kentleşme nedeniyle meydana gelen altyapı yetersizlikleri ve su kaynaklarının korunamaması gibi problemlere yol açmıştır. "Sağlıklı su, dengeli mineral dağılımı olan, pestisit kalıntıları ve organik maddeler içermeyen, fiziksel ve kimyasal özellikleri belirli kalite parametrelerine uyan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemeyen su olarak kabul edilir" şeklinde ifade edilmektedir (Begum vd., 2009; Yılmaz vd., 2017).

İçme suyu kaynakları farklı şekillerde kirlenebilmektedir. Yüzeysel su kaynaklarının kalitesi ve miktarı, iklimsel ve jeolojik faktörlerin bileşimine bağlıdır (Oğuz, 2015). Yağışlarla birlikte, farklı miktar ve çeşitlerde kirleticiler su

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (378) 5011000 Faks: +90 (378) 5011021
E-posta: edelikanli@bartin.edu.tr (Delikanlı N.E.)

Gönderim Tarihi / Received : 30/01/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 14/08/2024

kaynaklarına taşınabilmektedir. Yüzeysel su kaynaklarının kirlenmesine neden olan aktiviteler, yeraltı su kaynaklarını birincil olarak etkileyemezler. Yüzeyden yeraltına sızan su, filtrasyon, seyrelme, oksidasyon gibi olaylardan etkilenmektedir. Su tablasının altında olan kirletici etkiler, yeraltı suyu kalitesini birincil olarak etkileyen aktivitedir (Yıldırım & Topkaya, 2005). Yıldırım ve Topkaya, Antalya ilinde yaptıkları çalışmada, yeraltı suyu kirleticilerini etkileyen faktörleri; düdenler, akaryakıt istasyonları, sanayi tesisleri, çöp depolama sahaları ve fosseptikler olarak belirtmişlerdir (Yıldırım & Topkaya, 2005).

Kentleşme ve sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte, oluşan çevre kirliliği de aynı oranda artmaktadır. Kirliliğin artmasıyla birlikte, kaliteli ve güvenilir suya ulaşmak gittikçe güçleşmektedir. Kentleşmenin yoğun olduğu şehirlerde, kent sakinlerinin kaliteli suya ulaşması için arıtma tesisleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, su şebeke iletim hatları, gerek su kayıplarının önlenmesi, gerek su kalitesinin korunması açısından şehir içme/kullanma sularında büyük önem arz etmektedir. İçme suyu şebeke iletim hatlarının dayanıklılığı, ömrü, bakım, onarım ve montaj kolaylığı gibi özellikleri, şehir su kalitesinde belirleyici olmakta ve arıtılan suyun şebeke iletim hattındaki son noktasına kadar aynı kalitede iletilmesi de oldukça güçleşmektedir.

Şebekelerde fiziki kayıplar; iletim, dağıtım, depo, çeşitli sızmalar ve kaçak kullanımdan ileri gelebilmektedir. Fiziki kayıplar yaşandığı takdirde, şebeke hattında oluşan basınç düşmesi; kırık, çatlak ve gözeneklerden, ek ve bağlantı yerlerinden yer altında bulunan borunun içerisine toprakta bulunan kirleticilerin sızmasına neden olabilmektedir. Toprak nemi seviyesi, toprak ile boru içi arasında bir basınç farkı oluşturabileceğinden, şebeke suyunun kirlenme riski artabilir (Yayan, 2015). Bu bağlamda, şebekelerde, iletim hatlarında, depolarda, insan sağlığını korumak adına çeşitli dezenfeksiyon metotları uygulanmaktadır. Dezenfeksiyon, göl ve nehir gibi yüzeysel su kaynaklarından patojen mikroorganizmaları bertaraf ederek daha güvenli ve kaliteli bir su üretmek için gerçekleştirilmektedir. Fakat uygulanan metotların da oluşturacağı etkiler ölçülmeli ve belirlenmelidir. İçme suyu kaynaklarının klorla dezenfeksiyonu sonucunda, trihalometanlar (THMs) ve haloasetik asitler (HAAs) gibi önemli dezenfeksiyon yan ürünleri meydana gelmektedir (Özdemir, 2022).

Sağlık Bakanlığı'nın 17/2/2005 tarihli ve 25730 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmeliği'nde, "*İçme-kullanma sularının dezenfeksiyonunda klor ve klorlu bileşikler kullanılır, uç noktada yapılacak ölçümlerde serbest klor düzeyinin 0,2-0,5 mg/L olması sağlanır. Deprem ve sel gibi olağanüstü durumlar ile kaynak, depo ve şebeke sistemi gibi su yapılarında oluşan arızalanmalara bağlı olarak yapılan su kesintilerinde, şebekenin en uç noktasında serbest klor düzeyi en fazla 1,0 mg/L olacak şekilde klorlama yapılabilir.*" denmektedir. Bu bağlamda, serbest klor düzeyinin 0,2-0,5 mg/L düzeyinde olması istenmektedir. Ülkemiz yönetmelik ve standartlarında içme sularında bazı parametreler için limit değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ülkemiz yönetmelik ve standartlarında içme sularında bazı parametreler için limit değerleri

Parametre	**Birim**	**İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik**	**TS 266 (Türk Standartları Enstitüsü, 2005)**
Renk	Pt-Co	-	20
Bulanıklık	NTU	1	1
Koku	-	Yok	Yok
Tat	-	Normal	Normal
pH	-	6,5-9,5	6,5-9,5
Elektriksel İletkenlik	µS/cm	2500	2500
Serbest Klor	mg/L	0,2-0,5	-

1.1. Bartın Şebeke İçme-Kullanma Suyu ve Kavşak İçme Suyu Farkı

2020 yılı içme suyu mevcut durum raporunda, Bartın'da bir yıllık dönemde Kavşak Suyu çeşmeleri dahil 3.718.841 m³ civarında içme ve kullanma suyu tüketildiği ifade edilmiştir. Bu miktarın 2019 yılında 3.626.990 m³ olduğu belirtilmiştir. Kavşak Suyu, 1948 yılından beri Bartın, Amasra ve ikisinin arasındaki köylerin içme suyunu sağlayan pınarın ve Bartın Belediyesi tarafından mahalle çeşmeleri ve taşıma yoluyla Bartın halkına ücretsiz dağıtılan doğal yeraltı suyunun adıdır (Kavşak Suyu, 2023). Günümüzde hala Bartın Belediyesi tarafından mevcut su şebekesinden ayrı bir şebeke ile mahalle çeşmelerine ve su tankerleri ile mahalle çeşmesi bulunmayan bölgelere taşınarak halka sunulmaktadır. Bartın ilinin içme suyunu Kavşak Suyu, içme/kullanma suyunu ise şebeke suyu oluşturmaktadır.

Bartın'da, bitkisel ve hayvansal üretim noktasında ürün çeşitliliği bulunmaktadır (Bartın Ticaret ve Sanayi Odası, 2023). Bartın şehir merkezinde, hayvancılık yaygın olmakla birlikte, hayvan atıkları açık arazi üzerinde depolanmaktadır. Bu durum, yağışlarla birlikte hayvan atıklarından ileri gelen kirleticilerin yeraltına sızmasına neden olabilmektedir.

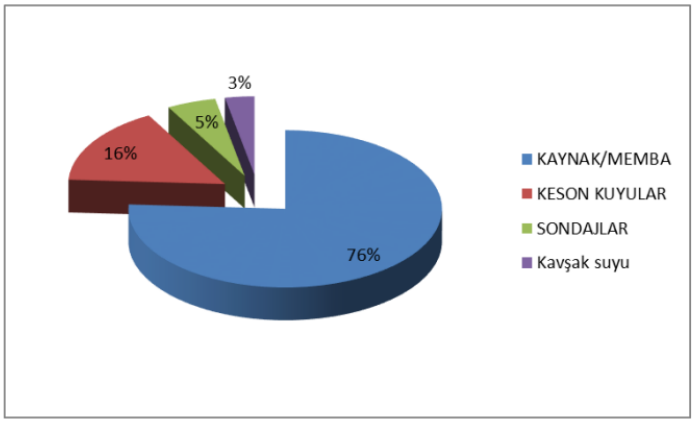
Bartın ilinin ana içme ve kullanma suyu kaynağı, Ulupınar-Bahçecik membasıdır. Kaman köyünde de Kavşak içme suyu membası bulunmaktadır (Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2021). Bartın ilinde hane çeşmelerinden akan su "*içme/kullanma suyu*" olarak, bazı sokak çeşmelerinden ve tankerlerle dağıtımı yapılan Kavşak Suyu ise "*içme suyu*" olarak farklı şebekelerle dağıtılmaktadır.

Bu sebeple, Bartın ilinde halk, Kavşak Suyunu şebeke suyu gibi değerlendirmemekte, sadece içme ve gıda amaçlı kullanmaktadır. Çalışma kapsamında analizleri yapılan şebeke, belediyenin hane ve işyerlerine dağıttığı ana su hattıdır.

Bartın Belediyesi 2022 Faaliyet Raporu'nda, şehir şebeke suyu arıtması yapmakta olan 3 adet paket arıtma tesisi olduğu ve toplam kapasitesinin 33.500 m³/gün olduğu belirtilmiştir (Bartın Belediyesi, 2023). Küresel ısınma, kuraklık durumları, mücavir alanların genişlemesi, turizm vb. nüfus artış olaylarına karşı baraj ve gölet gibi ilave rezerv su kaynakları için de yatırım yapılması gerekmektedir (Bartın Belediyesi, 2023).

Bartın Belediyesi faaliyet raporunda, 2020 yılı için kayıp-kaçak oranının %35 olduğu belirtilmiştir. İsale hattındaki vantuzlardan ve mekanik arızalardan kaynaklanan kaçaklardan dolayı, suyun şehre kadar isalesinin sağlanmasında sapmalar olduğu belirtilmiştir. Arıtma tesisleri çıkış suyu bulanıklık değerinin 5 NTU'nun altında olduğu ifade edilmiştir. Buna karşın, su kalitesinin mevsimsel değişmelere bağlı olarak farklılık gösterdiği açıklanmıştır (Bartın Belediyesi, 2020).

Bartın ili nüfusunun %99'u içme suyu şebekesinden faydalanmaktadır. Bartın Belediyesi tarafından temin edilen içme ve kullanma suyunun yaklaşık %76'sı Ulupınar-Bahçecik kaynağından, %16'sı keson kuyularından, %5'i sondajlardan ve %3'ü de Kavşak İçme Suyu membasından elde edilmektedir (Şekil 1) (Bartın Belediyesi, 2023). Kavşak suyunun, farklı iletim hatları ve taşıma yoluyla kullanıcılara ulaştırılması sebebiyle, şebeke dağıtım suyundan bağımsız değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında Kavşak suyu dahil edilmemiştir.



Şekil 1: Bartın ili 2022 yılı belediyeler tarafından içme ve kullanma suyu şebekesi ile dağıtılmak üzere temin edilen su miktarının kaynaklara göre dağılımı (Bartın Belediyesi, 2023)

Kanalizasyon ve şebeke suyuna erişim oranı, Bartın ve Zonguldak'ta Türkiye ortalamasının altındadır. Özellikle, ortalamanın en düşük olduğu Bartın kent merkezinde şebeke suyunun kullanılması ile ilgili ciddi bir sorun vardır. Şebeke suyu, kentte yaşayanlar tarafından büyük ölçüde sadece temizlik amaçlı kullanılabilmektedir (Nas, 2019).

Nas (2021), Bartın'da memnuniyet düzeylerinin araştırılması konusunda yapmış olduğu çalışmada, hava kirliliği, şehir içi ulaşım, şebeke suyu, sebze-meyve ve giyim fiyatları konusunda olumsuz değerlendirmelere yol açan sorunlara rastlamıştır. Bu durum, bireylerin kentsel yaşama uyum sağlama ve kentle bütünleşme düzeylerini olumsuz yönde etkiler; ayrıca yerel ve merkezi yönetimlere karşı politik bir tutumun oluşmasına yol açar. Kentsel yaşama dair olumsuz ekonomik ve politik bir bakış açısı, birey veya grupların başka bir kente göç etme eğilimlerini gündeme getirir (Nas, 2021).

Çalışmanın amacı, Bartın ilindeki şebeke arıtma tesisi çıkışında elde edilen suyun uç noktaya ulaşıncaya kadar yapısında meydana gelen farklılıkların belirlenmesinde bir ön çalışma yapmaktır. Şebeke suyunun içme suyu olarak kullanılabilecek derecede arıtıldığı, fakat içme suyu olarak kullanılamadığı; içme suyunun farklı bir kaynaktan, farklı bir şebeke ile mahalle çeşmelerine dağıtıldığı düşünüldüğünde, şebeke hattında çeşitli altyapı problemlerinin olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, halk sağlığının korunması için şebeke hattında uygulanan klor ile dezenfeksiyonun çeşitli problemlere yol açabileceği tartışılmıştır. Çalışma kapsamında, Bartın kent merkezinde su dağıtım şebekesinin 20 farklı mahallesinden tesadüfi olarak seçilmiş ev, cami, gıda işletmeleri ve sanayi işletmelerinden alınan numunelerde, fiziksel ve kimyasal parametrelerden bazıları incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

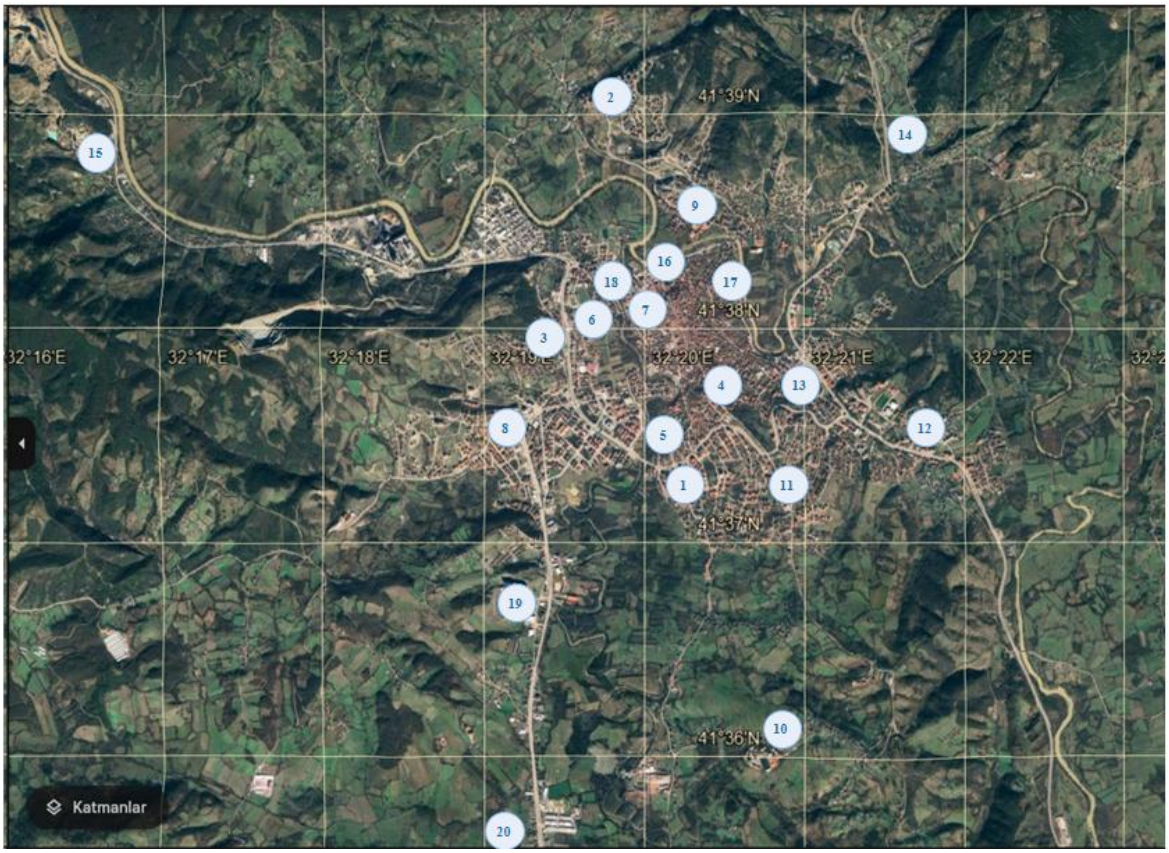
Çalışma kapsamında, Bartın kent merkezinde bulunan 20 farklı mahalleden tesadüfi olarak seçilmiş ev, cami, gıda işletmeleri ve sanayi işletmelerinden aynı gün içerisinde su numuneleri alınmıştır. Alınan su örnekleri, analizleri yapılana kadar Bartın Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'nda +4°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir. Numune alınan noktalar ve numune noktalarının kod numaraları Tablo 3 ve Şekil 3'te verilmiştir. Alınan numunelerin herhangi bir girişime ve bulaşa sebebiyet vermemesi açısından, örnek alınmadan önce numune kapları saf su ile yıkanmıştır.

Ayrıca, örnek kapları (1 litrelik renkli cam numune kapları) otoklavda (Nüve steamArt OT 40 L) 1 atm basınç altında 200°C'de 2 saat süreyle sterilize edilmiştir.

Bunların yanı sıra, numune alınan nokta önce alevle sterilize edilmiş, sonra bir müddet akıtılıp boşluk kalmayacak şekilde doldurularak ve kapakları kapatılarak numuneler alınmıştır. Örneklerde, bulanıklık, renk, pH, toplam çözünmüş katı, serbest klor ve toplam klor analizleri yapılmıştır. Bulanıklık ölçümleri Hach / 2100Q cihazı ile, renk ölçümleri Hach DR3900 spektrofotometre ile, pH ölçümleri Mettler Toledo SG78 ile, serbest ve toplam klor analizleri "Matriks® Serbest ve Toplam Klor Test Kiti" kullanılarak 0,03-6 mg/L ölçüm aralığında Hach DR6000 spektrofotometre ile yapılmıştır. Örnekler, aylık toplam yağış miktarı ortalamasının benzer ve sel afet riskinin düşük olduğu dönemler olması nedeniyle 2023 Mart ve 2023 Haziran ayları içerisinde alınmıştır ve sonuçlar ortalama değerleri göstermektedir.

Tablo 3: Numune alınan noktalar ve kod numaraları

1	Karaköy Mahallesi	11	Esentepe Mahallesi
2	Hürriyet Mahallesi	12	Çaydüzü Mahallesi
3	Aladağ Mahallesi	13	Tuna Mahallesi
4	Demirciler Mahallesi	14	Karaçay Mahallesi
5	Kemerköprü Mahallesi	15	Gürgen Pınarı Mahallesi
6	Gölbucağı Mahallesi	16	Köyortası Mahallesi
7	Orta Mahallesi	17	Okulak Mahallesi
8	Cumhuriyet Mahallesi	18	Kırtepe Mahallesi
9	Orduyeri Mahallesi	19	Şiremir Çavuş Mahallesi
10	Ağdacı Mahallesi	20	Gecen Mahallesi



Şekil 3: Numune alınan noktalar

3. Bulgular

3.1. Bulanıklık

Ülkemiz mevzuatlarındaki "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik"te, bulanıklık hakkında "Yüzeysel suyun arıtılması durumunda Bakanlık, arıtımından sonra sudaki bulanıklığın 1,0 NTU (Nefelometrik Bulanıklık Üniteleri) değerini aşmamasına dikkat eder." şeklinde ifade edilmiştir.

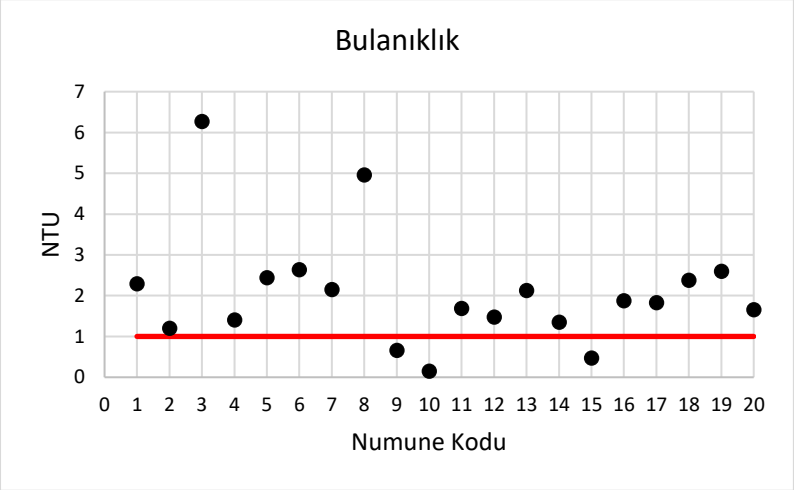
Alınan su örnekleri incelendiğinde, bulanıklık parametresinin Aladağ Mahallesi'nde 5 NTU değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Aladağ Mahallesi'nde elde edilen 6.27 NTU bulanıklık değeri, muhtemelen şebeke hattında meydana gelen arızalar nedeniyle borulara dışarıdan kirli su sızması veya eski borulardan kaynaklanan iç tortu birikimlerinin yer değiştirmesi sonucu oluşmuştur. Ayrıca, yağışlı dönemlerde yüzeysel suların şebeke suyuna karışması da bulanıklık artışına neden olabilir.

Cumhuriyet Mahallesi, 4,96 NTU değeri ile ikinci en yüksek bulanıklığa sahip olan mahalle olmuştur (Tablo 4, Şekil 4). 20 noktanın 17 noktasında, bulanıklık değerleri sınır değer olan 1 NTU'nun üzerindedir. Sadece Orduyeri, Ağdacı ve Gürgen Pınarı mahallelerinde 1 NTU'dan düşük bulunmuştur. Tüm mahallelerde ortalama bulanıklık değeri 2,08 NTU olarak tespit edilmiştir ve ülkemiz mevzuatlarında yer alan içme suyu bulanıklık sınır değeri olan 1 NTU'nun üzerindedir.

Tablo 4: Numune alınan noktalarda tespit edilen bulanıklık değerleri (NTU)

Mahalle	Bulanıklık (NTU)	Mahalle	Bulanıklık (NTU)
1-Karaköy Mahallesi	2,29	11-Esentepe Mahallesi	1,69
2-Hürriyet Mahallesi	1,2	12-Çaydüzü Mahallesi	1,48
3-Aladağ Mahallesi	6,27	13-Tuna Mahallesi	2,13
4-Demirciler Mahallesi	1,41	14-Karaçay Mahallesi	1,35
5-Kemerköprü Mahallesi	2,44	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	0,47
6-Gölbucağı Mahallesi	2,64	16-Köyortası Mahallesi	1,88
7-Orta Mahallesi	2,15	17-Okulak Mahallesi	1,83
8-Cumhuriyet Mahallesi	4,96	18-Kırtepe Mahallesi	2,38
9-Orduyeri Mahallesi	0,66	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	2,6
10-Ağdacı Mahallesi	0,15	20-Gecen Mahallesi	1,66

İçme suyu bulanıklığı, bir dizi sağlık sorununa sebep olmaktadır (Gaya vd., 2017; El Bouaidi vd., 2022). Bulanıklık, kötü kaynak suyu kalitesi, kötü arıtma ve dağıtım sistemlerinde çökeltilerin ve biyofilmlerin bozulması veya ana arızalar ve diğer arızalar yoluyla kirli su girişinden kaynaklanabilir. Büyük belediye kaynakları, sürekli olarak görünür bulanıklığı olmayan su üretmelidir (dezenfeksiyondan önce her zaman 0,5 NTU'yu sağlamalı ve ortalama 0,2 NTU veya daha az olmalıdır) (World Health Organization, 2022). Ancak, özellikle kaynakların sınırlı olduğu küçük kaynaklar bu seviyelere ulaşamayabilir. Görünür bulanıklık, içme suyunun kabul edilebilirliğini azaltır. Bulanıklığa katkıda bulunan çoğu partikül sağlık açısından bir önemi olmamasına rağmen (tehlikeli kimyasal ve mikrobiyal kirleticilerin varlığına işaret edebilir), birçok tüketici bulanıklığı güvenlikle ilişkilendirir ve bulanık suyu içmek için güvensiz olarak değerlendirir (World Health Organization, 2022). Bulanıklıkla ilgili şikâyetler her zaman araştırılmalıdır çünkü bunlar dağıtım sistemlerindeki önemli hataları veya ihlalleri yansıtıyor olabilir. Deneysel çalışmalar sonucunda, arıtma tesisinde yeterli arıtmanın sağlanamadığı veya suyun arıtma tesisinden çıktıktan sonra, son noktada kullanıcıya ulaşana kadar çeşitli altyapı yetersizlikleri nedeniyle şebekede problemler olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4: Numune alınan noktalarda tespit edilen bulanıklık değerleri (NTU)

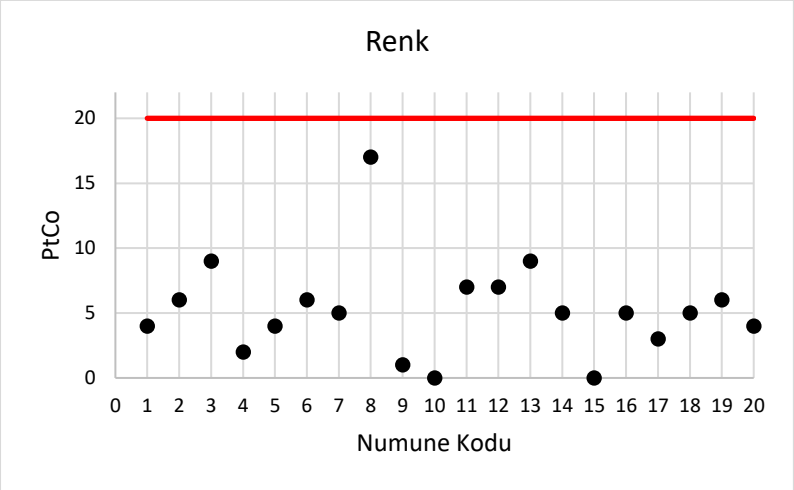
3.2. Renk

Renk problemleri, içme suyu arıtma süreçlerinde çeşitli yöntemler kullanılarak giderilebilir. Filtrasyon, koagülasyon/flokülasyon, aktif karbon adsorpsiyonu ve dezenfeksiyon gibi işlemler, suyu renk ve diğer kirliliklerden arındırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Ayrıca, su kaynağının korunması ve kirlilik kaynaklarının kontrol altına alınması da renk problemlerini önlemek için önemlidir (Rahman & Gagnon, 2014). Analizi yapılan numunelerde, renk parametreleri incelendiğinde en yüksek renk oranının 17 PtCo değeri ile Cumhuriyet Mahallesi'nde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5, Şekil 5). Tüm mahallelerdeki ortalama renk değeri 5,25 PtCo'dur. Ağdacı ve Gürgen Pınarı Mahallelerinde renk tespit edilmemiştir. Tüm değerler, TS 266 sınır değeri olan 20 PtCo'nun altındadır.

İçme suyunda ideal olarak görünür renk olmamalıdır. İçme suyundaki renk, genellikle toprağın humus fraksiyonuyla ilişkili renkli organik maddelerin (öncelikle humik ve fulvik asitler) varlığından kaynaklanmaktadır. Renk, doğal safsızlıklar veya korozyon ürünleri olarak demir ve diğer metallerin varlığından da güçlü bir şekilde etkilenir. Doğal organik karbondan (örneğin hümikler) kaynaklanan yüksek renk, dezenfeksiyon işlemlerinden kaynaklanan yan ürünlerin üretme eğiliminin yüksek olduğunu da gösterebilir (World Health Organization, 2022). Cumhuriyet Mahallesinde ölçülen 17 PtCo renk değerinin yüksek olmasının sebebi, su kaynağına karışan organik maddeler veya demir gibi metallerin varlığı olabilir. Özellikle eski veya korozyona uğramış borulardan suya metal iyonlarının karışması renk parametresinde artışa yol açar. Ayrıca, yüzey sularının şebeke suyuna karışması da renkte artışa neden olabilir.

Tablo 5: Numune alınan noktalarda tespit edilen renk değerleri (PtCo)

Mahalle	Renk (PtCo)	Mahalle	Renk (PtCo)
1-Karaköy Mahallesi	4	11-Esentepe Mahallesi	7
2-Hürriyet Mahallesi	6	12-Çaydüzü Mahallesi	7
3-Aladağ Mahallesi	9	13-Tuna Mahallesi	9
4-Demirciler Mahallesi	2	14-Karaçay Mahallesi	5
5-Kemerköprü Mahallesi	4	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	0
6-Gölbucağı Mahallesi	6	16-Köyortası Mahallesi	5
7-Orta Mahallesi	5	17-Okulak Mahallesi	3
8-Cumhuriyet Mahallesi	17	18-Kırtepe Mahallesi	5
9-Orduyeri Mahallesi	1	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	6
10-Ağdacı Mahallesi	0	20-Gecen Mahallesi	4



Şekil 5: Numune alınan noktalarda tespit edilen renk değerleri (PtCo)

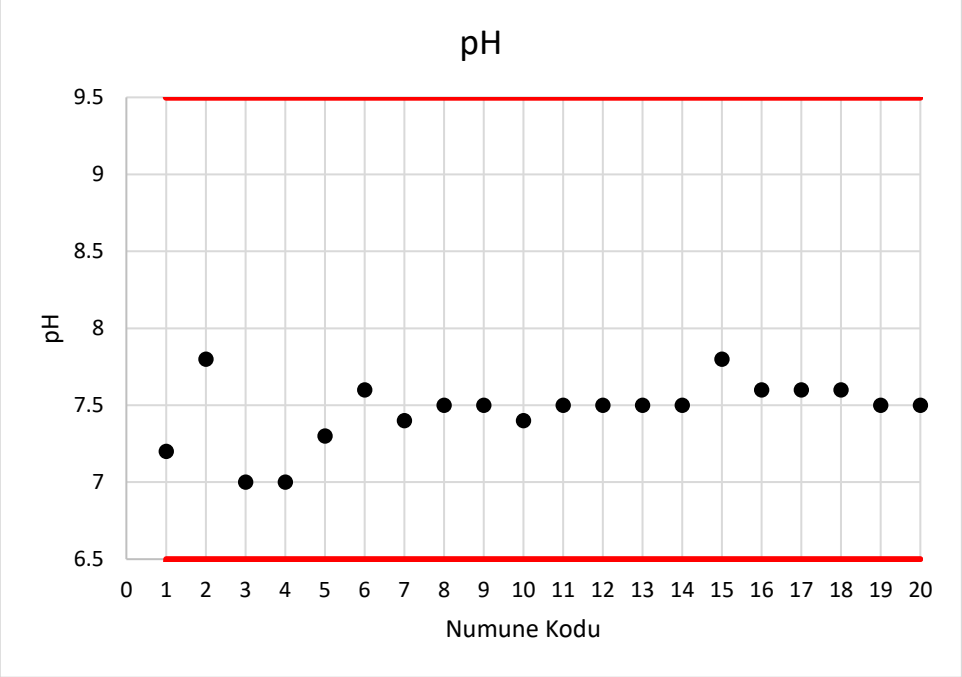
3.3. pH

pH, genellikle tüketiciler üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmasa da, en önemli operasyonel su kalitesi parametrelerinden biridir. Tatmin edici su arıtımı ve dezenfeksiyonu sağlamak için su arıtımının tüm aşamalarında pH kontrolüne dikkat edilmesi gerekir. 20 noktadaki pH değerleri incelendiğinde, tüm değerler mevzuat sınır değerleri arasında tespit edilmiştir. Tüm mahallelerdeki ortalama pH değeri 7,5'tir. En düşük pH, Aladağ ve Demirciler Mahallelerinde 7'dir. En yüksek pH, Hürriyet ve Gürgen Pınarı Mahallelerinde 7,8'dir. "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" sınır değerleri 6,5 ve 9,5 arasındadır (Tablo 6, Şekil 6).

Klor ile etkili dezenfeksiyon için pH tercihen 8'den az olmalıdır; ancak daha düşük pH'lı suyun (yaklaşık pH 7 veya daha düşük) aşındırıcı olma olasılığı daha yüksektir. Evsel su sistemlerinde, su şebekesi ve boruların korozyonunu en aza indirmek için dağıtım sistemine giren suyun pH'ı kontrol edilmelidir. Korozyonun en aza indirilememesi, içme suyunun kirlenmesine ve tadı ile görünümü üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Gerekli optimum pH, suyun bileşimine ve dağıtım sisteminde kullanılan yapı malzemelerinin niteliğine göre farklı kaynaklarda değişiklik gösterecektir; ancak genellikle 6,5-8,5 aralığındadır (World Health Organization, 2022).

Tablo 6: Numune alınan noktalarda tespit edilen pH değerleri

Mahalle	pH	Mahalle	pH
1-Karaköy Mahallesi	7,2	11-Esentepe Mahallesi	7,5
2-Hürriyet Mahallesi	7,8	12-Çaydüzü Mahallesi	7,5
3-Aladağ Mahallesi	7	13-Tuna Mahallesi	7,5
4-Demirciler Mahallesi	7	14-Karaçay Mahallesi	7,5
5-Kemerköprü Mahallesi	7,3	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	7,8
6-Gölbucağı Mahallesi	7,6	16-Köyortası Mahallesi	7,6
7-Orta Mahallesi	7,4	17-Okulak Mahallesi	7,6
8-Cumhuriyet Mahallesi	7,5	18-Kırtepe Mahallesi	7,6
9-Orduyeri Mahallesi	7,5	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	7,5
10-Ağdacı Mahallesi	7,4	20-Gecen Mahallesi	7,5



Şekil 6: Numune alınan noktalarda tespit edilen pH değerleri

3.4. Toplam Çözünmüş Katı Madde (TÇK)

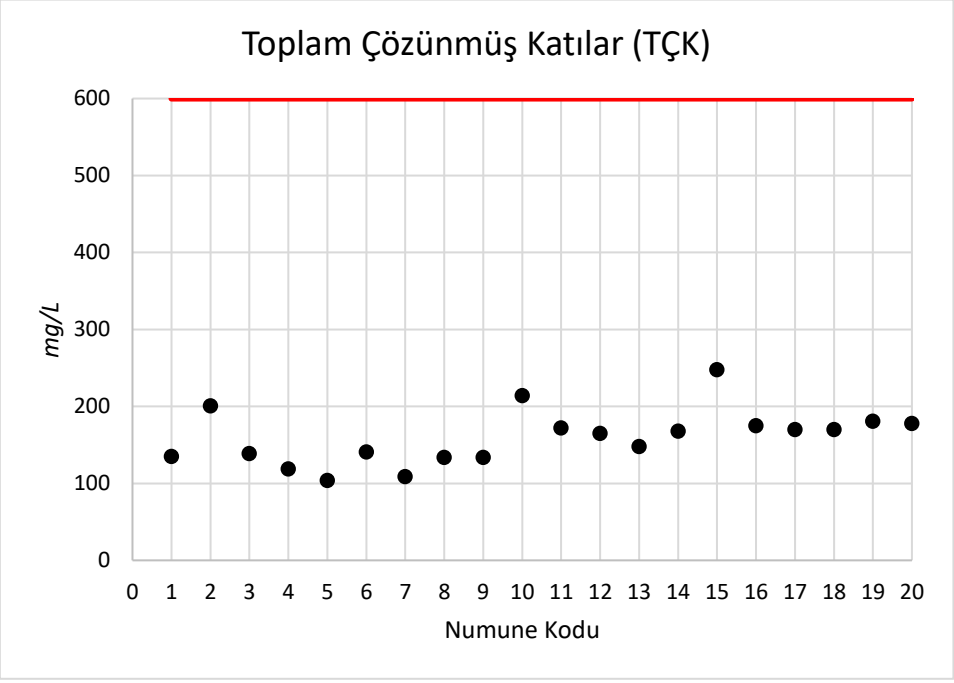
Toplam çözünmüş katı maddeler (TÇK), inorganik tuzlar (başlıca kalsiyum, magnezyum, potasyum, sodyum, bikarbonatlar, klorürler ve sülfatlar) ve suda çözünmüş az miktarda organik maddeden oluşur. Bununla birlikte, içme suyunda yüksek seviyelerde TÇK bulunması tüketiciler için sakıncalı olabilir. Toplam çözünmüş katı madde (TÇK) seviyesi yaklaşık 600 mg/L'den az olan suyun lezzetinin genellikle iyi olduğu kabul edilir; içme suyu, yaklaşık 1000 mg/L'den daha yüksek TÇK seviyelerinde önemli ölçüde ve giderek daha lezzetsiz hale gelir (World Health Organization, (2003, 2022). Su borularında, ısıtıcılarda, kazanlarda ve ev aletlerinde aşırı kireçlenme nedeniyle yüksek TÇK seviyelerinin varlığı tüketiciler için sakıncalı olabilir (World Health Organization, 2022). Çok düşük TÇK konsantrasyonlarına sahip sular da düz, yavan tadı nedeniyle tüketiciler tarafından kabul edilemez olabilir; ayrıca genellikle su tedarik sistemleri için aşındırıcıdır (World Health Organization, 2003). TÇK değerleri, 20 mahallede ortalama 249,99 mg/L olarak tespit edilmiştir (Tablo 7, Şekil 7).

TÇK'nın klorürler, sülfatlar, magnezyum, kalsiyum ve karbonatlar gibi belirli bileşenleri, su dağıtım sistemlerinde korozyonu veya kabuklaşmayı etkiler (Sawyer & McGraw, 1967). Yüksek TÇK seviyeleri (>500 mg/Litre), su borularında, su ısıtıcılarında, kazanlarda ve buharlı ütüler gibi ev aletlerinde aşırı kireçlenmeye neden olur (Tihansky, 1974). Bu tür kireçlenme, bu cihazların kullanım ömrünü kısaltabilir (McQuillan & Spenst, 1976).

Su kaynaklarındaki TÇK, doğal kaynaklardan, kanalizasyondan, kentsel ve tarımsal akıştan ve endüstriyel atık sulardan kaynaklanmaktadır. Yolların buzunu çözmek için kullanılan tuzlar da su kaynaklarının TÇK yüküne katkıda bulunabilir. 1955 ve 1970 yılları arasında, Amerika Birleşik Devletleri Burlington, Massachusetts'teki yeraltı suyunun tuzluluğunda, yolların buzunun çözülmesinden kaynaklanan on katlık bir artış kaydedilmiştir. Bu tarihten sonra buz çözücü kimyasalların kullanımı yasaklanmıştır (Meybeck vd., 1989). Ağdacı Mahallesi'nde TÇK değerinin bu kadar yüksek olması, suya karışan inorganik tuzlar, özellikle kalsiyum, magnezyum, klorür ve sülfat gibi iyonların fazla miktarda bulunmasından kaynaklanabilir. Bu durum, eski borulardan kaynaklanan korozyon ürünleri veya çevresel faktörlerin (örneğin, tuzlu su girişimi) etkisiyle meydana gelmiş olabilir.

Tablo 7: Numune alınan noktalarda tespit edilen TÇK değerleri (mg/L)

Mahalle	TÇK (mg/L)	Mahalle	TÇK (mg/L)
1-Karaköy Mahallesi	210,6	11-Esentepe Mahallesi	268,32
2-Hürriyet Mahallesi	313,56	12-Çaydüzü Mahallesi	257,4
3-Aladağ Mahallesi	216,84	13-Tuna Mahallesi	230,88
4-Demirciler Mahallesi	185,64	14-Karaçay Mahallesi	262,08
5-Kemerköprü Mahallesi	162,24	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	386,88
6-Gölbucağı Mahallesi	219,96	16-Köyortası Mahallesi	273
7-Orta Mahallesi	170,04	17-Okulak Mahallesi	265,2
8-Cumhuriyet Mahallesi	209,04	18-Kırtepe Mahallesi	265,2
9-Orduyeri Mahallesi	209,04	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	282,36
10-Ağdacı Mahallesi	333,84	20-Gecen Mahallesi	277,68



Şekil 7: Numune alınan noktalarda tespit edilen TÇK değerleri (mg/L)

3.5. Serbest ve Toplam Klor

İçme suyu kaynakları genellikle doğal olarak bakteri, virüs ve diğer mikroorganizmaları içerebilir. Bu mikroorganizmalar, hastalıklara neden olabilir ve sağlık açısından ciddi riskler oluşturabilir. Klor, içme suyunu dezenfekte etmek için kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. İçme suyuna klor eklenerek mikroorganizmaların büyümesi ve yayılması engellenir (Rao, 2022). Klor, suya eklendiğinde mikropları öldürebilen güçlü bir oksidandır. Bakterilerin, virüslerin ve parazitlerin hücre zarlarını ve genetik materyallerini tahrip ederek etkisiz hale getirir.

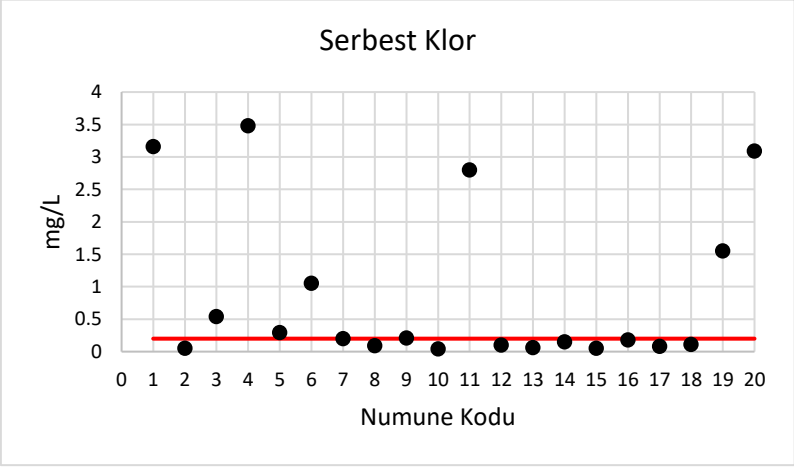
Bununla birlikte, klorun bazı dezavantajları da vardır. Klor, suya belirgin bir koku ve tat verebilir. Bazı insanlar bu koku ve tadı rahatsız edici bulabilir. Klor, su ile reaksiyona girerek yan ürünler oluşturabilir. Bu yan ürünlerden en yaygın olanı trihalometanlardır (Kitis vd., 2010). Trihalometanlar, uzun süreli maruz kalma durumunda sağlık riskleri taşıyabilir. Ancak, içme suyu standartlarında belirlenen limitler genellikle bu riskleri minimize edecek şekilde düzenlenir. Klor, bazı organik maddelerle reaksiyona girebilir ve zararlı bileşikler oluşturabilir. Özellikle bazı pestisitler ve endüstriyel atık maddeleri, klorla etkileşime girerek toksik bileşiklere dönüşebilir (Li vd., 2023).

Dezenfeksiyon, içme suyu arıtımının tamamlayıcı bir bileşenidir (Cortes & Marcos, 2018; Alexandrou vd., 2018). Ancak dezenfeksiyon sürecinde suyun mikrobiyolojik kalitesi iyileştirilirken, klor gibi dezenfektanlar doğal organik maddelerle (DOM) reaksiyona girerek sularda dezenfeksiyon yan ürünlerini (DYÜ) oluşturmaktadır (Chippi vd., 2018; Ersan vd., 2019). Sularda doğal olarak bulunan organik ve/veya inorganik maddeler, dezenfeksiyon sürecinde kullanılan dezenfektanlarla kasıtsız bir şekilde tepkime verme eğilimindedir. DYÜ'ler, içme suyu şebekelerinde dezenfeksiyon sürecinden sonra dezenfektanlarla öncül maddeler arasındaki tepkime sonucu oluşan genotoksik, sitotoksik ve karsinojenik yan ürünlerdir (Özgür vd., 2023). Sonuç olarak, klor, içme suyu dezenfeksiyonunda yaygın olarak kullanılan bir maddedir ve su kaynaklarının mikroorganizmalardan arındırılmasında önemli bir rol oynar. Ancak, suyun klorla dezenfekte edilmesi sırasında oluşabilecek yan ürünler ve kimyasal etkileşimler göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 8: Numune alınan noktalarda tespit edilen serbest klor değerleri (mg/L)

Mahalle	Serbest Klor (mg/L)	Mahalle	Serbest Klor (mg/L)
1-Karaköy Mahallesi	3,16	11-Esentepe Mahallesi	2,8
2-Hürriyet Mahallesi	0,05	12-Çaydüzü Mahallesi	0,1
3-Aladağ Mahallesi	0,54	13-Tuna Mahallesi	0,06
4-Demirciler Mahallesi	3,48	14-Karaçay Mahallesi	0,15
5-Kemerköprü Mahallesi	0,29	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	0,05
6-Gölbucağı Mahallesi	1,05	16-Köyortası Mahallesi	0,18
7-Orta Mahallesi	0,2	17-Okulak Mahallesi	0,08
8-Cumhuriyet Mahallesi	0,09	18-Kırtepe Mahallesi	0,11
9-Orduyeri Mahallesi	0,21	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	1,55
10-Ağdacı Mahallesi	0,04	20-Gecen Mahallesi	3,09

Alınan numunelerdeki serbest klor miktarları incelendiğinde, en yüksek değerlerin Demirciler Mahallesi'nde 3,48 mg/L, Karaköy Mahallesi'nde 3,16 mg/L, Gecen Mahallesi'nde 3,09 mg/L ve Esentepe Mahallesi'nde 2,8 mg/L olduğu bulunmuştur (Tablo 8). 29863 Sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te, serbest klor değerinin 0,2-0,5 mg/L aralığında olması istenmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, bu değerlere yakın veya değerleri sağlayabilen mahalleler, Aladağ, Kemerköprü, Orta, Orduyeri, Karaçay ve Köyortası Mahalleleridir. Hürriyet, Cumhuriyet, Ağdacı, Çaydüzü, Tuna, Gürgen Pınarı, Okulak ve Kırtepe Mahallelerinde serbest klor miktarı 0,2 mg/L'den düşüktür. Tablo 8 ve Şekil 8 incelendiğinde, serbest klor miktarlarında yüksek oranda farklılıklar bulunmaktadır. 20 mahallenin ortalama serbest klor miktarının 0,86 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Serbest klor miktarının yüksek olması, suyun mikrobiyolojik kontaminasyon riskini azaltmak için yapılan yoğun klorlama uygulamasının bir sonucudur. Ancak, bu kadar yüksek klor değerleri, suyun son kullanıcıya ulaşana kadar fazla miktarda klor eklenmesi veya şebeke hattında klorun homojen dağılmaması nedeniyle oluşabilir.

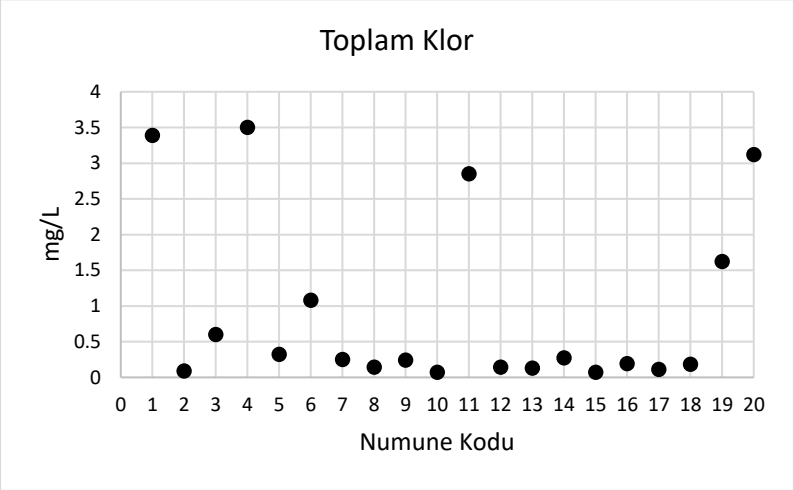


Şekil 8: Numune alınan noktalarda tespit edilen serbest klor değerleri (mg/L)

Toplam klor oranları incelendiğinde, serbest klor miktarlarına benzer sonuçlar göze çarpmaktadır. En yüksek değerlerin Demirciler Mahallesi'nde 3,5 mg/L, Karaköy Mahallesi'nde 3,39 mg/L, Gecen Mahallesi'nde 3,12 mg/L ve Esentepe Mahallesi'nde 2,85 mg/L olduğu bulunmuştur (Tablo 9). En düşük değerler ise, Hürriyet Mahallesi'nde 0,09 mg/L, Aladağ Mahallesi'nde 0,6 mg/L, Ağdacı ve Gürgen Pınarı Mahallelerinde 0,07 mg/L olarak tespit edilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde, serbest klor miktarlarında olduğu gibi yüksek oranda farklılıklar bulunmaktadır. 20 mahallenin ortalama toplam klor miktarının 0,92 mg/L olduğu hesaplanmıştır. Çoğu kişi, içme suyundaki klorun tadını veya kokusunu 5 mg/L'nin çok altındaki konsantrasyonlarda, bazıları ise 0,3 mg/L kadar düşük seviyelerde alabilmektedir. Klor için tat eşiği, sağlık temelli kılavuz değer olan 5 mg/L'nin altındadır (World Health Organization, 2022). Toplam klor değerinin yüksek olması, suyun dezenfeksiyon sürecinde fazla miktarda klor kullanıldığını ve bu klorun yan ürünleriyle birlikte suda kaldığını gösterir. Bu durum, hem halk sağlığı açısından hem de suyun tat ve kokusunda olumsuz etkilere yol açabilir. Fazla klorun varlığı, suyun arıtma tesisinden çıktıktan sonra da klorlamanın yapıldığını veya şebeke hattında klorlamanın düzensiz olduğunu gösterebilir.

Tablo 9: Numune alınan noktalarda tespit edilen toplam klor değerleri (mg/L)

Mahalle	Toplam Klor (mg/L)	Mahalle	Toplam Klor (mg/L)
1-Karaköy Mahallesi	3,39	11-Esentepe Mahallesi	2,85
2-Hürriyet Mahallesi	0,09	12-Çaydüzü Mahallesi	0,14
3-Aladağ Mahallesi	0,6	13-Tuna Mahallesi	0,13
4-Demirciler Mahallesi	3,5	14-Karaçay Mahallesi	0,27
5-Kemerköprü Mahallesi	0,32	15-Gürgen Pınarı Mahallesi	0,07
6-Gölbucağı Mahallesi	1,08	16-Köyortası Mahallesi	0,19
7-Orta Mahallesi	0,25	17-Okulak Mahallesi	0,11
8-Cumhuriyet Mahallesi	0,14	18-Kırtepe Mahallesi	0,18
9-Orduyeri Mahallesi	0,24	19-Şiremir Çavuş Mahallesi	1,62
10-Ağdacı Mahallesi	0,07	20-Gecen Mahallesi	3,12



Şekil 9: Numune alınan noktalarda tespit edilen toplam klor değerleri (mg/L)

4. Tartışma

Su arıtımında kullanılan kimyasallar ve suyla temas eden malzemeler, nihai suda kirleticilere sebep olabilir. Arıtma sürecinde, suya bilinçli bir şekilde katılan maddeler (doğrudan katkı maddeleri) ile arıtılmış suda yanlışlıkla bulunanlar (örneğin tuzlar, koagülant polimer kalıntıları veya monomerler) mevcuttur. Kloramin ve klor dezenfektan kalıntıları, özellikle bilinçli bir şekilde eklenen maddelerdir ve varlıkları belirli avantajlar sağlar. Diğerleri ise, dezenfektan kimyasalları ile normalde su içinde bulunan maddeler arasındaki kimyasal etkileşimler sonucu ortaya çıkan dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) gibi maddelerdir. Yüzme havuzlarında da oluşabilen bu yan ürünler, özellikle bu havuzlarda solunum ve deri yoluyla maruziyetin daha önemli olduğu durumlar olabilir (World Health Organization, 2006). Borulardan veya pirinç musluklardan sızan kurşun, bakır ve kaplamalardan kaynaklanan diğer kimyasallar gibi bazı maddeler, arıtma veya dağıtım süreçlerinde yüzeylerle temas sonucu suya karışabilir.

Bu katkı maddelerinin çoğu, hem doğrudan hem de dolaylı veya kasıtsız olarak, güvenli içme suyu üretim süreçlerinin bileşenleridir. İzleme ve yönetim yaklaşımı tercihen malzeme veya kimyasalın kontrolü yoluyla gerçekleştirilir. Arıtmada kullanılan kimyasalların kalıntılarını kontrol etmek ve DBP'lerin oluşumunu kontrol etmek için arıtma süreçlerini optimize etmek ve bu süreçlerin optimize kalmasını sağlamak önemlidir. Kalitesiz malzemelerden kaynaklanan kasıtsız kirlenme, en iyi şekilde arıtılmış suyun kalitesine sınırlar koymak yerine, ürünlerin bileşimini düzenleyen spesifikasyonların uygulanmasıyla kontrol edilirken, katkı maddelerinin uygunsuz kullanımından kaynaklanan kirlenme kullanım kılavuzuyla ele alınabilir. Benzer şekilde, boru kalitesine ilişkin düzenlemeler, suyun sızıntı yapabilen maddelerle olası kirlenmesini önleyebilir. Yerinde uygulanan kaplamalardan kaynaklanan kontaminasyonun kontrolü, malzemelerin bileşimine ilişkin kontrollere ek olarak, bunların uygulanmasına ilişkin uygun uygulama kurallarını gerektirir.

Dünya genelinde, içme suyu ile temas eden katkı maddeleri ve malzemeler için birçok ulusal ve üçüncü taraf değerlendirme ve onay sistemi bulunmaktadır; ancak birçok ülkede bu tür sistemler bulunmamakta veya işletilmemektedir. Hükümetler ve diğer kuruluşlar, katkı maddesi yönetim sistemleri kurmayı veya uyarlamayı, kabul edilebilir suyla temas eden ürünleri belirlemek için geçerli olacak ürün kalite standartlarını ve kullanım kılavuzunu belirlemeyi düşünmelidir. İdeal olarak, ülkeler arasında uyumlaştırılmış standartlar veya karşılıklı tanıma, maliyetleri azaltacak ve bu tür standartlara erişimi artıracaktır.

Şebeke hatlarındaki problemler, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerini de etkileyebilir. Örneğin, şebeke hatlarının eskimesi veya korozyonu sonucunda suya demir, kurşun veya diğer metaller karışabilir (Yang vd., 2022). Bu, suyun renginde, tadında veya kokusunda değişikliklere neden olabilir. Ayrıca, arıtma tesislerindeki arızalar veya bakım çalışmaları nedeniyle klorlama veya dezenfeksiyon işlemleri yetersiz kalabilir, bu da suyun mikrobiyolojik kalitesini etkileyebilir. Ayrıca, arıtılmış suyun tedarik sırasında kirlenmesi, suda bulunan yüksek klor içeriği ile etkileşime girme ihtimalini ortaya çıkarmaktadır. Klor yan ürünlerinin ölçümü ve önlenmesi bu noktada önem kazanmaktadır.

Özdemir (2022), İstanbul ili içme suyu kaynaklarının klor ile dezenfeksiyonu sonucu meydana gelen dezenfeksiyon yan ürünlerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada, her bir içme suyu kaynağının içerdiği doğal organik madde yapısının THM oluşumunda önemli bir yere sahip olduğu ortaya konulmuştur. Diğer yandan, her bir su kaynağının ClO_2 ile oksitlenmesi sonucunda, ortamda ClO_2^- iyonunun en baskın olarak görülen inorganik yan ürün olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, dezenfeksiyon işleminin klora alternatif olarak klor dioksit ile gerçekleştirilmesi halinde, insan sağlığı üzerinde kanserojen etkisi olan THM gibi DYÜ'nün minimize edilerek ülkemizdeki içme suyu arıtma tesislerinde daha kaliteli bir içme suyu üretiminin elde edilebileceği potansiyelini ortaya koymaktadır.

Klorlama yan ürünlerini kontrol etmenin en uygun yolu, büyük ölçüde doğal kaynaklı olan organik öncülleri ortadan kaldırmaktır. Şebeke hatlarındaki problemlerden ötürü bir sızma olup olmadığı, uç noktada yapılacak analizlerle rutin olarak kontrol edilmelidir. Her durumda, dezenfeksiyon verimliliğinden ödün verilmemeli; aynı zamanda DBP'lerle ilgili kılavuzlara uymaya veya klorlama yan ürünleri de dahil olmak üzere bu maddelerin konsantrasyonlarını azaltmaya çalışırken özen gösterilmelidir.

5. Sonuç

Bartın kent merkezinde bulunan 20 farklı mahalleden tesadüfi olarak seçilmiş ev, cami, gıda işletmeleri ve sanayi işletmelerinden alınan içme/kullanma suları incelendiğinde, bulanıklık değerinin 17 noktada "TS266" ve "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" sınır değeri olan 1 NTU'nun üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Renk parametreleri incelendiğinde, en yüksek renk 17 PtCo değeri ile Cumhuriyet Mahallesi'nde bulunmuştur. Numunelerdeki klor sonuçları incelendiğinde, 8 mahallede serbest klor oranının yönetmelik sınır değeri olan 0,2-0,5 mg/L aralığından düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, 4 mahallede serbest klor miktarları 2,8 – 3,48 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Toplam klor miktarları incelendiğinde, aynı mahallelerde 2,85 – 3,5 mg/L aralığında değerler kaydedilmiştir. Klor oranlarındaki büyük tutarsızlık dikkat çekmektedir. Aynı zamanda klor oranının yüksek olduğu mahallelerde belirgin bir klor kokusu tespit edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, su dağıtım şebekesindeki parametreler arasında belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Ayrıca, dönemsel olarak bölgede yaşanan yoğun yağışlar neticesinde bazı mahallelerde şebeke sularında 60 – 86 NTU arasında yüksek bulanıklık değerleri tespit edilmiştir. Buna karşın, komşu mahallelerde aynı durum gözlemlenmemiştir. Bu farklılıkların nedeninin şebeke hatlarındaki bozukluklar olduğu düşünülmektedir. Şebeke hatlarının onarımı ve yenilenmesi yerine, klorlama miktarının artırılmasıyla halk sağlığının korunmasının hedeflenmesi yalnızca geçici bir çözüm olacaktır. İçme suyu şebeke hatlarındaki problemler, su kalitesini etkileyebilir. Bu problemler çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir; su kaynaklarının kirlenmesi, şebeke hatlarının eskimesi, arıtma tesislerindeki arızalar veya bakım çalışmaları bunlar arasında yer alabilir. Bu tür problemler, şebeke suyunda çeşitli kalite sorunlarına yol açabilir. Bu konuda birincil endişe, şebeke hatlarındaki sızıntılar veya çatlaklar nedeniyle dışarıdan mikroorganizmaların, kirleticilerin veya toksinlerin suya karışmasıdır. Örneğin, eski veya hasar görmüş borular aracılığıyla suya çevresel kirleticiler sızabilir ve suyun kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca, şebeke hatlarındaki basınç değişiklikleri veya kesintiler, kirli suyun geriye doğru akmasına ve temiz suyla karışmasına neden olabilir. Bunu önlemek adına şebeke hattındaki klor miktarının artırılması, dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşma riskini artıracaktır. Dezenfeksiyon yan ürünlerinin tespiti ve önlenmesi için kapsamlı ve uzun süreli araştırmalara ihtiyaç vardır.

Şebeke hatlarındaki problemler genellikle yerel veya bölgesel düzeyde meydana gelmekte ve su tedarik sisteminin yönetimi ve bakımının önemini vurgulamaktadır. Su sağlayıcıları, sadece arıtma tesisi çıkış sularının rutin kontrollerini yapmamalı, aynı zamanda şebeke hatlarını düzenli olarak kontrol etmeli, hasarlı veya eskimiş boruları onarmalı, arıtma tesislerini düzenli olarak bakım ve kontrol etmelidir. Ayrıca, suyun kalitesini izlemek ve su arıtma işlemlerini optimize etmek için sıkı standartlar ve protokoller uygulanmalıdır.

Kaynaklar

Aksu, F., & Ünver, A. (2011). Endüstride su güvenliği, dezenfeksiyon ve sanitasyonu, *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi, 21*, 17–29.

Alexandrou, L., Meehan, B. J., & Jones, O. A. H. (2018). Regulated and emerging disinfection by-products in recycled waters. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1607–1616. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.391

Bartın Belediyesi, (2020). *Bartın Belediyesi 2019 Yılı Faaliyet Raporu*. 20 Ocak 2023'de https://bartin.bel.tr/kurumlar/bartin.bel.tr/FaaliyetRaporu/2019_faaliyet_raporu.pdf adresinden alındı.

Bartın Belediyesi, (2021). *Bartın Belediyesi 2021 Yılı Faaliyet Raporu*. 20 Ocak 2023'de https://bartin.bel.tr/kurumlar/bartin.bel.tr/FaaliyetRaporu/2021_faaliyet_raporu.pdf adresinden alındı.

Bartın Belediyesi, (2023). *Bartın Belediyesi 2022 Yılı Faaliyet Raporu*. 20 Ocak 2023'de https://bartin.bel.tr/kurumlar/bartin.bel.tr/FaaliyetRaporu/2022_faaliyet_raporu.pdf adresinden alındı.

Bartın Ticaret ve Sanayi Odası, (2023). *Bartın ekonomisi*. 20 Ocak 2023'de https://www.bartintso.org.tr/sayfalar/bartin-ekonomisi/tarim adresinden alındı.

Begum, A., Ramaiah, M., Harikrishna Khan, I., & Veena, K. (2009). Analysis of heavy metals concentration in soil and litchens from various localities of Hosur Road, Bangalore, India. *E-Journal Chem*, *6*(1), 13–22. https://doi.org/10.1155/2009/943695

Chhipi-Shrestha, G., Rodriguez, M., & Sadiq, R. (2018). Unregulated disinfection Byproducts in drinking water in Quebec: A meta analysis. *Journal of Environmental Management*, *223*, 984–1000. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.082

Cortes, C., & Marcos, R. (2018). Genotoxicity of disinfection byproducts and disinfected waters: A review of recent literature. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *831*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.04.005

Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, (2021). *Bartın İli 2020 Yılı Çevre Durum Raporu*. 20 Ocak 2023'de https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/bart-n_-cdr2020-20210702150652.pdf adresinden alındı.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2022). *2022 Faaliyet Raporu*. 20 Ocak 2023'de https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi2022faaliyetraporu.pdf adresinden alındı.

El Bouaidi, W., Libralato, G., Douma, M., Ounas, A., Yaacoubi, A., Lofrano, G., Albarano, L., Guida, M., & Loudiki, M. (2022). A review of plant-based coagulants for turbidity and cyanobacteria blooms removal. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*, 42601–42615. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20036-0

Ersan, M. S., Liu, C., Amy, G., & Karanfil, T. (2019). The interplay between natural organic matter and bromide on bromine substitution. *Science of the Total Environment*, *646*, 1172–1181. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.384

Gaya, M. S, Zango, M. U., Yusuf, L. A., Mustapha, M., Muhammad, B., Sani, A, Tijjani, A., Wahab, N. A., & Khairi, M. T. M. (2017). Estimation of Turbidity in Water Treatment Plant using Hammerstein-Wiener and Neural Network Technique. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *5*(3), 666–672. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v5.i3.pp666-672

Kavşak Suyu, (2023). *Bartın Kavşak Suyu ve Amasra'ya Tehditler*. 20 Ocak 2023'de https://bartinkavsaksuyu.tr.gg/Kav&%23351%3Bak-Suyu-Gidiyor.htm adresinden alındı.

Kitis, M., Yigit, N. O., Harmana, B. I., Muhammetoglu, H., Muhammetoglu, A., Karadirek, I. E., Demirel, I., Ozdenc, T., & Palancic, I. (2010). Occurrence of Trihalomethanes in Chlorinated Groundwaters with Very Low Natural Organic Matter and Bromide Concentrations. *Environmental Forensics*, *11*(3), 264–274. https://doi.org/10.1080/15275922.2010.495935

Li, W., Zhan, H., Dong, C., Wu, S., Mulcahy, D., & Duan, J. (2023). Detoxication of organophosphate pesticides in source waters by incorporation of an alkaline hydrolysis procedure in conventional drinking water treatment processes. *Journal of Water Process Engineering*, 53, Article 103917. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103917

McQuillan, R. G., & Spenst, P. G. (1976). The addition of chemicals to apartment water supplies. *Journal of the American Water Works Association*, *68*(8), 415–419. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1976.tb02446.x

Meybeck, M., Chapman, D., & Helmer, R. (1989). *Global Freshwater Quality: A First Assessment*. Blackwell Reference, Oxford.

Nas, F. (2019). Bartin, Karabük ve Zonguldak illerine ait yaşam endeksi gösterge değerlerinin sosyolojik analizi. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, *12*(64), 501–511. https://doi.org/10.17719/jisr.2019.3371

Nas, F. (2021). Bartin'da Yaşayanlarin Bir Kent Olarak Bartin'dan Memnuniyet Düzeylerinin Araştirilmasi. *Karadeniz Araştırmaları*, *18*(72), 963–977.

Oğuz, T.C., (2015). *İçme suyu arıtımında yaygın olarak karşılaşılan su kalite problemleri ve arıtımı için çözüm önerileri* [Uzmanlık tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı]. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/TEZLER/TU%C4%9EBA%20CANAN%20(3).pdf

Özdemir, K. (2022). İçme suyu kaynaklarının klor ve klor dioksit ile dezenfeksiyonu sonucu meydana gelen dezenfeksiyon yan ürünleri oluşumunun araştırılması: İstanbul örneği. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, *12*(1), 22–31.

Özgür, C., Civelekoğlu, G., & Kaplan Bekaroğlu, Ş. Ş. (2023). Düşük SUVA değerlikli sular için trihalometan tahmin modelinin geliştirilmesi ve analitik hiyerarşi yöntemi ile en iyi tahmin modelinin belirlenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *35*(1), 25–45. https://doi.org/10.35234/fumbd.1143444

Rahman, M. S., & Gagnon, G. A. (2014). Bench-scale evaluation of drinking water treatment parameters on iron particles and water quality. *Water Research*, *48*, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.018

Rao, S. M., (2023). Identifying drinking-water quality threats for a small town in Karnataka by geogenic and anthropogenic contaminants. *Sustainable Water Resources Management*, *9*, Article 2. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00782-2

Sawyer, C. N., McCarty, P. L. (1967). *Chemistry for sanitary engineers* (2nd ed). McGraw-Hill.

Tihansky, D. P. (1974). Economic damages from residential use of mineralized water supply. *Water resources research*, *10*(2), 145–154. https://doi.org/10.1029/WR010i002p00145

Türk Standartları Enstitüsü, (2005). *TS 266: Sular - İnsanî tüketim amaçlı sular*. Türk standartları Enstitüsü (TES). 20 Ocak 2023'de https://intweb.tse.org.tr/ Standard/Standard/ Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073082080080071077100076119105103072 adresinden alındı.

World Health Organization, (2003). *Total dissolved solids in Drinking-water in Guidelines for drinking-water quality* (2nd ed. Vol. 2). World Health Organization.

World Health Organization, (2006). *Control of Neglected Tropical Diseases*. WHO Pesticide Evaluation Scheme.

World Health Organization, (2022). G*uidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization.

Yang G., Gong M., Zheng X., Lin, L., Fan, J., Liu, F., & Meng, J. (2022). A review of microbial corrosion in reclaimed water pipelines: challenges and mitigation strategies. *Water Practice and Technology*, *17*(3), 731–748. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.007

Yayan, C., (2015), *İçme suyu güvenliği planlarına ilişkin dünyadaki uygulamalar ve Türkiye* [Uzmanlık tezi, T. C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı]. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/TEZLER/Cahit%20YAYAN%20-%20Uzmanl%C4%B1k%20Tezi.pdf

Yıldırım, M., & Topkaya, B. (2005, 22–24 Eylül). *Antalya kentindeki içme suyu kaynaklarının kirlenme potansiyelinin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak belirlenmesi* [Bildiri Sunumu]. Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, Türkiye.

Yılmaz, M., Bolu, F., Mayda, A. S., & Poyraz, B. (2017). Düzce'de satılan şişe suları ile musluk sularının ağır metal düzeylerinin incelenmesi. *Konuralp Tıp Dergisi, 2*, 24–29. https://doi.org/10.18521/ktd.291267

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 14–33, DOI: 10.21324/dacd.1438317

Afet Lojistiği Kapsamında CBS ile Depo Yeri Belirleme: Kilis İli Örneği

Büşra Kaya Zelzele[1,*], Mustafa Ergün[1]

[1]*Giresun Üniversitesi, Bulancak Kadir Karabaş Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Lojistik Yönetimi Bölümü, Giresun.*

Özet

Doğal afetler, insan yaşamını önemli ölçüde etkileyen olayları içerir. Günümüzde iklim değişikliği ve plansız yapılaşma gibi etkenlerle doğal afetlerin verdiği zararlar artmaktadır. Türkiye, farklı afet türlerinin sıkça yaşandığı bir coğrafyada bulunmaktadır. Bu afetler, can ve mal kayıplarına, sosyal ve ekonomik zararlara neden olabilir. Afet yönetimi, afetlerin zararlarını en aza indirme, hızlı müdahale ve toplumun güvenliğini sağlama amacı taşır. Bilim ve teknolojinin gelişmesi, afetlerin nedenlerini anlamamıza ve korunma stratejileri geliştirmemize yardımcı olmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), afet zararlarını azaltmada güçlü bir araçtır. Afetler öncesinde risk analizi, altyapı durumu, ulaşım ağlarının analizi gibi faktörleri değerlendirerek lojistik depo yerlerini belirlemek, afet yönetiminde etkin bir rol oynar. Bu çalışma, CBS tabanlı bir analiz yöntemi kullanarak afet lojistiği kapsamında lojistik depo yerlerinin belirlenmesi üzerine odaklanmakla birlikte analitik araçlar ve mekânsal veri entegrasyonuyla güvenli lojistik depo yerlerini belirleyerek afetlere yönelik lojistik planlama süreçlerine katkı sağlamaktır. Çalışma kapsamında Kilis ilinde yer seçimi sürecinde uzman görüşleri ve literatür taramasıyla desteklenen analizlerle, güvenli depo yerleri tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Lojistik, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Afet, Depo Yeri Seçimi, Afet Yönetimi

Warehouse Location Determination with GIS within the Scope of Disaster Logistics: Example of Kilis Province

Abstract

Natural disasters include events that significantly affect human life. Today, the damage caused by natural disasters is increasing due to factors such as climate change and unplanned construction. Turkey is located in a geography where different types of disasters are frequently experienced. These disasters can cause loss of life and property, social and economic damages. Disaster management aims to minimize the damages of disasters, provide rapid intervention and ensure the safety of society. The development of science and technology helps us understand the causes of disasters and develop protection strategies. Geographic Information Systems (GIS) are a powerful tool in reducing disaster damages. Determining logistics warehouse locations by evaluating factors such as risk analysis, infrastructure status, and analysis of transportation networks before disasters plays an active role in disaster management. This study focuses on determining logistics warehouse locations within the scope of disaster logistics using a GIS-based analysis method, and contributes to logistics planning processes for disasters by determining safe logistics warehouse locations with analytical tools and spatial data integration. Within the scope of the study, safe warehouse locations were determined in Kilis province with analyses supported by expert opinions and literature review during the site selection process.

Keywords

Logistics, Geographical Information Systems, Disaster, Warehouse Location Selection, Disaster Management

1. Giriş

Doğal afetler dünya üzerindeki doğal olayların insanların yaşamını önemli ölçüde ve olumsuz bir şekilde etkilediği durumları ifade eder. İnsanlık tarihi boyunca doğa olaylarına bağlı olarak meydana gelen afetler, insanların yaşamına her zaman etki etmiştir. Günümüzde bu afetler, özellikle küresel iklim değişikliği ve plansız yapılaşma gibi etkenler nedeniyle hızla artmaktadır. Doğal afetler yalnızca fiziksel etkileri değil, sosyal, ekonomik ve politik boyutları da içerir. Afetler, bölge ve ülke ekonomilerine zarar vererek insanlar üzerinde sosyal ve psikolojik olumsuz etkilere neden olur. Doğal afetlerin çeşitleri ve etkileri, coğrafi konuma ve diğer faktörlere bağlı olarak ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilir (Tanyaş vd., 2013).

Türkiye, doğal afetlerin yoğun olarak gözlemlendiği bir coğrafyada yer almaktadır. Ülkemiz, farklı iklim özellikleri ve jeolojik yapılar sebebiyle sel, kuraklık, deprem, toprak kayması ve benzeri afet türlerinin çeşitli bölgelerde meydana gelmesine zemin hazırlamaktadır. Bu doğal afetler, insan hayatına, taşınmaz varlıklara ve çevreye ciddi tahribatlar oluşturabilmektedir (Arca, 2012).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (454) 310100 Faks: +90 (454) 3101018
E-posta: busranurkaya002@gmail.com (Kaya B.), mustafa.ergun@giresun.edu.tr (Ergun M.)
Gönderim Tarihi / Received : 16/02/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 11/09/2024

Literatürde ise insan kaynaklı afetler, "insan yapısı afetler" veya "doğal olmayan afetler" olarak tanımlanmaktadır. İnsana dayalı afetlerde, olayların meydana gelmesinde insan faktörünün doğrudan etkisi bulunmaktadır (Altun, 2018). Özellikle deprem gibi büyük çaplı yıkımlara, can kayıplarına ve sosyal ile ekonomik zararların ortaya çıkmasına neden olan afet durumlarında, etkili bir afet yönetimi; afetlerin önlenmesi ya da zararlarının en aza indirgenmesi, afet anında hızlı ve etkin müdahale sağlanması ve toplumun bu zorlu süreci güvenli bir şekilde atlatmasına olanak tanınması açısından büyük önem arz etmektedir.

Afet yönetiminin risk azaltma ve hazırlık aşamaları, depremin neden olabileceği yıkım ve tahribatları minimum seviyeye indirmeye çalışır (Özkılıç, 2020). Günümüzde artık, doğal afetlerin yaratabileceği büyük zararlara karşı farkındalık oluşmuştur. Bu nedenle her toplumun afetlere karşı hazırlıklı olması ve zararları en aza indirme çabalarına destek vermesi gerekmektedir (Arca, 2012).Teknolojinin hızlı ilerlemesiyle, doğal afetler ve etkileri hakkında bilgi eksikliği geride kalmıştır. Ancak, afet yönetimi ve korunma stratejileri hala teknolojinin sunduğu olanaklara tam olarak uyum sağlayamamıştır. Teknolojik gelişmelere rağmen, afetlerle başa çıkma konusunda eksiklikler ve zorluklar devam etmektedir.

Gelişmiş toplumlar, bilgi ve teknolojiyi etkili bir şekilde kullanarak doğal afetlerden daha az etkilenme eğilimindedirler. Ancak, teknoloji ve bilgiye erişim konusunda geri kalmış veya bu gelişmeleri hayatlarına dâhil edememiş gelişmekte olan toplumlarda, doğal afetler hala büyük maddi ve manevi zayiatlar sebep olabilmektedir. Bu nedenle, toplumların afetlerle başa çıkma kapasitelerini arttırabilmesinin, can ve mal kayıpları azaltabilmesinin yolu bilgi ve teknolojik ilerlemelerinin yakından takip edilmesinden geçer (Demirci & Karakuyu, 2004). Doğal afetlerin oluşmasını tamamen engellemek mümkün olmasa da insan kaynaklı afetlerin ve kayıpların minimize edilmesi için bir dizi tedbir almak, müdahale planları oluşturmak ve toplumu bilinçlendirmek mümkündür. Afetlerden kaynaklanan maddi ve manevi zararları minimum seviyeye indirmek, etkili bir afet yönetimi ve lojistik yönetim sistemi ile mümkün olur. İyi bir şekilde kurulmuş bir afet lojistik yönetim sistemi, afet öncesi hazırlık döneminde gerekli malzeme stoklarını uygun düzeyde tutmayı ve afet anında bu malzemelerin bölgeye hızlı bir şekilde ulaştırılmasını hedefler. Bu yaklaşım sayesinde afetlerin neden olduğu kayıplar en aza indirilebilir (Topal, 2016).

Depreme hazırlık sürecinde, afet yönetimi çerçevesinde toplanma, tahliye, acil yardım ve barınma alanlarının önceden belirlenmesi gerekmektedir. Toplanma alanları, afet sonrasında insanların, kendilerini güvende hissetmeleri için önceden belirlenmiş, kolayca erişilebilen, yeterli büyüklükte ve kapasitede güvenli alanlardır (Özkılıç, 2020).

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) farklı disiplinlerden gelen kullanıcıların bulunduğu bir alan olduğundan, bu terim çok çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Temel işlevi, karar verme süreçlerini kolaylaştırmak ve hızlandırmak olan bilgi sistemleri ile coğrafi verilerin, yerleşik referanslarıyla birlikte bir veri tabanında toplandığı, bu verilere yönelik çeşitli analizlerin yapıldığı ve sonuçların grafikler, haritalar ve tablolar şeklinde görsel olarak sunulduğu bir bilgisayar sistemidir. Yani CBS, coğrafi verileri işlemek, analiz etmek ve görselleştirmek gayesiyle tasarlanmış bir tür bilgisayar sistemidir. Bu sistem, yer, mekân ve insanla ilgili verileri toplar, bu verilere farklı analizler uygular ve sonuçları haritalar, grafikler ve tablolar gibi anlaşılır görsel formatlarda sunar. Ayrıca CBS birçok farklı sektörde ve disiplinde kullanılabilen güçlü bir araçtır (Ballı, 2021). Dünya üzerindeki her türden yer ve konumla ilgili bilgilerin yönetimini sağlayan bu sistem haritalar aracılığıyla önemli bir bilgi kaynağı olarak faaliyet göstermektedir. Haritalar, çağlar boyunca insanlar ve mekânlar arasındaki iletişimi kolaylaştıran bir araç olmasıyla beraber, çeşitli mesleki alanlarda, planlamadan mülkiyete, tarımdan altyapıya, risk yönetiminden turizme, sağlıktan güvenliğe kadar birçok alanda etkili bir araç olarak kullanılmıştır. Bu önem, bilgi teknolojilerinin gelişimiyle birlikte artarak devam etmiş ve CBS kavramı olarak karşımıza çıkmıştır (Yurdoğlu, 2008).

Çeşitli yöntemlerle afet zararlarını minimize etme amacı dünya genelinde ve ülkemizde yaygın bir şekilde benimsenmektedir. Bu yöntemlerin başında, bir bölgenin afet riskini belirlemek ve mevcut planları bu risklere göre düzenlemek gelir. CBS teknikleri, afet zararlarını azaltma konusunda güvenilir, hızlı ve kullanımı kolay bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ancak, CBS kullanımı tek başına yeterli değildir. Öncelikle toplumda afet bilinci oluşturulmalıdır. Bu amaçla afetlere karşı korunma eğitimleri yaygınlaştırılmalı ve temel afet bilgisi artırılmalıdır (Arca, 2012). Kısa ve uzun vadede, afetlerin etkilediği bölgelerde yaşayan insanlar için ekonomik ve sosyal yıkımlar meydana gelebilir. Bazı afetler, nispeten küçük ölçekte olsalar bile, iyi bir müdahale olmadığında büyük facialara yol açabilir. Bu sebeple felaketlerin etkilediği bölgelere hızlı yardım ulaştırılması ve bu yardımların etkili bir şekilde depolanması, kısa ve uzun vadede yaşanan yıkımları azaltma açısından büyük bir öneme sahiptir (Ergün vd., 2020).

Yoğun nüfuslu bölgelerde tıbbi malzeme ve ilaç talebi artış gösterir. Bu nedenle, afet bölgelerindeki nüfus yoğunluğu, acil tıbbi malzemelerin depolanması, hızlı müdahale ve dağıtım süreçlerinde kritik bir rol oynar (Nebati, 2024).

Afet durumlarında, lojistik depoların stratejik olarak yerleştirilmesi; acil müdahale ekiplerinin etkili ve ivedi bir şekilde afet bölgesine ulaşmasını ve ihtiyaç duyulan malzemelerin dağıtımını sağlamak açısından kritik bir faktördür (Ağdaş vd., 2014). CBS teknolojisi, afet lojistiği yönetiminde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. CBS'nin sunduğu mekansal analiz ve veri görselleştirme imkanları, afet risklerinin belirlenmesi, nüfus yoğunluğunun analizi, altyapı durumunun değerlendirilmesi ve ulaşım ağlarının analizi gibi önemli faktörlerin göz önünde bulundurulmasını sağlamaktadır (Yurdoğlu, 2008).

Bu çalışma, afet lojistiği kapsamında CBS ile lojistik depo yerinin belirlenmesi konusunu ele almaktadır. 6 Şubat Kahramanmaraş depreminden sonra etkilenen 11 il göz önüne alınarak etkin bir afet yönetimi ile depoların depremden sonra gerek yiyecek içecek gerek teçhizat gerekse giyecek açısından ilk müdahalenin önemini ortaya koymuştur.

Bu makalenin amacı, CBS'nin sağladığı analitik araçlar ve mekânsal veri entegrasyonuyla etkili bir depo yerleşim stratejisi geliştirmektir. Bu strateji, afet risk analizi, nüfus yoğunluğu ve erişilebilirlik analizi, altyapı durumu ve ulaşım ağları analizi, fay hatları gibi faktörleri dikkate alarak en uygun lojistik depo yerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma ile ilgili gerekli literatür taraması yapılmış olup; Afet kavramı, afet yönetimi ve aşamaları, afet lojistiği, afet lojistiği aşamaları, CBS tanımı ve kullanım alanlarından aşağıda bahsedilmiştir. Bu çalışma, afetlere yönelik lojistik planlama ve müdahale süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirmeyi amaçlayarak akademik ve pratik alanda bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

1.1. Literatür Özeti

Ergün vd. (2020), çalışmalarında, doğal afetlerin insanlara ve ülkelere olan etkilerini ele almakta, lojistik faaliyetlerinin sürdürülebilirlik kavramına nasıl dahil olduğunu vurgulamışlardır. Lojistik; çevresel, ekonomik ve sosyal hedefleri gözeterek yönetilmelidir. Afet lojistiği, acil durumlarda yardımın taşınması ve depolanması gibi kritik bir rol oynamaktadır ve sürdürülebilirlik bu süreçte büyük önem taşır. Sürdürülebilir afet lojistiği, doğal felaketler sonrası etkilenen bölgelere ivedi ve etkili bir şekilde yardım sağlamayı hedefler. Depo yerlerinin seçimi, afet lojistiği süreçlerinde önemli bir rol oynar. Bu süreçte doğal afetlerin etkileri, acil yardım ihtiyacı, lojistik kaynakları ve koordinasyonu içerir. Makale, sürdürülebilir afet lojistiğinin temel prensiplerini, depo yerlerinin seçimi üzerinden ele alır. Çalışmanın odak noktası, Giresun'da sürdürülebilir afet lojistiği için ideal depo yerinin belirlemesidir. Çeşitli yöntemler kullanılarak ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütler doğrultusunda ideal depo yeri seçilmiştir. Afet lojistiği, felaket sonrası yardım dağıtımını, yaralıların tahliyesini ve yardım malzemelerinin taşınmasını içerir. Uzmanlar, ideal depo yerini belirlemede farklı görüşlere sahiptir. Maliyet, coğrafi faktörler ve etkilenme durumu gibi unsurlar bu seçimde etkilidir. Çalışma, sürdürülebilir afet lojistiği için depo yerlerinin seçimi konusunda yeni bir perspektif sunarken, gelecek çalışmalar için belirsizliklerin azaltılmasına yönelik bulanık mantık yöntemlerini önermektedir. Uzmanlar arasında görüş farklılıkları olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar karar vericilerin beklentilerini desteklemektedir.

Palazca & Partigöç (2018), makalelerinde; kentsel yerleşmelerin afetlere karşı direncinin artırılması gerekliliği vurgulanmaktadır. Özellikle, plansız kentleşme ve nüfus yoğunluğunun, kentlerin afetlere karşı kırılgan hale gelmesine yol açtığı belirtilmektedir. Bu durum, afet sonrası acil yardım ve kurtarma faaliyetlerini zorlaştırabilir. Afet yönetimi ve hazırlık süreçlerinin, toplumun tüm kaynaklarını ve kurumlarını bir araya getirerek yönetilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Bu bağlamda, potansiyel toplanma alanlarının belirlenmesi ve afet sonrasında bu alanların kullanımı için etkin stratejiler geliştirilmesi önemli olarak vurgulanmaktadır. Denizli İli Pamukkale İlçesi'nde yapılan bir çalışma, CBS ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılarak açık ve yeşil alanların potansiyel toplanma alanı olarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu çalışma, mevcut alanların eğim, fay hatları, yol durumu, nüfus ve büyüklük gibi faktörler üzerinden analiz edilerek potansiyel toplanma alanları olarak sınıflandırılmıştır.

Aksoy (2016) tarafından yürütülen çalışmada, 'Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Antalya İli Katı Atık Depolama Alanı Belirlenmesi' üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, Antalya ilindeki katı atık yönetiminin çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilir bir çevre politikası oluşturmak için hayati öneme sahiptir. Çalışma, gelişmiş uzaktan algılama tekniklerinin ve CBS, çevresel planlama ve atık yönetimi konularında belirleyici bir rol oynayabileceğini vurgulamaktadır. Uzaktan algılama yöntemleri, uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları gibi çeşitli veri kaynaklarından yararlanarak Antalya ilindeki mevcut katı atık depolama alanlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma, uzaktan algılama ve CBS' nin entegrasyonunun, atık yönetimi alanında stratejik kararlar alınmasına yardımcı olabileceğini göstermektedir. Çalışma, atık yönetimi konusunda yerel ve bölgesel düzeydeki yetkililer için önemli bir rehberlik sağlamakta ve çevresel planlama politikalarının oluşturulmasında kritik bir kaynak teşkil etmektedir.

Güngör vd. (2011) tarafından yazılan makalede, CBS teknolojisinin deprem bilgi sistemleri üzerindeki etkisini ve Kütahya ilinde bu teknolojinin nasıl uygulandığını incelemektedir. Çalışma, CBS'nin deprem bilgi sistemleri içindeki rolünü vurgulamakta ve deprem risklerinin belirlenmesi, izlenmesi ve yönetilmesi açısından bu teknolojinin sağladığı faydaları ele almaktadır. Özellikle, Kütahya ili üzerinde gerçekleştirilen bu uygulama, bölgesel düzeyde deprem risklerini analiz etme ve yerel düzeyde önleyici adımlar atma konusunda önemli bir model oluşturmuştur. Bu makale; CBS teknolojisinin, deprem bilgi sistemleri içindeki rolünün, deprem risklerinin azaltılması ve felaketlerin etkilerinin minimize edilmesi sürecinde ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, Kütahya ilinde yapılan bu uygulama, diğer bölgelerde benzer sistemlerin kurulmasına ve deprem risklerine karşı etkili önlemlerin alınmasına öncülük etmektedir.

Yurdoğlu (2008) tarafından yapılan bu çalışma, afet yönetimi alanında CBS uygulanmasını ele almaktadır. Afetlerin öncesi, sırası ve sonrasında CBS teknolojisinin kullanılması üzerine odaklanmaktadır. Çalışma, afet yönetiminin geliştirilmesi ve etkili bir şekilde yönetilmesi amacıyla coğrafi bilgi sistemlerinin nasıl kullanılabileceğini inceler. Özellikle, afetlerin öncesi için risk analizi, afet sırasında acil durum müdahaleleri ve afet sonrasında iyileştirme süreçlerinde CBS'nin rolüne odaklanır. Tez, farklı afet türlerine yönelik stratejiler geliştirmek için CBS'nin nasıl kullanılabileceği konusunda örnekler sunar. Bu örnekler, doğal afetlerde kaynak tahsisi, tahliye planlaması, zarar tespiti, acil yardım ve yeniden yapılanma gibi alanlarda CBS'nin etkili kullanımını gösterir. Sonuç olarak, bu çalışma afet yönetimi süreçlerinde coğrafi bilgi sistemlerinin kullanılmasının önemini vurgulamakta ve bu teknolojinin afetlerle mücadeledeki kritik rolünü göstermektedir. Tez, afet yönetiminde CBS'nin sağladığı potansiyeli ve pratik uygulamaları detaylı bir şekilde açığa çıkararak, bu alandaki ilgili taraflara faydalı bir kaynak sunmaktadır.

Bediroğlu & Yıldırım (2020) tarafından yapılan çalışmada, lojistik merkezlerin stratejik konumlandırılması için CBS ve Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri (ÇKKV)'nin nasıl entegre edilebileceği araştırılır. Bu entegrasyon, lojistik merkez yer seçimi sürecinde, yer seçimi kriterlerinin belirlenmesi, önceliklendirilmesi ve optimal lokasyonların tespit edilmesi amacıyla kullanılır. Ordu ilini pilot bölge olarak seçen çalışma, coğrafi veriler ve ÇKKV'nin analitik kullanımıyla birlikte CBS aracılığıyla lojistik merkezlerin yer seçimi sürecini detaylıca ele alır.
Çalışma, coğrafi veri analizlerinin ve ÇKKV'nin kullanılmasının lojistik merkez planlamasında nasıl değerli olduğunu gösterir. Sonuç olarak, bu makale Ordu ilinde lojistik merkezlerin yer seçimi için CBS ve ÇKKV'nin nasıl kullanılabileceğini detaylandırır. Bu entegrasyon, lojistik sektöründe yer seçimi süreçlerinde daha verimli ve kararlı sonuçlara ulaşabilmek için önemli bir yöntem olarak sunulmaktadır.

Atay vd. (2023) tarafından yapılan bu çalışmayla, CBS ve doğrusal programlama tekniklerini kullanarak Suriye'deki mülteci kamplarının ve insani yardım depolarının en uygun konumlarını belirlemeyi hedeflemektedir. CBS, coğrafi verileri analiz etmek ve görselleştirmek için kullanılırken, doğrusal programlama ise kampların ve depoların stratejik olarak en uygun yerlerini belirleme sürecinde matematiksel modelleme için kullanılır. Bu makale, Suriye'deki mülteci krizi ve insani yardım ihtiyacı bağlamında, mülteci kampları ile insani yardım depolarının en etkili ve stratejik konumlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. CBS'nin coğrafi verileri analiz etme ve görselleştirme yetenekleri ile doğrusal programlamanın matematiksel modelleme kabiliyeti, insani yardım kaynaklarının daha etkin dağıtılması ve Suriyeli mültecilere daha hızlı yardım ulaştırılmasına yardımcı olabilir. Sonuç olarak, bu çalışma, CBS ve doğrusal programlama yöntemlerini kullanarak Suriye'deki mülteci kamplarının ve insani yardım depolarının stratejik konumlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu tekniklerin entegrasyonu, insani yardımın daha etkin bir şekilde yönetilmesi ve Suriyeli mültecilere daha hızlı ve etkili bir yardım sağlanması için önemli bir adım olabilir.

Loree & Aros-Vera (2018), Yazdıkları makalede, afet sonrası insani yardım lojistiğinde hayatta kalanlara ulaşmak için dağıtım noktalarının bulunması ve yakın bölgelere dağıtımda envanterin tahsis edilmesi sorununu çözmek için matematiksel bir model sunmuşlardır. Yazarlar temelde, afet müdahalesi sırasındaki en büyük zorluklardan biri olan afet kıtlığını ele almışlardır. Model, müdahalenin hem yoksunluk hem de operasyonel maliyetlerini içermektedir. Ek olarak, makale matematiksel formülasyonun geniş örneklemlerini çözmek için Sezgisel Konsantrasyon Tamsayısının bir modifikasyonunu sunmaktadır. Çoklu kaynak kullanımına izin verildiğinde, herhangi bir talep noktasına mevcut kapasiteye sahip herhangi bir tesis tarafından hizmet verilebileceğini de ele almışlar ve yardımların hayatta kalanlara ve en çok ihtiyaç duyanlara ulaştırılması için ek lojistik maliyetini de hesaplamışlardır.

Rodríguez-Espíndola vd. (2016), Yaptıkları çalışmada, Afet yönetiminde CBS'nin faydalarını göstermek amacıyla, potansiyel su baskını senaryolarını analiz etmek ve bir optimizasyon modeline girdi sağlamak için raster verileri kullanarak kartografik bir model oluşturmuşlardır. Yazarlar, afet planlamasına CBS'nin dahil edilmesini değerlendirmek için geçmiş yıllarda Meksika'da meydana gelen iki sel felaketinin verileri üzerinde uygulama yapmışlardır. Sonuç olarak, afet yönetiminde bir karar verme aracı olarak CBS analizinin dahil edilmesinin, sel riski altında kullanılan tesislerin sayısını azaltarak afet operasyonlarının sonuçlarını iyileştirebileceğini öne sürmüşlerdir.

Zhao & Liu, (2018),Yaptıkları çalışmada, büyük ölçekli kentsel alanlarda kentsel acil kurtarma tesisi konumlarının optimizasyon sürecini kolaylaştırmak amacıyla kullanıcı dostu bir karar destek aracı tasarlamış ve geliştirmişlerdir. Çalışmada karar almayı kolaylaştıracak optimum kentsel acil kurtarma tesisi konumlarını bulmaya yönelik bir karar destek aracı tasarlamış ve uygulamışlardır. Karar vermenin iş akışının yanı sıra işlevlerini de göstermek için Çin'deki bir kentsel bölgeye ilişkin bir örnek olay çalışması yapmışlardır. Bulgular, kamu güvenliği ve sağlığı açısından kentsel acil durum planlaması için yararlı bir karar destek aracı olma potansiyelini göstermektedir.

Timperio vd. (2017), Çalışmalarında, afet yardımının tedarik zinciri alanında ağ tasarımına yönelik konumların belirlenmesi için bir karar destek çerçevesi oluşturmuşlardır. Çözüm yaklaşımı yöntemiyle yapılan çalışma daha sonra Endonezya'daki gerçek bir vakaya uygulanmıştır. Çalışmada yer seçimine yönelik sekiz konum kriterini tanımlamışlar, ağırlıklandırmışlar ve sıralamışlardır. Çözüm yaklaşımı, benzer sorunlarla uğraşabilecek yetkililere, uluslararası ve yerel STK'lara, BM kuruluşlarına lokasyonlar için uygulanabilir bir karar destek çerçevesi sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre karar vericiler, tedarik zincirinin dayanıklılığını ve sağlamlığını artırmak amacıyla çabalarını yardım operasyonlarının stratejik planlamasına odaklayabileceklerdir. Yazarlara göre kilit bölgelerdeki stratejik stokların önceden belirlenerek konumlandırılması, dikkate alınması gereken en iyi strateji olabilir.

Timperio vd. (2022), Yazdıkları makalede, ekosisteme duyarlı tedarik zinciri ağlarına odaklanan bir karar destek çerçevesi oluşturmuşlardır. Çalışmada ilk olarak, insani lojistik operasyonlarının karmaşıklığını araştırma araçlarıyla ele almışlar, ardından, statik ve zamana bağlı değişkenleri göz önünde bulundurarak tedarik zinciri planlama ve yürütme konusunda derinlemesine içgörüler oluşturmak için farklı yöntemleri entegre etmişler, daha sonra, gerçek dünyadaki uygulama odaklı bir örnek olay incelemesini kullanarak sayısal bir örnek sunmuşlar ve son olarak, insani yardım lojistiği alanındaki uygulamaları bilgilendirmeye yönelik tavsiyelerde bulunmuşlardır.

1997 yılında kurulan bir insani yardım kuruluşu olan Sphere 'in 2018 yılında yayınladığı el kitabında "Onurlu Yaşam Hakkı" İlkesi, Temel İnsani Standart ve İnsani müdahalede teknik standartlar aşağıdaki maddeleri içermektedir.

- **Yer Seçimi/Stratejik Planlama**

  - Yerleşim yeri potansiyel tehlikelerin uzağında ve mevcut risklerin asgariye indirildiği güvenli alanlarda olmalıdır; deprem, toprak kayması, volkanik faaliyetler, sel ya da şiddetli rüzgârlar gibi doğal afet riskleri düşünülmelidir,
  - Yerleşim yeri afetten kaynaklanan atıklardan uzakta olmalı, hastalık ya da kirlilik ile önemli vektör risklerine maruz olmamalıdır,
  - Yerleşim alanlarına erişim, yerel yol alt yapısının durumu ve ulaşım olanaklarına yakınlık, olası yardımın sağlanması sırasındaki kullanım (ağır vasıtaların alana ulaşabilmesi, gerekirse yapılabilmesi) gibi durumlar analiz edilmelidir,
  - Havalimanları, liman ve garlara yakınlık analizi yapılmalıdır,
  - Yüzey suyu drenajı, arazi şartlarının da izin verdiği ölçüde yerinde yapılmalıdır. Yeterli drenaj ve erozyon kontrol önlemleri alınamadığı sürece eğim % 5'in üzerinde olmamalı ya da yeterli drenaj sağlamak için % 1' in altında olmamalıdır (ideal %2-4),
  - Sürekli su temini sağlamak için kentin su şebekesi öncelikli olmak üzere gerekli kaynaklara bağlantı sağlanmalıdır,
  - Sürekli elektrik temini sağlamak için kent şebekesi öncelikli olmak üzere, güneş panelleri kurularak yerel elektrik enerjisi üretilmelidir.

- **Tasarım/Uygulama**

  - Alanın lojistik fonksiyonlarına cevap verebilmesi için verimli işleyen ve ilgili standartları karşılayabilecek bir vaziyet planı tasarımı hazırlanmalıdır,
  - Vaziyet planı topoğrafyaya uygun, doğal çevreye en az zarar verecek şekilde yapılmalıdır,
  - Yangın riski açısından yerleşim alanında her 300 metrede bir 30 metre yangın emniyet şeridi ayrılmalıdır. Yan yana binalar varsa çökmesini önlemek için her hane arasında en az 2 metre (tercihen yapının iki katı yüksekliğinde) mesafe olmalıdır,
  - İnşaat tasarımı iklim koşullarına uyumlu, rüzgâr yüküne dayanıklı ve soğuk iklimlerde kar yükünü karşılıyor olmalıdır. Depreme karşı direnç ve zemin taşıma şartları teknik uzmanlar tarafından tespit edilmeli, toplu merkezler için yapıların ek yüklere ve artan doğal afet risklerine dayanıklılığı, örneğin zemin, ara duvarlar, çatılar vs. değerlendirilmelidir,
  - Mümkün olan yerlerde ağaç ve diğer bitkiler korunarak, toprak erozyonu riski azaltılmalı ve yapılar için gölge sağlanmalıdır,
  - Alanda yenilenebilir enerji, geri dönüşüm, geri kazanım gibi sürdürülebilir uygulamalar hayata geçirilmelidir.

USAID'in İnsani Yardım Bürosu, ABD hükümetinin uluslararası afet yardımında başı çekmekte ve her yıl dünya çapında on milyonlarca insana hayat kurtaran yardımlar ulaştırmaktadır. Her yıl ortalama 70'ten fazla ülkede 75 krize müdahale ederek, en çok ihtiyacı olan insanlara yiyecek, su, barınak, sağlık hizmetleri ve diğer kritik yardımları sağlamaktadır. Bu yardımın kasırgalar, depremler ve yanardağlar gibi doğal afetlerin yanı sıra kuraklık ve çatışma gibi yavaş başlayan krizlerden etkilenen insanlara ulaşmasını sağlamak için çalışmaktadırlar (United States Agency for International Development, 2024).

Yapılan literatür taraması sonucunda Kilis İli için afet lojistiği kapsamında depo yeri belirlemeye dair herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle afet durumlarında depo yeri belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışma ile Kilis için en uygun depo yeri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Afet Kavramı

Afetler, genellikle öngörülemeyen ve hızlı bir biçimde meydana gelen, insanların ve diğer canlıların günlük yaşamlarını derinden etkileyen, geniş çapta hasara yol açarak yerel imkânlarla çözülemeyen durumlardır. Bu olaylar, ulusal ya da uluslararası yardım talep edilen, genellikle ansızın ortaya çıkan ve büyük bir nüfusu etkileyen durumları içerir. Afetlerin ana özellikleri; anlık gerçekleşmeleri, bölgedeki insanları ve mülkleri büyük ölçüde etkilemeleri, can ve mal kayıplarına sebep olmaları ve genellikle önceden engellenememeleridir (Önsüz & Atalay, 2015). Afetler, günümüzde birden çok nedenin etkisi altında olmalarına rağmen temelde insan kaynaklı ve doğal afetler olmak üzere iki ana kategoride incelenir (Limoncu & Bayülgen, 2005).

a) Doğal Afetler (deprem, sel, yangın, heyelan, kuraklık, tayfun, kasırga, vb.)
b) İnsan Kaynaklı Afetler (yangın, patlama, çevresel kirlilik, trafik kazaları, vb.)

2.1. Afet Yönetimi ve Afet Yönetiminin Aşamaları

Günümüzde insanlık, bilgi ve teknoloji alanlarındaki gelişmelere rağmen deprem, kuraklık, volkanik patlama ve fırtınalar gibi doğal afetlerin oluşumu üzerinde tam kontrol sağlayamamaktadır. Bu tür afetlerin önlenebilmesi sınırlıdır.

Ancak bu afetlerle başa çıkmanın en etkili yolu, araştırma yaparak, çeşitli planlar hazırlayarak ve bunları uygulayarak afetlerin etkilerini en aza indirgeme veya önleme üzerine çabalamaktır. Afet yönetimi, insanların yaşadıkları çevredeki doğal olaylardan haberdar olmalarını ve bu olayları detaylı bir şekilde anlamalarını gerektirir. Bu doğal afetlerin tekrar etmesi durumunda en az etkilenmeyi sağlamak için çalışmalar yürütmeyi içerir. Modern afet yönetimi, kayıp ve zararların azaltılması, hazırlık aşamaları, öngörü ve ikaz gibi afet öncesi koruma odaklı faaliyetleri 'Risk Yönetimi' olarak tanımlarken, etki analizi, müdahale, iyileştirme ve yeniden yapılanma gibi afet sonrası süreçleri 'Kriz Yönetimi' olarak adlandırır. Bu bağlamda, etkili bir afet yönetimi çalışması, afet öncesinde, sırasında ve sonrasında gereken tüm alanları kapsayacak şekilde düzenlenmelidir (Erkal & Değerliyurt, 2009).

2.2. Afet Lojistiği

Afet Lojistiği, farklı afet türlerine hızlı bir yanıt verebilmek için, afetin türüne bağlı olarak çeşitli faaliyetleri içeren bir alanı kapsar. Bu faaliyetler, meydana gelen afetin türüne göre değişse de temel amaç her zaman "insan hayatını kurtarmak ve yaşam desteği sağlamaktır". Afet yardım faaliyetleri genellikle ilk yardım malzemeleri, yiyecek, ekipman ve arama-kurtarma ekiplerinin tedarik noktasından, afet bölgesinde coğrafi olarak dağılmış bir dizi destinasyon noktasına dağıtımı içerir. Ayrıca, afetzedelerin güvenli bir şekilde tahliyesi ve acil sağlık merkezlerine transferiyle ilgili faaliyetleri de kapsar. Özellikle, korunmasız durumda olan bireylerin ihtiyaçlarını zamanında ve yerinde karşılamak için ürünlerin, malzemelerin ve ilgili bilgilerin depolanması ve başlangıcından ihtiyaç duyulan son aşamaya kadar etkin bir biçimde akışını planlamak, uygulamak ve kontrol etmek afet lojistiğinin temelini oluşturur (Börühan & Ersoy 2013).

Afet lojistiği hazırlık, planlama, tedarik, ulaştırma, depolama, izleme, kontrol ve gümrükleme gibi çeşitli faaliyetlerle insanların hayatta kalmasına yardımcı olmayı amaçlar. Bu, ticari amaçlı işletme lojistiğinden farklı bir nitelik taşır; çünkü afet lojistiği, maliyetleri ve karı önceliğe koymaz. Ayrıca, afet lojistiği, alışılmadık kısıtlamalar, düzensiz talepler ve büyük ölçekli operasyonlarla karakterize edilen afet ve acil durumları içerir. Önceden hazırlık, afet anında müdahale ve afet sonrası iyileştirme olmak üzere üç kademeden oluşur (Şen & Esmer, 2017).

2.2.1. Afet Lojistiğinin Aşamaları

Lojistik faaliyetler, afet öncesi hazırlık, afet müdahale süreci ve müdahale sonrası olmak üzere üç bölümde değerlendirilebilir (Tanyaş vd., 2013).

2.2.1.1. Afet Öncesi Hazırlık

Bu aşamada yürütülen lojistik faaliyetler, normal koşullarda gerçekleştirilen lojistik faaliyetlerle temelde aynı olmakla birlikte, doğal afet durumuna özgü bazı özellikleri içermektedir. Aşağıda, bu faaliyetlere ilişkin bazı konular bulunmaktadır (Demirci vd., 2018).

2.2.1.2. Planlama

Afet öncesi hazırlık ve planlama, gerekli malzemelerin uygun fiyatlarla, doğru zamanda ve uygun yerlere ulaştırılması üzerine odaklanır. Bu süreçte, lojistik verilerin analiz edilmesiyle programın gerçekleşme olasılıkları değerlendirilmeli, afet planlarına uygun malzeme çeşitleri ve miktarları belirlenmeli ve tedarikçilerin temin süreleri incelenmelidir. Ayrıca, temin edilecek malzemelerin depolanacağı alanlar detaylı bir şekilde planlanmalı, depolama koşulları ve depo kapasiteleri gözden geçirilmelidir. Ulusal ve bölgesel afet planları doğrultusunda bölge bazlı lojistik ve kriz merkezlerinin kapasiteleri belirlenmeli, ayrıca yurtdışından gelebilecek yardım malzemelerinin hızlı bir şekilde afet bölgelerine taşınabileceği gümrük noktaları tespit edilmelidir (Pektaş, 2012).

2.2.1.3. Satın Alma

Afet durumları için malzeme temini süreci, tedarik edilecek firmaların güvenilirlik, deneyim, acil durum müdahale kapasitesi ve finansal durum gibi kriterlerin değerlendirildiği bir süreçtir. Bu aşamada, malzemelerin ya depolanması ya da gerektiğinde tedarik edilmesi amacıyla satın alma faaliyetleri gerçekleştirilir. Özellikle afet veya acil durumların beklendiği bölgelerde, malzeme tedarikini yönetecek kurumların acil durum stratejileri gözden geçirilerek, tedarikçi listeleri düzenli aralıklarla güncellenmelidir. Bu, etkili bir afet yönetimi için kritik bir adımdır (Özdemir, 2021).

2.2.1.4. Taşımacılık Yönetimi

Lojistik yönetimi, bir sorunu etkili bir şekilde çözme ve yönetme aracı olarak öne çıkar. Tasarlanmayan taşıma hareketlerini planlamak, planlanan taşıma işlemlerini etkili bir biçimde yönetmek ve denetlemek, bu sürecin temel hedefini oluşturur. Taşıma, malzemelerin ihtiyaç duyulmayan yerlerden, gerektikleri noktalara sorunsuz bir şekilde ulaştırılmasını sağlayan kilit bir araç olarak dikkat çeker (Koca, 2001).

2.2.1.5. Depo Yönetimi

Depolama, lojistik sürecin temel fonksiyonlarından biridir ve malzemelerin belirli koşullara uygun şekilde saklanması işlemidir. Acil durumlar ve olası afetler için temel ihtiyaç malzemelerinin istiflenmesi ve hazır bulundurulması kaçınılmazdır. Bu sürecin etkin şekilde yapılabilmesi için şu asgari koşulların sağlanması gereklidir:

- Ulaşılabilirlik: Depolama yerlerinin ulaşımı kolay olmalıdır.
- Doğru Arazi Seçimi: Doğru seçilmiş arazilerde depo kurulmalıdır.
- Uygun Bina Yapıları: Uygun yapılarla depolama sağlanmalıdır.
- Çalışma Alanları: Uygun çalışma alanları mevcut olmalıdır.

Bölgesel ve yerel depolarda stokların doğruluğunu sağlamak için düzenli periyodik sayım ve kayıt işlemleri yapılmalıdır. Bu, depolama sürecinin etkili ve doğru bir biçimde denetimini sağlar ve acil durumlar için gerekli malzemelerin hazır bulundurulmasına katkı sağlar (Gülner, 2016).

2.2.1.6. Afet Müdahale Süreci Lojistik Faaliyetleri

Afet müdahale süreci, lojistik faaliyetlerin en yoğun kullanıldığı aşamadır. Bu aşamada, malzemelerin ve ekipmanların doğru kişilere ve doğru bir biçimde en yakın depolardan dağıtımı sağlanmalıdır. Afet sonrası mücadele aşaması ise mevcut durumun kötüleşmesini engellemek ve afetzedelerin hayatlarını kurtarmak için gerçekleştirilen faaliyetlerin en önemlisidir. Bu süreçte gerçekleştirilen lojistik faaliyetleri; önceden yapılan değerlendirme ve ihtiyaç tespiti, afet öncesi hazırlanan lojistik eylem planının uygulanması, afet sonrası müdahale sürecinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve raporlanması gibi aşamalardan oluşur. Bu aşamalar, afetin etkilerini azaltmaya ve etkilenen bölgelerdeki insanların acil ihtiyaçlarının karşılanmasına odaklanır. Afet müdahale evresinde, idari birim hem can hem de mal kurtarma çabalarına odaklanırken, aynı zamanda olağanüstü durumun normale dönmesi için çabalar sarf etmelidir. Bu evrede kapsam, müdahalede görev alacak personelin belirlenmesini, halkın uyarmasını, gerektiğinde tahliye edilmesini ve barınma imkanlarının sağlanmasını içerir. Ayrıca, halkın sürekli olarak bilgilendirilmesi, arama-kurtarma, enkaz kaldırma, tıbbi ve acil yardımların yapılması, hasar tespiti ve zarar azaltma için uyulması gereken kuralların belirlenmesi de müdahale evresinde yürütülen çalışmalardır. Buna ek olarak, bölge içinden veya dışından yardımların talep edilmesi de bu evre içinde değerlendirilebilecek faaliyetler arasındadır (Kadıoğlu & Özdamar, 2008; Coppola, 2011; Yaprak, 2015).

2.2.1.7. Afet Müdahalesinin Ardından Lojistik Faaliyetler

Afet yönetiminin son aşaması, iyileştirme ve yeniden yapılandırma sürecidir. Bu aşama, afetten etkilenen toplulukları afet öncesi durumlarına döndürmeyi hedefler. Yeniden inşa edilen binalar, altyapı ve insanların yaşamlarını sürdürebilmeleri için sağlanan destekler, bu sürecin önemli unsurlarını oluşturur. Gerçekleştirilen çalışmalar, afetzedelerin normal yaşamlarına dönmelerini sağlamayı amaçlar ve uzun vadeli bir süreci içerir. Bu aşama, afetzedelerin geçici veya kalıcı barınma ihtiyaçlarını karşılamak, geçim kaynaklarını yeniden oluşturmak ve eğitimlerini sürdürmelerine yardımcı olmak gibi çeşitli faaliyetleri içerir. Ancak, bu iyileştirme ve yeniden yapılandırma çalışmaları aylar veya hatta yıllar sürebilir. Afetzedelerin, bu süreçte kendi başlarına yeterli olamayabilecekleri ve yeni koşullara uyum sağlamakta zorlanabilecekleri unutulmamalıdır. Bu nedenle, bu insanlara ekonomik ve psikolojik destek sağlanması gerekebilir. Afete müdahale sürecinin tamamlanmasının ardından, afet malzeme toplama ve bakım ekipleri, malzemelerin hızlı bir şekilde toplanması, bakımı ve depolara sevki için çalışmalarını yürütürler. Bu sürecin etkin bir şekilde yürütülebilmesi için detaylı planlamalar yapılır ve ekiplerin faaliyetleri bağımsız bir gözlemci tarafından değerlendirilir ve raporlanır (Köseoğlu & Yıldırımlı, 2015; Akbal, 2023).

3. CBS Nedir?

CBS, mekânsal verilerin toplandığı, istenildiği zaman erişilebildiği, uzamsal bilgileri görüntüleyebilen, grafik ve nitelik bilgilerini bir arada ve eş zamanlı olarak ilişkilendiren, sorgulayan, analiz eden ve farklı bilgi kaynaklarından gelen verileri entegre ederek yönetim, planlama ve analiz problemlerinin çözümüne katkıda bulunan bilgisayar destekli sistemler topluluğunu ifade eder. Bu sistemler, bilgi alışverişinde standartları sağlar, harita ve tabloların bir araya getirilmesini mümkün kılar ve coğrafi verilerin çeşitli alanlarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır (Yiğit vd., 2011).

3.1. CBS'nin Kullanım Alanları

CBS mekânsal ve mekânsal olmayan verileri entegre ederek geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu teknoloji, bilim dallarından özel sektöre ve kamu sektörüne kadar yaygın bir kullanım bulmuştur. Özellikle ülkemizde yerel yönetimler, CBS uygulamalarını kullanarak istihdam fırsatları sunmakta ve kaynak yönetimi konusunda etkili araçlar elde etmektedir. CBS, verilerin depolanması, analiz edilmesi, sunulması, raporlanması ve modellenmesi gibi süreçlerde etkili olup, özel sektör ve kamu kurumlarında hizmet sunumu ve performans değerlendirmesi için önemli bir araçtır. Yerel bilgi ve kaliteli verinin entegrasyonuyla CBS, kamu politikalarının oluşturulmasında önemli bir role sahiptir.

Bu nedenle, yerel yönetimlerde CBS, planlama, sosyal gelişim, çevre koruma, altyapı yönetimi, ulaşım planlaması, sağlık, eğitim, seferberlik yönetimi, suçla mücadele, trafik güzergâhları, ruhsat ve lisanslama, seçim yönetimi, arsa ve yapılaşma yönetimi gibi birçok alanda önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Çabuk, 2015).

Birçok alanda kullanılan CBS; afet öncesinde kapsamlı tahminlerin yapılması, modelleme çalışmaları ile olası afet zararlarının öngörülmesi, acil durum müdahale ekiplerinin afet bölgelerine ulaşımının optimize edilmesi, yolların durumu, trafik yoğunluğu, rota seçenekleri, alternatif senaryoların oluşturulması, kentsel alanlarda afete hassas bölgelerin belirlenmesi, farklı afet türlerine göre müdahale biçimlerinin geliştirilmesi, paydaşların rol ve görev dağılımlarının yapılması, afet sonrasına ilişkin hasar tespiti, strateji ve eylemlerin belirlenmesi, hasarın onarımı için gereken kaynakları tahmini gibi bir dizi çalışma yürütmektedir. Çalışmaların neticesinde, afetlere karşı daha dirençli yaşam çevrelerinin oluşturulması mümkün olabilir. CBS'nin sunduğu veri analizi, haritalama ve bilgi yönetimi araçları, afet yönetimi süreçlerinin daha etkili bir şekilde planlanmasına ve uygulanmasına katkıda bulunabilir (Tarhan & Partigöç, 2021).

4. Amaç ve Yöntem

Ülkemiz deprem, yangın, sel gibi birçok afet' in sıkça yaşandığı coğrafi bir bölgede yer almaktadır. Bölgelere göre afet çeşitliliğin olduğu bölgemizde ülkemizin doğu-batı-kuzey-güney-orta bölgelerinde farklı farklı veya benzer afetler görülmektedir. 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş merkezli yaşanılan depremlerde resmi açıklamalara göre 53 bin 537 kişinin hayatını kaybetmiş, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının açıklamalarına göre 39 bin 441 bina deprem anında yıkılmış, yıkılan binalarla birlikte 271 bin 892 bina ise aldıkları hasarlar nedeniyle kullanılamaz hale gelmiştir (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2024). Yüzyılın afeti olarak nitelendirilen bu iki büyük depremde, hayatta kalan insanlar için başlatılan yardım kampanyasında belirli depo merkezleri olmadığı için yardımların afetzedelere ulaştırılmasında, büyük sıkıntılar yaşanmıştır. Bu yaşananlar deprem felaketinin bir nevi önüne geçmiş yardımlar kısmi de olsa sekteye uğramıştır. Bu nedenle doğru zamanda, doğru yere konumlandırılmış, sistemli bir şekilde dağıtımı yapılan, iyi bir organizasyon, herhangi bir afette zarar görmüş bölgelerdeki ihtiyaç sahiplerine hızlı ve etkin bir şekilde yardımın ulaştırılması için acil yardım depoları ve merkezlerinin kurulmasını zorunlu kılmıştır. Kilis ilinde kurulabilecek en uygun acil depo yerlerinin analizi, bu ilin merkezine, Hatay ve Kahramanmaraş'a yakın konumu nedeniyle yapılmıştır. Bu çalışma, afet durumlarında hem Kilis'e hem de çevre illere yardımların hızlı bir şekilde ulaştırılabilmesini amaçlamaktadır. Kilis'te şimdiye kadar ölçülen en şiddetli deprem 5.0 büyüklüğünde olmuştur. Bu nedenle, 5.0 büyüklüğündeki bir depremin olası etkilerinden en az düzeyde etkilenecek acil depo yerlerinin belirlenmesi, Kilis'te bu tür depoların kurulmasının önemini ortaya koymaktadır. Kilis'te bu tür depoların olmaması ve daha önce Kilis ilinde böyle bir çalışmaya rastlanılmaması sebebiyle bu çalışma yapılmıştır. Afet yönetimi ve lojistik planlama, afetlerin yol açtığı acil durumlarla başa çıkmak ve etkilenen bölgeye hızlı bir şekilde yardım ulaştırmak açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu çalışma, afet yönetimi ve lojistik planlama alanlarında karar vericilere rehberlik etmeyi ve afetlerle mücadele süreçlerini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Afet durumlarında depolama yerlerinin önceden belirlenmesi ve bu depolarda gerekli ekipman ve malzemelerin bulundurulması, afetzedelere hızlı, etkili ve koordineli bir yardım sağlama açısından son derece kritiktir. Çünkü afet anında doğru yerde ve doğru zamanda malzeme ve teçhizatın bulunması, kurtarma ve yardım operasyonlarının başarılı bir şekilde yürütülmesini sağlar. Bu pratik yaklaşım, afet durumlarında lojistik planlamanın önemini vurgulayarak, etkilenen bölgelere ulaşacak yardımın hızını artırmayı ve afetzedelere daha hızlı, koordineli ve etkili bir destek sağlamayı amaçlar. Bu sayede, afet yönetiminde verimliliği artırarak daha iyi sonuçlar elde etmeyi hedefler.

4.1. Araştırma Soruları

Bu araştırma ile aşağıdaki sorulara cevap verilmeye çalışılacaktır;

a. Kilis'teki afet depolama yerleri nasıl belirlenebilir?
b. Halkın, afet durumunda ihtiyaç duyduğu yardım ve malzemelerin en hızlı şekilde ulaştırılabilmesi için etkili depo yerleri neresi olmalıdır?
c. CBS teknolojileri, Kilis ilinde afet lojistiği stratejilerinde nasıl entegre edilebilir?
d. Kilis ilindeki afet riskleri ve potansiyel afetlerin tespiti için hangi CBS araçları ve veri kaynakları kullanılabilir?
e. Kilis ilinde mevcut altyapı ve yerel kaynaklar göz önünde bulundurularak, afet depolarının stratejik bir şekilde konumlandırılması ve bu depoların yönetimi için nasıl bir CBS tabanlı planlama yapılabilir?
f. Kilis ilindeki afet depolarının etkin bir şekilde çalışabilmesi ve hızlı bir yanıt verebilmesi için hangi CBS entegrasyonları ve süreçler geliştirilebilir?

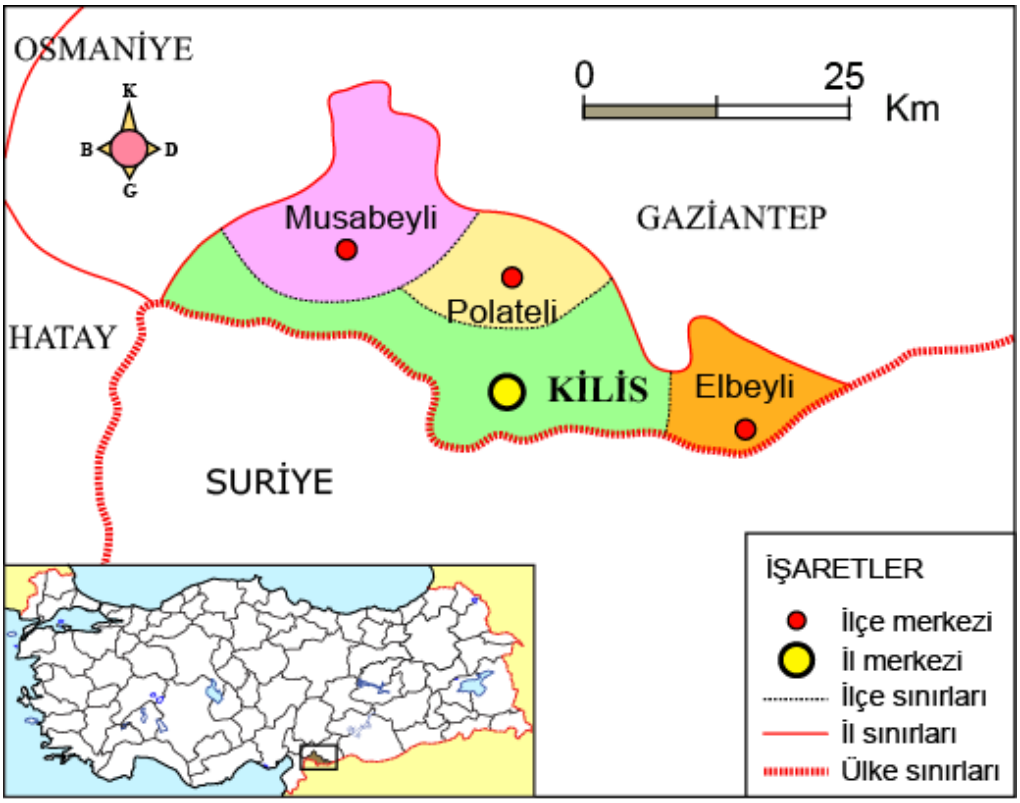
4.2. Araştırmanın Yöntemi

Mekânsal araştırma yöntemlerinden bir tanesi olan CBS ile ülkemizde afetlerde güncel kaynaklardan faydalanılarak afetlerin zarar ve sonuçlarında yaşayacağımız maddi ve manevi kayıpların en aza indirgenmesi amaçlanmıştır. Bu yöntem ile uygulamada kullandığımız programlarda sahadan aldığımız en güncel verileri işleyerek çalışma alanı veya bölge içerisinde kalan alanlarda problemlerin çözümlenmesi için gerekli tedbirlerin alınması için altlık olarak değerlendirilmesi

amaçlanmıştır. Bu çalışmada araştırma yöntemi olarak tercih ettiğimiz CBS tabanlı analiz yöntemi ile Ülkemizin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alan Kilis İli için afetlerde veya acil durumlarda ayakta kalabilecek ilin veya bölgenin ihtiyaçlarını hızlı bir şekilde karşılayabilecek depoların uygunluk yer analizinin tespiti amaçlanmıştır. Yöntemin uygulanmasında GIS programı ArcMap 10.5 yazılımı kullanılarak çalışma alanı içerisinde kalan alan ile ilgili gerekli sonuçlar tespit edilmiştir.

4.3. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Kilis ili belirlenmiş olup Kilis merkezi 8,13 km² olup, Kilis il sınırlarının toplam alanı 1,411 km²'dir. Çalışma alanımız Kilis merkezi ve ilçelerini kapsamaktadır. Kilis ilinin toplam nüfusu 155.179' dur. Bu çalışma, Kilis ilinde CBS kullanarak afet lojistiği ve depo yerlerinin belirlenmesi üzerine odaklanmaktadır. Çalışma, afet durumlarında etkili lojistik stratejilerin oluşturulması ve afetzedelere hızlı yardım ulaştırılmasına yönelik CBS'nin rolünü ve kullanımını incelemektedir. 6 Şubat 2023 tarihli Kahramanmaraş merkezli depremde Kilis ili özelinde 110 adet bina yıkılmış olup, ağır hasarlı ve acil yıkılacak bina sayısı 193 adettir. Kilis ilinde kurulan toplam 1088 adet geçici barınma alanı (AFAD çadırı) mevcuttur. Fakat afet depo yeri bulunmamaktadır. Kilis ilinde bugüne kadar kaydedilen en şiddetli depremin büyüklüğünün 5.0 olduğu göz önüne alındığında, 5.0 büyüklüğündeki bir depremin olası etkilerini en aza indirmek için acil depo yerlerinin Kilis ilinde kurulması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu çalışma, acil depo yerlerinin afet durumlarından etkilenmemesi veya en az seviyede etkilenmesi ve aynı zamanda Kilis iline ve çevre illere hızlı ve etkin yardımların ulaştırılabilmesi amacıyla yapılmıştır. Kilis İli özelinde, CBS teknolojisinin afet lojistiği yönetimine nasıl entegre edilebileceği ve depo yerlerinin stratejik olarak nasıl belirlenebileceği üzerine bir analiz sunmayı hedeflemektedir.



Şekil 1. *Kilis ili haritası (Milliyet Gazetesi, 2021)*

5. CBS Tabanlı Uygulama

Bu çalışmada Kilis İlinde en uygun depo yeri analizi CBS tabanlı bir analiz yöntemi ARCMAP 10.5 GIS programı ile yapılmıştır. Bu yöntem ile çalışma alanına ait güncel 12 (On iki) adet veri kullanılmıştır. Bu veriler; enerji-nakil hattı, trafo, iklim (yağış-sıcaklık-rakım), yükseklik, eğim, nüfus, fay hattı, toprak, yol ve bakı verileri kullanılmıştır.

a. **Enerji – Nakil Hattı Verisi:** Depolardaki saklanan veya depolanan ürünlerin belli sıcaklıktaki saklanması için enerji-nakil hatlarından faydalanarak ürünlerin korunmasını sağlamak amaçlanmıştır.
b. **Trafo Verisi:** Enerji nakil hattının sorunsuz çalışması için enerji kaynağı olan trafo verilerinden faydalanılarak enerji nakil hatlarının sorunsuz şekilde çalışması amaçlanmıştır.

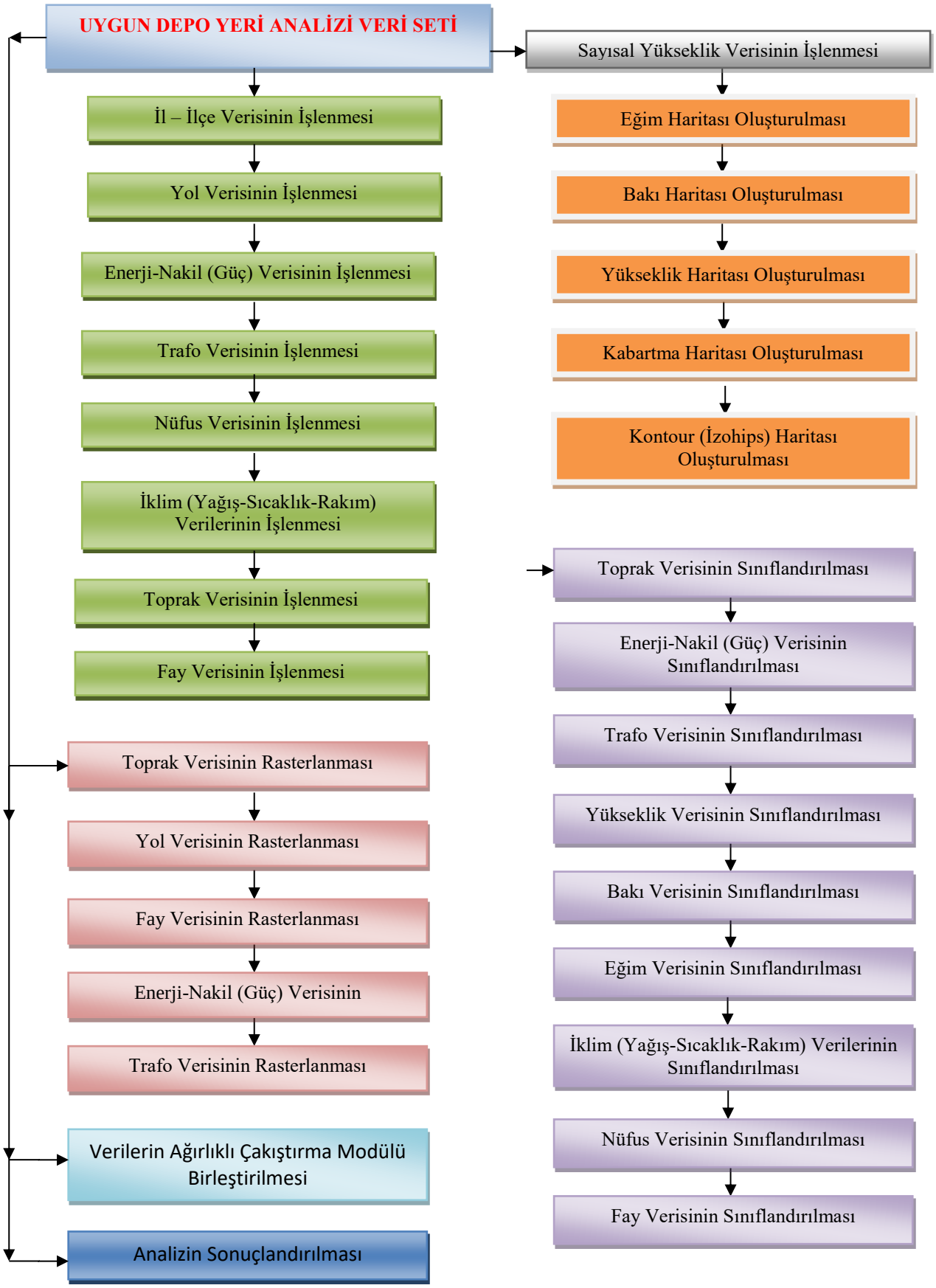
c. **İklim Verisi (Yağış-Sıcaklık-Rakım) :** Depoların kurulduğu merkezlerdeki iklim faktörünün afetlerin her an olabilme ihtimalleri göze alındığında yağış toplama miktarları yıllık seviyelerine, yine belli sıcaklık seviyelerinde araçlarla veya yaya olarak taşınma ihtimalleri de göz önünde bulundurulması ve belli bir rakım seviyesinin atında ve üstünde tutulması yine hem araçlarla ulaşılma veya yaya olarak ulaşılma ihtimallerinden dolayı bu seviyelerin hesaplanarak ve ölçülerek bu verilere ihtiyaç duyulması.
d. **Yükseklik Verisi:** Depoların kurulacağı merkezlerin taşıma ve taşınabilirliğinin ısının da yüksekliğe bağlı olarak değişmesininde değerlendirilerek, depoya ulaşması gereken araçların her tipten araçların giriş-çıkış işlemlerinde sıkıntı yaşamayacak durumda olması gereken yükseklikte kurulmaları bu verinin kullanılması olarak amaçlanmıştır.
e. **Eğim Verisi:** Depoların kurulması gereken arazi seçiminde yüksek eğimli araziler yerine daha düz arazilerin tercih edilmesinde eğim verisinin kullanılması amaçlanmıştır. Düz arazide kurulacak olan depolar ulaşımdan maliyete her alanda olumlu etki sağlamaktadır.
f. **DEM Verisi:** Uydulardan alınan görüntülerden alınmış konumsal ham verilerdir. Bu verilerin üzerine işlenen diğer veriler sonucu analiz yapılmaktadır.
g. **Nüfus Verisi:** Gelen yardımların ve ihtiyaç malzemelerinin bu verilerin doğru kullanımı sayesinde bölgelerdeki nüfusla doğru orantılı şekilde paylaşımının yapılmasını sağlayarak ürünlerin ziyan olmasını ve eksik dağıtılmasını önlemek amaçlanmıştır.
h. **Fay Hattı Verisi:** Çalışma alanı olan Kilis ilinin sınırları içerisinde kalan diri ve ölü fayların konumlarının tespit edilerek fay hattı üzerine yapılacak depoların fay hattı üzerindeki alanlardan uzak bölgelere tayin edilmesi amaçlanmıştır. Fay boylarının uzunlukları ve kısalıkları dikkate alınarak gerekli hesaplamalar yapılması amaçlanmıştır. Bu veri aktif veya diri olarak bilinmeyen, şiddetli depremler üretmeyen, uzun yıllar boyunca deprem üretmeyen fay tipleridir. Farklı uzunluklara sahip ve levhaların kesiştiği bölgede değillerdir.
i. **Toprak Verisi:** Bölgedeki toprak yapısına göre depoların konumlandırılacağı yerin tespiti için gerekli bir veri türüdür. Bu veri ile arazinin toprak yapısı tespit edilerek afetlere karşı toprağın gücü ve toprak tipine göre önlemler alınarak toprağın yapısına göre uygun yer tespiti yapılması amaçlanmıştır.
j. **Yol Verisi:** Kurulması gereken depoların yol verisindeki kullanılmasındaki amaç; yol hatlarının öncelik, kullanılabilirlik, hızlı ve ihtiyaçlara doğru zamanda ulaşılmasında depolara ulaşım noktasında yol verileri üzerinden avantaj sağlamak amaçlanmıştır.
k. **Bakı Verisi:** Güneş ışınlarının geldiği yön ve güneşe bakan yerlerin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Afet depo yerini belirlerken potansiyel afet risklerinden etkilenmemesi, deponun bütünlüğünün koruması ve herhangi bir afet durumunda afetzedelerin birincil ihtiyaçlarının karşılanabilmesi amacıyla bu kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Kaynak olarak açık kodlu kaynaklar kullanılmıştır. Bu çalışmada, birçok veri eş zamanlı olarak işlenmiş olup ve kullanılan verilerin devamlı güncellenmesi sebebiyle bu veriler daha önce hiçbir çalışmada kullanılmamıştır.

ArcMap 10.5 CBS programı kullanılarak, Kilis ilinin güneydoğu Anadolu bölgesinde afet durumlarında insani ihtiyaçların hızla karşılanabileceği, sağlam zemin ve uygun topraklar üzerine dayanıklı bir depo yeri belirleme amaçlanmaktadır. Bu depo yeri, ulaşım ağının aksama veya tıkanma riski olmayan bölgelerde bulunmalıdır. İnsanlara hızlı yardım ulaştırılabilmesi için her türlü aracın sorunsuzca giriş-çıkış yapabileceği bir ulaşım kaynağına yakın olmalı ve hastane ile sağlık merkezlerine yakın mesafede olabilmelidir.

Aynı zamanda fay hatlarından uzak veya fay hatları ile çevrili alan içinde ise zayıf şiddetli depremler üzerine konumlandırılacak, enerji depoları, jeneratörler ile enerji nakil hatları üzerinde ve hiçbir enerji kesinti riski yaşamayacak hatlar üzerinde olmalıdır. Özellikle nüfusun yoğun olduğu kalabalık bölgelerinin yakınlığı dikkate alınmıştır. Sıcaklık-yağış gibi iklim faktörleri ile ne çok sıcak ne çok soğuk lokasyonlar ile yağış alan bölgelerde suyun toplanamadığı alanlar üzerine kurulabilmeli, rakım ve yükseklik faktörleri deniz seviyesinden orta yükseklikte ve yerden azami yükseklikte alanlar seçilerek tırmanarak çıkılacak alan ya da düz alanlar tercih edilmemelidir.

Arazinin topografik yapısı öngörülerek eğimli arazilerden kaçınılarak ve inşa edilecek depoların yönlerinin seçiminde bakının önemi dikkate alınarak bu depo türleri için en uygun yer ve uygun yer analizi uygulaması çalışmasını elimizdeki verileri belirli yöntem, metot, işlem adımları ve aşamalarla verilerin yaklaşık doğruluk ve yaklaşık güncellikleri ile çalışma sonuçlandırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Tablo 1' de gösterilmiştir.



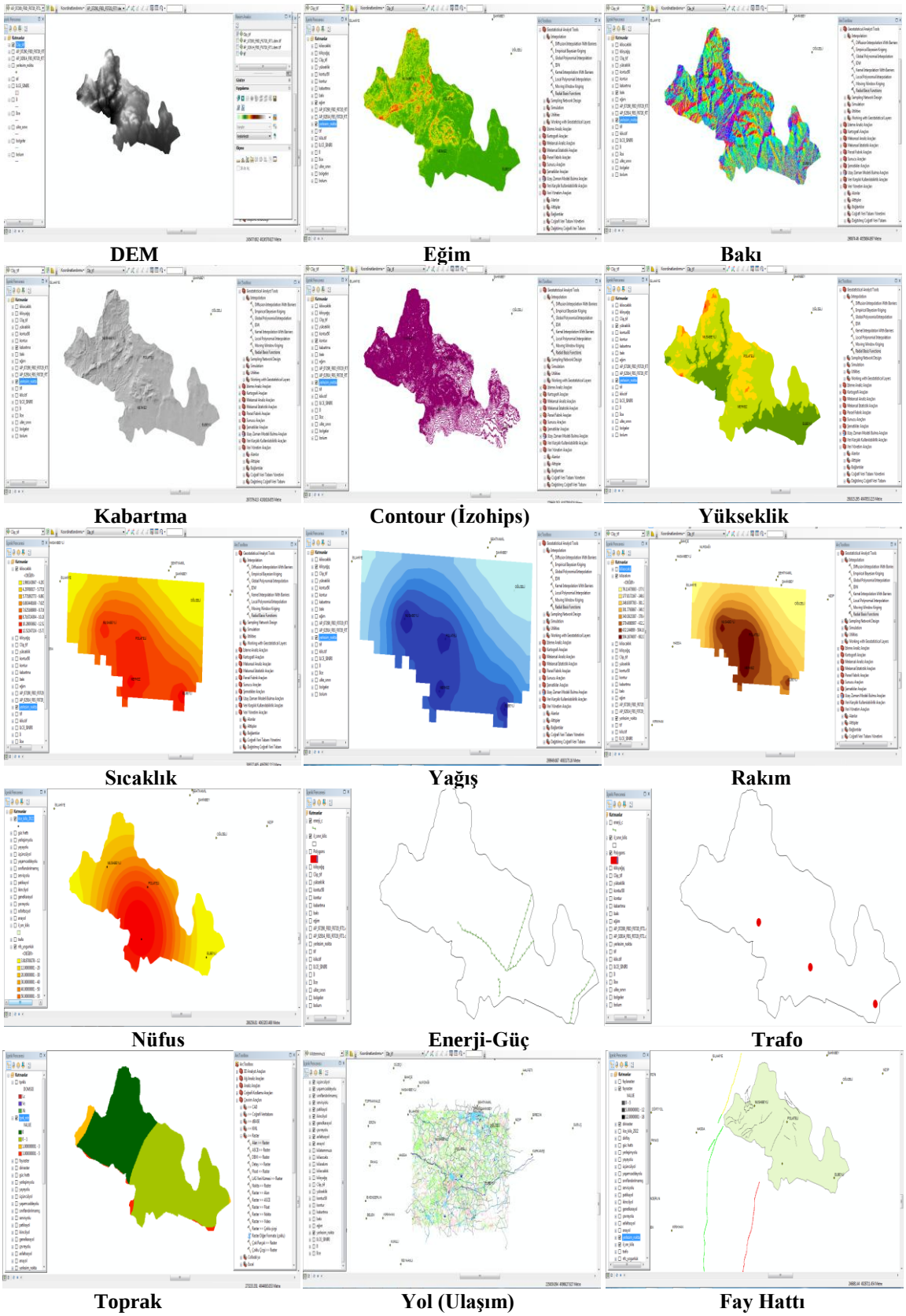
Tablo 1: Akış şeması

6. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, uygun bir yer analizi yapabilmek için ARCMAP 10.5 programı tercih edildi. Verilerin güncel olması önemle sağlanmış olup, gerekli veri kaynakları hem özel hem de tüzel kaynaklardan temin edilmiştir. Temin edilen veriler, GIS programına aktarılarak işlenme, raster temsile dönüştürülmesi, sınıflandırma ve ağırlıklı çakıştırma adımlarıyla analiz edildi. Toprak, yol (ulaşım), fay hatları, enerji-güç ve trafo verileri raster temsile dönüştürülüp sınıflandırma aşamasında kullanılmak üzere hazır hale getirildi. Diğer verilerin ise raster temsile dönüştürülmesine gerek olmadığı göz önünde bulundurulduğu. Bu şekilde, bütün veriler sınıflandırma aşamasına hazır hale getirildi. Verilerin işlenme aşaması şu şekildedir:

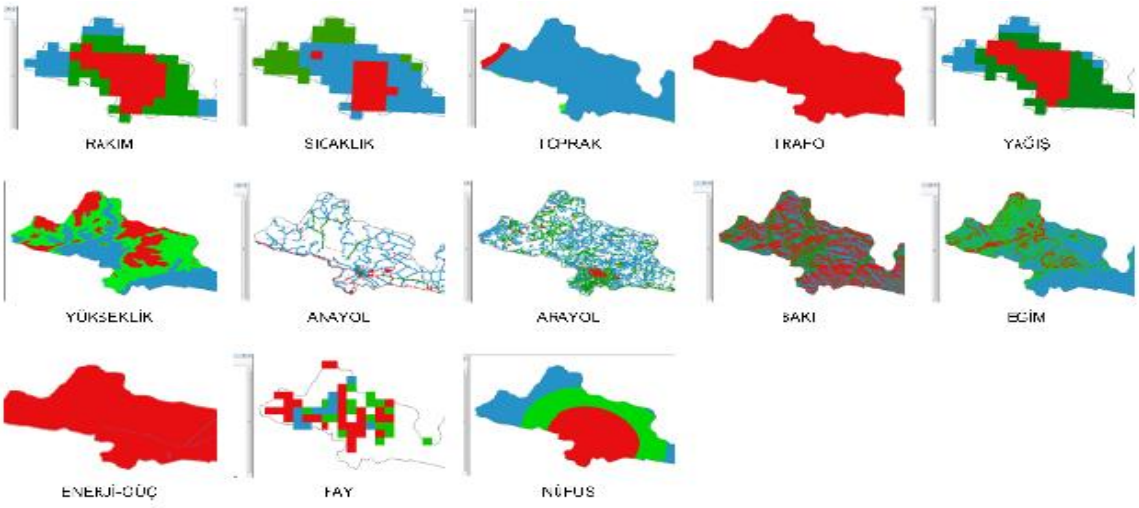
a. **DEM Verisi İşleme:** İlk olarak Kilis ilinin sınırları içerisinde kaldığı ALOS PALSAR uydu verileri işlenir.
b. **İl-İlçe Verisi İşleme:** Çalışma alanının belirlenmesi için uydu verisi ile il-ilçe sınırları verisinin birleştirilerek çalışma alanı belirlenir.
c. **Eğim Verisi İşleme:** Arazinin eğim verisi işlem analizi.
d. **Bakı Verisi İşleme:** Arazinin güneşe göre yönü olan bakı verisi işlem analizi.
e. **Kabartma İşlemi:** Arazinin topografik yapısının, çözünürlüğünün ve yer şekillerinin ortaya çıkmasını sağlayan işlemdir.
f. **Kontur İşlemi:** Çalışma alanı olan arazinin 20 metrelik aralıklarla izohips haritası.
g. **Yükseklik Verisi İşleme:** Bölgenin kot değerleri hesaplanarak yükseklik verisi elde edilmiştir.
h. **Sıcaklık – Yağış – Rakım Değerleri İşleme:** Veriler https://en.climate-data.org web sayfasından referans alınarak sıcaklık – yağış – rakım değerleri manuel olarak işlenmiştir. Bölgenin yıllık yağış ve sıcaklık ortalamaları ile birlikte deprem öncesi hesaplanmış rakım değerleri referans alınmıştır. Ek olarak analize dahil edilmeyen yılın en düşük ve en yükseklik sıcaklık ortalamalarına sahip olan ayları olan ocak ve temmuz ayları da belirtilmiştir.
i. **Sıcaklık Verisi İşleme:** Çalışma alanındaki merkez ve ilçelerine ait yerleşim bölgelerindeki yıllık sıcaklık ortalama değerleri ile sınıflandırılmış analiz sonucu.
j. **Yağış Verisi İşleme:** Çalışma alanındaki merkez ve ilçelerine ait yerleşim bölgelerindeki yıllık yağış ortalama değerleri ile sınıflandırılmış analiz sonucu.
k. **Rakım Verisi İşleme:** Bölgenin deniz seviyesinden olan yükseklik değerleri işlenerek elde edilmiş analiz sonucu.
l. **Yol (Ulaşım) Verisi İşleme:** Çalışma alanındaki yol verileri işlenmiştir.
m. **Nüfus Verisi İşleme:** Kilis il ve ilçelerine ait nüfus verileri GIS programında işlenmiştir.
n. **Toprak Verisi İşleme:** Kilis iline ait toprak verisi işlenmiştir.
o. **Fay-Hattı Verisi İşleme:** Kilis iline ait fay-hattı verisi işlenmiştir.
p. **Enerji-Nakil (Güç) Hattı Verisi İşleme:** Kilis iline ait enerji-nakil (güç) hattı verisi işlenmiştir.
q. **Trafo Verisi İşleme:** Kilis iline ait trafo verisi işlenmiştir.

Şekil 2'de verilerin işlenme aşaması gösterilmiştir.



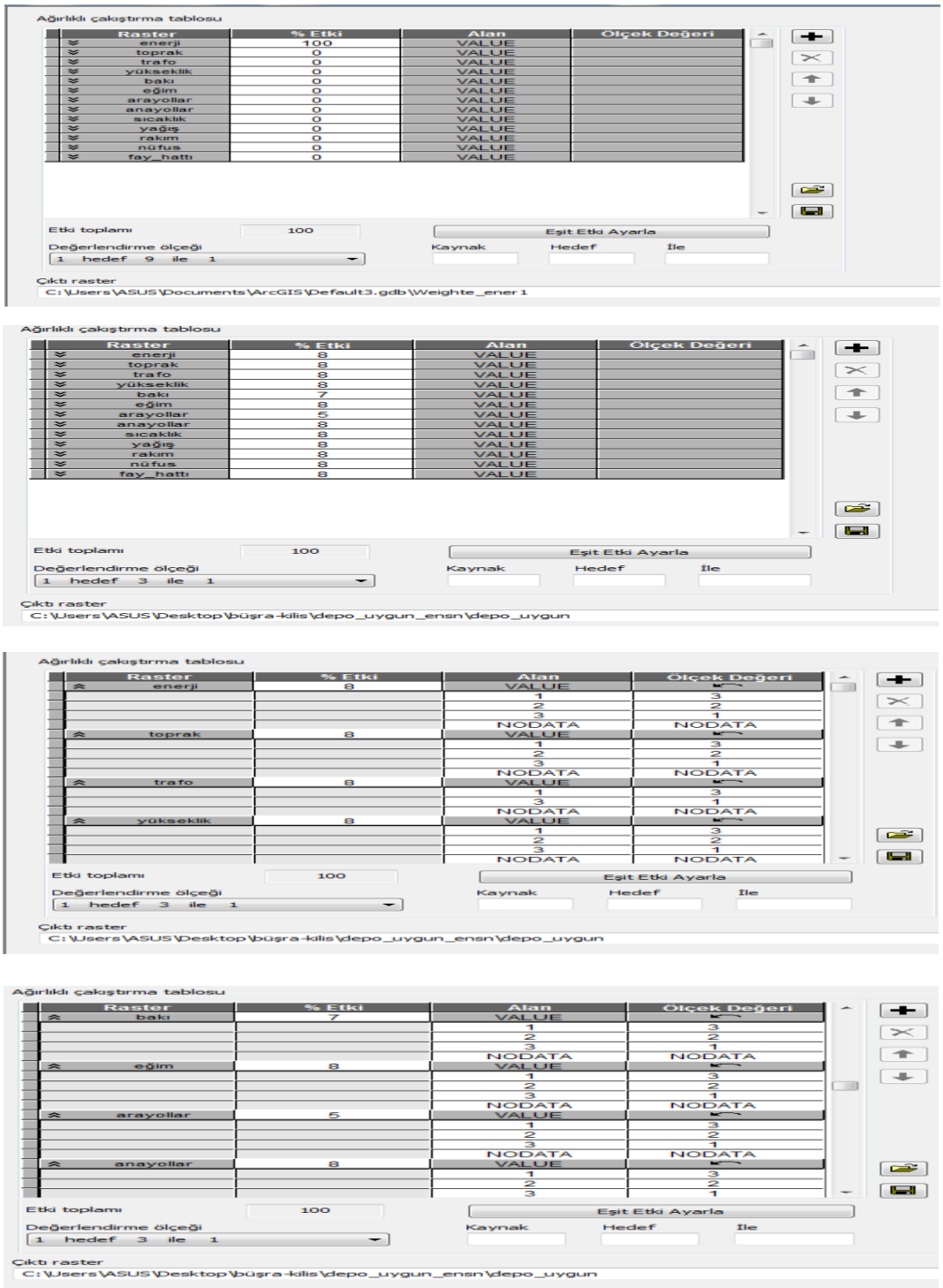
Şekil 2: Verilerin işlenme aşaması

Kilis ilinin en uygun, uygun ve uygun olmayan yerlerinin analizinde kullanılan 12 verinin, 3 kademeli sınıflandırma yöntemiyle analiz edilerek kademeler arası geçişlerdeki sayı değerlerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Analizin son adımında, ağırlıklı çakıştırma modülünde yeniden sınıflandırılmış verilerdeki etki değerlerine göre ölçek değer katsayılarındaki puanlamanın analize etkisinin artırılması amaçlanmıştır. Yeniden sınıflama aşamasında, en uygun yer, uygun yer ve uygun olmayan yerlerin net bir şekilde ayırt edilmesi sağlanmıştır. Bu yeniden sınıflama ile 1 numara mavi renkli alan en uygun yer, 2 numara yeşil renkli alan uygun yer ve 3 numara kırmızı renkli alan uygun olmayan yer olarak belirlenmiştir.

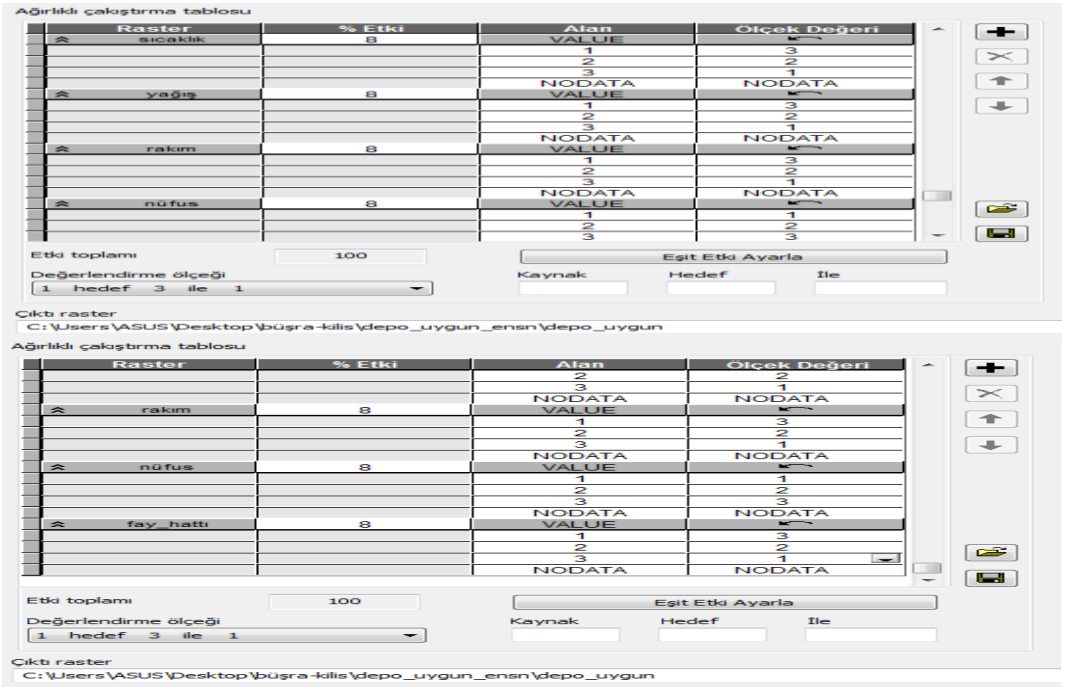


Şekil 3: Verilerin sınıflandırma aşaması

Sınıflandırma işlemi yapılan 12 verinin ağırlıklı çakıştırma modülüne aktarılması gerçekleştirilmiştir. Etki değerleri, verilerin önemine göre yüzde olarak değerlendirilmiş ve 100 üzerinden puanlanmıştır. Ölçek değerleri, veriler üç sınıfa ayrılarak 1-2-3 puanlama yöntemine göre belirlenmiştir; en uygun yer 3 puan, uygun yer 2 puan ve uygun olmayan yer 1 puan olarak puanlanmıştır. Tablonun oluşturulma aşamasında, 3 sınıfa ayrılmış verilerin tablo grafiğinde etki değerleri yüzde olarak ve ölçek değeri 1-2-3 puanlama sistemine göre atanmıştır. Yol, yükseklik, bakı, eğim, enerji-güç, fay, nüfus, rakım, sıcaklık, toprak, trafo ve yağış verilerinin ARCMAP 10.5 programında gerekli işlem adımlarının tamamlanmasıyla ağırlıklı çakıştırma analizi yapılmıştır. Aşağıda Şekil 4'de gösterilmiştir.

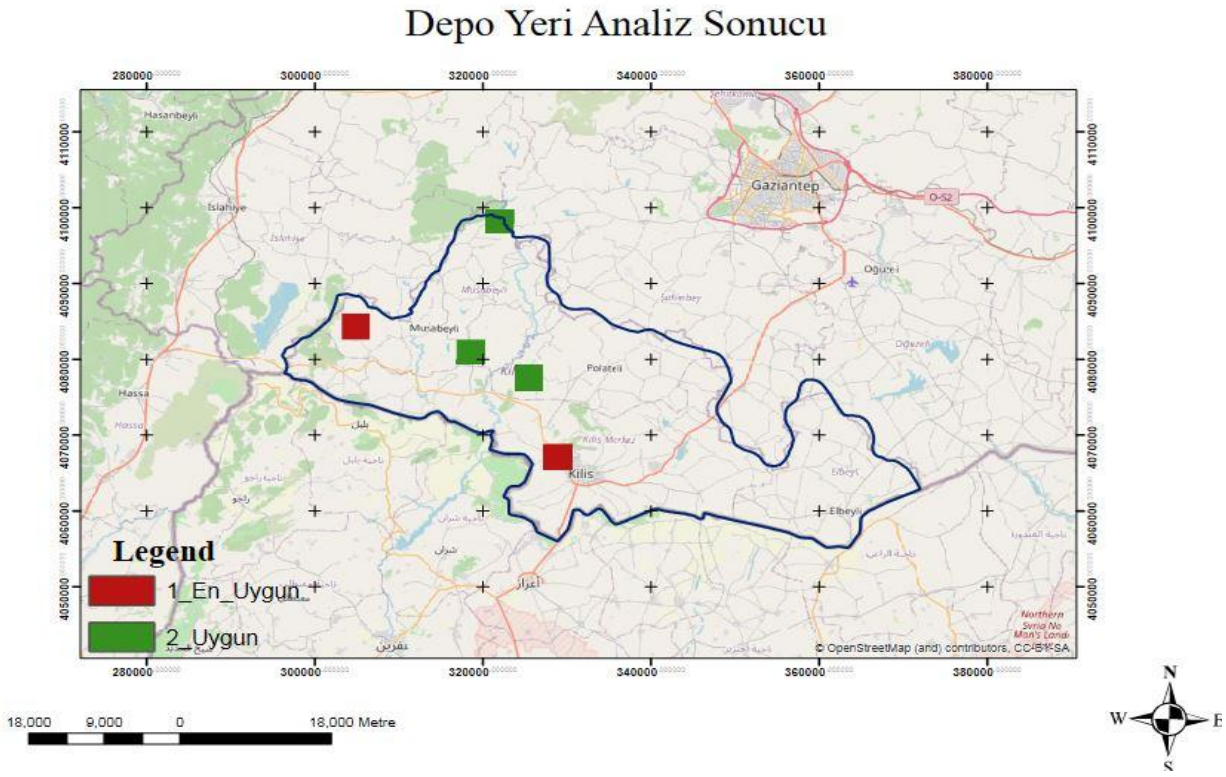


Şekil 4: Ağırlıklı çakıştırma analizi aşaması



Şekil 4: (Devam)

Bu analiz sonucunda, Kilis il merkezinin kuzeybatı mevkiinde yaklaşık 8 km²'lik bir alan ile Kilis ilinin Musabeyli ilçesinin güneybatısındaki yaklaşık 8 km²'lik bir alan, toplamda yaklaşık 16 km²'lik iki bölge en uygun yerler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Kilis ilinin Musabeyli ilçesinin kuzey ve güney bölgelerinde toplamda yaklaşık 16 km²'lik iki alan ile birlikte, Kilis ilinin Polateli ilçesinin merkezinde kalan yaklaşık 8 km²'lik alanlar da uygun yerler olarak analiz edilip konumlandırılmıştır. Kırmızı renkle gösterilen alanlar depo yeri seçimi için en uygun yerleri, yeşil renkle gösterilen alanlar ise depo yeri seçimi için uygun yerleri temsil etmektedir. Aşağıda Şekil 5, 6 ve Tablo 2 de gösterilmiştir.

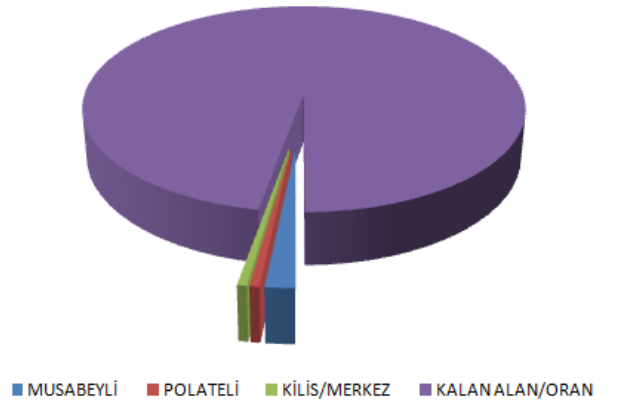


Şekil 5: Depo yeri analiz sonucu

Tablo 2: Depo sonucu analiz açıklaması

İl/İlçe	Mevkii	Analiz Sonucu	Uygunluk Sıralaması	Açıklama
Kilis	Merkez	En Uygun	1. En Uygun Alan	En uygun alan olması ve Kilis merkeze çok yakın olması dolayısıyla 1. en uygun olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki haritada kırmızı renkle gösterilmiştir.
Musabeyli	Güneybatı	En Uygun	2. En Uygun Alan	En uygun olması ile birlikte Kilis il merkezine yakınlığından dolayı 2. en uygun alan olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki haritada kırmızı renkle gösterilmiştir.
Musabeyli	Kuzey	Uygun	3. Uygun Alan	Kilis il merkezine uzak olması ile birlikte konum olarak sapa bir alanda olduğundan dolayı 3. uygun alan, genel olarak 5. uygun alan olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki haritada yeşil renkle gösterilmiştir.
Musabeyli	Güney	Uygun	2. Uygun Alan	İlçe merkezinin güneyinde, Kilis il merkezine kuzey alandan daha yakın bir noktada bulunduğu için 2. uygun alan ve 4. genel uygun alan olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki haritada yeşil renkle gösterilmiştir.
Polateli	Merkez	Uygun	1. Uygun Alan	Kilis merkezinin sınır komşusu ilçesinde bulunduğu ve merkeze yakın bir lokasyonda bulunduğu için 1. uygun alan ve 3. genel uygun alan olarak tespit edilmiştir. Yukarıdaki haritada yeşil renkle gösterilmiştir.

İl/İlçe	Alan (km^2)	Oran (%)
Kilis toplan alan / oran	1411.18	100
Musabeyli	24.40	1.729
Polateli	8.13	0.576
Kilis/Merkez	8.13	0.576
Kalan alan / oran	1370.52	97.119



Çalışmada, uzman görüşleri ve literatür taramasının sonuçları değerlendirilmiş ve bu sonuçlar üzerinde ağırlıklandırma yapılmıştır. Bilgilioğlu & Gezgin (2022) tarafından yapılan çalışmada Nevşehir ili için katı atık depolarının yer seçimine yönelik CBS Çok Kriterli Karar Verme (ÇKVV) yöntemini kullanmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgular dikkate alındığında, kullanılan CBS yönteminin uygun yer analizinde benzer sonuçlar ortaya koyduğu; analiz sürecine etki eden yükseklik, eğim, fay hattı ve yol verilerinin de benzerlik gösterdiği saptanmıştır. Benzer şekilde Erbaş vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada tehlikeli madde depo yeri seçimi analizinde CBS yöntemi, depo yeri seçimi ve kullanılan veriler (nüfus, eğim, fay hattı, yol) etkin bir şekilde kullanılmıştır ve kullanılan veriler bakımından benzerlikler saptanmıştır. Ergün vd. (2020) ise yapılan çalışmanın konusu bakımından uygunluk göstermekte olup, yöntem ve analiz bakımından herhangi bir benzerlik saptanmamıştır. Uygun yer seçimi analizinin farklı yöntemlerle de belirlenebileceğini çalışmasında göstermektedir. Bediroğlu & Yıldırım (2020) yaptıkları çalışma ile Ergün vd. (2020) benzerlik saptanmıştır. Kullanılan yöntem bakımından bu çalışmayla örtüşmektedir. Palazca & Partigöç (2018) tarafından yapılan çalışmada ise, kullanılan tüm yöntem ve veriler bakımından benzerlik gözlemlenirken, çalışma amaçları açısından farklılıklar belirginleşmiştir. Ancak Aksoy (2016) yaptığı uygulamalı çalışmada kullanılan yöntem bakımından uyumlu olup kullanılan veriler bakımından tamamına yakını benzerlik göstermektedir.

Yukarıda incelenen çalışmalar ve gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda, bu çalışmanın Kilis ili özelinde afet lojistiği depo yeri seçimine yönelik farklı bir yaklaşım sunması, çeşitli veri katmanlarının entegrasyonu yoluyla özgün bir analiz ortaya koyması ve dolayısıyla literatüre önemli bir katkı yapma potansiyeli barındırdığı değerlendirilmektedir.

7. Sonuç ve Öneriler

Yapılan bu çalışma, Kilis ili kapsamında afet lojistiği için uygun depo yerlerini belirlemektir. Bu doğrultuda, CBS kullanılarak afet sonrası lojistik faaliyetlerin etkin ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için stratejik depo lokasyonlarının tespit edilmesi hedeflenmektedir. Böylece, afet durumlarında yardım malzemelerinin hızlı ve etkili bir şekilde dağıtılması sağlanarak, olası can ve mal kayıplarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Analiz sonucunda 5 adet depo yeri belirlenmiştir: 2 depo yeri en uygun, 3 depo yeri ise uygun olarak tespit edilmiştir. Şekil 5'teki ağırlıklı çakıştırma analiz tablosunda da görüldüğü üzere, verilerin % etki, alan ve ölçek değerleri girilerek program otomatik olarak bu yerleri atamıştır.

Bu analiz sonucunda; Kilis il merkezinin kuzeybatı mevkiinde yaklaşık 8 km²'lik alan ve Kilis ilinin Musabeyli ilçesinin güneybatı bölgesindeki yaklaşık 8 km²'lik alan toplamda yaklaşık 16,1 km²'lik 2 bölgedeki alan en uygun yer olarak tespit edilmiştir. Yine Kilis ilinin Musabeyli ilçesinin kuzey ve güney bölgelerindeki 2 bölgede toplamda yaklaşık 16,1 km²'lik alan ile birlikte, Kilis ilinin Polateli ilçesinin merkezinde kalan yaklaşık 8 km²'lik alanlar ise uygun yer olarak analiz sonucu olarak hesaplanmış ve konumlandırılmıştır. Çalışmada uzman görüşleri, resmi kaynaklar ve literatür taraması sonuçları değerlendirilmiş ve Kilis ilinde afet lojistiği kapsamında herhangi bir depo yerine rastlanmamıştır.

Yapılan bu çalışmada, Kilis ili örneği üzerinden afet lojistiği kapsamında CBS kullanarak depo yerinin belirlenmesi ele alınmıştır. Ancak gelecekteki araştırmalar için bir dizi potansiyel araştırma konusu ortaya çıkmıştır. Özellikle, afet lojistiği alanında CBS'nin daha etkin bir şekilde nasıl kullanılabileceği konusunda daha derinlemesine bir araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, afet lojistiği operasyonlarının optimize edilmesi için matematiksel modeller ve algoritmalar geliştirilmesi üzerine yoğunlaşılabilir. CBS'nin acil durum yönetimi süreçlerine nasıl dahil edilebileceği ve kentsel dönüşüm süreçlerinde afet lojistiğinin nasıl iyileştirilebileceği gibi konular da gelecekteki araştırmalar için önemli birer odak noktası olabilir. Ayrıca, büyük veri analitiği ve yapay zeka tekniklerinin afet lojistiği planlamasında nasıl kullanılabileceği de incelenmelidir. Bu öneriler, gelecekteki araştırmacıların afet lojistiği ve CBS alanında çalışmalarını yönlendirmek için bir temel oluşturabilir.

Sonuç olarak; ülkemizin deprem kuşağı bölgesinde ve yer yer iklim felaketlerinin yaşandığı bir coğrafyada olduğunu düşünerek CBS tekniği veya benzer teknikler kullanılarak ve yaygınlaştırılarak insanlar ve yaşam merkezlerinin tercih yerlerinin bu yöntem veya tekniklerle tespiti amaçlanmalıdır. Afet durumlarında insanların anında erişebileceği, acil durum iletişimi, güvenli bölge tespiti, temel yardım bilgileri gibi özellikleri bulunan bir mobil uygulama geliştirilmeli ve bu uygulama bütün illerde yaygınlaştırılmalıdır. Afet öncesi hazırlık ve afet anında doğru davranış biçimleri konusunda seminerler, eğitimler, kampanyalar düzenlenip toplumda bir farkındalık oluşturulmalıdır. Yenilikçi teknolojilerin (drone) afet yönetimi ve lojistiği alanında nasıl kullanılabileceğine yönelik araştırma projeleri yürütülmelidir. Sivil toplum kuruluşları, kamu kurumları ve özel sektör ile iş birliği içinde olup, afet durumlarında yapılacak ortak çalışmalar için protokoller geliştirmelidir. Afet senaryoları üzerine bilgisayar simülasyonları gerçekleştirerek, farklı durumlara hazırlıklı olacak stratejiler geliştirmeli ve bunları eş zamanlı olarak bütün il ve ilçelerde uygulanmalıdır. Acil durum müdahale ekiplerinin sayıları arttırılmalı, yeni ekipler kurulmalı ve ekiplerin afet durumlarına hazırlıklı olmaları için düzenli eğitimler düzenlenmelidir. Her yıl ortak bir bütçe fon belirlenmeli ve olası afet durumlarında kullanılmalıdır. Bütün il ve ilçelerde güvenli depo alanları ve toplanma alanları belirlenmeli, belirlenen yerlerde sağlık kabinleri olmalıdır. Bu şekilde yapılması durumunda daha az can ve mal kaybı olacağı uzman görüşleri, literatür taraması sonucunda saptanmıştır.

Teşekkür

Makaleyi değerlendiren ve önerileri ile makalenin bilimsel değerine katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederiz. Bu makale, birinci yazarın "Afet lojistiği kapsamında CBS ile depo yeri belirleme: Kilis ili örneği" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

Ağdaş, M., Özkan, B., & Ballı, H. (2014). Afet lojistiği kapsamında dağıtım merkezi için yer seçimi: SMAA-2 tekniği ile bir uygulama. *Beykoz Akademi Dergisi, 2*(1), 75–94. https://doi.org/10.14514/BYK.m.21478082.2014.2/1.75-95

Akbal, H. (2023). Afetlerde lojistik ve tedarik zinciri yönetimi. In A. Durmuş (Ed.), *Olağan Dışı Durumlarda Sağlık Yönetimi* (pp. 155–185). Efe Akademi.

Aksoy, E. (2016). *Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanarak Antalya ili katı atık depo alanı belirlenmesi* [Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Altun, F. (2018). Afetlerin ekonomik ve sosyal etkileri: Türkiye örneği üzerinden bir değerlendirme. *Sosyal Çalışma Dergisi, 2*(1), 1–15.

Arca, D. (2012). Afet yönetiminde coğrafi bilgi sistemi ve uzaktan algılama. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2*(2), 53–61.

Atay, M., Alhamad, M., Çetinkaya, C., & Seçkiner, S. (2023). Suriye mülteci kamplarının ve insani yardım depo konumlarının coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve doğrusal programlama ile modellenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38*(3), 633–645. https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1377216

Ballı, Y. (2021). *İç Anadolu bölgesinde şebekeden deşarj edilen atık su miktarlarının yıllar bazındaki değişim seyri ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) yardımıyla mekansal analizi* [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Bediroğlu, Ş., & Yıldırım, V. (2020). Lojistik merkez yer seçimi için CBS ve ÇKKV arayüzü geliştirilmesi ve Ordu ili pilot bölge çalışması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9*(1), 323–334.

Bilgilioğlu, S. S., & Gezgin, C. (2022). Nevşehir ili uygun katı atık depolama sahalarının coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve bulanık analitik hiyerarşi süreci (BAHS) yöntemlerinin entegrasyonu ile belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22*(4), 836–849. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1105426

Börühan, G., & Ersoy, P. (2013). Lojistik süreçler açısından afet lojistiğinin önemi. *Finans Politik & Ekonomik Yorumlar, 50*(578), 75–86.

Coppola, D. (2006). *Introduction to international disaster management*. Elsevier.

Çabuk, S. (2015). CBS'nin yerel yönetimlerde kullanımı ve Kent Bilgi Sistemleri. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7*(3), 69–87. https://doi.org/10.15659/hartek.15.08.76

Değerliyurt, M., & Çabuk, S. (2015). Coğrafyayı coğrafi bilgi sistemleri ile tanımlamak. *Doğu Coğrafya Dergisi, 20*(33), 37–48. https://doi.org/10.17295/dcd.88722

Demirci, A., & Karakuyu, M. (2011). Afet yönetiminde coğrafi bilgi teknolojilerinin rolü. *Doğu Coğrafya Dergisi, 9*(12), 67–100.

Demirci, A., Bilgiç, E., & Demir, Ö. G. D. (2018). Doğal afetlere karşı hazırlık ve doğal afet lojistiği. In N. Öztürk & A. Aksoy (Eds.), *7. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi (ULTZK) 2018 Bildiriler Kitabı* (pp. 197–205).

Erbaş, M., Bali, Ö., & Durğut, T. (2014, 14–17 Ekim). *Tehlikeli madde depo yeri seçiminin coğrafi bilgi sistemleri açısından incelenmesi* [Bildiri Sunumu]. 5. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.

Ergün, M., Korucuk, S., & Memiş, S. (2020). Sürdürülebilir afet lojistiğine yönelik ideal afet depo yeri seçimi: Giresun ili örneği. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6*(1), 144–165.

Erkal, T., & Değerliyurt, M. (2009). Türkiye'de afet yönetimi. *Doğu Coğrafya Dergisi, 14*(22), 147–164.

Gülner, B. (2016). *Afet lojistiği yönetim sürecinde lojistik merkezlerin teşkili ve yer seçimi için örnek uygulama* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Kemerburgaz Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Güngör, H. C., Ayday, C., & Kibici, Y. (2011). Coğrafi bilgi sistemi teknolojisi ile deprem bilgi sistemi uygulaması: Kütahya ili. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, 26*, 85–98.

United States Agency for International Development. (2024). *Humanitarian Assistance*. United States Agency for International Development (USAID). https://www.usaid.gov/humanitarian-assistance

Kadıoğlu, M., & Özdamar, E. (2008). *Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri*. JICA Türkiye Ofisi.

Koca, S. (2001). *Tedarik zinciri yönetimi ve bir taşıma sisteminin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Köseoğlu, A. M., & Yıldırımlı, H. (2015). Afet lojistiğine bağlı afet yönetimi sorunlarının siyasi etkileri. *Akademik Bakış Dergisi, 49*, 199–224.

Limoncu, S., & Bayülgen, C. (2005). Türkiye'de afet sonrası yaşanan barınma sorunları. *Megaron, 1*(1), 18-27.

Milliyet Gazetesi. (2021). *Kilis Haritası: Kilis İlçeleri Nelerdir? Kilis İlinin Nüfusu Kaçtır, Kaç İlçesi Vardır?* 10 Şubat 2024'de https://www.milliyet.com.tr/egitim/haritalar/kilis-haritasi-kilis-ilceleri-nelerdir-kilis-ilinin-nufusu-kactir-kac-ilcesi-vardir-6310003 adresinden alındı.

Nebati, E. E. (2024). Afet yönetimi sürecinde medikal depo yer seçimi için etkili faktörlerin değerlendirilmesi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi, 15*(1-Deprem Özel Sayısı), 139–149. https://doi.org/10.54688/ayd.1405883

Önsüz, M., & Atalay, B. (2015). Afet lojistiği. *Osmangazi Tıp Dergisi, 37*(3), 1–6. https://doi.org/10.20515/otd.45606

Özdemir, S. F. (2021). *Afet ve acil yardım lojistiğinde yönetsel planlama önerisi: Pandemi uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Maltepe Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Özkılıç, E. N. (2020). *İstanbul'da deprem sonrası toplanma alanlarının kapasitelerinin ve erişilebilirliklerinin CBS yardımıyla analizi ve değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Palazca, A., & Partigöç, N. S. (2018, 18–21 Eylül). *Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve analitik hiyerarşi süreci (AHS) kullanılarak afet sonrası potansiyel toplanma alanlarının yer seçimi: Denizli kenti örneği* [Bildiri Sunumu]. 7. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (VII. UZAL-CBS 2018), İstanbul, Türkiye.

Pektaş, T. (2012). *İlçe bazında afet lojistiği: Başakşehir uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Şen, G., & Esmer, S. (2017). Afet lojistiği: Bir literatür taraması. *The International New Issues in Social Sciences, 5*(5), 231–250.

Tanyaş, M., Günalay, Y., Aksoy, L., & Küçük, Ö. G. B. (2013). *İstanbul ili afet lojistik planı kılavuzu*. Lojistik Derneği Yayınları.

Tanyaş, M. (2004). *Lojistik ve tedarik zinciri yönetimi, ders notları.* İ.T.Ü. Endüstri Mühendisliği Bölümü. https://docplayer.biz.tr/2948974-Tedarik-zinciri-yonetimi-ders-notlari-hafta-1-2-3.html

Tarhan, Ç., & Partigöç, N. S. (2021). Web tabanlı CBS uygulamalarının afet riski azaltmadaki rolü. *Resilience, 5*(2), 265–279. https://doi.org/10.32569/resilience.1028577

Topal, B. (2016, 4–6 Kasım). *Türkiye afet lojistik yönetim sistemi üzerine bir değerlendirme* [Bildiri Sunumu]. 3rd International Symposium on Environment and Morality (ISEM 2016), Alanya/Antalya, Türkiye.

Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği. (2024). *6 Şubat 2023 Depremlerinin Birinci Yılı Değerlendirmesi*. 10 Şubat 2024'de http://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/6_subat_2023_depremi_degerlendirmesi_1.pdf adresinden alınmıştır.

Yaprak, Ü. (2015). *Afet lojistiğinde stok kontrolüne yönelik veri analizi* [Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Yiğit, İ., Ataol, M., & Dinç, A. (2011). Coğrafya bölümlerindeki CBS eğitimi ve CBS'nin gerekliliği. *Marmara Coğrafya Dergisi, 24*, 312–331.

Yurdoğlu, E. (2008). *Afet yönetiminde coğrafi bilgi sistemi uygulama örneği* [Doktora tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Loree, N., & Aros-Vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for post-disaster humanitarian logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 116*, 1–24.

Rodríguez-Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2016). GIS and optimisation: Potential benefits for emergency facility location in humanitarian logistics. *Geosciences, 6*(2), Article 18. https://doi.org/10.3390/geosciences6020018

Zhao, M., & Liu, X. (2018). Development of decision support tool for optimizing urban emergency rescue facility locations to improve humanitarian logistics management. *Safety Science, 102*, 110–117.

Timperio, G., Panchal, G. B., Samvedi, A., Goh, M., & De Souza, R. (2017). Decision support framework for location selection and disaster relief network design. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 7*(3), 222–245.

Timperio, G., Kundu, T., Klumpp, M., de Souza, R., Loh, X. H., & Goh, K. (2022). Beneficiary-centric decision support framework for enhanced resource coordination in humanitarian logistics: A case study from ASEAN. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 167*, Article 102909. https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102909

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 34–43, DOI: 10.21324/dacd.1455994

Spatial and Temporal Analysis of Earthquake Events in Kahramanmaraş on 6 February 2023

Özer Akyürek[1,*]

[1]*Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics, 41001, Kocaeli, Türkiye.*

Abstract

Earthquakes are one of the most destructive natural disasters that occur as a result of the energy resulting from the movements of the earth's crust spreading and shaking the earth's surface. Since it is not possible to predict when and where earthquakes will occur, it has become possible to make various inferences and take necessary precautions by analyzing previous earthquakes. Spatial and temporal analysis of natural disasters such as earthquakes with geographic information systems provides useful information to local and global decision-makers in measures to be taken and mitigation studies. The objective of this study is to demonstrate that the general orientation of stress accumulation on fault lines can be monitored by weighted average centre points with the use of Geographic Information Systems (GIS). Spatio-temporal analyses of two earthquakes with a magnitude of 7.7 M_w and 7.6 M_w in Kahramanmaraş and aftershocks were performed. Ten-week spatial distributions of the aftershocks were examined with the weighted average center method and it was determined that the earthquake intensity and average centers shifted towards the north. When the spatial distribution of the earthquake centers is examined with the help of standard deviation ellipses weekly, it has been determined that they show orientation along the Eastern Anatolian Fault System.

Keywords

Earthquake, GIS, Spatiotemporal Analysis, Standard Deviational Ellipse, Weighted Average Center

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Konumsal ve Zamansal Analizi

Özet

Depremler, yerkabuğunun hareketleri sonucu ortaya çıkan enerjinin yeryüzüne yayılması ve yeryüzünü sarsması sonucu meydana gelen en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Depremlerin ne zaman ve nerede meydana geleceğini önceden kestirmek mümkün olmadığından, daha önce meydana gelmiş depremleri analiz ederek çeşitli çıkarımlar yapmak ve gerekli önlemleri almak mümkün olabilmektedir. Deprem gibi doğal afetlerin coğrafi bilgi sistemleri ile konumsal ve zamansal analizi, alınacak önlemlerde ve zarar azaltma çalışmalarında yerel ve küresel karar vericilere faydalı bilgiler sağlamaktadır. Bu çalışmada, Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla fay hatları üzerindeki stres birikiminin genel yöneliminin ağırlıklı ortalama merkez noktaları ile izlenebileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Kahramanmaraş'ta meydana gelen 7.7 ve 7.6 M_w büyüklüğündeki iki depremin ve artçı şokların konumsal-zamansal analizleri yapılmıştır. Artçı depremlerin on haftalık konumsal dağılımları ağırlıklı ortalama merkez yöntemi ile incelenmiş ve geçen süreyle birlikte deprem yoğunluğu ile ortalama merkezlerinin kuzeye doğru kaydığı belirlenmiştir. Deprem merkezlerinin konumsal dağılımları haftalık standart sapma elipsleri yardımıyla incelendiğinde Doğu Anadolu Fay Sistemi boyunca yönelim gösterdikleri tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Deprem, CBS, Konumsal-Zamansal Analiz, Standart Sapma Elipsi, Ağırlıklı Ortalama Merkez

1. Introduction

Two earthquakes, with magnitudes of 7.7 and 7.6 M_w, occurred on the Amanos and Pazarcık segments and the Sürgü - Çardak fault of the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), respectively, at 01:17:32 (UTC) and 10:24:47 (UTC) on 6 February 2023, with epicenters in the Pazarcık and Elbistan districts of Kahramanmaraş. The magnitude of the first earthquake was measured as Mw = 7.8 by the USGS. The earthquake, which affected an area of 108,812 km^2 covering 11 provinces in the Eastern and Southeastern Anatolia Regions, caused severe damage or destruction to 33,143 buildings and over 50,000 deaths, more than 100,000 people were injured (AFAD 2023a, 2023b; Alkan et al., 2024). According to a report published by the Strategy and Budget Directorate of the Presidency of the Republic of Türkiye, the total cost of earthquakes to the Turkish economy is estimated at 103.6 billion USD (Strategy and Budget Directorate, 2023).

Earthquakes are one of the most destructive and deadly natural disasters on earth. Earthquake is defined as the sudden release of energy due to fractures in the earth's crust, spreading in waves and shaking the earth. Although it is impossible to predict where and when earthquakes will occur, recent research has shown that trends in earthquake risk in a particular

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 3033247 Faks: +90 (262) 3033003
E-posta: ozer.akyurek@kocaeli.edu.tr (Akyürek Ö)

Gönderim Tarihi / Received : 20/03/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 04/09/2024

region can be analyzed by examining the spatiotemporal processes of earthquake events. The results of the studies provide useful information for disaster prevention and mitigation. To reduce the destructive effects of earthquakes, precautions to be taken beforehand are of critical importance. For this reason, spatial and temporal analysis methods of Geographic Information Systems (GIS), which have been frequently preferred in recent years, are important methods that provide information for the measures to be taken. The results obtained as a result of spatial and temporal analysis using GIS provide valuable information to decision-makers at global and local scales. Earthquake events can be considered as data with geographical attributes. Traditional statistical analysis techniques are unable to characterize the constraint relationships between spatial data because of the spatial limitations imposed by varying directions and distances between these data. By merging the statistics of spatial data with contemporary graphical computing technology and applying heuristic approaches, spatial statistics may display the spatial distribution, spatial pattern, and spatial relationships in spatial data (Shan et al., 2021).

In the literature, there are studies conducted in many different areas by using spatial and temporal analysis methods of GIS. Wang et al., (2012) examined China's food production spatially and temporally using the weighted average center method. They determined the directions in which the production of various food groups has shifted over time within the study region. Al-Kindi et al., (2017) analyzed Dubas insect infestation data in northern Oman over ten years with spatial and temporal methods of GIS. During the study period, they determined the movement directions of insect infestation by performing analysis according to the years with the weighted average center method. Xu et al., (2018) investigated impervious surface variations in Guangzhou, China, with the help of weighted average center and standard deviation ellipses. In the period between 1988 and 2015, the principle orientation, direction, spatiotemporal expansion trends, and distribution differences of impermeable surfaces were revealed on the maps they created. Çolak & Sunar, (2020) spatially and temporally analyzed the forest fires occurring in the Muğla-Marmaris and İzmir-Menderes regions of Türkiye using data from the NASA FIRMS database. They concluded that the fire risk of the Marmaris region is higher than the Menderes region. Cheng et al., (2022) performed a spatial and temporal analysis of economic resilience in Chinese cities during the COVID-19 pandemic. As a result of their analysis, they found that the spatial distribution of economic resilience showed a tendency towards clustering and trended from SE to NW, and the weighted average centers shifted from NW to SE. Zhang et al., (2022) investigated the destructive effects of the earthquake that occurred in Longtoushan, China in 2014 on buildings and people with spatial analysis. The studies carried out after various natural disasters can be shown as proof of how effective the GIS methods produce information. Ocaña et al., (2008) performed spatial and temporal analyses of the earthquake and its aftershocks that occurred in the town of La Paca in southeastern Spain. After their analysis, they determined that the distribution of aftershocks developed trends in three different directions. Veitch & Nettles, (2012) conducted spatial and temporal analysis of earthquakes occurring in the Greenland polar region. They analyzed the spatial and temporal trends of earthquakes occurring in 18 years. Santos et al., (2014) analyzed flood and landslide events in the north of Portugal with the help of spatial analysis of GIS. They determined that natural disaster events increased by 0.17 per decade with the help of trend analysis. Yang et al., (2017) examined the spatial and temporal analysis of landslide events occurring around the earthquake center after large earthquakes using geographic information systems and remote sensing techniques. Dias et al., (2019) examined the effect of considering partial sets of data on the spatiotemporal probability distributions of earthquakes using earthquake data on the California San Andreas fault. Huang et al., (2020) spatially and temporally analyzed the precursor earthquakes that occurred before the magnitude 6.4 and 7.1 M earthquakes that occurred in Ridgecrest, California in 2019. They obtained information about the orientations of the foreshocks. Shan et al., (2021) analyzed the temporal and spatial analysis of earthquakes occurring on the San Andreas fault for forty years. They analyzed the earthquakes, which they divided into certain periods, according to the weighted average center method. They also examined the clustering of earthquakes with the help of spatial autocorrelation analysis. Ferreira et al., (2022) investigated the correlation between earthquakes by performing a spatiotemporal analysis of real and synthetic earthquake data. Sarfraz et al., (2023) analyzed the spatiotemporal distribution of landslides in a region in northern Pakistan using various satellite images and GIS.

If local governments have a solid understanding of the temporal and spatial development rules of seismic events in a particular region with frequent earthquakes, they can make informed decisions on disaster prevention and mitigation for that region. Thus, they can take necessary precautions and make decisions to ensure the life safety of the people living in and around the region. This is why, the accurate information is the most important data source in such cases. For this reason, this study aims to determine the weekly orientation of aftershocks occurring after two major earthquakes in Kahramanmaraş in order to produce information for disaster prevention and mitigation. Therefore, the weekly trend of earthquake intensity was followed by spatially and temporally analyzing the aftershocks occurring for ten weeks after two large earthquakes occurring a few hours apart using the weighted average center method. With this method, it has been determined in which directions the aftershocks may cause stress accumulation on the fault lines where they occur. In addition, the weekly standard deviation ellipses of the earthquakes were analyzed and the trend orientations of the aftershocks were analyzed.

2. Materials and Methods

2.1. Study area

The study area is Kahramanmaraş and its neighboring provinces in Türkiye, located on the EAFS, where earthquakes with magnitudes of 7.7 and 7.6 Mw occurred a few hours apart on 06.02.2023 (Figure 1). EAFS forms an NE-SW left-lateral strike-slip boundary between the northward-moving Arabian Plate and the westward-moving Anatolian Block. The EAFS and the North Anatolian Fault System (NAFS), which are among the most active and active fault systems in Türkiye, form the boundary between the Anatolian and Arabian Plates, causing the Anatolian block to move westward. Current GPS data gives a present-day slip rate in the range of 11±2 mm/year (Aksoy et al., 2007; Arpat & Şaroğlu, 1972; Jackson & McKenzie, 1984; Lyberis et al., 1992; Nalbant et al., 2002; Şaroğlu et al., 1992; Şengör et al., 1985; Westaway, 2003). The EAFS extends as a single segment from Karlıova (Kargapazarı) in the northeast to the west of Çelikhan. The southern segment of the fault, which is split into two parts, continues from north of the Gölbaşı Basin and Pazarcık to southwest of the Türkoğlu. The fault leaps to the right south of Türkoğlu and continues by bounding Sağlık, Kocagöl, and Amik plains from the west and ends by scattering south of Kırıkhan. In this region of the EAFS, the depression basin that includes the Sağlık and Narlı plains is bounded from the east by the Sakçagöz and Narlı segments of the Dead Sea Fault Zone. The Narlı section extends N-NE for 30-40 km from north of the Pazarcık to the EAFS. The northern segment, which diverges west of Çelikhan, forms a northward convex line by the morphology of the southeastern Toros Mountain Belt. This segment consists of Sürgü and Çardak faults and Savrun, Çokak and Toprakkale faults turning to SW from Göksun (AFAD, 2023a).

After the two main earthquakes, 27925 aftershocks of various magnitudes occurred in the region during the ten-week study period. Statistical information about the earthquakes is shown in Table 1, while earthquake locations and fault lines are shown in Figure 1.

Table 1: Statistics on the frequency of earthquake events over different weeks (AFAD, 2023c)

Weeks (2023)	Number of Earthquakes	Magnitude 0.2 – 2.0 (M_w)	Magnitude 2.0 – 3.0 (M_w)	Magnitude 3.0 – 4.0 (M_w)	Magnitude 4.0 – 5.0 (M_w)	Magnitude 5.0 – 7.7 (M_w)
First (06-12/02)	3907	20	1760	1705	370	52
Second (13-19/02)	3647	163	2795	649	36	4
Third (20-26/02)	3742	318	2939	450	33	2
Fourth (27/02-05/03)	3213	426	2527	238	21	1
Fifth (06-12/03)	2734	371	2139	212	12	–
Sixth (13-19/03)	2529	466	1897	155	11	–
Seventh (20-26/03)	2309	419	1737	141	11	1
Eighth (27/03-02/04)	2200	357	1700	134	9	–
Ninth (03-09/04)	1860	368	1389	99	4	–
Tenth (10-16/04)	1784	348	1342	89	5	–

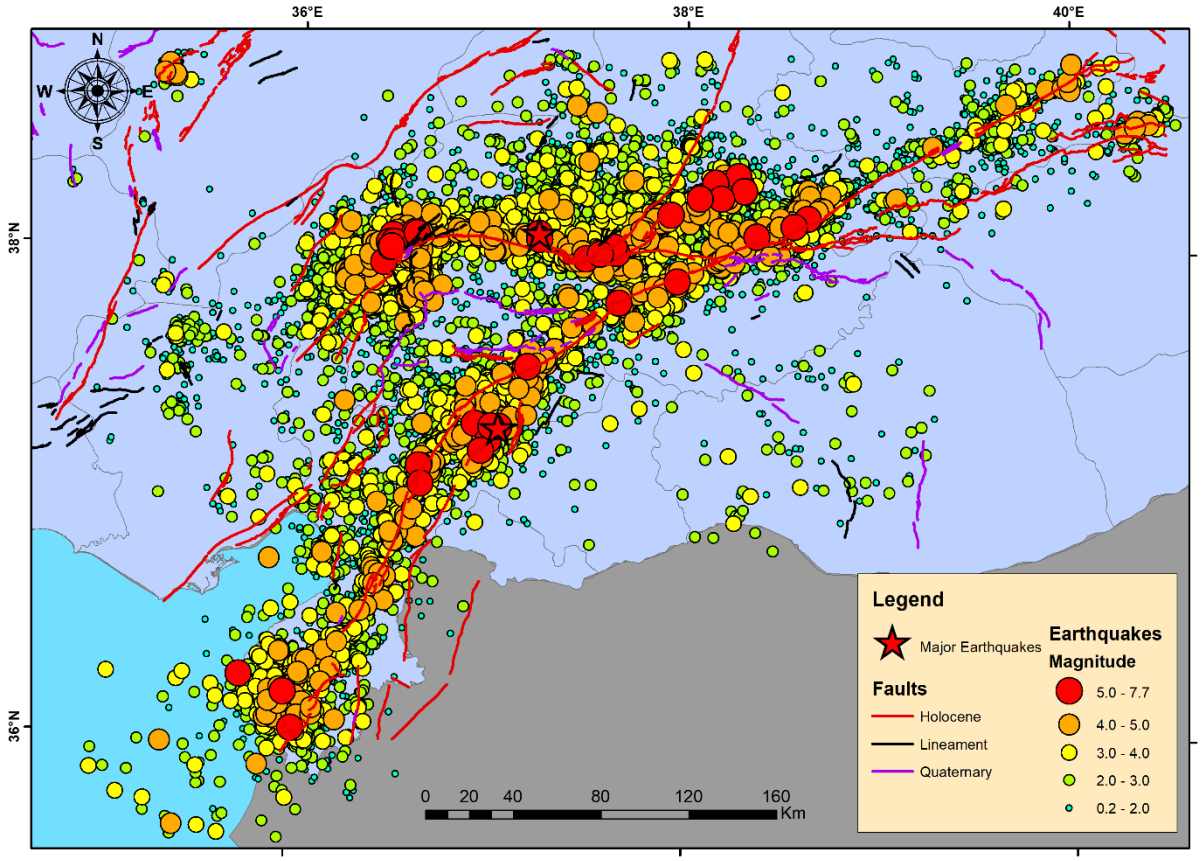


Figure 1: 6 February Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan major earthquakes and aftershocks and Eastern Anatolian Fault System where the earthquakes occurred

2.2. Methods

In the study, firstly, the transformation process was carried out to ensure the integrity of the earthquake data. All magnitude units in the earthquake catalog data received from the Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), the data provider institution, were converted to Mw. Afterward, weekly average center points were calculated with earthquake magnitudes as weight values. Finally, standard deviation ellipses were created with the weekly earthquakes, and the weekly orientations of the aftershocks were monitored.

2.2.1. M_L – M_w conversion

Firstly, earthquake magnitude unit conversion was performed to ensure the integrity of the study within the dataset. All earthquake magnitudes in the M_L unit in the data set were converted to the M_w unit with the formulas taken from the studies given below. For small earthquakes $0 \leq M_L \leq 3.8$ (Munafò et al., 2016) mentioned the following formula;

$$M_w=(2/3)*M_L+1.15 \quad (1)$$

and (Kadirioğlu & Kartal, 2016) mentioned their study for the earthquake ranges $3.3 \leq M_L \leq 6.6$ following the formula;

$$M_w=0.8095*M_L+1.3003 \quad (2)$$

was used for the conversion from M_L to M_w.

2.2.2. Weighted average center

The mean center, used in spatial analysis, is the average geographic coordinates of all features in the dataset. It is a useful tool for tracking changes in the distribution of features within the dataset. The mean center method is also significantly affected by outliers in the dataset and when a feature is found more than once in the same location. On the other hand, the weighted mean center method used in spatial analysis is defined as the geographic center of a set of points arranged according to the influence of a value associated with each dataset feature. The weighted mean center method is used to reflect the importance of each feature in a data set and its influence on the overall distributional trend of the data set.

The method requires that a feature in the data set is assigned a weight value. The assigned weight value indicates the importance of the feature in the data set. The weighted mean value of the data set is then calculated by multiplying each feature by its weight value, summing it up, and dividing this sum by the sum of all weights. The weighted mean center extends to the following;

$$\bar{X}=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$
$$\bar{Y}=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (3)$$

where x_i and y_i are the latitude and longitude coordinates of the earthquake event *i*, respectively; *n* is the total number of earthquake events in different weeks; and w_i is the magnitude of earthquake event *i* (Delmelle, 2009; Mitchell, 2005).

2.2.3. Standard deviational ellipse

Standard deviation ellipses are used to describe the spatial distribution and orientation of geographic features in a given study area. The Standard Deviation Ellipse is used to determine the direction of distribution of data in the study area (Shan et al., 2021). In a standard deviation ellipse, which is commonly used to measure the trend of features of a dataset, the distance is calculated separately in the x and y geographic coordinate direction. The distance value calculated in these two directions defines the axes of an ellipse covering the feature distribution. The method works by calculating the standard deviation of the x and y coordinates from the mean center to define the axes of the ellipse. The ellipse allows us to observe the length of the distribution of the dataset and therefore whether there is a specific orientation. The axis directions of the ellipse provide information about the direction of the spatial distribution of geographic elements (earthquake centers). The difference between the major axis and the minor axis carries information about the directionality of geographic elements. If the length of the major axis is equal to the length of the minor axis, there is no directional change in the distribution of geographic elements. The standard deviational ellipse is given as:

$$\sigma_{1,2}=\left(\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2+\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2\right)\pm\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}\tilde{y}_i^2\right)^2+4\left(\sum_{i=1}^{n}\tilde{x}_i\tilde{y}_i\right)^2}}{2n}\right)^{1/2} \quad (4)$$

where *x* and *y* are the coordinates for earthquake event *i*, $\{\bar{x}, \bar{y}\}$ represent the mean center for the earthquake events and *n* is equal to the total number of earthquake events (Delmelle, 2009; Mitchell, 2005; Wang et al., 2015).

3. Results

In this study, it was aimed to monitor the weekly distributions and trends of aftershocks that occurred after two consecutive major earthquakes (M_w > 7.0). To achieve this aim, the weekly movements of the aftershocks that occurred during the study period were monitored with the weighted average center method. Figure 2 shows the weekly weighted average center points. Accordingly, the weighted average center points were geographically located in the middle region of the two main earthquakes. When the weekly locations of the weighted average center points are examined, it is seen that a northward movement has occurred. Table 2 shows the weekly movement directions and distances of the weighted average center points. During the ten-week study period, the weighted average center of the earthquakes shifted 16.80 km to the north at an angle of 7°. When Figure 2 is analyzed, it is seen that only the third-week moves towards the south-east. This is due to the 6.4 M_w earthquake that occurred in Hatay province (southeast of the study area) in the third week of the study and the high number of aftershocks that occurred afterward.

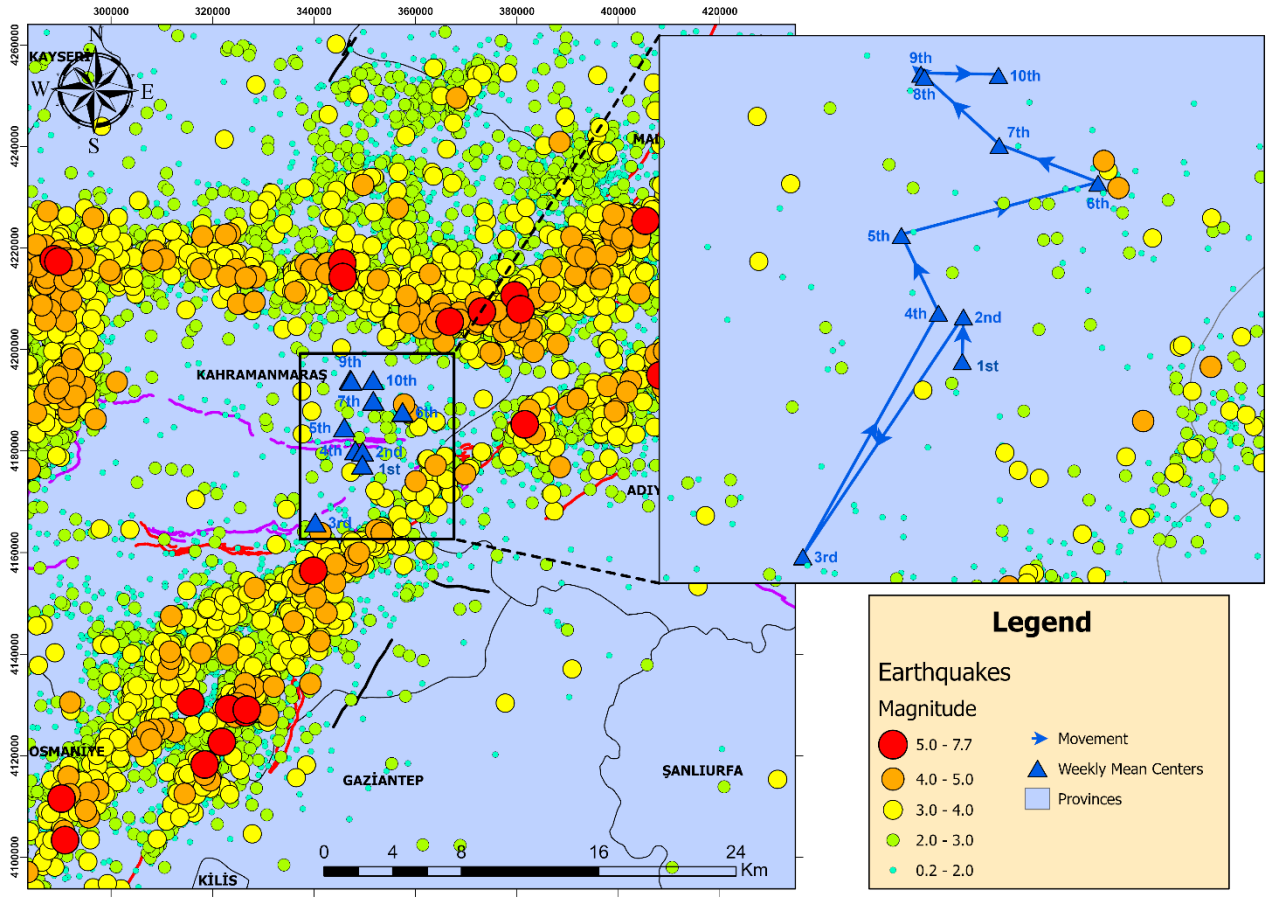


Figure 2: The weighted average center's temporal and spatial evolution process for earthquake events

Table 2 shows that the weighted average center points moved a total of 69.34 km and each segment moved in a northerly direction, except for the third week.

Table 2: Movement directions and distances of the weighted average centers according to different weeks

Weeks	Segment (km)	Directions
First	–	
Second	2.60	N
Third	16.80	SW
Fourth	16.23	NE
Fifth	5.01	NW
Sixth	11.85	NE
Seventh	6.17	NW
Eighth	5.89	NW
Ninth	0.27	NW
Tenth	4.52	E
Total	69.34	N – NE

One of the most remarkable and important risk mitigation information that the study provides to decision-makers is that the orientation of the stress generated by an earthquake on a fault can be tracked by weighted average center points. According to Toda et al. (2023), the most likely scenario is that aftershocks will remain clustered in the stress-triggering lobes, and while their number will decrease according to Omori's law, their magnitude will not necessarily decrease. When Figure 2 is examined, the fact that the weighted average center point of the second week shifted to the north supports this situation. The reason for the shift of the weighted average center point of the third week by 16.8 km to the south-east can be attributed to the 6.4 M_w Hatay earthquake, which is likely to have occurred due to stress accumulation at the southern end of the EAFS, and the aftershocks that followed.

The continuous northward movement of the weighted average center points in the following weeks can be interpreted as a sign of increased stress accumulation in the northern branch of the EAFS and stress accumulation in this region, which has produced large earthquakes in previous years. February 6 earthquakes may have transferred energy to two fault systems in particular. These fault lines are the Eastern Anatolian Fault System, which radiates down towards the Adana basin, and the Malatya Fault System, which extends west of Malatya in the direction of Doğanşehir-Kepez-Başkavak-Kemaliye. The Malatya Fault system mentioned here is located north of the study area of this study. The situation mentioned here is in parallel with the results obtained in this study.

In standard deviation ellipses, the deviation along the major axis represents the direction of maximum spread of points and the deviation along the minor axis represents the direction of minimum spread of points. Figure 3 shows the weekly standard deviation ellipses of aftershocks. The statistical parameter analysis results of the SDE in weeks are listed in Table 3. The azimuth angle of the SDE provides information about the main trend direction of the distribution of earthquake points. The weekly SDE rotation angles shown in Table 3 are distributed between 50° and 65°. This indicates that the dominant distribution direction of the earthquake centers is NE-SW, i.e. parallel to the EAFS direction. When Figure 3 and Table 3 are analyzed, it is seen that the SDEs of the weeks other than the third and fifth weeks have similar values. The reason why the main axis of the ellipse belonging to the third week is longer than the others can be shown as the high number of aftershocks after the earthquake in Hatay. It is observed that earthquakes occurring in this region increase the area and major axis value of the SDE. What is noteworthy is the SDE of the fifth week, which has the highest area and small axis value. The reason for this situation is the high number and magnitudes of earthquakes that occurred as a result of the stresses accumulated on the Savrun fault located southwest of the Çardak fault, the fault where the second main earthquake occurred.

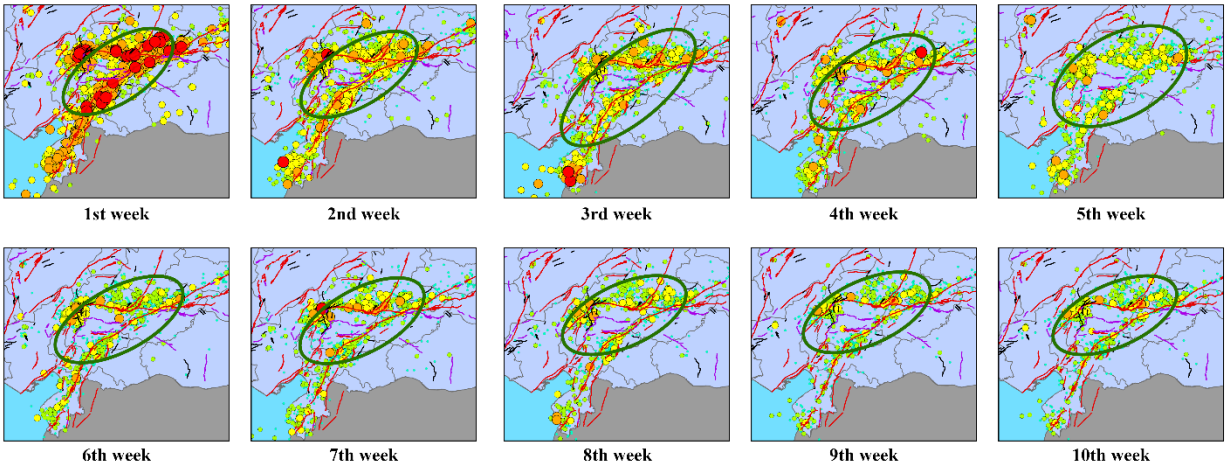


Figure 3: The SDEs of seismic occurrences evolve both spatially and temporally

Table 3: Results of the SDE's statistical parameter analysis of the earthquake events during the different weeks

Weeks	Area (km^2)	XSD (km)	YSD (km)	Rotation (°)
First	20590.81	117.694	55.692	56.11
Second	21798.43	122.372	56.703	58.55
Third	30894.11	152.509	64.484	50.77
Fourth	26159.70	131.545	63.303	57.68
Fifth	32799.08	135.758	76.906	61.11
Sixth	24421.96	131.079	59.308	62.07
Seventh	23792.67	127.520	59.393	61.68
Eighth	22618.05	123.693	58.207	65.67
Ninth	22632.37	123.755	58.215	65.82
Tenth	24266.82	129.472	59.663	63.61

The difference between this study from similar studies in the literature is that the spatial and temporal analysis of the aftershocks that occur after large earthquakes with high destructive effects can determine the orientations on the fault lines and suggest the necessary special measures to be taken in the residential areas that coincide with these regions. In addition, it is an important source of information for monitoring the direction of stress accumulated on fault lines outward from the earthquake point as a result of large earthquakes and taking the necessary precautionary steps accordingly.

4. Discussion

This study offers a different approach to investigating the temporal and spatial evolution trends of earthquakes and understanding the earthquake risk in a given region. The experimental results of the temporal and spatial evolution trends in this paper are consistent with the following researches, which demonstrate the validity of using the spatial statistical method to study the spatial and temporal evolution characteristics of earthquake events.

Toda et al. (2023) reported that the first earthquake of magnitude 7.7 was not the main cause of the second earthquake of magnitude 7.6, but it supported the occurrence of the second earthquake. In parallel with this, according to the findings obtained as a result of the analyses performed in this study, the fact that the weighted average center points have shifted to the north supports that stress accumulation may have increased at the northern end of the EAFS. Kobayashi et al. (2023), Över et al. (2023), Tikhotsky et al. (2023), He et al. (2023), Utkucu et al. (2023), Rebetsky (2023), Alkan et al. (2024), Dai et al. (2024) and Li et al. (2024) in their coulomb stress analyses, showed that the stress accumulations after the main earthquakes were north oriented.

The standard deviation ellipses revealed that the main trend directions of the aftershocks were parallel to the EAFS. Similarly, Shan et al. (2021) and Huang et al. (2020) found parallels along the fault line in the SDEs they generated with historical earthquakes on the San Andreas fault.

Earthquake catalogues are important for determining the temporal and spatial evolution characteristics of earthquake events; the more complete the earthquake catalogue, the more accurate the research results will be. Therefore, maintaining earthquake catalogues regularly, precisely and above a certain accuracy will play an important role in the accuracy of the results of this and similar studies.

5. Conclusions

In this study, the spatial and temporal analyses of the earthquakes with magnitudes of 7.7 and 7.6 M_w that occurred in Kahramanmaraş on 06.02.2023 were performed. In the analyses performed using weighted mean center and standard deviation ellipses, the orientation of the aftershocks was examined and the direction of the stress accumulation that may be caused by fault lines was investigated. When the weighted average center approach was used to analyze the ten-week spatial distributions of the aftershocks, it was found that both the average centers and the earthquake strength changed northward. It has been found that the standard deviation ellipses weekly are useful in examining the spatial distribution of earthquake centers, which exhibit direction along the Eastern Anatolian Fault System.

The unique aspect of this paper is the demonstration that the general orientation of stress accumulation on fault lines can be tracked by weighted average center points. This and similar information is very important to protect and save the lives of people living in settlements built on or near fault lines. The priority of such information is of great importance in producing policies and making decisions to reduce the damages of natural disasters and to overcome them with minimum loss of life and property. Since the location and time of earthquakes cannot be known or predicted with certainty, the value of the information produced as a result of spatial and temporal analysis supported by such geographic information systems becomes even more important. The information produced in this way will play an effective role in the measures to be taken by local and general decision-makers.

Acknowledgments

The author is thankful to the Republic of Turkey–Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) for providing the data.

References

AFAD. (2023a). *06 February 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık and Elbistan) earthquakes field studies preliminary evaluation report*. Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency. Retrieved March 7, 2024, from https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Arazi_Onrapor_28022023_surum1_revize.pdf

AFAD. (2023b). *Preliminary evaluation report on 06 February 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) Mw 7.7 and Elbistan (Kahramanmaraş) Mw 7.6 earthquakes*. Republic of Turkey Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Presidency. Retrieved March 7, 2024, from https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmara%C5%9F%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf

AFAD. (2023c). *AFAD deperem katalogu*. Retrieved March 7, 2024, from https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog

Aksoy, E., Inceöz, M., & Koçyiğit, A. (2007). Lake Hazar basin: A negative flower structure on the East Anatolian Fault System (EAFS), SE Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, *16*(3), 319–338.

Al-Kindi, K. M., Kwan, P., Andrew, N. R., & Welch, M. (2017). Modelling spatiotemporal patterns of dubas bug infestations on date palms in northern Oman: A geographical information system case study. *Crop Protection*, *93*, 113–121. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.033

Alkan, H., Büyüksaraç, A., & Bektaş, Ö. (2024). Investigation of earthquake sequence and stress transfer in the Eastern Anatolia Fault Zone by Coulomb stress analysis. *Turkish Journal of Earth Science. 33*(1), 56–68. https://doi.org/10.55730/1300-0985.1898

Arpat, E., & Şaroğlu, F. (1972). Some observations and thoughts on the East Anatolian Fault. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, *78*(78), 44–50.

Cheng, T., Zhao, Y., & Zhao, C. (2022). Exploring the spatio-temporal evolution of economic resilience in Chinese cities during the COVID-19 crisis. *Sustainable Cities and Society*, *84*(126), Article 103997. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103997

Çolak, E., & Sunar, F. (2020). The importance of ground-truth and crowdsourcing data for the statistical and spatial analyses of the NASA FIRMS active fires in the Mediterranean Turkish forests. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *19*, Article 100327. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100327

Delmelle, E. (2009). Point pattern analysis. *International Encyclopedia of Human Geography*, 204–211. https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00494-6

Dai, X., Liu, X., Liu, R., Song, M., Zhu, G., Chang, X., & Guo, J. (2024). Coseismic Slip Distribution and Coulomb Stress Change of the 2023 M_w 7.8 Pazarcik and M_w 7.5 Elbistan Earthquakes in Turkey. *Remote Sensing. 16*(2), Article 240. https://doi.org/10.3390/rs16020240

Dias, V. H. A., Papa, A. R. R., & Ferreira, D. S. R. (2019). Analysis of temporal and spatial distributions between earthquakes in the region of California through Non-Extensive Statistical Mechanics and its limits of validity. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *529*, Article 121471. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121471

Ferreira, D. S. R., Ribeiro, J., Oliveira, P. S. L., Pimenta, A. R., Freitas, R. P., Dutra, R. S., Papa, A. R. R., & Mendes, J. F. F. (2022). Spatiotemporal analysis of earthquake occurrence in synthetic and worldwide data. *Chaos, Solitons and Fractals*, *165*(P2), Article 112814. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112814

He, L., Feng, G., Xu, W., Wang, Y., Xiong, Z., Gao, H., & Liu, X. (2023). Coseismic Kinematics of the 2023 Kahramanmaras, Turkey Earthquake Sequence From InSAR and Optical Data. *Geophysical Research Letters*, *50*(17), Article e2023GL104693. https://doi.org/10.1029/2023GL104693

Huang, H., Meng, L., Bürgmann, R., Wang, W., & Wang, K. (2020). Spatio-temporal foreshock evolution of the 2019 M 6.4 and M 7.1 Ridgecrest, California earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, *551*, Article 116582. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116582

Jackson, J., & McKenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpine–Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, *77*(1), 185–264. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x

Kadirioğlu, F. T., & Kartal, R. F. (2016). The new empirical magnitude conversion relations using an improved earthquake catalogue for Turkey and its near vicinity (1900–2012). *Turkish Journal of Earth Sciences*, *25*(4), 300–310. https://doi.org/10.3906/yer-1511-7

Kobayashi, T., Munekane, H., Kuwahara, M., & Furui, H. (2023). Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation. *Geophysical Journal International*, *236*(2), 1068–1088. https://doi.org/10.1093/gji/ggad464

Li, W., Zhao, L., Tan, K., Lu, X., Zhang, C., Li, C., & Han, S. (2024). Coseismic deformation and fault slip distribution of the 2023 M_w 7.8 and M_w 7.6 earthquakes in Türkiye. *Earthquake Science*, *37*, 263–276. https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.03.006

Lyberis, N., Yurur, T., Chorowicz, J., Kasapoglu, E., & Gundogdu, N. (1992). The East Anatolian Fault: an oblique collisional belt. *Tectonophysics*, *204*(1), 1–15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90265-8

Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis* (Volume 2). ESRI Press.

Munafò, I., Malagnini, L., & Chiaraluce, L. (2016). On the relationship between mw and mL for small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *106*(5), 2402–2408. https://doi.org/10.1785/0120160130

Nalbant, S. S., McCloskey, J., Steacy, S., & Barka, A. A. (2002). Stress accumulation and increased seismic risk in Eastern Turkey. *Earth and Planetary Science Letters*, *195*(3–4), 291–298. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00592-1

Ocaña, E., Stich, D., Carmona, E., Vidal, F., Bretón, M., Navarro, M., & García-Jerez, A. (2008). Spatial analysis of the La Paca, SE Spain, 2005 seismic series through the relative location of multiplets and principal component analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *166*(3–4), 117–127. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.12.005

Över, S., Demirci, A., & Özden, S. (2023). Tectonic implications of the February 2023 Earthquakes (Mw7.7, 7.6 and 6.3) in south-eastern Türkiye. *Tectonophysics*, *866*, Article 230058. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230058

Rebetsky, Y.L. (2023). Tectonophysical Zoning of Seismic Faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 59*, 851-877. https://doi.org/10.1134/S1069351323060174

Santos, M., Bateira, C., Soares, L., & Hermenegildo, C. (2014). Hydro-geomorphologic GIS database in Northern Portugal, between 1865 and 2010: Temporal and spatial analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *10*(PA), 143–152. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.08.003

Sarfraz, Y., Basharat, M., Riaz, M. T., Akram, M. S., Ahmed, K. S., & Shahzad, A. (2023). Spatio-temporal evolution of landslides along transportation corridors of Muzaffarabad, Northern Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, *82*(5), 1–23. https://doi.org/10.1007/s12665-023-10822-5

Şaroğlu, F., Emre, Ö., & Kuşçu, I. (1992). The East Anatolian fault zone of Turkey. *Annales Tectonicae*, *6*, 99–125.

Şengör, A.M.C., Görür, N., & Şaroğlu, F. (1985). Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study. In K. T. Biddle & N. Christie-Blick (Eds.), *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation* (Vol. 37). SEPM Society for Sedimentary Geology. https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211

Shan, W., Wang, Z., Teng, Y., & Wang, M. (2021). Temporal and spatial evolution analysis of earthquake events in california and nevada based on spatial statistics. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(7), Article 465. https://doi.org/10.3390/ijgi10070465

Strategy and Budget Directorate. (2023). *2023 Kahramanmaraş ve Hatay Earthquake Reports*. Presidency of the Republic of Turkey Strategy and Budget Department. Retrieved March 7, 2024, from https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf

Tikhotsky, S. A., Tatevosyan, R. E., Rebetsky, Y. L., Ovsyuchenko, A. N., & Larkov, A. S. (2023). The 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey: Seismic Movements along Conjugated Faults. *Doklady Earth Sciences*, *511*, 703–709. https://doi.org/10.1134/S1028334X23600974

Toda, S., Stein, R. S., Özbakır, A. D., Gonzalez-Huizar, H., Sevilgen, V., Lotto, G., & Sevilgen, S. (2023). Stress change calculations provide clues to aftershocks in 2023 Türkiye earthquakes. *Temblor*. https://doi.org/http://doi.org/10.32858/temblor.295

Utkucu, M, Durmuş, H., Uzunca, F., & Nalbant, S. (2023). *A Preliminary Report on the 2023 Gaziantep (Mw=7.7) and Elbistan (Mw=7.5) Earthquakes in Souhteast Türkiye.* Sakarya University Disaster Management Application and Research Centerand Department of Geophysics. Retrieved March 7, 2024, from https://jfm.sakarya.edu.tr/sites/jfm.sakarya.edu.tr/file/Rapor1.pdf

Veitch, S.A., & Nettles, M. (2012). Spatial and temporal variations in Greenland glacial-earthquake activity, 1993-2010. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *117*(4), 1993–2010. https://doi.org/10.1029/2012JF002412

Wang, B., Wenzhong, S., & Zelang, M. (2015). Confidence Analysis of Standard Deviational Ellipse and Its Extension into Higher Dimensional Euclidean Space. *PLoS ONE2*, *10*(3), Article e0118537. https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118537

Wang, Q., Yue, T.X., Wang, C.L., Fan, Z.M., & Liu, X.H. (2012). Spatial-temporal variations of food provision in China. *Procedia Environmental Sciences*, *13*(2011), 1933–1945. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.187

Westaway, R. (2003). Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. *Turkish Journal of Earth Sciences*, *12*(1), 5–46.

Xu, J., Zhao, Y., Zhong, K., Zhang, F., Liu, X., & Sun, C. (2018). Measuring spatio-temporal dynamics of impervious surface in Guangzhou, China, from 1988 to 2015, using time-series Landsat imagery. *Science of the Total Environment*, *627*, 264–281. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.155

Yang, W., Qi, W., Wang, M., Zhang, J., & Zhang, Y. (2017). Spatial and temporal analyses of post-seismic landslide changes near the epicentre of the Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, *276*, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.010

Zhang, L., Tao, Z., & Wang, G. (2022). Assessment and determination of earthquake casualty gathering area based on building damage state and spatial characteristics analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *67*, Article 102688. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102688

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 44–57, DOI: 10.21324/dacd.1458177

MIKE Hidrolojik Model Programı ile Alanya İlçesi Demirtaş-Sedre Çayı Taşkın Bölgesinin Modellenmesi

Mehmet Dikici[1,*], Tasvire Gökce[1]

[1]*Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,74050, Antalya.*

Özet

Bu çalışma, küresel iklim değişikliğinin etkileri üzerine odaklanarak, Antalya ilinin Alanya ilçesinde bulunan Demirtaş-Sedre Çayı'nın taşkın risklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Küresel iklim değişikliğinin artan yağışlar ve doğal afetler üzerindeki etkileri, özellikle insan etkisinin ve kaynak kullanımının kontrolsüzlüğünün doğal afetlere zemin hazırlama potansiyelini vurgulamaktadır. Bölgesel hidrolojik modelleme yöntemlerinin kullanılmasıyla, Demirtaş-Sedre Çayı havzasında taşkın risklerinin belirlenmesi ve bu risklerin azaltılması için stratejiler geliştirilmesine katkıda bulunması açısından önem arz etmektedir. Demirtaş-Sedre Çayı havzasında belirlenen tehlikeli taşkın bölgelerinin haritalanması ve bu bölgelerde alınabilecek önlemlerin belirlenmesiyle ilgili önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bağlamda, doğal ve beşerî etkenlerin taşkın riskleri üzerindeki rolü detaylı bir şekilde incelenmiş ve yönetim için stratejiler önerilmiştir. Bu çalışma, bölgesel ölçekte taşkın yönetimi planlaması ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, küresel iklim değişikliğinin yerel düzeydeki etkilerini anlamak ve bu etkilere karşı dirençli topluluklar oluşturmak için yapılan bu tür çalışmaların önemi de vurgulanmaktadır. Bu makale hem akademik çevrelerde hem de yerel yönetimlerde taşkın yönetimi ve risk azaltma stratejileri konusunda ileriye yönelik çalışmalara ilham verici bir katkı sunmaktadır. Taşkın sonucu oluşabilecek can ve mal kayıplarını önlemek ve yağışı kontrol altına alabilmek amaçlı taşkın projelendirme programları ile bölgenin topoğrafik yapısı ve buna bağlı dem haritası, taşkın debisi veya yağış-akış grafileri ile olası taşkın ihtimallerinin hesaplanması için meteorolojiden ve DSİ (Devlet Su İşleri 13. Bölge Müdürlüğü'nden) alınan veriler istatiksel, sentetik veya deterministik yöntemlerle hesaplanarak belirlenebilmektedir. Bu doğrultuda tehlikeli taşkın bölgeleri belirlenmiştir. Bu çalışmada Antalya ilinin Alanya ilçesinde bulunan Demirtaş-Sedre Çayı'nın MIKE hidrolojik model programı ile modellenmesi taşkın debisinin hesaplanması ve olası taşkın risklerinin tahmin edilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Taşkın riski belirlenen yerlerin olası taşkın yükseklikleri ve taşkın yayılım alanlarının mevcut durumda ki kritik bölgelerin hava fotoğrafları İHA (İnsansız Hava Aracı) kullanılarak çekilmiş ve sonuç kısmında analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre taşkın öncesi afet risklerini öngörmek ve yönetebilmek için önem arz etmektedir.

Anahtar Sözcükler

Taşkın, Taşkın Debisi, MIKE, Hidrolojik Model, İHA, CBS

Modeling of Alanya District Demirtaş-Sedre Stream Flood Zone with MIKE Hydrological Model Program

Abstract

This study aims to evaluate the flood risks of Demirtaş-Sedre Stream in Alanya district of Antalya province by focusing on the effects of global climate change. The effects of global climate change on increased rainfall and natural disasters highlight the potential for human influence and resource use to pave the way for natural disasters, in particular. By using regional hydrological modeling methods, it is important in terms of determining flood risks in the Demirtaş-Sedre Stream basin and contributing to the development of strategies to reduce these risks. It provides important information about the mapping of the dangerous flood zones determined in the Demirtaş-Sedre Stream basin and the determination of the measures that can be taken in these areas. In this context, the role of natural and human factors on flood risks has been examined in detail and strategies for management have been proposed with the proposed methods. This study can be considered as an important step in terms of flood management planning and sustainability on a regional scale. In addition, the importance of such studies to understand the effects of global climate change at the local level and to build resilient communities against these effects is also emphasized. This article is an inspiring contribution to future studies on flood management and risk reduction strategies in both academic circles and local governments. 13. The data obtained from the Regional Directorate can be determined by calculating by statistical, synthetic or deterministic methods. Accordingly, dangerous flood zones have been identified. In this study, a study was carried out on modeling the Demirtaş-Sedre Stream in Alanya district of Antalya province with the MIKE hydrological model program, calculating the flood flow rate and estimating possible flood risks. Aerial photographs of the possible flood heights of the places where flood risk was determined and the current critical areas of flood spread areas were taken using UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and analyzed in the conclusion part. According to the results of the analysis, it is important to predict and manage pre-flood disaster risks.

Keywords

Flood, Flood Flow, MIKE, Hydrological Model, UAV, GIS

*Sorumlu Yazar: Tel : +90 (242) 5106060 Faks: +90 (242) 5106124
E-posta: mehmet.dikici@alanya.edu.tr (Dikici M.), gokcetasvire@gmail.com (Gökce T.)

Gönderim Tarihi / Received : 24/03/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 08/08/2024

1. Giriş

Küresel iklim değişikliğine de sebep olan sera etkisi diye adlandırdığımız bir nevi güneş ışınlarının atmosferden tekrar dünyaya yansıması dolayısıyla oluşan yeryüzünün ısınmasına sebep olan etkidir. IPCC raporuna göre bu ısınmada insan faaliyetlerinin payının büyük olduğu söylenmiştir. Küresel boyuttaki sıcaklık artışı sera gazı birikmesi sebebiyle çevrede tahribata yol açmaktadır. Oluşan tahribatla taşkın, kuraklık, heyelan vb. doğal afetlere yol açmaktadır (Demirbaş vd., 2020; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Su insanoğlunun ve evrenin yapı taşı olarak görülmektedir. Temel bir ihtiyaç olan suyun kontrol edilmesi ve yönetilmesi oldukça önemlidir. Nüfusun artması ile birlikte insanların temel ihtiyacı olan suya karşı talebi de artmıştır. Artan nüfus yerleşim sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Düz dere yatakları ıslah edilerek, yeşil alanlar imara açılarak yerleşim yerleri inşa edilmeye başlanmıştır. Doğal yaşamın tahribatı ve ihlali ile küresel ısınmaya katkıda bulunulmuştur. Daha sonrasında değişen iklimler taşkın afetini de beraberinde getirmiştir (Üyüklüoğlu, 2015). Taşkın afeti sadece iklim değişikliğine bağlı olmayıp hidro-meteorolojik olayların sıklığı ve şiddetinden etkilenmektedir. Taşkın afetinin hasarlarının bu kadar büyük ölçüde hissedilmesinin temel sebebi insanoğlunun sebep olduğu beşerî etkenlerdir. İklim değişikliği sebebiyle yağış rejimleri düzensizleşmiştir. Yağış rejimindeki değişiklikler yağışların ani ve sağanak şeklinde gözlemlenmesi, mevsiminde yeterli yağışı almayan bölgenin alması gereken yağışı bir anda alması gibi etkiler sonucunda taşkın riskleri oluşmaktadır. Ekstrem koşulları içeren afetler ile baş edilmesi güçtür. Afetin oluşma riskine karşılık önlemler almak oluşacak zarar ve tehlikeleri önlemektedir (Cebeci vd., 2019). Ülkemizin coğrafi koşulları ve jeolojik yapısı sebebiyle en çok görülen afetlerde birinci sırada deprem yer alırken ikinci sırada seller yer almaktadır (Gülbaz, 2019).

Ülkemizde sık görülen taşkın beraberinde heyelan felaketine de yol açmaktadır. 1998 yılında Batı Karadeniz'de gerçekleşen sel afetinden sonra yaklaşık 478 yakın ev sular altında kalmış ve 2 milyondan fazla insan bu felaketten etkilenmiştir (Oğuz vd., 2016). Özellikle Doğu Karadeniz Türkiye'de yağış bakımında yıllık en fazla yağış alan bölgedir. Bölgenin topoğrafik yapısı da oldukça engebeli ve sele elverişlidir. 2009 yılında İstanbul'da Ayamama deresinde gerçekleşen sel felaketinde hem can kaybı hem de konutlarda büyük hasarlara sebep olmuştur (Kömüşçü vd., 2011). Sel felaketinin yaşanmasındaki en büyük etken olarak ani düşen yağışlardır. Çalışma kapsamında Akdeniz Havzası ve Alanya İlçesi olarak içerisinde bulunduğumuz Doğu Akdeniz Havzası IPCC 4. Değerlendirme raporuna göre iklim değişikliğinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Alanya'nın konumsal olarak kıyı şeridinde yer alması ve değişen sıcaklık koşulları dolayısıyla yağış rejimi de etkilenmektedir. Taşkınlar planlanan aralıklarla meydana gelmeyeceği için öngörülen veya istatiksel, sentetik ,deterministik hesap yöntemleriyle taşkın tekerrür aralığı hesaplanır. (Dikici vd., 2018). Hesaplanabilen Q2, Q5, Q10, Q25, Q50, Q100, Q500 ve Q1000 debiler hidrolojik modellerde kullanılır. Gülbaz (2019) Türkköse Deresi üzerinde yaptığı taşkın riski çalışması ile bu çalışmanın ortak bir noktası ise WMS yazılımı ile çalışma alanının yükseklik haritası, eğim, toprak tipi ve dere güzergâhı ile alına yağış verileri akış verilerine çevrilmiş ve farklı tekerrür yıllarına ait debiler elde edilmiştir. Demir (2016) ,çalışmasında taşkın modelleme programı olarak HEC-RAS yazılımı kullanılmıştır. Taşkın modelleme programlarının farklı olmasından ziyade ön hazırlık aşamaları aynı şekilde ilerlemektedir. Demir (2016) Samsun Mert deresi hidrolik analiz için HEC-RAS 4.10, haritalama için ArcGIS 10.2, dem (SYM) verisi için 1/1000 ölçekli harita kullanılmıştır. Demir (2016) çalışmasında ise farklı tekerrür yıllarına ait debilerin bulunması aşamasında uzaktan algılama ve modifiye Cowan yöntemi kullanılarak Manning pürüzlülük katsayıları kullanılarak su seviye ve hızlarının incelenmesine farklı bir bakış ve derinlik kazandırılmıştır (Üyüklüoğlu, 2015; Dikici vd., 2019; Demir vd., 2016; Demir vd., 2020; Peker vd., 2024).

Hidrolojik modelleme çalışması kapsamında kullanılan ve Danimarka Hidrolik Enstitüsü tarafından geliştirilen MIKE hidrolojik model programında 'MIKE-21 Flow Model' iki boyutlu modelleme ara yüzüdür. Hidrololik modellemeler için açık kaynak kodlu ve lisanslı olarak yaygın kullanılan programlar MIKE,HEC-RAS ve SMS-TUFLOW'dur. Her programın kendi içerisinde avantajları olduğu gibi kolaylık açısından dezavantajları da olabilmektedir. Bu programları karşılaştırmak ve kendi içerinde değerlendirmelerde bulunmak için Elmalı Barajı üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında farklı mesh alanları ve pik su yüksekliği değerleri üzerinde durulmuş ve programlar arasında karşılaştırma yapılmıştır (Hacı vd., 2023).

Türkiye bulunduğu konum ve iklim sebebiyle aşırı yağış alan ve sel afetine maruz kalan bir durumdadır. Afetlerden kaçınamayacağımız gibi afete karşı önlem almayı öğrenmemiz gerekmektedir. Alınabilecek başlıca önlemlerden biri ise bitki örtüsünü korumaktır. Aynı zamanda havza içerisinde yüksek eğimli yamaçlarda madde taşınımını minimize etmektir. Bu kapsamda sedimentin engellenmesi için farklı yapılar inşa edilebilir. Dere ve dere yataklarının ıslah edilmemesi ve uygun projelendirmeler kapsamında ilerletilmesi gerekmektedir. Ülkemizce ve dünyada önem arz eden taşkın risk ve analiz haritaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Uçar (2010) Trabzon ili Değirmendere üzerinde HEC-RAS yazılımı ile 1 boyutlu analiz yapılmış ve taşkına sebebiyet veren sanat yapıları ve taşkın alanı tespit etmiştir. Efe ve Önen (2015), HEC-RAS yazılımı ile bir başka çalışma ise Batman Çayı için yapmıştır. Çakan (2021) tarafından yapılan bizim çalışmamızla benzerlik gösteren taşkın tekerrür debileri kullanılmıştır. Bu kapsamda Bozkır-Çarşamba Çayı ıslah çalışmalarının HEC-RAS Programında incelenmesi üzerine yüksek lisans çalışması yapmıştır. Buna benzer birçok taşkın modelleme çalışması yapılmıştır. Özellikle Karadeniz yağış bakımından ve engebeli coğrafyası ile sel afetiyle sürekli olarak karşılaşmaktadır.

Artvin ili Kemalpaşa ilçesindeki birkaç dere üzerinde HEC-RAS ile hidrolik modellemesi yapılmıştır ve ArcGIS üzerinde taşkın yayılım alanları gözlemlenmiştir. Taşkından etkilenen ormanlık alanlar ve yerleşim alanlarının tekerrür debileri altında yayılımları metrekare cinsinden istatiksel olarak karşılaştırılmıştır (Çanta, 2022; Uçar, 2010; Çakan, 2021; Efe & Önen, 2015).

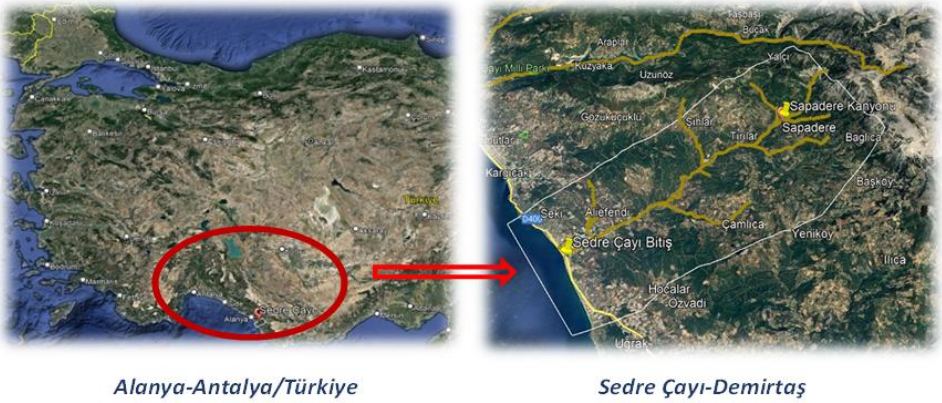
Taşkın modellemede kullanılan MIKE programı kıyı sorunları, baraj gibi biriktirme yapıları üzerinde farklı modelleme seçenekleri sunmaktadır. Karataş (2019) tarafından Sivas 4 Eylül Barajı'nın yıkılma senaryosu üzerine MIKE11, MIKE21 kullanılmıştır. Yağış ve akış için Devlet Su İşleri (DSİ)'nin sentetik hesap yöntemleri kullanılmıştır. Üç ayrı havza için bu işlem yapılmıştır Aynı zamanda normal, maksimum ve suyun barajı aştığı durumlar için ayrı analizler gerçekleştirilmiştir, MIKE FLOOD ile bütünleşik olarak çalışmaya olanak sağlanmıştır (Karataş, 2019). Bu kapsamda Gülcü (2021) tarafından Üsküdar Meydan Havzası'nda yağmur suyunun kentsel alanlarda yönetimi adlı bir Yüksek Lisans Tezi yazmıştır. Kentleşmenin ,yeşil bitki örtüsünde yaptığı tahribat ve yıllık pik debiye sahip yağışlarda drenaj hatlarının yetersiz kalması İstanbul için bir problemdir. Bölgenin Hidrolojik modellemeleri yapıldıktan sonra farklı öneriler sunulmuştur. Beden (2019) tarafından Ordu ilinin Ünye ilçesinde bulunan Cevizdere havzasının MIKE 11 ve MIKE 21 yazılımlarıyla taşkın modellemesi yapılmıştır. Bu çalışmada yağış verilerinin yetersiz olması sebebiyle olasılık hesapları kullanılarak uygun dağılım elde edilmiş ve DSİ sentetik hesaplarıyla hidrograflar elde edilmiştir,1 boyutta enkesitler oluşturulurken 2 boyutta arazi modellenmiştir. Ardından MIKE 21 ile elde edilen sonuçlar ArcGIS PRO görüntülenmiştir. Damçayırı (2018) tarafından çalışılan Kınıklı deresi havzası üzerinde yapılan doktora tezi çalışmasında bizimde kendi çalışmamızda kullanarak yağıştan akışa geçtiğimiz WMS kullanılmıştır. Vilsteren (2010) Vietnam'da bulunan Quang Tri eyaleti için tasarım taşkın tahmini yapılmıştır. Bu süreçte hidrograf için MIKE-NAM kullanılmıştır (Gülcü, 2021; Beden, 2019; Vilsteren, 2010).

Literatürde taşkın modelleme anlamında MIKE'da dahil olmak üzere birçok çalışma yapılmıştır. Her çalışmanın kendi içerisinde metodu ve çalışma aşamaları farklı ilerlemekte olsa da amaç taşkın yayılım risk değerlendirmesi için modellenmesidir. Bu çalışma kapsamında Alanya merkez yağış ölçüm verileri kullanılmıştır. Sedre Çayı Bölgesindeki Keşefli ilçesi yağış ölçüm istasyonunda uzun yıllar boyunca ölçüm verileri olmadığı için tekerrür analizleri; Antalya ili, Alanya ilçesi Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne ait 5 adet yağış gözlem istasyonundan merkez istasyonun yağış verilerine göre hesaplanmıştır. Analiz sonucu Sedre Çayı havzasında olası taşkın riskleri hesaplanmıştır. Gerekli yağış veri ve aralığına ulaşmak mümkün olmasaydı (Demir & Keskin, 2022) Mert ırmağı üzerinde yaptığı çalışma gibi gözlem istasyonlarında kayıtlı yağış verilerine ait uygun istatistiksel dağılımlar belirlenmiştir (Kolmogrov Smirnov testi kullanılmıştır). Böylece Q_2, Q_5, Q_{10}, Q_{25}, Q_{50}, Q_{100} ve Q_{500} yıllık tekerrürlere sahip yağış değerleri elde edilmiştir. Bu yağış değerleri sentetik birim hidrograf yöntemleri kullanılarak da havzaya uygun taşkın tekerrür debileri elde edilmiştir. Yapılmış ve gerekli taşkın debisine ulaşılmıştır. Analiz sonucu Sedre Çayı havzasında olası taşkın riskleri hesaplanmıştır (Demir & Keskin, 2022). Literatür taraması sonucunda bu çay üzerinde taşkın riski dair çalışma yapılmamış olup aynı zamanda bölgede daha önce gerçekleşen taşkın sonucu yıkılma tehlikesi bulunan Yenidamlar köprüsü ve mevkii de bulunan yapıların olası taşkın sonucu etkisinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı: Sedre Çayı ve Havzası

Doğu Akdeniz Havzası, iklimi dolayısıyla yağış bakımından önemli bir merkezdir. Küresel iklim değişikliğiyle beraber sıcaklık ve kıyı şeridinin yağış rejiminde önemli ölçüde değişimler gözlenmeye başlanmıştır. Bölgesel olarak nüfusun artışı yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaç doğal tahribat ve olası taşkın tehlikesinde can ve mal kaybı riski de artmaktadır. Çalışma kapsamında Antalya ili Alanya ilçesi Demirtaş mevkii Sedre Çayı taşkın modellemesi yapılmıştır. Bölgenin iklimi yazlar sıcak ve kurak geçerken, kış mevsimi ise yağışlı ve ılık geçmektedir. Sedre Çayı özellikle kış aylarında yağan yağmurla beraber yüksek debiye sahip iken yaz aylarında ise kuruma eğilimi göstermektedir.

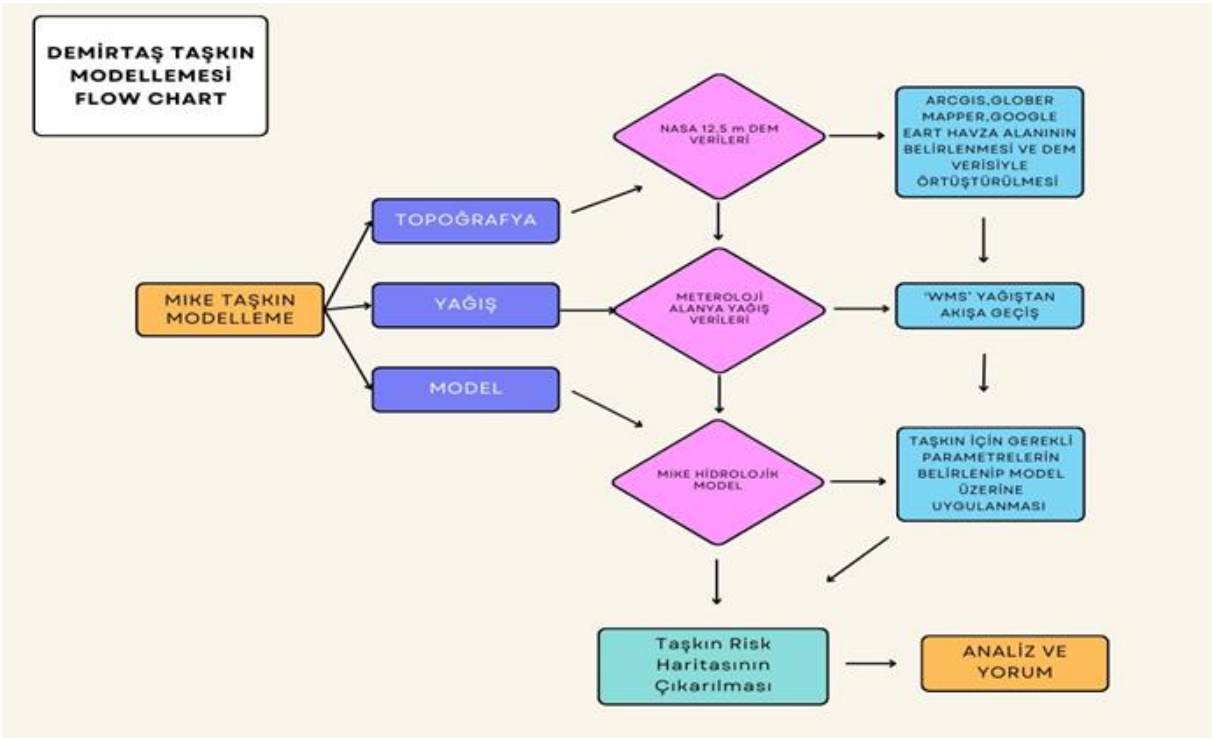


Şekil 1: Çalışma alanı ve Sedre çayı havzası

Zemin olarak incelendiğinde bölge çökel kayadır. Sedre Çayı Havzasının fiziki coğrafyası konum olarak Sapadere Kanyonu'nun bulunduğu havza içerisinde yer almaktadır. Akdeniz Bölgesi'ne bağlı Antalya ili, Alanya ilçesi Demirtaş Mahallesi'nde bulunan Sedre Çayı üzerinde taşkın analizi yapılmıştır. Sedre Çayı taşkın analizi tek ana kol üzerinde yapılmıştır. Anakolun başlangıcı Sapadere Kanyonu olup bitişi ise Demirtaş Mahallesi mevkiinden Akdeniz'e dökülmektedir. Çalışma alanı Şekil 1'de gösterilmiştir (36°25'7.37"K 32°10'29.64"D).

2.2. Kullanılan Veriler

Orta Akdeniz Havzası içerisinde bulunan Antalya ili, Alanya ilçesi, Demirtaş mahallesindeki Sedre Çayına ait havzanın hidrolojik modellemesi için akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Yağış ve topoğrafik harita verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Topoğrafik harita verileri NASA DEM Elevation Data (1-arc second Resolution SRTM / ASTER DEM)'dan alınmıştır. DEM verilerinin çözünürlüğü 12,5'dir. Bu dem verisinin kullanılmasının sebebi hızlı ve kolay bir şekilde elde edilmesidir. Çalışmadaki taşkın alanlarını daha hassas incelemek istersek Harita Genel Müdürlüğü'den 5 m çözünürlüklü DEM verisiyle çalışarak karşılaştırma yapabiliriz.



Şekil 2: Akış şeması

DEM (Digital Elevation Model) verileri diğer bir adıyla SYM (sayısal yükseklik modeli), ArcMap ve Glober Mapper programları kullanılarak eşyükselti (izohips) haritaları oluşturulmuştur. Ardından oluşturulan eşyükselti haritaları Global Mapper programı kullanılarak MIKE programına uygun projeksiyon ve uzantı formatında aktarılmıştır. MIKE üzerinde oluşturulan 2 boyutlu modelde sığ su denklemi kabulleri yapılmıştır. Memba sınır şartı olarak program içerisinde "specified discharge" olarak tekerrür hidrografları tanımlandı, mansap sınır şartı olarak ise programdaki "free outflow" sınır şartı seçilmiştir. Akdeniz'e dökülen serbest bir akış gözlemlenmektedir. MIKE Manning Pürüzlülük Katsayısı 0,032 alınmış ve (Taşkın kanalı-kısa çim) çalışma alanının her bölgesinde aynı Manning katsayısı kullanılmıştır. 2B modelleme Tam St. Venant (Shallow water equations) Sığ Su Denklemleri kabulleri ile oluşturulmuştur. 2 boyutlu Sığ Akım Denklemleri ile ilgili eşitlikler 1, 2, 3'de verilmiştir. Model hesap adım süresi 1 saniye alınmıştır. Modelin tüm işleyiş aşamalarını anlatan diyagram ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

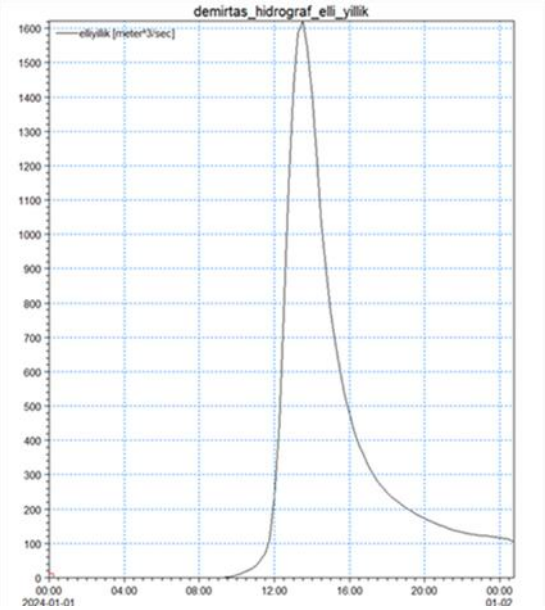
$$\frac{\partial h}{\partial t} \vdash \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial \left(u^{2h} + \frac{1}{2} g h^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial (uvh)}{\partial y} = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial x} + S_{f_x}\right) \tag{2}$$

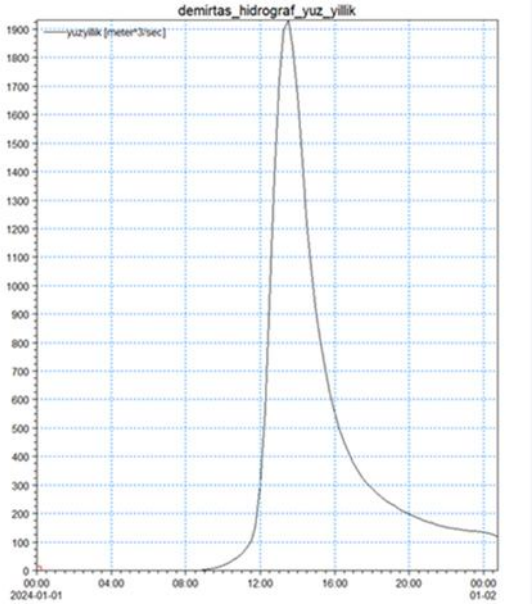
$$\frac{\partial (vh)}{\partial t} + \frac{\partial (uvh)}{\partial x} + \frac{\partial \left(v^{2h} + \frac{1}{2} g h^2\right)}{\partial y} = -gh \left(\frac{\partial b}{\partial y} + S_{f_y}\right) \tag{3}$$

2.3 Hidrolojik Modelleme Yöntemi

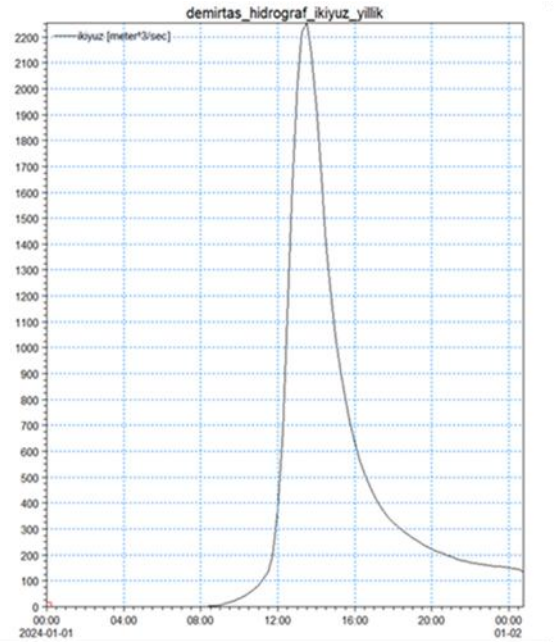
MIKE hidrolojik model programıyla Antalya ili, Alanya ilçesi, Demirtaş mahallesinde bulunan Sedre Çayı'nın, Devlet Su İşleri (DSİ)'nden alınan ve hesaplanan maksimum debi ile olası taşkın riski analizi yapılmıştır. Çalışma alanı için gerekli yağış verileri ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden; Alanya ili Merkez yağış istasyonu verileri kullanılmıştır. Alınan yağış verilerinin Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı yardımıyla tekerrür debileri ve hidrografları oluşturulmuştur. WMS, hidrolik, hidrolojik ve yeraltı suyunun modellenmesi için geliştirilmiş GIS tabanlı bir yazılımdır. Dijital arazi verilerine sahip havzanın geometrik verilerinin girilmesi ve infiltrasyon ve zemin değerlerini girerek alt havzalar oluşturulur. Giriş çıkış sınırları belirlenerek havzaya ait yağış verileri girilir ve sonuç olarak akış hidrograf değerleri elde edilir. Şekil 3, 4, 5, 6'da farklı tekerrür yıllarına ait hidrograflar gösterilmiştir.



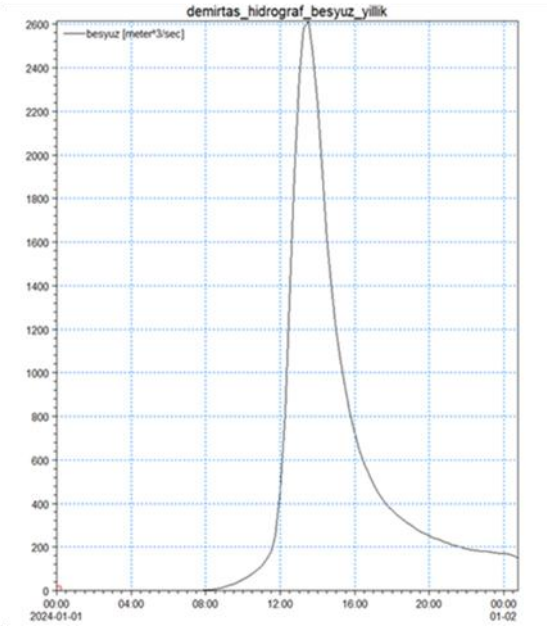
Şekil 3: 50 yıllık tekerrür aralığına sahip hidrograf zaman grafiği



Şekil 4: 100 yıllık tekerrür aralığına sahip hidrograf zaman grafiği



Şekil 5: 200 yıllık tekerrür aralığına sahip hidrograf zaman grafiği



Şekil 6: 500 yıllık tekerrür aralığına sahip hidrograf zaman grafiği

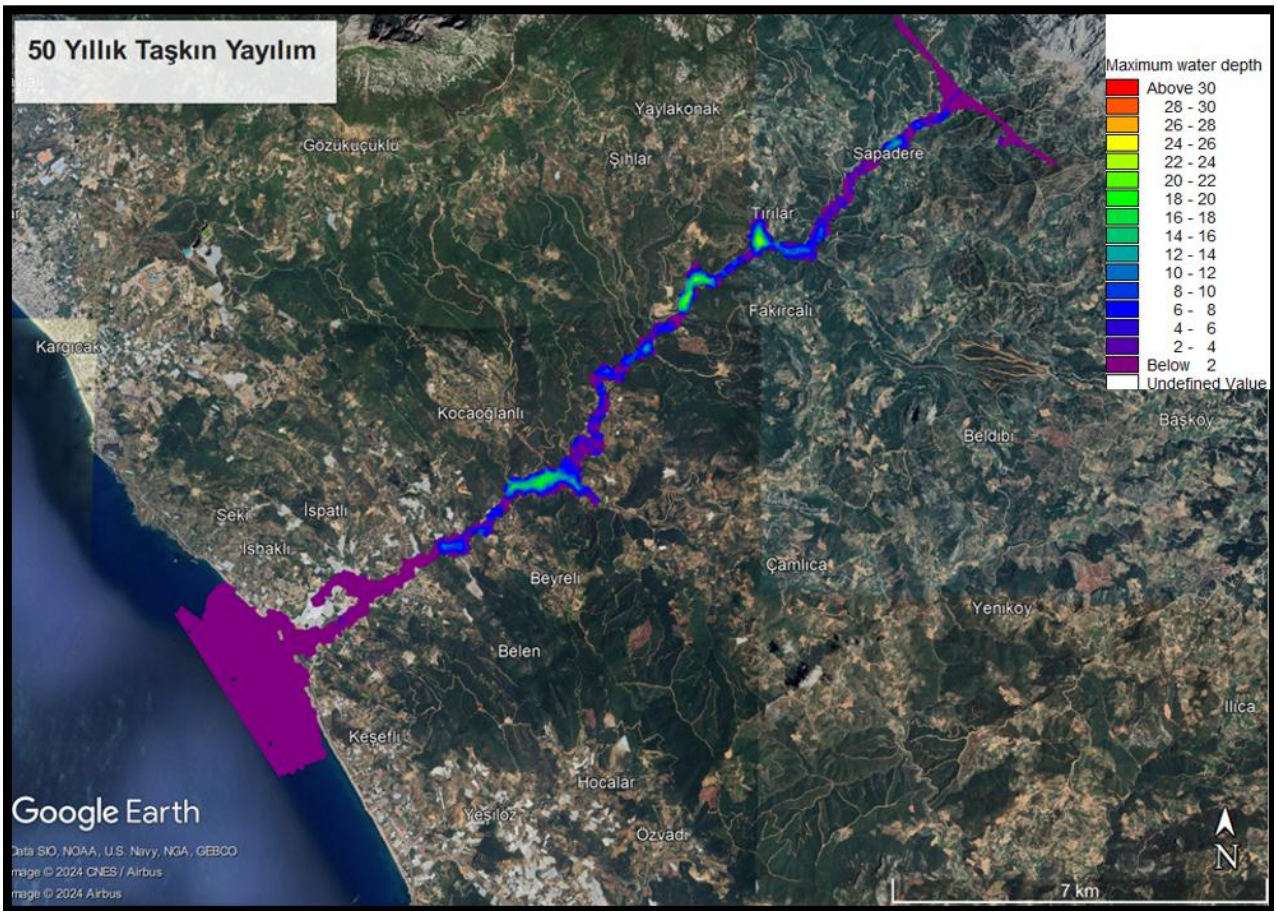
3. Bulgular

3.1. Hidrolojik ve Meteorolojik Verilerin Analizi

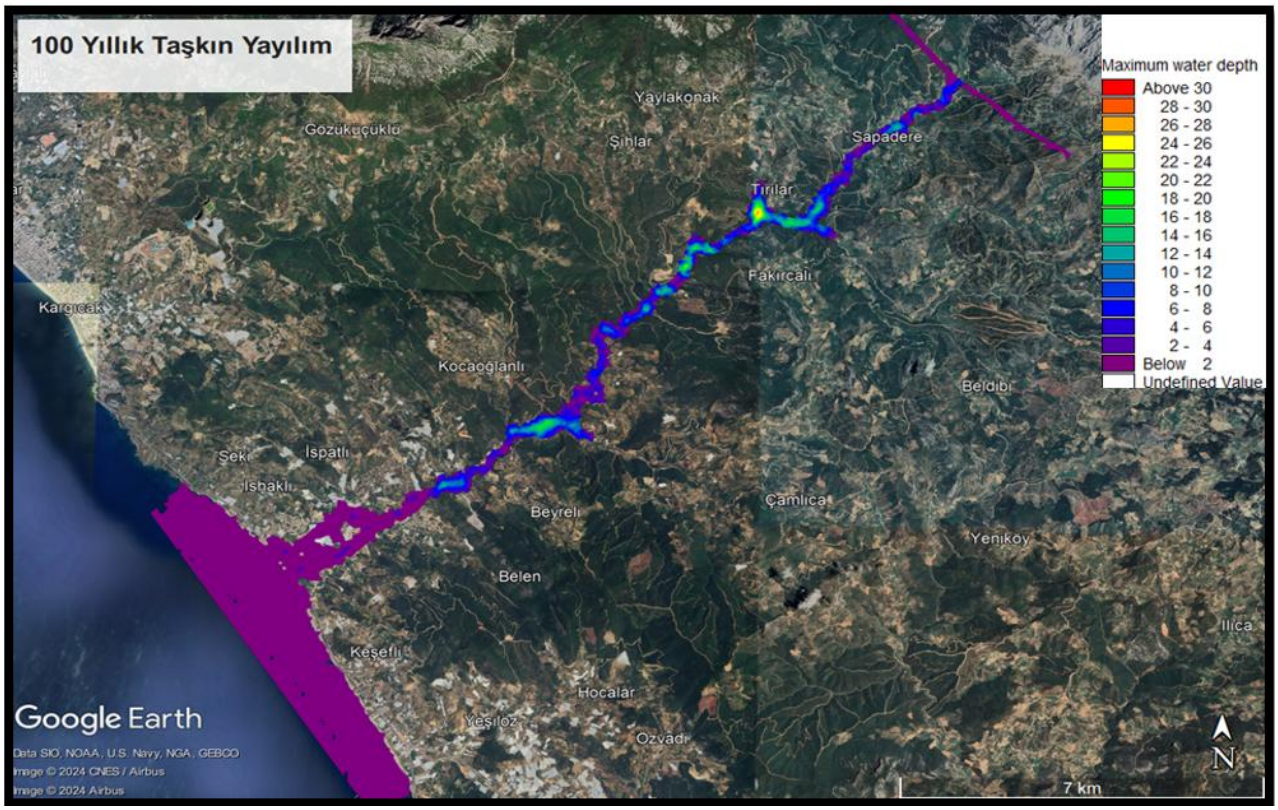
Bu çalışma kapsamında, Akdeniz Bölgesi'ne bağlı Antalya ili, Alanya ilçesi, Demirtaş Mahallesi'nde bulunan Sedre Çayı üzerinde taşkın analizi hidrolojik model programı MIKE ile simüle edilmiştir. Sedre Çayı taşkın analizi tek ana kol üzerinde yapılmıştır. Anakolun başlangıcı Sapadere Kanyonu olup bitişi ise Demirtaş Mahallesi mevkinden Akdeniz'e dökülmektedir.

Çalışma bölgesine ait yüksek çözünürlükteki DEM verileri 'NASA Earthdata ASF' üzerinden alınmıştır. Alınan bu yükseklik verileri 12,5 m hassasiyete sahiptir. Yükseklik verileri Global Mapper ve ArcMap programları kullanılarak eşyükselti (izohips) haritası çıkarılmıştır. Sayısal yükseklik modeli topoğrafya üzerindeki yapay ve doğal unsurlarında dahilinde modellenmesidir. DEM haritası aracılığıyla arazinin profili çıkarılmıştır.

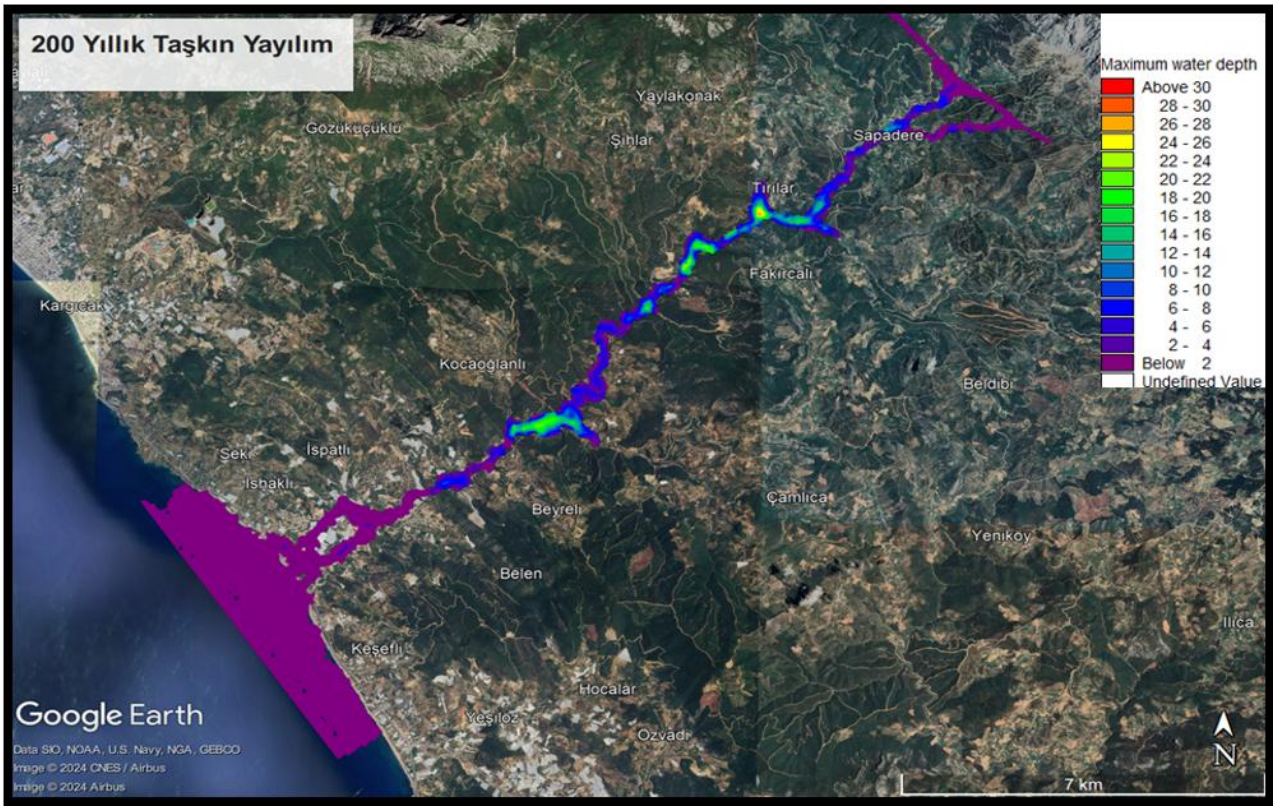
Sayısal yükseklik modeli izohipsleri barındıran bir topoğrafik harita olduğu için oluşturacağımız hidrolojik model için uygun bir altlık konumuna getirilmiştir. Hidrolojik modellemede kullanılacak yağış verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınmıştır. Yağış verileri Alanya Meteoroloji Merkez istasyonuna aittir. Alınan veriler 1964-2020 Standart sürelerle gözlenen en büyük yağışlar mm cinsinden, dakika ve saat aralığında verilmiştir. Tekerrür analizi mm cinsinden alınmıştır. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan yağış verilerinin akışa geçirmek ve yıllara göre hidrograf grafiklerinin çıkarmak için Watershed Modeling System (WMS 11.0) programı kullanılmıştır. Programda havzanın topoğrafik ve jeolojik özellikleri girilmiş, ardından hidrograf çıktılarına erişilmiştir. MIKE 21 ile akışkan modeli oluşturulur ve girdiler analiz edilir. Sonuç olarak farklı yıllarda hesaplanan tekerrür debilerinin belirli zaman aralığında oluşturacağı taşkın simülasyonuna çıktı olarak ulaşılır ve sonuçlar Google Earth üzerine aktarılarak olası taşkın riski bölgeleri ve su yükseklikleri gözlenmektedir. Analiz sonucunda maksimum taşkın yayılım analizleri hesaplanan Q50, Q100, Q200 ve Q500 tekerrür debileri için analiz gerçekleştirilmiştir. Oluşan analiz çıktıları uydu görüntüsü üzerine aktarılarak olası taşkın riski içeren bölgelerin tespiti yapılmıştır. Şekil 7, 8, 9, 10 'da tekerrür yıllarına göre analiz sonucu taşkın riski taşıyan bölgeler gösterilmiştir.



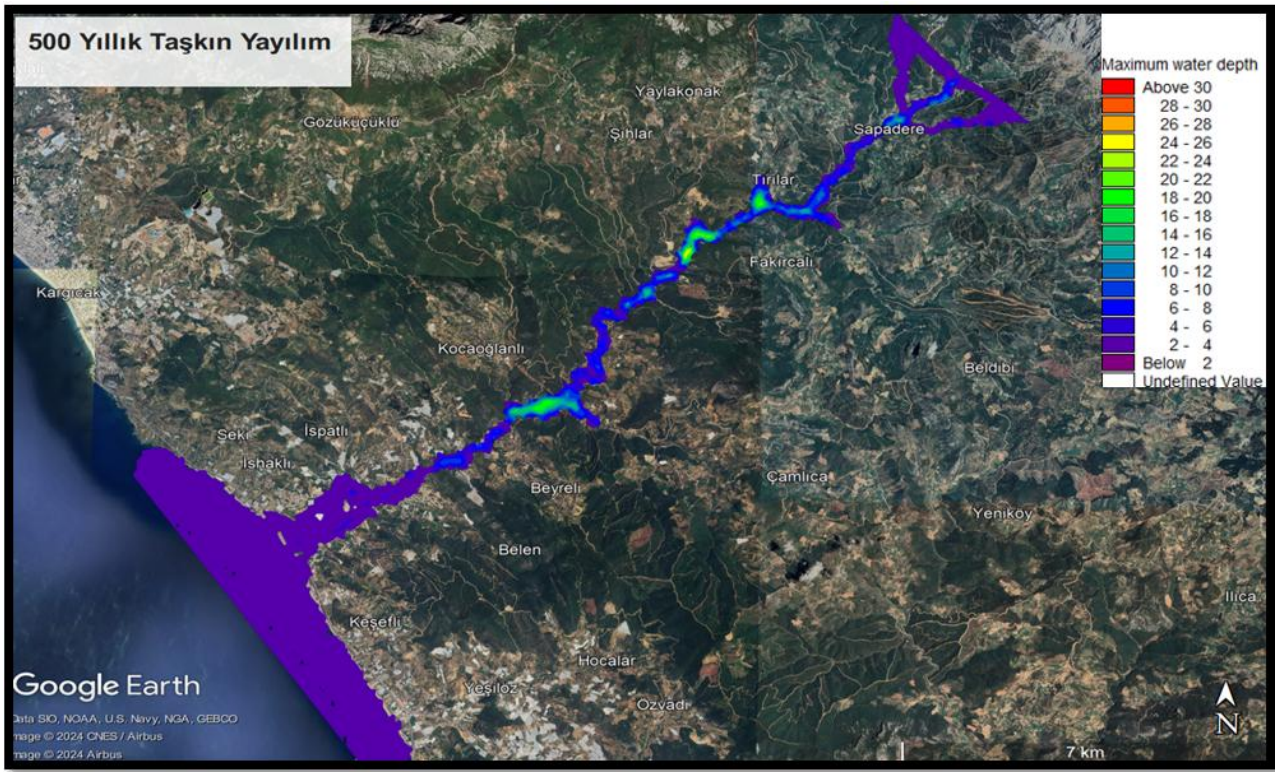
Şekil 7: 50 yıllık tekerrür aralığına sahip taşkın yayılım haritası



Şekil 8: 100 yıllık tekerrür aralığına sahip taşkın yayılım haritası



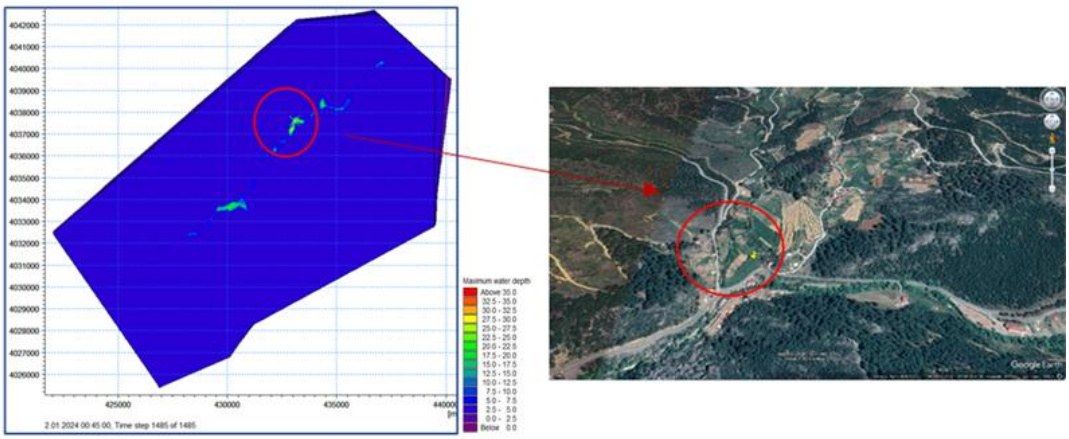
Şekil 9: 200 yıllık tekerrür aralığına sahip taşkın yayılım haritası



Şekil 10: 500 yıllık tekerrür aralığına sahip taşkın yayılım haritası

3.2 Noktasal Konumda Tekerrür Debilerine Bağlı Su Derinliği Analizi

Bu yerleşim yeri özellikle son dönemlerde yapılaşmanın çoğaldığı bir bölgedir. Alanya'nın iklim koşullarının elverişli olması seracılık ve tarım için büyük bir avantajdır. Bölgede seracılık faaliyetleri de oldukça yoğun gözlemlenmektedir. Tarıma ve yerleşime artan rağbet sonrası geniş alanlara yayılan yapılaşma ve sera faaliyetleri artmıştır. Yerleşimin ve tarım arazilerinin akarsu kenarına yapılması olası taşkın risklerini arttırmaktadır. Olası ihtimaller değerlendirilip bu bölgelerde taşkın risk analiz için planlamalar yapılabilir. Şekil 11'da maksimum taşkın yayılım çalışma alanı gösterilmiştir.

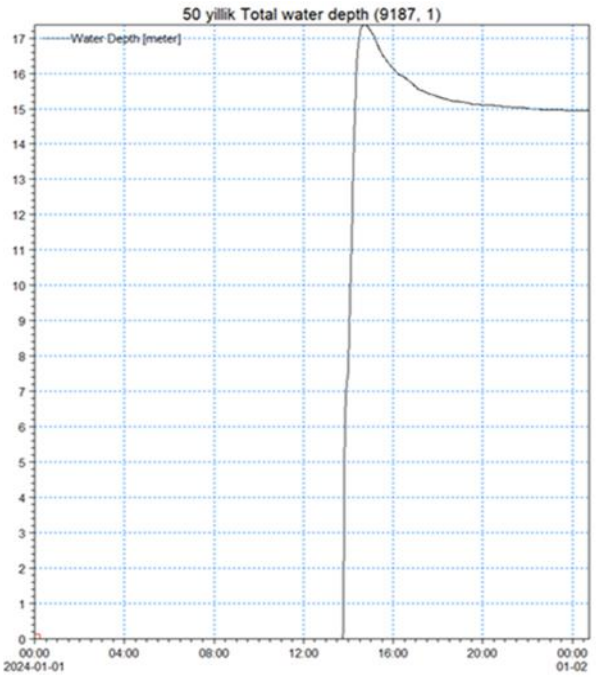


Şekil 11: Zamana göre su derinliği incelenen nokta

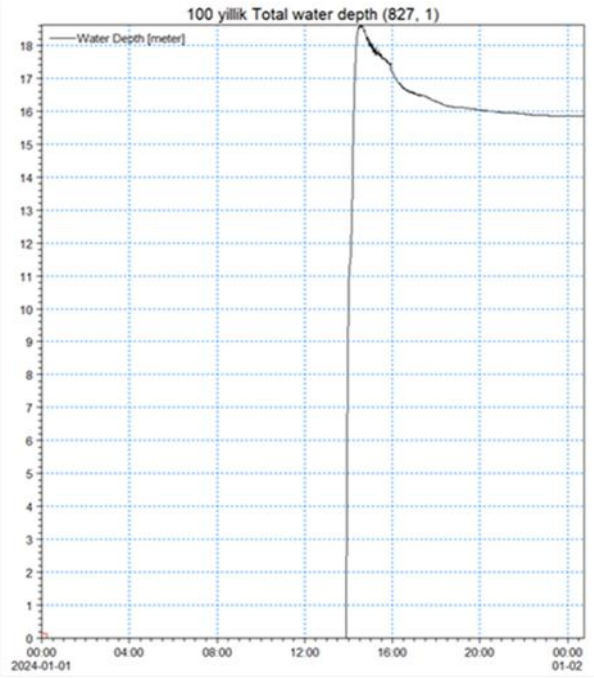
Q_{50}, Q_{100}, Q_{200}, Q_{500} tekerrür debilerinin simülasyonu sonucu maksimum taşkın yayılımım sonucu üzerinde su yüksekliği analizi gözlemlenmektedir. Havza çalışma alanı mavi sınırlar içerisinde olup suyun 15-25 m yükselme ihtimali olan noktalar yeşil renkle ifade edilmiştir. Şekil 11'de seçilen noktada su yüksekliğinin oldukça geniş bir alana yayılma ihtimali olduğu görülmektedir. Arazi eğimli bir yapıya sahip olsa dahi bazı bölgelerdeki eğim, yatağının genişliği veya araziye daha sonra yapılan dolgu gibi işlemler sebebiyle taşkın geniş bir bölgeye yayılarak orada bulunan yapılara zarar verebilir. Bu nokta çevresinde de birkaç adet yerleşim yeri bulunmaktadır.

Burada simülasyonun başlaması ile Sedre Çayı üzerinde seçilen Şekil 11'de gösterilen (x=431863.233, y=4041970.367) noktanın zamana göre değişimi ile o noktanın su derinliğini ifade eden grafikler Şekil 12, 13, 14, 15'de verilmiştir.

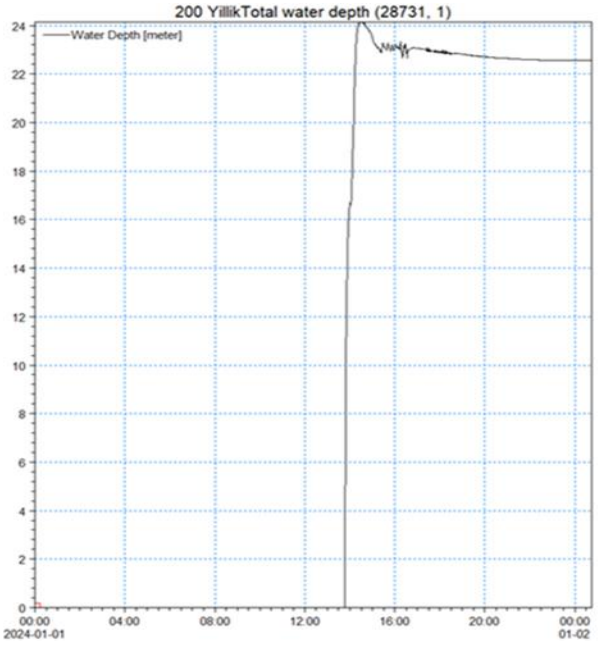
Taşkın yayılım haritasında noktasındaki su derinliklerini farklı tekerrür yıllarında zamana göre değişim grafikleri gösterilmiştir. İncelendiği zaman Q_{500}'den Q_{50}'ye doğru inildikçe su yüksekliğinde azalma gözlemlenmektedir aynı zamanda debi yüksek değerde iken aynı seviyeye gelmeleri daha uzun zaman almaktadır. Bu şekilde taşkın yayılımı ve su derinliği gibi grafiklerinden yapılan analizler sonucunda Sedre Çayı'nın topoğrafyanın çukur kesimlerindeki birikmelerden dolayı o bölgede sel riski yüksektir. Maksimum Q_{500} tekerrür debisine bakıldığında çayın 600-700 m dış kısmı tehlike altındadır. Bu durum gözetilip olası taşkın yüksekliğinin 1-2 m 'ye yükselme ihtimaline karşı yerleşim yerleri buna göre seçilmelidir. Aynı zamanda Şekil 17'de mansap kısmında tarım için kullanılan sera yapıları uygun konumda olmayıp olası taşkında etkilenme ihtimali oldukça yüksektir.



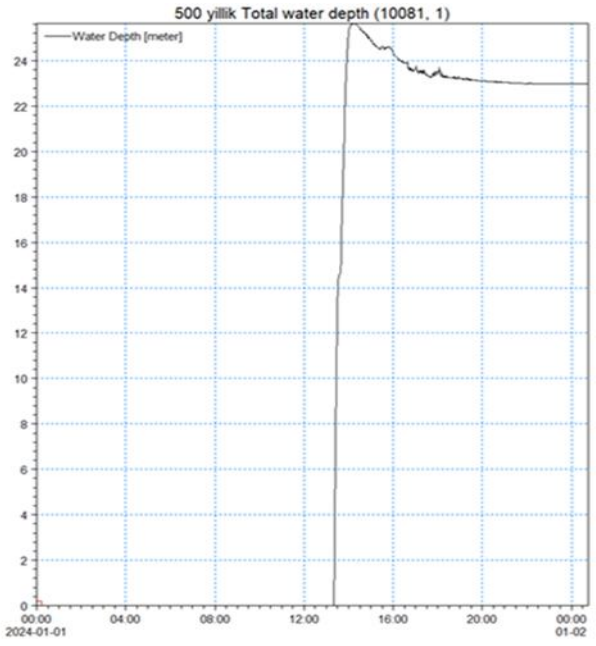
Şekil 12: Belirlenen noktanın 50 yıllık tekerrür aralığındaki hidrograf grafiği



Şekil 13: Belirlenen noktanın 100 yıllık tekerrür aralığındaki hidrograf grafiği



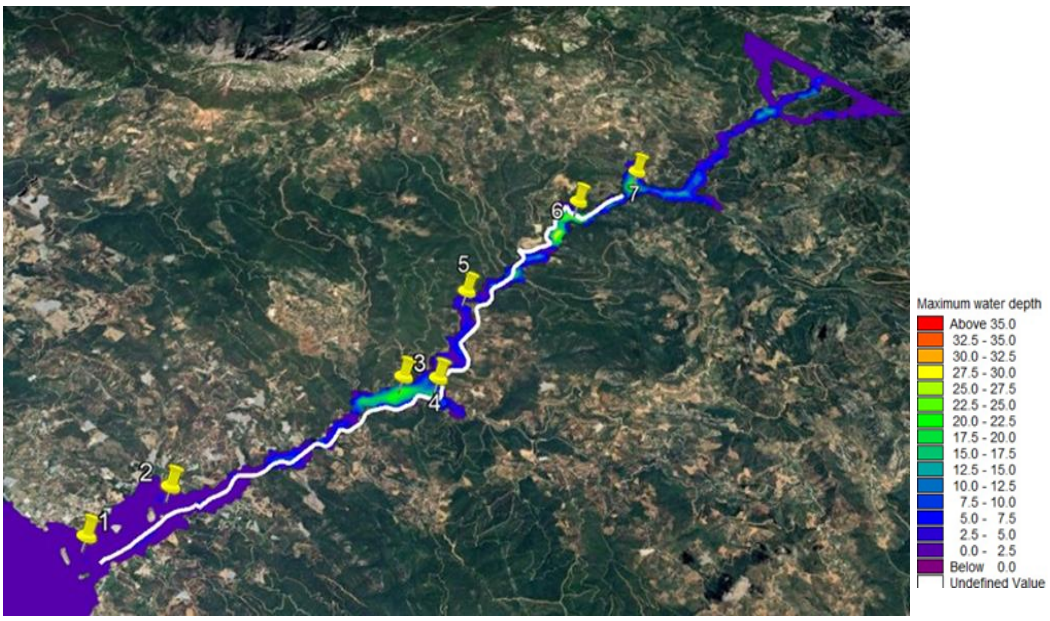
Şekil 14: Belirlenen noktanın 200 yıllık tekerrür aralığındaki hidrograf grafiği



Şekil 15: Belirlenen noktanın 500 yıllık tekerrür aralığındaki hidrograf grafiği

3.3 Kritik Taşkın Noktalarının Güncel Durum Karşılaştırılması

Q_{500} tekerrür debisi sonucu gerçekleştirilen simülasyon sonucunda spesifik noktalar belirlenmiştir. Bu belirlenen noktaların taşkın anında geniş bölgelere yayılması ve su derinliklerinin yüksek veya düşük olması sebebiyle dikkat çekmektedir. Bu noktaların güncel olarak durumları İHA ile fotoğraflanıp olası hasar alanları ve yapılar gözlemlenmiştir. Şekil 16'de bu noktalar işaretlenmiştir.



Şekil 16: 500 yıllık hidrografta taşkın anındaki kritik noktalar



Şekil 17: Nokta 1 güncel durumu

Bu olası senaryoda suyun yüksekliği incelendiği zaman 0-2,5 m arası öngörülmüştür. Nokta 2 ise su derinliği olarak Nokta 1 ile aynı özellikleri taşırken yayılım olarak 600 m bir genişliğe ulaşmaktadır. Nokta 1 ve 2 bakıldığında taşkının bu noktalarda kapladığı alan yaklaşık 1,5 km^2'dir. Bu noktanın dikkat çeken tarafı ise etrafında çok geniş kesimlere yayılan seralardır. Aynı zamanda buradaki taşkında mansap kısmındaki 0 m yakın yüksekliklerin görülmesi modelleme kısmında çıkış sınırlarının geniş işaretlenmesi ve analizin bu doğrultuda topoğrafyaya yayılmasıdır. Burada aslında su yüksekliğinin görülmediği deniz seviyesiyle bir olduğu anlamına gelmektedir. 500 yılda bir tekerrür edebilecek bir yağış sonrası Şekil 18'de gösterilen seralar taşkından etkilenme ihtimali taşımaktadır. Aynı zamanda bu noktaya yakın yeni ve eski yerleşim yerleri de bulunmaktadır.



Şekil 18: Nokta 2 güncel durumu

Nokta 4 ve 8'e bakıldığında su yüksekliğinin 15-20 m bulabileceği görülmektedir. Eğimin bu bölgede az olması sebebiyle suyun geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Hacimsel olarak bakıldığında suyun bu yüksekliğe ulaşabileceği alan yaklaşık olarak 0.3 km^2'dir. Bu konumda olası taşkın sonrası etkilenebilecek açık tarım arazisi ve yerleşim yerleri de bulunmaktadır.



Şekil 19: Nokta 3 ve Nokta 4 güncel durumu

Nokta 5 tüm taşkın alanı boyunca bakıldığında taşkının yaklaşık olarak minimum genişliğe ulaştığı konumdur. Yatağının sağ ve sol kesimleri dahil olmak üzere taşkın genişliği 144 m civarında gerçekleşmektedir. Burada yerleşim yerleri etki görmüyor olsa bile açık tarım alanları 0-2,5 m aralığında su yüksekliğinden etkilenme durumları vardır.



Şekil 20: Nokta 5 güncel durumu

Nokta 6'da zarar görebilecek herhangi bir yapı bulunmamaktadır. Ormanlık alanda bulunması olası bir taşkın için avantaj olsa da çay yatağının darlığı 20-30 m bulan su yüksekliği olabileceğini göstermektedir. Taşkın sonucu genel anlamda suyun en yüksek kota ulaştığı konumlardan biridir. Bu yükseklik 0.3 km^2 alana ulaşabilmektedir.



Şekil 21: Nokta 6 güncel durumu

Nokta 7 taşkının yaklaşık 20-30 m'yi bulan su yüksekliğine ulaşabileceği gözlemlenmiştir. Bu yükseklik 0,12 km^2 alanda gözlemlenmektedir. Bu alan içerisinde yerleşim yerleri bulunmaktadır.



Şekil 22: Nokta 7 güncel durumu

4. Sonuç

Sonuç olarak 500 yıllık taşkın debisine göre olası taşkın yaklaşık 10 km^2 bir alana yayılacaktır. Bu durum 500 yıllık bir tekerrür aralığındaki yağışa göre hesaplanmış olsa dahi gerçekleşme riski taşımaktadır. Afetlerin olmadan tedbirlerinin alınmasının maliyeti, olduktan sonra harcanacak maliyetin çok altındadır. Analiz değerleri, taşkın risk alanı ve olası derinliklerin simülasyon sonucu görülebilmesi ve buna bağlı olarak yerleşim planlaması yapılması gerekmektedir. Dere kenarlarındaki yerleşimlerin kaldırılması, dere ıslahının yapılması ve taşkın alanlarının yeşillendirilmesi, peyzaj alanlarının oluşturulması hem iklim değişikliğine karşı bir önlem hem de afet zararlarını minimize etmeye karşı bir tedbirdir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) , Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve Antalya Su ve Atık Su İdaresi Genel Müdürlüğü (ASAT) Alanya Şube CBS Uzmanı İbrahim AYTEN'e yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Kaynaklar

Beden, N. (2019). *Cevizdere havzasının sayısal modelleme sistemlerine dayalı taşkın analizi ve taşkın zararlarının değerlendirilmesi* [Doktora tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Cebeci, İ., Demirkıran, O., Doğan, O., Sezer, K. K., Öztürk, Ö., & Elbaşı, F. (2019). Türkiye'nin iller bazında kuraklık değerlendirmesi. *Toprak Su Dergisi (Özel Sayı),* 169–176. https://doi.org/10.21657/topraksu.655613

Çakan, S. (2021). *Bozkır-Çarşamba çayı ıslah çalışmalarının HEC-RAS programında incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Çanta, E. E. (2022). *Kemalpaşa (Artvin) ilçesinde 1 ve 2 boyutlu entegre hidrolik model ile taşkın yayılım haritalarının üretilmesi* [Yüksek lisans tezi, Artvin Çoruh Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Damçayırı, D. (2018). *Kınıklı deresinin taşkın risk haritasının oluşturulması* [Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Demirbaş, M., & Aydin, R. (2020). 21. yüzyılın en büyük tehdidi: küresel iklim değişikliği. *Ecological Life Sciences*, *15*(4), 163–179.

Demir, V., & Kisi, O. (2016). Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey. *Advances in Meteorology, 2016*, Article 4891015. https://doi.org/10.1155/2016/4891015

Demir, V., & Keskin, A. Ü. (2020). Obtaining the Manning roughness with terrestrial-remote sensing technique and flood modeling using FLO-2D: A case study Samsun from Turkey. *Geofizika, 37*(2), 131–156. https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.9

Demir, V., & Keskin, A. Ü. (2022). Flood flow calculation and flood modeling in rivers that do not have enough flow measurement (Samsun, Mert River sample). *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

Efe, H., & Önen, F. (2015). Batman çayı'nın taşkın analizinin HEC-RAS programıyla yapılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 6(2), 83–92.

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

Gülbaz, S. (2019). Sayısal modeller ile taşkın yayılım haritasının oluşturulması ve risk altında olan alanların belirlenmesi: Türkköse Deresi örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *5*(2), 335–349. https://doi.org/10.21324/dacd.491529

Hacı, A., Gülbaz, S., & Paşa, Y. (2023). *Taşkın modellemelerinde ve taşkın haritalarının oluşturulmasında kullanılan programların karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

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

Kömüşçü, Ü.A., Çelik, S., & Ceylan, A. (2011). 8–12 Eylül 2009 tarihlerinde marmara bölgesi'nde meydana gelen sel olayının yağış analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, *9*(2), 209–220. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000125

Oğuz, K., Oğuz, E., & Coşkun, M. (2016, 21–24 Kasım). *Coğrafi Bilgi Sistemleri ile taşkın risk alanlarının belirlenmesi: Artvin ili örneği* [Bildiri Sunumu]. 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, Rize, Türkiye.

Peker, İ. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. *Sustainability*, *16*(3), Article 1226. https://doi.org/10.3390/su16031226

Uçar, İ. (2010). *Trabzon Değirmendere Havzası'nda Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bir Hidrolik Model Yardımıyla Taşkın Analizi Yapılması* [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Üyüklüoğlu, M. (2015). *HEC-RAS ile taşkın bölgelerinin modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Bozok Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Vilsteren, M. (2010). *Design Flood Estimation For The Quang Tri Province in Vietnam* [Bachelor's Thesis, University Of Twente]. https://purl.utwente.nl/essays/69461

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 58–69, DOI: 10.21324/dacd.1465730

Deprem Sonrası Adıyaman Gölbaşı'na Dair Gözlemler ve Mimarlık

Rojat Aksoy Işık[1,*]

[1]*Mardin Artuklu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 47100, Mardin.*

Özet

Önlenemeyen doğal afetlerden/tehlikelerden sayılan deprem, yerkabuğundaki kırılmalardan dolayı ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayıldıkları ortamları sarsan hareketlerdir. Deprem kuşağında yer alan Türkiye'de depremler kaçınılmaz bir gerçeklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüze kadar Türkiye'de birçok deprem yaşanmış ve yaşanmaya devam edecektir. Son zamanlarda yaşanan depremler arasında 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan Kahramanmaraş'ta 7.7 (Pazarcık merkezli) ve 7.6 (Elbistan merkezli) şiddetindeki depremler gelmektedir. Pazarcık merkezli bu depremden merkez üs ve çevresinde yer alan 11 il (Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Osmaniye, Gaziantep, Şanlıurfa, Malatya, Diyarbakır, Adana, Kilis ve Elâzığ) çok etkilenmiştir. Yüksek şiddetli olan bu deprem, buralardaki birçok yerleşimi ve yapıyı çok etkilemiştir. Çalışma kapsamına bu depremlerden çok etkilenen yerleşim yerlerinden biri olan Adıyaman'ın Gölbaşı ilçesi alınmıştır. Gölbaşı'na 26 Nisan 2023 tarihinde (depremden 79 gün sonra) MAÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölüm hocaları, MYO İnşaat Teknolojisi hocası (İnş Müh.) ve öğrencilerle gidilip yerinde gözlemler ve incelemeler yapılmıştır. Gözlem ve inceleme yapılan yerler Gölbaşı Merkeze bağlı Fatih ve Yeni mahallelerdir. Araştırmanın temel amacı, bu hasarların nedenlerini anlamak ve deprem-mimarlık ilişkisini irdelemektir. Yapılan gözlemler, birçok yapının zemin sıvılaşması nedeniyle hasar gördüğünü, bunun yanı sıra yapısal hasarların da önemli boyutlarda olduğunu göstermiştir. Literatür taraması, mimarlık ve deprem ilişkisi üzerine yeterli çalışma yapılmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, deprem sonrası yapı tasarımı ve inşaat süreçlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, gelecekteki depremlere karşı daha dirençli yapılar inşa edilmesi için mimari yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Sonuç olarak, bu tür araştırmalar, deprem sonrası hasar tespitinin yanı sıra, yapısal tasarımın iyileştirilmesi adına önemli veriler sunmaktadır. Türkiye gibi deprem kuşağında yer alan ülkelerde, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin birlikte çalışarak daha güvenli bir yaşam alanı yaratma çabası büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Sözcükler

Gölbaşı, Adıyaman, Deprem, Mimarlık, Yapı Hasarları

Observations on Adıyaman Gölbaşı after the Earthquake and Architecture

Abstract

Earthquakes, which are considered to be one of the natural disasters/hazards that cannot be prevented, are movements that shake the environments where vibrations arising from fractures in the earth's crust spread in the form of waves. Earthquakes are an inevitable reality in Turkey, which is located in the earthquake zone. Many earthquakes have occurred in Turkey to date and will continue to occur. Among the recent earthquakes, the earthquakes with a magnitude of 7.7 (centered in Pazarcık) and 7.6 (centered in Elbistan) in Kahramanmaraş on February 6, 2023 are among the earthquakes. The epicenter and 11 provinces around it (Kahramanmaraş, Hatay, Adıyaman, Osmaniye, Gaziantep, Şanlıurfa, Malatya, Diyarbakır, Adana, Kilis and Elazığ) were greatly affected by this Pazarcık-centered earthquake. This high-intensity earthquake greatly affected many settlements and structures here. The Gölbaşı district of Adıyaman, one of the settlements most affected by these earthquakes, was included in the scope of the study. On April 26, 2023 (79 days after the earthquake), MAU Engineering-Architecture Faculty Architecture Department professors and students went to Gölbaşı and made on-site observations and investigations. The places where observation and examination were carried out are Fatih and Yeni neighborhoods of Gölbaşı Center. The main purpose of the research is to understand the causes of these damages and to examine the earthquake-architecture relationship. Observations have shown that many buildings were damaged due to ground liquefaction, and that structural damage was also significant. Literature review reveals that there are not enough studies on the relationship between architecture and earthquakes. This situation emphasizes that post-earthquake building design and construction processes need to be reconsidered. The results of this study may contribute to the development of architectural approaches to build more resistant structures against future earthquakes. As a result, such studies provide important data for post-earthquake damage assessment as well as for improving structural design. In countries such as Türkiye, which are located in earthquake zones, the effort of architecture and engineering disciplines to work together to create a safer living space is of great importance.

Keywords

Gölbaşı, Adıyaman, Earthquake, Architecture, Building Damages

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (482) 2134002 Faks: +90 (482) 2128380
E-posta: rojataksoy@artuklu.edu.tr (Aksoy Işık R.)

Gönderim Tarihi / Received : 05/04/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 20/10/2024

1. Giriş

Birleşmiş Milletler afet kavramını, insanlar ve insanların üzerinde yaşadığı yerleşmelerin ekonomik, fiziksel, sosyal ve çevresel kayıplara neden olan, normal yaşamı ve insanların aktivitelerini durduran veya kesintiye uğratan olaylar olarak ifade etmektedir. Ayrıca toplumları veya toplulukları etkileyen ve söz konusu toplumların kendi kaynaklarıyla sorunun üstesinden gelebilme imkânını aşan, her türlü doğal, teknolojik ve insan kökenli yaygın ve yıkıcı olaylar olarak da tanımlanmaktadır (Ayyıldız & Haşim, 2021).

Genel olarak, afet, bir toplumu veya çevreyi olumsuz etkileyen, beklenmedik bir şekilde ortaya çıkan doğa veya insan kaynaklı olaylar olarak tanımlanır (Tanrıverdi vd., 2021). Depremler ise yerkürenin doğal olaylarıdır ve tek başlarına bir afet olarak kabul edilmemelidir. Yerleşim alanları dışında bir bölgede meydana gelen bir deprem, muhtemelen herhangi bir can kaybına yol açmayacağı için afet olarak kabul edilmez. Tehlike unsuru barındırması ve bundan zarar görebilme özelliği bulunması durumunda afet olarak tanımlanabilir (Akıncıtürk, 2003). Bu nedenle depremi tanımlarken afetten ziyade tehlike demek tanımsal olarak depremi daha anlaşılabilir bir hale koyacaktır. Buna rağmen daha çok doğal afet olarak bilinen depremler, özellikle yerleşim yerleri açısından yıkıcı bir etkiye sahip, can ve mal kaybına en çok yol açan afetlerin başında gelmektedir. Ülkemiz bilindiği gibi Hindistan'dan İtalya'ya kadar uzanan önemli deprem kuşaklarından Alp-Himalaya üzerinde bulunmaktadır. Buna bağlı olarak bu deprem kuşağı boyunca aralıklarla depremler yaşanmaktadır. Türkiye nüfusunun yaklaşık yarısı kadarı (%42) birincil deprem kuşağı hattında bulunan yerleşim alanlarında yer almaktadır (Sürer & Meydan, 2020). Son 70 yılda Türkiye'de çeşitli tehlikelerden hasar gören konut sayısı 600.000 civarındadır. Bu sayının %66'sı depremlerden; %15'i su baskınlarından, %10'u yer kaymalarından, %7'si kaya düşmelerinden ve %2'si meteorolojik olaylardan ve çığ düşmelerinden kaynaklıdır. Bu oranlardan can ve mal kaybı açısından en önemli olan doğal afetin deprem olduğu görülmektedir. Türkiye, tektonik özellikleri nedeniyle topraklarının %98'i deprem riski altında bulunan bir ülkedir (Özkul & Karaman, 2007).

Bu bağlamda oldukça önemli aktif fayların bulunduğu bir coğrafyada yer alan ülkemizin depremselliği oldukça yüksektir. Bu nedenle deprem dayanımı, ülkemizde yapılacak olan herhangi bir yapı için en önemli ölçütlerden biridir. Deprem kuşağında yer alan Türkiye'de deprem riski her zaman bulunmaktadır. Bundan dolayı yapılan çalışmalarda mutlaka deprem kuşağında yer alan bir bölge olduğumuz gözetilmelidir. Bu doğrultuda inşa edilecek binalarda deprem dayanımı en iyi şekilde ve en ince hesapla yapılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, Maraş merkezli deprem sonrası Adıyaman'ın Gölbaşı ilçesinde iki mahallede yerinde incelemeler ve gözlemler gerçekleştirilmiş; hasar görmüş binalar ele alınarak bu binaların hasar nedenleri incelenmiştir. İncelemelerde daha çok mimari bir bakış açısı benimsenmiş ve hasarların tespiti yapılmıştır.

Ayrıca, "deprem-mimar ve mimarlık" ilişkisine dair bir literatür çalışması da yapılarak, bu kavramların önemine vurgu yapılmıştır. Çalışmanın amaçlarından biri, Gölbaşı'ndaki deprem sonrası yapıları görünür kılmak ve bu bağlamda daha fazla araştırma yapılmasına katkı sağlamaktır. Bunun yanı sıra, deprem, yapı, mimar ve mimarlık kavramlarının ilişkisini tekrar gündeme getirerek, mimarlık eğitimi verilen okullarda bu konulara yönelik güncellemelerin yapılmasını teşvik etmektir.

Bu çalışmada, seçilen bölgelere gidilerek alan çalışması gerçekleştirilmiş; fotoğraflar çekilmiş ve notlar alınmıştır. Ancak, depremden 79 gün sonra yapıldığı için istenilen düzeyde bir çalışma gerçekleştirilememiştir. Alandaki birçok enkaz ve binalardaki yıkılma tehlikesi nedeniyle bazı bölgeler gezilememiştir. Bu zorlu koşullar, çalışma alanındaki yapılarla ilgili veri toplama sürecini olumsuz etkilemiştir.

2. Gölbaşı Yeri ve Konumu

Gölbaşı, Adıyaman ilinin bir ilçesidir. Karaçalık adlı bir köy olarak 1958 yılına kadar Besni ilçesine bağlıyken Adıyaman'ın il olmasıyla beraber Adıyaman'a bağlı bir ilçe statüsüne kavuşmuştur. Gölbaşı; Adıyaman, Malatya, Gaziantep ve Kahramanmaraş il sınırlarının birbirleriyle kesiştiği bir alanda (Şekil 1,2) olduğu için coğrafi bakımdan önemli bir konuma sahiptir. Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerini Akdeniz'e bağlayan kara yolu ve Cumhuriyet döneminde yapılmış tren yolu hattı da Gölbaşı merkezden geçmektedir. Bulunduğu coğrafi konumu Gölbaşı ilçesini tarihi dönemlerde de transit geçiş güzergâhı konumuna getirmiştir. Bu transit geçiş yolu, tarihsel dönemde "Bağdat Yolu", "Savaş Yolu", "Halep Yolu", "Murat Yolu" gibi farklı isimlerle de anılmıştır (Telli, 2018). Günümüzde Gölbaşı Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğünden, Mehmet Özbay'dan alınan bilgilere göre Gölbaşı ilçesinin nüfusu deprem öncesi 34 ve 35 bin dolayındayken deprem sonrası bu sayı 33 binlere kadar inmiştir.



Şekil 1: Gölbaşı haritası (Lafsözlük, 2024)



Şekil 2: Gölbaşı ilçesinin günümüzde bulunduğu durum

3. Gölbaşı Merkezde Yerinde Yapılan Gözlemler ve Tespitler

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen 7.7 (Pazarcık merkezli) ve 7.6 (Elbistan merkezli) şiddetindeki depremlerden en çok etkilenen yerlerden biri de Gölbaşı olmuştur. Yaşanan depremden 79 gün sonra Gölbaşı merkezde bulunan Yeni ve Fatih mahallelerinde (Şekil 3, 4) bazı yerlerde yerinde incelemeler ve gözlemler yapılmıştır. Çalışmada bu gözlemler sonucunda yapılarda tespit edilen hasarlar alandaki mevcut şartların zorluğundan dolayı genel olarak verilmiştir. Alandaki yıkıntılardan ve yıkılma tehlikesinden dolayı istenilen düzeyde araştırma yapılamadığından genel gözlemler çalışmaya eklenmiştir. Gölbaşı, Türkiye'nin depremsellik açısından riskli bölgelerinden birindedir.

Bölge, aktif fay hatları üzerinde bulunması nedeniyle depremlere maruz kalmaktadır. Geçmişte meydana gelen depremler, yerleşim alanında önemli hasarlara yol açmış, bu durum da yerel halkın deprem riskine karşı duyarlılığını artırmıştır. Depremsellik, yapıların tasarımı ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşımaktadır. Gölbaşı'nın zemin yapısı, yerel jeolojik özelliklere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zemin sıvılaşması, özellikle suya doygun zeminlerde depremlerde ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Bu bağlamda, zemin koşullarının detaylı analizi, yapıların dayanıklılığı için kritik bir unsurdur. Zemin etüdü, yapı projelerinde dikkate alınması gereken temel bir aşamadır.

Fatih mahallesi genelde 3, 4 ve 5 katlı (zemin+2, zemin+3, zemin+4) yapıdan oluşmaktadır (mahallede geniş olan yol üzerinde 6 katlı yapılar bulunmaktadır). Yeni yapılaşmanın olduğu bir mahalle olduğundan ayrık nizam ve betonarme yapılardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Yeni mahalle ilk yerleşim alanı olduğundan, yığma sistemle 3 ve 4 katlı bitişik nizamlı yapılar çoğunluktadır (Bu bilgi günümüzde Gölbaşı Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğünden, Mehmet Özbay'dan alınmıştır).



Şekil 3: Yapıları incelenen Yeni Mahalle (Google Earth - deprem sonrası)



Şekil 4: Yapıları incelenen Fatih Mahalle (Google Earth - deprem sonrası)

Bitişik olarak inşa edilen bazı yapılarda binalar arasında boşluk olmadığından deprem sırasında titreşimlerden dolayı binalar birbirine çarpmış ve çekiçleme denilen yapısal hasar meydana gelmiştir. Çekiçleme, farklı yüksekliklerde inşa edilen binaların birbirine bitişik olması ve deprem sırasında bu binaların çarpışması sonucunda ortaya çıkan bir etkidir.

Yükseklik farkı nedeniyle titreşim düzeyleri farklı olan binalar, hareket esnasında çarpışmakta; daha uzun yapılara göre daha sert olan kısa yapılar, kendi kat hizasında yer alan uzun binaları tahrip etmektedir (Özen, 2018). Aynı zamanda çekiçleme, gerçekleştirilen çalışmada binalar arasında yetersiz boşluk oranına sahip ya da bitişik nizamlı olarak inşa edilmiş düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda oluşması muhtemel etkidir (Kamal vd., 2018). Bu yapılarda zeminin sıvılaşmasından dolayı oturmalar meydana gelmiş, yan yana bulunan binalarda yan yatmalar da gözlemlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: Yapısal hasar örnekleri



Şekil 6: Zemindeki sıvılaşmadan dolayı yapı oturması

Yapılan incelemelerde inşa süreci yeni tamamlanmış veya sürmekte olan binalarda yapısal hasarların çok olmadığı ama zemindeki sıvılaşma sonucu oturmaların olduğu ve bu oturmalardan kaynaklı binaların yana yatma durumlarının olduğu görülmüştür (Şekil 6).

Birçok yapıda taşıyıcı ve diğer yapısal sistemlerinde bir hasar olmadığı halde zemin sıvılaşmasından dolayı yan yattığı, oturduğu gözlemlenmiş ve bu durumdan dolayı ağır hasarlı duruma geldikleri görülmüştür. Zemin sıvılaşması nedeniyle yol seviyesinin yükseldiği gözlemlenmiş ve bu durumun birçok yapının çökmesine neden olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7, 8, 9).



Şekil 7: Bina çökmeleri (sıvılaşmadan kaynaklı yolların yükselmesi)



Şekil 8: Zemin sıvılaşmasından dolayı yapı çökmesi



Şekil 9: Taşıyıcı sistemin yıkıldığı bir yapı örneği



Şekil 10: Betonarme ve yığma yapı hasar örnekleri

Deprem sonucu yığma yapıların da önemli hasarlar aldığı gözlemlenmiştir. Bu yapılardaki hasarların nedenleri arasında zemin sıvılaşması, eski olmaları nedeniyle taşıyıcı sistemlerdeki eksiklikler ve malzeme yetersizliği gibi etkenler gelmektedir (Şekil 10).

İllere göre dağılımları incelendiğinde elde edilen verilerden, deprem bölgesinde yer alan illerde yoğun bir şekilde olduğu görülen yığma yapım sisteminin diğer sistemlere göre azaldığı da bilinmektedir. Bu anlamda yığma binaların deprem dayanımının diğer sistemlere göre daha düşük olması ve Türkiye'de yoğunlukla tercih edilmesinden dolayı yığma sistemle olan binaların deprem davranışı Türkiye'deki yapıların deprem direnci açısından oldukça önemlidir. Yığma binaların hasar görmesi, iki baskın hasar ile meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, deprem yükünün duvarlara dik gelmesinden ötürü duvarlarda devrilme tehlikesine neden olacaktır. İkincisi ise, taşıyıcı duvarların depremden kaynaklanan yanal kuvvetlere dayanabilmek için perde duvar gibi davranmasıdır. Yük bu duvarlarda diyagonal veya eğimli çekme çatlakları şeklinde ortaya çıkan ve baştan zemin bağlantı noktalarına kadar kademeli çatlaklar yaratan kesme çatlakları oluşturmaktadır (Yılmaz, 2024).

Yapılan gözlemlerde, yapısal hasarlar arasında özellikle taşıyıcı sistemde (kolon, kiriş, döşeme) malzeme eksikliği ve yanlış malzeme kullanımı tespit edilmiştir. Örneğin, etriye sayılarının az olması ve fazla aralıklarla bırakılması, kum yerine taş kullanılması ve düz donatı kullanımının yaygınlığı gibi sorunlar gözlemlenmiştir. Bazı ağır hasarlı yapılarda perde duvarlar, kolonlar ve kirişler yan yatmış veya patlamıştır. Bu binalarda duvarların yıkıldığı, sıvaların döküldüğü, döşemelerin yer yer çöktüğü ve açıkta kalan donatıların çürüyüp korozyona uğradığı gözlemlenmiştir (Şekil 11, 12).

Yeni mahallede deprem öncesi 682 bina bulunurken deprem sonrası bu sayı 408'e inmiştir. Fatih mahallesinde ise deprem öncesi 705 bina, deprem sonrası 603 bina olarak kalmıştır. Bu kalan binalar da orta, az ve hasarsız binalardır.

Gölbaşı'ndaki yapılara bakıldığında genellikle yığma ve betonarme yapıların karışımını içermektedir. Ancak, yapıların bir kısmının depreme dayanıklılık açısından yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Eski yapıların büyük bir kısmı, güncel deprem yönetmeliklerine uygun inşa edilmemiştir, bu da potansiyel riskleri artırmaktadır.



Şekil 11: Binada yapısal hasar örneği



Şekil 12: Binada yapısal hasarlar

4. Deprem ve Mimarlık

Türkiye, daha önce de belirtildiği gibi deprem kuşağında bir ülke olduğundan deprem her zaman kaçınılmaz bir gerçek olmaktadır. Bu yüzden ülkede olası depremler için birtakım tedbirler alınmak zorundadır.

Depremin tedbirleri arasında en önemli aşamalardan biri yapının tasarımından uygulanmasına kadar olan süreçtir. Bu sürecin içerisinde yer alan tüm kuruluş ve kişiler ile özellikle teknik elemanların sürece hâkim olmaları ve buna uygun bir proje ile bu projenin uygulama sürecini yürütmeleri gerekmektedir. Bu aşamada deprem ile ilgili olabilecek her durumun düşünülmesi ve sorgulanması gerekmektedir. O yüzden bu süreçteki baş aktörlerden sayılan teknik elemanlar (mimar, mühendis gibi) için deprem ile ilgili tüm etkilerle beraber eğitimler de çok önemli olmaktadır.

Yapı ile ilgili baş aktörlerden olan mimarlar; deprem içinde önemli aktörlerdir. Bu bağlamda mimarlık eğitimi de düşünülmesi gereken ve bu doğrultuda verilmesi gereken eğitimlerdendir.

Bina tasarımında mekân kurgusu önemli bir etken olmakla birlikte, mimari tasarım süreci toplumsal bir yaklaşım benimsemeli ve toplumun tüm ihtiyaçlarını göz önünde bulundurmalıdır.

Bu bağlamda, güncel uluslararası koşullarda mimarlık eğitimi üzerine düşünülmeli ve sorgulama yapıldığında ülkenin mevcut koşulları, sorunları ve kendine özgü durumları dikkate alınmalıdır.

Türkiye de deprem kuşağında olduğundan yapı ile ilgili tüm aşamalarda deprem gözetilmeli ve o bağlamda yapı süreci takip edilmelidir. Türkiye'de deprem bilinci ve tedbirleri ile ilişkili dönüm noktası sayılabilecek durumlar 1999 Marmara Depremi sonrasında yapılmaya başlanmıştır. 1999 Marmara Depremi sonrasından yaşanan deprem felaketleriyle mimarlık ve mimarlık eğitiminin doğal afetler temelinde yeniden sorgulanmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Mimarların taşıyıcı sistem hakkındaki bilgi yetersizliği, yapıdaki durağan ve hareketli olan sistemlerin bilinmemesi en önemli sebeplerindendir. 1999 Marmara depreminden sonra incelenen yapılardaki hasarların tespitinde mimari tasarım açısından hatalarının ön plana çıktığı görülmüştür.

Depreme dayanıklı yapıların tasarımının mimari tasarım sürecini yönlendiren mimarların, disiplinler arası işbirliğinin temellerini lisans eğitimi döneminde oluşturmaları gerektiği bilinmektedir. Depreme dayanıklı binaların tasarımı, inşaat mühendislerinin çalışma alanı olarak görülse de mimari tasarım aşamalarında, yapının taşıyıcı sisteminin yapının formuna bağlı olarak tasarlanması, yapının depreme karşı göstereceği dayanımı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Solak, 2022). Bu yüzden belki de Özen'in belirtiği gibi "Depreme dayanıklı yapılar için en önemli şart, depremin her yönden gelebileceğini göz önünde bulundurarak tasarım yapmaktır" (Özen vd., 2021) İfadesi yerinde olacaktır.

Mimari bir bakış açısıyla deprem sorununa bakıldığında, depremden kaynaklı yaşanan yıkımlarda, can ve mal kayıplarında mimarların da sorumluluğunun bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, deprem özelinde yaşanabilecek afet durumlarında dayanıklı, sağlam ve güvenilir olan binalar tasarlamak; mimarlık eğitiminin temelini oluşturduğu için, mimarların da bunu hep göz önünde bulundurup bina tasarlamaları gerekmektedir. Son yıllarda meydana gelen depremlerin neden olduğu yıkım ve acı bilançoları (can ve mal kaybı açısından) mimarlık eğitiminin tekrar gözden geçirilmesine neden olmuştur. Özellikle de mimarlık bölümü öğrencilerine verilen taşıyıcı sistem dersleri gözlem altına alınmıştır.

Depremden kaynaklı hasarlardan meydana gelen can ve mal kaybını önlemek için, çözümlerden biri de Türkiye'de mimarlık okullarında verilen taşıyıcı sistem ile ilgili derslerinin eğitime uygun olarak artırılması ve uygun standartlara ulaşması gerekmektedir (Akçaer vd., 2015).

Türkiye'de 57 devlet üniversitesinde mimarlık bölümü vardır ve bunların 28'inde deprem ile ilgili dersler bulunmaktadır. Bu dersler, 3 üniversitede zorunlu, 24 üniversitede seçmeli olarak verilmektedir (Solak, 2022).

Deprem sonrası yapılarda ortaya çıkan hasarların da gösterdiği gibi mimari tasarım ile depreme karşı dayanım arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Uygulama sonrası ortaya çıkacak ürünün temel noktası olan mimari tasarımın strüktürel tasarımla birlikte ele alınması gerekmektedir.

Mimar, binaların yapımını tasarlayıp planlayan ve ayrıca binaların mimari açısından yapımını denetleyen kişi olduğundan sağlam ve yüksek dayanımlı yapı tasarımı için taşıyıcı sistem hakkındaki bilgisi bu noktada oldukça önemlidir. Mimar ön tasarımında, yapının zeminini tanıyan, temel çeşidini, taşıyıcı sistemi, malzemeleri ve yapım sistemini bilerek planlama sürecinde olan kişidir bu yüzden bu bilgilerle donanımlı olmak zorundadır. Mimari tasarım süreci, tüm olası durumların tespitinin ardından alınan tasarım kararlarından detaylandırma aşamasına kadar, çeşitli alanlarda uzmanlaşmış kişilerin iş birliği ile gerçekleşen bir süreçtir. Bu süreçte, plan şeması, kütle ve mekân kurgusu gibi birçok karar mimar tarafından verilmektedir. Tasarım sürecinde alınan kararların taşıyıcı sistem üzerinde değiştirilmesi sıkça rastlanan bir durumdur. Bir yapının formu, deprem sırasında göstereceği davranışı doğrudan etkiler. Bina geometrisi, yapının mimari tasarımındaki formunu ve kullanılan taşıyıcı sistemleri içermektedir (Özdemir & Karataş, 2024).

Bunun önüne geçebilmek için mimari tasarımın ilk aşamalarında depremin olası bilinciyle taşıyıcı sistemin bir tasarım verisi olarak sürece katılması gerekmektedir. Çünkü mimari tasarım sürecinde taşıyıcı sisteminde düşünülmeden tasarıma dâhil edilmemesi, uygulama projesi veya uygulama aşamasında değişikliklerle karşılaşılmasına sebep olmaktadır. Bu da proje sürecinde ciddi zaman ve maliyet kaybına sebep olmanın yanında olası depremde can ve mal kaybına da yol açabilmektedir.

Bu bağlamda mimar, yapıyı tasarlarken projede görev alan mühendislerle beraber çalışıp, projeyi taşıyıcı sistem açısından da en iyi şekilde ele almalıdır. Binalar için deprem boyutu düşünüldüğünde, mimari tasarım, yapım süreci, seçilen malzemenin doğru kullanımı ile de ilişkilidir. Mimarın tasarımın ilk aşamasından yapılandırma sürecine kadar vereceği kararlarda binanın deprem dayanımı açısından da sağlamlığı düşünmeli ve ona göre kararlar vermelidir.

Projelendirme aşamalarında, yapıdaki sismik izolasyona uygun taşıyıcı sistem düşünülebilir. Daha ayrıntılı çalışma gerektiren onarım ve güçlendirme konusunda da mimarın görevleri vardır.

Yapının projeleri ve uygulanmış durumu arasındaki farklılıkları incelemek, inşaat mühendislerinin yapacağı işlere zemin oluşturmak, yapıyla ilgili yerinde gözlem, araştırma ve ölçümler yapılması gerekmektedir. Yapılan incelemeler doğrultusunda değişiklik yapılması gereken yapı elemanlarında hangi değişiklik yapılacağı belirlenir, önerilerle birlikte tamir ve güçlendirmeyi kapsayan yapım süreci gerçekleştirilir (Akıncıtürk, 2003). Yapıdaki taşıyıcı sistem daha çok inşaat mühendislerinin sorumluluk alanı gibi görünse de mimarlarında tasarım aşamasında karar verecekleri önemli bir durumdur. Deprem aşamasında insanlara depremden çok depremde yıkılan binaların zarar verdiği gerçeği düşünüldüğünde, taşıyıcı sistem tasarımının mimarların ve mühendislerin ortak sorumluluğunda olduğu açıktır (Bingöl vd., 2020).

5. Değerlendirme ve Sonuç

Bir yapının deprem güvenliliğini/dayanımını etkileyen en önemli faktörlerin arasında binanın büyüklüğü, yükseklik boyutları, geometrik şekilleri, duvarları, taşıyıcı sistemleri, kütle ve rijitlik dağılımıdır (Arslan vd., 2005). Ayrıca hasar görebilirliği etkileyen parametreler de dört ana başlık altında toplanabilmektedir. Bunlar, depremin şiddeti ve özellikleri, zemin ve yerleşim yeri özellikleri, mimari (yapısal ve biçimsel özellikler), uygun malzeme seçimi, uygulama kalitesi ve korunma düzeyidir (Akbulut & Aytuğ, 2005). Son otuz yılda ülkemizde yaşanan depremler sonucunda depremdeki hasarların, Zemin ile ilgili tehlikeler, mimari tasarımdan kaynaklı hatalar, statik tasarımdan kaynaklı hatalar, işçilik ve kullanıcı hataları olarak belirtilmektedir (Özkul & Çivici, 2018).

"Gerçekte, bir binanın deprem güvencesinden mimar değil inşaat mühendisi sorumludur. Bu doğrudur. Ancak, bir binanın deprem güvencesini risk altına sokabilecek ve tehlike unsuru oluşturabilecek cinsten tasarım hatalarına düşmemek, başka bir deyimle, deprem hesaplarında zorluklar, karmaşa ve belirsizlikler yaratabilecek cinsten taşıyıcı sistemlere olanak vermemek de doğrudan mimarın sorumluluğundadır" (Tezcan, 1998). Mimarlar yapı tasarımına başlarken depremi düşünerek deprem hareketlerinden yapının nasıl etkileneceğini göz önünde bulundurmalıdır. Bu sayede iyi bir tasarımla yapıyı daha güvenli, kullanışlı ve ekonomik bir duruma getirmek mümkün olmakta, taşıyıcı sistem belirlenince de yapının depreme karşı dayanımı şekillenmiş olacaktır (Özen vd., 2021). Bu anlamda bina tasarlanırken bunlara dikkat edilmesi önem arz etmektedir.

Gölbaşı'nın göl kıyısında yer alması ve zemin yapısının sulak olması, burada bulunan birçok binanın temellerinin deprem kaynaklı sismik hareketlerden daha fazla etkilendiğini gösteren yerinde yapılan incelemelerle anlaşılmıştır. Temellerin zemin sıvılaşması nedeniyle oturmalara maruz kaldığı ve bu oturma yüksekliğinin bir metreye kadar çıkabildiği, ayrıca temellerde dönmelere neden olduğu gözlemlenmiştir. Binalarda, zemin sıvılaşması ile birlikte yapısal hasarların da yaygın olduğu tespit edilmiştir.

Bu yapısal hasarların nedenleri arasında, kolon ve kirişlerde kesme etkileri, yapı malzemesinin yanlış seçilmesi (örneğin, kolonlarda kum yerine iri çakıl taşlarının kullanılması, cüruf demirinin tercih edilmesi gibi) ve birçok yapım ve tasarım hatası bulunmaktadır.

Bitişik olarak inşa edilen bazı yapılarda binalar arasında boşluk olmadığından deprem sırasında titreşimlerden dolayı binalar birbirine çarpmış ve "çekiçleme" dediğimiz yapısal hasar meydana gelmiştir. Ayrıca birbirine etki eden yapıların bir tarafı yıkılmış bir tarafı hasarlı ve yıkılmamış durumdadır.

Yapım aşamasında beton dökümü esnasında olan yetersiz vibrasyon (sıkıştırma) eksikliği veya betona su katılması gibi birçok nedenden dolayı oluşabilecek segregasyonlar, demirin korozyona uğraması, betonla birbirini tutamaması, az malzeme kullanılması gibi birçok olay depremde hasarların oluşması neden olmuştur.

Maraş merkezli olan 6 Şubat tarihli depremde Gölbaşı'nda meydana gelen deprem sonrası taşıyıcı sistemi betonarme olan binalarda oluşan durumlar, ülkemizde daha önceki depremlerde hasar gören binalarla aynı benzerlikleri göstermektedir. Bunlar arasında bodrum katlarında yapılan bant pencere veya diğer katlardaki kısa kolon oluşumlarıyla oluşan kesme kuvveti hasarları, bölme duvarların kaldırılmasıyla yumuşak kat oluşumu, kolonlarda etriye sıklaştırması yapılmaması, düşey taşıyıcılarda seyrek etriye konulması veya konulmaması, boyuna donatı yetersizliği gibi birçok neden vardır.

Ayrıca yapı-zemin etkileşimi ve zeminin depremdeki davranışının (sıvılaşma, taşıma gücünün azalması gibi) dikkate alınmadan temel sisteminin yapılması (Çatal, 2019) gibi maddeler sıralanabilir. Kısacası birçok sebeple birlikte binalarda beton dayanımının düşük olması, deprem sonrası binalardaki hasarların nedenlerindendir.

Bu hasarların oluşmaması için gerekli tedbirler tasarım aşamasındayken göz önünde bulundurulmalı ona göre tüm süreç takip edilmeli, binaların depreme dayanımı sağlanmalıdır.

Eski yapıların depreme dayanımını artırabilecek, depremden doğabilecek kayıp ve zararı aza indirmenin yollarından biri de kentsel dönüşümdür. Kentsel dönüşüm, bulunduğu dönemin şartlarına göre inşa edilmiş ve zamanla özelliğini yitirmiş, eskimiş, fiziki ve çevresel yönden zayıf düşmüş alanların/yapıların belirli bir plan ve strateji çerçevesinde yenilenerek kente kazandırılması olarak tanımlanabilir. Kentsel dönüşüm olgusu tekrardan yapılandırma, yenileme ve mevcut durumu koruma gibi yöntemleri kapsamaktadır.

Bu bağlamda yapıların da toplumların kullanımına sunulmuş birer ürün olduğu bilinciyle bir kullanım ömürlerinin olduğunu ve zamanla özelliklerini yitirip eskiyebilecekleri gerçeğinin unutulmaması gerekmektedir. Oluşturulan plan ve stratejiler bağlamında deprem başta olmak üzere oluşabilecek doğal afetlere karşı risk taşıyan alanlar/yapılar en hızlı şekilde uygun koşullar sağlanarak kentsel dönüşüm kapsamında sağlamlaştırma veya yeniden yapımı gerçekleştirilmelidir. Risklerin en aza indirgenmesi açısından kentsel dönüşüm yaygınlaştırılmalıdır (Sürer & Meydan, 2020).

Eski yapıların deprem dayanımı için kentsel dönüşüm olgusu çözümlerden biri olabilmektedir. Bütün bu gözlemlerden ve yerinde yapılan incelemelerden anlaşılacağı gibi Gölbaşında zeminin yumuşak olması olası depremlerde büyük kayıplara neden olabilmektedir. Bu yüzden bu zeminin durumuna göre yapılaşma kararı verilmesi ve gerekirse bu alanlarda binaların yapılmaması gerekmektedir. Bu zeminin durumuna göre temel çeşidinin seçilmesi gerekmektedir. Tüm bunlarla beraber tasarım aşamasında yapı planı ne kadar doğru yapılırsa yapılsın binanın deprem esnasında hasar almasının nedenleri arasında kullanılan malzemenin niteliği gelmektedir. Depreme dayanıklı, kaliteli ve nitelikli malzeme kullanımı, binanın deprem esnasında davranışına doğrudan etki eder.

Ayrıca yapıların deprem anında hasar almasına etki eden en önemli faktörlerden biri de işçilik hatalarıdır. Yapı tasarımı ne kadar iyi olursa olsun malzeme ve işçilik hataları deprem hasarları için çok önemli olmaktadır (Özdemir & Karataş, 2024).

Ülkemiz deprem kuşağında olduğundan dolayı yapıların mimari tasarım sürecinden uygulanmasına kadar deprem düşünülerek yapılması bu bağlamda tüm teknik elemanlar gibi mimarların ve mimarlığın üzerine düşen sorumluluğu alarak bina tasarıma başlamaları ve sonuna kadar bunu takip etmeleri gerekmektedir.

Bu bağlamda 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş merkezli 7.7 ve 7.6 şiddetindeki depremler on ili etkilemiştir. Deprem sonrası hasar gören veya yıkılan binaların yeniden yapılandırılmasında tasarlama ve yapım süreçlerinde depreme hazırlıklı ve dayanıklı yapılar oluşturmak için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'ne bakılmalıdır. Ayrıca bu yönetmeliğin belirttiği tüm kurallar uygulanmalıdır. İçinde mimarların da olduğu farklı meslek gruplarının bir arada ve uyum içinde çalışmaları gerekmektedir. Ülkemizde Kahramanmaraş gibi merkez üssü olan ve fay hattı üzerinde birçok yerleşim bulunmakta bu yüzden bina tasarımlarda olası durumlar göz önünde bulundurulmalı ve bu doğrultuda uygulamalar yapılmalıdır. Şehirlerin yapılaşması bu doğrultuda yeniden inşa edilmelidir ki depremlerden bu denli yıkıcı bir sonuçla karşılaşılmamalıdır.

Bu çalışma, Gölbaşı özelinde deprem sonrası yapı hasarlarının anlaşılmasına katkıda bulunarak, benzer bölgelerdeki yapıların güçlendirilmesi ve yeni yapıların tasarımına yönelik önemli veriler sağlayabilir. Sonuçların, yapı mühendisliği ve mimarlık alanında yol gösterici olması, depreme dayanıklı yapı tasarımlarının teşvik edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, yerel yönetimlerin ve planlayıcıların, deprem sonrası iyileştirme süreçlerinde daha bilinçli kararlar almasına katkıda bulunabilir. Gölbaşı'nda tespit edilen hasarların benzer bölgelerde de yaşanabileceği göz önüne alındığında, ulusal düzeyde yapı tasarım standartlarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Zemin etüdü uygulamalarının her bölgede zorunlu hale getirilmesi, gelecekteki yapı projelerinde riskleri azaltacaktır. Özellikle sıvılaşma riski taşıyan zeminlerde, yapıların temellerinin güçlendirilmesi önemlidir.

Yeni yapıların tasarımında güncel deprem yönetmeliklerine uygunluğun sağlanması, maliyetlerin yanı sıra güvenliği de artıracaktır. Mimarlık öğrencileri ve profesyonel mimarlar için, yapı hasarlarının önlenmesine yönelik eğitim programları ve seminerler düzenlenmeli sektördeki bilgi eksikliğini giderilmelidir. Elde edilen bulgulara dayanarak, yerel yönetimlerin deprem risk yönetimi stratejilerini güçlendirmesi gerekmektedir. Risk azaltma planlarının oluşturulması ve bu planların düzenli olarak güncellenmesi, eski ve hasarlı yapıların yerine depreme dayanıklı binaların inşa edilmesi için kentsel dönüşüm projeleri geliştirilebilir Yapı denetim süreçlerinin daha sıkı hale getirilmesi ve denetimlerin bağımsız bir otorite tarafından yapılması, yapıların güvenliğini artırabilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde ulaşım için gerekli desteği sağlayan Mardin Artuklu Üniversitesi'ne, Gölbaşı'nda yerinde inceleme yaparken bize eşlik eden Gölbaşı Belediyesi İmar ve Şehircilik, Fen İşleri Müdürlüğü ve AFAD ekibi çalışanlarına teşekkür ederim.

Kaynaklar

Akçaer, G., Özdemir N. B., & Soyluk A. (2015, 15–16 Ekim). *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Eğitimi ve Mimarlık* [Bildiri Sunumu]. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, Türkiye.

Akıncıtürk, N. (2003). Yapı Tasarımında Mimarın Deprem Bilinci. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *8*(1), 190–201.

Ayyıldız Potur, A., & Haşim, M. (2021). Mimarlık Eğitiminde Depremin Yeri ve Depremin Eğitsel Boyutu: Küresel Gündem ve Türkiye Bağlamı Üzerine Bir Değerlendirme, *Megaron Dergisi, 16*(2), 223–254.

Akbulut, M. T., & Aytuğ, A. (2005). Deprem Hasar Görebilirlik Riskinin Gözleme Dayalı Belirlenmesine Yönelik Öneri Değerlendirme Yaklaşımı. *YTU Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *1*(1), 88–98.

Bingöl, K., Er Akan, A., Örmecioğlu, H. T., & Er, A. (2020). Depreme Dayanıklı Mimari Tasarımda Yapay Zekâ Uygulamaları: Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Yöntemi ile Düzensiz Taşıyıcı Sistem Tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35*(4), 2197–2210. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.647981

Çatal, H. H. (2019, 19–21 Nisan). *Deprem nedeniyle binalarda oluşan hasarlar* [Bildiri Sunumu]. 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (Engineering and Natural Sciences), Ankara, Türkiye.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018, 18 Mart). *Resmi Gazete* (Sayı: 30364 (Mükerrer)). https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm

Kamal, M., Çaycı, B. T., & İnel, M. (2018). Düşük ve orta yükseklikteki binalarda çekiçleme etkisi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B– Teorik Bilimler, 6*, 141–151.

Kol Arslan, H. D., Yaldız, E., & Arslan, M. H. (2005, 23–25 Mart). *Yapının Deprem Dayanımında Yeni İnşa Tekniklerinin Önemi* [Bildiri Sunumu]. Kocaeli Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye.

Lafsözlük. (2024). *Adıyaman ili nereye bağlıdır?* https://www.lafsozluk.com/2009/01/golbasi-neredir-nereye-baglidir.html

Özdemir, I., & Karataş, N. (2024). Deprem Anında Yapıların Hasar Almasına Etki Eden Mimari Ölçekli Faktörler ve Yunuskent Sitesi Örneklemi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, *6*(1), 1–29. https://doi.org/10.46464/tdad.1290795

Özen, R. S., Korkmaz, S. Z., & Ecemiş, A. S. (2021). Mimari ve Strüktür Tasarım İlişkisinde Tekrarlanan Hatalar: 2020 İzmir Depremi İzlenimleri, *EGE Mimarlık*, *2*(110), 70–77.

Özen, R. S. (2018). *Mimari Tasarımda Betonarme Yapıların Türk Deprem Yönetmeliği Açısından Taşıyıcı Sistem Düzensizliğinin Değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Özkul, B., & Çivici, F. (2018, 13–15 Aralık). *Betonarme binalarda yapısal düzensizlikler ve deprem tehlikesi* [Konferans Sunumu]. 2. Uluslararası Farkındalık Konferansı, Çanakkale, Türkiye.

Özkul, B., & Karaman, A. E. (2007, 5–7 Aralık). *Doğal afetler için risk yönetimi* [Bildiri Sunumu]. *TMMOB Afet Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.

Solak, A. (2022). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımının İnşaat Mühendisliği ve Mimarlık Eğitimindeki Yeri ve Önemi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *38*, 76–87. https://doi.org/10.31590/ejosat.1091518

Sürer, A. G., & Meydan, A. (2020, 16–18 Aralık). *Kentsel dönüşüm projelerinin deprem üzerindeki rolü* [Bildiri Sunumu]. II. Uluslararası Kapadokya Sosyal Bilimler Öğrenci Kongresi, Nevşehir, Türkiye.

Tanrıverdi, B., Orhan O., & Tekin, S. (2021). Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Adıyaman Gölbaşı-Adıyaman Merkez Arasının Heyelan Duyarlılık Değerlendirmesi*, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *36*(3), 701–708.

Telli, B. (2018). Yer Adları Üzerine Bir Değerlendirme: Adıyaman İli Gölbaşı İlçesi Örneği. *Journal of Turkish Studies*, *13*(12), 507–526. https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.13694

Tezcan, S., (1998). *Depreme Dayanıklı Tasarım İçin Bir Mimarın Seyir Defteri*. Türkiye Deprem Vakfı Yayınları.

Yılmaz, S. (2024). Kâgir Yığma Binalarda Mimari Tasarım Hataları: Elâzığ ve Kahramanmaraş Depremleri Saha Gözlemleri. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *14*(1), 336–352. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1387365

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 70–88, DOI: 10.21324/dacd.1472796

Investigating Stability Problems in Solid Waste Landfills

Gökçe Buse Güner Karaca[1], Şeyma Ordu[2], Ertuğrul Ordu[1,*]

[1]*Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu, Tekirdağ.*
[2]*Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 59860, Çorlu, Tekirdağ.*

Abstract

One of today's most pressing environmental issues is related to waste disposal, especially landfilling. The quality of groundwater has been seriously compromised due to improper storage methods. Problems related to human health and environmental pollution are more common in open dumps. These irregular disposal sites cause many disadvantages and serious health problems. For this reason, cases that caused slope failures in landfills have been examined. This study investigates stability issues related to solid waste landfills, focusing on the assessment of waste stability. The study includes analyses of slope failure cases in various landfills: Hekimbasi, Dona Juana, Gnojna Grora, Hiriya, Payatas, and Xerolakka. Using Plaxis 2D software, the data obtained from these analyses have been rigorously evaluated to determine the most appropriate landfill management strategies. Slope collapses in landfills are generally caused by unsuitable landfill design, lack of daily cover laying and waste compaction, inadequate waste segregation, insufficient leachate drainage and gas discharge, and excessive slope angle and height. The presence of one or more of these conditions can result in a decline in site stability. Instabilities are experienced in these areas where engineering controls are inadequate.

Keywords
Landfill, Slope Stabilitiy, Slope Failure, Back Analysis, Finite Elements Method

Katı Atık Depolama Sahalarındaki Stabilite Sorunlarının Araştırılması

Özet

Günümüzün en acil çevresel sorunlarından biri, atıkların bertarafı, özellikle de düzenli depolama ile ilgilidir. Yanlış depolama yöntemleri nedeniyle yeraltı sularının kalitesi ciddi şekilde tehlikeye girmiştir. Vahşi depolama sahalarında insan sağlığı ve çevre kirliliğiyle ilgili problemler daha yaygındır. Bu düzensiz depolama sahaları birçok dezavantaja ve ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu sebeple, daha önce depolama sahalarında meydana gelen şev göçmelerine neden olan vakalar incelenmiştir. Bu çalışmada, atık stabilitesinin değerlendirilmesine odaklanarak katı atık depolama alanlarıyla ilgili stabilite sorunları araştırılmaktadır. Çalışma, Hekimbaşı, Dona Juana, Gnojna Grora, Hiriya, Payatas ve Xerolakka gibi çeşitli düzenli depolama sahalarındaki şev göçmesi vakalarının analizini içermektedir. Plaxis 2D yazılımı kullanılarak, bu analizlerden elde edilen veriler titizlikle değerlendirilmiş ve en uygun düzenli depolama sahası yönetim stratejilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Düzenli depolama sahalarındaki şev göçmeleri genellikle uygun olmayan depolama sahası tasarımı, günlük örtü serme ve atık sıkıştırma eksikliği, yetersiz atık ayrıştırma, yetersiz sızıntı suyu drenajı ve gaz tahliyesi ile aşırı şev açısı ve yüksekliğinden kaynaklanmaktadır. Bu koşullardan bir veya daha fazlasının varlığı saha stabilitesinde kayba neden olabilir. Mühendislik kontrollerinin yetersiz olduğu bu sahalarda duraysızlıklar yaşanmaktadır.

Anahtar Sözcükler
Depolama Sahası, Şev Stabilitesi, Şev Göçmesi, Geri Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu

1. Introduction

The disposal of waste materials is recognized as posing significant environmental risks, with landfills being identified as a central concern. The stability of solid waste landfills is the focus of our research, with critical questions related to their long-term viability being addressed. Specifically, surface rupture incidents within selected landfills are explored, and advanced computational tools are employed for thorough analysis.

Accelerated urbanisation and population growth, coupled with advancements in technology and industrialisation, have intensified the impact of human activities on the global environment. The escalating trend of consumption has led to the generation of waste in quantities and with harmful contents that pose a significant threat to both the environment and human health (Kamer, 2018). One of the most pressing environmental challenges today is waste storage.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (282) 2502322 Faks: +90 (282) 2509924
E-posta: gokcebusekaraca@gmail.com (Karaca G.), sordu@nku.edu.tr (Ordu Ş.), eordu@nku.edu.tr (Ordu E.)

Gönderim Tarihi / Received : 25/04/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 10/10/2024

The landfilling of waste is an unavoidable element of all solid waste management systems. It is estimated that around 40% of solid waste worldwide is disposed of using sanitary landfills, while unregulated landfilling remains the primary disposal method in many developing or underdeveloped countries (Kaza et al., 2018).

The selection of an appropriate disposal method for solid waste is contingent upon the planning and management strategies employed. These encompass economic, engineering, land use, landscaping, geographical, and social factors (Kamer, 2018). Solid wastes are composed of numerous components, each with distinct characteristics. Pulat, in his study, encapsulated the challenges faced in determining the engineering properties of municipal solid wastes as follows (Pulat, 2014):

- The inconsistent and heterogeneous composition of municipal solid wastes results in a wide range of engineering parameter values.
- Obtaining samples that adequately represent the natural state of municipal solid waste in the land environment poses a significant challenge.
- The inconsistent and unstable state of solid waste particles complicates sampling and experimentation. Furthermore, there are no specialised standards that define the phases of sampling, sample preparation, and testing for these wastes.
- The characteristics of municipal solid waste vary with time, depth, and location.

The engineering properties of solid wastes, which include porosity, water content, unit volume weight, area capacity, strength, compressibility, and permeability, are outlined (Pulat, 2014).

One of the critical stability issues that may arise at solid waste sites is the stability of the excavated ground. The stability of the stored solid wastes has a direct impact on the stability of the landfill (Pulat, 2014).

This study analysed instances of slope failures in various landfills, including Hekimbasi Landfill (Turkey), Dona Juana Landfill (Colombia), Gnojna Grora Landfill (Poland), Hiriya Landfill (Israel), Payatas Landfill (Philippines), and Xerolakka Landfill (Greece). The back analysis method was employed to predict shear strength. These analyses were conducted using Plaxis 2D software. The data from these analyses were evaluated, and recommendations were made regarding the integration of the landfills.

In their research, Kocasoy and Curi reported that storage operations have been ongoing at the Ümraniye-Hekimbaşı Landfill since 1976. On a daily basis, an average of 1.500 to 2.000 tonnes of solid waste is deposited at the site. Interestingly, their study revealed that no compaction was performed during waste deposition (Kocasoy & Curi, 1995).

Merry et al. conducted an analysis of the Payatas landfill in the Philippines. On July 10, 2000, a slope failure led to the sliding of approximately 1.2 million cubic meters of waste. Remarkably, inadequate compaction during waste placement contributed to the formation of low-density waste (Merry et al., 2005).

In their comprehensive study, Sarihan and Stark meticulously analyzed case studies from Gnojna Grora, Istanbul, Hiriya, and Payatas Landfills. Through rigorous back analysis, they determined shear strength parameters and investigated slope failures. The results of these analyses were meticulously documented. Consequently, considering factors such as landfill location, waste composition, shear strength properties, slope geometry, and soil characteristics, it was concluded that reporting landfill case histories should explicitly address cavity pressure conditions (Sarihan & Stark, 2008).

Blight's investigation focused on six landfills that experienced slope failures spanning the years 1977 to 2005. These sites include Sarajevo (1977), Istanbul (1993), the Philippines (2000), Indonesia (2005), Colombia (1997), and South Africa (1997). Across all these instances, critical factors contributing to the failures were the absence of engineering controls, inadequate landfill design, and deficiencies in operational principles (Blight, 2008).

Caicedo et al. documented a significant event at the Dona Juana Site, where a staggering 800.000 tonnes of solid waste migrated. On September 27, 1997, the slope, with a steepness ratio of 3:1 and a height of 40 meters, experienced a collapse. Initially, the failure initiated in the front portion of Zone 2, but its impact extended throughout the entire waste mass. Caicedo's research attributes the collapse primarily to elevated pore water pressure (Caicedo et al., 2022).

In their study, Fernandez et al. reported that the Dona Juana Site exhibits a migration of 1.5 million tonnes and features a slope ratio of 4.7:1. The analysis led to the conclusion that the site's issues stem from elevated void pressures within the solid waste mass, exacerbated by its highly organic composition. Poorly designed leachate drainage and gas venting systems further contributed to the problem (Fernandez et al., 2005).

According to Athanasopoulos et al., the slope failure that occurred on December 29, 2010, had dimensions of 27 meters in height and 30 meters in width, containing 12.000 tonnes of waste mass. Through reconnaissance studies, field measurements, and stability analyses, it was determined that inadequate storage practices (such as insufficient compaction and daily soil cover), the steep slope of the waste mass, and the rising leachate due to rainfall contributed to the slope collapse rainfall (Athanasopoulos et al., 2013).

Xu et al.'s study documented a catastrophic slope failure on December 20, 2015, at the Hongao landfill site in Guangming New District, Shenzhen, China. The collapsed volume amounted to 2.32 million tonnes, while the pre-collapse volume stood at approximately 6.27 million tonnes. The displaced waste comprised a mixture of silty soil with a water content ranging from 17.3% to 42.4%, along with construction and demolition debris. The primary factors contributing to the slope failure were drainage system malfunction, the total waste volume exceeding design capacity, and elevated pore water pressure (Xu et al., 2017).

Lavigne et al. conducted an extensive investigation into a significant slope failure at the Leuwigajah landfill site in Bandung, Java, Indonesia. This catastrophic event occurred on 21 February 2005 following heavy rainfall. The researchers meticulously examined the collapse preconditions and triggering factors that contributed to this disaster. Additionally, they analyzed the internal structure of the source area to better understand the movement conditions (Lavigne et al., 2014). In a separate study, Fang et al. delved into the Qizishan landfill expansion project. Their focus was on assessing the stability of the landfill. They thoroughly examined the various factors that impact landfill stability (Fang et al., 2011).

2. Materials and Methods

2.1. Assessing Slope Instabilities

Slope stability plays a pivotal role in the field of geotechnical engineering. Analyzing slopes is crucial, especially in the context of natural disasters such as earthquakes, floods, and landslides. Ensuring stability has become a critical engineering challenge, as underscored by Kezer (Kezer, 2019).

One specific area where stability is paramount is in the design of landfills. The stability of a landfill directly impacts its safety and long-term performance. Engineers must carefully consider slope stability during the facility's planning and construction phases. Interestingly, even when dealing with waste materials that have lost their inherent strength and are prone to collapse, slope stability analyses remain applicable (Polat, 2019; Pulat & Yükselen Aksoy, 2017; Qian et al., 2002).

To better understand the causes of slope instabilities, Springman's work, as referenced in Tekin's study (Tekin, 2011), provides valuable insights. Table 1 summarizes these causes, shedding light on the factors that contribute to slope failures.

Table 1: Factors contributing to slope ınstabilities (Tekin, 2011)

1. Long-term effects that reduce stability	2. Short-term effects leading to loss of equilibrium
Change in the use or shape of natural or artificial slope,	Water saturation of the soils due to excessive rainfall, snowmelt, inoperability of surface drains,
Geology of the ground (presence of clay or marl type soils),	Seepage pressure, seasonal variations in groundwater levels
Stress history of the soils,	Earthquake loads or externally applied vibrations
Previous failures of the soil that has not been recognised at present,	Change in the loading condition due to a change in geometry or a new structure,
Slip surfaces formed in the soil due to very old tectonic movements,	Change in slope geometry.
The mechanism by which weathering leads to the formation of minerals different from the parent material and softer soils,	
Changes in the slope geometry due to erosion or changes in the internal structure due to water infiltration into the soil and material washout,	
Decrease in soil strength due to surface and groundwater,	
The presence of expansive soils.	

These factors play a crucial role in slope stability and require careful consideration in geoenvironmental engineering projects.

Stability calculation methods are categorized into three based on the shape of the slip plane, whether it is circular or wedge, the desired number of dimensions for analysis, and whether the calculation is done under static or dynamic loads. These methods include the Limit Equilibrium Method, Finite Element Method, and Seismic Analysis (Griffiths & Lane, 2021).

Limit equilibrium analyses have been widely used in solving geotechnical engineering problems for many years. It is assumed that the sliding occurs along a specific surface and the sliding mass is divided into either whole sections or slices. The stresses along the sliding surface are then compared to the shear strength. The Mohr-Coulomb stress criteria (Kezer, 2019; Akçakal, 2009) are employed to seek three main static equilibrium equations of the slope using these analysis methods.

There are three main types of limit equilibrium analyses commonly used in practice: the slice method, wedge method, and infinite slope method (Griffiths & Lane, 2021).

In Kezer's study, the slice method emerges as the predominant limit equilibrium technique for conducting stability assessments of slopes (Kezer, 2019). Widely embraced by geotechnical engineers, this method has spurred the development of numerous computer programs that yield dependable outcomes.

These software solutions facilitate seamless adjustments of shear surfaces, soil properties, and pore-water conditions essential for comprehensive analyses. The finite element method operates on the principle of segmenting a mass into uniform particles and establishing interconnectedness among them (Tekin, 2011).

By employing this methodology, each particle exerts a specific force on its adjacent counterparts, inducing movement. Although in actuality, all elements within a continuous system are interconnected through an infinite number of points, the finite element method simplifies this by assuming connectivity solely at designated nodes. Presently, computer software is extensively employed to conduct finite element analyses. These programs segment the soil into elements and execute computations to ascertain the relationships between them (Aykol, 2008).

In static analyses, gravity serves as the predominant force propelling slope movement. Nevertheless, seismic events introduce both vertical and horizontal accelerations that trigger internal forces within the slope. When performing seismic slope stability assessments, particular attention is paid to the horizontal earthquake acceleration, as it generally induces more severe conditions compared to vertical earthquake acceleration. In many instances, the influence of gravity helps counterbalance the effects of vertical earthquake acceleration (Griffiths & Lane, 2021).

As per the technical guidelines provided by the Environmental Protection Agency (EPA), the recommended factor of safety for slope stability typically ranges from 1.2 to 1.7. In Table 2, values outside the brackets correspond to static calculations, while those inside the brackets relate to calculations considering earthquake loads (Griffiths & Lane, 2021).

In the domain of geotechnical engineering, the assessment of slope stability is recognized as playing a crucial role in reducing the risks associated with natural disasters. Factors of safety (Fs) are provided as a quantitative measure of stability, and the research conducted by Griffiths & Lane (2021) is referred to for precise values.

Table 2: Coefficients of safety (Fs) for slope stability (Griffiths & Lane, 2021)

	The Uncertainty in Soil Strength Parameters	
Risk Assessment of Landslide Failures	Less	More
No danger to human life or the environment	1.25 (1.20)	1.50 (1.30)
Human life or environmental hazards	1.50(1.30)	>2.0(1.70)

In a slope, if the acceleration generated by the earthquake exceeds the yield acceleration of the calculated slope, a slope movement occurs along the plane (Griffiths & Lane, 2021).

When a slope fails, retrospective information can be obtained about the slope conditions at the time of failure. When slope stability is compromised, a safety factor of one (1.0) is obtained. Based on this information, the slope model at the time of collapse can be estimated to closely reflect reality using the appropriate analysis method (Akçakal, 2009; Coşkun, 2021). The location and type of boundary conditions in the model geometry are crucial. If the boundaries are too close to the area of interest, boundary effects may impact the modeling results (Natur, 2018). The following factors play a critical role in the success of a back analysis (Ün & Yıldız, 2021):

- Thorough analysis of the slope geometry both before and after the slope failure.
- Understanding the variations in groundwater levels is essential. In situations where additional loading impacts the slope mass beyond its self-weight, detailed data regarding this loading (distribution, magnitude) should be available.
- Incorporation of field assessments concerning the slope's failure mechanism.
- Selection of a stability analysis method that aligns with determining FS=1, considering the observed failure mechanism in the slope.

During back analysis, the safety factor at the time of collapse is typically assumed to be around “1”. The soil parameters derived from the calculations represent the weighted average shear strength parameters at the sliding surface. The pairs of “c-φ” (c: cohesion, φ: internal friction angle) that meet the condition Fs=1 (Fs: safety factor) are identified through trial and error within the slope model area. In cases where multiple collapses occur on different surfaces of the slope, distinct “c-φ” envelopes are established for various sections. These envelopes are graphed, and the shear strength parameters of the failure surface are determined at the point of intersection (Arıoğlu & Tokgöz, 2022).

3. Conclusions and Recommendations

3.1. Analysis

The Plaxis 2D program, which is based on the finite element method, was utilized for the analyses (Güner, 2022). Within the Plaxis program, the model type was set to "plane strain" prior to initiating the modeling process. This setting ensures that the analysis will be conducted in accordance with the slope geometry. To enhance the precision of the analysis, a 15-node model was chosen, thereby yielding a higher number of nodal points. The boundaries were defined based on the geometry to be created. Once the geometry was established, the input materials were assigned, and meshes were generated using the mesh command.

In the “Staged Construction” section, inputs for the analysis were created in stages, allowing for a safe and systematic analysis. The “Curve” section was used to generate graphs for determining the safety factor. Studies conducted on landfills composed of solid wastes have yielded a broad range of data. As a result, the geotechnical properties of the landfills analyzed in this study were sourced from existing literature (Güner, 2022; Seco e Pinto et al., 1999). In the literature, the modulus of elasticity of the material was found between 3,000 - 25,000 kN/m^2 when modelling solid wastes in the consolidation experiment (Aykol, 2008). Accordingly, the modulus of elasticity was taken as 10,000 kN/m^2 for solid wastes in model analyses using Plaxis (Güner, 2022). In addition, different values of the elastic modulus were also reported in the analyses and it was found that the impact on the safety number was small (Güner, 2022). Poisson's ratio values were found between 0.29 and 0.32 according to the literature (Laman et al., 1999; Akıncı et al., 2010). Accordingly, Poisson's ratio for solid wastes was taken as 0.29 in the model analyses using Plaxis (Güner, 2022). As with the modulus of elasticity, different values were also given for the Poisson's ratio in the analyses. However, it was found to have little effect on the safety factor (Güner, 2022). The engineering properties of these landfills are detailed in Table 3.

Table 3: Engineering properties of landfills composed of solid wastes

Landfill Sites	Hekimbasi	Dona Juana	Gnojna Grora	Payatas	Hiriya	Xerolakka
Unit volume weight, γ (kN/m^3)	11	11	17	12	9	12
Modulus of elasticity, E (kN/m^2)	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Poisson 's ratio, v	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29

The slope geometry of the Hekimbasi landfill was modelled and analysed using the Plaxis (2D CE V20) software, as depicted in Figure 1. The landfill’s slope height and angle were measured to be 45 m and 45 degrees, respectively. During the mesh creation process for the modelled landfill, the “Mesh-Medium” option was selected, resulting in a model comprising 262 elements and 2263 nodes. The analysis phase was subsequently carried out, and the resulting deformations were analysed, as shown in Figure 2. When the cohesion value of the waste was set to 0 and the internal friction angle was set to 30º (c=0, ϕ= 30º), the total displacement amounted to 40.09 m. As a result of the analyses performed at the landfill, it was determined that the maximum shear stress was 598.1 kN/m² and the average principal stress was 738.8 kN/m² (Figure 2 and Figure 3). In the event of a slope collapse, a back analysis was performed to retrospectively obtain information about the conditions at the time of the collapse. The safety factor at the time of slope failure is assumed to be 1.0, thereby providing retrospective data on slope conditions and creating a model of the slope at the time of collapse. When the cohesion value of the solid waste was 0 and the internal friction angle was 30º, the safety factor was calculated to be 1.035, as shown in Figure 4. The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 5. These conditions closely resemble those of the slope at the time of collapse.

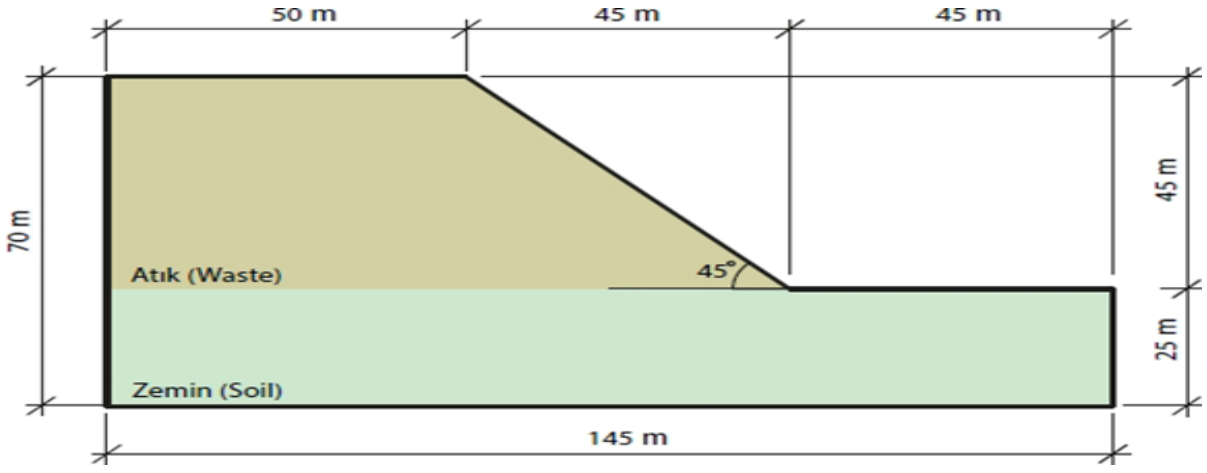


Figure 1: Depiction of the slope geometry of the Hekimbasi landfill

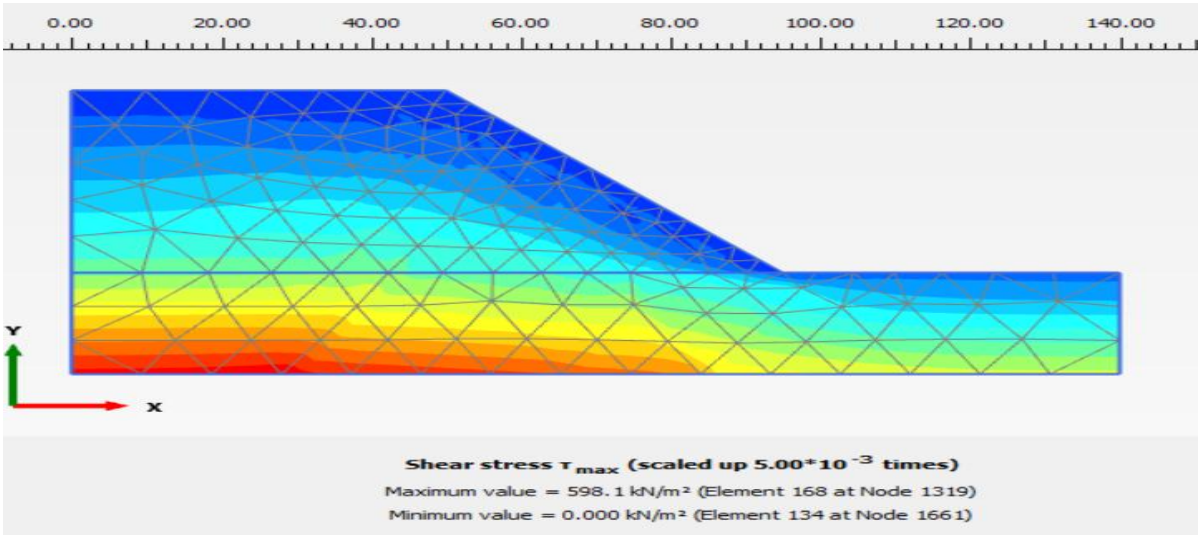


Figure 2: Illustration of the maximum shear stress at the Hekimbasi landfill

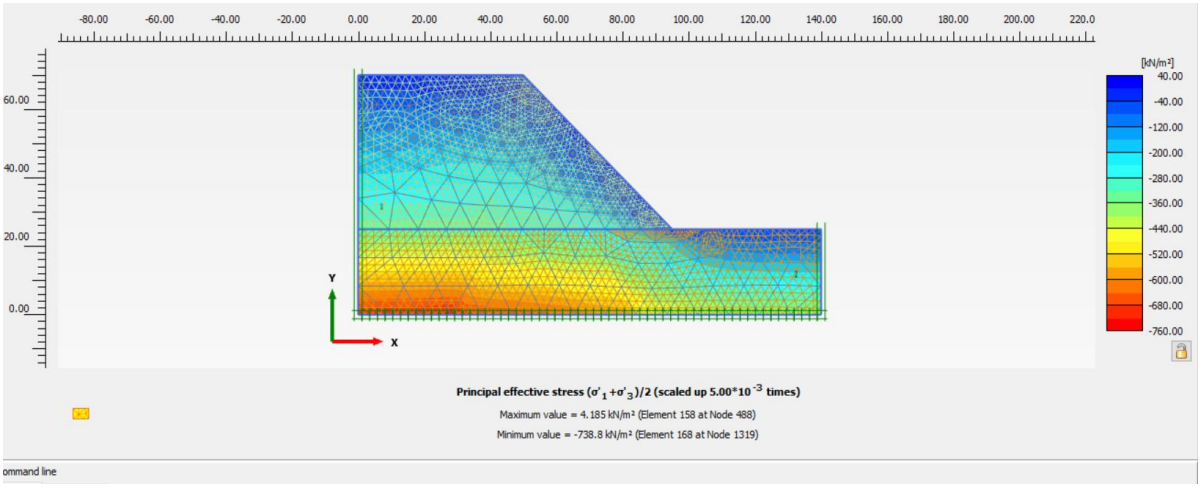


Figure 3: Illustration of the average principal stress at the Hekimbasi landfill

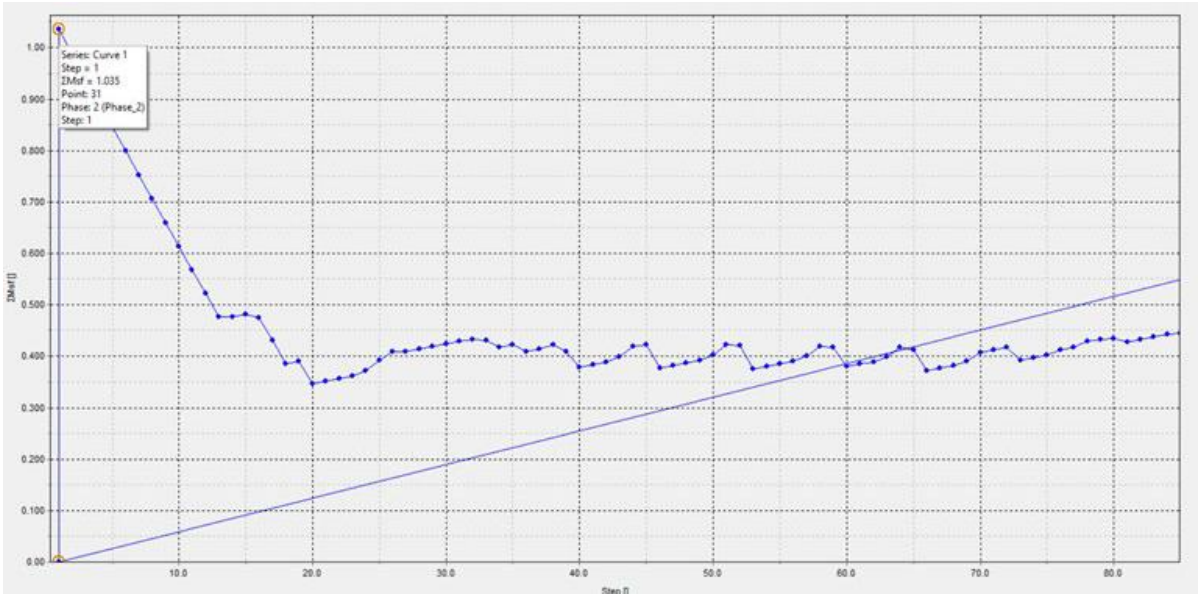


Figure 4: Diagram of the safety number of the Hekimbasi landfill in Plaxis

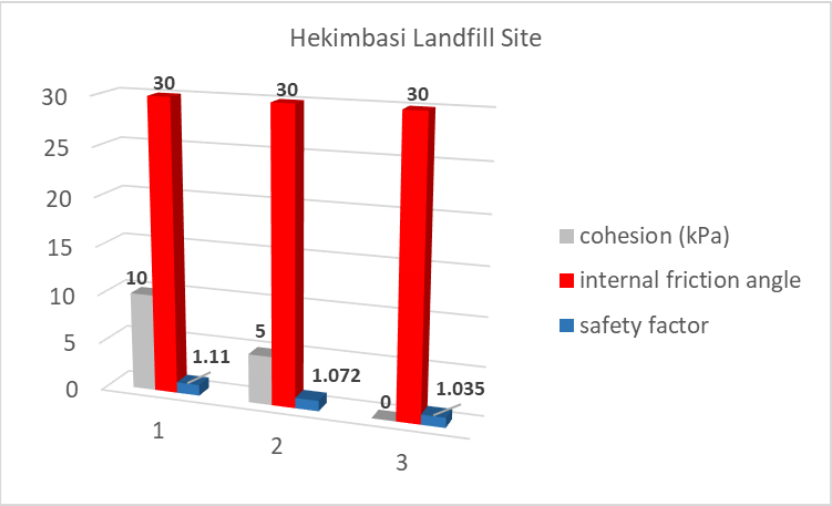


Figure 5: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Hekimbasi landfill

The Dona Juana landfill was modelled and analysed using the Plaxis (2D CE V20) software. The slope geometry of the landfill is depicted in Figure 6, with a slope height of 40 m and a slope angle of 18º. During the mesh creation process in the modelled landfill, the "Mesh-Medium" option was selected, resulting in a model comprising 130 elements and 1137 nodes. Following the analysis, the deformations were examined. When the cohesion value of the waste was set to 0 and the internal friction angle was set to 28º (c=0, ϕ= 28º), the total displacement amounted to 309.2 m (Figure 7). Finite element analyses performed in the storage area showed that the maximum shear stress was 706.8 kN/m² and the average principal stress was 849 kN/m² (Figure 7 and Figure 8). When the safety factor is 1.0, retrospective information about the slope conditions is obtained. In the scenario where the cohesion value of the solid waste in the landfill modelled in Plaxis is 0 and the internal friction angle is 28º, the safety factor is calculated to be 1.109 (Figure 9). The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 10.

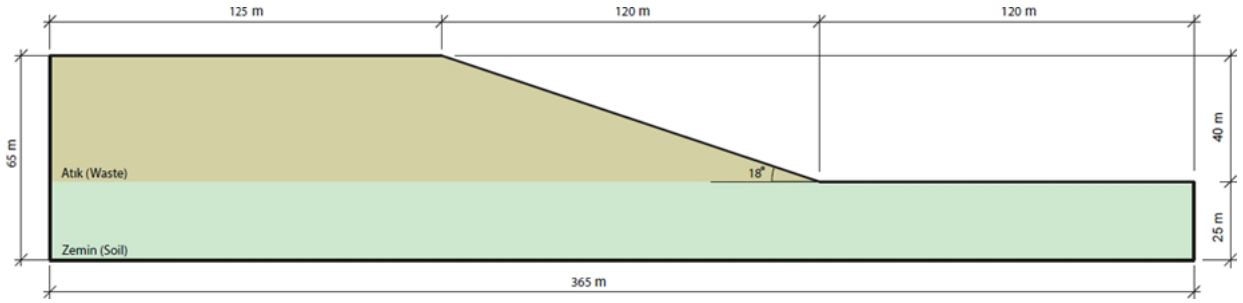


Figure 6: Depiction of the slope geometry of the Dona Juana landfill

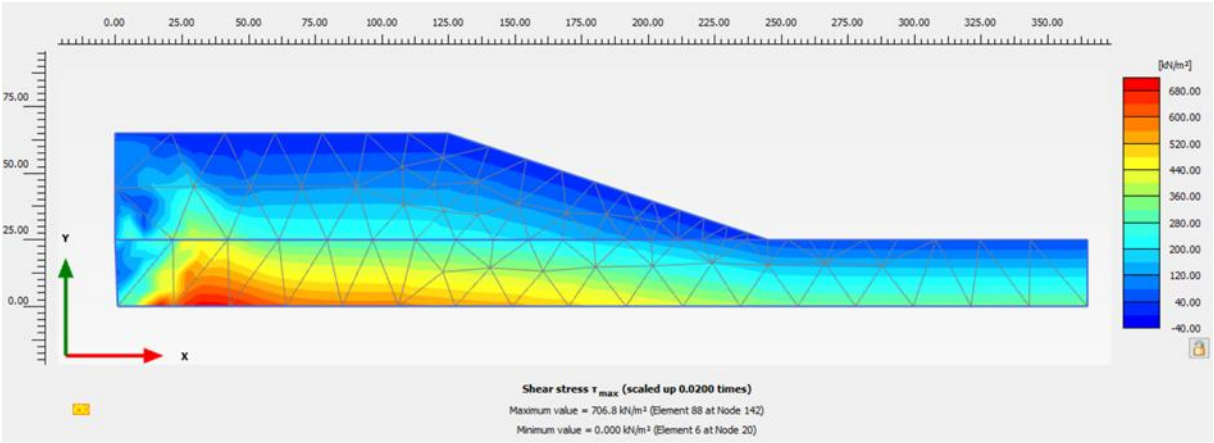


Figure 7: Illustration of the maximum shear stress at the Dona Juana landfill

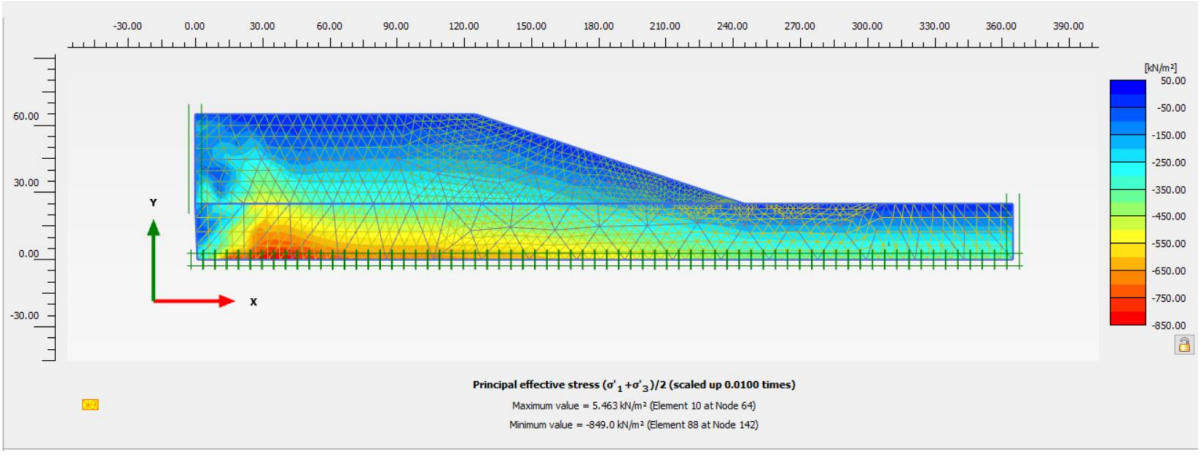


Figure 8: Illustration of the average principal stress at the Dona Juana landfill

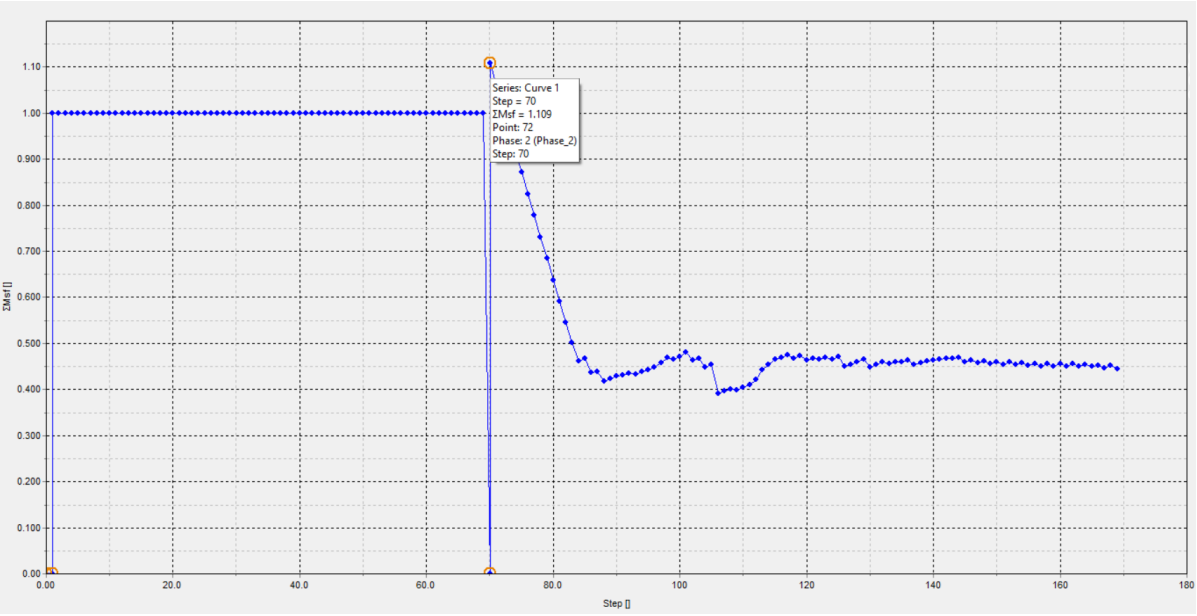


Figure 9: Diagram of the safety number of the Dona Juana landfill in Plaxis

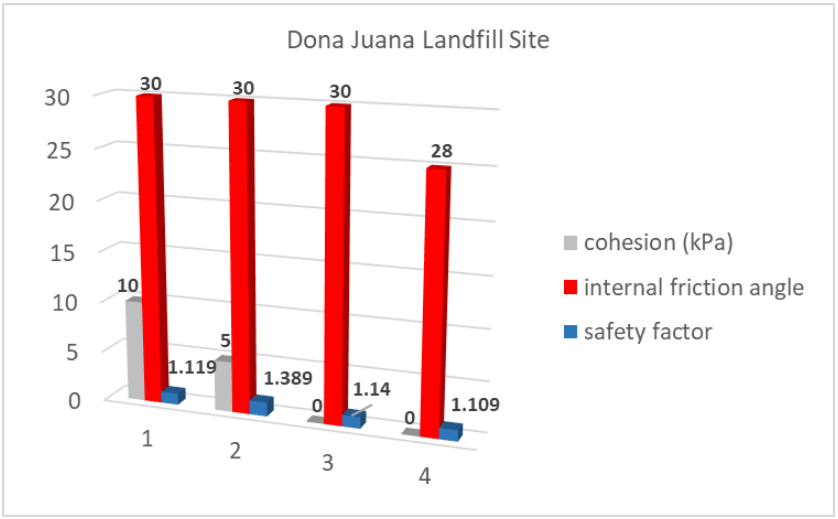


Figure 10: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Dona Juana landfill

The Gnojna Grora landfill site was analyzed using Plaxis (2D CE V20) software to assess the slope stability. The landfill's slope geometry, with a height of 26 m and an angle of 30º, is depicted in Figure 11. Specifically, the slope stability analyses focused on the 1st zone of the landfill, which had steeper slopes. During the modeling process, a "Mesh-Medium" was selected, resulting in 175 elements and 1499 nodes. The deformations in the landfill were examined (Figure 12), revealing a total displacement of 23.09 m at the 239th node (66 elements) when the waste's cohesion value was 0 and the internal friction angle was 21º (Figure 12). The analyses revealed that the maximum shear stress at the landfill was 390.1 kN/m² and the average principal stress was 549.6 kN/m² (Figure 12 and Figure 13). When the cohesion value of the waste was set to 0 and the internal friction angle to 21º, the safety number was calculated to be 1.107 (Figure 14). The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 15.

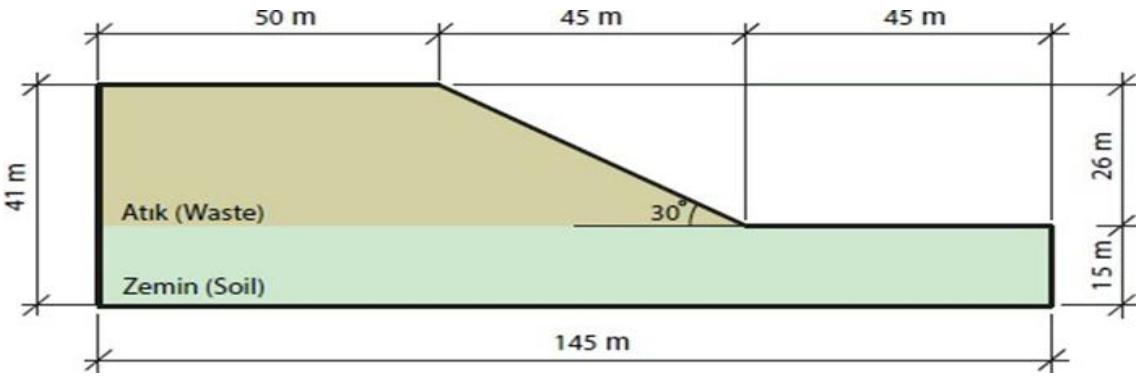


Figure 11: Depiction of the slope geometry of the Gnojna Grora landfill

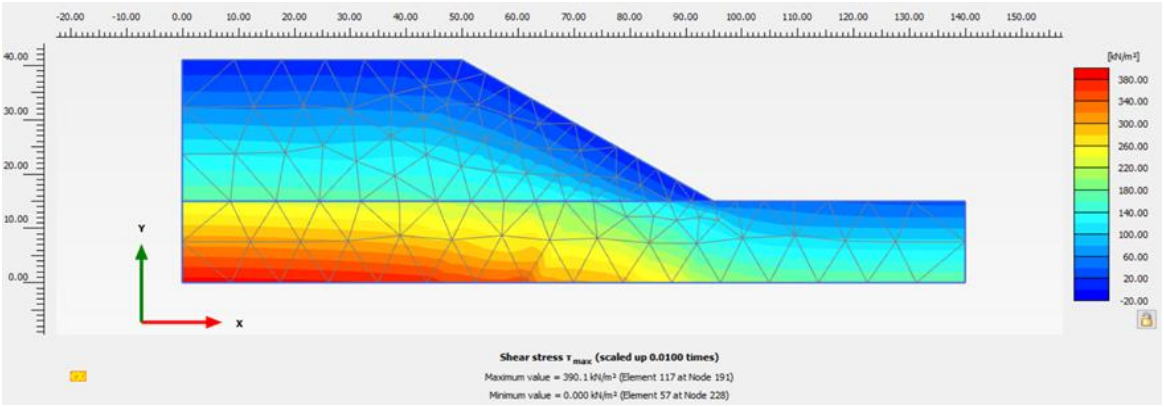


Figure 12: Illustration of the maximum shear stress at the Gnajna Grora landfill

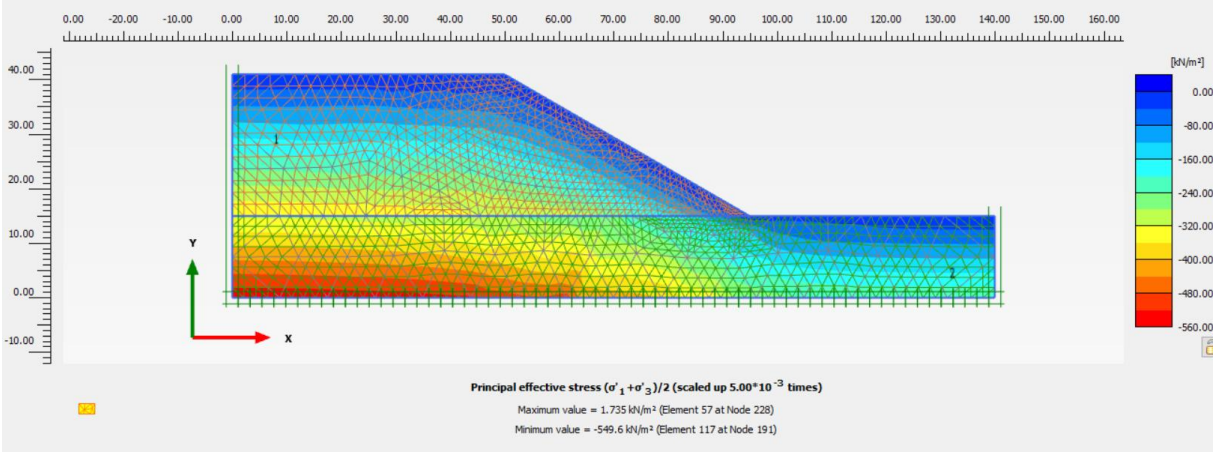


Figure 13: Illustration of the average principal stress at the Gnajna Grora landfill

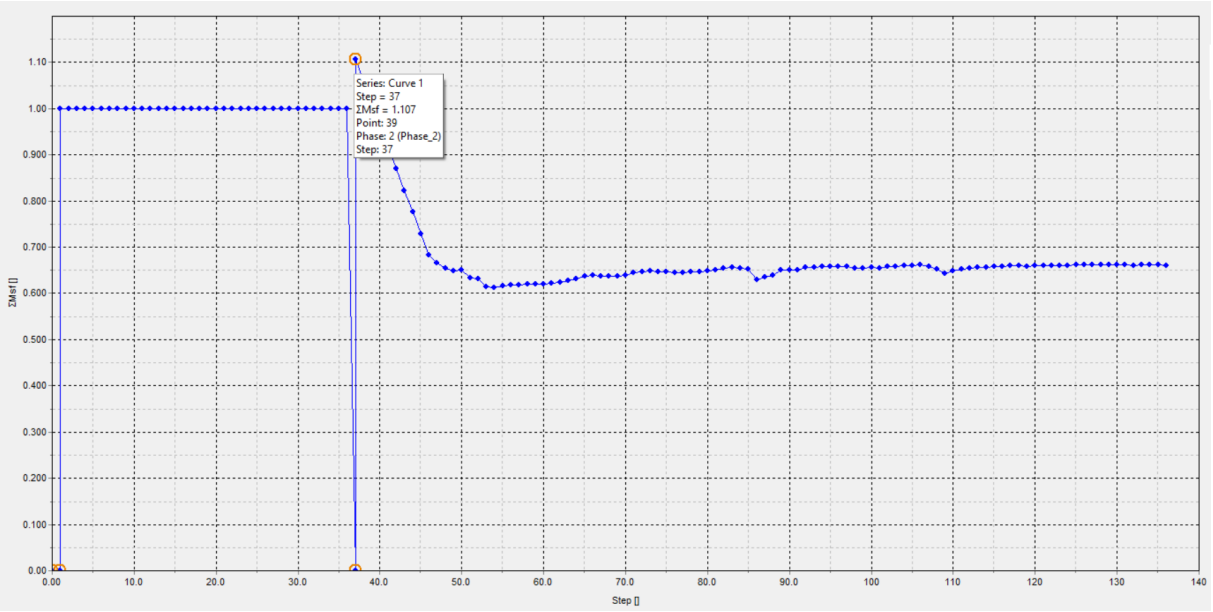


Figure 14: Diagram of the safety number of the Gnajna Grora landfill in Plaxis

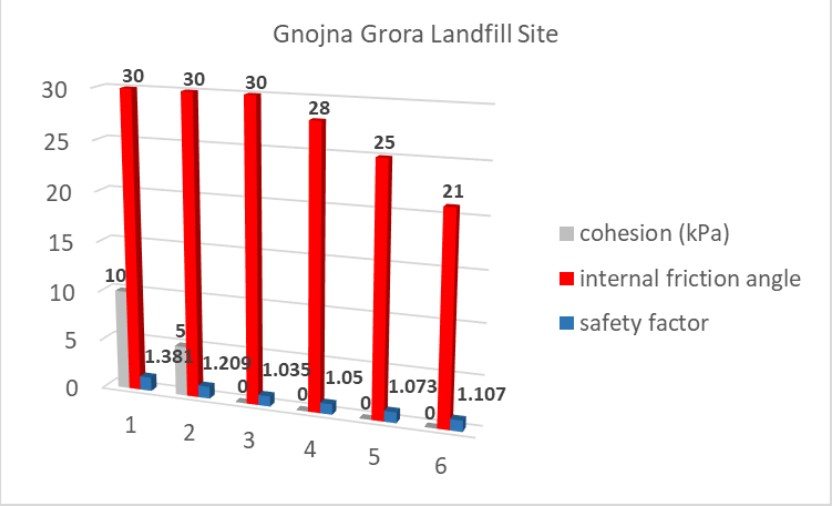


Figure 15: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Gnojna Grora landfill

The Payatas landfill site has been analyzed using Plaxis (2D CE V20) software. The slope at Payatas measures 33 meters in height with a 40-degree angle. The slope geometry of the Payatas landfill is illustrated in Figure 16. During the creation of the landfill model, "Mesh-Medium" was chosen, resulting in 225 elements and 1903 nodes. When the cohesion value of the waste is 0 and the internal friction angle is 28 degrees (c=0, ϕ= 28º), the total displacement is calculated to be 19.42 meters (Figure 17). The investigations conducted at the landfill showed that the maximum shear stress was 431.2 kN/m² and the average principal stress was 575.3 kN/m² (Figure 17 and Figure 18). Furthermore, in the case where the cohesion value of the solid waste in the landfill modeled in Plaxis 2D is 0 and the angle of internal friction is 28 degrees, the safety number is determined to be 1.05 (Figure 19). The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 20.

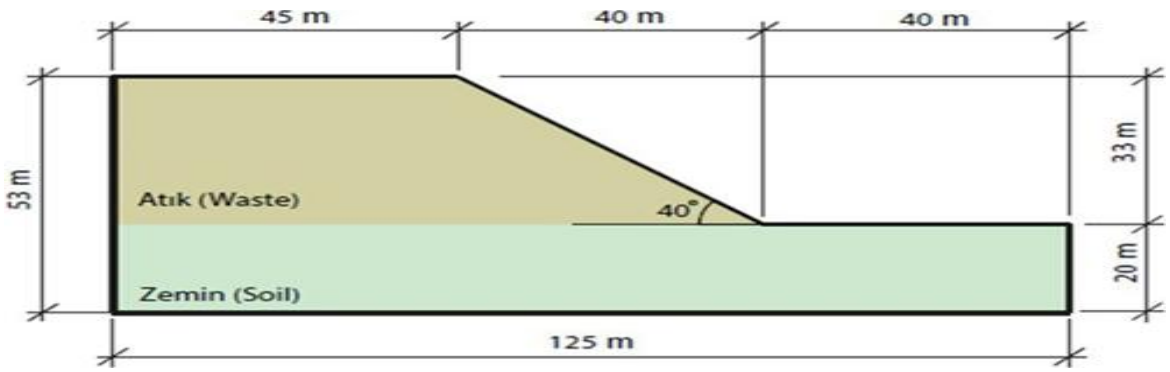


Figure 16: Depiction of the slope geometry of the Payatas landfill

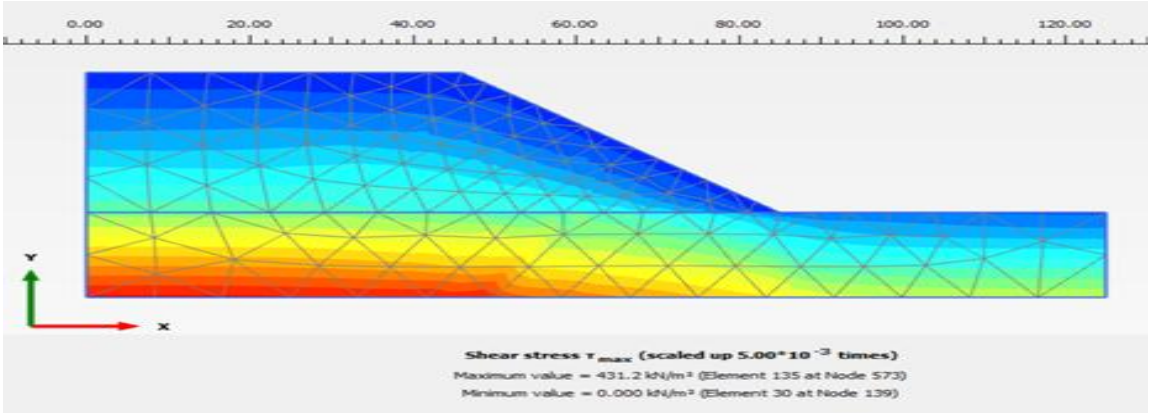


Figure 17: Illustration of the maximum shear stress at the Payatas landfill

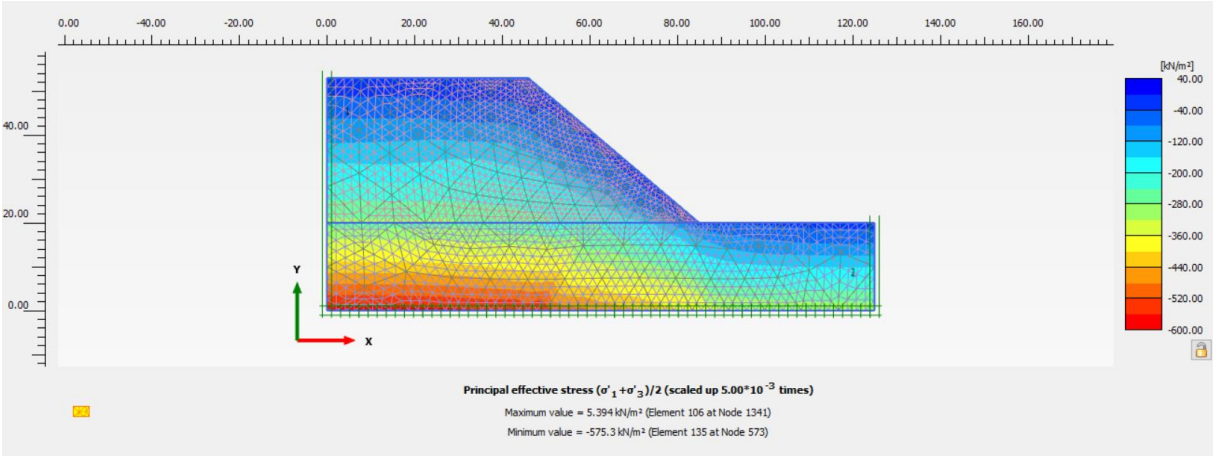


Figure 18: Illustration of the average principal stress at the Payatas landfill

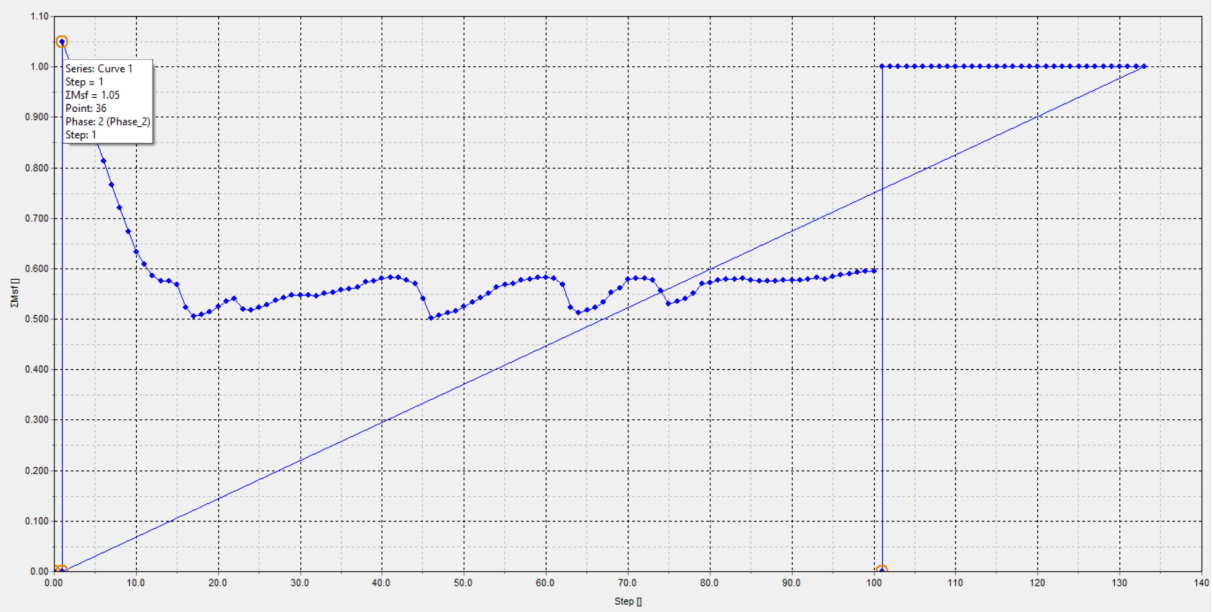


Figure 19: Diagram of the safety number of the Payatas landfill in Plaxis

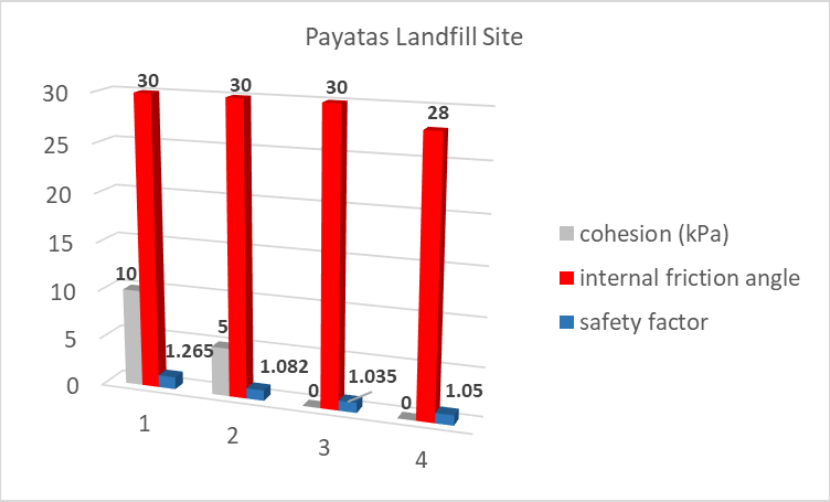


Figure 20: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Payatas landfill

The Plaxis (2D CE V20) program was utilized to conduct an analysis of the Hiriya landfill. The slope geometry of the landfill is illustrated in Figure 21. When designing the slope geometry, a height of 60 meters and an angle of 56 degrees were used. The "Mesh-Medium" option was chosen for creating a mesh in the simulated landfill, resulting in 265 elements and 2227 nodes. Subsequently, the analysis phase was executed, and deformations were examined as shown in Figure 22. With a waste cohesion value of 0 and an internal friction angle of 28 degrees (c=0, ϕ= 28º), the total displacement was determined to be 184.6 meters. The analyses revealed that the maximum shear stress at the landfill was 861.6 kN/m² and the average principal stress was 865.6 kN/m^2 (Figure 22 and Figure 23). Furthermore, with a waste cohesion value of 0 and an internal friction angle of 28 degrees, the safety number was calculated to be 1.05, as depicted in Figure 24. The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 25.

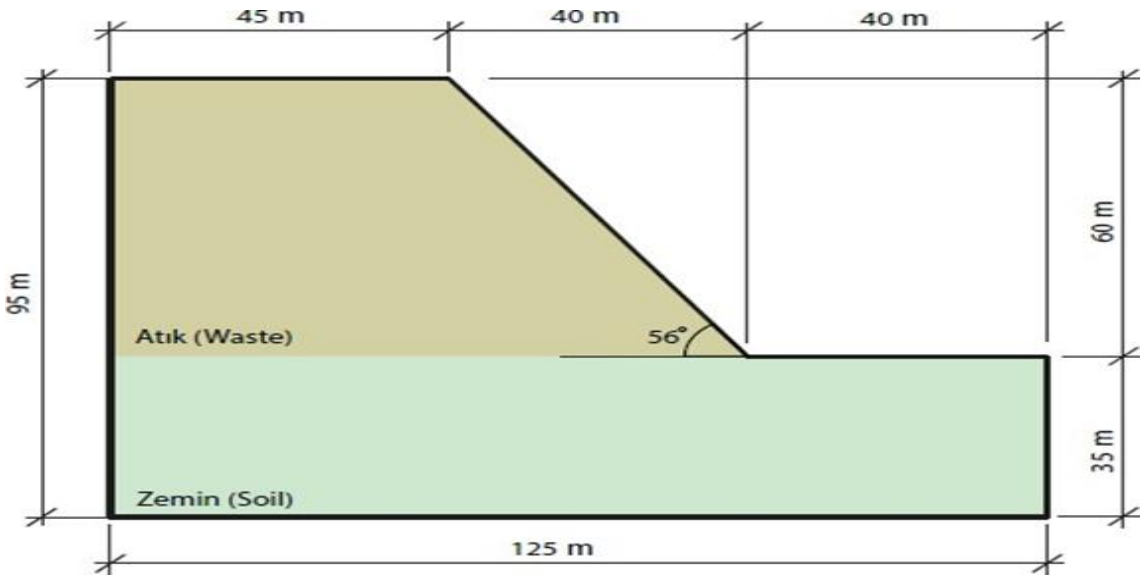


Figure 21: Depiction of the slope geometry of the Hiriya landfill

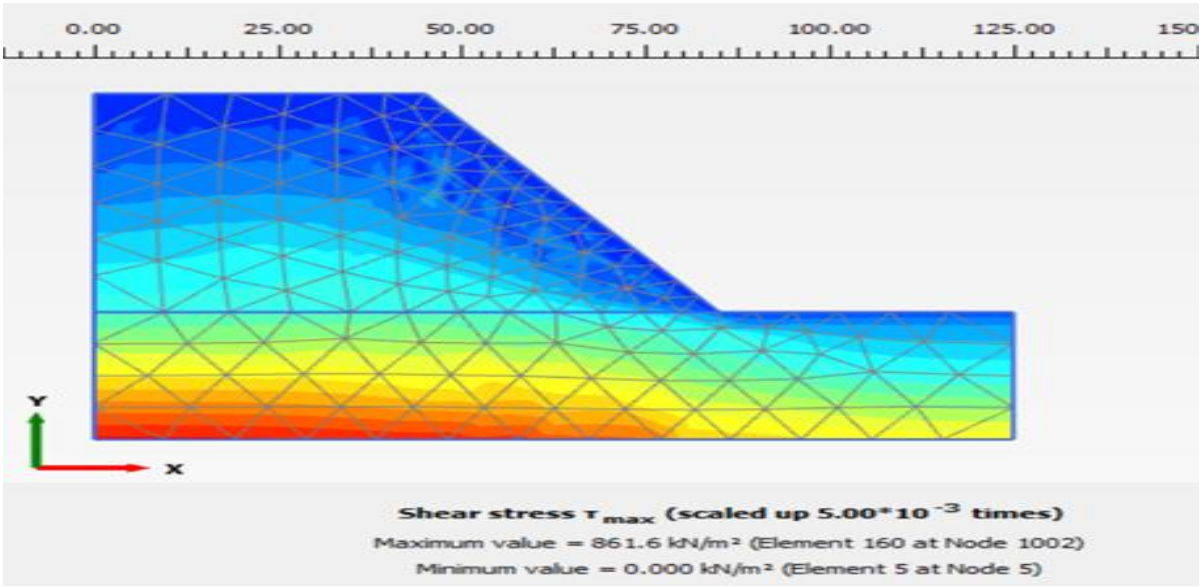


Figure 22: Illustration of the maximum shear stress at the Hiriya landfill

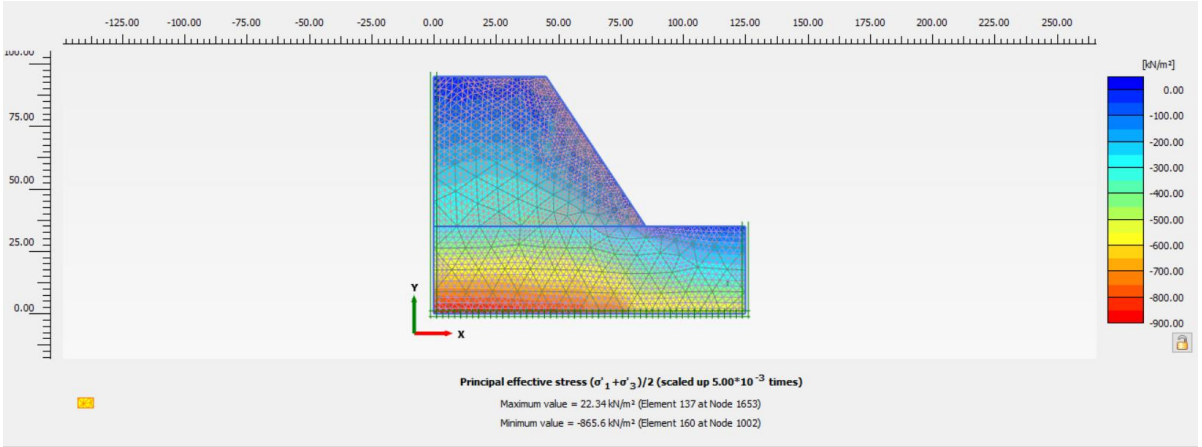


Figure 23: Illustration of the average principal stress at the Hiriya landfill

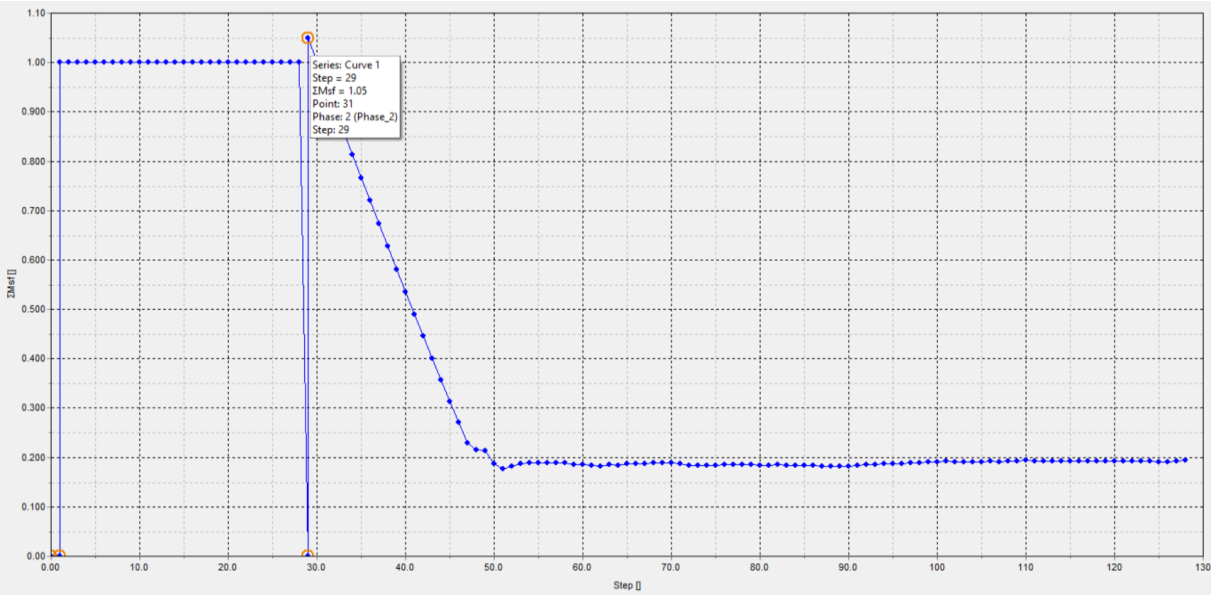


Figure 24: Diagram of the safety number of the Hiriya landfill in Plaxis

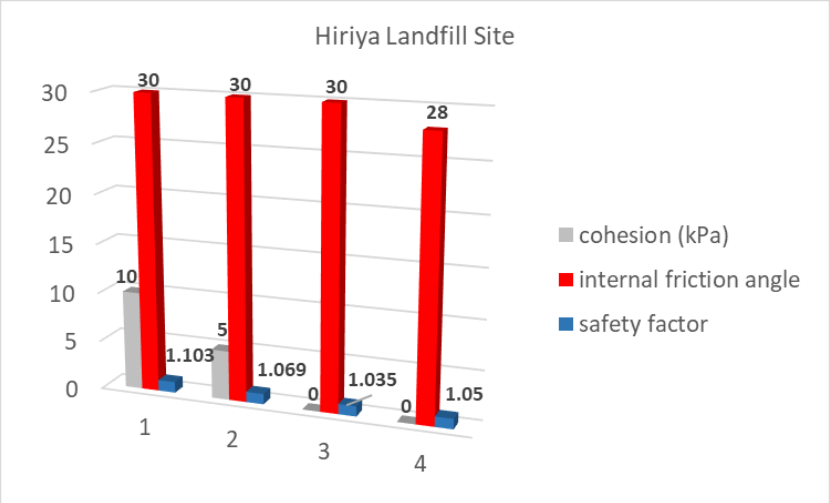


Figure 25: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Hiriya landfill

The analysis of the Xerolakka landfill was conducted using the Plaxis (2D CE V20) program. The geometry of the landfill slope is depicted in Figure 26. The landfill has a slope height of 42 m and an angle of 42 degrees. When creating a mesh in the modelled landfill, the "Mesh-Medium" option was chosen. This resulted in a mesh comprising 216 elements and 1829 nodes. Deformations in the analysed landfill were examined and are illustrated in Figure 27. When the cohesion value of the waste was set to 0 and the internal friction angle was set to 28 degrees (c=0, ϕ= 28 degrees), the total displacement amounted to 14.71 m. Following the examination of total displacements, shear stress was analysed. According to the analysis results, the maximum shear stress at the landfill was determined to be 365.4 kN/m² and the average principal stress was 455.3 kN/m² (Figure 27 and Figure 28). When the cohesion value of the solid waste in the Xerolakka landfill, as modelled in Plaxis 2D, is 0 and the internal friction angle is 28 degrees, the factor of safety is determined to be 1.05, as shown in Figure 29. The variation of the cohesion values, the internal friction angle and the safety factor of the model analyses performed are shown in Figure 30.

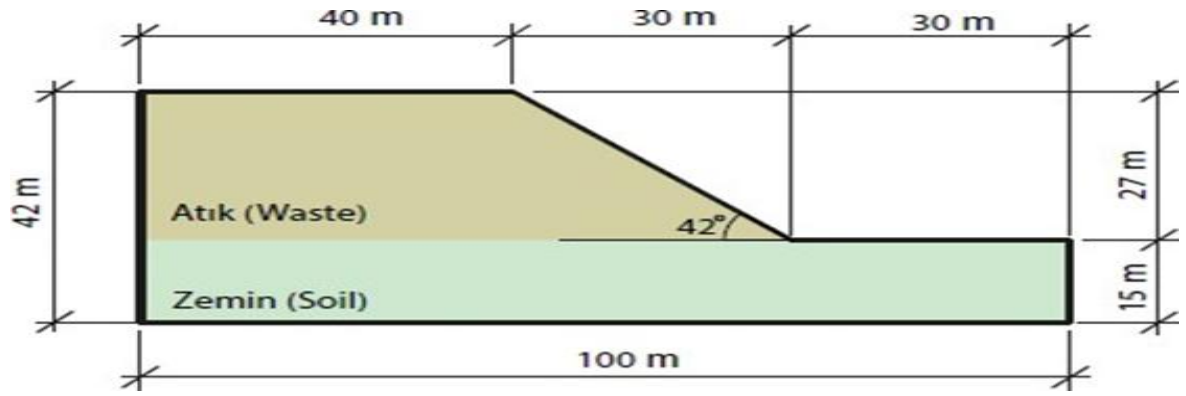


Figure 26: Depiction of the slope geometry of the Xerolakka landfill

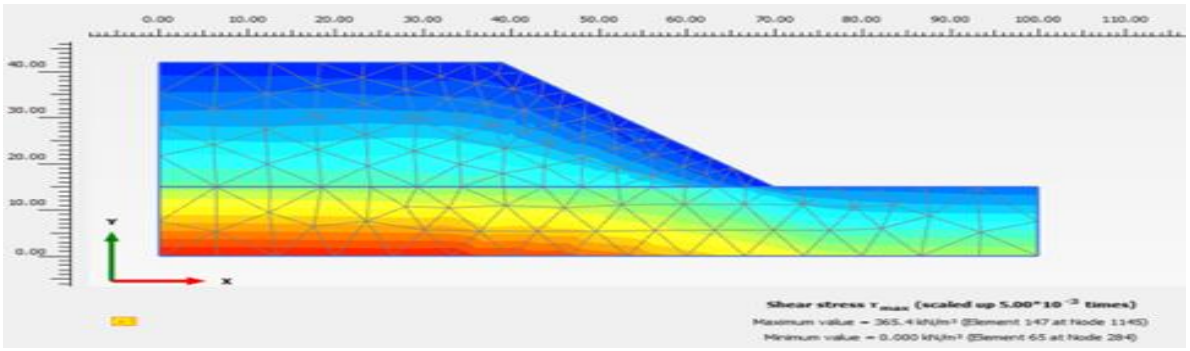


Figure 27: Illustration of the maximum shear stress at the Xerolakka landfill

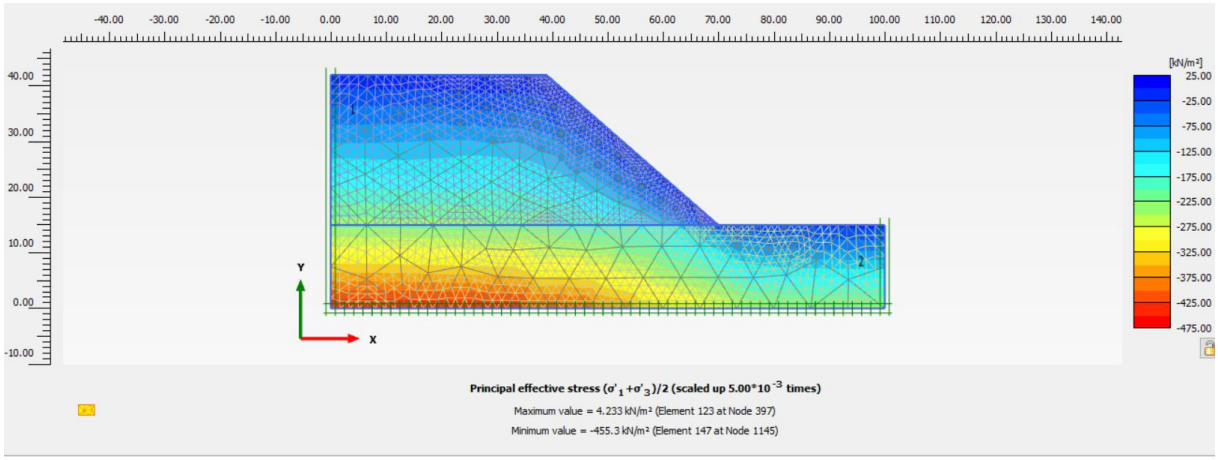


Figure 28: Illustration of the average principal stress at the Xerolakka landfill

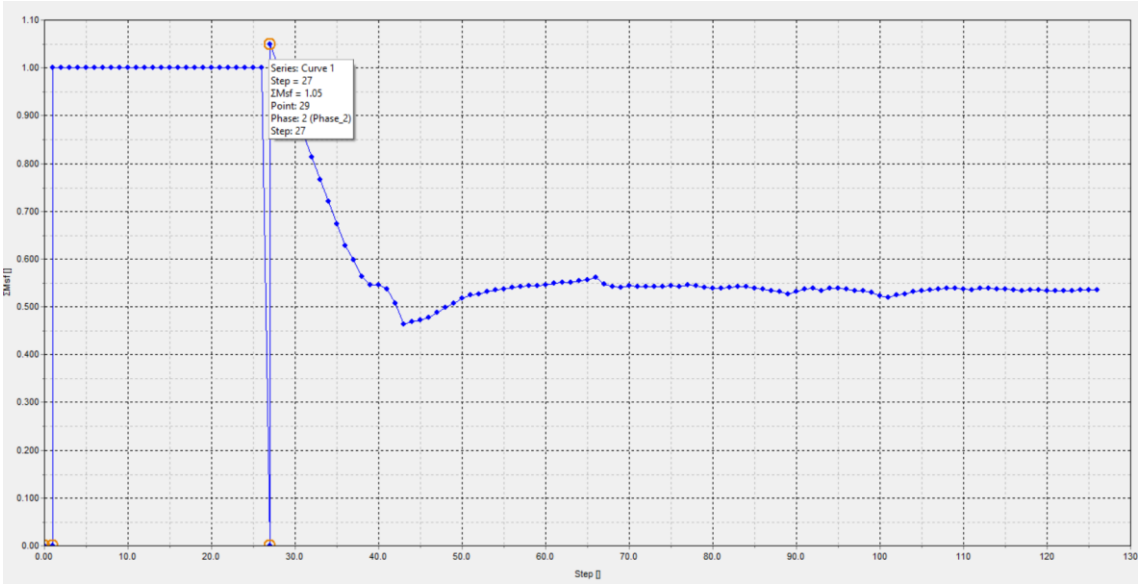


Figure 29: Diagram of the safety number of the Xerolakka landfill in Plaxis

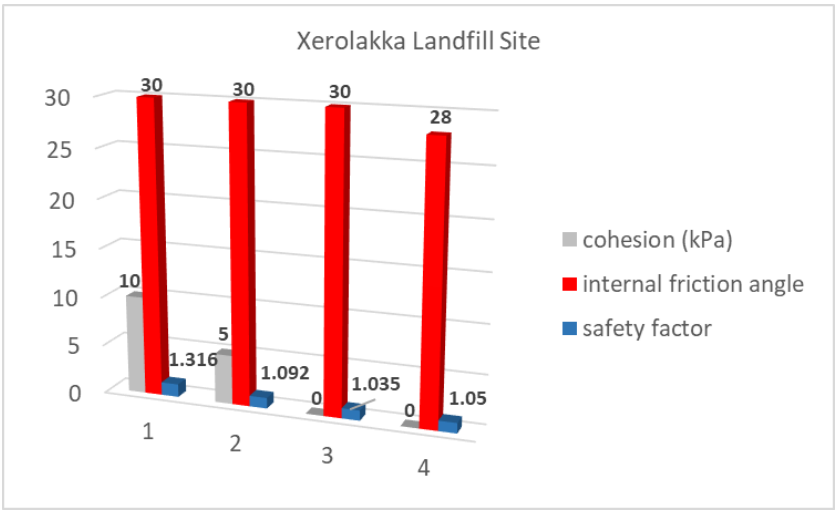


Figure 30: Safety factors as a function of cohesion and internal friction angle for the Xerolakka landfill

Table 4 presents the results of the landfill analyses, including shear stress, safety factor, and total displacement values obtained from the evaluated landfills.

Table 4: Results of landfill analyses

Landfill Site	Hekimbasi	Dona Juana	Gnoja Grora	Hiriya	Payatas	Xerolakka
Cohesion (kN/m^2)	0	0	0	0	0	0
Internal friction angle (^{0})	30	28	21	28	28	28
Total displacement (m)	40,09	309,2	23,09	184,6	19,42	14,71
Shear stress (kN/m^2)	598,1	706,8	390,1	861,6	431,2	365,4
Safety factors	1,035	1,109	1,107	1,05	1,05	1,05

In this study, the results of finite element analyses conducted for six irregular storage sites where collapse events occurred are presented. The maximum shear stress values (half the difference between the maximum and minimum principal stresses) and the average principal stress values (the average of the maximum and minimum principal stresses) shown in the figures are summarized collectively in Table 5. Using the maximum shear stress values and the average principal stress values, the maximum and minimum principal stress values for these six irregular storage sites were easily calculated.

Table 5: Stress and shear stress parameters in landfill areas

Landfill	Shear Stress Failure Value (kN/m²)	Average Normal Stress (kN/m²)	Maximum Principal Stress (kN/m²)	Minimum Principal Stress (kN/m²)
Hekimbaşı	598.1	738.8	1441.91	35.69
Dona Juana	706.8	849	1673.38	24.62
Gnojna Grora	390.1	549.6	1026.65	72.55
Hiriya	431.2	575.3	1093.64	56.96
Payatas	861.6	865.6	1830.43	-99.23
Xerolakka	365.4	455.3	886.03	24.57

These results indicate that the material in each landfill site is subjected to different stress conditions, significantly affecting its mechanical strength and deformation behavior. Therefore, stress analyses are critical parameters that must be considered in design and engineering processes to ensure the safe and long-term use of the material. Understanding how the material behaves under different stress conditions and how these conditions impact its strength is vital for designing safer and more durable structures.

3.2. Results

This study presents a comparative analysis of six distinct landfill sites: Hekimbasi, Dona Juana, Gnoja Grora, Hiriya, Payatas, and Xerolakka. The evaluation parameters for each site encompass cohesion, internal friction angle, total displacement, shear stress, and safety factors.

The landfill materials at all sites exhibit zero cohesion (kN/m²), indicating that the materials are granular with no inherent or natural binding property. The internal friction angle, a measure of the shear strength of the landfill material, varies across the sites. Gnoja Grora has the lowest value of 21º, suggesting that the material at this site is likely to shear or deform under less stress compared to the other sites, which have values around 28-30º.

In terms of total displacement (m), Dona Juana and Hiriya show significantly higher values (309.2 m and 184.6 m respectively) compared to the other sites. This could indicate more significant settlement or movement of the landfill mass at these sites, possibly due to factors such as load, composition of the waste, or underlying soil conditions.

The shear stress (kN/m²), a measure of the force that causes layers or parts to slide upon each other in opposite directions, also varies across the sites. Hiriya exhibits the highest shear stress of 861.6 kN/m², while Xerolakka shows the lowest at 365.4 kN/m². This suggests that the landfill material at Hiriya is subjected to higher forces that could lead to deformation or failure.

The safety factors for all sites are slightly above 1, indicating that the landfills are designed to withstand the applied stresses. However, these values are quite close to 1, suggesting that there may be little room for error or unexpected increases in stress.

While all the landfill sites share some common characteristics, there are notable differences in their geotechnical properties and behavior. These differences could have significant implications for the stability and long-term management of these sites. Further investigation and monitoring would be beneficial to understand the causes of these variations and to develop appropriate mitigation strategies.

The significant findings from the analysis are encapsulated in this section, and practical recommendations grounded in these insights are offered.

The selection of a suitable site is paramount in the establishment of solid waste landfills. It is vital that the selected site adheres to all relevant regulations prior to the installation of a storage facility. The main contributors to slope failures include deficiencies in engineering control, substandard landfill design, and a lack of comprehension of design principles and operation. Consequently, it is imperative that engineering controls are comprehensively implemented in line with the landfill design.

Several characteristics can lead to stability issues in municipal solid waste sites. These include the inhomogeneity of the solid waste, inconsistent compaction, differential settlement across the site, inherent instability of the garbage, and the development of pore water pressures.

Slope collapses in landfills are frequently caused by unsuitable landfill design, lack of daily cover laying and waste compaction, inadequate waste segregation, insufficient leachate drainage and gas discharge, and excessive slope angle and height. The presence of one or more of these conditions can result in a decline in site stability. In certain instances, adverse groundwater conditions and weather conditions can intensify these issues, leading to slope failures. This was particularly observed in the Hiriya and Payatas landfills.

It was observed that the impacts of groundwater elevation and slope angle on stability were not sufficiently considered in the landfill sites. Additionally, it is essential to collect and remove any leachate that may occur in the landfill.

The surge in waste production, economic growth, and rapid population increase, particularly in developing countries, has escalated the demand for landfills. Given the financial constraints, landfills constructed as a rule have been unable to be maintained due to the lack of natural reduction measures, such as leachate collection systems and lining materials. The subsequent year witnessed a significant amount of environmental contamination. Furthermore, it is believed that weak layers in the landfill, caused by sporadic or various factors or inadequately compacted soil layers, may have contributed to failures.

The most crucial conclusion is that landfill owners and managers, whether they operate dumpsites or construct structured landfills, should employ prepared and skilled personnel to manage their landfills. Likewise, administrative or control specialists should be adequately trained. Measures for controlling and enhancing capacity should be implemented, if not already in place. The disposal of MSW by uncompacted dumping should be phased out as soon as possible. Where this is impractical, steep, hilly regions, especially sites intersected by streams or other watercourses, or located in marshes or lakes, should be avoided.

References

Akçakal, Ö. (2009). *Şev stabilite analizinde geri hesap yöntemi ve bir vaka analizi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Akıncı, G., Onargan, T., Danışman, M. A., Küçük, K., Güven, D., Gök, G., & Bilgin, M. (2010). *Uşak Belediyesi katı atık yönetimi fizibilite raporuna esas sondajlı atık sahası karakterizasyonu belirlenmesi ve gaz varlığının araştırılmasına yönelik Ar-Ge projesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Arıoğlu, E., & Tokgöz, N., (2022). *Bilgi föyü: şev stabilitesine toplu bakış*. 22 Mart 2022'de https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyalari/430c0073-8602- 44d0-94b0-58aeb4a5e717-c58b51df-f08a-4123-bd45-8a1c3be816da.pdf adresinden alındı.

Athanasopoulos, G., Vlachakis, V., Zekkos, D., & Spiliotopoulos, G. (2013, September 2–6). *The December 29th 2010 Xerolakka municipal solid waste landfill failure* [Conference presentation]. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France.

Aykol, K. (2008). *Evsel katı atıkların geoteknik özelliklerinin modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Blight, G. (2008). Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. *Waste Management & Research, 26*(5), 448–463. https://doi.org/10.1177/0734242X07087975.

Caicedo, B., Giraldo E., Yamin L., & Soler N. (2022, August 11–15). *The landslide of Dona Juana Landfill in Bogota. A case study* [Congress presentation]. 4th international congress on environmental geotechnics (4th ICEG), Rio de Janeiro, Brazil.

Coşkun, H. (2021). *Dolgu barajlarda gövde stabilitesi ve Çukurca barajı örneği* [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Fang, R., Guo, Z., & Feng T. (2011). Analysis of stability and control in landfill sites expansion. *Procedia Engineering, 24*, 667–671. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2715

Fernandez, G., Hendron, D., & Castro, A. (2005, September 12–15). *Pore pressure induced slide in municipal solid waste Doña Juana Landfill - Bogota, Colombia* [Conference presentation]. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan.

Griffiths, D. V., & Lane P. A. (2021). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique, 49*(3), 387–403. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387

Güner, G. B. (2022). *Katı atık sahalarında duyarlılığın incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kamer, A. (2018). *Katı atıkların en uygun toplama tekniklerinin araştırılması ve toplanan katı maddelerden en uygun geri kazanımın belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Arel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What A Waste 2.0 A Global. Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. The World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/bitstreams/df788c58-3c21-52a2-a224-1445f0a1850b/download

Kezer, S. (2019). *Katı atık sahalarında şev stabilitesi* [Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kocasoy, G., & Curi, K. (1995). The Umraniye-Hekimbasi open dump accident. *Waste Management & Research, 13*(4), 305–314. https://doi.org/10.1016/S0734-242X(95)90080-2

Laman M., King, G. J. W., & Dickin, E. A. (1999). Three-dimensional finite element studies of the moment-carrying capacity of short pier foundations in cohesionless soil. *Computers and Geotechnics, 25*(3), 141–155.

Lavigne, F., Wassmer, P., & Gomez, C. (2014). The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, *1*, Article 10. https://doi.org/10.1186/s40677-014-0010-5

Merry, S. M., Kavazanjian, E., & Fritz, W. U. (2005). Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas Landfill Failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *19*(2), 100–107.

Natur, O. (2018). *Şev stabilitesi analiz yöntemleri ve bir vaka analizi* [Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Polat, A. (2019). *Şev stabilitesinde sonlu elemanlar yöntemi uygulaması ve karşılaştırmalı analiz* [Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Pulat, H. F. (2014). *Kentsel katı atıkların geoteknik karakterizasyonu ve duraylılığının incelenmesi* [Doktora tezi, Celal Bayar Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Pulat, H. F., & Yükselen Aksoy, Y. (2017). Türkiye kentsel katı atık kompozisyonunun kayma mukavemeti özellikleri ve şev duraylılığının incelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, *28*(1), 7703–7724. https://doi.org/10.18400/tekderg.299128

Qian, X., Koerner, R. M., & Gray, D. H. (2002). *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction*. Prentice Hall.

Sarihan, N. H., & Stark, T. D. (2008, August 11–16). *Back- analyses of landfill slope failures* [Conference presentation]. 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, USA.

Seco e Pinto, P., Vieira, A., Mendonça, A., & Lopes, L. (1999). Seismic behaviour of solid waste Grhdola landfill. In P.S. Pinto (Ed.), *Earthquake Geotechnical Engineering* (pp. 661–666). Balkema, Rotherdam.

Ün, B., & Yıldız, A. (2021). Şev stabilitesi probleminin geri analizle çözümü: örnek bir vaka. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, *9*(1), 174–181. https://doi.org/10.21541/apjes.740867

Tekin, A. (2011). *Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Xu, Q., Peng, D., Li, W., Dong, X., Hu, W., Tang, M., & Liu, F. (2017). The catastrophic landfill flowslide at Hongao dumpsite on 20 December 2015 in Shenzhen, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *17*(2), 277–290.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 89–103, DOI: 10.21324/dacd.1478173

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı AHS yöntemi ile Erzincan-Sivas Karayolu ve Çevresinin Heyelan Duyarlılık Analizi

Betül Güneş[1], Ali Ümran Kömüşcü[1,*]

[1]*Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Yenimahalle, 06560, Ankara.*

Özet

Heyelanlar Türkiye'de depremden sonra en fazla insan kayıplarına ve ekonomik zarara yol açan afetlerin başında gelmektedir. Bu çalışmada sık sık heyelanlara maruz kalan Erzincan-Sivas karayolu ve çevresindeki alanda Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılarak heyelana karşı duyarlı alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Sahanın heyelana duyarlılığının analizinde eğim, bakı, yükseklik, litoloji, fay hatlarına mesafe, akarsuya mesafe, anayola mesafe, yağış ve bitki yoğunluğu (NDVI) gibi faktörler dikkate alınmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre Erzincan-Sivas Karayolu çevresindeki 6,39 ha alanın heyelana karşı çok yüksek duyarlılığa ve 120 ha alanın ise yüksek duyarlılığa sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma Erzincan-Sivas karayolu ve yakın çevresinin yüksek duyarlılığa sahip olduğunu ortaya koyarken, karayolundan uzaklaştıkça duyarlılığın azaldığını göstermiştir. Çalışma sahasının heyelana olan dirençliliğini artırmak için erken uyarı sisteminin önemini vurgulayarak, duyarlılığı yüksek alanlarda belirlenen lokasyonlara uyarı-ikaz sistemi kurulmasını önermektedir.

Anahtar Sözcükler
Heyelan, Erzincan-Sivas Karayolu, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

Analysis of Landslides Susceptibility of the Erzincan-Sivas Road and Its Surrounding Region by the AHP Method based on Geographic Information Systems (GIS)

Abstract

Landslides cause the highest human loss and economic damages following the earthquakes in Türkiye. This study aimed to identify areas that are susceptible to landslides in the Erzincan-Sivas highway and its surrounding region which frequently suffer from landslides based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method using Geographic Information System (GIS) approach. A number of factors including slope, aspect, elevation, lithology, proximity to fault lines, proximity to rivers, proximity to main roads, precipitation, and vegetation density based on NDVI were considered in assessing the susceptibility of the region to landslides. The findings of the analysis indicate that a nearly 6,39 ha area along the Erzincan-Sivas highway has an extremely high susceptibility to landslides while 120 ha has a high susceptibility to landslides. Furthermore, the susceptibility to landslides is highest along and in the vicinity of the Erzincan-Sivas highway and decreases as it becomes distant from the Erzincan-Sivas highway. The study emphasizes the importance of early warning systems to increase resilience against landslides and proposes setting up an early warning system at the landslide-prone locations in the area.

Keywords
Landslides, Erzincan-Sivas Highway, Geographic Information Systems, Analytic Hierarchy Process (AHP)

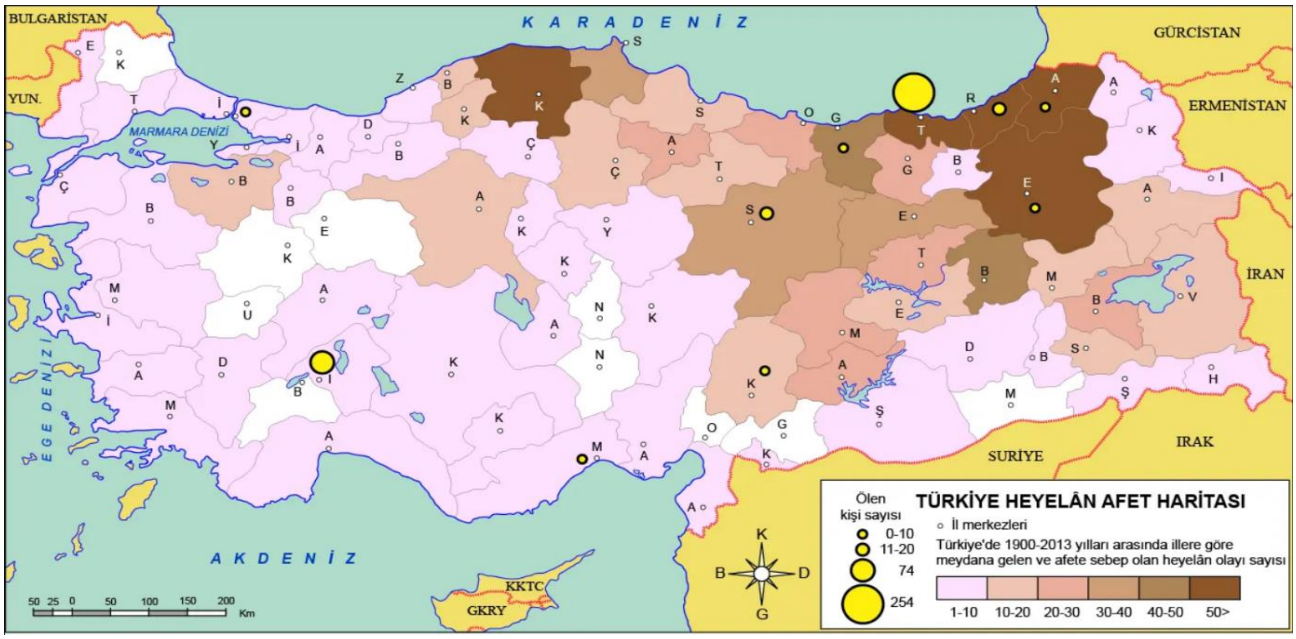
1. Giriş

Heyelanlar arazi bozulmalarına, tarım arazilerinin ve yerleşim yerlerinin zarar görmesine neden olan ve sık olarak görülen doğal afetlerin başında yer almaktadır (Ceylan Demirel & Hastaoğlu, 2022). Afet. Epidemiyolojileri Araştırma Merkezi (CRED) istatistiklerine göre; heyelanlar küresel ölçekte tüm doğal afetlere dayalı ölümlerin yaklaşık %17'sini oluşturmaktadır (CRED, 2021). Heyelanlar, başta jeolojik ve jeomorfolojik etkenler olmak üzere, meteorolojik faktörler ve insan aktivitelerine bağlı olarak yamaç stabilitesinin bozulmasıyla kendini gösteren kütle hareketleridir (Cruden & Varnes, 1996). Yamaç stabilitesinin bozulması sonucu harekete meyilli duruma gelen toprak ve alttaki kayalar, yerçekiminin de etkisiyle yamaç eğimi doğrultusunda yer değişikliğine uğrar. Arazinin eğim durumu, toprağın suya doygunluğu, litolojik özellikler, bitki örtüsünün zayıflığı, donma ve çözülme olayları, çökmeler ve erozyon gibi toprağın bozulmasına yol açan olaylar heyelanların oluşumuna sebep olan önemli fiziki faktörler arasında yer almaktadır (Öztürk, 2002).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (312) 5460690 Faks: +90 (312) 5460601
E-posta: gunes.betul@hbv.edu.tr (Güneş B.), ali.komuscu@hbv.edu.tr (Kömüşcü A.Ü.)
Gönderim Tarihi / Received : 03/05/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 08/08/2024

Diğer taraftan, şiddetli ve sürekli yağışlar ve kar erimeleri ana kayanın ya da zeminin üzerindeki toprak örtüsünü su içeriğini ve dolayısı ile ağırlığını artırarak sürtünmeyi azaltır ve bu durumda kayma hareketine zemin hazırlayarak heyelan oluşumu kolaylaşmaktadır. Heyelan oluşumunda, yamaçların alt sınırlarında yol, tünel, baraj ve kanal gibi inşaat çalışmaları ve buna bağlı olarak yamaç eğimlerinde bozulmalar meydana gelmesi, maden ve taş ocaklarındaki suni patlamalar ve sarsıntılar, yamaçlarda ve yamaç eteklerinde yapılan hafriyatlar ve yamaçlardaki bitki örtüsünün tahribi insan kaynaklı faktörler olarak önemli rol oynamaktadır.

Türkiye'nin iklim koşulları ve jeomorfolojik-jeolojik özellikleri kütle hareketlerinin oluşması için uygun şartlar göstermektedir. Afete neden olan heyelanlar dikkate alındığında, özellikle Karadeniz Bölgesi kıyı kuşağı ve Sivas-Erzurum arasındaki bölgenin yüksek heyelan oluşumlarına sahip olduğu dikkati çekmektedir (Şekil 1). Ayrıca kütle hareketlerine eğilimli yamaçlar üzerindeki bitki örtüsünün tahribi ve yanlış arazi kullanım uygulamaları bu türlü hareketlere hız kazandırmaktadır. Diğer taraftan, Türkiye yüzölçümünün 2/3'ü eğimli ve sarp araziden oluşması, eğimli arazilerde tarım yapılması, ormanlık alanların tahribatı ve meraların aşırı otlatılması kütle hareketlerine zemin hazırlayan diğer önemli faktörlerdir. Genel olarak, şiddetli yağışlar ve kar erimeleri deniz seviyesinden yüksek engebeli topografyalarda litolojik koşulların uygunluğuna bağlı olarak doğal koşullarda meydana gelen ölümcül heyelanların sayısı daha yüksek iken, deniz seviyesinden yüksek olmayan daha az karmaşık topografya koşullarında ise insan faaliyetlerine bağlı olarak meydana gelen ölümcül heyelanların sayısının fazla olduğu tespit edilmiştir (Fidan, 2019).



Şekil 1: Türkiye heyelan afet haritası (https://www.afad.gov.tr/afet-haritalari)

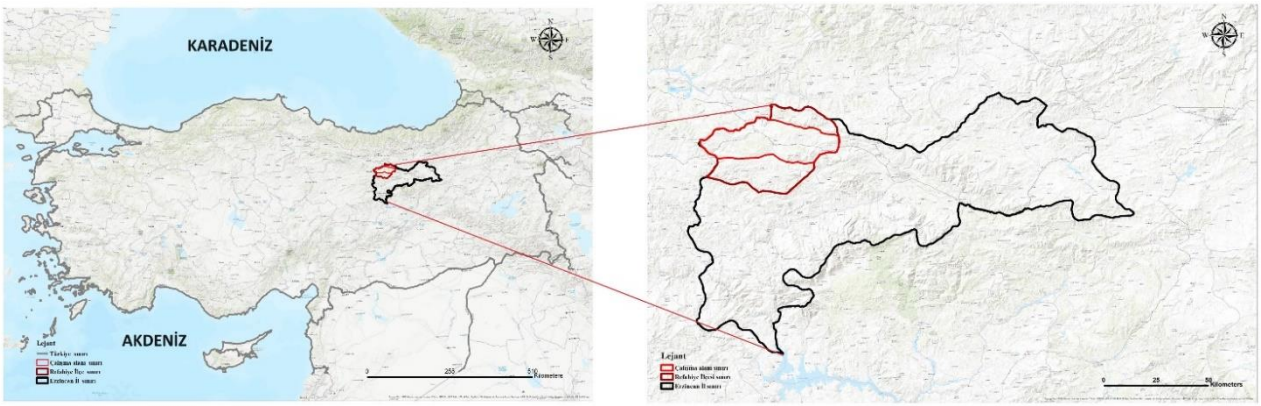
Bir kütle hareketi olarak başlayan heyelan oluşumları, tarım alanları ve yerleşim yerlerine verdikleri zarar ve insan kayıpları ile afete dönüşebilmektedir. Türkiye'de doğal afetlerin sebep olduğu kayıplar dikkate alındığında, kütle hareketleri depremlerden sonra en fazla can ve mal kaybına neden olan afet türüdür (Ildır, 1995; Özşahin, 2015). Görüm ve Fidan (2021) tarafından yapılan bir araştırma, Türkiye'de 1929-2020 yılları arasında meydana gelen 389 heyelan sonucunda 1343 kişinin hayatını kaybettiğini ortaya koymuştur. Bu heyelanların %40'ı meteorolojik ve hidrometeorolojik koşullar ile ilişkilendirilirken, %60'ında ise inşaat ve altyapı çalışmaları gibi insan kaynaklı faktörlerin etkili olduğu ortaya konmuştur. Aynı araştırmaya göre doğal faktörlere bağlı heyelan olaylarının yüzde 65'i Karadeniz Bölgesi'nde meydana gelirken, hidrometeorolojik koşulların daha geniş alanlarda etkili olması nedeniyle insan kaynaklı ölümcül heyelanlara göre daha fazla insan kaybına neden olmuştur. Heyelan ve bununla ilişkili ölüm olaylarının daha yüksek olduğu Doğu Karadeniz Bölgesinde, dağınık yerleşme, yamaçlarda çay plantasyonu ve bu alanlara ulaşmak için yapılmış çok yoğun yol ağlarının heyelan oluşumlarını artırdığı gözlemlenmiştir. Alptekin ve Yakar (2020), Türkiye'nin özellikle Kuzeydoğu Anadolu bölgesinde sahip olduğu engebeli arazi yapısı nedeniyle heyelana meyilli olduğu ve bu bölgedeki kütle hareketlerinin düzenli aralıklarla izlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Günümüzde heyelana duyarlı alanların tespit edilmesinde en Uzaktan Algılama (UA) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kapsamlı olarak kullanılmaktadır (Fidan, 2019). CBS farklı mekânsal verilerin analizine imkân tanıdığı gibi aynı zamanda karar destek sistemi özelliğine sahip bir teknolojidir. Bu teknolojinin kütle hareketlerinin analizinde kullanılması heyelan olabilecek alanları önceden belirlenmesi, modellenmesi ve heyelan sonrası oluşan hasarın belirlenmesi çalışmalarında daha detaylı sonuçların elde edilmesine imkân vermektedir.

Akıncı vd. (2015) tarafından CBS tabanlı AHP yöntemi kullanılarak Artvin ilinin bazı mahaller ve köylerinde heyelan duyarlılığının belirlenmesine yönelik yapılan bir çalışmada; söz konusu lokasyonlardaki yapıların yaklaşık %68'inin çok yüksek veya yüksek seviyede heyelana duyarlı alanda yer aldığı ortaya konmuştur. Ceylan Demirel ve Hastaoğlu (2022) tarafından, Sivas-Koyulhisar heyelan duyarlılık haritasının yapılmasında CBS tabanlı Analitik Hiyerarşi (AHP) yöntemi kullanılmış, alanın heyelan duyarlılığının %44,06 yüksek ve %6,31 çok yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir. Sivas'ın Suşehri ilçesinde yapılan bir başka çalışmada CBS analizleri ile çalışma alanının %22.81'i yüksek ve %23.35'i ise çok yüksek duyarlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir (Demir, 2018). Benzer bir çalışmada, CBS ve UA teknikleri kullanılarak Erzurum Uzundere ilçesinin (yaklaşık 840 km²) heyelan duyarlılık analizi yapılmış ve ilçenin %28,1 yüksek ve %4,1 çok yüksek seviyede heyelan duyarlılık sınıfına sahip olduğu tespit edilmiştir (Aleshzadeh & Yavuz, 2019). Özşahin vd. (2013) tarafından yapılan "Camili Biyosfer Rezerv Alanının (Artvin) Heyelan Duyarlılık Analizi" konulu bir çalışmada heyelan tehlikesi ve riskli bulunan alanlar tespit edilerek, heyelanın olumsuz etkilerini azaltmak ve gelecekte heyelan olabilecek potansiyel arazileri belirlemek amacı ile duyarlılık haritaları üretilmiştir. Aykır (2023) tarafından yapılan bir çalışmada Ardahan-Göle karayolunun 8. km'sinde meydana gelen Ardahan-Göle heyelanı incelenerek frekans oranı yöntemi ile yapılan heyelan duyarlılık analizi sonucunda karayolu genişletme faaliyetlerinin heyelanı tetiklediği ortaya konmuştur. Karayolu heyelanları konusunda yakın zamanda yapılan çalışmalardan biride Hepdeniz ve Soyaslan (2024)'a aittir. Çalışmada Isparta-Ağlasun (Burdur) arasındaki karayolunda meydana gelen heyelanlar CBS tabanlı AHS yöntemi ile analiz edilmiş ve güzergâh boyunca kütle hareketlerine eğilimli alanlar belirlenmiştir.

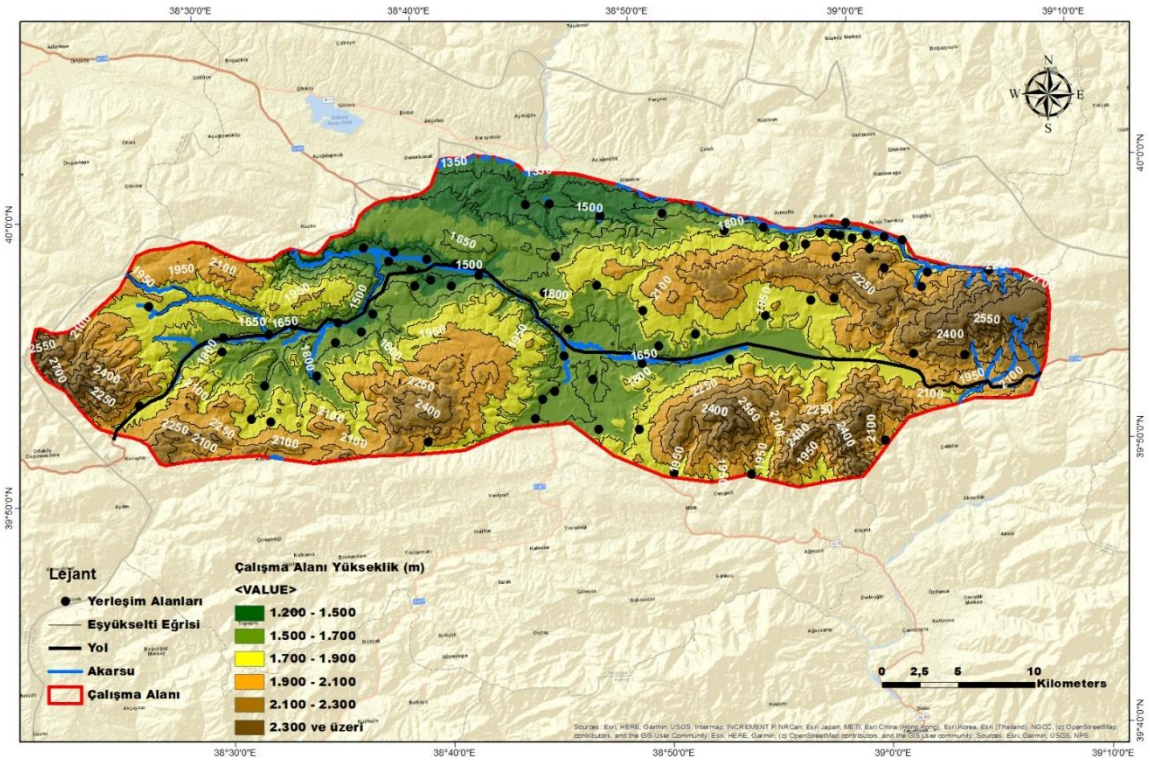
Çalışma alanı ile ilgili yapılan ön araştırmada; Erzincan-Sivas karayolunun belli bölümlerinde heyelan olduğu, özellikle Sakaltutan geçidinin olduğu bölümünde heyelanların yoğunluğunun fazla olması dikkat çekmiştir. Söz konusu yol üzerinde hasarı azaltmaya yönelik herhangi bir uyarı-ikaz sisteminin olmaması problem durum olarak belirlenmiş ve heyelan duyarlılık sınıflarına ait alanlar tespit edilerek, erken uyarı mekanizması ile heyelanlara hazırlıklı olunması hedeflenmiştir. Bu çalışmada; Erzurum-Sivas karayolu çevresindeki alan için heyelan duyarlılığının belirlenmesi, belirlenen risk alanlarına yönelik heyelan erken uyarı-ikaz sisteminin oluşturulması ve UA yöntemlerini ve CBS kullanarak, mekânsal analizler yapabilme kabiliyetinin ortaya konması hedeflenmiştir. Çalışmanın öngörülen sonuçları arasında heyelan duyarlılığının en fazla olduğu alanlara yerleştirilecek olan uyarı-ikaz sistemleri ile heyelana bağlı oluşacak hasarın önlenmesi yer almaktadır. Heyelan duyarlılık analizleri, ülkemizde başta Karadeniz Bölgesi (Görüm, 2006; Şahin, 2012) olmak üzere, Erzurum-Sivas (Demir, 2018; Ceylan Demirel & Hastaoğlu, 2022) arasındaki alanda daha fazla uygulanmış olup, Erzincan-Sivas karayolu üzerinde detaylı bir çalışmanın olmadığı belirlenmiştir. Özellikle çalışma alanında heyelan duyarlılığı fazla olan çamurtaşı, çakıltaşı ve kireçtaşının yaygın olması ve heyelan duyarlılığını artıran Kuzey Anadolu fay hattının bulunması söz konusu alanda heyelan konusunda böyle bir çalışmanın yapılmasını gerekli kılmıştır. En son 2024 yılının Şubat ayında Erzincan'ın Ilıç ilçesinde bir maden sahasında meydana gelen toprak kayması ve heyelanlarda bölgenin insan kaynaklı heyelan olaylarına olan duyarlılığını ortaya koymuştur.

2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Erzincan ili, Refahiye ilçesi idari sınırları içinde yer alan "Sivas-Erzincan karayolu çevresini" kapsamaktadır. Refahiye, 39º 54′ 4″ Kuzey enlemi ile 38º 46′ 7″ Doğu boylamı arasında yer alan 174.000 ha alana sahip, yarı kurak karasal iklimin görüldüğü bir ilçedir (Şekil 2). Çalışma alanında ortalama yükseklik 1200 metrenin üzerinde olup, özellikle güneye ve doğuya gidildikçe bu değer 2300 m. ve üzerine çıkmaktadır (Şekil 3).

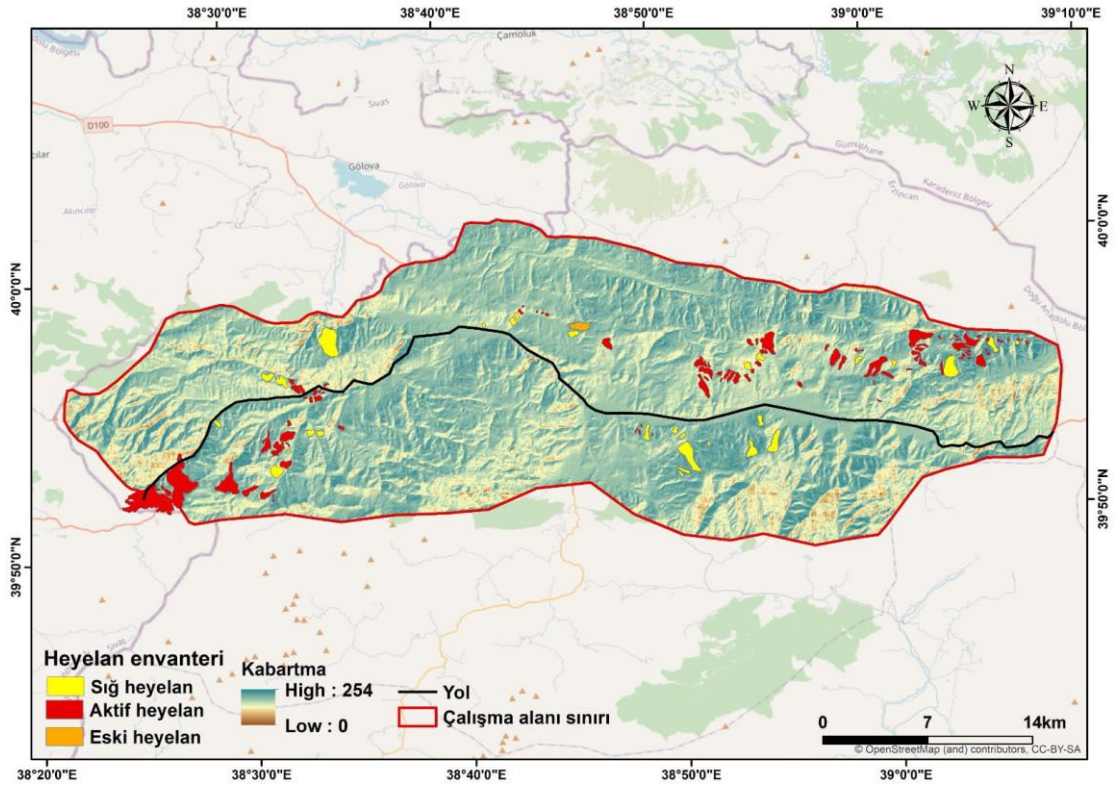


Şekil 2: Çalışma alanını kapsayan Erzincan-Sivas karayolu ve çevresi



Şekil 3: Çalışma alanının yükseklik haritası

Çalışma alanında daha önce meydana gelmiş heyelan alanlarının belirlenmesi ve heyelana neden olan faktörlerin tespit edilmesi, önem arz etmektedir. Bu konuda izlenen yaklaşımlardan biriside, gelecekte oluşma potansiyeli olan heyelanların, geçmişte yaşanan heyelanlarla benzer koşullar altında gerçekleşebileceğidir (Yılmaz, 2009). Bu nedenle çalışma alanında daha önce ve günümüzde meydana gelmiş olan heyelanlar araştırılarak, bölgeye ait heyelan haritaları incelenmiş ve heyelanların alansal dağılımının gösterildiği harita hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4: Çalışma alanı heyelan envanter haritası

Aktif heyelanların çalışma alanının batısında Erzincan-Sivas karayoluna oldukça yakın alanlarda, doğu bölümünde ise Erzincan-Sivas karayolunun daha kuzeyinde yer aldığı görülmektedir. Erzincan genelinde ve özellikle çalışma alanına ait 2013-2022 yılları arasında meydana gelen heyelanlar, etkileri ve tarihleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: 2013-2022 yılları arası meydana gelen heyelanlar ve etkileri

Yıl	Yıllara Göre Erzincan'da Meydana Gelen Bazı Heyelanlar ve Etkileri (2013-2022)
2013	Erzincan-Erzurum karayolu Erzincan yönünde heyelan nedeniyle ulaşıma kapandı (31 Mayıs)
2014	Erzincan-Erzurum karayolunun 100 metrelik bölümü heyelan nedeniyle yok oldu (29 Eylül)
2014	Erzincan'da sağanak yağış sonrası Erzincan-Sivas karayolu Davarlı mevkiinde heyelan nedeniyle yol trafiğe kapandı (21 Temmuz)
2014	Tunceli-Erzincan karayolu heyelan nedeniyle ulaşıma kapandı (15 Aralık)
2015	Tunceli-Erzincan karayolu heyelan nedeniyle ulaşıma kapandı (29 Mayıs)
2016	Erzincan'ın Refahiye ilçesine bağlı Aşağı Sütlü köyünde heyelan meydana geldi, 24 ev boşaltıldı (12 Eylül)
2017	Tunceli-Erzincan karayolunda meydana gelen heyelan nedeniyle düşen kaya parçaları ulaşımı olumsuz yönde etkiledi (8 Aralık)
2018	Erzincan Üzümlü ilçesinde heyelan nedeniyle yük treni raydan çıktı (21 Haziran)
2018	Erzincan Üzümlü ilçesinde Erzincan-Sivas demir yolu heyelan nedeniyle ulaşıma kapandı (8 Ağustos)
2019	Erzincan'ın Üzümlü ilçesine bağlı Kureyşlisarıkaya köyünde heyelan meydana geldi (8 Mayıs)
2020	Erzincan'ın Tercan ilçesinde heyelan meydana geldi (10 Temmuz)
2020	**Erzincan -Sivas karayolu** Sakaltutan geçidinde heyelan meydana geldi (18 Haziran)
2021	**Erzincan -Sivas karayolu** Sakaltutan geçidinde heyelan meydana geldi (12 Ağustos)
2022	**Erzincan -Sivas karayolu** Sakaltutan geçidinde heyelan meydana geldi (19 Ağustos)

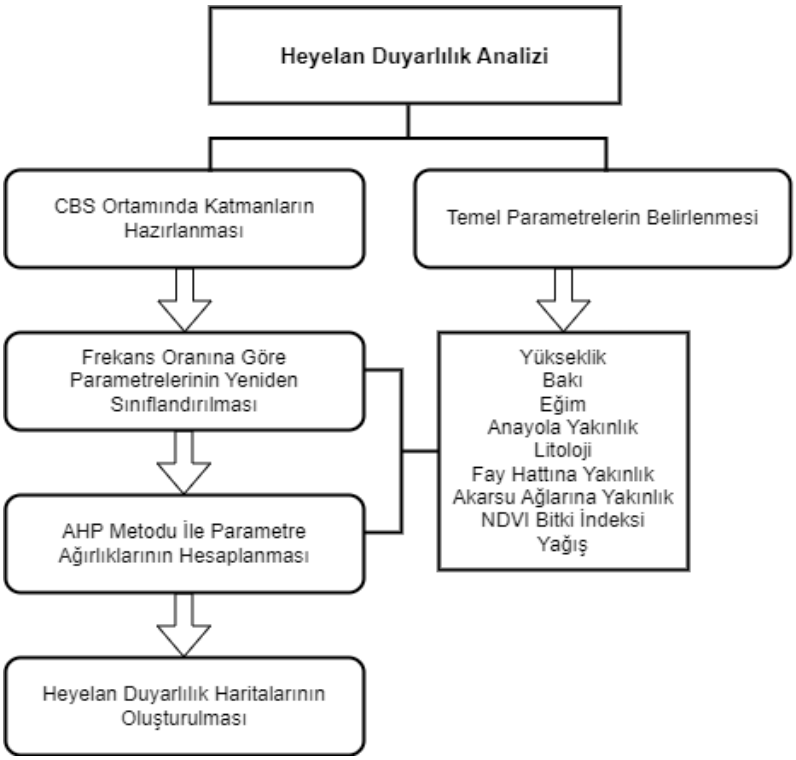
Tablo 1 incelendiğinde, son yıllarda (2020, 2021 ve 2022) Haziran ve Ağustos aylarında çalışma alanında, özellikle Sakaltutan Geçidi'nde heyelanlar meydan geldiği görülmektedir.

3. Yöntem

Bu çalışmada Erzincan-Sivas karayolu ve çevresindeki bölgede heyelan duyarlılık sınıflarını belirlemek için CBS tabanlı, "Çok Ölçütlü Karar Verme" yöntemlerinden birisi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca, heyelana karşı en fazla duyarlı olduğu belirlenen alanları için uyarı-ikaz sistemi geliştirilmesi önerilmektedir.

Çalışmada öncelikle çalışma alanına ait, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) heyelan envanter verilerine dayalı olarak mevcut heyelan durumu incelenmiştir. Ardından, CBS destekli AHP yöntemi ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Heyelan duyarlılığının değerlendirilmesinde DEM (sayısal yükseklik modeli) kullanılarak eğim, bakı, yükseklik; litoloji, fay alanlarına yakınlık, akarsuya yakınlık, anayola yakınlık, yağış değerleri ve bitki yoğunluğu (NDVI) faktörleri kullanılmıştır. ArcGIS yazılımı kullanılarak, faktörlerin ağırlık değerlerine göre heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur.

AHP heyelan duyarlılık analizlerinde sık kullanılan CBS tabanlı bir yöntemdir (Ayalew & Yamagishi, 2005; Akgun, 2012). AHP yöntemi, bir problemin çözümünde birden çok kritere bağımlılık olması durumunda, kullanıcılara kriterlerin ağırlıklarını belirlemesine imkân sağlamaktadır. AHP yöntemi hiyerarşik bir model kullanımını esasına göre tasarlanmıştır ve her problem için amaç, kriterler (ölçütler), alt kriterler ve seçeneklerden oluşan bir ayrıştırma süreci söz konusudur (Özcan vd., 2009). Problem, hiyerarşik bir yapı esasına göre dizayn edildikten sonra, hiyerarşiyi oluşturan ölçütlerin ağırlıkları hesaplanmaktadır. Literatürde AHP yöntemi ile yapılan heyelan duyarlılık analizlerine Kamp vd. (2008); Yalcin (2008); Reis vd. (2009); Hasekioğulları ve Ercanoglu (2012); Çellek (2013); Park vd. (2013); Kayastha vd., (2013); Althuwaynee vd. (2014); Özşahin (2015) ve Ahmed (2015) gibi çalışmalar örnek olarak verilebilir. AHP yönteminin uygulanmasında ilk aşamada hiyerarşik bir yapı oluşturulmuştur (Şekil 5). Sonraki adım ise ölçütlerin göreli öneminin saptanması için ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasını kapsamaktadır. İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra sentezleme olarak adlandırılan aşamada ise her ölçütün göreli önemi hesaplanır. Daha sonra karar verici tarafından verilen ikili karşılaştırma kararlarının tutarlılığını belirlemek için tutarlılık oranı hesaplanır. Tutarlılık oranı değerinin 0,1'den küçük olması uzman görüşüne dayalı karşılaştırmaların tutarlı olduğunu ifade ederken, tutarlılık oranının 0,1 değerinden büyük olması ise karar vericinin karşılaştırmalardaki tutarsızlığını ifade etmektedir (Hafeez vd., 2002). Yöntemin detayları ve hesaplamaları içeren analizler Saaty ve Niemira (2006); Kuruüzüm ve Atsan (2001); Saaty (2008) ve Tudes (2011) tarafından etraflıca açıklanmıştır.



Şekil 5: AHP ile heyelan duyarlılık analizi aşamaları

Eğim, bakı, litoloji ve arazi örtüsü gibi parametreler heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında sıkça kullanılan parametrelerdir. Bu çalışmada da eğim, litoloji, bakı, yükseklik, faylardan uzaklık, normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI), akarsuya yakınlık, anayola yakınlık ve yağış verileri kullanılmıştır. AHP yöntemiyle her bir parametreye ait ölçüt ağırlıkları belirlenerek heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. AHP metodu ile heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında Chen vd. (2016) tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır.

$$LSI = \sum_{i=n}^{n} w_i \, x \, u_i \qquad (1)$$

Bu eşitlikte *LSI*= Heyelan Duyarlılık İndeksini, w_i i ölçütünün ağırlığını ve u_i ise Ölçüt i'nin alt sınıf puanlamasıdır. Çalışma alanının heyelan duyarlılık haritaları ArcGIS 10.1 yazılımı ile üretilmiştir.

4. Heyelan Duyarlılık Sınıflarına Ait Alanların Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, çalışma alanına ait heyelan duyarlılık sınıflarının belirlenmesinde CBS destekli AHP yöntemi kullanılmıştır. Literatür taraması yapılarak belirlenen faktörlere ait veriler ve ulaşıldıkları kaynaklar tablo 2'de verilmiştir. CBS platformunda heyelan duyarlılık sınıflarının belirlenebilmesinin ilk aşamasında farklı parametrelere ait tüm verileri ArcGIS Spatial Analyst Tool aracı ile vektör verileri raster veriye çevrilmiştir. Tablo 2'de yer alan DEM ve uydu görüntüleri ise raster verisi formatındadır. Tüm veriler raster formatında ArcMap ile heyelan duyarlılıklarının belirlenmesi için yeniden sınıflandırılmıştır.

Tablo 2: Kullanılan faktörler ve faktörlere ait veri kaynakları

Faktörler	Veri Tipi	Kaynak	Periyod
Yükseklik, eğim ve bakı	SYM (Sayısal Yükseklik Modeli)	U.S. Geological Survey (2024a)	18.12.2022
Litoloji, fay	Vektör veri (çizgi)	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2024)	-
Akarsu, ana yol	Vektör veri (çizgi)	OpenStreetMap	-
NDVI	Landsat 8 Band 4 ve 5 Uydu görüntüsü (30 metre çözünürlük)	U.S. Geological Survey (2024b)	27-29 Aralık 2022
Yağış	Vektör veri (nokta)	Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024)	2013-2022

2.1. Heyelana Neden Olan Faktörlerin Belirlenmesi

Yapılan çalışmada, literatür taraması yapılarak, konuyla ilgili hangi parametrelerin kullanıldığı tespit edilmiş (Öz & Günek, 2021; Çellek, 2020; Özşahin, 2014; Bulut & Dağ, 2012; Nasery, 2022) ve çalışma alanı da dikkate alınarak literatürde de sıklıkla kullanılan, yükseklik, eğim, bakı, yağış, jeoloji, akarsuya yakınlık, yola yakınlık, fay alanlarına yakınlık, NDVI faktörleri belirlenmiştir.

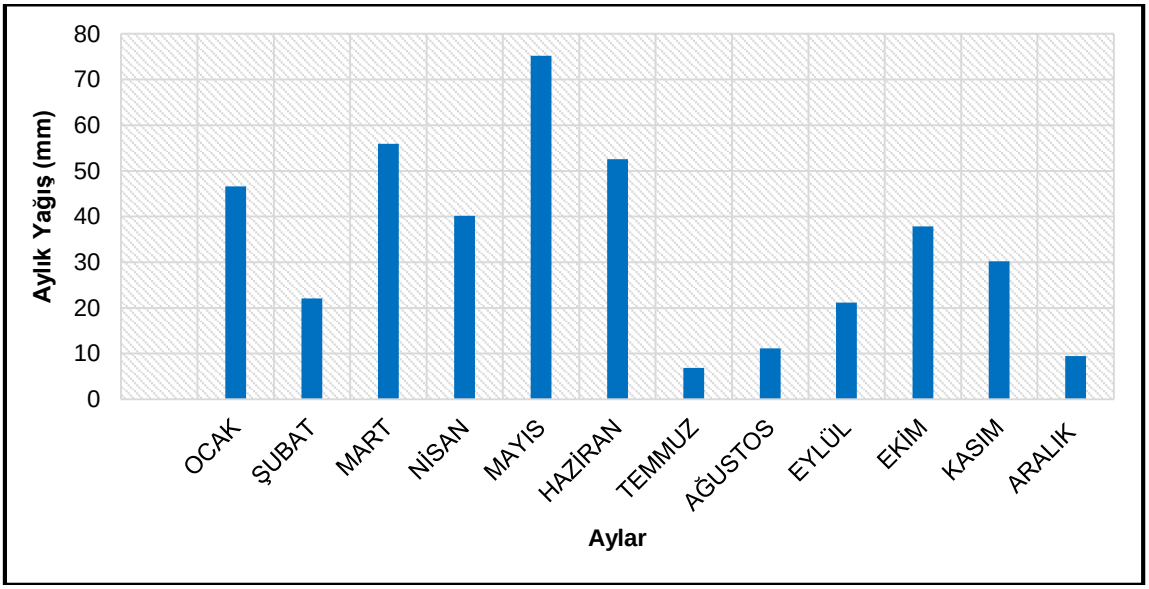
Tablo 3: Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan faktörler, ağırlık değerleri ve duyarlılık sınıfları

Parametreler	Ağırlık	Sınıflar	Faktör	Duyarlılık Sınıfları
Yükseklik (m)	6%	1200-1500	5	Çok Yüksek Duyarlı
		1500-1800	4	Yüksek Duyarlı
		1800-2100	3	Duyarlı
		2100-2400	2	Az Duyarlı
		2400 ve üzeri	1	Çok Az Duyarlı
Bakı	8%	Kuzey, Kuzeydoğu ve Kuzey batı	5	Çok Yüksek Duyarlı
		Batı, Doğu	4	Yüksek Duyarlı
		Güneydoğu, Güney Batı	3	Duyarlı
		Güney	2	Az Duyarlı
		Düz	1	Çok Az Duyarlı
Eğim (°)	14%	0-10	5	Çok Yüksek Duyarlı
		10_20	4	Yüksek Duyarlı
		20-30	3	Duyarlı
		30-40	2	Az Duyarlı
		40-50	1	Çok Az Duyarlı
Anayola Yakınlık (m)	10%	0-50	5	Çok Yüksek Duyarlı
		50-100	4	Yüksek Duyarlı
		100-150	3	Duyarlı
		150-200	2	Az Duyarlı
		200 ve üzeri	1	Çok Az Duyarlı
Litoloji	15%	Alüvyon	5	Çok Yüksek Duyarlı
		Mesozoik-Trias yaşlı Kireçtaşı-Kumtaşı-Çakıltaşı,Tersiyer-Neojen Yamaç Molozu	4	Yüksek Duyarlı
		Şist,Ofiyolitik Kayaç	3	Duyarlı
		Volkanik Kayaç	2	Az Duyarlı
		Melanj	1	Çok Az Duyarlı
Fay Hattına Yakınlık (m)	10%	0-100	5	Çok Yüksek Duyarlı
		100-200	4	Yüksek Duyarlı
		200-300	3	Duyarlı
		300-400	2	Az Duyarlı
		400 ve üzeri	1	Çok Az Duyarlı
Akarsuya Yakınlık (m)	10%	0-50	5	Çok Yüksek Duyarlı
		50-100	4	Yüksek Duyarlı
		100-150	3	Duyarlı
		200-250	2	Az Duyarlı
		250 ve üzeri	1	Çok Az Duyarlı
NDVI	13%	(-0,05)-0,07	5	Çok Yüksek Duyarlı
		0,07-0,10	4	Yüksek Duyarlı
		0,10-0,14	3	Duyarlı
		0,14-0,18	2	Az Duyarlı
		0,18-0,41	1	Çok Az Duyarlı
Yağış (mm)	15%	86 ve üzeri	5	Çok Yüksek Duyarlı
		83-86	4	Yüksek Duyarlı
		82-83	3	Duyarlı
		79-82	2	Az Duyarlı
		76-79	1	Çok Az Duyarlı

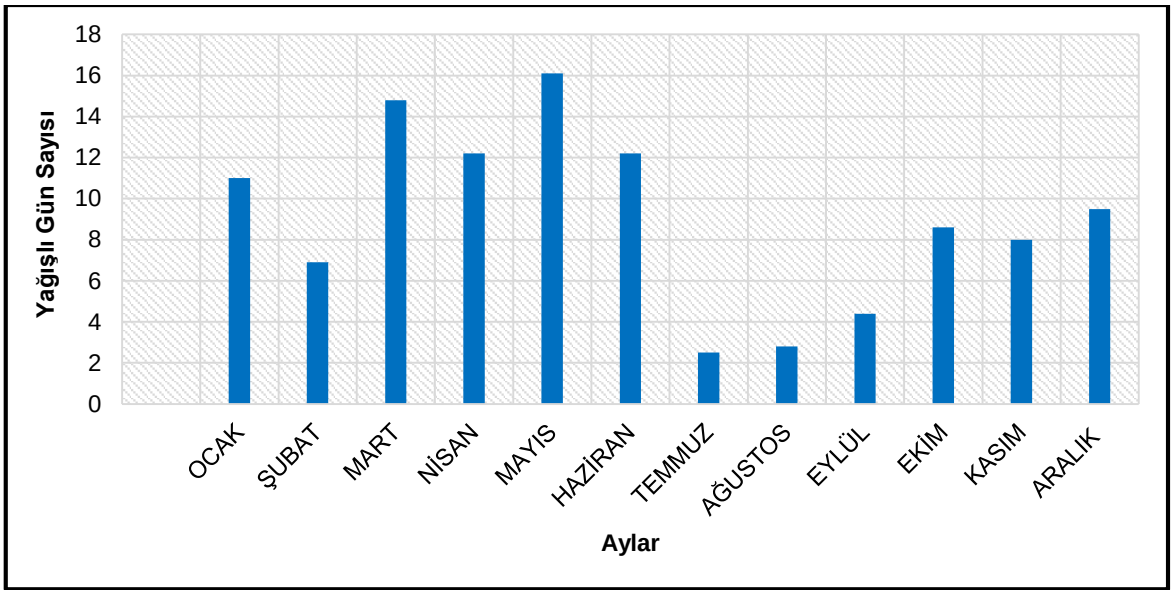
Tablo 3'de çalışmada kullanılan faktörlere, heyelan duyarlılığını oluşturma potansiyeline göre duyarlılık faktörü değerlerine ve duyarlılık sınıflarına yer verilmiştir. Her bir sınıfa 1-5 arasında ağırlık değerleri atanmıştır.

Burada heyelan için çok yüksek duyarlı sınıfa "5", çok az duyarlı sınıf "1" ile ifade edilmiştir. Sözü edilen sınıflar, ağırlık puanları ve sınıf değerleri literatüre dayanılarak verilmiştir (Öz & Günek, 2021; Nasery, 2022; Hepdeniz & Soyaslan, 2018; Alptekin & Yakar, 2020).

Çalışma alanında kullanılan parametreler ve heyelan üzerindeki etkilerini kısaca değerlendirmek gerekirse; litoloji, heyelan oluşumunu etkileyen önemli faktörlerden biridir ve heyelan duyarlılığının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Farklı litolojik birimleri heyelan süreçleri üzerinde farklı duyarlılıklara sahiptir. Çalışma alanı litolojik olarak ağırlıklı olarak Mesozoik-Trias yaşlı kireçtaşı, kumtaşı, çamurtaşı ve Tersiyer-Neojen yaşlı alüvyal yapıdan meydana gelmiştir. Eğim, heyelan duyarlılık analizlerinin en önemli bileşenlerinden biridir (Özalp vd., 2015). Yapılan çalışmalar ve arazi gözlemleri eğimin artmasıyla heyelana karşı duyarlılığın arttığını göstermektedir (Erener & Düzgün 2010, Akıncı vd., 2015). Yapılan analizlerde çalışma alanın 0-50° arasında eğimli bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Heyelan duyarlılık analizlerinde bakı da önemli faktörler arasında yer almaktadır (Çevik & Topal 2003; Ercanoglu & Gokceoglu, 2004). Belli yönelimlere sahip yamaçlarda heyelanların daha sık görülmesinde, alanın morfolojik yapısının, özellikle bölgenin genel yağış yönü ve güneş ışığını alması gibi faktörler etkili olmaktadır. Çalışma alanının özellikle kuzey, kuzey batı ve kuzey doğu yönlerinin heyelana duyarlı olduğu tespit edilmiştir. Fay hatlarına yakınlık, heyelan duyarlılığını artıran diğer önemli bir faktördür. Çalışma alanı Kuzey Anadolu fay hattı sınırları içinde yer almaktadır. Yamaçların akarsu ağlarına yakınlığı da stabilite açısından önemli diğer bir faktördür. Akarsular, yamaç ya da şevleri suya doygun hale getirerek yamaç stabilitesini bozmaktadır. Diğer taraftan, yükselti ile heyelanlar arasında bir ilişki söz konusudur (Dağ & Bulut, 2012). Yüksekliğe bağlı olarak yağış, eğim ve toprak koşullarının değişmesi heyelan oluşumlarını dolaylı olarak etkilemektedir (Öz & Günek, 2021). Çalışma alanının yükselti değerleri 1200-2400 m. arasında değişmektedir. Yağış faktörü, diğer faktörlerle birleştiğinde heyelanın oluşumunda önemli bir yer tutmaktadır. Çalışma alanının heyelan duyarlılık analizleri yapılmadan önce bölgenin 2013-2022 yılları arasındaki yağış değerleri incelenerek, Şekil 6 ve Şekil 7'de uzun yıllar ortalama aylık toplam yağış değerleri ve aylık yağışlı gün sayıları ortaya konmuştur.



Şekil 6: Aylık ortalama yağışlar (2013-2022)



Şekil 7. Aylık ortalama yağışlı gün sayısı (2013-2022)

Şekil 6 ve 7 incelendiğinde en fazla yağışlı gün ortalamasının ve en fazla yağış miktarının Mayıs ayında gerçekleştiği görülmektedir.

Akarsu ağlarının kesişme noktalarında yer alan yamaçlar akarsuların biriktirme ve aşındırma faaliyetlerinden etkilenmektedir. Akarsuların yamaçları topuk kısmına kadar aşındırmaları ve yamaçların suya doygun hale gelmesi heyelan duyarlılığını artırmaktadır (Öz & Günek, 2021). Yola yakınlık yamaç dengesi bozduğu için eğim yönünde hareketi hızlanmakta ve heyelan oluşumunu etkilemektedir (Hepdeniz & Soyaslan, 2018). NDVI faktörü dikkate alındığında; bitki örtüsü olmayan veya seyrek bitki örtüsü ile kaplı alanlar heyelana daha duyarlıdırlar. Genellikle, bitki örtüsü ile kaplı alanlarda tahribatın azalması ve erozyon etkisinin azalması heyelan duyarlılığını da azaltmaktadır (Nasery, 2022). Çalışma alanımızda da heyelana duyarlı olan alanlarda bitki yoğunluğunu azaldığı belirlenmiştir.

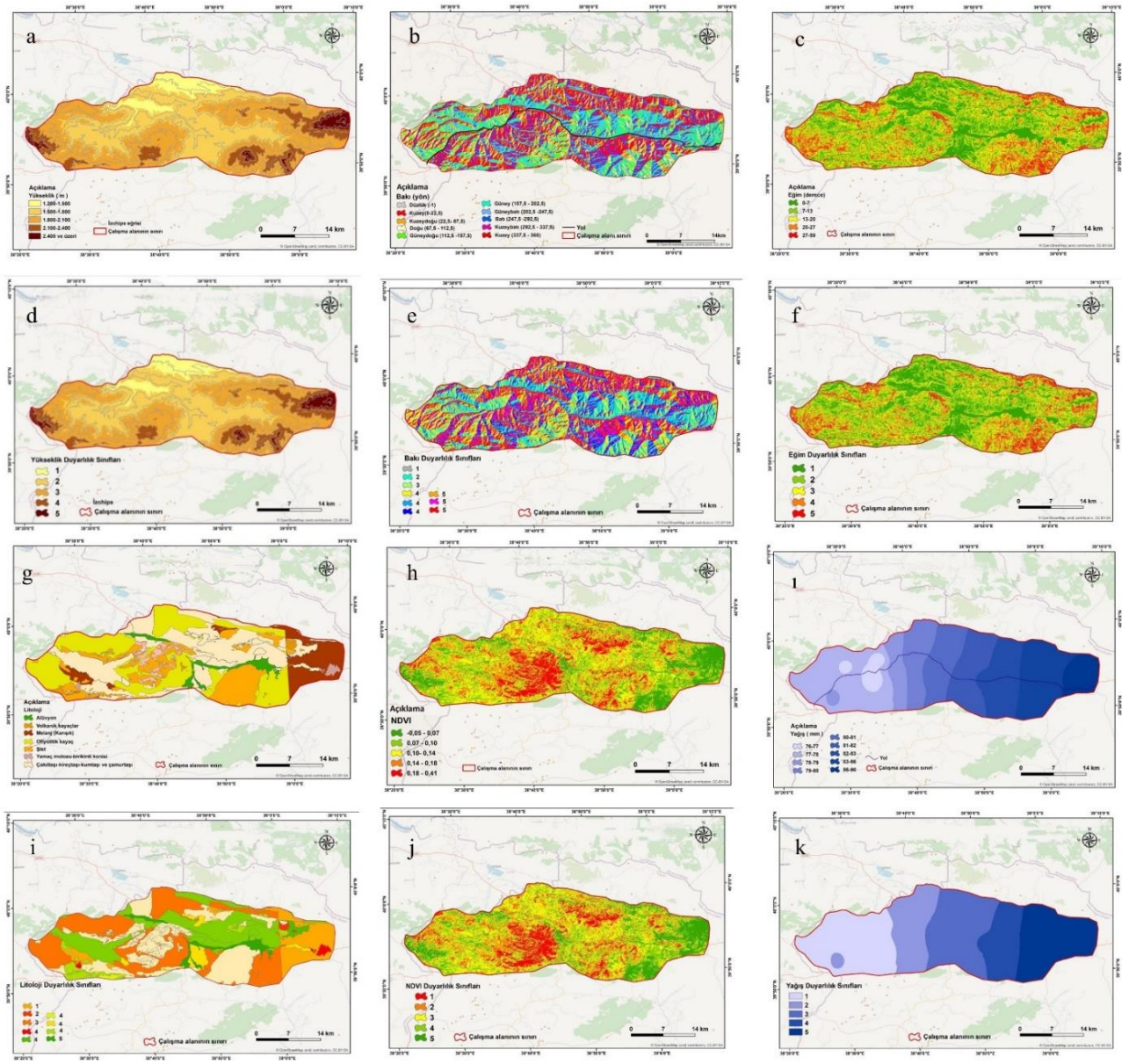
2.2. Çalışma Alanı Heyelan Duyarlılık Sınıflarının Belirlenmesi

Çalışma alanında heyelan duyarlılık sınıflarının belirlenebilmesi için, öncelikle kullanılan verilerin raster formatında düzenlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle DEM verisinden elde edilen eğim, bakı ve yükselti verileri dışındaki diğer veriler raster veriye çevrilmiştir. NDVI analizi yapmak, için 30 m çözünürlüklü Landsat uydu görüntülerinden bant-5 ve bant-4 verileri, birbirlerine oranlanarak, çalışma alanındaki bitki yoğunluğu belirlenmiştir. Bütün faktörlere ait veriler ArcMap kullanılarak yeniden sınıflandırılmış ve bu faktörlere ait heyelan duyarlılık sınıflarına ait alanlar belirlenmiştir. Tablo 4'de her faktöre ait heyelan duyarlılık sınıfları ve bu sınıfların toplam alan içerisindeki oranları verilmiştir.

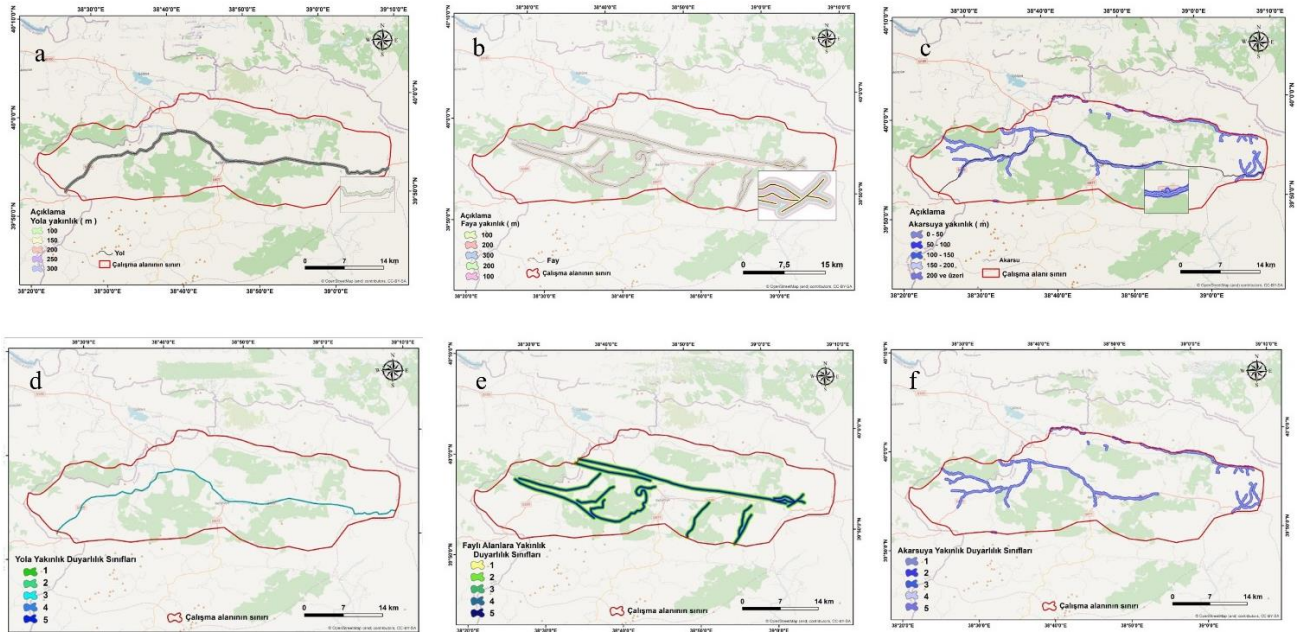
Tablo 4: Heyelan duyarlılık sınıfları ve bu sınıfların toplam alan içerisindeki oranları

Duyarlılık Sınıfları (%)	**Kriterler**							
	Yükseklik	Eğim	Bakı	Litoloji	NDVI	Akarsu	Yol	Fay
Çok Yüksek Duyarlı	7.24	6.37	8.51	4.63	10.03	1.72	0.38	3.29
Yüksek Duyarlı	30.00	15.75	24.19	40.03	21.39	1.60	0.38	3.30
Duyarlı	24.49	25.04	24.08	40.03	32.27	1.66	0.38	3.27
Az Duyarlı	29.97	30.33	21.02	13.42	23.15	1.63	0.37	3.10
Çok Az Duyarlı	0.72	22.48	22.17	1.89	13.14	1.62	0.38	3.10

Tablo 4 incelendiğinde çok yüksek duyarlı alanların; yükseklik faktörüne göre; %7,24; eğime faktörüne göre %6,37; bakı faktörüne göre % 8,51; yağış faktörüne göre %61,67; litoloji faktörüne göre %4,63; NDVI faktörüne göre %10,03; akarsuya yakınlık faktörüne göre %1,72; yola yakınlığa göre %0,38; faya alanlara yakınlığa göre %3,29'luk bir alan kapladığı belirlenmiştir. Bütün faktörlere ve ait heyelan duyarlılık sınıflarını gösteren haritalar Şekil 8'de ve 9'da verilmiştir.



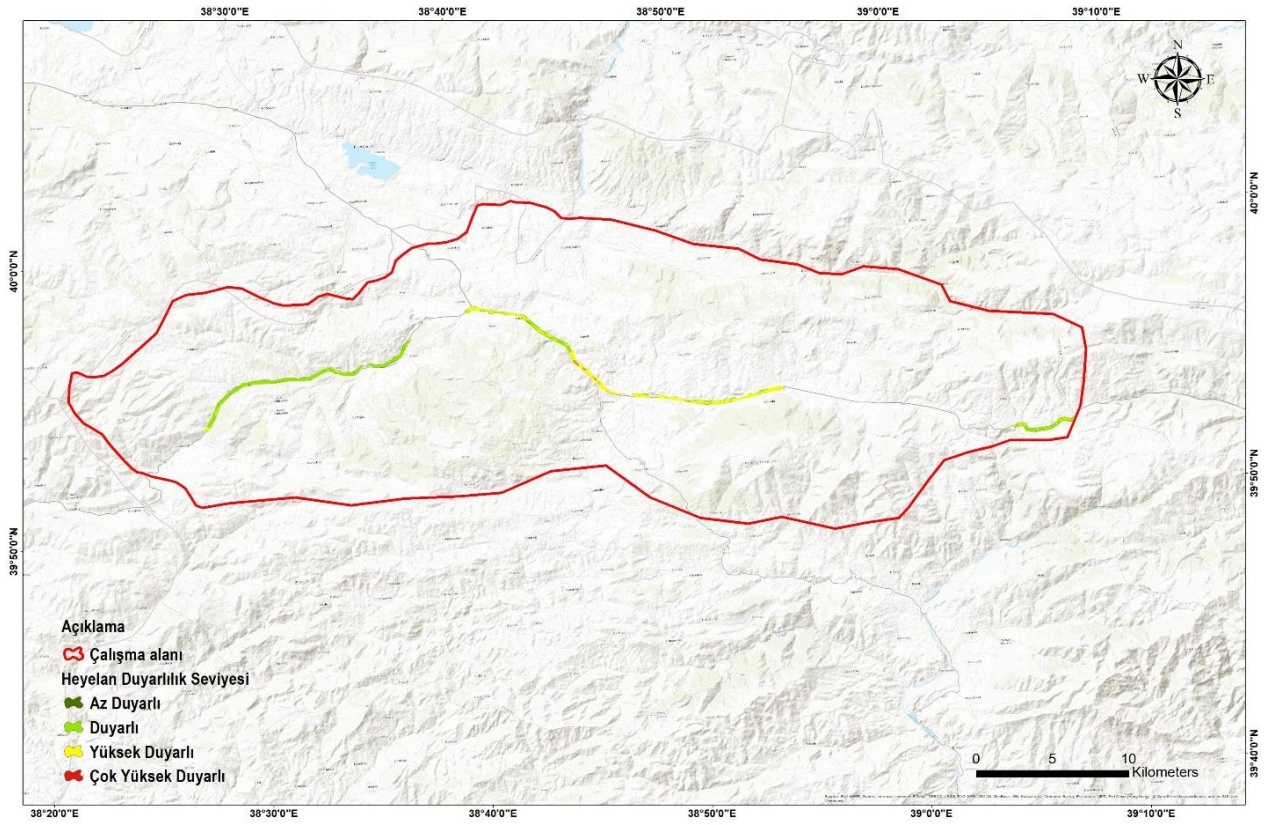
Şekil 8: a) Yükselti faktörü, b) bakı faktörü, c) eğim faktörü, d) yükselti heyelan duyarlılık sınıfları, e) bakı faktörü duyarlılık sınıfları, f) eğim faktörü duyarlılık sınıfları, g) litoloji faktörü, h) NDVI faktörü, ı) yağış faktörü, i) litoloji faktörü duyarlılık sınıfları, j) NDVI uyarlılık sınıfları, k) yağış faktörü duyarlılık sınıfları



Şekil 9: a) Yola yakınlık faktörü, b) faya yakınlık faktörü, c) akarsuya yakınlık faktörü, d) yola yakınlık duyarlılık sınıfları, e) faylı alanlara yakınlık duyarlılık sınıfları, f) akarsuya yakınlık duyarlılık sınıfları

2.3. Erzincan-Sivas yolu heyelan duyarlılık sınıflarının belirlenmesi

Çalışma alanına ait veriler, raster veriye çevrilerek önem derecelerine göre yeniden sınıflandırma işlemi yapılan eğim, bakı, yükselti, yağış, akarsu, yol, fay, litoloji ve NDVI verilerine ArcGIS yazılımının Spatial Analyst Tools aracı kullanılarak ağırlık yüzdeleri atanmış ve heyelan duyarlılık sınıfları haritası oluşturulmuştur (Şekil 10).



Şekil 10: Çalışma alanı heyelan duyarlılık haritası

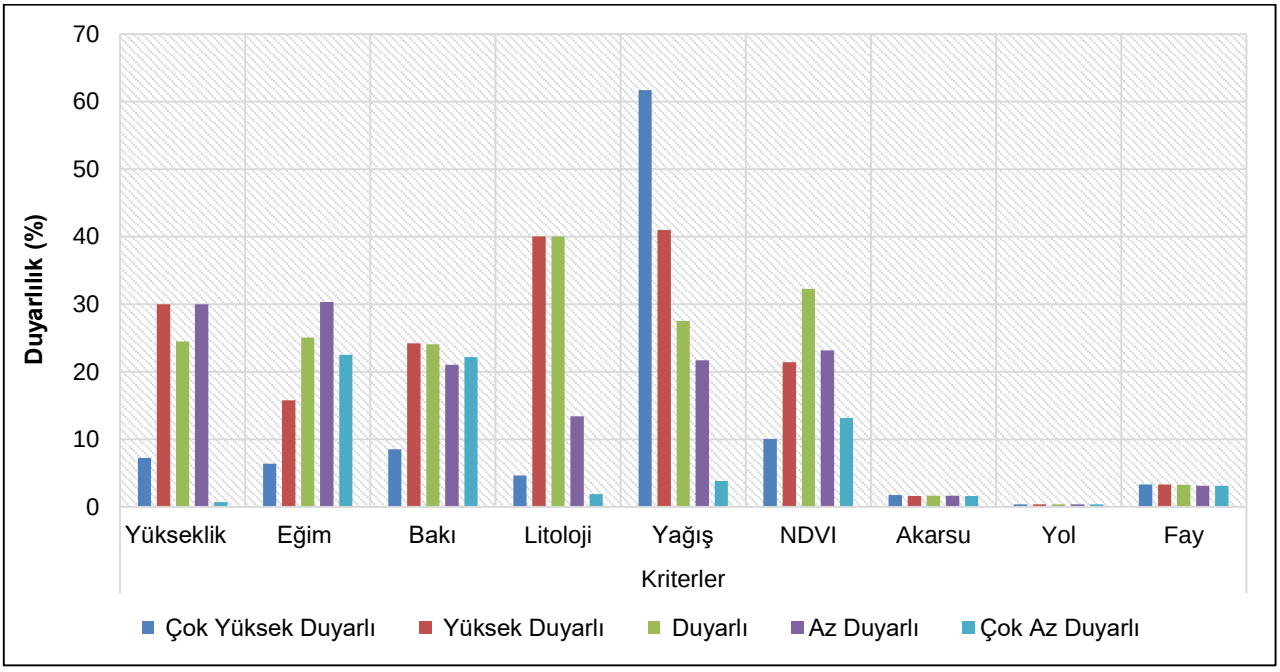
Şekil 8 incelendiğinde, harita üzerinde ayrıntılı olarak gösterilen alanlarda heyelan duyarlılığının arttığı görülmektedir. Tablo 5'de heyelan duyarlılık haritasına ait duyarlılık sınıflarının hektar değerleri ve % olarak toplam alana göre kapladığı alansal değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Heyelan duyarlılık sınıfları ve toplam alana göre oransal değerleri

Duyarlılık Sınıfları	Alan (ha)	%
Çok Yüksek Duyarlı	6.80	0.08
Yüksek Duyarlı	119.97	0.12
Duyarlı	271.26	0.28
Az Duyarlı	26.79	0.06
Çok Az Duyarlı	93258.79	99.54

Tablo 5 incelendiğinde, çalışma alanında duyarlılığı çok yüksek olan alanın 6,8 ha olduğu, toplam alana göre %0,08 oranda bir alan kapladığı, yüksek duyarlılığa sahip 119,97 ha alanın ise % 0,12'lik bir değere karşılık geldiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen bulgulara göre; çok yüksek duyarlı alanlar, yağış faktöründe (%61,67); yüksek duyarlı yerler yağış (% 40,97) ve litoloji faktöründe (%40,03); duyarlı yerler litoloji (% 40,03), NDVI faktöründe (% 32,27), az duyarlı yerler eğim (% 29,97) ve yükseklik faktöründe (% 30,33); çok az duyarlı yerler ise eğim (% 22,48) ve bakı faktöründe (%22,17) oranında olduğu tespit edilmiştir(Şekil 11).



Şekil 11: Duyarlılık sınıflarına göre faktörlerin dağılımı

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma özellikle CBS teknolojilerinin, veri dönüşümü, mekânsal analiz ve sınıflandırma teknikleri gibi imkânlar sağlayarak heyelan vb. gibi afet analizlerinde önemli bir yere sahip olduğu ve ortaya konan analiz sonuçlarının afet yönetimi karar destek sürecine kayda değer ölçüde katkılar sağlayabileceğini ortaya konmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar göre; heyelan duyarlılığı üzerinde sırasıyla; yağış, litoloji, bitki yoğunluğu (NDVI) ve eğim faktörlerinin diğer faktörlere göre daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir. Benzer bulgulara diğer çalışmalarda da ulaşılmıştır. Ataol ve Yeşilyurt (2014) yılında yapılan Çankırı-Ankara karayolu boyunca heyelan risk alanlarının belirlenmesinde litolojik yapının daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ceylan Demirel ve Hastaoğlu (2022) tarafından yapılan Sivas Koyulhisar yöresine ait heyelan duyarlılık analizi yapılan çalışmada eğim parametresinin yüksek duyarlılığa neden olduğu tespit edilmiştir. Balaban (2019)'nın Gölpazarı İlçesi (Bilecik) ve çevresinin heyelan duyarlılığı açısından değerlendirmesini amaçlayarak hazırladığı heyelan duyarlılık analizinde, eğim ve litoloji parametrelerinin önem derecesinin diğerlerine göre fazla olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmadan elde edilen analiz sonuçları, Erzincan-Sivas Karayolu ve çevresindeki 6,39 ha alanın heyelana karşı çok yüksek duyarlılığa ve 120 ha alanın ise yüksek duyarlılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma Erzincan-Sivas karayolu ve yakın çevresi heyelana karşı yüksek duyarlılık gösterirken, karayolundan uzaklaştıkça duyarlılık azalmaktadır. Tüm bulgular dikkate alındığında; çalışma alanında kurulması önerilen erken heyelan mekanizmasının vereceği uyarılar ile heyelan riskini fazla olduğu alanlarda ilgili kurumlar gerekli önlemleri alarak can ve mal kaybı en aza indirgenebilir. Çalışmanın sonucunda özellikle yağış verileri de dikkate alındığında Refahiye ilçesi için heyelan erken uyarı sistemi kurulması, heyelan kaynaklı can ve mal kayıplarının azaltılması açısından önemlidir. 2013-2022 yılları verileri kullanarak elde edilen heyelan yağış eşikleri yeni verilere göre güncellenmelidir. Heyelana hassas yamaçlardaki malzemenin sertleştirilmesiyle zeminin iç direnci artırılabilir. Heyelana duyarlılığı yüksek bölgelerde yapılacak her türlü planlamada detaylı saha incelemesi yapılmalıdır Heyelan oluşumuna uygun litolojik birimlerin bulunduğu alanlarda yamaçların daha da yatıklastırılarak yamaç yükünün azaltılabilir ve taraçalandırılabilir. Bölge genelinde heyelanların olumsuz etkilerini azaltmak ve bölgenin heyelanlara karşı dirençliliğini artırma faaliyetlerine katkısı olması açısından heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmalıdır. Bu haritaların üretilmesi, potansiyel kütle hareketlerinin olabileceği alanların dikkate alınarak uygun yerleşim planlarının hazırlanması ve heyelanın sebep olacağı can ve mal kayıplarının azaltılabilmesi yönünden oldukça önemlidir. Duyarlılık haritasının oluşturulmasında uygun parametre seçimi ve bu parametrelere ait verilerin ve heyelan envanter verisinin doğruluğu da oldukça önemlidir. Duyarlılık parametrelerine ait verilerin konumsal doğruluğu ve çözünürlüklerinin yüksek olması duyarlılık haritalarının doğruluğunu önemli ölçüde etkimektedir. Çözünürlüğü daha yüksek sayısal yükseklik modellerin kullanılması ve insansız hava araçları ile yüksek hassasiyetli Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) oluşturulması bu tür heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulması için gerekli parametrelere ait verilerin elde edilmesinde büyük önem arz etmektedir. İleriye dönük yapılacak heyelan duyarlılığı çalışmalarında, heyelan oluşumlarına etki edebilecek diğer parametrelerin de dikkate alınması ile daha yüksek doğrulukta duyarlılık haritaları üretilmesi mümkün olabilecektir. Heyelan duyarlılık haritaları potansiyel heyelan alanlarının belirlenmesinde önemli olmakla beraber, bu haritalara dayalı olarak oluşturulacak erken uyarı sistemleri ile şiddetli yağış ve toprak nemi değişimleri izlenerek, heyelan oluşumlar daha önceden tespit edilerek gerekli uyarı ve ikazlar yayınlanması olası heyelan zararlarının etkilerini en aza indirecektir. Diğer taraftan, bu çalışma Erzincan-Sivas karayolu güzergâhında bundan sonraki süreçte yapılacak projelendirme işlemlerinde heyelan tehlike ve risklerin azaltılması ve sürdürülebilir kullanım sağlaması açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynaklar

Ahmed, B. (2015). Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides, 12*(6), 1077–1095.

Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides, 9*(1), 93–106.

Akıncı, 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

Aleshzadeh, A., & Yavuz, E. V. (2019, 23–25 Ekim). *Shannon entropisine dayanarak Uzundere heyelan duyarlılık haritasının hazırlanması* [Bildiri Sunumu]. TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye.

Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Heyelan bölgesinin İHA kullanarak modellenmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 2*(1), 17–21.

Althuwaynee, F. O., Pradhan, B., Park, H., & Lee, J. H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena, 114*, 21–36.

Ataol, M., & Yeşilyurt, S. (2014). Çankırı-Ankara karayolu boyunca (Akyurt-Çankırı arası) heyelan risk bölgelerinin belirlenmesi. *Coğrafya Dergisi, 29*, 51–69.

Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology, 65*, 15–31.

Aykır, D. (2023). Yol boyu heyelanlarına bir örnek: Ardahan - Göle heyelanı. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 11*, 52–70. https://doi.org/10.46453/jader.1288368

Balaban, B. (2019). *Gölpazarı (Bilecik) ve çevresinin heyelan duyarlılık analizleri* [Yüksek lisans tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Bulut, F., & Dağ, S. (2012). Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli, Rize, KD Türkiye. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 36*(1), 35–62.

Ceylan Demirel, Ş., & Hastaoğlu, K. Ö. (2022). CBS tabanlı AHP yöntemi kullanılarak oluşturulan Sivas Koyulhisar heyelan duyarlılık haritalarının güvenilirliğinin araştırılması. *Afet ve Risk Dergisi, 5*(2), 715–730. https://doi.org/10.35341/afet.1071728

Chen, W., Li W., Chai, H., Hou, E., Li, X., & Ding, X. (2016). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China. *Environmental Earth Sciences, 75*, Article 63. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4795-7

CRED. (2021). *Disasters in numbers*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds.), *Landslides investigation and mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board, US National Research Council.

Çellek, S. (2020). Heyelana neden olan parametreler: yükseklik örneği. *MTA Dergisi, 162*, 199–227.
Çevik, E., & Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology, 44*, 949–962.
Dağ, S., & Bulut, F. (2012). Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 36*(1), 35–62.
Demir, G. (2018). Coğrafi bilgi sistemleri ile Suşehri (Sivas) heyelan duyarlılık analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8*(1), 96–112.
Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2004). Batı Karadeniz Bölgesi, Türkiye'de heyelan eğilimli bir alanın heyelan duyarlılık haritasını üretmek için bulanık ilişkilerin kullanımı. *Mühendislik Jeolojisi, 75*, 229–250. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.001
Erener, A., & Düzgün, H. S. B. (2010). Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). *Landslides, 7*(1), 55–68.
Fidan, S. (2019). *Türkiye'deki ölüme sebep olan heyelanların coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi
Görüm, T. (2006). *Coğrafi bilgi sistemi ve istatistiksel yöntemler kullanılarak heyelan duyarlılık analizi: Melen Boğazı ve yakın çevresi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi
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
Hafeez, K., Zhang, Y. B., & Malak, N. (2002). Determining key capabilities of a firm using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics, 76*, 39–51.
Hasekioğulları, G. D., & Ercanoğlu, M. (2012). A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: A case study at Yenice (Karabük, NW Turkey). *Natural Hazards, 63*, 1157–1179.
Hepdeniz, K., & Soyaslan, İ. (2018). CBS ve frekans oranı yöntemi kullanılarak Isparta-Burdur dağ yolu heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9*(2), 179–186.
Hepdeniz, K., & Soyaslan, İ. (2024). Examination of the highway between Isparta-Ağlasun (Burdur) in terms of mass movement susceptibility using geographic information systems. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 10*(2), 117–125. https://doi.org/10.22399/ijcesen.305
Ildır, B. (1995, 25–26 Ekim). *Türkiye'de heyelanların dağılımı ve afetler yasası ile ilgili uygulamalar* [Bildiri Sunumu]. 2. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Sakarya, Türkiye.
Kamp, U., Growley, B. J., Khattak, G. A., & Owen, L. A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology, 101*(4), 631–642. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.003
Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences, 52*, 398–408.
Kuruüzüm, A., & Atsan, N. (2001). Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve İşletmecilik Alanındaki Uygulamaları. *Akdeniz İİBF Dergisi, 1*(1), 83–105.
Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2024). *Heyelan Haritaları*. https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/heyelan-haritalari
Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). *2013-2022 Aylık yağış verileri*. https://mgm.gov.tr/site/urunler.aspx?u=tum
Nasery, S. (2022). *CBS, uzaktan algılama ve çok kriterli karar verme analizi tekniklerini kullanarak optimum yüksek hızlı tren güzergâhı seçimi* [Doktora tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi
Öz, T., & Günek, H. (2021). Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE), 44*, 396–412.
Özalp, M., Dehşet, F., Turgut, B., Yıldırımer, S., & İnanlı, E. (2015). Tahrip edilmiş eğimli arazilerde teraslama ve ağaçlandırma çalışmalarının toprak özelliklerini iyileştirmedeki rolü. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 1*(1–2), 74–88.
Özcan, O., Musaoğlu, N., & Şeker, D. Z. (2009, 11–15 Mayıs). *Taşkın Alanlarının CBS ve Uzaktan Algılama Yardımıyla Belirlenmesi ve Risk Yönetimi; Sakarya Havzası Örneği* [Bildiri Sunumu]. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.
Özşahin, E., & Kaymaz, Ç. (2013). Camili (Macahel) biyosfer rezerv alanının (Artvin, KD Türkiye) heyelan duyarlılık analizi. *International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic, 8*(3), 471–493.
Özşahin, E., & Kaymaz, Ç. (2013). Camili (Macahel) Biyosfer Rezerv Alanının (Artvin, Kd Türkiye) Heyelan Duyarlılık Analizi. *Turkish Studies International Periodical For The Languages, Literature and History of Turkish or Turkic. 8*, 471–493.
Özşahin, E. (2014). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Kullanılarak Antakya (Hatay) Şehri'nde Kütle Hareketleri Duyarlılığının Değerlendirmesi. *Ege Coğrafya Dergisi, 23*(2), 19–35.
Özşahin, E. (2015). Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla heyelan duyarlılık analizi: Ganos Dağı örneği (Tekirdağ). *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7*(1), 47–63.
Öztürk, K. (2002). Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 22*(2), 35–50.
Park, S., Choi, C., Kim, B., & Kim, J. (2013). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, *Korea. Environmental Earth Sciences, 68*, 1443–1464.
Reis, S., Nisanci, R., & Yomralioglu, T. (2009). İl bazlı bir mekansal veri tabanının tasarlanması ve geliştirilmesi: Trabzon, Türkiye'deki potansiyel çevresel sorunların analizi. *Environmental Engineering Science, 26*, 123–130.
Saaty, T. L., & Niemira, M. P. (2006). A framework for making a better decision. *Research Review, 13*(1), 1–4.
Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83–98.
Şahin, K. E. (2012). *CBS tabanlı çok kriterli karar verme analizi kullanılarak heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi* [Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi
Tudes, Ş. (2011). Proposal of the analytical model on the evaluation of the geological thresholds in planning: Case study Portsmouth (England). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26*(2), 273–288.
U.S. Geological Survey. (2024a). *Earth Explorer*. U.S. Geological Survey. https://earthexplorer.usgs.gov/
U.S. Geological Survey. (2024b). *Landsat normalized difference vegetation index*. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index

Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *CATENA, 72*(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003

Yılmaz, I. (2009). A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68*, 297–306. https://doi.org/10.1007/s10064-009-0185-2

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 104–114, DOI: 10.21324/dacd.1492289

Depremde Hasar Gören Tarihi Yapıların Temsiliyetine Yönelik Bir Öneri: Pnömatik Sistem Kullanımı

Esra İmamoğlu Yılmaz[1], Güray Yusuf Baş[1], Tayfur Emre Yavru[1], Semih Yılmaz[1,*]

[1]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 61080, Trabzon.*

Özet

2023 yılında Türkiye'de meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonucunda birçok tarihi yapı yıkılmıştır. Bu yapılar şehrin ve şehirlinin kültürel hafızasını temsil ettiği için güçlendirilmesi, yenilenmesi ve onarımı önemli bir gerekliliktir. Ancak, tarihi yapıların yeniden inşa ya da onarım süreçleri, yeni bir yapı yapmaya kıyasla daha maliyetlidir, komplekstir ve uzun süreler alır. Güçlendirme, yenileme ve onarım süreçlerinde, bölgede yaşayanların kültürel hafızalarını taze tutmak amacıyla çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Bu uygulamalara yenilikçi bir öneri olarak, pnömatik sistem kullanımıyla depremde hasar görmüş tarihi yapıların temsiliyeti için model önerisi geliştirilmiştir ve geliştirilen model önerisi uygulama olanakları yönünden irdelenmiştir. Çalışma sonucunda pnömatik sistemin farklı yapı tipleri ve formlarına kısa sürede uygulanabildiği, sistem elemanlarının boyut ve yükseklik kısıtlamasının olmadığı, nakliye ve işçiliğin rasyonel olduğu, sistem malzemelerinin geri dönüşüme uygunluğu sayesinde karbon ayak izinin düşmesine katkı sağlayacağı anlaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler

Pnömatik Sistemler, Habibi Neccar Cami, Latin Katolik Kilisesi

Using Pneumatic Systems in the Representation of Historical Buildings Damaged in Earthquakes: The Case of Hatay

Abstract

As a result of the earthquakes centered in Kahramanmaraş in 2023, many historical buildings were destroyed. Since these structures represent the cultural memory of the city and its inhabitants, the renewal, reinforcement and restoration of these structures are essential. However, reconstruction or restoration of historical buildings are more costly, complex and time-consuming than constructing new ones. In reinforcement, renovation and restoration processes, various practices are implemented to preserve the cultural memories of the local inhabitants. As an innovative proposal within these practices a model that employs pneumatic system technology to represent earthquake-damaged historical structures has been developed and examined for its practical application possibilities. The results of the study indicate that the pneumatic system can be rapidly applied to different types and forms of buildings, that there are no size or height restrictions on system components, that transportation and labor are efficient, and that the recyclability of system materials will contribute to reducing the carbon footprint.

Keywords

Pneumatic Systems, Habibi Neccar Mosque Latin Catholic Church

1. Giriş

Deprem etkisi ile zarar gören/yıkılan mimari yapı stoğu içerisinde tarihi yapılar da mevcuttur. Tarihi yapıların yıkımı, şehrin/bölgenin kültürel birikimini olumsuz etkilemektedir. Tarih boyunca, Dünya'nın birçok farklı yerinde, birçok kültür yapısı depremden zarar görerek tahrip olmuştur. Bu yapıların bir kısmı yenilenmiş, bir kısmı ise yok olarak değerlerini sonraki nesillere aktaramamıştır (Parisi & Augenti, 2013).

Tarihi yapıların yıkıldığı ve yok olduğu deprem sarsıntılarının yaşandığı son afet örneği 2023 yılında Türkiye'nin güneydoğusunda meydana gelen depremlerdir (6 Şubat 2023 günü saat 04.17'de merkez üssü Kahramanmaraş ilinin Pazarcık ilçesi olan 7.7 büyüklüğünde ve saat 13.24'te merkez üssü Kahramanmaraş ilinin Elbistan ilçesi olan 7.6 büyüklüğünde). 6 şehrin doğrudan etkilendiği, çok sayıda can kaybının yaşandığı, şehirlerin bazı bölgelerindeki yapı stokları zemin ya da inşa hataları etkisiyle yıkıldığı veya hasar gördüğü bu depremlerde, Anadolu'da yaşamış medeniyetlerin imzası olan birçok kültür varlığı da tahrip olmuş ve/veya yıkılmıştır (Şekil 1) (Gürbüz & Aslan, 2023). Depremde tahrip olan veya yıkılan kültür varlıklarının yeniden var edilmesi, deprem yıkımı yaşanmış şehirlerin yeniden inşası ve şehir insanlarının toplumsal hayata geri dönmesi süreçlerinde önemli bir gerekliliktir.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (462) 3771668 Faks: +90 (462) 3255588
E-posta: esra_imamoglu@hotmail.com (İmamoğlu Yılmaz E.), gurayyusufbas@ktu.edu.tr (Baş G.Y.), tayfuremreyavru@ktu.edu.tr (Yavru T.E.), semihyilmaz@ktu.edu.tr (Yılmaz S.)

Gönderim Tarihi / Received : 29/05/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 24/12/2024

Çünkü tarihi yapılar şehrin ve şehirlinin kültürel hafızasını temsil etmektedir. Ancak, tarihi yapıların güçlendirme, yeniden inşa ya da onarım süreçleri yeni bir yapı yapmaya kıyasla daha maliyetlidir, komplekstir ve uzun süreler alır. Tarihi yapıların restorasyonu sürecinde şantiye sahasındaki görsel niteliği artırmak ve bölgede yaşayanların kültürel hafızalarını taze tutmak (yapının insanlar tarafından hatırlanması) amacıyla, farklı yöntem ve malzeme kullanılarak tarihi yapı siluetinin canlandırılmaya çalışıldığı çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Ancak, tarihi yapıları yenileme/onarım/güçlendirme süreçlerinde yürütülen çalışmaların birçoğu, deprem afeti sonrasında tecrübe edilmemiştir. Bu çalışmada, deprem afeti sonrasında bölge insanlarının kültürel değerlerini anımsamaları ve şehirlerinin yeni inşa süreçlerinde kent ile bağlarının yaşatılması/canlandırılması amacıyla yıkılan/yok olan tarihi yapıların restorasyon/rekonstrüksiyon süreçlerinde ya da öncesinde, benzer uygulamalara kıyasla uzun süreli kullanım için uygun ve daha ekonomik olan pnömatik sistemler ile temsiliyetine yönelik bir model önerilmesi ve modelin uygulama olanaklarının tartışılmasıdır. Modelin örneklemi olarak Hatay şehrinde bulunan Habibi Neccar Cami ve Latin Katolik Kilisesi binaları seçilmiştir. Bu binaların seçilmesinin nedeni, Hatay şehri ve Anadolu'nun kültürel mirası açısından büyük değer taşımaları ve farklı inançların izlerini yansıtıyor olmalarıdır. Çalışma sonucunda; pnömatik sistemin farklı yapı tipleri ve formlarına kısa sürede uygulanabildiği, serbest biçimli üretime uygun olduğu, sistem elemanlarının boyutlandırılması, nakliyesi ve işçiliğinin rasyonel olduğu, sistem malzemelerinin geri dönüşüme katkı sağlayacağı anlaşılmış, bu sistemin tarihi yapıların temsiliyeti maksadıyla kullanımının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Deprem, Dünya'nın Litosfer katmanında (üzerinde yaşam olan, en dış kabuk) enerji salınımının neden olduğu sarsıntılardır. Depremler oluşum biçimlerine göre tektonik, volkanik, çöküntü ve tsunami olmak üzere dört gruba ayrılır. Bunlardan en yaygın meydana gelen tektonik depremlerdir. Tektonik depremler yer kabuğunu oluşturan levhaların hareketleri sonucunda oluşmaktadır. Sürekli hareket eden levhalarda gerilme ve şekil değiştirme kuvvetleri ortaya çıkar. Bu kuvvet, yer kabuğunun mukavemetinden fazla olduğunda, enerji salınımı ile birlikte depremler ortaya çıkmaktadır (Dowrick, 2009; Gök Nayir, 2016).

Depremin etkileri, deprem merkezinin derinliği, salınan gücün şiddeti, zemin çeşidi vb. faktörlere göre değişmektedir. Sarsıntılardan, depremin oluştuğu bölgede yaşayan canlılar ve yapay çevre olumsuz şekilde etkilenerek can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Zarar gören yapay çevrenin başlıca unsurlarından biri de mimari yapılardır. Deprem sarsıntılarının mimari yapılar üzerindeki etkilerine deprem yükleri denilmektedir. Deprem yükleri, sarsıntı kuvvetine göre yapılara değişik boyutlarda etkimektedir ancak genel kabule göre merkez üssünün 30 km yarıçap alanındaki mimari yapıların etkilendiği varsayılmaktadır (Aytekin, 2006; Dowrick, 2009; Gök Nayir, 2016).

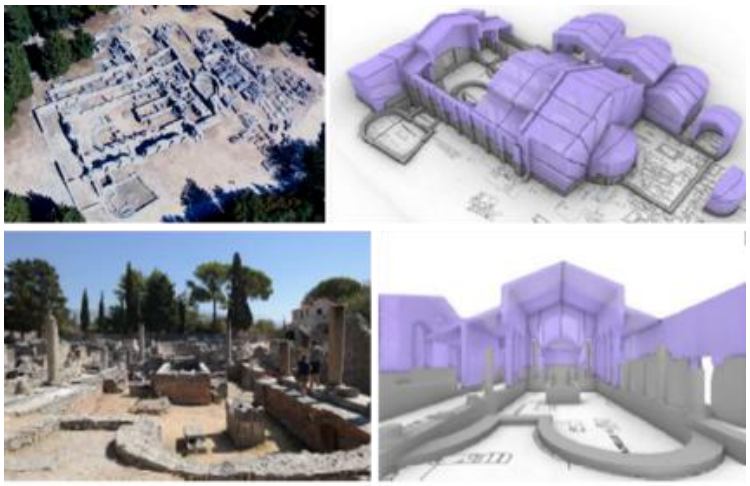
Deprem etkisi ile zarar gören/yıkılan mimari yapı stoğu içerisinde tarihi yapılar da mevcuttur. Tarihi yapılar üzerinde yaşanan bu yıkım, şehrin/bölgenin kültürel birikiminin zarar görmesine neden olmaktadır. Tarih boyunca, Dünya'nın birçok farklı yerinde, birçok kültür yapısı depremden zarar görerek tahrip olmuştur. Bu yapıların bir kısmı yenilenmiş, bir kısmı ise yok olarak değerlerini sonraki nesillere aktaramamıştır (Şekil 1) (Parisi & Augenti, 2013).



Şekil 1: Depremde yıkılan tarihi yapı örnekleri (Malatya Yeni Cami - Gaziantep Kalesi) (Hyetert, 2023)

Deprem vb. nedenlerle zarar gören tarihi yapılar onarım/yenileme/güçlendirme sürecine girerler. Bu süreç, yeni bir yapı inşa etmeye kıyasla daha hassas ve uzun bir dönemdir. Birçok tarihi yapı, bu süreçte kullanılamaz ve temsil ettiği değerleri çevresine aktaramaz. Ayrıca yapımın gereklilikleri nedeniyle çevresine niteliksiz görüntü sunarlar.

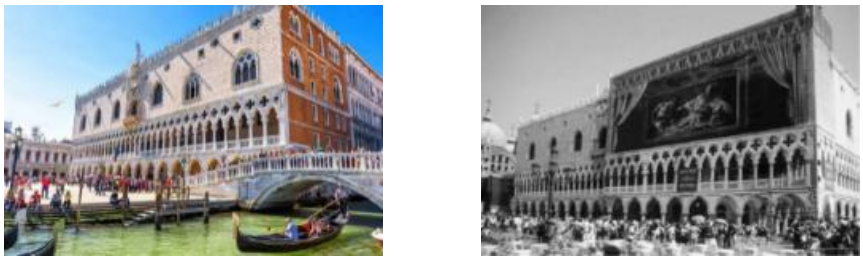
Yenileme, onarım, güçlendirme vb. inşa sürecindeki tarihi yapıların temsiliyetlerini sürdürebilmeleri amacıyla çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Bu uygulamalar kaplama ve canlandırma şeklinde ayrılabilir. Kaplama uygulamalarında çeşitli malzemeler (Tekstil örtü, yansıtıcı, iskele vb.) ile yapının cephesi kapatılır. Canlandırma uygulamalarında ise teknolojik gereçler (Sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, ışıklandırma vb.) kullanılarak yapı kabuğunun animasyonu sunulur. İlgili çalışmalara yönelik başlıca örnekler Tablo 1 ve 2'de gösterilmektedir. Yapılan literatür taramasında, kaplama ve canlandırma uygulamasına ait çeşitli çalışmalar incelenmiştir. Ancak bu çalışmalara yenilik getirebilecek uygulama önerileri konusunda eksiklik mevcuttur. İncelenen çalışmalar içerisinde Andric ve Jaksic (2018)'in çalışması, tarihi yapıların temsiliyeti için yenilikçi bir öneri olarak değerlendirilmiş ve bu çalışmaya ışık tutmuştur.

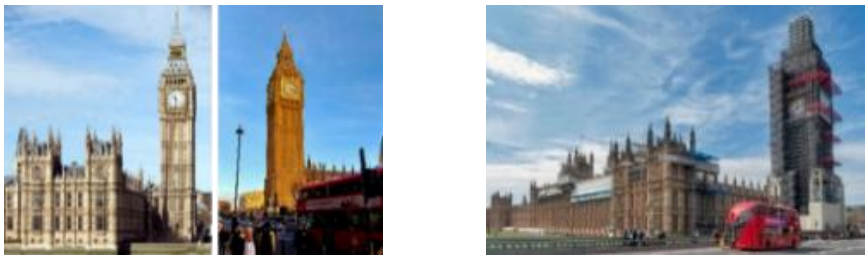


Şekil 2: Manastirine Bazilikası ve Mezarlığı için Andric ve Jaksic (2018) tarafından yapılan temsiliyet çalışması

Andric ve Jaksic (2018) yaptıkları çalışmada, Avrupa'da önemli bir erken Hristiyanlık kompleksi olan Manastirine Bazilikası ve Mezarlığı için bilimsel rekonstrüksiyonlara dayalı, müdahalesiz bir yenileme önerisi geliştirmişlerdir. Oldukça tahrip olmuş bu kompleks yapının temsiliyeti için pnömatik sistem kullanılması tasarlanmıştır (Şekil 2).

Tablo 1: Kaplama ile temsiliyet uygulama örnekleri

Yenileme/Onarım Süreçlerinde Kaplama Uygulamalarına Örnekler

Tekstil örtü ile temsiliyet
Doge's Sarayı, Saint Mark's Meydanı, İtalya: Uzun yıllar süren yenileme sürecinde yapının içerisindeki tabloları ve sanat eserlerini vurgulamak amacıyla cephe, yapının içini tasvir eden tekstil örtü ile kapatılmıştır (Banerjee & Loukaitou-Sideris, 2011).

Yansıtıcı/ayna ile temsiliyet
Palais-Royal, Fransa: Yenilenen yapı nedeniyle sokağın görsel algısının bozulmaması amaçlanmıştır. Bu amaçla inşaat halindeki yapının cephesi ayna ile kapatılarak sokak dokusunda görsel süreklilik sağlanmıştır (LeParisien, 2023).

Geçici iskele ile temsiliyet
Elizabeth Tower (Big Ben), İngiltere: Yapının yenileme sürecinde çevresine, yapının görselini tamamen kapatmayan ve temsilini farklı bir estetik görsel ile destekleyen geçici yapım iskelesi kurgulanmıştır (Londonist, 2023).

Tablo 2: Canlandırma ile temsiliyet uygulama örnekleri

Yenileme/Onarım Süreçlerinde Kaplama Uygulamalarına Örnekler





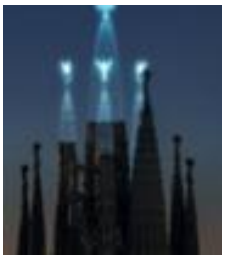
Artırılmış gerçeklik ile temsiliyet

Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları: Tarihi yapıların temsiliyetinde artırılmış gerçeklik (Augmented reality - AR) teknolojisi kullanılmaktadır. Çeşitli AR araçları (telefon, başlık vb.) kullanılarak, yenileme sürecinde olan yapının tahrip olmamış hali, yenilenecek hali veya farklı anlatımlarını görmek mümkün olmaktadır (Archaeo, 2023; Technopark, 2023).




Sanal gerçeklik ile temsiliyet

Sanal Gerçeklik Uygulamaları: Tarihi yapıların temsiliyet süreçlerinde sanal gerçeklik (virtual reality - VR) teknolojisi kullanılmaktadır. Çeşitli VR araçları (gözlük, başlık vb.) kullanılarak yapılar ve çevreleri gezilebilmektedir (Unimersiv, 2023).






Işıklandırma ile temsiliyet

Studio DRIFT: Hollanda merkezli tasarım stüdyosu, uçan kameralar (drone) kullanarak tahrip olmuş tarihi yapıların restorasyon süreçleri sonucunda nasıl görüneceklerini ışıklandırma ile canlandırmaktadır (Drift, 2023).

Membran malzemelerin kullanımı, ilkel dönemlerde barınma ihtiyacı için inşa edilen basit çadırlara dayanmaktadır. Endüstri Devrimiyle birlikte gelişen taşıyıcı sistemler ve malzeme üretim olanaklarıyla birlikte, membran malzemeler farklı tasarım alanlarında kendine yer bulmuştur. Gelişim ve kullanım olanakları yeni imkanları ve arayışları ortaya çıkarmıştır. Bu arayışlardan biri de geniş açıklıkları hafif malzemeler kullanarak, minimum maliyetler ile geçmektir. Bu amaçla çeşitli sistemler geliştirilmiştir ve halen bu konuda birçok araştırma yapılmaktadır. Mevcut sistem kullanımları içerisinde membran malzeme kullanımı öne çıkmaktadır.

Membran malzemeler kullanımlarına göre 'germe membran sistemler' ve 'şişirme (Pnömatik) membran sistemler (pnömatik sistemler)' olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3: Membran sistem sınıflandırması (Bal, 2022; Knippers vd., 2011)

Germe membran sistemler, membranın germe ve çekme malzemelerine (çelik halat vb.) örtü olarak kullanıldığı sistemlerdir. Bu sistemde yapısal yükleri membran örtüyü şekillendiren yapı elemanları almaktadır. Genellikle geniş açıklıklı yapılarda görülen germe membran sistemler; stadyumlar, spor salonları, gösteri salonları vb. mimari eserlerde kullanılmaktadır (Bal, 2022; Knippers vd., 2011) (Şekil 4).



Şekil 4: Germe Membran; Milenyum Kubbesi - Münih Olimpiyat Stadı (Archdaily, 2024)

Pnömatik sistemler, dış çeper malzemenin içerisinde bulunduğu madde veya maddeler sayesinde hacim kazanan yapılardır. Bu sistemlerde içeride bulunan basınç sağlayan madde alındığında kabuk/çeper kendini taşıyamaz (Türkçü, 2003). Birçok farklı disiplinde çeşitli alet, araç veya yapı için kullanılan bu sistemler, inşaat alanında genellikle geçici yapılarda (afet sonrası kapalı alan kurguları, sergi-fuar yapıları vb.), şehir donatılarında, yapı cephelerinde ve kültürel yapılarda görülmektedir.

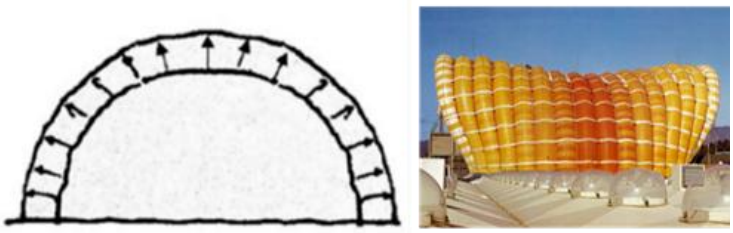
Pnömatik sistemler, inşaat ve yapı alanında ilk olarak 20. Yüzyılın son çeyreğinde kullanıma başlanmıştır. Pnömatik strüktürler, plastik-polimer esaslı membran malzemenin katı, sıvı ve gaz maddeler aracılığıyla basınçlandırılarak mimari mekan oluşturmasıyla ortaya çıkar. Bu sistemin elemanları çoğunlukla gaz (hava) desteğiyle basınçlandırılır. Geniş açıklıkları, diğer yapı malzemelerine kıyasla oldukça hafif malzeme ile geçebilen bu sistemler, kendi içerisinde hava destekli ve çift duvar strüktürler olarak ikiye ayrılmaktadır (Bal, 2022).

Hava destekli strüktür sistemler, hava basınç elemanları kullanarak, kapalı membran örtünün içerisini sürekli belli basınçta tutan ve basınçla membranı taşıtan sistemdir. Bu sistemlerde hava akışının sürekliliği sağlanmalıdır. Bu nedenle yapı tasarımında hava akışını sağlayan araçların uygun yerleri düşünülmelidir. Ayrıca membran strüktürde herhangi bir hava kaçışı veya çıkışı olmamalıdır. Oldukça geniş açıklıkların geçilebildiği bu sistemde, dikme, kolon ve kiriş gibi yapı elemanlarına ihtiyaç duyulmamaktadır (Bal, 2022; Özşen ve Yamantürk, 1991) (Şekil 5).



Şekil 5: Hava destekli strüktür sistem/örnek (Dağılgan, 2019)

Çift duvarlı strüktür sistemler, çift zarın arasında havayı hapsederek elemanın mukavemetini sağlayan kurgudur. Bu sistemde hava akışı sürekli değildir; pnömatik eleman monte edilmeden önce şişirilir. Pnömatik sistemlerin tamamında olduğu gibi, hava kaçışı ve çıkışı önlenmelidir. Geniş açıklıklar geçilebilen çift duvarlı strüktür sistemlerde, hava destekli strüktür sistemlerde olduğu gibi, kolon, dikme ve kiriş gibi yapı elemanlarına ihtiyaç duyulmamaktadır (Şekil 6) (Bal, 2022; Herzog, 1978).



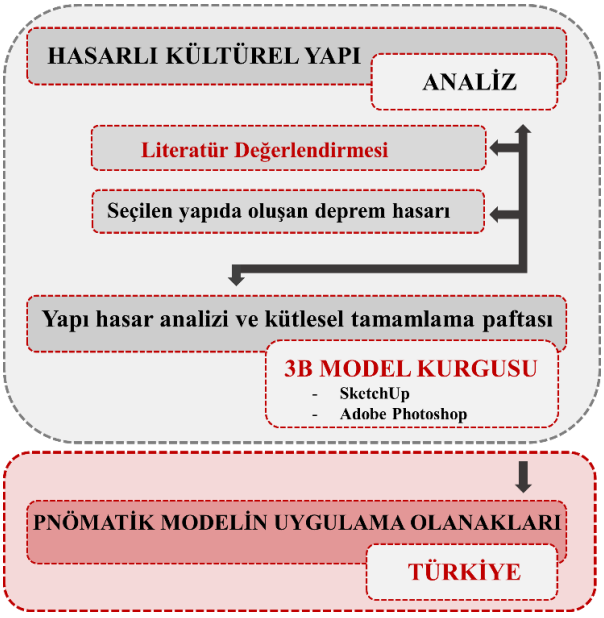
Şekil 6: Çift duvarlı strüktür sistem/örnek (Dağılgan, 2019)

3. Yapılan Çalışmalar

Çalışmanın bu bölümünde; yöntemin açıklanması, temsili model önerisinin sunumu ve modelin uygulanma olanakları yer almaktadır.

3.1. Yöntem

Pnömatik sistemler, yapı malzemelerinin sert ve statik tasarımından yumuşak ve dinamik tasarıma geçiş alternatifi olarak düşünülebilir. Bu nedenle bu sistem hafif, geçici ve esnek tasarımlar için ideal olabilmektedir. Ancak bu sistemlerin kullanım alanları yeterince geliştirilmemiş ve kullanımları diğer yapı malzemelerine kıyasla kısıtlı kalmıştır. Bu sistemin kısıtlı kaldığı, kullanımının olmadığı ve kullanım olanakları için araştırmaların yetersiz kaldığı önemli alanlardan biri tarihi yapıların yenilenme sürecidir. Pnömatik sistemler, tarihi yapıların yenilenme sürecinde, koruyucu kaplamalar, 3 boyutlu görselleştirmeler ve sanal gerçekliklerin yerine kullanım potansiyeli taşımaktadır (Andric & Jaksic, 2018). Bu düşünceden hareketle, deprem yıkımına/tahribatına uğramış tarihi yapıların, pnömatik sistemler ile temsiliyetine yönelik bir model önerisi geliştirilmiş ve sistemin kullanım olanakları irdelenmiştir. Yapılan çalışmada, Hatay şehri örneğinde pnömatik sistemlerin uygulama olanakları Şekil 7'de verilen yöntem üzerinden kurgulanmıştır. İlgili yöntem uygulanırken, pnömatik temsili modellerin değerlendirilmesi adımında, Smith (2010)'da yer alan kriterler, Baş (2019)'da ki sınıflandırma (19 adet değerlendirme kriteri) üzerinden ele alınmıştır.



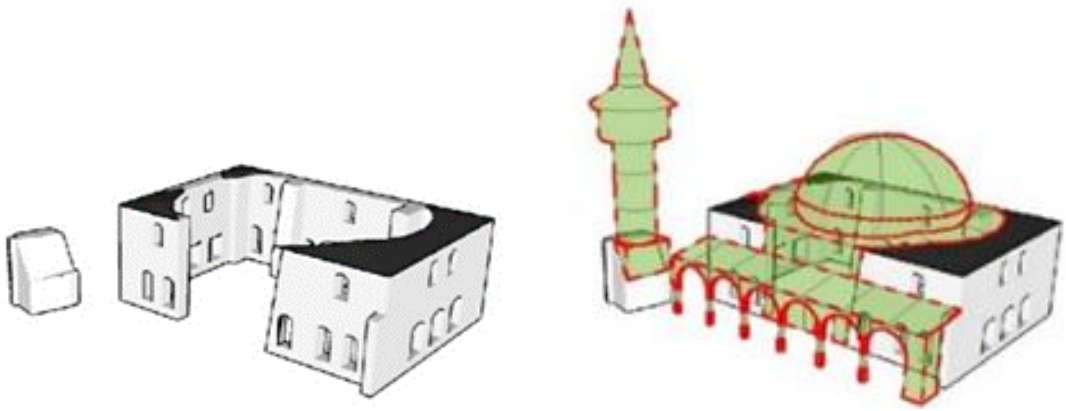
Şekil 7: Çalışma yönteminin anlatımı

3.2. Temsili Model Önerisi

Kent kimliği, bir kenti diğer kentlerden ayıran fiziki, sosyal, kültürel, tarihsel, ekonomik özelliklerin bileşenidir. Kent kimliğini yansıtan sembol yapılar, kentin tanınmasında ve hatırlanmasında önemli rol oynamaktadır. İbadet yapıları, kent dokusunda; mimari özellikleri, konumları, biçim ve boyutları ile dokuyu oluşturan diğer yapılardan farklılaşmaları sayesinde kolaylıkla görülebilmekte ve algılanabilmektedir. Bu da ibadet yapılarını güçlü birer işaret ögesi haline getirmekte, hem turistler hem de yerliler tarafından kolaylıkla hatırlanmalarını sağlamaktadır (Diker & Erkan, 2017).

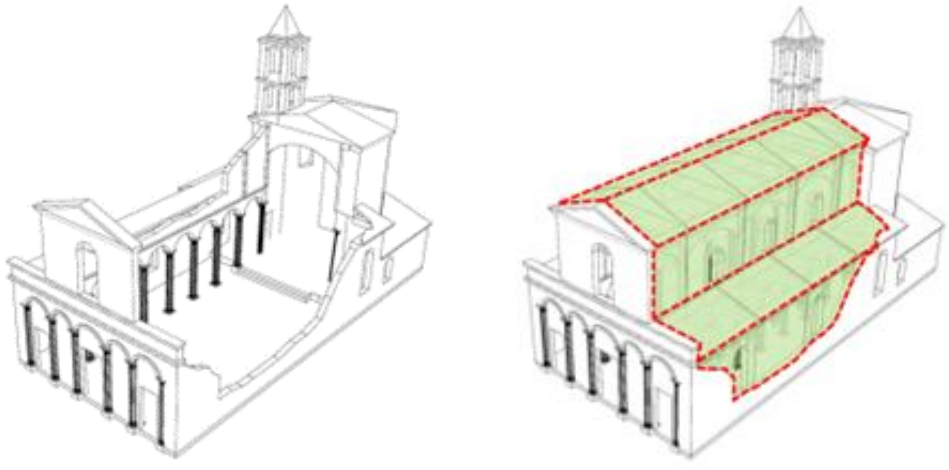
Seçilen tarihi yapılardan Habibi Neccar Cami, Hatay ilinin Antakya ilçesinde 19. yüzyıl sonlarında (aynı alanda ilk cami inşa tarihi 638 yılıdır) inşa edilmiştir. Cami, iki türbe, medrese hücreleri ve şadırvandan oluşan bir külliyede yer almaktadır. Külliyeyi oluşturan yapılar yamuk biçimli bir avlu etrafında toplanmışlardır ve bu yapılar camiye paralel değil, avlunun yamuk planı doğrultusunda konumlanmıştır. Habibi Neccar Cami kesme taş malzemeden üretilmiş yığma taşıyıcı sistemli bir yapıdır. İç mekânın üzeri kubbe ile örtülüdür (Eykay vd., 2015).

Habibi Neccar Camii 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinde yıkılmıştır. Yapının hasar fotoğrafları incelendiğinde giriş yönündeki duvarın (Kuzey cephe) ve kemerin yıkıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kubbenin oturduğu doğu kemeri ve buna bağlı olan tonoz yapısı çökmüştür. Ancak yapının geri kalan duvarlarında yıkılan bölgelere göre daha az hasar gözlemlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8: Habibi Neccar Cami hasar analizi

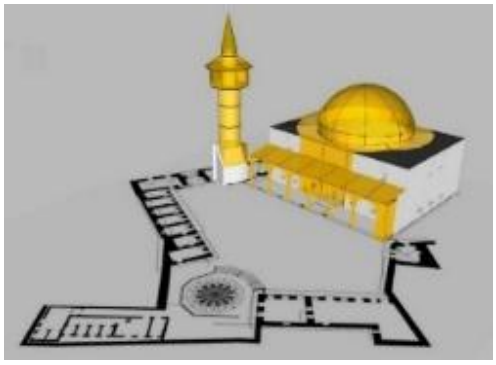
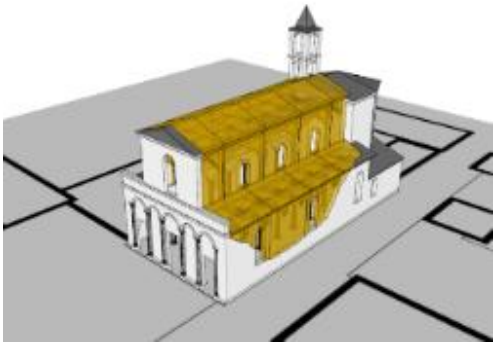
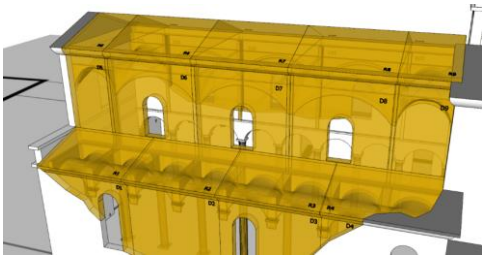
Seçilen diğer tarihi yapı Latin Katolik Kilisesi, Hatay ilinin İskenderun ilçesinde 1871 yılında inşa edilmiştir. 1887 yılında geçirdiği yangından sonra yapının restorasyonu 1901 yılında tamamlanmıştır. Yapı, kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda bazilikal planlıdır. Büyük orta nef ve ana eksenin simetrik olarak iki yanında küçük iki yan nefli kilise, ortada naos, doğuda tek apsis ve batıda bir narteksten oluşmaktadır. Yığma yapım sistemi kullanılarak inşa edilen yapının iç mekânında 14 adet taş sütün yer almaktadır. Yapının iç mekânı, tonoz örtü sistemi ile örtülmüştür. İskenderun Katolik Kilisesi ile ilgili hasar resimleri incelendiğinde yapının güneydoğu (yol tarafı) yönünde yıkıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9: Latin Katolik Kilisesi hasar analizi

Yapılan çalışma kapsamında Habibi Neccar Cami ve Latin Katolik Kilisesi'nin deprem sonrası kütlesel durumu incelenerek, pnömatik sistem elemanlarının kullanılacağı kütlesel kısımlar belirlenmiştir. Geliştirilen model önerisi yalnızca kütlesel bir uygulamayı kapsamaktadır ve gerçekleştirilecek uygulamalar tarihi yapılar üzerinde yürütülmesi gereken detaylı restorasyon uygulamaları hassasiyetine sahip değildir. Bu uygulama ile amaç, yapının restore edilmesi değil restorasyon süreci öncesi yapısal temsiliyetin sağlanmasıdır (Tablo 3).

Tablo 3: Seçilen yapıların temsiliyet modeli önerileri

Habibi Neccar Cami	Latin Katolik Kilisesi
	
	
	
	

Habibi Neccar Cami ve Latin Katolik Kilisesi, Hatay: Yapılan çalışmada, Kahramanmaraş Depremleri sonucunda yıkılan tarihi yapıların yenileme sürecinde temsiliyetine yönelik olarak pnömatik sistem kullanılması önerilmiştir.

3.2. Modelin Uygulama Olanakları

Deprem afetinde hasar gören tarihi yapıların temsiliyetleri için pnömatik sistemlerin Hatay şehrinde kullanım olanaklarını araştıran bu çalışmada; akademik araştırmalar ile yerli ve yabancı uygulama firmalarının verileri irdelenmiştir. Araştırma için Baş (2019)'ın prefabrike konut yapım sistemleri için belirlediği değerlendirme kriterleri kullanılmıştır. Yapılan analizler Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: Sistemin Hatay şehrinde uygulanabilme olanakları

1. Sistem Elemanlarının Üretim Yeri: Pnömatik sistem elemanları şantiye alanı dışında; fabrika ve atölye ortamında üretilmektedir (DBS Engineering, 2023).
2. Sistem Elemanlarının Tipleri: Pnömatik sistem elemanları mimaride taşıyıcı sistem elemanları, yardımcı yapı elemanı ve kalıp elemanı olarak görev alabilmektedir. Sistemin rasyonel ve etkin olması amacıyla, genellikle kabuk ve kaplama elemanları olarak kullanıldıkları görülmektedir (Bal, 2022).
3. Sistem Elemanlarının Malzemesi: Pnömatik sistem elemanları membran örtü ve dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Membran örtünün malzemesi plastik-polimer esaslıdır. En yaygın kullanılan malzemeler; PVC (polivinilklorür), PTFE (politetrafloroetilen) ve ETFE (etilentetra-floroetilen)'dir. Membran örtünün dolgusu için katı, sıvı veya gaz maddeler kullanılmaktadır. Günümüzde maliyet ve hafiflik açısından en yaygın kullanılan dolgu malzemesi ise havadır (Bal, 2022).
4. Yaygın Modüler Boyut: Pnömatik sistem elemanları tasarımcının belirlediği boyutlarda ve standartlarda üretilmeye elverişlidir. Bu nedenle mimari yapılarda yaygın modüler boyut yoktur (DUOL, 2023; Vector Build, 2023).
5. Sistem Elemanlarının Boyut Sınırlaması: Pnömatik sistem elemanlarının boyut sınırlaması, üretim-malzeme olanakları ve montaj imkanları ile sınırlıdır. Bu sistem ile oldukça büyük boyutlu elemanlar üretilebilmektedir (Vector Build, 2023).
6. Sistem Elemanlarının Yükseklik Sınırlaması: Pnömatik sistem elemanlarının yükseklik sınırlaması, üretim-malzeme olanakları ve montaj imkanları ile sınırlıdır. Bu sistem ile oldukça yüksek boyutlu elemanlar üretilebilmektedir (DUOL, 2023).
7. Sistem Elemanlarının Ağırlığı: Pnömatik sistem elemanlarının ağırlığı örtü ve dolgu malzemesinin türüne göre değişmektedir. Bu sistem, en hafif yapım sistemi olarak gösterilebilir (Knippers vd., 2011).
8. Sistem Elemanlarının Geçebildiği Açıklık: Pnömatik sistemler, geniş açıklıklar için üretilmiştir. Bu sistemler ile geniş açıklıklar geçilebilmektedir. Geçilen açıklık boyutlarının 100 m'yi geçtiği örnekler günümüzde mevcuttur (DBS Engineering, 2023; Vector Build, 2023).
9. Sistemin Tasarım Esnekliği: Pnömatik sistemlerde, birleşim detaylandırmaları ve üretim olanaklarının elverişliliği sayesinde, serbest biçimli formlar üretilebilmektedir (Bal, 2022).
10. Sistem Elemanlarının Yüzey Özellikleri: Pnömatik sistemler elemanlarının yüzeyi membran örtüden oluşmaktadır. Membran örtü, türüne göre farklı renklerde ve yüzey kaplamaları ile birlikte üretilebilir. Ancak bu kaplamalar estetik görüntü sağlama amacıyla değil yapı elemanlarını koruma amaçlı yapılan kaplamalardır (DUOL, 2023).
11. Sistemin Elemanlarının Montaj Teknikleri: Pnömatik sistemler elemanları zemine, mevcut yapıya ve birbirlerine farklı tekniklerle birleştirilebilir. Zemine genellikle ankraj elemanları ile birleştirilen bu elemanlar, mevcut yapıya mekanik bağlantı elemanları ile birleştirilmektedir. Sistem elemanları birbirlerine ise ısı, dikiş, mekanik veya yapıştırma yöntemleriyle monte edilebilirler (DUOL, 2023; Erol, 1997).
12. Montaj Araçları: Pnömatik sistem elemanları boyutlarına göre farklı araçlar yardımıyla monte edilebilirler. Küçük boylu elemanlar araçsız da monte edilebilirken; boyutlar büyüdükçe yapı iskeleleri veya vinçler kullanılabilmektedir (DBS Engineering, 2023).
13. Nakliye: Pnömatik sistem elemanları, fabrika veya atölye ortamında üretildikten sonra, şantiye alanında şişirilerek kullanılmaktadır. Şantiye alanına katlanmış örtü olarak götürüldüğü için, basit taşıma araçlarının kullanımı da mümkündür. Bu nedenle sistemin nakliyatı kolay ve maliyeti düşüktür (Asati, 2023).
14. İşçilik: Sistemin inşası kolaydır ve kısa sürede yapılabilir. Ancak sistem elemanlarının kurulumu ve birleştirilmesi için nitelikli iş gücü gereklidir (Asati, 2023).
15. Sistemin Prefabrike Derecesi: Sistem üretim, birleştirme ve yerinde yapım metotları kapsamında yüksek prefabrike dereceye sahiptir.
16. Sistem Elemanlarının Fiziksel Etkenlere Direnci: Pnömatik sistemlerin rüzgar yükü ve diğer çevresel faktörler karşısındaki dayanımı, tasarım parametreleri ve kullanılan malzeme özelliklerine bağlıdır. Özellikle rüzgar yükleri gibi dinamik çevresel etkiler, pnömatik sistemlerde deformasyon ve stabilite sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, rüzgarın türbülans etkilerinin ve akış dinamiğinin dikkate alındığı aerodinamik tasarımlar kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, pnömatik sistemlerin iç basınç dengesi, yük dağılımını optimize ederek yapısal dayanıklılığı artırır. Membran ve esnek malzemelerin yüksek gerilme mukavemeti, bu sistemlerin rüzgar gibi çevresel yüklere karşı daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bunun yanında, nem, sıcaklık değişimi ve UV ışınları gibi diğer çevresel etkiler, pnömatik sistemlerde malzeme bozulmasına yol açabileceğinden, bu tür sistemlerin dış kaplamalarında su itici, UV dayanımlı ve düşük geçirgenlikli malzemeler kullanılması gereklidir. Tüm bu önlemler ve tasarım iyileştirmeleri, pnömatik sistemlerin yapı ve mimarlık uygulamalarında sürdürülebilir ve dayanıklı bir çözüm sunmasını sağlar (Bal, 2022; DUOL, 2023)
17. Sistemin Yangın Güvenliği: Sistem elemanları, yangın dayanımı düşük malzemelerden üretilmektedir. Ancak farklı malzeme, dolgu elemanları ve kaplama kullanımıyla birlikte yangın dayanımı belli dereceye kadar yükselebilmektedir (DUOL, 2023).
18. Sistem Elemanlarının Yalıtım Etkinliği: Sistem elemanları ve ek önlemler ile iyi derecede ısı, ışık, ses ve su yalıtımı sağlanabilmektedir (DUOL, 2023; Bal, 2022).
19. Sistemin Sürdürülebilirliği: Pnömatik sistemler elemanları uzun ömürlü (40 yıla kadar ön görülmektedir), tekrar kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir malzemeleri neticesinde karbon ayak izi düşük ve sürdürülebilir olarak nitelendirilebilir (Bal, 2022; DUOL, 2023).

4. Tartışma ve Sonuçlar

2023 Kahramanmaraş Depremlerinde birçok yapı ağır hasar almış ve yıkılmıştır. Bu yapılar içinde şehirlerin kültürel belleğini oluşturan tarihi yapılarda bulunmaktadır. Tarihi yapılar, kültürel belleğin temsilcisi olarak şehirlerin ruhu için oldukça önemlidir. Şehirlerin yeniden yaşanabilir yerler haline getirilmesi, afetten etkilenen insanların psikolojisinin olumlu yönde etkilenmesi ve kentin kültürel varlığını sürdürebilmesine katkı sağlanması amacıyla tahrip olan/yok olan tarihi yapılar onarılmalı ve/veya yeniden inşa edilmelidir. Tarihi yapıların yeniden inşa süreçleri diğer yapımlara göre daha hassas, nitelikli iş gücü ve uzun zaman gerektirmektedir. Bu süreçte şehirde niteliksiz bir görüntü oluşturmaması ve kültürel hafızanın varlığını sürdürmesi amacıyla çeşitli temsiliyet uygulamaları yapılabilir. Yapılan çalışmada, kültürel mirasın temsiliyeti için restorasyon/rekonstrüksiyon sürecinde pnömatik sistem kullanımına yönelik model önerisi sunulmuş; sunulan model önerisi 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde hasar almış ve kültürel bellek açısından önemli nitelik taşıyan Habibe Neccar Cami ve Latin Katolik kilisesi yapıları üzerinden modellenmiştir. Ayrıca geliştirilen model önerisinin Hatay şehrinde uygulama olanakları irdelenmiştir. Yapılan analizlere göre şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Önerilen sistem bileşenleri, Türkiye'de ve yurt dışında bulunan fabrika veya atölyelerde üretildikten sonra, uygulanacağı çalışma alanına taşınarak kurulum ve montaj işlemleri gerçekleştirilebilir.
- Sistem elemanları modelde önerildiği gibi yapı kabuğu şeklinde kurgulanabilir.
- Sistem elemanlarını oluşturan malzemeler membran örtü ve basınçlı havadır.
- Hasar görmüş yapılarda oluşan tahribatlar, genellikle düzensiz formlara ve değişken boyutlara sahiptir. Bunun yanı sıra, organik formlar ve kübik yapılar gibi farklı türde mimari formlar bulunması nedeniyle, sistem elemanlarının standart modüler boyutlarda üretilmesi mümkün değildir. Bu durum, her bir yapıya özgü, farklı boyut ve formlarda elemanların tasarlanması ve üretilmesini gerektirmektedir. Bu yaklaşım, tahribatın niteliğine ve yapının özgün formuna uygun, esnek bir çözüm sunmayı zorunlu kılmaktadır.
- Sistem elemanları, yapım sürecine olanak sağlamak amacıyla belirli boyutlarda segmentlere ayrılmıştır. Bu yaklaşım, inşaatın gerçekleştirileceği bölgedeki parçaların diğerlerinden bağımsız bir şekilde ayrılmasını ve uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Böylece sistem elemanları, bütünlüğünü koruyarak ve fonksiyonelliğini sürdürülebilir bir şekilde devam ettirerek inşaat sürecine entegre edilebilmektedir.
- Sistem elemanları, boyut ve yükseklik sınırlamaları, taşıma kapasitesi ve geçilebilecek maksimum açıklık gibi teknik parametrelere uygun şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım, sistemin hem yapısal bütünlüğünü hem de işlevselliğini sağlayarak, projenin verimli bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmaktadır.
- Önerilen sistem elemanları, serbest biçimli üretim yöntemlerine ve her yapı için özel olarak tasarlanmış elemanların kurgulanmasına olanak tanıdığı için sistemin uygulanmasında önemli bir esneklik sunmaktadır. Bu özellik, farklı formlara ve yapı gereksinimlerine adapte olmayı kolaylaştırarak, tasarım ve inşaat süreçlerinde daha yenilikçi ve uyarlanabilir çözümler geliştirilmesine imkan tanır.
- Sistem elemanları, önerilen sistemde öngörülen renk paleti ve şeffaflık düzeyine uygun şekilde üretilebilir. Ancak, mevcut yapılarda bulunan rölyef, süsleme gibi detaylı dekoratif uygulamalar, önerilen sistemin teknik ve üretim olanaklarıyla gerçekleştirilememektedir. Bu durum, sistemin işlevsellik ve estetik arasındaki dengeyi sağlamaya yönelik belirli kısıtlamalar içerdiğini göstermektedir.
- Sistem elemanları, yapıların mevcut bileşenlerine zarar vermeden, mekanik bağlantı yöntemleriyle monte edilebilir. Elemanlar arasındaki birleştirme ise, dikiş veya yapıştırma gibi teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım, hem mevcut yapıya müdahaleyi minimize etmekte hem de sistem elemanlarının kendi aralarında güçlü ve dayanıklı bir bütünlük oluşturmasını sağlamaktadır.
- Sistem elemanları, yapı iskelesi veya basit vinçler gibi erişim ve kaldırma ekipmanları kullanılarak kolaylıkla yerleştirilebilir. Bu yöntem, montaj sürecinin hızlı ve pratik bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanırken, aynı zamanda yerleştirme işlemlerinin güvenli ve kontrollü bir şekilde yapılmasını sağlar.
- Sistem elemanları kamyon veya kamyonet gibi büyük yapı elemanlarına kıyasla basit nakliye araçlarıyla şantiye alanına getirilebilir. Şantiye alanında hava basıncı ile şişilecek elemanlar, nitelikli işçiler aracılığıyla yerleştirilir. Bu süreç, inşaat yapım sürelerine göre oldukça kısa sürede tamamlanabilir.
- Önerilen modele göre yapıların mekan olarak kullanımı ön görülmemektedir. Bu nedenle elemanların yalıtım etkinliği tartışma konusu dışında bırakılmıştır.
- Sistem elemanlarının fiziksel etkenlere karşı direnci sınırlıdır, ancak herhangi bir deformasyon durumunda, elemanlar kolayca onarılabilir ve yeniden düzenlenebilir. Bu özellik, sistemin esnekliğini artırarak, küçük hasarların hızla giderilmesine ve yapısal bütünlüğün korunmasına olanak tanır.

Bu çalışma, deprem sonrası yıkıma uğrayan tarihi yapıların yenilikçi bir yöntem ile (pnömatik sistem kullanılarak) geçici/kalıcı temsil edilmesine yönelik bir öneridir. Çalışma, bu sistemin uygulama olanaklarını pnömatik sistem elemanlarının yerel/ülke bazında üretim kabiliyeti üzerinden tartışmakta olup şantiye sahasında uygulanması kapsam dışında tutulmuştur. Bu amaca yönelik çalışmalar devam eden süreçte ele alınacaktır.

Teşekkür

Makaleyi değerlendiren ve önerileri ile makalenin bilimsel değerine katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederiz. Bu çalışma, "3rd International Civil Engineering & Architecture Conference (ICEARC'23)" programında sunulan "Pneumatic systems in the representation of earthquake-damaged cultural heritage" başlıklı bildirinin geliştirilmesi yöntemiyle yapılmıştır.

Kaynaklar

Andric, D., & Jaksic, N. (2018, May 22–24). *Adaptive pneubotics in the service of heritage presentation: The cemetery of Manastirine, Salona* [Conference presentation]. S.ARCH 2018: 5th International Conference on Architecture and Built Environment with AWARDs, Venice, Italy.

Archaeo. (n.d.). *Augmented reality tour*. 20 Ekim 2023'de https://www.archaeo-now.com/english/ar-tour/ adresinden alındı.

Archdaily. (n.d.). *Germe membran sistemler*. 1 Aralık 2024'te https://www.archdaily.com/ adresinden alındı.

Asati. (n.d.). *Always the Innovator. Never the Imitator*. 14 Aralık 2023'de https://www.asati.com/index adresinden alındı.

Aytekin, İ. (2006). *Donatısız ve sarılmış yığma yapıların deprem davranışlarının incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Bal, Y. (2022). *Geçmişten günümüze Dünya'da ve Türkiye'de pnömatik sistemlerin incelenmesi ve değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Banerjee, T., & Loukaitou-Sideris, A. (Eds.). (2011). *Companion to urban design.* Routledge.

Baş, G. Y. (2019). *Prefabrike konut üretiminde kullanılan yapım sistemlerinin malzeme türüne göre analizi* [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Dağılgan, S. (2019). *Geniş açıklıkların örtülmesinde kullanılan taşıyıcı sistem seçimi için bir model önerisi* [Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

DBS Engineering. (n.d.). *DBS Engineering*. 10 Aralık 2023'de https://dbs-engineering.com/ adresinden alındı.

Diker, M., & Erkan, N. Ç. (2017). Kent kimliğinde ibadet yapıları: Antakya örneği. *Planlama, 27*(2), 180–192. https://doi.org/10.14744/planlama.2017.74755

Dowrick, D. J. (2009). *Earthquake resistant design and risk reduction.* John Wiley & Sons.

Drift. (2022, 3 Kasım). *DRIFT'ten Dronlarla Tamamlanan Tarihi Eserler*. 23 Ekim 2023'de https://www.arkitera.com/haber/drifften-dronlarla-tamamlanan-tarihi-eserler/ adresinden alındı.

DUOL. (n.d.). Çağdaş yapı sistemleri. 12 Aralık 2023'de https://duol.eu/tr adresinden alındı.

Erol, A. İ. (1997). *Yapılarda taşıyıcı sistemler.* Zonguldak Karaelmas Üniversitesi.

Eykay, İ., Dalgın, T., & Çeken, H. (2015). İnanç turizmi potansiyeli açısından Antakya'nın değerlendirilmesi. *Journal of Life Economics, 2*(2), 59–74. https://doi.org/10.15637/jlecon.66

Gök Nayir, T. (2016). *Elazığ bölgesindeki geleneksel yapıların deprem performanslarının incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Gürbüz, İ. A., & Aslan, B. (2023). Kahramanmaraş depreminde hasar tespit çalışmaları üzerine bir değerlendirme. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 2*(4), 180–195.

Herzog, T. (1978). *Pneumatic structures: A handbook of inflatable architecture.* Oxford University Press.

Hyetert. (2023, 15 Şubat). *Kahramanmaraş merkezli depremlerin ardından yıkılan tarihi yapılar*. 18 Ekim 2023'de https://hyetert.org/2023/02/15/binlerce-yillik-tarih-yok-oldu-kahramanmaras-merkezli-depremlerin-ardindan-yikilan-tarihi-yapilar/ adresinden alındı.

Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., & Lienhard, J. (2011). *Construction manual for polymers + membranes: Materials, semi-finished products, form finding, and design.* Birkhäuser.

LeParisien. (2022, 27 Ekim). Le chantier du Louvre des antiquaires est masqué par des façades réfléchissantes qui offrent une perspective inédite. 19 Ekim 2023'de https://www.leparisien.fr/paris-75/paris-un-miroir-geant-signe-jean-nouvel-pour-faire-oublier-le-chantier-du-louvre-des-antiquaires adresinden alındı.

Londonist. (2019, 29 Mayıs). The Big Ben On HP Sauce Is Now Covered In Scaffolding. 23 Ekim 2023'de https://londonist.com/london/food/hp-big-ben-label-scaffolding adresinden alındı.

Özşen, E. G., & Yamantürk, E. (1991). *Taşıyıcı sistem tasarımı.* Birsen Yayınevi.

Parisi, F., & Augenti, N. (2013). Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks. *Engineering Failure Analysis, 34*, 735–760. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.005

Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction.* John Wiley & Sons.

Technopark. (2023). *VR in tourism & heritage preservation*. 18 Ekim 2023'de https://www.technopark.ps/arvr/en/article/26/VR-in-Tourism--Heritage-Preservation adresinden alındı.

Türkçü, H. Ç. (2003). *Çağdaş taşıyıcı sistemler.* Birsen Yayınevi.

Unimersiv. (2017, 13 Ocak). *Explore ancient Rome in virtual reality*. 19 Ekim 2023'de https://unimersiv.com/ancient-rome-virtual-reality/ adresinden alındı.

Vector Build. (n.d.). *Inflatable buildings and structures*. 12 Aralık 2023'de https://www.vector-build.com/eng.htm adresinden alındı.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 115-134, DOI: 10.21324/dacd.1527242

MUSLE Yöntemi Kullanılarak Selin Sebep Olduğu Toprak Erozyonunun Tahmin Edilmesi: İğneada (Kırklareli) Seli Örneği (5.9.2023)

Emre Özşahin[1,*], Mikayil Öztürk[2]

[1]*Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 59030, Tekirdağ.*
[2]*Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 59030, Tekirdağ.*

Özet

Türkiye'nin Trakya Yarımadasındaki Istranca Yöresinin Karadeniz aklanındaki akarsu havzalarında aşırı şiddetli yağışlara bağlı olarak 5.9.2023 tarihinde katastrofik bir sel gerçekleşmiştir. Şiddetli toprak erozyonuna sebep olan bu sel, akarsularda biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda ağır bir sediment birikimine yol açmıştır. Resmi kayıtlara göre selin etkisi en fazla Değirmen Deresi havzasında hissedilmiştir. Bu çalışmada, Değirmen Deresi havzasında 5.9.2023 tarihinde meydana gelmiş selin sebep olduğu toprak erozyonunun tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Böylece dramatik sonuçları olan bu problemin hem potansiyel konumu hem de şiddeti hakkında fikir vermesi bakımından önemli bilgiler elde edilmiştir. Selin sebep olduğu toprak kaybının hesaplanması ve erozyon risk haritalarının oluşturulması için MUSLE modeli tercih edilmiştir. Model, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) temelli ArcGIS toprak erozyon aracı kullanılarak uygulanmıştır. Sonuçta Değirmen Deresi havzasındaki selin sebep olduğu toprak erozyonunun daha çok eğim ve yağış artışının belirgin olduğu üst havzadaki akarsu vadilerinde, etkisinin ise akarsularda biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda olduğu tespit edilmiştir. Model sonuçlarına göre selin yaşandığı tarihte 195,78 ton/gün miktarda sedimentin geldiği tahmin edilmiştir. Bu sonuç sellerin sebep olduğu toprak erozyonunun yaşanmış bir olay ölçeğinde modellenmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca bu çalışmanın sonuçları, sellerin sebep olduğu toprak erozyonu riskinin gerçek nedenlerini ele almaya yönelik bölgesel politikalar geliştirmek için kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler
Sel, Erozyon, MUSLE, CBS, Değirmen Deresi

Estimation of Soil Erosion Caused by Flash Floods Using MUSLE Method: The Case of Igneada (Kırklareli) Flash Flood (5.9.2023)

Abstract

A catastrophic flood occurred on 5.9.2023 due to extremely heavy rainfall in the river basins on the Black Sea catchment area of the Istranca Region in the Thracian Peninsula of Türkiye. As a result of these rainfalls, a catastrophic flash flood occurred on 5.9.2023. This flash flood, which caused severe soil erosion, also led to a heavy accumulation of mud in areas close to the valley floor in the lower basin where deposition in the rivers increased. According to official records, the impact of the flash flood was felt the most in the Degirmen river basin. In this study, it was aimed to estimate the soil erosion caused by the flash flood that occurred on 5.9.2023 in the Degirmen river basin. Thus, important information was obtained in terms of giving an idea about both the potential location and severity of this problem with dramatic consequences. The MUSLE model was preferred for the calculation of soil loss caused by flash floods and the creation of erosion risk maps. The model was applied using ArcGIS soil erosion tool based on Geographic Information Systems (GIS). As a result, it was determined that soil erosion caused by flash floods in the Degirmen river basin is mostly in the river valleys in the upper basin where the increase in slope and precipitation is significant, and its effect is in the areas close to the valley floor in the lower basin where deposition increases in the rivers. According to the MUSLE model results, 195,78 tons/day of sediment was estimated to have arrived at the time of the flash flood. The result of the study emphasize the importance of modeling soil erosion caused by flash floods at the scale of a lived event. Furthermore, the results of this study can be used to develop regional policies to address the real causes of soil erosion risk caused by flash floods.

Keywords
Flash Flood, Erosion, MUSLE, GIS, Degirmen River

1. Giriş

Kurak ve yarıkurak bölgelerde kaynağını dağlık alanlardan alan akarsu havzalarında meydana gelen seller, uzun süreden beri dünyanın en riskli doğal tehlikelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Othman vd., 2023). Son yıllarda iklim değişikliğinin etkisiyle geçmişe göre daha sık görülen bu doğal afet, canlı hayatına zarar verdiği gibi altyapı hasarına da yol açmaktadır (Abu El-Magd vd., 2021).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (282) 2502696 Faks: +90 (282) 2509925
E-posta: eozsahin@nku.edu.tr (Özşahin E.), mkylozturk@gmail.com (Öztürk M.)
Gönderim Tarihi / Received : 02/08/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 30/11/2024

Özellikle uzun süren kurak bir dönemden hemen sonra meydana gelen aşırı yağışlar, üst toprağın geçirimsizliğini arttırarak yüzeysel akışı desteklemektedir (Ocak & Bahadır, 2024). Böylece debisi çok düzensiz bir şekilde değişen ve çok hızlı hareket eden su akımları oluşmaktadır (Özcan, 2006; Korkanç & Korkanç, 2006; Polat vd., 2023). Sel olarak tanımlanan bu su akımları, yüksek kinetik enerjilerinden dolayı şiddetli toprak erozyonuna sebep olmaktadır (Borga vd., 2014). Bunun sonucunda sel kaynaklı toprak erozyonu ortaya çıkmakta ve akarsu havzasında eğimin azaldığı alt kesimlerde önemli miktarda sediment ve enkaz birikimi gerçekleşmektedir (Özdemir & Kaymak, 2022). Dolayısıyla sel kaynaklı toprak erozyonu, büyük ve kalıcı toprak kayıpları gibi tahripkâr sonuçlar da doğurmaktadır (Kaffas vd., 2022).

Sel kaynaklı toprak erozyonu, başta coğrafyacılar ve jeomorfologlar olmak üzere farklı disiplinlere ait araştırmacıların en çok ilgi gösterdiği doğal problemlerdendir (García-Ruiz vd., 2013; Zhang vd., 2024). Akdeniz havzasında yaygın olarak izlenen (Aronica vd., 2012) bu doğal problem, kıyıdan itibaren yükselen dağlık alanlardan kaynağını alan akarsu havzalarında daha baskın bir şekilde görülmektedir (Víg vd., 2023). Ancak Akdeniz havzasının topografya, toprak ve yüzeysel akış koşullarındaki yerel farklılıklar nedeniyle dünyanın en karmaşık peyzajlarından birine sahip olması ve bunun da toprak derinliği, infiltrasyon kapasitesi, eğim ve bitki örtüsü özelliklerinde son derece hızlı değişikliklere yol açması, bu fenomenin dramatik etkilerinin anlaşılması ve incelenmesi bakımından büyük bir zorluk taşımaktadır (Thornes, 2002). Bu zorluğu aşmak için basit veri gereksinime sahip olan ve havza ölçeğinde daha doğru sonuçlar veren Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tekniklerine dayalı modellemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Berteni vd., 2021).

Akdeniz havzasındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun değerlendirilmesi bakımından şu anda genellikle USLE (Universal Soil Loss Equation) ailesine ait ampirik modellerden olan MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) ve RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) büyük bir ilgi görmektedir (Özşahin, 2023a). Birbirinin devamı şeklinde olan bu modeller Türkçe literatürde sırasıyla ETKE (Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği), METKE (Modifiye Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği) ve YETKE (Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği) şeklinde kısaltılarak kullanılmaktadır (Erpul, 2011). Olay bazlı çalışan MUSLE, akarsu havzalarındaki toprak erozyonunu tahmin etmek için USLE yöntemindeki yağış faktörü yerine akım faktörünün dikkate alındığı bir erozyon modelidir (Williams, 1975). Özellikle fırtınalı sağanak yağışların etkili olduğu dönemlerde optimum sonuçlar veren (Özsoy, 2007) bu yöntemin küçük akarsu havzalarında (0,5-2227 km²'den küçük) meydana gelen sıra dışı olaylar için toprak erozyonunu oldukça doğru bir şekilde tahmin ettiği bildirilmiştir (Williams ve Berndt, 1977). Yaşanmış tek bir örnek olaya ait verilerin, olağanüstü olayların yaşanmadığı dönem verileriyle kıyaslanması için oldukça büyük avantaj sağlayan bu model, Akdeniz havzasında İtalya (Berteni vd., 2021), Yunanistan (Kaffas vd., 2022), Cezayir (Millares vd., 2020) ve Tunus (Khemiri & Jebari, 2022) örneklemlerindeki bazı akarsu havzalarında meydana gelen sel kaynaklı toprak erozyonunun belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Ancak benzer çalışmalar Doğu Akdeniz Havzasında yer alan Türkiye'de ise hiç yapılmamıştır. Bu durum literatürde önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Türkiye'nin Trakya Yarımadasındaki Istranca (Yıldız) Yöresinin Karadeniz aklanındaki akarsu havzalarında 5.9.2023 tarihinde meydana gelen şiddetli sağanak yağışlar neticesinde sel yaşanmıştır. Kısa zamanda doğal afet karakteri kazanan bu olay, Değirmen Deresi havzasında eğimin azaldığı kesimlerde can ve mal kaybına sebep olan su baskınlarına ve suyla taşınan maddelerin birikimine yol açmıştır (Kırklareli Valiliği, 2023). Değirmen Deresi havzasında yaşanan bu sel afetinin sebep ve sonuçları yakın zamanda yayınlanmış bir çalışmayla bilimsel olarak değerlendirilmiş (Özşahin & Öztürk, 2024) olmasına rağmen sel kaynaklı toprak erozyonu konusunda herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmada, Değirmen Deresi havzasında 5.9.2023 tarihinde gerçekleşen sel kaynaklı toprak erozyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylece sel kaynaklı toprak erozyonunun hem potansiyel konumu hem de şiddeti hakkında fikir vermesi bakımından önemli bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışma, sel kaynaklı toprak erozyonu riskinin gerçek nedenlerini ele almaya yönelik bölgesel politikalar oluşturmak için sağlam bir temel strateji geliştirilmeye yardımcı olabilecek özgünlüğe sahiptir.

2. Materyal ve Yöntem

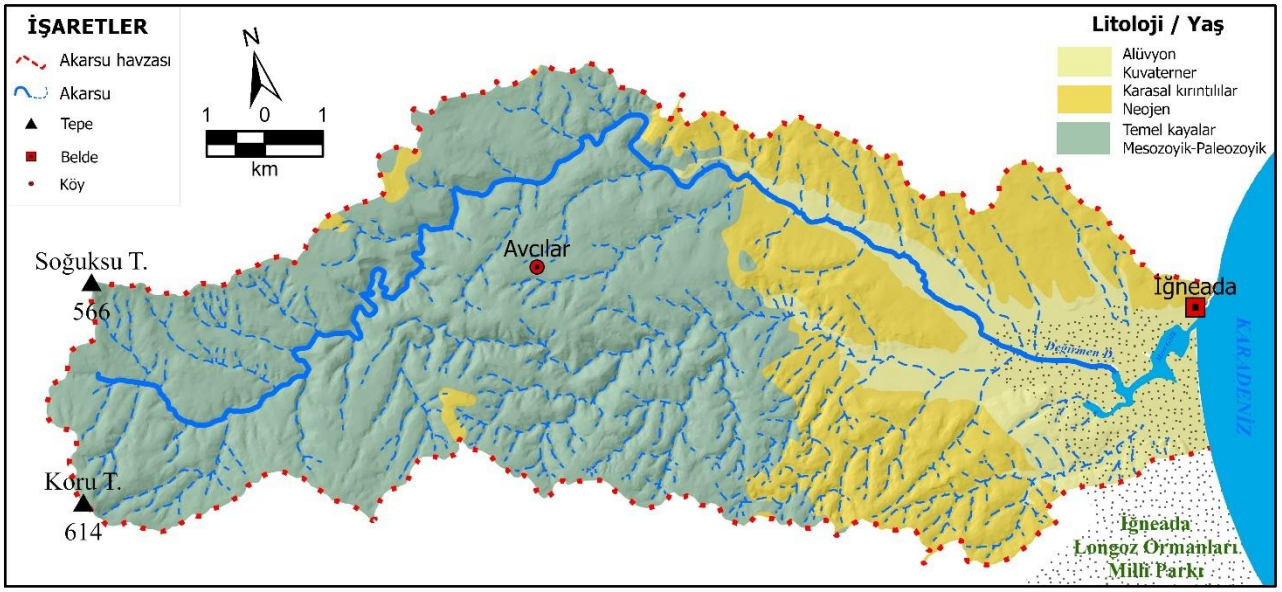
2.1. İnceleme alanı

İnceleme alanı, sel kaynaklı toprak erozyonunun yaşandığı Değirmen Deresi havzasıdır. Havza alanı, Türkiye'nin Trakya Yarımadasında konumlanmaktadır (Şekil 1). Yüzölçümü 61.1815 km² olan inceleme alanının mansap kısmı aynı zamanda İğneada Longoz Ormanı Milli Parkı sınırları içerisinde kalmaktadır (Şekil 1).

İnceleme alanında ana akarsu kolunun mansabından memba kısmına doğru ilerledikçe yaşlıdan genç birimlere geçişin olduğu litolojik özellikler hakimdir (Şekil 2). Temel arazinin Istranca masifine ait Paleozoyik yaşındaki şist ve gnays türünden kayaçlar ile Mesozoyik yaşındaki flişlerden oluştuğu inceleme alanında, akarsu havzasının alt kesimleri Neojen'e ait karasal kırıntılılarla örtülmüştür. İnceleme alanında ana akarsu kolunun vadi tabanları ve kıyı kesimlerinde ise Kuvaterner yaşındaki birimler yayılış göstermektedir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002).



Şekil 1: İnceleme alanının lokasyon haritası

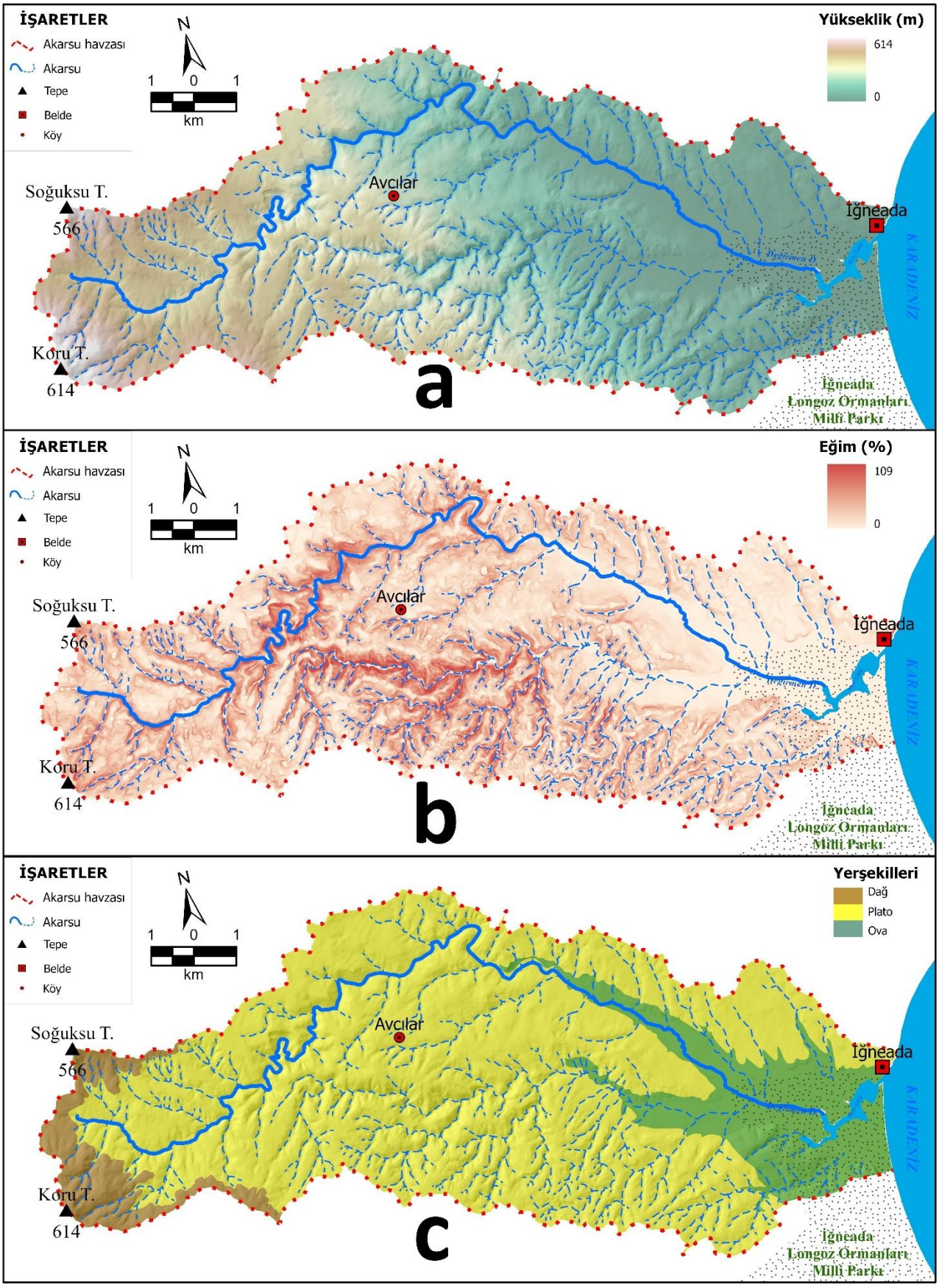


Şekil 2: İnceleme alanının litoloji haritası (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

En alçak noktası deniz seviyesi olan inceleme alanının, en yüksek noktası Istranca Dağları üzerinde yer alan Koru Tepedir (614 m). Buna göre yükselti farkının 614 m olduğu inceleme alanının ortalama yükseltisi 176,93 m'dir (Şekil 3a). Kıyıdan iç kesimlere doğru eğimin belirgin bir şekilde arttığı inceleme alanı, daha çok eğimli yamaçların egemen olduğu bir topografyaya sahiptir (Şekil 3b). İnceleme alanında ana yerşekillerinin tamamını görmek mümkündür (Şekil 3c). Miyosen aşınım yüzeyine karşılık gelen Istranca Dağları, inceleme alanındaki başlıca ana yerşeklidir (Kurter, 1978; 1982). Bu dağ, deniz yönünde Üst Pliyosen yaşlı aşınım yüzeyi şeklinde gelişmiş bir plato tarafından sınırlandırılmaktadır. İnceleme alanındaki platonun akarsuyun mansap kısmına doğru olan kesimlerindeki dolgu alanları karasal ova, ana akarsu kolunun kıyıya ulaştığı sahalar ise kıyı ovası karakteri göstermektedir (Turoğlu, 1997).

İnceleme alanında genel olarak yaz mevsiminin az yağışlı, kış mevsiminin ise serin ve yağışlı olduğu iklim özellikleri hakimdir (Turoğlu, 1997). Buna göre yıllık ortalama sıcaklık 12,4 ˚C ve ortalama yıllık toplam yağış miktarı ise 797,3 mm'dir. İnceleme alanında kıyıdan iç kısımlara doğru gidildiğinde sıcaklık ve yağış aylık olarak değişmekle birlikte nispeten azalmaktadır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).

İnceleme alanında flüvyal süreçler hakimdir. Yörenin iklim özelliklerine bağlı olarak akarsularda kış mevsiminde seviye yükselmesi, yaz mevsiminde ise seviye alçalması görülmektedir (Tablo 1). Diğer yandan akarsularda seviye yükselmesi maksimum değerine şubat, minimum değerine ise ağustos ve eylül aylarında erişmektedir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2015). Dolayısıyla inceleme alanındaki akarsu akımları Yağmurlu-Akdeniz rejim tipinin temel özelliklerini taşımaktadır.



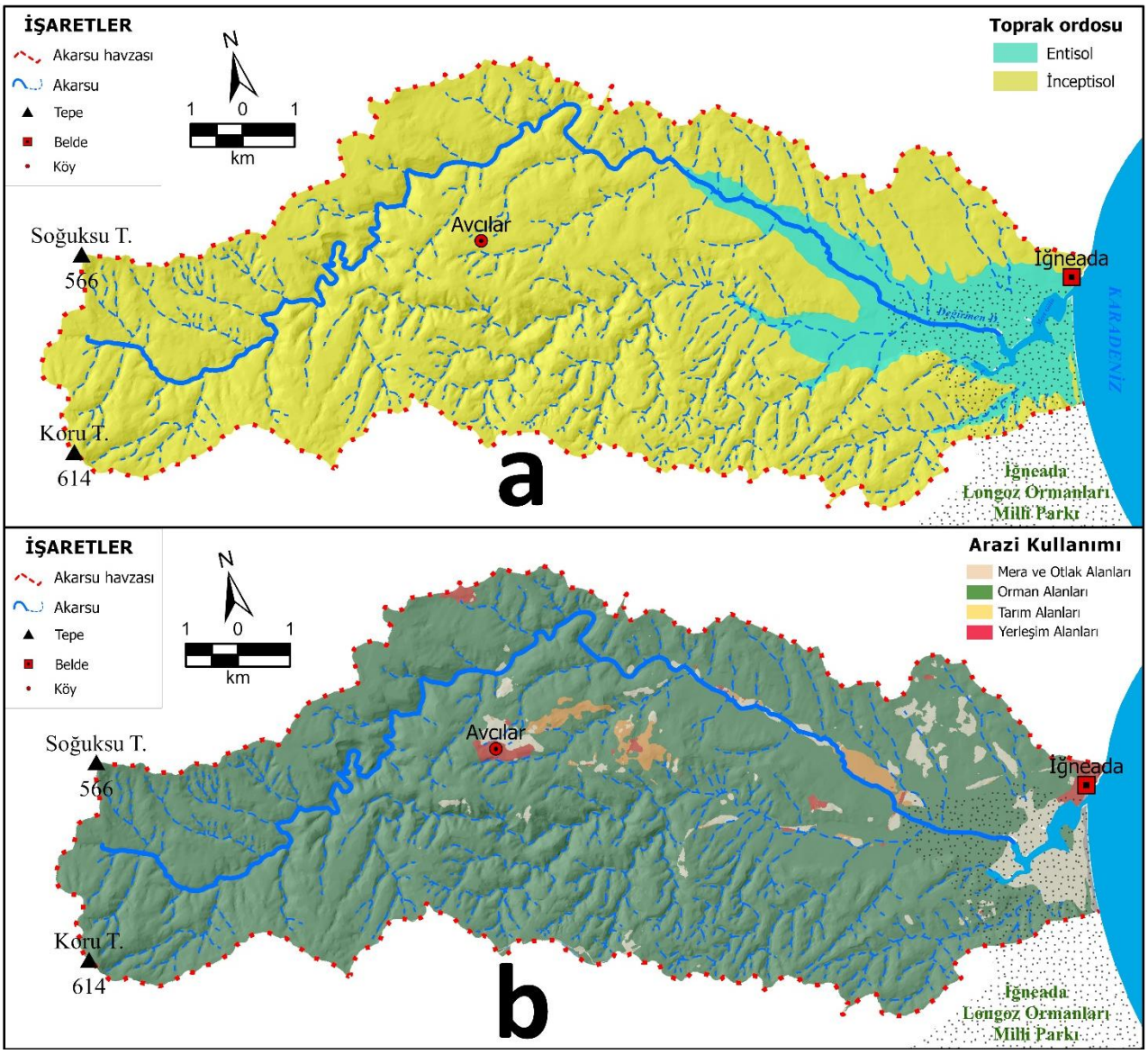
Şekil 3: a) İnceleme alanının yükseklik haritası, b) inceleme alanının eğim haritası, c) inceleme alanının yer şekilleri haritası

Tablo 1: İnceleme alanındaki akım gözlem istasyonlarının ortalama aylık akımları (Ege, 2022)

İstasyon	Akım (m³/sn)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
Elmalı Deresi	0,4	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,05	0,2	0,2	0,2	0,4	2,8
Değirmen Deresi	0,4	0,6	0,5	0,3	0,1	0,1	0,01	0,005	0,1	0,1	0,3	0,5	3,0

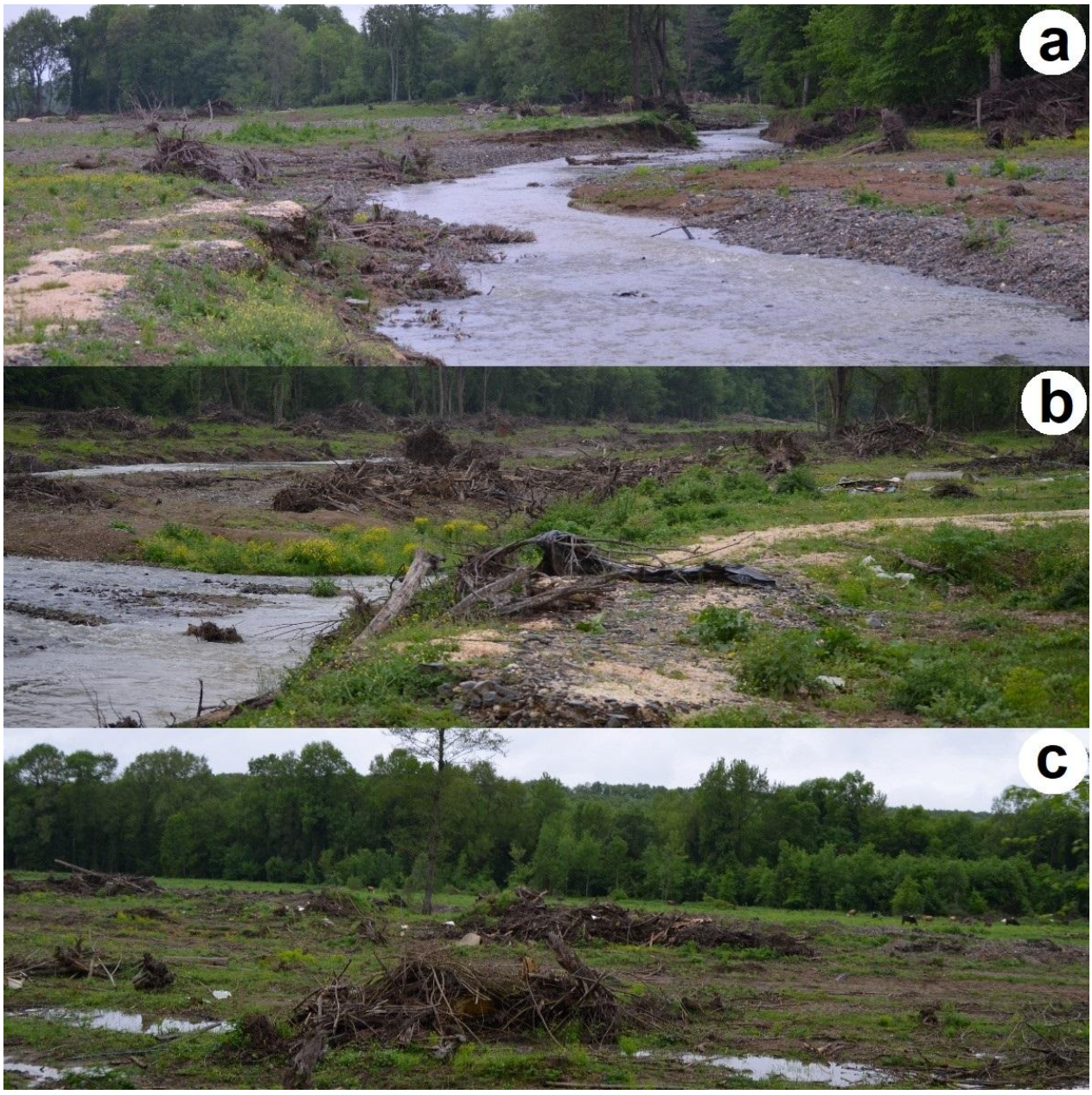
İnceleme alanındaki dağ ve plato alanlarında ana materyalin ayrışması sonucunda oluşmuş ve tam olgunlaşmamış İnceptisol, ovada ise horizonları tam gelişmemiş ve daha genç özellikte olan Enstisol ordolarına ait topraklar yayılış göstermektedir (Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1991; Şekil 4a).

İnceleme alanındaki doğal bitki örtüsü formasyonları nemli ormanlar, psödomaki ve kıyı bitkileriyle temsil edilmektedir (Dönmez, 1990). Hemen hemen tamamına yakın bir kısmı orman alanları tarafından kaplanmış olan inceleme alanında, kıyıya yakın bazı alanlarda psödomaki ve kıyı bitkileri bazı alanlarda da tarım, mera ve otlak alanları ile yerleşim alanları şeklinde arazi kullanımları yaygındır (ESRI, 2023; Şekil 4b).



Şekil 4: a) İnceleme alanının toprak haritası (Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 1991'den değiştirilerek alınmıştır), b) inceleme alanının arazi kullanımı haritası (ESRI, 2023'den değiştirilerek alınmıştır)

İnceleme alanında 4-6.9.2023 tarihleri arasında "Daniel" adı verilen fırtınanın etkisiyle şiddetli sağanak yağışlar gerçekleşmiştir (JBA Risk Management, 2023). Bu yağışlar neticesinde 5.9.2023 tarihinde şiddetli toprak erozyonunun etkili olduğu katastrofik bir sel meydana gelmiştir. Bu olay sonucunda 6 kişi hayatını kaybederken, kamp alanları, ulaşım ağları, hidrolik yapılar (Köprüler ve menfezler vb.) ve diğer teknik altyapılarda büyük bir hasar ortaya çıkmıştır (Kırklareli Valiliği, 2023). Ayrıca ormancılık faaliyetlerinin yaygın olduğu akarsu havzasında bazı tomruk dizileri ve köklerinden sökülen ağaçlar sel sularıyla birlikte sürüklenmiştir (Şekil 5). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2023) tarafından hazırlanan resmi rapora göre inceleme alanında sel olayının gerçekleştiği sahadaki su izlerinden alınmış n (enine kesit) kesitler kullanılarak bazı hidrolojik-hidrolik hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre selin yaşandığı zamanda ana akarsu kolundaki akımın 320,4 m^3/s olduğu belirlenmiştir. Bu miktarın ise 10.000 yıllık tekerrürlü akım büyüklüğünden daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2023). Dolayısıyla bu selin inceleme alanındaki insan nüfusu, doğal ve tarımsal çevre, her türlü altyapı tesisleri için yıkıcı sonuçlar doğuran doğal afet karakteri kazandığı anlaşılmıştır. Bu nedenle bölgenin yakın tarihindeki en yıkıcı sellerden biri olarak kayıtlara geçmiştir (Özşahin & Öztürk, 2024).



Şekil 5: İnceleme alanında 5.9.2023 tarihinde meydana gelen katastrofik selin etkisinin en fazla hissedildiği Sisli Vadi mevkinde akarsu vadisine yakın yerlerde su baskını ve sediment birikimi gerçekleşmiştir. a) Değirmen Deresi Sisli Vadi mevkinde kıvrımlı yatak özellikleri göstermektedir. b) Değirmen Deresi Sisli Vadi mevkinde selin etkisiyle getirdiği malzemeleri yatak kenarında biriktirmiştir. c) Sisli Vadi mevkinde selin etkisiyle Değirmen Deresi taşmış ve akarsuyun getirdiği malzemeler çevreye yayılmıştır.

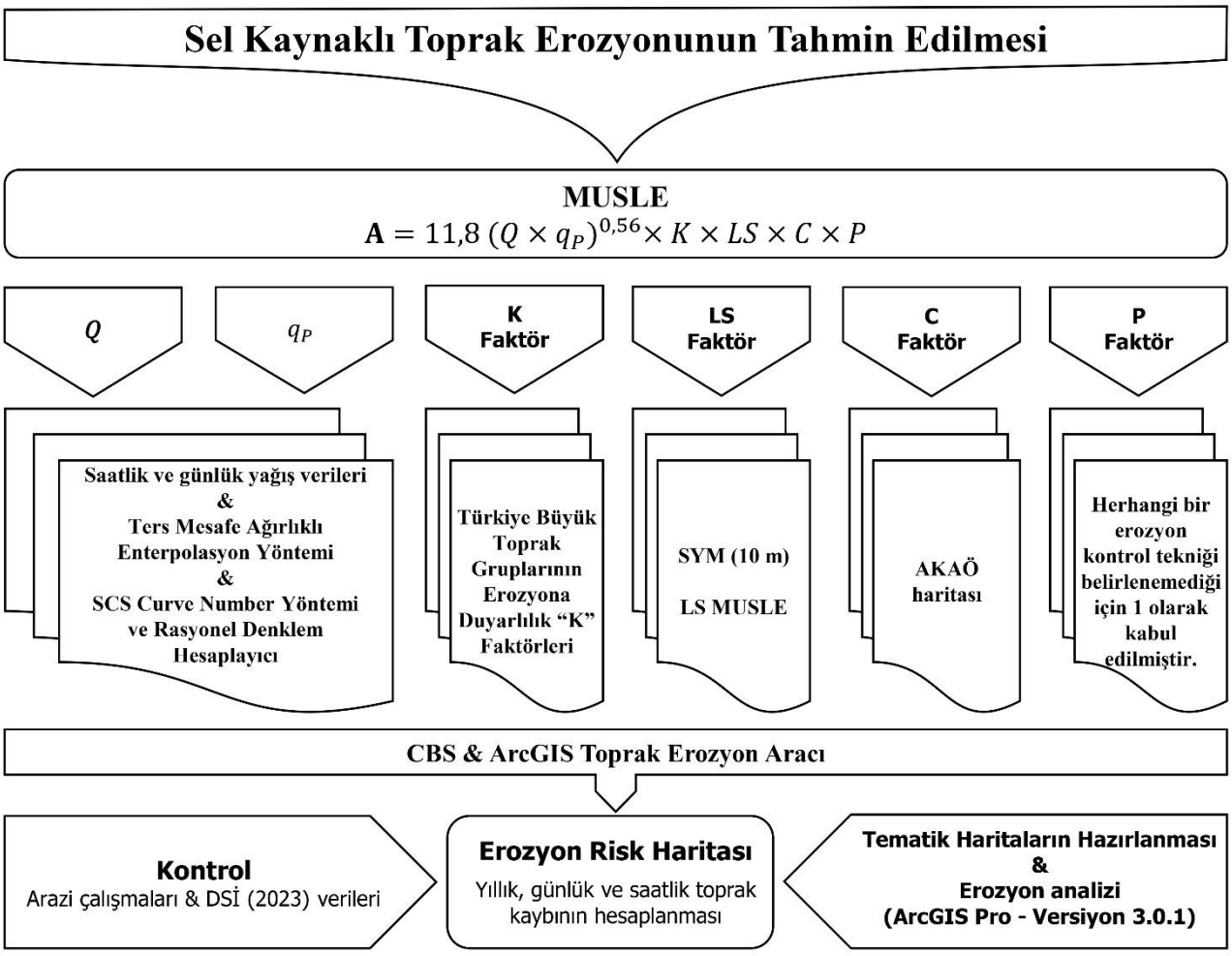
2.2. Yöntem

Bu çalışmanın haritalama işlemi 1:25.000 ölçekli Türkiye topografya haritalarının ilgili paftaları eşliğinde gerçekleştirilmiştir (Harita Genel Müdürlüğü, 2023). Bu paftalardan hem altlık verilerin sayısallaştırılması hem de SYM (Sayısal Yükseklik Modeli) verisinin oluşturulması işleri sırasında yararlanılmıştır.

Çalışmada MUSLE modelinin kullanılması tercih edilmiştir. Çünkü USLE modelinin (Wischmeier & Smith, 1965) değiştirilmiş bir versiyonu olan bu model, yaşanmış bir olaya dayalı bir şekilde çalıştığı için sel kaynaklı toprak erozyonunun hesaplanmasında daha kullanışlıdır (Djoukbala vd., 2019). MUSLE yöntemi aşağıdaki denkleme ve işlem akış şemasında takip edilen aşamalara göre uygulanmıştır (Şekil 6).

$$A = 11{,}8\ (Q \times q_P)^{0{,}56} \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Burada; "A" Ortalama toprak kaybı (t ha^{-1} y^{-1}), "Q" Akım (af) ve "q_P" Maksimum akım (cfs), "K" Toprak erozyon faktörü (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}), "LS" Eğim uzunluk ve eğim dikliği faktörü (boyutsuz), "C" Arazi örtüsü ve yönetimi faktörü (boyutsuz) ve "P" Erozyon kontrol faktörü (boyutsuz)'dür.



Şekil 6: İşlem akış şeması

İnceleme alanında Elmalı Deresi (No: D02A057) ve Değirmen Deresi (No: D02A151) olmak üzere 2 farklı akım gözlem istasyonu (AGİ) bulunmaktadır. Ancak akım hacmi (Q) ve maksimum akım (q_P), inceleme alanındaki AGİ'ler kullanılarak hesaplanamamıştır. Zira Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2023) tarafından hazırlanan resmi rapora göre inceleme alanında selin meydana geldiği dönemde doğrudan herhangi bir ölçüm yapılmamıştır. Dolayısıyla inceleme alanındaki Q ve q_P parametreleri akarsuyun drenaj havzasını bütünüyle karakterize etmesi için Demirköy, Beğendik/İğneada ve İğneada meteoroloji istasyonlarına ait saatlik ve günlük yağış verilerine göre hesaplanmıştır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023). Yağış verileri, yağış gözlem istasyonlarının az ve düzensiz olmasından dolayı CBS tekniklerine dayalı enterpolasyon yöntemiyle mekânsal olarak dağıtılmıştır.

Bu aşamada yağış değerlerinin haritalandırılmasında daha doğru tahmin sonuçları üreten Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi (Inverse Distance Weighting - IDW) tercih edilmiştir (Taylan & Damçayırı, 2016). Böylece drenaj havzasının saatlik ve günlük ortalama yağış miktarları belirlenmiştir.

İnceleme alanında selin meydana geldiği dönemdeki saatlik ve günlük ortalama yağış miktarlarına göre akım hacmi (Q) ve maksimum akım (q_P) değerleri, ABD (Amerika Birleşik Devletleri) Toprak Koruma Servisi (Soil Conservation Service - SCS) tarafından geliştirilen ve Türkiye'de DSİ (Devlet Su İşleri) tarafından yaygın bir şekilde kullanılan sentetik metot yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplama işlemi, SCS Curve Number Yöntemi ücretsiz yazılım aracı (SCS Curve Number, 2024) ve Rasyonel Denklem Hesaplayıcı (Edwards, 2024) yardımıyla sırasıyla aşağıdaki formüller kullanılarak yapılmıştır.

$$Q = \frac{(P-0{,}2S)^2}{(P+0{,}8S)} \quad (2)$$

Burada; "Q" akım (mm), "P" yağış (mm) ve "S" toprak tarafından tutulan su (mm) anlamındadır.

$$q_P = ciA \quad (3)$$

Burada; "q_P" maksimum akım (cfs), "c" akım katsayısı, "i" yağış (mm) ve "A" drenaj alanı (km²) anlamındadır. Yukarıdaki ilk formüle göre belirlenen akım (Q) değerleri, MUSLE denklemine uygun olması için çevirici (Conversion of Measurement Units, 2024) yardımıyla sırasıyla saatlik ve günlük değerler şeklinde "cfs" birimine dönüştürülmüştür. K faktörü, Türkiye Büyük Toprak Gruplarının Erozyona Duyarlılık "K" Faktörleri adlı çalışma kapsamında inceleme alanındaki büyük toprak gruplarından alınmış 20 farklı toprak örneğinin aşağıdaki eşitliğe göre birleştirilmesiyle tespit edilmiştir (Doğan vd., 2000).

$$K = (2{,}77 \times 10^{-6} \times M^{1{,}14} \times (12 - OS) + 0{,}043 \times (A - 2) + 0{,}033 \times (4 - D) \quad (4)$$

Burada; "K" Toprak erozyon faktörü (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}), "M" (% silt + çok ince kum) × (% silt + kum-çok ince kum), "OS" 1,72 × organik karbon %'si, "A" Strüktür sınıfı (Agrega sınıfı) ve "D" Geçirgenlik (Permeabilite) sınıfı anlamındadır (Doğan vd., 2000). Buna göre inceleme alanındaki K faktör değeri 0,10-0,21 arasında değişmektedir (Tablo 2).

Tablo 2: İnceleme alanındaki büyük toprak gruplarından alınmış 20 farklı toprak örneğinin K faktör değerleri (Doğan vd., 2000)

Örnek No	K faktör	Örnek No	K faktör	Örnek No	K faktör	Örnek No	K faktör
1	0,10	**6**	0,12	**11**	0,11	**16**	0,12
2	0,10	**7**	0,12	**12**	0,11	**17**	0,11
3	0,12	**8**	0,12	**13**	0,10	**18**	0,21
4	0,12	**9**	0,12	**14**	0,11	**19**	0,11
5	0,12	**10**	0,12	**15**	0,11	**20**	0,11

LS faktörü, 10 m çözünürlüğündeki SYM verisi kullanılarak MUSLE için önerilen denkleme göre tespit edilmiştir (Djoukbala vd., 2019).

$$LS = 1{,}4 \times \left(\frac{\text{FA}\times\text{R}}{22{,}1}\right)^{0{,}4} \times \left(\frac{\sin(\theta \times 0{,}01745)}{0{,}09}\right)^{1{,}4} \quad (5)$$

Burada; "LS" Eğim uzunluk ve eğim dikliği faktörü, "FA" Akım Birikimi (Flow accumulation), "R" Çözünürlük ve "θ" eğim (derece) anlamındadır. Bu bakımdan inceleme alanındaki LS faktörü topoğrafyanın eğimli olduğu yerlerde artarken, eğimin azaldığı sahalarda azalmaktadır.

C faktörü, Karra vd. (2021) tarafından hazırlanmış ve serbest erişime sunulmuş (ESRI, 2023) AKAÖ (Arazi Kullanımı-Arazi Örtüsü) sınıflarına farklı kaynaklardan derlenen (Panagos vd., 2015a; Ozsahin vd., 2018) katsayıların birleştirilerek çalışma alanı ölçeğinde ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir. İnceleme alanındaki AKAÖ sınıfları farklı C faktörü değerlerine sahiptirler (Tablo 3). Ancak genel olarak C faktör değerleri AKAÖ sınıflarının toprak erozyonuna etkisine göre artmaktadır.

Tablo 3: İnceleme alanındaki AKAÖ sınıflarının C faktör değerleri

AKAÖ sınıfı	C faktör
Mera ve Otlak alanı	0,05-0,15
Tarım alanı	0,1-0,2
Orman alanı	0,0001-0,003
Yerleşim alanı	0,001-0,01

P faktörü, arazi çalışmaları esnasında çalışma alanında gerek normal gerekse sel koşullarından kaynaklanan toprak erozyonunun oluşumunun engellenmesine yönelik herhangi bir erozyon kontrol tekniği belirlenemediği için 1 olarak kabul edilmiştir (Renard vd., 1991).

Sediment verimi, Dendy-Bolton yöntemi (Dendy & Bolton, 1976) kullanılarak ücretsiz yazılım aracı (Online Dendy-Bolton, 2024) ile aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

Q < 2 için;

$$S = 1280 \times Q^{0,46}[1,43 - 0,26 \log (A)] \quad (6)$$

Q ≥ 2 için;

$$S = 1965 \times e^{-0,055Q}[1,43 - 0,26 \log (A)] \quad (7)$$

Burada; "S" sediment verimi (t/km²/y), "Q" akım (mm), ve "A" havza alanı (km²) anlamındadır.

MUSLE modeliyle tahmin edilen toprak kaybı sonuçlarının doğruluğu, tek ölçüme dayalı verinin olduğu selin meydana geldiği gün için yapılmıştır. Çünkü sadece ilgili günde DSİ tarafından bazı hidrolojik-hidrolik ölçümler gerçekleştirilmiştir (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2023). Ölçülen veriler günlük sediment miktarı yöntemi kullanılarak doğrulamaya uygun hale getirilmiştir (Miller, 1951). Bu aşamada günlük sediment miktarı aşağıdaki denklem kullanılarak tespit edilmiştir.

$$S = Q \times C \times K \quad (8)$$

Burada; "S" günlük sediment miktarı (ton/gün), "Q" günlük ortalama debi (m³/sn), "C" günlük ortalama sediment konsantrasyonu (ppm) ve "K" katsayı anlamındadır (Güresinli, 1978). Günlük sediment miktarları, model tahmin değerleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, doğruluk oranı karar verme katsayısı (R^2) değeri hesaplanarak kontrol edilmiştir.

Çalışma verileri, yöntem içeriği doğrultusunda CBS teknikleriyle birleştirilmiştir. İlgili işlem bu amaçla geliştirilmiş yazılım aracıyla gerçekleştirilmiştir (ArcGIS, 2020). Zira başta yer bilimleri olmak üzere eğitim ve bilimsel araştırmalarda dünya çapında en yaygın kullanılan CBS programlarından birisi olan ArcGIS sayesinde çok sayıda yazılım aracı geliştirilmektedir (Stefanidis vd., 2021). Bu araçlardan en popüler olanlarından birisi de ArcGIS toprak erozyon aracı (Soil Erosion Tool)'dır (Özşahin, 2023a; 2023b). Böylece inceleme alanındaki yıllık ve selin meydana geldiği dönemdeki günlük ve saatlik toprak kayıpları hesaplanmış ve erozyon risk haritaları oluşturulmuştur. Bu haritaların sınıflandırılmasında benzer çalışmalarda yaygın olarak kullanılan erozyon risk sınıfları (çok hafif, hafif, orta, şiddetli ve çok şiddetli) kullanılmıştır (Özşahin, 2016). Erozyon risk sınıflarının toprak kaybı miktarı ise zamansal ve mekânsal değişimi daha rahat bir şekilde belirlemek ve karşılaştırmak için erozyon risk haritalarının istatiksel olarak minimum, ortalama ve maksimum değerlerine göre belirlenmiştir.

Bu çalışma için arazi çalışması selin yaşandığı dönemde yapılamamıştır. Çünkü ilgili dönemde ve hemen sonrasında arama-kurtarma çalışmaları devam ettiğinden dolayı selin etki alanına girişler ve fotoğraf çekimleri yetkili makamlar tarafından kısıtlanmıştır. Ancak olay yeri soruşturması bittikten sonra selin etki alanına gidilip, gözlem ve görüşme yapılmıştır. Bu esnada sel kaynaklı toprak erozyonuyla gelip biriken sedimentin yayılış alanı ve kalınlığı ölçülmeye çalışılmıştır (Şekil 7). Böylece sel kaynaklı toprak erozyonunun etkileri olay yerinde değerlendirilmiştir. Çalışmanın tematik haritalarının hazırlanması ve erozyon analizinin yapılması ArcGIS Pro (Versiyon 3.0.1) isimli CBS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Toprak erozyonu yağış-akım özelliklerinden etkilense bile erozyon oranının yüzeysel akışa daha duyarlı olduğu ortaya konulmuştur (Kayet vd., 2018). Bilhassa sel kaynaklı toprak erozyonunun akım, maksimum akım, topoğrafya, toprak ve AKAÖ özellikleri gibi faktörlerin karmaşık etkileşiminden kaynaklandığı açıklanmıştır (Islam vd., 2024; Stefanović vd., 2024). MUSLE erozyon modelinin ise bu karmaşık etkileşimin hızlı ve doğru bir şekilde çözümü için en uygun yöntem olduğu bildirilmiştir (Djoukbala vd., 2019; Kaffas vd., 2022).



Şekil 7: İnceleme alanında 5.9.2023 tarihinde meydana gelen katastrofik selin etkisinin en fazla hissedildiği Sisli Vadi mevkinde arazi çalışmaları gerçekleşmiştir. a) Sisli Vadi mevkinde Değirmen Deresi derinliği az olmasına karşın genişliği oldukça fazla olan bir yataktan akmaktadır. b) Sisli Vadi mevkinde selin etkisiyle gelen sedimentler tabakalanma göstermeksizin karışık olarak birikmiştir.

İnceleme alanı için MUSLE erozyon modeli, ArcGIS toprak erozyon aracı yardımıyla uygulanmıştır. Bu araç akarsu havzasının tamamını daha iyi karakterize etmesi ve veri yetersizliğinden kaynaklanan eksikliği telafi edebilmesi için toprak erozyon modelinde değerlendirilen bazı parametrelerin (Q, q_P, K, C, P) ortalama değerlerine göre çalışmaktadır. Sadece LS faktörü SYM kullanılarak ilgili yazılım aracılığıyla otomatik hesaplanmaktadır (ArcGIS, 2020). Böylece farklı koşullara sahip farklı coğrafi alanlarda ve yetersiz verilerle istatiksel açıdan daha anlamlı sonuçlar elde edilebilmektedir (Ahmari vd., 2022).

İnceleme alanında MUSLE erozyon model faktörlerinin ortalama değeri bakımından akım (Q) ve maksimum akım (q_P) saatlik, günlük ve yıllık olarak değişirken, K faktörü 0,12 t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}, C faktörü 0,007 ve P faktörü 1 olarak hesaplanmıştır. LS faktörü ve erozyon haritaları ise toprak erozyon aracıyla otomatik olarak üretilmiştir. Dolayısıyla bütün bu verilere göre inceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır.

İnceleme alanında yıllık yağış ve akım ilişkisi bakımından toprak erozyonu ortalama 0,009 t ha^{-1} y^{-1} ve maksimum 1757 t ha^{-1} y^{-1} olarak belirlenmiştir. Buna göre inceleme alanındaki sediment verimi ise birim alanda 130,11 M t/km^2/y ve toplamda ise 7960,07 M t/y olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Panagos vd. (2015b) Avrupa için toplam yıllık toprak kaybını 970 M t/y olarak tespit etmişlerdir. Bu bakımdan inceleme alanındaki toplam yıllık toprak kaybı Avrupa için tahmin edilen değerden daha fazladır.

Tablo 4: İnceleme alanında toprak erozyonunu etkileyen parametrelerin özellikleri ve yıllık değerler

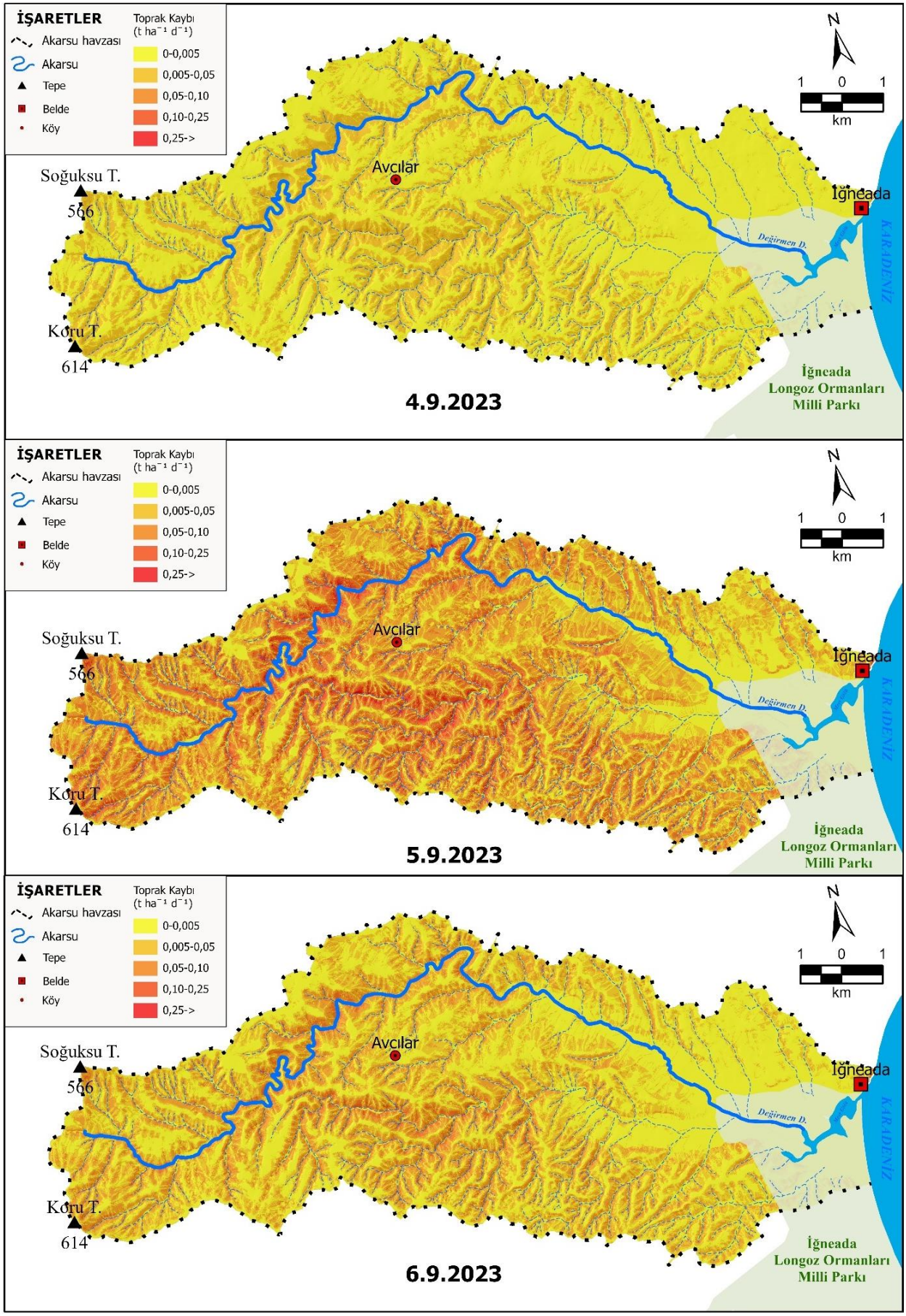
Parametre	Parametre özellikleri	Yıllık değerler
Yağış	P (mm)	812,40
Akım	Q (m^3/sn)	2,9
Toprak Kaybı	Ortalama (t ha^{-1} y^{-1})	0,009
	Maksimum (t ha^{-1} y^{-1})	1757
Sediment Verimi	Birim alan (M. t/km^2/y)	130,11
	Toplam (M. t/y)	7960,07

İnceleme alanında sel, hidroklimatik özellikleri bakımından üç günlük bir zaman diliminde (4-6.9.2023) gerçekleşmiştir. En büyük etkisini ise kısa süreli ve yüksek yoğunluklu sağanak karakterli yağışların arttığı ikinci gün (5.9.2023) göstermiştir (Tablo 5). Gerçekten de ilgili günde düşen yağış, inceleme alanındaki yıllık toplam yağış miktarının %17,26'sına karşılık gelmektedir. Ayrıca selin meydana geldiği tarihin öncesindeki ve sonrasındaki günler dikkate alındığında üç gün içerisinde inceleme alanında yıllık toplam yağış miktarının %26,79'unun düştüğü anlaşılmaktadır (Tablo 5).

Tablo 5: İnceleme alanında selin meydana geldiği dönemde günlük yağış (P) ve akım (Q) miktarları ile ortalama ve maksimum toprak kaybı

Tarih	Yağış	Akım	Toprak Kaybı	
	P	Q	Ortalama	Maksimum
	mm		t ha^{-1} d^{-1}	
4.9.2023	25,50	17,37	0,004	0,800
5.9.2023	140,22	130,26	0,032	6,437
6.9.2023	51,89	42,70	0,009	1,974
Toplam	217,61	190,33	0,045	9,211

İnceleme alanında selin meydana geldiği tarihin öncesindeki ve sonrasındaki günlerde ortalama yıllık miktarından az veya aynı düzeyde toprak kaybı gerçekleşmiştir (Tablo 5; Şekil 8). Ancak selin meydana geldiği gün, ortalama yıllık miktarın 3,5 katından daha fazla toprak kaybının olduğu belirlenmiştir (Tablo 5). Kaffas vd. (2022) sel kaynaklı toprak erozyon oranının daha yüksek olmasının yağış/akım ile toprak erozyonu arasındaki orantısal ilişkiyle ilgili olduğunu kaydetmişlerdir. Dolayısıyla hem daha önce yapılmış çalışmaların hem de bu çalışmanın sonuçlarına göre sel ve toprak erozyonun şiddeti arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu anlaşılmıştır.

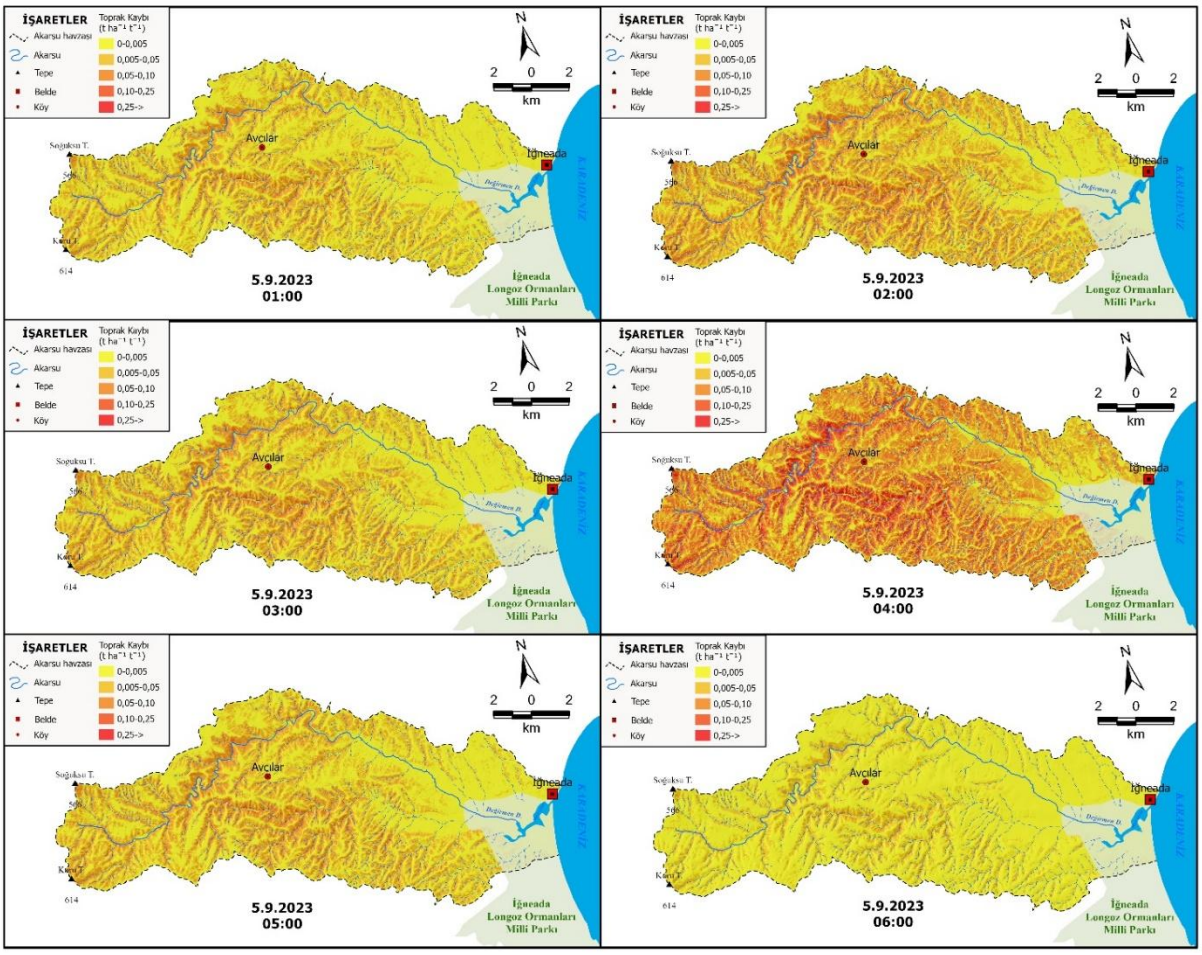


Şekil 8: İnceleme alanında selin meydana geldiği dönemdeki günlük erozyon haritaları

İnceleme alanındaki sel, 5.9.2023 tarihinde 01:00-14:00 saatleri arasında etkili olan sağanak karakterli yağışlarla meydana gelmiştir. Ancak selin oluşumunda asıl belirleyici olan yağış ise 01:00-06:00 saatleri arasındaki 6 saatlik zamanda gerçekleşmiştir (Tablo 6). İlgili saat aralığında en fazla yağış saat 04:00'da kaydedilmesine rağmen (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2023) inceleme alanında sel gecikme süresine bağlı olarak daha geç etki göstermiştir. Bu durum havza uzunluğu ve şekline bağlı olarak gelişen akım toplanma zamanından kaynaklanmış olmalıdır. Nitekim olay yeri görgü tanıklarının ifadesinden de selin ilgili tarihte saat 07:00 sularında meydana geldiği anlaşılmıştır (Duman, 2024; F. Ateş, kişisel iletişim, 2024). Dolayısıyla inceleme alanında selin oluşumunu tetikleyen 6 saatlik yağış, öncelikle sel oluşumuna, ardında da akarsu akımlarının artmasına ve buna bağlı olarak su baskınlarına ve toprak erozyonuna sebep olmuştur (Şekil 9). Ayrıca selin oluşmaya başladığı saatlerde inceleme alanındaki sediment veriminin de yağış ve akım ilişkisine bağlı olarak saatlik değişiklik gösterdiği saptanmıştır (Tablo 6). Bannari vd. (2017) yağış ve akım ilişkisine bağlı olarak ortaya çıkan sellerin toprak erozyonuna güçlü bir şekilde katkıda bulunarak sediment verimini etkilediğini ileri sürmüşlerdir.

Tablo 6: İnceleme alanında selin meydana geldiği tarihteki (5.9.2023) saatlik yağış (P) ve akım (Q) ile toprak kaybı ve sediment verimi miktarları

Saat	Yağış	Akım	Toprak Kaybı		Sediment Verimi	
	P	Q	Ortalama	Maksimum	Birim alan	Toplam
	mm		t ha^{-1} t^{-1}		M. t/km^2/t	M. t/t
01:00	10,3	4,23	0,006	1,283	210,98	12908,28
02:00	17,3	9,96	0,014	2,812	312,85	19140,41
03:00	12,78	6,16	0,009	1,799	250,81	15344,72
04:00	44,67	35,66	0,049	9,765	562,52	34415,6
05:00	12,03	5,56	0,008	1,645	239,26	14638,15
06:00	5,79	1,28	0,002	0,479	121,74	7448,49



Şekil 9: İnceleme alanında selin meydana geldiği gündeki saatlik erozyon haritaları

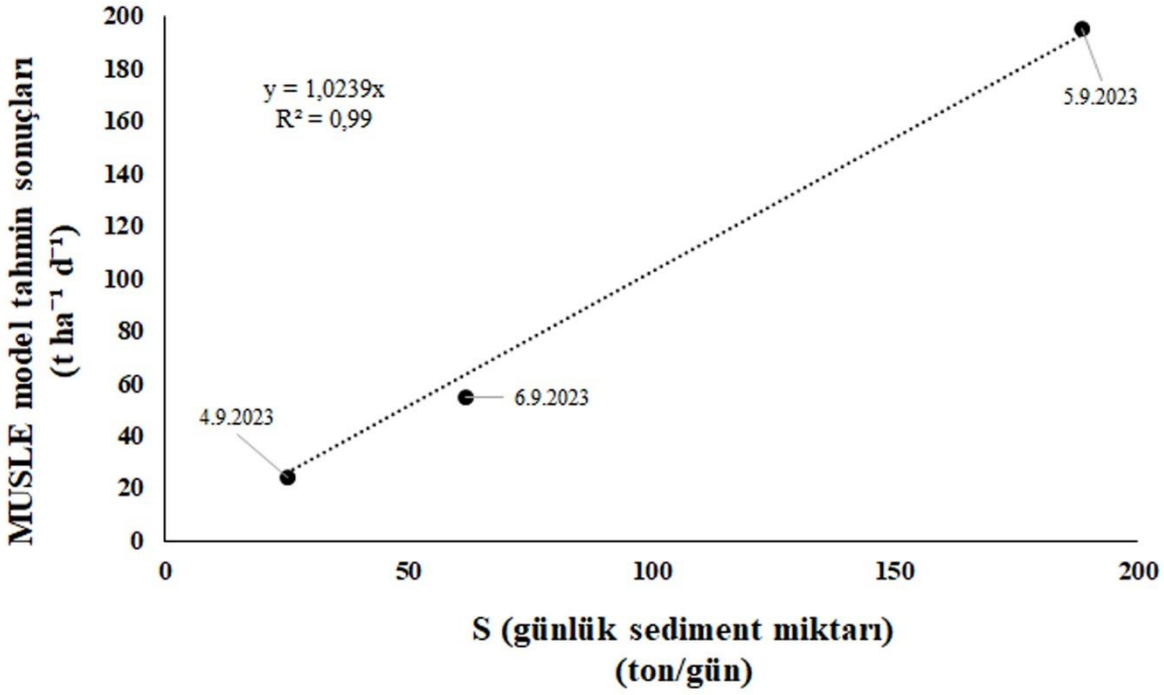
İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisi, selin meydana geldiği 6 saatlik zaman aralığında belirgin bir şekilde değişmiştir (Şekil 9). Bu değişim genellikle yıllık toprak kaybı miktarını aşmıştır (Tablo 4, 5, 6). En yüksek toprak kaybı ise saat 04:00'da gerçekleşmiştir (Tablo 6; Şekil 9). Hatta ilgili saatte meydana gelen toprak kaybının hem aynı gün (5.9.2023) hem de yıllık ortalama toprak kaybından daha fazla olduğu anlaşılmıştır (Tablo 4, 5). Dolayısıyla inceleme alanında yağış ve akım ilişkisine bağlı olarak şiddetli sağanak yağışın olduğu dönemde toprak erozyonunun etkisini daha da arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle yüzeysel akışın artmasına bağlı olarak akım hacmi ve maksimum akımın artmasıyla alakalı olmalıdır (Özşahin, 2023a).

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisiyle gerek günlük gerekse saatlik toprak kaybı miktarlarının maksimum değerlerinin ortalama değerlere kıyasla oldukça yüksek olduğu saptanmıştır (Tablo 5, 6). Ortalama ve maksimum toprak kaybı miktarları arasındaki bu farklılık, muhtemelen MUSLE yöntemiyle ilgili olmalıdır. Zira MUSLE erozyon modelinin akım hacmi ve maksimum akım faktörlerinden dolayı maksimum düzeyde daha yüksek sonuçlar gösterdiği düşünülmektedir (Djoukbala vd., 2019; Pakoksung, 2024).

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun meydana geldiği dönemdeki günlük sediment miktarları, model tahmin sonuçlarıyla kıyaslanarak kontrol edilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre inceleme alanında selin gerçekleştiği tarihteki günlük sediment miktarı 188,43 ton/gün ve MUSLE model tahmin sonucu ise 195,78 ton/gün olarak hesaplanmıştır (Tablo 7). Bu sonuçların R^2 değeri ise 0,99 olarak tespit edilmiştir (Şekil 10). Hem karşılaştırma sonuçlarının hem de doğruluk oranı karar verme katsayısı (R^2) değerinin pozitif olması ve 1'e çok yaklaşması model sonucunun tahmin yeteneğinin çok güçlü olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla bu bulgu, benzer sahalarda MUSLE model tahmin sonuçlarının sel kaynaklı toprak erozyonunun hesaplanmasında kullanılabileceğini göstermiştir.

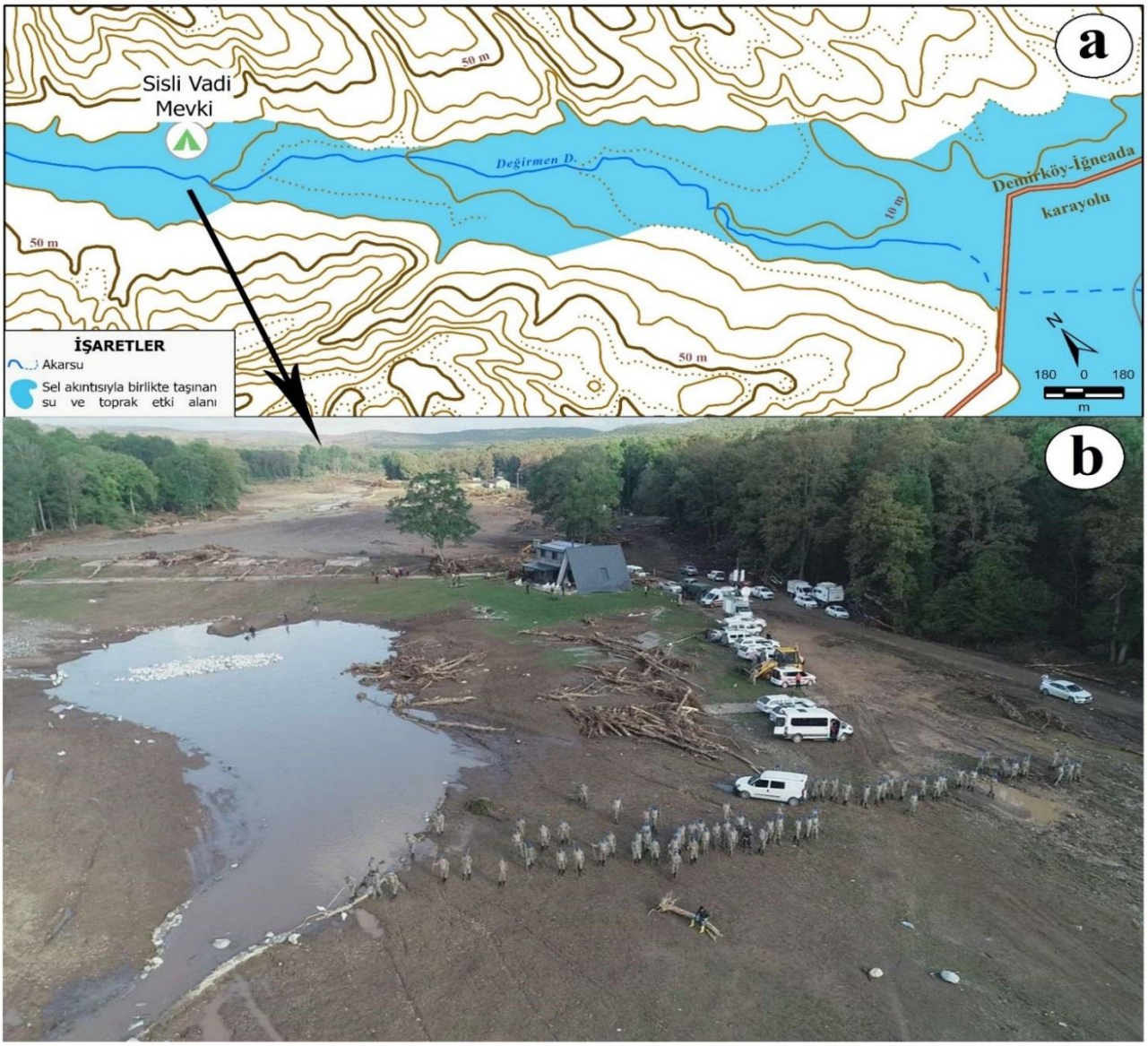
Tablo 7: İnceleme alanında selin meydana geldiği dönemdeki günlük sediment miktarı (S) ve MUSLE model tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

Tarih	Yağış	Akım	Toprak Kaybı	
	P	Q	S	MUSLE
	mm		ton/gün	
4.9.2023	25,50	17,37	24,60	24,47
5.9.2023	140,22	130,26	184,48	195,78
6.9.2023	51,89	42,70	60,47	55,06



Şekil 10: İnceleme alanında selin meydana geldiği dönemdeki günlük sediment miktarı (S) ve MUSLE model tahmin sonuçlarının karşılaştırılmasına ait regresyon grafiği

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonu daha çok eğim ve yağış artışının belirgin olduğu üst havzadaki vadilerde, etkisi ise eğimin azaldığı buna karşın akarsuda biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda izlenmektedir (Şekil 11). Zira inceleme alanında 5.9.2023 tarihindeki sağanak yağışlar neticesinde meydana gelen selin etkisiyle akarsuyun alt havzasında can ve mal kaybına sebep olan su baskınlarının yanında ciddi miktarda tortu ve enkaz birikimi gerçekleşmiştir. Sel akıntısıyla birlikte taşınan su ve toprak, akarsu vadisinde eğimin azaldığı ve biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda özellikle Sisli Vadi mevkinde ağır bir çamur birikimine yol açmıştır (Şekil 12). Ayrıca Sisli Vadi mevkinde akarsu kanalına yakın ve eğimin tam düzlük (% 0-1) olduğu yerlerde yaklaşık 50 cm kalınlığında bir sediment birikimin olduğu gözlenmiştir.



Şekil 11: (a) İnceleme alanındaki Sisli Vadi mevkinde sel akıntısıyla birlikte taşınan su ve toprak etki alanı haritası, (b) İnceleme alanında selin meydana geldiği günde sel akıntısıyla birlikte taşınan su ve toprak Sisli Vadi mevkinde ağır bir çamur birikimine yol açmıştır.

4. Tartışma

Son yarım asırda tüm jeofizik afetlerin %44'ünü oluşturan (World Meteorological Organization, 2020) ve tehlike kaynaklı küresel ekonomik kayıpların %31'ine karşılık gelen (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015) sel olayları, yakın geçmişte daha sık bir hale gelmiştir (CRED, 2023). Bu sebeple sel kaynaklı toprak erozyon riskinin her geçen gün daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Kiptum vd., 2024). Bilhassa proaktif afet yönetimi için sel kaynaklı toprak erozyonunun konumunun ve şiddetinin belirlenmesine yönelik yöntemler acil bir ihtiyaç haline gelmiştir (Kaffas vd., 2022).

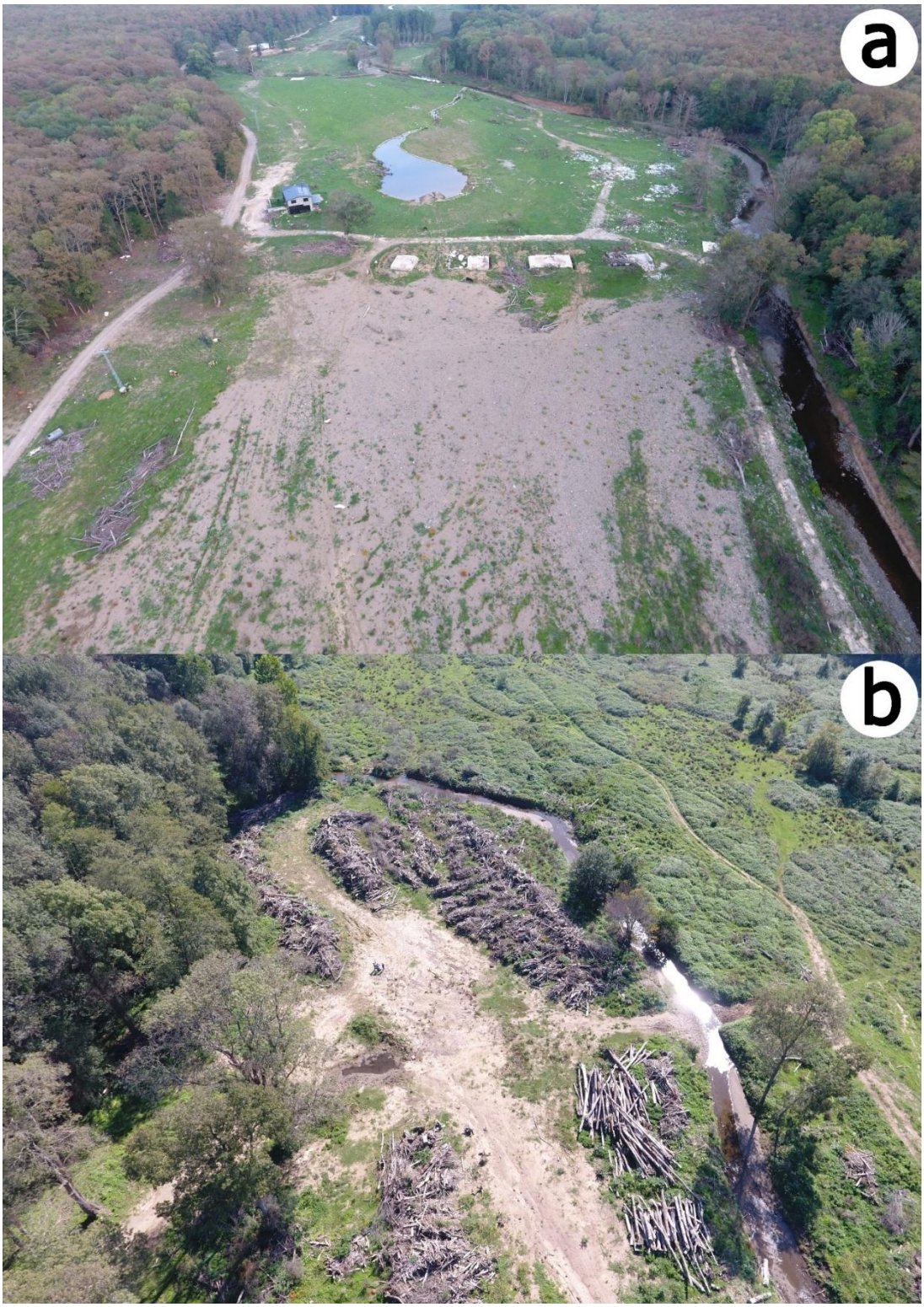
İnceleme alanının bulunduğu bölgede özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle sağanak yağışlara bağlı olarak gerçekleşen sel olaylarının da artması beklenmektedir (Çağlar vd., 2019; Eroğlu, 2022; 2024). Bu tür sel olaylarının gerçekleştiği akarsu havzalarında ise yüzeysel akışa bağlı toprak erozyonunun daha fazla şiddetleneceği öngörülmektedir (Özşahin, 2023a; 2023b). Böylece gelecek iklim değişikliğinin etkisiyle inceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun artacağı aşikardır. Dolayısıyla inceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonuna karşı hassasiyeti yüksek sahaların belirlenmesi, akarsu havzasındaki faaliyetlerin daha güvenli alanlara doğru yönlendirilmesi bakımından önemlidir. Ayrıca bu tür yer belirleme çalışmaları iklim değişikliğinin etkisiyle gelecekte yaşanabilecek su baskını risklerinden korunmak için de gereklidir (Othman vd., 2023).

Sel kaynaklı toprak erozyonu, yoğun yağış-akım olaylarının ardından meydana gelen ve doğal kaynakları bozan veya onlara zarar veren küresel bir sorundur (Bauer vd., 2019). Bu problemin çevresel, sosyal ve ekonomik sonuçlarının hafifletilmesi için mekânsal dağılımın yanı sıra bu olguyla ilişkili niceliksel ve niteliksel risklerin de derinlemesine araştırılması gerekmektedir (Oudchaira vd., 2024). Ayrıca sel kaynaklı toprak erozyonunun etkilerinin büyük ölçüde zamana ve mekana özgü faktörlere bağlı olduğu düşünüldüğünde, bu problemin akarsu havzaları ölçeğinde belirlenmesi ve değerlendirilmesi daha önemli bir hale gelmiştir (Phillips, 2002). Coğrafi verilerin ulaşılabilirliği ve son teknolojik gelişmeler de göz önüne alındığında, model bazlı toprak erozyon çalışmalarının sayısı artmıştır (Alexiou vd., 2023). Yağış ve akım ilişkisine bağlı olarak bu kapsamda en yaygın şekilde kullanılan toprak erozyon modeli, MUSLE yöntemidir. Genellikle tatmin edici ve istatistiksel olarak sağlam verilerin üretildiği bu yöntem (Djoukbala vd., 2019), yakın zamanda CBS temelli ArcGIS toprak erozyon aracı ile denenmiştir (Özşahin, 2023a; 2023b). Bu çalışmada da MUSLE yöntemi aynı erozyon aracı kullanılarak uygulanmıştır. Zira MUSLE modelinin Akdeniz havzalarındaki toprak kaybını tahmin etmede iyi bir performans gösterdiğini bildirmiştir (Alewell vd., 2019). Ayrıca MUSLE kısa vadeli ve yüksek yoğunluklu akışların sebep olduğu sel kaynaklı toprak erozyonunun belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Demir vd., 2024). Dolayısıyla bu çalışmanın MUSLE model sonuçları literatürdeki çeşitli olay bazlı uygulama sonuçlarıyla da paralellik göstermektedir (Adegede & Mbajiorgu, 2019; Berteni vd., 2021).

Akarsu havzalarındaki yanlış arazi yönetimi uygulamaları üst havzada yüzey suyu akışına ve sellerin artmasına katkıda bulunduğu gibi alt havzada da toprak erozyonu ve su baskınları ile oluşan zararları arttırmaktadır (Opere, 2013). 5.9.2023 tarihinde inceleme alanında aniden gelişen sağanak yağışlar akarsuyun üst havzasının topografik özelliklerine bağlı olarak yamaç arazilerde yüksek enerjili su akımlarıyla karakterize edilen selin oluşmasına sebep olmuştur. Debisi çok düzensiz bir şekilde değişen güçlü sel suları, akarsuyun alt havzasında konumlanan Sisli Vadi mevkinde sel kaynaklı toprak erozyonunun ve su baskınlarının yaşanmasını tetiklemiştir (Kırklareli Valiliği, 2023). Ancak bu olay, özellikle insanın doğal ortam üzerindeki olumsuz etkilerinin yol açtığı yanlış arazi kullanımıyla alt havzada insanlara ve insan yapısı eserlere zarar vermiştir. İnceleme alanında 2017-2022 yılları arasında antropojenik etkilerin sebep olduğu yanlış arazi kullanımına yol açan değişimler yaşanmıştır. Bu değişimler neticesinde mera ve otlak alanları tarım ve yerleşim alanına dönüşmüştür. Akarsuyun taşkın ovasında ve bazı alanlarda kıyı kanununa aykırı bir şekilde gerçekleşen bu değişim ve dönüşümler, selin yıkıcı etkisini arttırırken, sel kaynaklı toprak erozyonunun da güçlenmesine sebep olmuştur (Özşahin ve Öztürk, 2024). Böylece inceleme alanında meydana gelen sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisiyle akarsuyun alt havzasındaki vadi tabanı, kalın bir sediment örtüsüyle kaplanmıştır. Bannari vd. (2016) akarsuların üst havzalarındaki dik eğimli alanlarda ve vadilerde yüksek akıma bağlı olarak sel kaynaklı toprak erozyon oranının daha fazla olduğunu ve erozyon malzemesinin su gücü ve yerçekimi yoluyla havzada eğimin azaldığı alt kısımlara doğru taşındığını savunmuşlardır.

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonu daha çok eğim ve yağış artışının belirgin olduğu üst havzadaki vadilerde etkili olmuştur. Sel sularıyla gelen malzemeler ise eğimin azaldığı buna karşın akarsuda biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda birikmiştir. Ancak bu birikim güçlü ve kontrolsüz bir şekilde gelen sel suları vasıtasıyla meydana geldiği için sadece sedimentlerden değil çok farklı organik ve inorganik maddelerden oluşmaktadır. Yoğun yağış olayları sırasında selin etkisini şiddetlendiren ve afet riskini artıran bu maddeler, çöp erozyonu (litter erosion) olarak isimlendirilmiştir (Farahnak vd., 2024). Sel olaylarının tetiklediği toprak ve çöp erozyonu, akarsu yataklarında eğimin azaldığı kesimlerde su baskınlarına da yol açmaktadır. Gerçekten de inceleme alanında selin yaşandığı 5.9.2023 tarihinde meydana gelen su baskının ortaya çıkmasında sel sularıyla akarsuya karışıp akışı engelleyen toprak ve çöp erozyonunun etkisi büyük olmuştur (Şekil 13).

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun şiddetinin artması, sağanak karakterli yağış ve akım arasındaki ilişki tarafından belirlenmiştir. Zira inceleme alanında yağış ve buna bağlı olarak akımın artığı zamanlarda toprak erozyonunun miktarı da artmıştır. MUSLE model tahmin sonucuna göre inceleme alanındaki selin yaşandığı 5.9.2023 tarihinde toprak kaybının ortalama günlük hızı 0,032 t ha^{-1} d^{-1} olarak saptanmıştır. Buna göre günlük sediment miktarı ise 195,78 ton/gün olarak belirlenmiştir. İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisini daha iyi bir şekilde anlamak için hem Trakya Yarımadasının (İkiel vd., 2020) hem de Türkiye'nin (Erpul vd., 2018) ortalama yıllık toprak kaybı miktarları günlük olarak tekrar hesaplanmıştır. Sonuçta inceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonuna bağlı bir şekilde günlük gerçekleşen ortalama toprak kaybının Trakya Yarımadası (0,013 t ha^{-1} d^{-1}) ve Türkiye (0,005 t ha^{-1} d^{-1}) için hesaplanan günlük ortalama toprak kaybından daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla sel kaynaklı toprak erozyonuna bağlı bir şekilde günlük gerçekleşen ortalama toprak kaybının Trakya Yarımadası ve Türkiye için belirlenmiş günlük ortalama toprak kaybının çok üzerinde olması, ekstrem olayların toprak erozyonuna etkisini göstermesi bakımından oldukça önemlidir.



Şekil 12: (a) İnceleme alanındaki Sisli Vadi mevkinde sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisiyle biriktirilen sedimentler, (b) İnceleme alanındaki toprak ve çöp erozyonu sebebiyle farklı organik ve inorganik maddeler birikmiştir.

5. Sonuç

Bu çalışma, Türkiye'nin Trakya Yarımadasındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun anlaşılmasına ilişkin ilk değerlendirmeye karşılık gelmektedir. İnceleme alanındaki toprak kaybı miktarının selin meydana geldiği tarihlerde belirgin bir şekilde değiştiği tespit edilmiştir. Hem ortalama hem de maksimum toprak kaybı miktarı olarak en yüksek değerine ise 5.9.2023 tarihinde ulaşmıştır.

Buna göre ilgili tarihte sırasıyla 0,032 t ha^{-1} d^{-1} ve 6,437 t ha^{-1} d^{-1} toprak kaybı yaşanmıştır. Aynı tarihteki günlük sediment miktarının da MUSLE model tahmin sonucuna göre 195,78 ton/gün şeklinde olduğu hesaplanmıştır. İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun daha çok eğim ve yağış artışının belirgin olduğu üst havzadaki vadilerde, etkisinin de akarsularda biriktirmenin arttığı alt havzadaki vadi tabanına yakın alanlarda olduğu anlaşılmıştır.

İnceleme alanındaki sel kaynaklı toprak erozyonunun etkisi özellikle proaktif bir yaklaşımla çözümlenmelidir. Bunun için ana akarsu kolu üzerinde belirli aralıklarla sel tırmığı kurulmalıdır. Böylece yukarı havzadan gelebilecek toprak ve çöp erozyonunun tuzaklanıp mansaptaki ulaşım ağları, hidrolik yapılar ve diğer teknik altyapılarda yapabileceği hasar engellenebilir. Erozyonun şiddetli olduğu akarsu kolları üzerinde dinlendirme havuzları yapılmalıdır. Bununla birlikte akarsu vadisinde eğimin tam düzlük olduğu alanlar sel sonrasında su basması ve sediment birikimine karşı uygun bir kullanım şekliyle değerlendirilmelidir. Ayrıca inceleme alanındaki ana akarsu kolu üzerinde sediment ölçümünün yapılmasına yönelik çalışmalar başlatılmalıdır.

Çalışma sonuçları sel kaynaklı toprak erozyonunun yaşanmış olay ölçeğinde modellenmesinin önemini vurgulamaktadır. Zira yaşanmış bir olaya dayalı toprak erozyonu modellemesi hem ölçüm hem de tahmin verilerine dayandığı için daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Çalışma sonuçları sel kaynaklı toprak erozyonunun MUSLE modeliyle başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca bu sonuçlar paydaşlar ve politika yapıcılar tarafından erozyona yatkın alanların belirlenmesi ve toprağın korunmasına yönelik eylemler hakkında bilgi sağlanması amacıyla da kullanılabilecektir.

Kaynaklar

Abu El-Magd, S. A., Orabi, H. O., Ali, S. A., Parvin, F., & Pham, Q. B. (2021). An integrated approach for evaluating the flash flood risk and potential erosion using the hydrologic indices and morpho-tectonic parameters. *Environmental Earth Sciences, 80*, Article 694. https://doi.org/10.1007/s12665-021-10013-0

Adegede, A. P., & Mbajiorgu, C. C. (2019). Event-based sediment yield modeling for small watersheds using MUSLE in north-central Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 21*(2), 7–17.

Ahmari, H., Pebworth, M., Baharvand, S., Kandel, S., & Yu, X. (2022). Development of an ArcGIS-Pro Toolkit for assessing the effects of bridge construction on overland soil erosion. *Land, 11*, Article 1586. https://doi.org/10.3390/land11091586

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges, and limitations of soil erosion modeling. *International Soil and Water Conservation Research, 7*(3), 203–225. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004

Alexiou, S., Efthimiou, N., Karamesouti, M., Papanikolaou, I., Psomiadis, E., & Charizopoulos, N. (2023). Measuring annual sedimentation through high-accuracy UAV-photogrammetry data and comparison with RUSLE and PESERA erosion models. *Remote Sensing, 15*, Article 1339. https://doi.org/10.3390/rs15051339

ArcGIS. (2020, 22 Eylül). *Soil Erosion Tool*. https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d9cf2bdcb64e47d39df8410cb6814d20

Aronica, G., Brigandí, G., & Morey, N. (2012). Flash floods and debris flow in the city area of Messina, north-east part of Sicily, Italy in October 2009: The case of the Giampilieri catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 12*(5), 1295–1309.

Bannari, A., Kadhem, G., El-Battay, A., Hameid, N., & Rouai, M. (2016). Assessment of land erosion and sediment accumulation caused by runoff after a flash-flooding storm using topographic profiles and spectral indices. *Advances in Remote Sensing, 5*, 315–354. https://doi.org/10.4236/ars.2016.54024

Bannari, A., Ghadeer, A., El-Battay, A., Hameed, N. A., & Rouai, M. (2017). Detection of areas associated with flash floods and erosion caused by rainfall storm using topographic attributes, hydrologic indices, and GIS. In S. Pirasteh & J. Li (Eds.), *Global changes and natural disaster management: Geo-information technologies* (pp. 201–213). Springer.

Bauer, M., Dostal, T., Krasa, J., Jachymova, B., David, V., Devaty, J., Strouhal, L., & Rosendorf, P. (2019). Risk to residents, infrastructure, and water bodies from flash floods and sediment transport. *Environmental Monitoring and Assessment, 191*, Article 85. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7216-7

Berteni, F., Dada, A., & Grossi, G. (2021). Application of the MUSLE model and potential effects of climate change in a small alpine catchment in northern Italy. *Water, 13*(19), Article 2679. https://doi.org/10.3390/w13192679

Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology, 518*(PB), 194–205. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022

Conversion of Measurement Units. (2024). *Convert m³/s to acre foot/day*. 24 Mayıs 2024'te https://www.convertunits.com/from/m%5E3/s/to/acre+foot/day adresinden alındı.

CRED. (2023). *Centre for research on the epidemiology of disasters*. https://www.cred.be

Çağlar, F., Hanedar, A., Yıldırım, I., Görgün, E., Özdemir, A. D., Altürk, B., & Albut, S. (2019). TR21 Bölgesi'nde ekstrem iklim olaylarının mevcut durumu ve gelecek projeksiyonları. In F. Konukçu, S. Albut, & B. Altürk (Eds.), *TR21 Trakya Bölgesinde İklim Değişikliğinin Etkileri ve Uyum Stratejileri* (pp. 23–45). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.

Demir, S., Şimşek, H., & Kaya, Y. (2024). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and MUSLE in Yozgat-Kadılı Village. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 12*(10), 1684–1695.

Dendy, F. E., & Bolton, G. C. (1976). Sediment yield-runoff drainage area relationships in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation, 31*, 264–266.

Djoukbala, O., Hasbaia, M., Benselama, O., & Mazour, M. (2019). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment, 5*, 725–743. https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6

Doğan, O., Cebel, H., Akgül, S., & Küçükçakar, N. (2000). *Türkiye büyük toprak grupları (K) faktörleri*. Köy Hizmetleri APK Dairesi Başkanlığı Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Şube Müdürlüğü.

Dönmez, Y. (1990). *Trakya bitki coğrafyası*. İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Basımevi.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2015). *Akım gözlem yıllıkları*. https://dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/744

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). *Kırklareli-Demirköy-Değirmen Dere ve Bulanık Dere taşkın tespiti ve hesabı (05-06/Eylül/2023)*. Devlet Su İşleri 11. Bölge Müdürlüğü, Edirne.

Duman, H. (2024, 8 Mart). *Kırklareli'de doktor ve eşinin öldüğü sel felaketi: İlk duruşma görüldü*. https://medimagazin.com.tr/hekim/kirklarelide-doktor-ve-esinin-oldugu-sel-felaketi-ilk-durusma-goruldu-110349

Edwards, K. (2024). *Rational equation calculator*. https://www.lmnoeng.com/Hydrology/rational.php

Ege, İ. (2022). *İğneada Longoz Ormanlarını besleyen derelerin uygulamalı hidrografyası ve sürdürülebilirliği* [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Eroğlu, İ. (2022). Trakya Yarımadası'nda ortalama hava sıcaklıklarının trend analizi. *International Social Sciences Studies Journal, 8*(102), 3121–3144. http://dx.doi.org/10.29228/sssj.64624

Eroğlu, İ. (2024). Trend analysis of precipitation in the Thrace Peninsula. *Coğrafya Dergisi, 47*, 165–182.

Erpul, G. (2011). *Sediment modelinin geliştirilmesi ile Türkiye havzalarının erozyon risk haritalarının oluşturulması*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü.

Erpul, G., Şahin, S., İnce, K., Küçümen, A., Akdağ, M. A., Demirtaş, İ., & Çetin, E. (2018). *Türkiye Su Erozyonu Atlası*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları.

ESRI. (2023). *Sentinel-2 10m land use/land cover timeseries downloader (2017–2023)*. https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/#mapCenter=-77.08371%2C26.38100%2C11&mode=step&timeExtent=2017%2C2023&year=2023

Farahnak, M., Sato, T., Tanaka, N., Nainar, A., Mohd Ghaus, I., & Kuraji, K. (2024). Impact of thinning and contour-felled logs on overland flow, soil erosion, and litter erosion in a monoculture Japanese Cypress forest plantation. *Water, 16*, Article 2874. https://doi.org/10.3390/w16202874

García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology, 198*, 20–36. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023

Güresinli, Y. Z. (1978). Tortum Gölü su toplama havzasında sedimantasyon sorunu ve kontrolü üzerinde bir araştırma. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 9*(2–3), 1–14.

Harita Genel Müdürlüğü. (2023). 1:25.000 ölçekli topografya paftaları. Harita Genel Müdürlüğü. https://www.harita.gov.tr/urun/125000-olcekli-raster-turkiye-topografik-harita/34

Islam, M. R., Imran, H. M., Islam, M. R., & Saha, G. S. (2024). A RUSLE-based comprehensive strategy to assess soil erosion in a riverine country, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences, 83*, Article 162. https://doi.org/10.1007/s12665-024-11455-y

İkiel, C., Ustaoğlu, B., & Koç, D. E. (2020). Trakya Yarımadası'nda erozyon duyarlılık analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 4*, 1–14. https://dergipark.org.tr/tr/pub/jader/issue/53577/666287

JBA Risk Management. (2023, 4 Eylül). *Storm Daniel: September 2023*. https://www.jbarisk.com/products-services/event-response/storm-daniel-september-2023/

Kaffas, K., Papaioannou, G., Varlas, G., Al Sayah, M. J., Papadopoulos, A., Dimitriou, E., Katsafados, P., & Righetti, M. (2022). Forecasting soil erosion and sediment yields during flash floods: The disastrous case of Mandra, Greece, 2017. *Earth Surface Processes and Landforms, 47*(7), 1744–1760. https://doi.org/10.1002/esp.5344

Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021, July 11–16). *Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning* [Symposium presentation]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Brussels, Belgium.

Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., & Sahoo, S. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research, 6*(1), 31–42.

Khemiri, K., & Jebari, S. (2022). Identifying vulnerable lands using the duration-frequency of Mediterranean exceptional rainfall events in semiarid watersheds. In H. Chenchouni et al. (Eds.), *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences* (pp. 433–446). Springer.

Kırklareli Valiliği. (2023, 7 Eylül). *Geçmiş olsun Kırklareli*. http://www.kirklareli.gov.tr/gecmis-olsun-kirklareli-20230907-1

Kiptum, A., Antonarakis, A. S., Todd, M. C., & Guigma, K. (2024). Characteristics, drivers, and predictability of flood events in the Tana River Basin, Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 53*, Article 101748. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101748

Korkanç, S. Y., & Korkanç, M. (2006). Sel ve taşkınların insan hayatı üzerindeki etkileri. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 8*(9), 42–50. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/650468

Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü. (1991). *Kırklareli ili arazi varlığı* (İl Rapor No:39). Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları.

Kurter, A. (1978). Istranca (Yıldız) Dağlarının temel yapısal ve jeomorfolojik özellikleri (Yeni görüşlerin ışığında I). *Güneydoğu Avrupa Araştırmaları Dergisi, 6–7*, 1–26.

Kurter, A. (1982). Istranca (Yıldız) Dağlarının temel yapısal ve jeomorfolojik özellikleri (Yeni görüşlerin ışığında II). *Güneydoğu Avrupa Araştırmaları Dergisi, 10–11*, 1–19.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2022). *Demirköy-İğneada meteoroloji istasyonlarının uzun yıllara ait tüm parametreler bülteni*. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *Demirköy (18102), Demirköy/Beğendik köyü (18795) ve Pınarhisar/Mahya Dağı (18797) meteoroloji istasyonları arası günlük ve saatlik yağış verileri*. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Millares, A., Chikh, H. A., Habi, M., Morsli, B., Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V., & Martín-Rosales, W. (2020). Seasonal patterns of suspended sediment load and erosion-transport assessment in a Mediterranean basin. *Hydrological Sciences Journal, 65*(6), 969–983. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1724294

Miller, C. R. (1951). *Analysis of flow-duration. Sediment-rating curve method of computing sediment yield*. U.S. Bureau of Reclamation.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2002). *Edirne-Kırklareli 1/250.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Ocak, F., & Bahadır, M. (2024). Evaluation of potential flood areas in the basin of Lake Ladik through AHP and GIS integration, (Samsun, Türkiye). *Journal of Geomorphological Researches, 13*, 71–93. https://doi.org/10.46453/jader.1513212

Online Dendy-Bolton. (2024). *Calculation of sediment yield by the Dendy-Bolton formula*. https://ion.sdsu.edu/onlinedendybolton.php

Opere, O. (2013). Chapter 21 - Floods in Kenya. In P. Paron, D. O. Olago, & C. T. Omuto (Eds.), *Kenya: A natural outlook: Geo-environmental resources and hazards* (pp. 315–330). Elsevier.

Othman, A., El-Saoud, W. A., Habeebullah, T., Shaaban, F., & Abotalib, A. Z. (2023). Risk assessment of flash flood and soil erosion impacts on electrical infrastructures in overcrowded mountainous urban areas under climate change. *Reliability Engineering & System Safety, 236*, Article 109302. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109302

Oudchaira, S., Rhoujjati, A., Hanich, L., & El Hachimi, M. L. (2024). Evaluating soil loss and sediment yield for sustainable management of the Hassan II dam within Morocco's Upper Moulouya watershed using RUSLE model and GIS. *Environmental Earth Sciences, 83*, Article 210. https://doi.org/10.1007/s12665-024-11518-0

Özcan, E. (2006). Sel olayı ve Türkiye. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, 26*(1), 35–50.

Özdemir, M. A., & Kaymak, H. (2022). 16 Haziran 2022 tarımsal arazilere zarar veren Ayazini (Afyonkarahisar) sel ve taşkını. *International Social Sciences Studies Journal, 8*(105), 4174–4188. http://dx.doi.org/10.29228/sssj.66493

Özsoy, G. (2007). Uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) teknikleri kullanılarak erozyon riskinin belirlenmesi [Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Ozsahin, E., Duru, U., & Eroglu, I. (2018). Land Use and Land Cover Changes (LULCC), a Key to Understand Soil Erosion Intensities in the Maritsa Basin. *Water, 10*(3), Article 335. https://doi.org/10.3390/w10030335

Özşahin, E. (2016). Alakır Çayı Havzasında (Antalya) Toprak Kaybının Mekânsal Dağılışı ve Etkili Faktörler. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 13*(2), 123–134. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/178660

Özşahin, E. (2023a). Farklı erozyon tahmin modellerine göre akarsu sedimantasyon miktarının belirlenmesine bir örnek: Naip Barajı Havzası (Tekirdağ, Türkiye). *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 10*, 1–19. https://doi.org/10.46453/jader.1203890

Özşahin, E. (2023b). Climate change effect on soil erosion using different erosion models: A case study in the Naip Dam basin, Türkiye. *Computers and Electronics in Agriculture, 207*, Article 107711. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107711

Özşahin, E., & Öztürk, M. (2024). An evaluation of the causes and consequences of the flash floods (5.9.2023) in the Degirmen River Basin in İğneada (Demirköy/Kırklareli). *Doğu Coğrafya Dergisi, 29*(51), 61–77. https://doi.org/10.5281/zenodo.12571618

Pakoksung, K. (2024). Assessment of soil loss from land cover changes in the Nan River Basin, Thailand. *GeoHazards, 5*(1), 1–21.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, C., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015a). Estimating the soil erosion cover-management factor at European scale. *Land Use Policy, 48C*, 38–50. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015b). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy, 54*, 438–447.

Phillips, J. D. (2002). Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin. *Journal of Hydrology, 269*(3–4), 236–250.

Polat, P., Kopar, İ., & Yalçın, F. (2023). Günebakan (Erzincan) seli örneği ile Esence Dağları'nın güney-güneybatı aklanında oluşan moloz yüklü eski ve yeni selleri denetleyen morfometrik faktörler. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 9*(2), 279–294.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). Revised universal soil loss equation (RUSLE). *Journal Soil Water Conservation, 46*, 30-33.

SCS Curve Number. (2024). *Free software tool*. https://zonums.com/online/hydrology/curve_number.php?id=9

Stefanidis, S. P., Chatzichristaki, C. A., & Stefanidis, P. S. (2021). An ArcGIS toolbox for estimation and mapping soil erosion. *Journal of Environmental Protection and Ecology, 22*(2), 689–696.

Stefanović, I., Ristić, R., Dragović, N., Stefanović, M., Živanović, N., & Čotrić, J. (2024). Effects of erosion control works: Case study – Reservoir Celije, Rasina River Basin, the Zapadna Morava River (Serbia). *Water, 16*(6), Article 855. https://doi.org/10.3390/w16060855

Taylan, E. D., & Damçayırı, D. (2016). Isparta bölgesi yağış değerlerinin IDW ve Kriging enterpolasyon yöntemleri ile tahmini. *Teknik Dergi, 27*(3), 7551–7559. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/284992

Thornes, J. B. (2002). The evolving context of Mediterranean desertification. In N. A. Geeson, C. J. Brandt, & J. B. Thornes (Eds.), *Mediterranean Desertification: A Mosaic of Processes and Responses* (pp. 5–11). John Wiley.

Turoğlu, H. (1997). Istranca yöresi'nin Karadeniz aklanı: Coğrafi özellikler, sorunlar ve öneriler. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Dergisi, 5*, 283–333. https://dergipark.org.tr/tr/pub/iucografya/issue/25054/264519

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015*. https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/home/GAR_2015/GAR_2015_73.html

Víg, B., Fábián, S. A., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Halmai, A., Kovács, I. P., Varga, G., Dezső, J., Nagy, G., & Lóczy, D. (2023). Morphometric analysis of low mountains for mapping flash flood susceptibility in headwaters. *Natural Hazards*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1318911/v1

Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal soil loss equation using runoff energy factor. In *Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources* (pp. 244–252). Agricultural Research Service & U.S. Department of Agriculture.

Williams, J. R., & Berndt, H. D. (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of the ASAE, 20*(6), 1100–1104. https://doi.org/10.13031/2013.35710

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: A guide for selection of practices for soil and water Conservation* (Agricultural Handbook, No. 282). U.S. Department of Agriculture.

World Meteorological Organization. (2020). *2020 on track to be one of three warmest years on record*. World Meteorological Organization (WMO). https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-track-be-one-of-three-warmest-years-record

Zhang, J., Wang, J., Zhao, N., Shi, J., & Wang, Y. (2024). Analysis of changes in runoff and sediment load and their attribution in the Kuye River Basin of the Middle Yellow River based on the slope change ratio of cumulative quantity method. *Water, 16*(7), Article 944. https://doi.org/10.3390/w16070944

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 135–156, DOI: 10.21324/dacd.1562566

Kaya Düşmeleri Risklerine Karşı Esnek Kaya Bariyerlerinde Enerji Kapasitesi Tayini ve Uygun Yer Seçim Kriterleri

Eroltan Durmuş[1,*], Özkan Coruk[2], Ahmet Karakaş[2]

[1]*Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 41100, Kocaeli.*
[2]*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 41100, Kocaeli.*

Özet

Kaya düşmesi, yamaç yüzeylerinde veya teknik girişimler ile açılmış olan şev yüzeylerinde süreksizlik düzlemleriyle ya da ortamın ayrışma durumuna göre oluşan zayıf dayanımlı zonlarla sınırlandırılmış kaya bloklarının yer çekimi etkisiyle yamaç veya şev eğim yönü boyunca hareket kazanması olarak tanımlanır. Günümüz teknolojisindeki gelişmeler kaya düşmelerinin önlenmesinde önemli proje ve imalatların ortaya çıkmasına katkı sağlamaktadır. Alınan önlemler neticesinde daha güvenli yerleşim alanları, daha güvenli karayolu ve demiryolu geçişleri oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada da son yıllarda kaya düşme riski olan sahalarda koruma önlemi olarak imal edilen yüksek enerji sönümlemeli esnek kaya bariyerlerinin enerji ve yükseklik tayinleri ile bariyer tasarımı için seçilecek uygun hat kriterleri hesaplamaların sonucuna göre değerlendirilmiştir. Bu kriterlerin belirlenmesi aşamasında hesaplanan enerji, hız, sıçrama yükseklik değerleri ve yörüngeleri, bilgisayar yazılımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda blok sıçrama yükseklikleri ve yüzey temas noktalarında önemli farklar bulunmadığı, ancak hesaplamalarda elde edilen kinetik enerji değerlerinin (2515kJ) bilgisayar yazılımının verdiği kinetik enerji sonucundan(1600kJ) fazla olduğu görülmüştür. Aradaki fark, bilgisayar yazılımında kaya bloğunun yüzey temaslarındaki yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarından kaynaklanmaktadır. Çalışmada, kaynak alandan eş zamanlı ya da kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerine karşı güvenli alanda kalınması amacıyla yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayıları ihmal edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Kaya Düşmesi, Kinematik Analiz, Kaya Düşmesi Etki Elanı, Yüksek Enerji Sönümlemeli Kaya Bariyeri

Determination of Energy Capacity and Suitable Location Selection Criteria in Flexible Rock Barriers Against Rockfall Risks

Abstract

Rockfall is defined as the movement of rock blocks bounded by discontinuity planes or weak zones formed according to the weathering condition of the environment on the slope surfaces or on the slope surfaces cut by technical works along the slope or slope direction under the influence of gravity. Developments in today's technology contribute to the emergence of important projects and productions in the prevention of rock falls. As a result of the measures taken, safer residential areas, safer highway and railway crossings can be established. In this study, the energy and height determinations of high energy damping flexible rock barriers, which have been manufactured as a protection measure in areas with rockfall risk in recent years, and the appropriate line criteria to be selected for the barrier were evaluated according to the results of manual calculations. During the determination of these criteria, calculated energy, speed, bounce height values and trajectories were compared with the computer software results. As a result of the comparisons, it was seen that there were no significant differences in the block bounce heights and surface contact points, but the kinetic energy values obtained in the calculations (2515 kJ) were higher than the kinetic energy result given by the computer software (1600 kJ). The difference is due to the surface friction and restitution coefficients in the surface contacts of the rock block in the computer software. In the study, surface friction and restitution coefficients were neglected in order to remain in the safe area against simultaneous or short-timed multiple block falls from the source area.

Keywords

Rock Fall, Kinematic Analysis, Rock Fall Impact Area, High Energy Absorption Rock Barrier

1. Giriş

Günümüz teknolojisi, potansiyel kaya düşmelerinin meydana gelmesi halinde can ve mal kayıplarına sebep olabilecek alanlarda koruma önlemi olarak çok sayıda mühendislik uygulamasına imkân vermektedir. Önlem alınıp alınamayacağı durumları için sahanın belirli bir araştırma sürecinden geçmesi gerekmektedir. Araştırma sürecinin büyük bir bölümünü mühendislik jeolojisi amaçlı saha gözlemleri ve sahadan alınan veriler oluşturmaktadır.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 303 3143 Faks: +90 (262) 303 10 03
E-posta: eroltandurmus08@gmail.com (Durmuş E.), coruk@kocaeli.edu.tr (Coruk Ö.) akarakas@kocaeli.edu.tr (Karakaş A.)

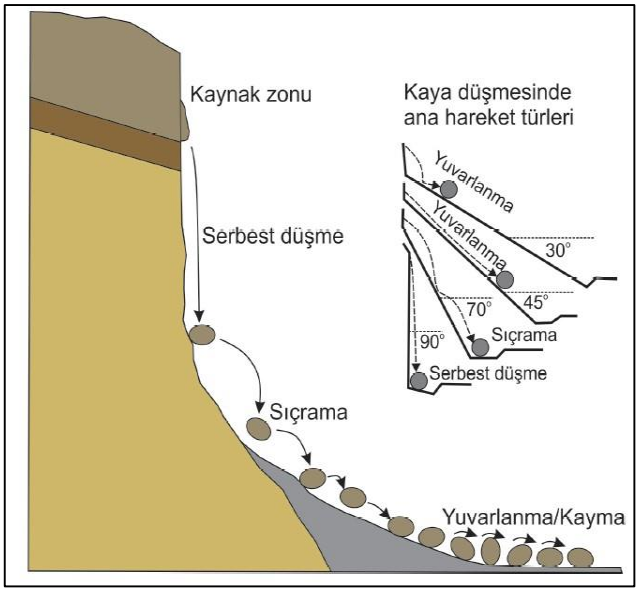
Gönderim Tarihi / Received : 07/10/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 11/12/2024

Sahada yapılacak veri derleme işleminin başında, düşmesi muhtemel kaya bloklarının bulunduğu "kaya düşmesi kaynak alan/alanların" sınırlarının belirlenmesi gelmektedir. Kaynak alan içerisinde düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespiti (kaya bloklarını sınırlayan süreksizliklerin mühendislik özellikleri, düşmesi muhtemel kaya bloklarının hacimleri, muhtemel kütleleri ve konumları), daha önceki tarihlerde düşmüş kaya bloklarının konumları, hacim ve kütleleri, çalışma alanındaki kaya düşmesi olaylarının zamana bağlı sıklığı, korunması istenilen sahanın kaynak alana olan yatay ve düşey mesafeleri ile kaynak alana göre konumu, kaynak alan ve korunması istenilen saha arasındaki yamaç/şev yüzey topografyasının sayısal verileri, kaya düşmesi senaryolarının ve analizlerin hazırlanmasında önemli bir veri tabanı oluşturur. Böylelikle kaya düşmesi etki alan sınırlarının tespitiyle alınması gereken önlemlerin neler olabileceği konusunda önlemli bir aşama kaydedilmiş olacaktır. Elde edilecek veriler kullanılarak farklı yöntemler yardımıyla pek çok kaya düşmesi modellemesi yapılabilmektedir. Bilgisayar teknolojisi ve yazılımlar yardımıyla kaya düşmesi modellemeleri oluşturulabildiği gibi, ampirik eşitlikler ve 2 boyutlu topografik kesitler kullanılarak da modellemeler oluşturulabilmektedir.

Yapılan modellemeler sonucunda, korunması istenilen tesise (altyapılar, binalar, karayolu veya demiryolu güzergâhları vb.) olan etkisi /oluşturacağı tehlikenin saptanması durumunda, uygun yapısal önlemler seçilebilmektedir. Seçilecek yapısal koruma önlemi için en önemli faktör, düşmesi muhtemel kaya bloklarının enerji potansiyelidir. Yapısal önlemin uygun şekilde tasarımı için çalışma alanının jeolojik ve topografik özellikleri ile düşmesi muhtemel kaya bloklarının darbe yüklerinin önlem yapısı tarafından karşılanabilirliği (sönümlenebilirliği) bilinmelidir. Bu kapsamda, yukarıda da değinildiği üzere pek çok yapısal önlem alınabilmektedir; toprak seddeler, kaya tutma hendekleri, rijit istinat yapıları, ağaçlandırma, saptırma yapıları ve esnek kaya bariyerleri ilk akla gelenlerdir.

1.1. Kaya Düşmelerinde Hareket

Kaya düşmelerini, süreksizlikler veya zayıflık zonları ile sınırlandırılmış kaya bloklarının doğal veya yapay nedenlere bağlı olarak belirli bir eğime sahip yamaç ya da şev yüzeyinden koparak/ayrılarak hareket etmesi olarak tanımlayabiliriz. Şekil 1'de görüldüğü üzere bulunduğu noktadan kopan/ayrılan kaya bloğunun hareketi, topografik eğim miktarına göre yuvarlanma, sıçrama veya serbest düşme şeklinde gerçekleşebilmektedir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020). Ritchie (1963)'e göre topografik eğimin 76°'nin üzerine çıktı durumlarda hareket serbest düşme olarak gerçekleşmektedir. Ancak farklı saha koşullarında 70° civarındaki açıya sahip yüzeylerde hareketin zıplamalardan kademeli olarak düşmeye geçtiği görülür (Dorren, 2003). Wang ve Lee (2012)'ye göre topografik eğim ne kadar düzensiz olursa, kaya düşmesinin hareket davranışı da yuvarlanmadan sıçramaya varan değişkenlikler gösterecektir. Kaya bloğunun şekli ise düşen kaya bloğunun hareket yolunu etkileyen bir faktördür. Bu faktör ise eklem pürüzlülük katsayısına bağlıdır. Yamaç eğiminin düşmesi, enerji ve hız değerlerinin azalmasına neden olabileceğinden, düşük enerjili hareketler sırasında bloklarda kayma şeklinde hareketlerin görülmesi de olasıdır.



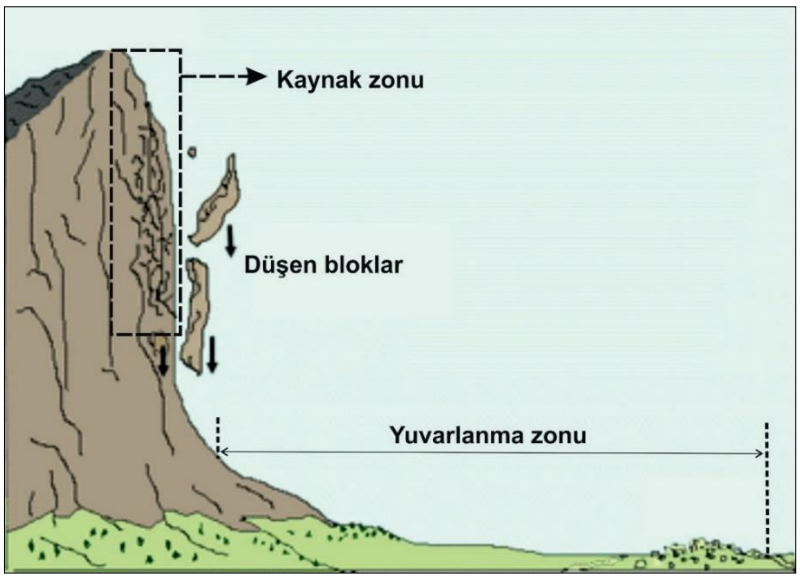
Şekil 1: Yamaç veya şev topografik eğimine göre kaya bloklarının genel hareket ve davranışları (Ritchie,1963; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

Kaya düşmelerinde düşmesi muhtemel blok boyu ve şekli kadar, aynı anda tek bir bloğun mu yoksa çoklu blok düşmelerinin mi olacağına dair analizlerin de yapılması gerekir. Blok kütleleri ve morfoloji, kaya bloğu ya da bloklarının oluşturacağı kinetik enerjileri, sıçrama yükseklikleri, hızları ve düşen blokların izleyebileceği en muhtemel yol konusunda önemli veriler vermektedir.

Kaynak alandan düşmesi muhtemel olan kaya bloklarının bulundukları noktadan kopması/ayrılması durumunda yamaç yüzeyinde hareketleri sonucunda enerjilerinin tamamen sönümlendiği, yani hareketin durduğu nokta ya da noktalar, aynı zamanda maksimum yuvarlanma mesafeleridir. Yamaç topografyasındaki düzensizlikler ile yamaç yüzeyini oluşturan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, yamaç yüzeyi üzerindeki doğal engeller (bitki örtüsü gibi), kaya bloğunun mekanik özellikleri, kütlesi ve blok şekli bu mesafeyi etkileyen ana faktörler olarak sıralanabilir.

1.2. Kaynak Zonu ve Yuvarlanma Zonu

Kaya bloklarının çeşitli faktörler etkisiyle bulundukları kaya ortamından ayrılarak düşme hareketine bağladığı ilk bölüm "kaynak zonu" olarak isimlendirilir. Genelde dik/dike yakın topografik açıya sahip, çatlaklı/kırıklı yapısal özellik gösterirler. Kaynak zonundan ayrılan kaya bloklarının düşme hareketleri boyunca sıçrama ve yuvarlanma şeklinde hareketlerine devam ettikleri zon ise "yuvarlanma zonu" olarak bilinir (Şekil 2). Yuvarlanma zonu Evans ve Hungr (1993)'a göre iki ayrı bölüme ayrılır. Bunlar, geçiş bölgesi ve durma bölgesidir. Geçiş bölgesi, genelde düşük enerjili küçük çaplı kaya bloklarının yer aldığı bölüm olup, durma bölgesi ise daha büyük çaplı yüksek enerjili kaya bloklarının ulaşabildiği alanlar olarak tanımlanmıştır. Ancak günümüzde kaya düşmesi etki alan sınırları içerisinde her zaman geçiş zonlarına rastlanamamaktadır. Bunun sebebi, yamaç topografik özellikleri ile düşen blokların enerjileridir. Kaya düşme davranışlarını kontrol eden başlıca iki parametre; yamaç veya şev açısı ile yamacı veya şevi oluşturan malzemedir. Şekil 3'te Wyllie (2015) tarafından dört ayrı zonda kaya düşme davranışları ile depolanma kriterleri tanımlanmaktadır.



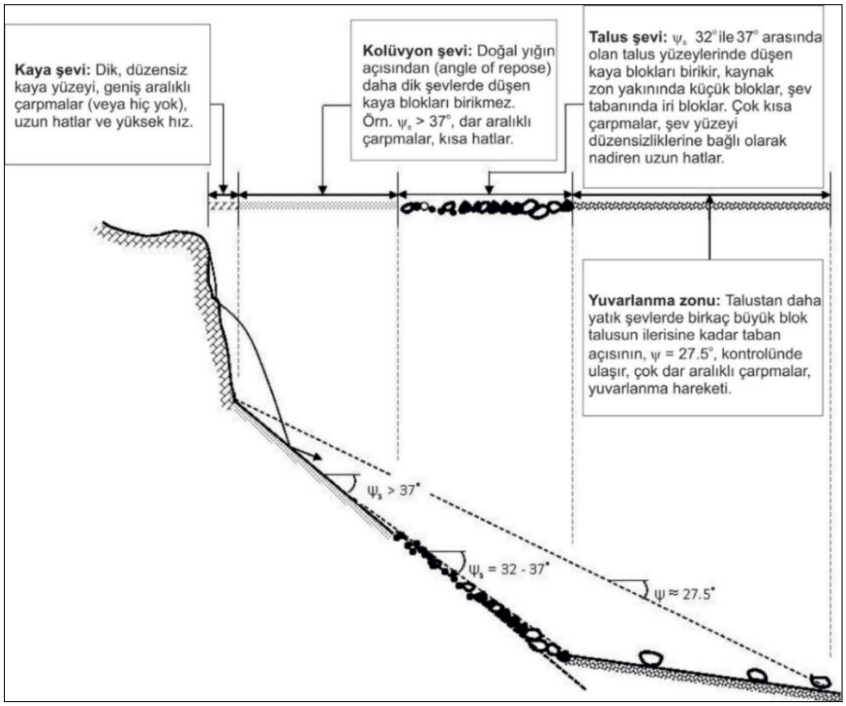
Şekil 2: Kaya düşmelerinde kaynak zon ve yuvarlanma zonları (Evans & Hungr, 1993; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, bilgisayar yazılımı dışında kaya düşmesi analizinin hangi parametreler ve eşitliklerle nasıl yapılacağı bir saha örneği ile açıklanmaya çalışılmıştır. Saha çalışmaları kapsamında kaynak zon yamaç yüzeyinde kinematik analiz, kaya bariyeri güzergâhının seçimi için de sahada Schmidt çekici deneyleri yapılmıştır. Kinematik analizlerle Dips 8.0 bilgisayar yazılımı kullanılarak kaynak zonda süreksizlik denetimli duraysızlık türleri saptanmıştır. Kaya bariyerleri için uygun hat seçiminde ise topografik verilerle birlikte Schmidt çekici deneylerinden elde edilen dayanım değerleri kullanılmıştır. Yapılan kaya düşmesi analizi sonuçları, aynı parametreler kullanılarak Rocfall8.0 bilgisayar yazılımı ile karşılaştırılmıştır.

2.1.Kaya Düşmelerinde Saha Çalışmaları

Kaya düşmeleri için sahada yapılacak incelemelere dair elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenirliği, düşme analizlerinin ve alınabilecek önlemlerin doğru yorumlanabilmesini sağlayacaktır. Saha verileri toplanırken öncelikle geçmiş dönemlerde düşmüş kaya bloklarının varlığı, kaynak alan-yuvarlanma-durma zonlarının morfolojik ve jeolojik özellikleri, daha önce düşmüş kaya bloklarının şekil ve boyutları ile kaynak alanda düşmesi muhtemel kaya bloklarının şekil ve boyutları, daha önce düşmüş kaya bloklarının hareket türü (düşme, sıçrama, yuvarlanma) gibi konular dikkate alınmaktadır (Caltrans, 2020).



Şekil 3: Kaya düşmelerinde şev açılarına bağlı kaya düşme davranışları ve depolama özellikleri (Wyllie, 2015; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2020)

Saha çalışmalarında yukarıdaki sorulardan alınabilen cevaplar, büro çalışmaları süresince yapılacak analizler için önemli bir veri niteliğindedir. Özellikle yerleşik alanların etkilendiği kaya düşmesine konu saha çalışmalarında kaynak alan ve kaya bloklarının eriştiği en uzak noktalara ait kayıtlar ilk aşamadaki en önemli veridir. Daha önce kaya düşmesi olayı yaşanmamış, ancak kaynak zon içerisinde düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespiti halinde kaynak alan alt kotlarındaki yamaç morfolojisine ait sayısal verilerin alınması gerekmektedir. Yamaç topografyasının sayısal verileri kullanılarak düşmesi muhtemel kaya bloklarının düşme analizleri yapılabilecektir. Yamaç topografik eğiminde ve eğim yönündeki farklılıklar göz önünde bulundurulmalı, eğim yönündeki farklılıklara göre ayrı ayrı topografik kesitler üzerinde düşme senaryolarının analizleri yapılmalıdır.

2.2.Kaya Düşme Analizleri

Koruma tipi veya stabilizasyon tipi önlemler alınmadan önce kaya düşmesi analizleri yapılması gerekir. Analizlerde kaya düşmelerinin hareket yönelimleri ve enerji miktarlarının tayin edilebilmesi için blok hızlarını, darbe enerjilerini ve sıçrama yüksekliklerini dikkate alan yöntemler kullanılmaktadır. Koruma tipi önlemlerin geliştirilmesi için gerekli olan en önemli parametre, Eşitlik 1'de formüle edilen kinetik enerjidir.

$$\textit{Toplam Kinetik Enerji: } \frac{1}{2}m\vartheta^2 + \frac{1}{2}I\,\omega^2 \tag{1}$$

m: Blok kütlesi
ϑ: Translasyonel Hız
ω: Rotasyonel Hız
I: Atalet Momenti olarak tanımlanmıştır.

$$\omega = \frac{\vartheta}{r} \tag{2}$$

$$I = \frac{2}{5}mr^2 \tag{3}$$

$$\textit{Potansiyel Enerji: } m.g.h \tag{4}$$

m: Blok kütlesi
g: Yer Seçimi İvmesi
h: Düşmesi muhtemel bloğun kaynak alan ile durma noktası arasındaki kot farkı

Bir serbest düşme hareketinden sonra, hareketine yuvarlanma veya sıçrama şeklinde devam eden kaya bloğunun enerjisi potansiyel enerjiden kinetik enerjiye dönüşür. Kaynak zonundan koparak serbest düşme yapan bir bloğun yamaç yüzeyine ilk temasındaki hızı:

$$V = \sqrt{2gh} \tag{5}$$

Burada V bloğun hızı, g yerçekimi ivmesi ve h bloğun maksimum düşme yüksekliğidir. Fakat her kaya düşmesi olayı, yukarıda belirtildiği üzere bir "serbest düşme" ile başlamayabilir. Dik/dike yakın eğim dışında, 40-70° arasında değişen eğim miktarlarına sahip yamaç ya da şev yüzeyinde gerçekleşebilecek hareketler kamalanma, düzlemsel kayma ve devrilme şeklinde gerçekleşebileceği gibi, serbest haldeki yarı yuvarlaklaşmış şekilli bloklar da yuvarlanarak düşme hareketine başlayabilir.

Kaya bloğunun (yarı yuvarlaklaşmış, küre şekilli) eğimli bir yüzey üzerindeki hareketine yuvarlanma şeklinde başlaması durumunda, aralarında h kadar yükseklik farkı bulunan ikinci noktaya ulaştığı andaki hız değeri, Eşitlik 6 kullanılarak tanımlanır.

$$V = \sqrt{\left(\frac{10}{7}\right).g.h} \tag{6}$$

Yuvarlanma şeklinde gerçekleşen blok hareketi, topoğrafik eğimin 45° üzerine çıktığı bölgelerde, sıçrama türünde hareketine devam edecektir. Bu durumda eğimli bir düzlem üzerinde bloğun ilk temasına kadar olan hareketi, bir eğik atış prensibini yansıtır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bileşke hızın düşey bileşeninin yukarı değil aşağı yönlü olduğudur. Topoğrafik eğimin 45°'nin üzerine çıktığı ilk noktadan kaya bloğunun eğik atış hareketine başladığı ilk hız bileşeninin V_0 olacağı düşünüldüğünde; hareketin başladığı ilk noktadaki yatay hız bileşeni (V_{0x}), bir sonraki temas noktasına kadar olan yörünge boyunca sabit kalacaktır. Değişen parametre, artış gösteren hız ise düşeydeki hız bileşeni (V_{0y}) olacaktır.

$$h = \left(\frac{1}{2}\right)gt^2 + V_{0y}.t \tag{7}$$

$$X = V_{0x}.t \qquad \text{veya} \qquad t = \frac{X}{V_{0x}} \tag{8}$$

$$tan\alpha = \frac{V_{0y}}{V_{0x}} \qquad \text{ve} \qquad \mathrm{V_{0x}} = \mathrm{V_0 cos\alpha} \tag{9}$$

İlk temas noktasındaki çarpma hızının düşey bileşeni;

$$V_y^2 = V_{0y}^2 + 2gh$$

$$V_y = \sqrt{V_{0y}^2 + 2gh} \tag{10}$$

İlk temas noktasındaki çarpma hızı:

$$V_x = V_{0x}\ ,\ V = \sqrt{Vy^2 + Vx^2} \tag{11}$$

İki temas noktası arasındaki yatay ve düşey mesafeler bulunurken; iki nokta arasındaki topografik eğim oranı,

$$h = -x.tan\beta \qquad \text{(Wyllie, 2014)} \tag{12}$$

$$h = \frac{1}{2}g\left(\frac{x}{V0cos\alpha}\right)^2 + x.tan\alpha \tag{13}$$

İki sıçrama noktası arasındaki maksimum yükseklik için;

$$a = \left(\frac{g}{2}\right).\left(\frac{1}{V0Cos\alpha}\right)^2 \qquad \text{(Wyllie, 2014)} \tag{14}$$

$$b = tan\alpha \tag{15}$$

$k = tan\beta$ (2 nokta arasında, topograya eğimindeki değişim) (16)

Eşitlik 12 ve 13' ün birbirine eşitliğinden hareketle elde edilecek eşitliğin ilgili kısımları Eşitlik 14, 15 ve 16 olarak ele alındığında sıçramanın en büyük değerini verecek 15 nolu Eşitlik elde edilir.

$$hmax = a.x^2 + x(b-k)$$ (Wyllie, 2014) (17)

15 nolu eşitliğin x'e göre türevi ile x değeri elde edilir.

$$x = -\frac{(b-k)}{2a}$$ (18)

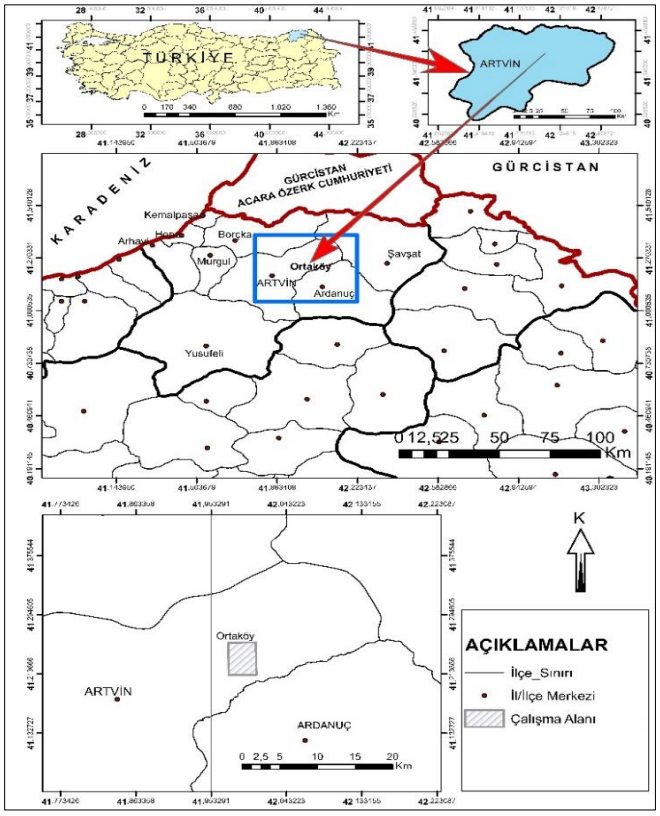
Temas noktasına gelen kaya bloğunun geliş açısı;

$$\alpha 1 = atan(\frac{V_y}{V_x})$$ (19)

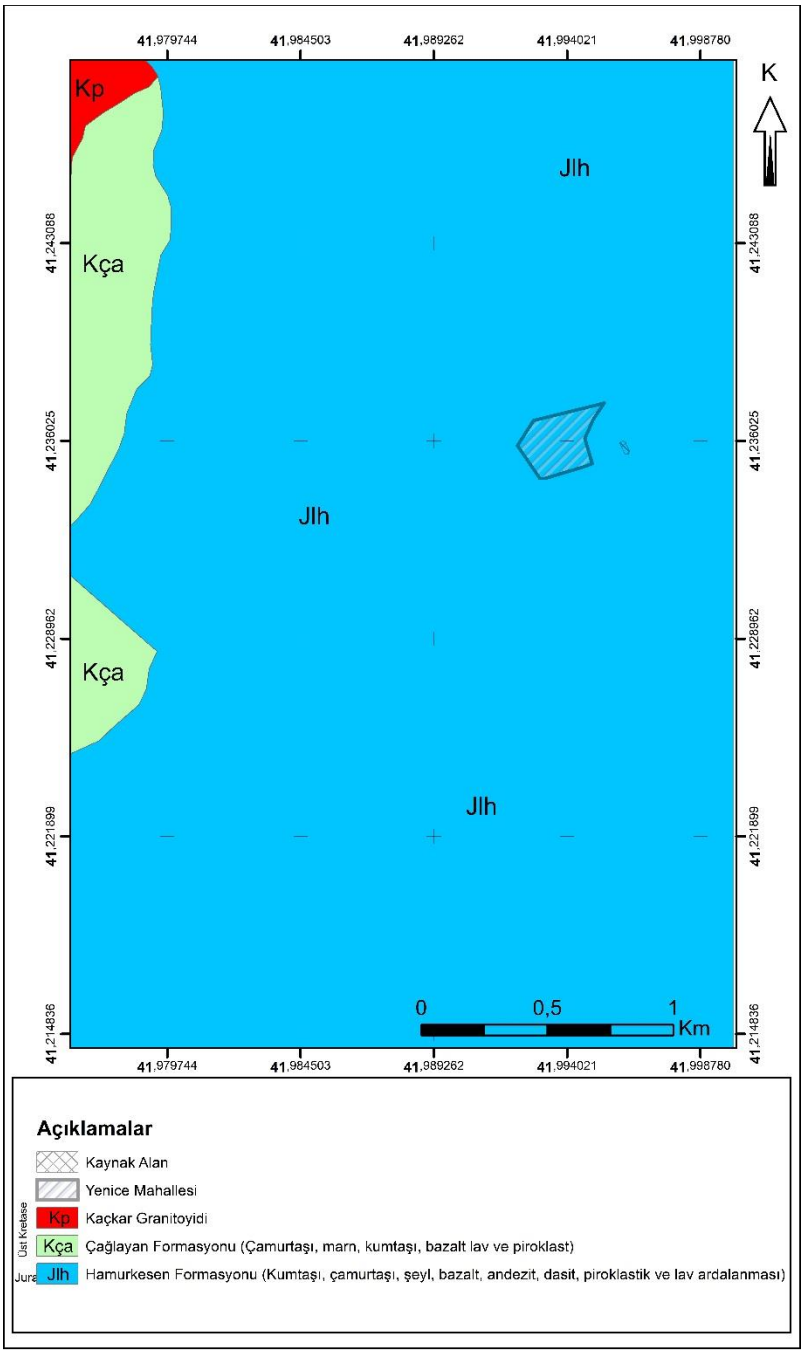
Kaya düşme analizleri, düşme esnasındaki yuvarlanma hatları ile yuvarlanma hatları boyunca bloğun sıçrama yükseklikleri, bloğun kazanacağı veya kaybedebileceği hızı ve enerjisi, kaya düşmesi tehlikesi altındaki alanların belirlenmesine yönelik maksimum yuvarlanma mesafelerinin saptanmasını amaçlamaktadır. Günümüzdeki bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak önce 2 boyutlu düşme analizleri ve modellemeler geliştirilmiştir. Son yıllarda insansız hava araçlarının kullanım alanlarının da genişlemesiyle bu çalışmalar için 3 boyutlu kaya düşme analizleri ve modellemeye imkân tanıyan bilgisayar yazılımları üretilmiştir.

3. İki Boyutlu Kaya Düşmesi Modellemesinde Ortaköy (Artvin) Yenice Mahallesi Örneği

Örnek inceleme alanı Artvin İli Merkez ilçesine bağlı olup, Artvin İl Merkezinin yaklaşık 15 km kuzeydoğusunda yer alır (Şekil 4). Yenice mahallesi, Ortaköy köyünün merkez yerleşkesinin yaklaşık 1 km güneyinde, köy ulaşım yolunun alt kotunda, konveks bir yamacın eteğinde bulunur. Ortaköy köyünde, Jura ve Üst Kretase yaşlı birimler yüzeylenmektedir (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 1998). Yenice mahallesi ve yakın çevresinde Jura yaşlı Hamurkesen Formasyonuna ait volkano sedimenter kayaçlar yer alır. Formasyon kumtaşı, çamurtaşı, şeyl, bazalt, andezit, dasit, piroklastik ve lav ardalanmasından oluşur. Bu birimlerin batısında, Üst Kretase yaşlı Çağlayan formasyonuna ait volkano sedimenter kayaçlar ile Kaçkar Granitoyidi gözlenir (Şekil 5).



Şekil 4: Ortaköy-Artvin inceleme alanının yer bulduru haritası



Şekil 5: Ortaköy ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Maden Tetik Arama Genel Müdürlüğü, 2012)

Yamaç topografik eğimi 37-45° arasında değişmekte olup konveks bir yamaç oluşuna bağlı olarak güneybatı, batı ve güneydoğuya doğru eğimlidir. Yenice mahallesinin yaklaşık 125 m kuzeydoğusunda, yaklaşık 810 ile 840 m kotlarında, yamaç eğim miktarının aniden arttığı (40-70° arasında), andezit ve bazaltlardan oluşan, orta-sık çatlaklı yapıya sahip bir zonun varlığı söz konusudur. Sahada bu bölüm incelendiğinde, birbirlerini kesen çok sayıda süreksizliğin olduğu, süreksizlik düzlemlerinin genelde pürüzlü (ondülasyonlu-düzensiz (IV), ondülasyonlu–düz (V), basamaklı-düz (II), basamaklı-düzensiz (I) (Barton, 1976), birkaç mm'den 15 cm'ye varan süreksizlik açıklıklarının olduğu kaya düşmesi kaynak zonu nitelikleri taşıyan bir zon olduğu kanaatine varılmıştır.

Söz konusu kaynak alandan 2011 yılı şubat ayında meydana gelen kaya düşmesi olayında yerleşim yerine ulaşmış kaya bloklarının toplamda 3-3.5 m³'lük hacme sahip olduğu görülmüştür. Kaya düşmesi olayı sonucunda Yenice mahallesinde bir ev ve bir ahır/samanlık binalarında tahribata sebep olmuştur (Şekil 6). Ahırda bulunan 2 küçükbaş hayvanın telef olmasına neden olmuştur. Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü arşivi incelendiğinde, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğünce sahada yapılan inceleme sonucu düzenlenen 04.01.1991 tarihli jeolojik etüt raporunda da Yenice mahallesinde muhtemel kaya düşmesi olayından 27 konut ve 1 caminin etkilenebileceği belirtilmiş, kaya ıslah işlemlerinin yapılmasının konutların bir başka yere nakledilmesinden daha ekonomik olacağı

kanaatiyle, sahada ıslah çalışmalarının yapılması yönünde ayrıca bir değerlendirme yapılması önerilmiştir. Rapora istinaden 02.07.1997 tarihli ıslah planlama ve proje raporunda, ıslah önerisi olarak düşmesi muhtemel kaya bloklarının tespit edilerek patlayıcı maddeler yardımıyla düşürme/kırma/ufalama ve geçici kaya tutucu bariyerler ile kaya tutucu hendekler önerilmiştir.



Şekil 6: 2011 yılı şubat ayında Ortaköy Yenice mahallesinde düşmüş olan kaya bloğu parçalarının bazıları konut ve ahır çatısından sonra yaptığı sıçramanın ardından ağaç dallarına takılı kalmıştır (a ve b). Kaya bloklarının konut avlusuna ve ahıra ulaşmış olanlarının her birinin 1.5-2.0 m³ civarında hacme sahip olduğu görülmektedir (c ve d).

Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünce 2011 yılı şubat ayında yapılan saha incelemelerinde, yamaç topografik eğiminin kaynak alandan sonra Yenice mahallesi alt kotlarına kadar 37°'yi düşmeden devam etmesi nedeniyle mevcut topografik duruma göre uygun genişlik ve derinlikte bir kaya tutucu hendek imalatının yapılmasının mümkün olamayacağı anlaşılmıştır. Uygun genişlik ve derinlikte kazılamayacak hendekler, düşebilecek bloklar için tutucu/enerji düşürücü bir etken olmaktan daha çok, sıçrama yüksekliklerini hatta hızlarını ve buna bağlı olarak da kinetik enerjilerinde artışlara neden olabilecek bir etken olabilecekleri unutulmamalıdır. Kaynak alan altındaki yamaç şeklinin konveks (dışbükey) şekilli olması nedeniyle, kaynak alanda yapılacak patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemleri sonrasında kaya bloğu parçalarının yamacın hangi yönüne doğru ne kadarlık hız/enerji ve hareketi boyunca ne kadarlık sıçrama/sıçramalar yaparak hareketine devam edebileceğine dair net bir veri tabanı oluşturabilmek mümkün değildir. Bu nedenle geçici bariyerlerin tam olarak hangi hat veya hatlarda oluşturulması gerektiği, minimum yükseklikleri ve minimum enerji kapasitelerinin ne olabileceği konuları da sonuçsuz kalacaktır.

Bir kaya bloğunun doğal nedenlere bağlı olarak bulunduğu noktadan ayrılarak harekete geçişiyle izleyeceği yol, kazanacağı hız, enerji ve de sıçrama yükseklikleri gibi parametreler, patlatma/kırma işlemlerine bağlı yerinden kopan kaya bloğunun hareketlenmesiyle oluşan hız, enerji, sıçrama yüksekliği ve düşme hatlarıyla büyük farklılıklar içereceği kuşkusuzdur. Ayrıca bu yöntem, oluşacak yapay titreşimlere bağlı olarak kaynak zonun farklı noktalarından farklı boyutlarda kaya bloklarının da kaynak alandan ayrılmasına ve çoklu kaya düşmesi olaylarına neden olabileceği de unutulmamalıdır. Dolayısıyla patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemleri sırasında geçici kaya bariyeri oluşturulmasının da Yenice mahallesindeki konutlar için risk oluşturacağı kanaatiyle, kaya ıslahına yönelik farklı yöntemler üzerinde çalışılmıştır.



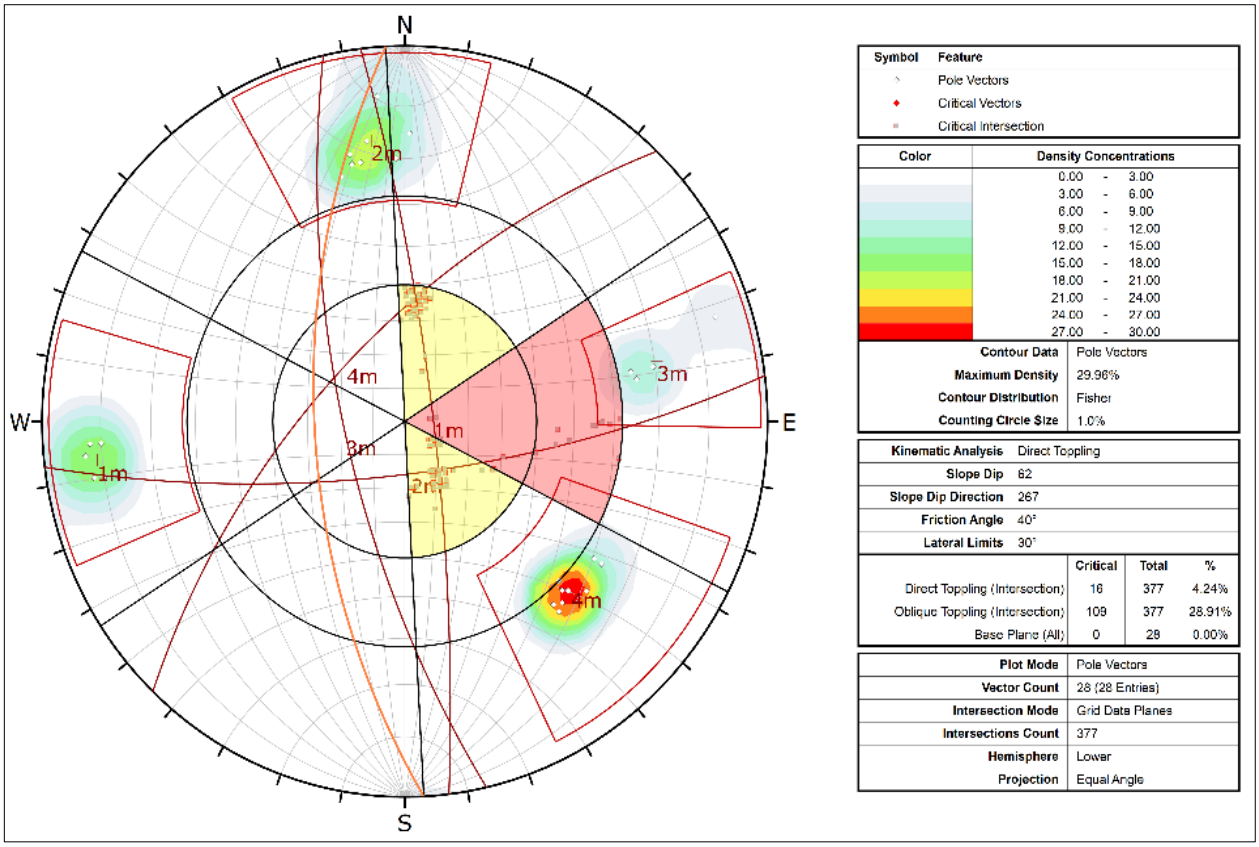
Şekil 7: 2011 yılı şubat ayında düşen kaya bloğunun kaynak alan yamaç yüzeyinden koptuğu noktanın görünümü

3.1. Kaynak Zonda Stabilizasyon

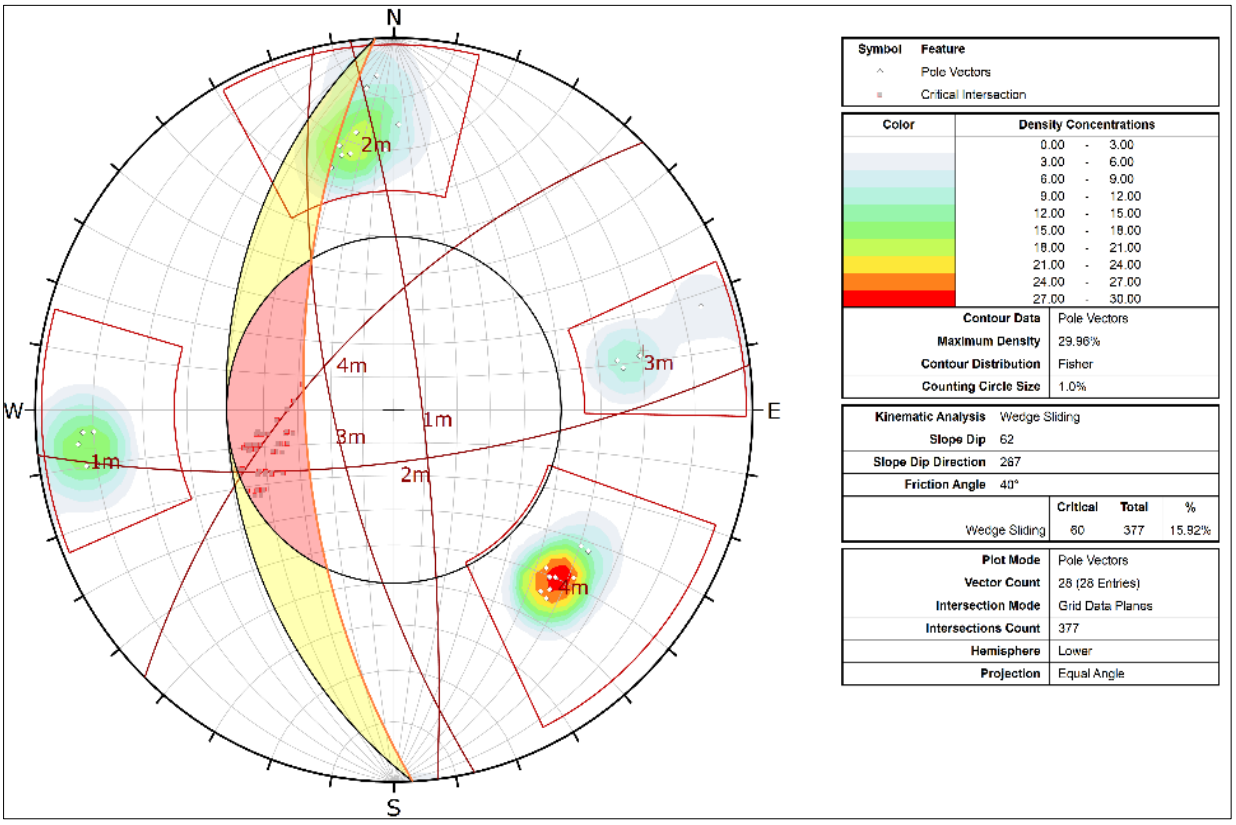
Kaynak zonda, süreksizliklerle sınırlandırılmış kaya blokları incelendiğinde, düşmesi muhtemel kaya bloklarının 0.5 ile 2.5 m^3 arasında değişen hacimlere sahip oldukları tespit edilmiştir. Kaynak alanda üç farklı tip süreksizlik tespit edilmiştir.

A Tip Süreksizlikler: Kaynak zonun batı ve güneybatıya bakan yamaçlarında ve yamaç tepe seviyesi arka bölümlerinde gözlenmiştir; eğim yönleri kaynak zonu yamaç eğim yönüne paralel, açıklıkları kaynak zon üst seviyelerinde 1.5-2.0 cm, kaynak zon alt seviyelerinde açıklık tespit edilmemiştir. Yamaç tepe seviyesinden 1.5-2.0 m arkasında gözlenmiştir. Düzlem pürüzlülük durumu; basamaklı-düz (II). Ancak bu süreksizliklerin eğim miktarları kaynak zon yamaç eğimine eşit veya kaynak zon yamaç eğiminden daha fazladır. B Tip Süreksizlikler: Eğim yönleri kaynak zon yamaç eğim yönüne zıt yönde, kısmen dik/dike yakın açılıdır. Açıklıkları birkaç mm'den 3 cm'ye varmaktadır. Pürüzlülük durumu: ondülasyonlu, düz (V). C Tip Süreksizlikler: Kaynak zon içerisinde, kaynak zon yamacını farklı doğrultu ve eğim açılarıyla kesen süreksizliklerdir. Pürüzlülük durumu: ondülasyonlu-düzensiz (IV), basamaklı-düzensiz (I). Açıklıkları birkaç mm'den 5 cm'ye varmaktadır. Bu süreksizlikler hem birbirlerini hem de kaynak alanda yamaç doğrultusuna paralel gelişmiş diğer süreksizliklerin neredeyse tamamını kesmektedir. Bu tip süreksizliklerin sayıca çokluğu, kısa mesafelerde çeşitli doğrultu ve eğim yönlerine sahip oluşları nedeniyle süreksizliklerin sınırladığı bloklar form bakımından şekilsiz, yarı prizmatik, yarı yuvarlaklaşmış görünüm kazanmıştır.

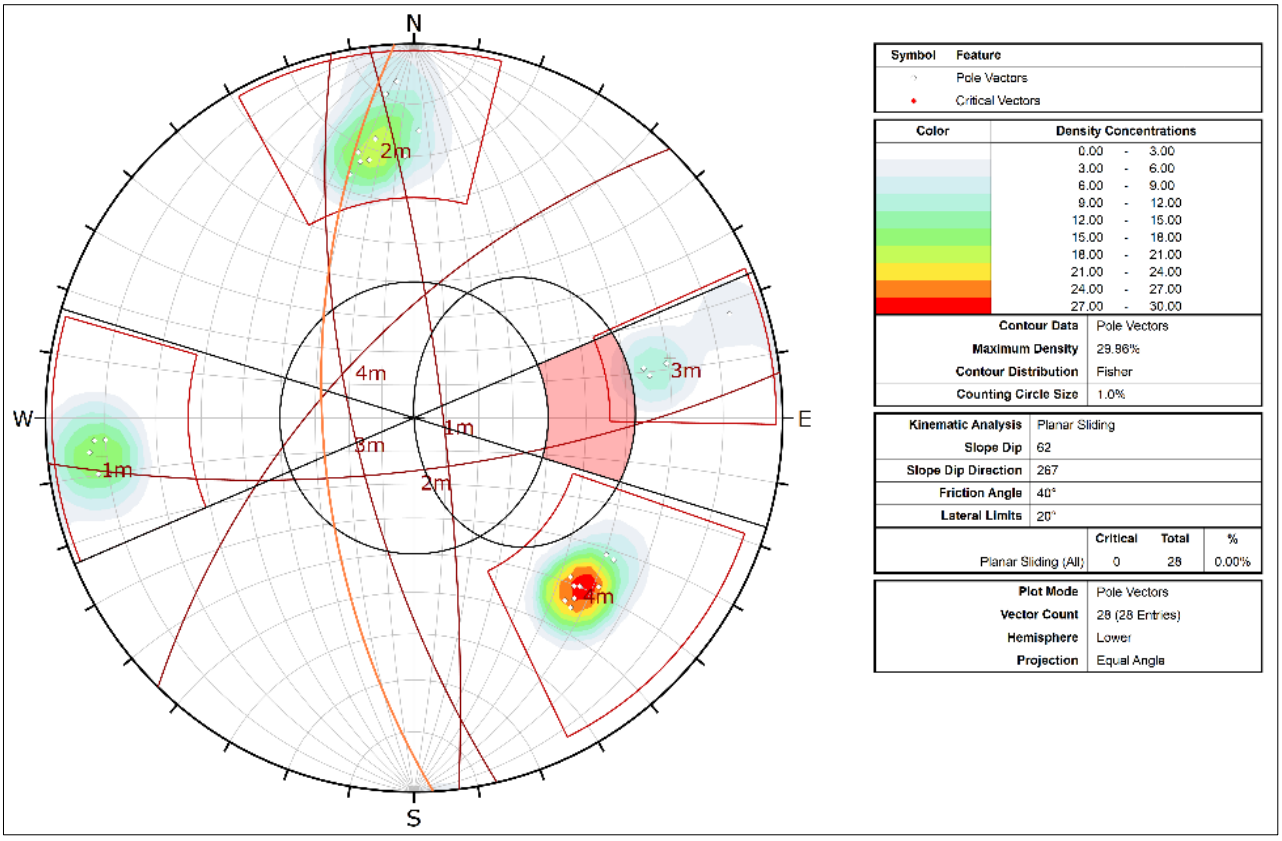
Kaynak alandaki süreksizliklerin eğim yönü ve eğim miktarları, içsel sürtünme açısı (40°), yamaç eğim yönü ve eğim miktarlarına ait veriler dikkate alındığında, yamaç yüzeyi boyunca yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre düşmesi muhtemel kaya blokları için kaynak alandaki yamaçtan kamalanma ve devrilme türü yenilmelerin görülmesi daha muhtemeldir (Şekil 7 ve Şekil 8). Burada düzlemsel kayma türü yenilmeler için kinematik analizlerde limit açı 20° olarak seçilmiştir (Hoek & Bray, 1977). Devrilme türü yenilmeler için limit açı değeri 30° olarak alınmıştır (Ulusay, 2001). Ayrıca düzensiz süreksizliklerle sınırlandırılmış yarı yuvarlak şekilli blokların çokluğu, bu tip blokların kaynak alandan koparak harekete geçme olasılığını da göz önünde bulundurmak gerekmektedir.


N
W
E
S
1m
2m
3m
4m
Symbol Feature
Pole Vectors
Critical Vectors
Critical Intersection
Color Density Concentrations
0.00 - 3.00
3.00 - 6.00
6.00 - 9.00
9.00 - 12.00
12.00 - 15.00
15.00 - 18.00
18.00 - 21.00
21.00 - 24.00
24.00 - 27.00
27.00 - 30.00
Contour Data Pole Vectors
Maximum Density 29.96%
Contour Distribution Fisher
Counting Circle Size 1.0%
Kinematic Analysis Direct Toppling
Slope Dip 82
Slope Dip Direction 267
Friction Angle 40°
Lateral Limits 30°
Critical Total %
Direct Toppling (Intersection) 16 377 4.24%
Oblique Toppling (Intersection) 109 377 28.91%
Base Plane (All) 0 28 0.00%
Plot Mode Pole Vectors
Vector Count 28 (28 Entries)
Intersection Mode Grid Data Planes
Intersections Count 377
Hemisphere Lower
Projection Equal Angle

(a)


N
W
E
S
1m
2m
3m
4m
Symbol Feature
Pole Vectors
Critical Intersection
Color Density Concentrations
0.00 - 3.00
3.00 - 6.00
6.00 - 9.00
9.00 - 12.00
12.00 - 15.00
15.00 - 18.00
18.00 - 21.00
21.00 - 24.00
24.00 - 27.00
27.00 - 30.00
Contour Data Pole Vectors
Maximum Density 29.96%
Contour Distribution Fisher
Counting Circle Size 1.0%
Kinematic Analysis Wedge Sliding
Slope Dip 62
Slope Dip Direction 267
Friction Angle 40°
Critical Total %
Wedge Sliding 60 377 15.92%
Plot Mode Pole Vectors
Vector Count 28 (28 Entries)
Intersection Mode Grid Data Planes
Intersections Count 377
Hemisphere Lower
Projection Equal Angle

(b)



(c)

Şekil 8: Ortaköy Köyü kaya düşmesi kaynak alandaki süreksizlik denetimli oluşabilecek duraysızlık türlerinin DİPS8.0 Kinematik Analizi sonuçları (a: Devrilme Türü Yenilme, b: Kamalanma Türü Yenilme, c: Düzlemsel Kayma Türü Yenilme) (Rocscience Inc., 2024).

Düşebilecek kaya bloğu kütleleri değerlendirildiğinde; 2.5 m^3 hacimli bir kaya bloğu ağırlığının yaklaşık 6 ton olduğu kabulüne göre kaynak zonu yüzeyinde pasif ankrajlar ve tel ağlar ile stabilizasyon durumu: Günümüz teknolojisiyle üretilen tel ağlar mevcut kaya bloklarını taşıyabilecek kapasitedirler ancak, bu tip sistemler için sahada uygulanan pasif ankraj boyları 1.5 metreyi geçememektedir. Kaynak zon içerisinde A tipi süreksizliklerin kaynak zonu yamaç tepe seviyesinin 2 m arkasında da izleniyor oluşu nedeniyle 1.5 m uzunluğundaki pasif ankrajlar (yüzey ankrajları ve tepe ankrajları) yamaç yüzeyindeki stabilizasyon için yetersiz kalabilecektir. Daha derin pasif ankraj delgilerinin yapılması daha farklı bir makine ekipmanı gerektireceği gibi, açıklıkları 5 santimetreyi bulan süreksizlik sistemi (C Tipi süreksizlikler) içerisinde pasif ankraj enjeksiyonu yapılması da teknik açıdan farklı sorun ve güçlükler yaşatabilecektir. Böyle bir ortama süreksizlik düzlemlerini geçemeyecek uzunlukta yüzey ankrajlı çelik tel ağ ile stabilizasyon uygulamak, yamaç yüzeyine ilave yük anlamına da gelmekte, kaynak zonundaki kaya ortamının makaslama gerilmesini arttıracak bir uygulama olabileceği kanaatiyle, kaynak zon yamaç yüzeyinde çelik tel ağ imalatlı bir stabilizasyon uygulaması riskli bulunmuştur.

Kaynak zonu, yamaç yüzeyinde düşmesi muhtemel blokların stabilizasyonu için bir çelik tel ağ yerine, düşmesi muhtemel blokların yamaç yüzeyine dik, uygun çapta pasif ankrajlar ve blok ağırlığını taşıyabilecek kapasitede uygun çaplı çelik halatlar kullanılmalıdır. Bu önlemler kaynak zonundan yamaç tepe hattına 2.5 metreden yakın olmayacak şekilde ankraj yapılmalıdır. Böylece kaynak zonundaki blokların yalnızca bir bölümünün stabilizasyonu sağlanmış olur. Ancak bu işlem tek başına yeterli olmayacaktır. Her düşmesi muhtemel bloğun stabilizasyonu benzer şekilde sağlanamayacaktır; yarı serbest haldeki bloklar üzerinde yapılacak işlemler sırasında blokların düşme riskleri göz önünde bulundurulduğunda, yukarıda tanımlanan uygulama yalnızca kapalı süreksizliklerle sınırlandırılmış, gelecekte duraysızlık olasılığı olan bloklar için geçerlidir.

3.2. Kaynak Zon Alt Kotlarında Koruma Önlemi (Yüksek Enerji Sönümlemeli Kalıcı Kaya Bariyeri) Önerimi

Ortaköy köyü Yenice mahallesindeki kaya düşmesi risk ve tehlikelerine karşı stabilizasyon önlemlerinin ve tutucu hendekler, patlatmalı düşürme/kırma/ufalama işlemlerinin yetersiz ve eksik bir uygulama olabileceği düşüncesiyle kalıcı kaya bariyerine yönelik analizler yapılması gerekliliği doğmuştur.

Bu örnek çalışmada Yenice mahallesindeki kaynak zonu alt kotunda yapılabilecek yüksek enerji sönümlemeli esnek, kalıcı bir kaya bariyerinin hangi kotta konuşlandırılabileceği, düşünülen kot boyunca düşen kaya bloğunun hızı, enerjisi ve sıçrama yüksekliklerinin ne olacağı analizleri bir bilgisayar yazılımı ile değil, ampirik eşitlikler yardımıyla yapılmıştır.

Çalışma alanında yüksek enerji sönümlemeli kalıcı bir kaya bariyerinin nerede konumlandırılabileceği konusunda iki farklı yaklaşım söz konusudur:

1. Kaya bariyerine ait ana dikmelerin temel betonu ve temel ankrajları ile taşıyıcı ve fren sisteminin bulunduğu halat sisteminin ankraj uygulanacağı "sağlam" kaya ortamı boyunca bariyer hattının belirlenmesi; ardından belirlenen kottaki maksimum hız, maksimum enerji ve maksimum sıçrama yüksekliklerine göre kapasitesi belirlenecek bariyerin belirlenen hat boyunca monte edilmesi.

2. Düşme analizleri sonucunda, hız ve enerji verilerinin ile sıçrama yüksekliklerinin en az olduğu kotta, belirlenen değerlere göre kapasitesi olan bir bariyer montajının yapılması.

Burada, yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri imalatı için öncelikle sahada eğim yönüne dik konumlandırılabilecek hat veya hatlar boyunca çatlaksız/az çatlaklı, sağlam, ayrışma bakımından mümkün olduğunca taze yüzeylere sahip muhtemel hat güzergâhları çalışılmıştır. Bu güzergâhlar boyunca düşme analizleri sonucunda elde edilen hız, enerji ve sıçrama yükseklikleri belirlenmiştir. Bu hatlar belirlenirken sahada uyulması önemli hususlar vardır. Belirlenen hat boyunca bariyer dikmeleri arasında kot farkları olmamalı, her iki bariyer dikmesi arası hattın mümkün olduğunca eğim yönüne dik (±10°) olması durumu da bariyerlerin enerji sönümleme sırasında fren sistemlerinin optimum çalışmasını sağlayacaktır.

Yapılan saha çalışmalarında yukarıdaki şartların sağlanabileceği hatlar üzerinde kaya ortamı dayanım parametrelerine göre: 820 m kotu ile 720 m kotlarına kadar yamaç yüzeyindeki örtü kalınlığının 0-75 cm arasında değişmekte olduğu, örtü kalınlığının en fazla olduğu bölümün kaynak zonu alt kotundaki birikme zonunda (820-800 m kotları arası) olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle sahada montajı yapılacak bir bariyerin birikme zonu içerisindeki montajı uygun bulunmamıştır. Yamaç boyunca yüzeyde gözlemlenebilen kaya mostralarının orta derecede çatlaklı, az ayrışmış özelliklerde olup Schmidt çekici yardımıyla sahada yapılan testlerden dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımı belirlenmiştir. Yapılan Schmidt çekici testleri sonucundaki değerlendirmelerde yamaç yüzeyindeki kaya mostralarının tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin 55-110 MPa arasındadır. Bu haliyle kaynak zon alt kotundaki yamaç yüzeyi boyunca 720 m kotlarına kadar kaya ortamı yüzeyinde tek eksenli sıkışma dayanımının Deere ve Miller (1966)'a göre düşük-orta dayanımlı, International Society for Rock Mechanics'e (Ulusay & Hudson, 2007) göre orta dayanımlı olduğu anlaşılmaktadır.

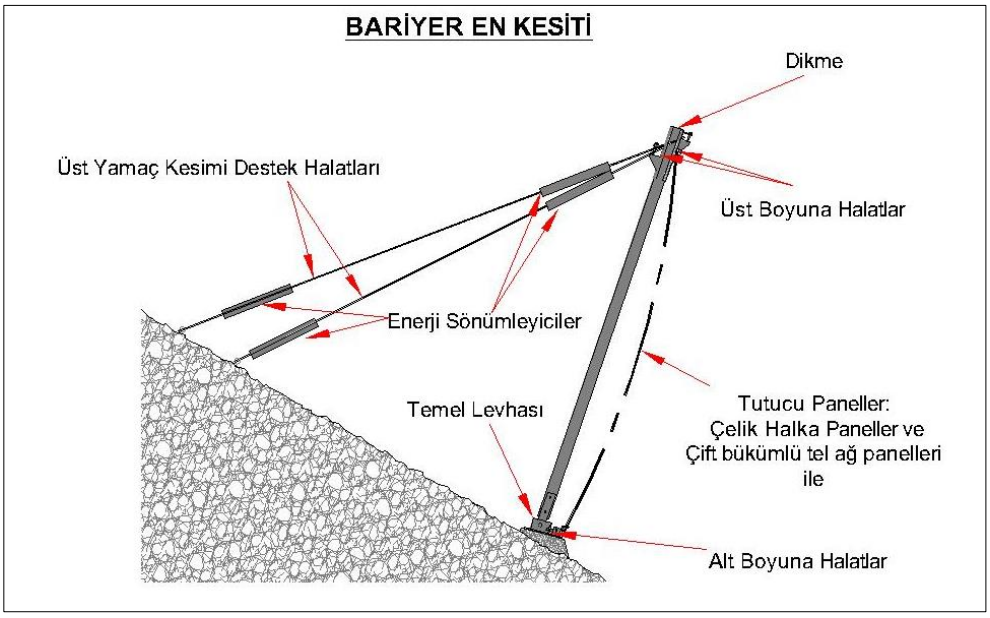
Kaynak zonun bittiği taban kotunda (820-800 m) bariyer planlaması yapılmamasının bir başka nedeni de kaynak zonu yamaç yüzeyi topuğundaki süreksizliklerin mühendislik özellikleridir. Kaya bariyerini üst yamaca sabitleyecek ankraj noktaları güvenli bulunmamıştır. Örtü kalınlığının en az olduğu (0-30 cm), kaya mostralarının görülebildiği, 797-790 m kotlarıdır. 797-790 m kotları arasında, yamaç topografyası da yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri montajı için uygun (iki dikme arasındaki kot farkı 15 cm'nin de altında) bulunmuştur. Ayrıca kaya mostralarının yüzeydeki dayanım değerleri bakımından düşük dayanım değerlerini de içeriyor oluşu nedeniyle kaya bariyeri ankraj boyları 2 m olarak seçilmiştir. Yapılacak düşme analizleri sonucunda 797-790 m kotları için elde edilecek toplam kinetik enerji değerlerine göre montajı yapılması önerilecek esnek kaya bariyeri kapasitesine göre de ankraj çapları belirlenecektir.

3.3. Önerilen Esnek Kaya Bariyeri Hattı İçin Kaya Düşme Analizleri

Esnek kaya bariyerleri, kaya düşmesi hattı üzerine yerleştirilen ve böylelikle düşen blokların önünü keserek durdurmayı sağlayan enerji sönümleyici sistemlerdir (Şekil 9). Esnek kaya bariyerleri çelik dikme direkler, halat panel ağlar, ankrajlar, halatlar, fren sistemleri (enerji sönümleyiciler) ve temel levhasından oluşur (Şekil 10). Esnek kaya bariyeri uygulamalarında 1000 kJ üzerindeki kaya bariyeri imalatlarının ETAG 027 (2013) yönergesi dahilinde olmalıdır.



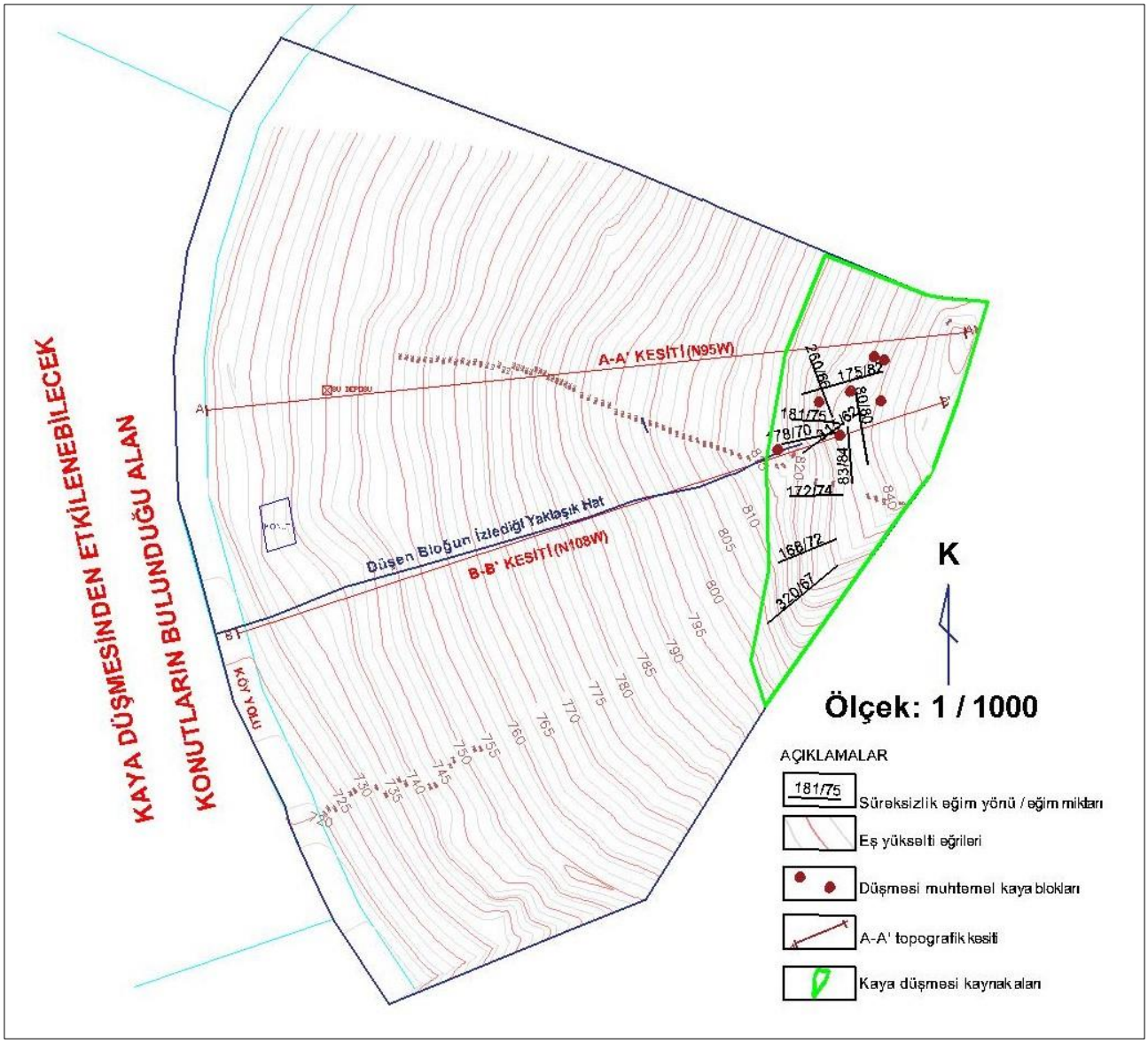
Şekil 9: Artvin İli merkez ilçesi, Ortaköy, Yenice mahallesinde imalatı yapılmış olan 3.000 kJ enerji sönümlemeli kaya bariyerinin kaynak zon üzerinden görünümü.



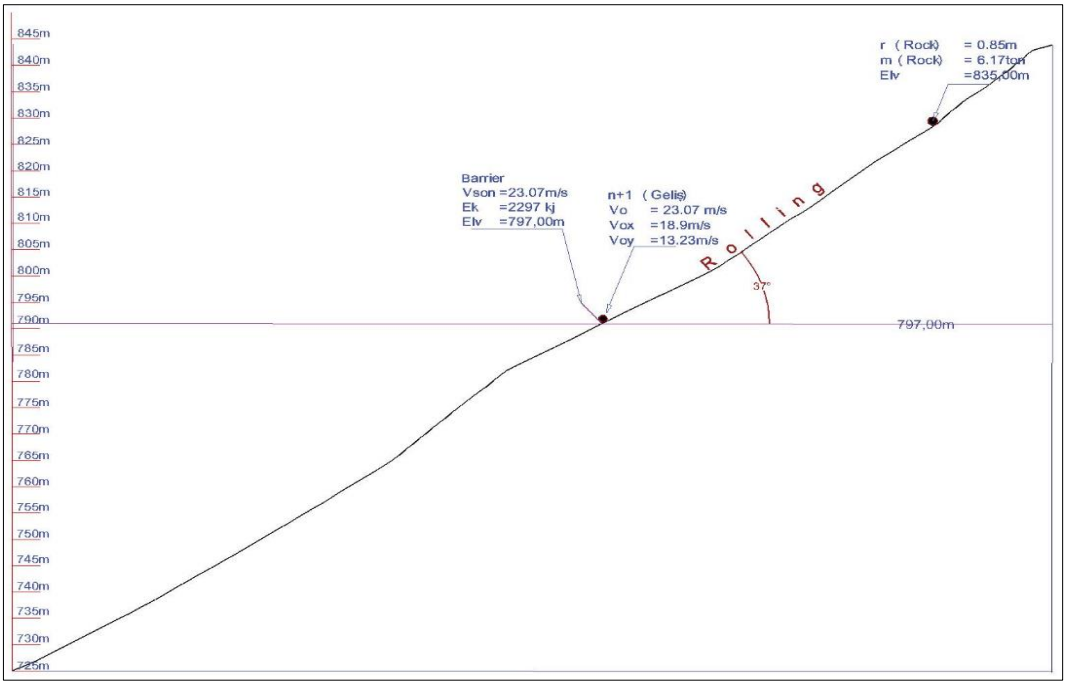
Şekil 10: Esnek Kaya Bariyeri Kesiti

Kaynak zon ile yerleşim alanı arasındaki yamacın tamamının 1/1.000 ölçekli topoğrafya haritası hazırlatılmıştır. Saha çalışmalarıyla, kaynak zonunda ve kaynak zonu alt kotlarında ölçülen süreksizliklerin eğim yönü/eğim miktarı değerleri ile kaynak zonu içerisinde düşmesi muhtemel kaya blokları bu harita üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 11). Yenice mahallesinde 2011 yılı şubat ayında düşmüş olan kaya bloğunun kaynak alandan ayrıldığı nokta ile izlemiş olduğu yol ve düşmesi muhtemel diğer kaya bloklarının izleyebileceği muhtemel yolların topografik kesitleri çıkarılmıştır (Şekil 11). Böylelikle kaynak zon, yerleşik alan arasında, kaya bloğunun düşebileceği muhtemel doğrultularda farklı topografik profillerde 2 boyutlu kaya düşmesi analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, kaynak zonundaki düşmesi muhtemel kaya bloğunun bulunduğu alanın 45°'nin altında ve 45°'nin üzerinde olmak üzere iki ayrı kesit üzerinde yapılan düşme analizi örnek olarak sunulmuştur (Şekil 12). Kaynak zon içerisinde topografik eğim miktarının 45°'nin üzerine çıktığı B-B' topografik kesit (Şekil 13 ve Şekil 14), aynı zamanda daha önce düşmüş olan bir kaya bloğunun yaklaşık olarak izlemiş olduğu yolu da temsil etmektedir. Düşme analizinde kaynak zonundaki kaya bloğunun küre şeklinde olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, kaynak zonu yamaç yüzey eğim miktarının 45° ve üzerinde olduğu noktaya küre şekilli cismin eğik düzlem üzerindeki hareketine yönelik prensiplerden ve ampirik Eşitliklerden faydalanılmıştır. Bu durumda; topografik eğimin 45°'ye kadar olduğu yamaçlarda küre şekilli bir cismin "yuvarlanma" şeklinde hareketine başlayacağından (Ritchie, 1963), hareketin başladığı nokta ile yamaç eğim miktarının 45°'nin üzerine çıkmış olduğu noktaya kadar olan düşeydeki kot farkına (h) bağlı V hızı Eşitlik 4'teki gibi hesaplanacaktır.

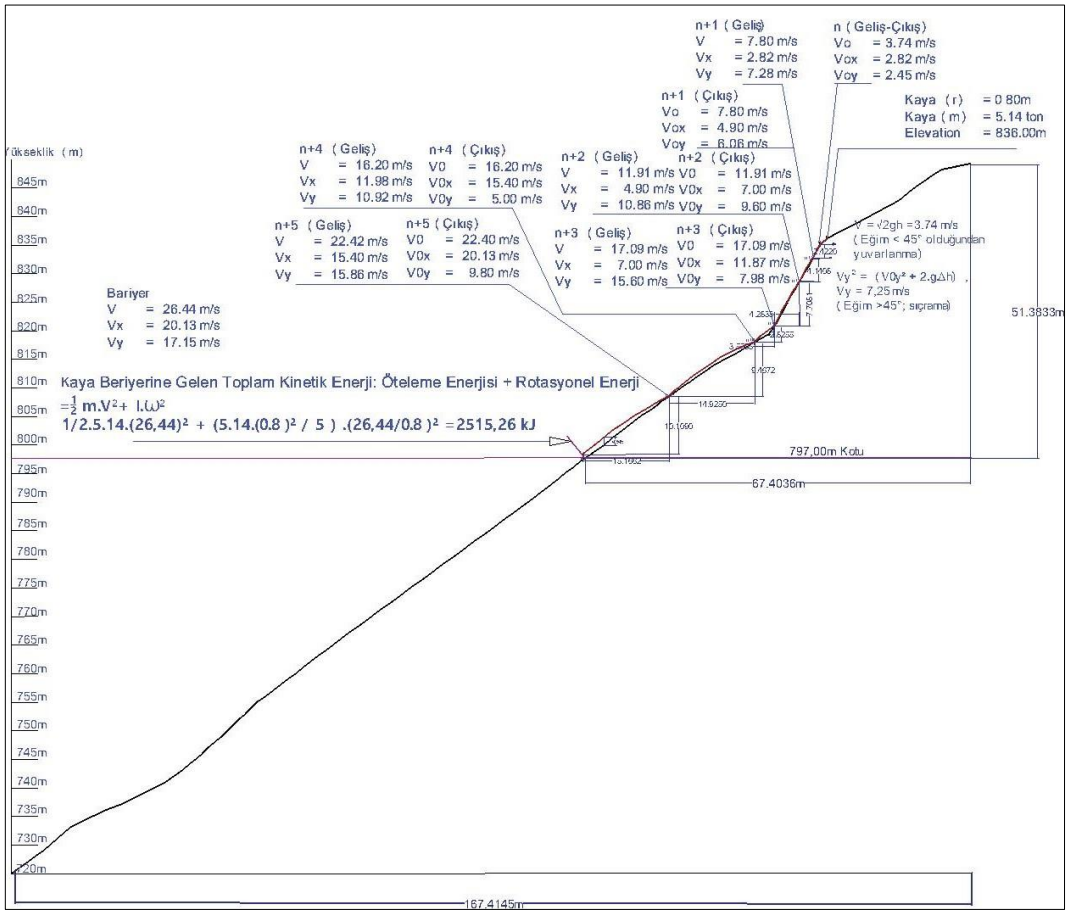
Burada cismin kazandığı hızın bileşke vektörünün yatay hız bileşeniyle yaptığı açı, yüzeyin topografik eğim açısına eşit olacaktır. Cisim (küre şekilli bir kaya bloğu), topografik eğimin 45° ve üzerine çıktığı noktada artık hareketine yuvarlanma şeklinde değil, sıçramalar yaparak devam edecektir. 45°'nin üzerindeki yamaç yüzeyine temas edilen her bir nokta arasında kaya bloğunun sıçrama yaparak aldığı yol, yörünge (trajectory) olarak tanımlanmaktadır. Hareket boyunca ortaya çıkan öteleme hızları için Newton mekaniği esas alınmaktadır (Wyllie, 2015). Burada topografik eğimin 45°'nin üzerine çıktığı noktaya kadar blok hareketine yuvarlanma şeklinde devam ederken, topografik eğim açısının 45°'nin üzerine çıktığı noktadan sonra ilk hareketine eğik atış hareketi prensiplerine göre devam edecektir. Kaya bloğunun yüzeye çarpma anı, esnek çarpışma olarak değerlendirilmiş, çarpma sonrası bloğun izleyeceği yeni yörünge; kaya bloğunun düzleme geldiği açıyla hareketine devam edeceği kabulü yapılmıştır. Yenice mahallesinde düşen kaya bloğunun sahadaki düşme izleri takip edildiğinde, kaya bloğunun hareket hattı, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiş olan topografik kesitler (B-B' kesiti) doğrultusuna oldukça yakındır. Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'teki kesitlerde de görüleceği üzere, 836 m kotunda kütlesi 5.14 ton olan kaya bloğunun düşme analizinde V_0 ilk hızıyla yuvarlanma şeklinde hareketine başlayıp topografik açının 45°'nin üzerine çıktığı ilk nokta (n) olarak isimlendirilmiştir. Daha sonraki her bir temas noktası (n+1), (n+2), (n+3), (n+4)…..şeklinde devam etmektedir.



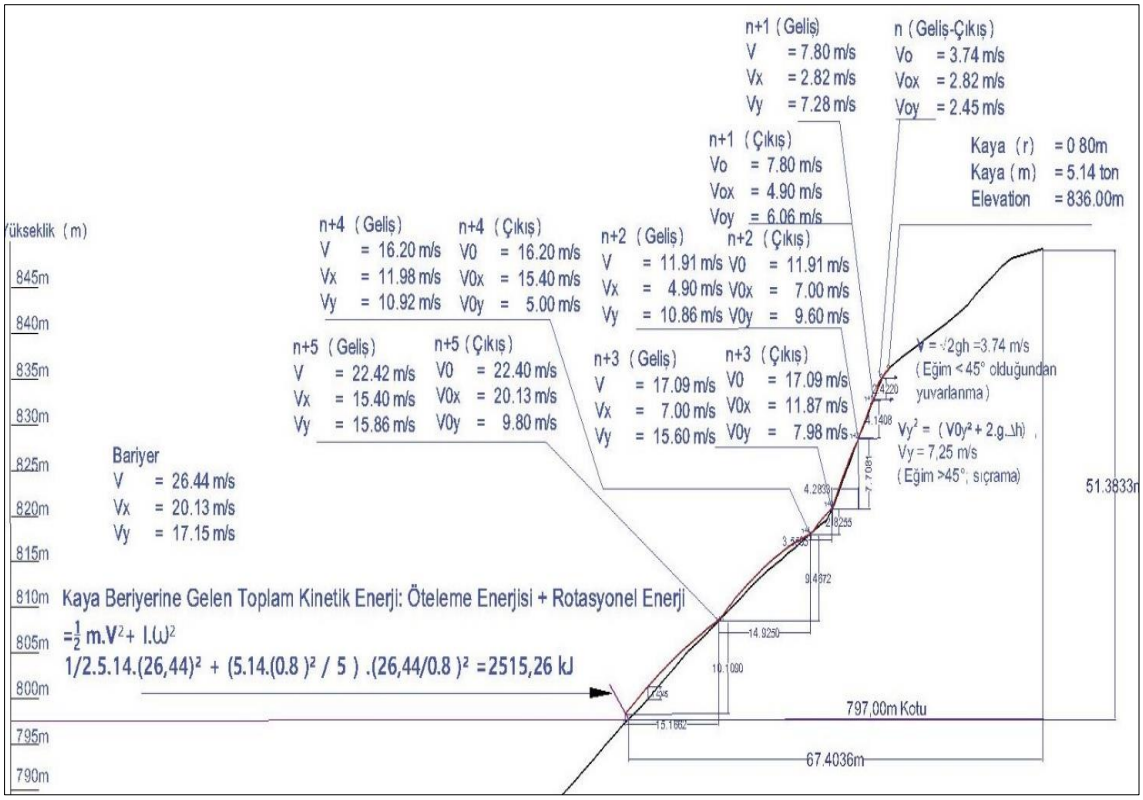
Şekil 11: Ortaköy Köyü Yenice mahallesi-kaynak alan arasındaki yamacın topoğrafya haritası ve bu harita üzerinde düşen bloğun izlediği yol ile analizi yapılan topoğrafik kesit doğrultuları



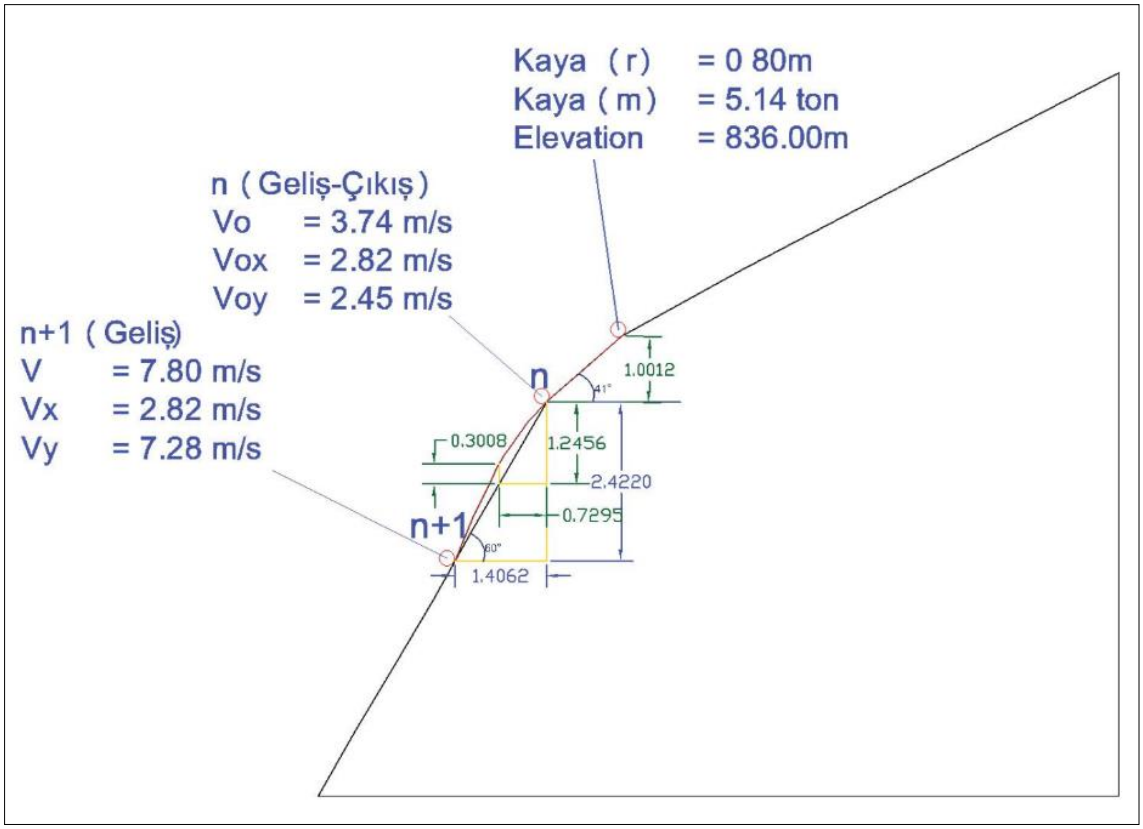
Şekil 12: A-A' topografik kesit üzerinde kaya düşmesi analizinin görünümü



Şekil 13: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinin görünümü



Şekil 14: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinin ayrıntı görünümü



Şekil 15: Kaya bloğunun 836-832,60 m kotları arasındaki hareketi

Blok, ilk noktadan (n) noktasına gelene kadar hareketine yuvarlanma şeklinde devam edeceğinden (n) noktasına (topografik eğim (β) = 41º, h = 1 m, g = 9.81 m/s²) vardığındaki hızı Eşitlik 6'dan,

V = 3.74 m/s

V_x = V*Cos41 = 2.82m/s

V_y = V*Sin41 = 2.45m/s olacaktır.

Yukarıdaki hız değerleri aynı zamanda (n) noktasından (n+1) noktasına sıçrama yaparak ilerleyecek kaya bloğu için V_0, V_{0x} ve V_{0y} değerleridir. Yukarıdaki hız değerleriyle hareketine başlamış bir kaya bloğunun ilk temas noktası olan (n+1) noktasının (n) noktasıyla olan kot farkı (h), Eşitlik 12 ve 13'den;

$h = -x.tan60$ = -1.73x

$h = \left(\frac{g}{2}\right)\left(\frac{x}{V0}.Cos\alpha\right)^2 + x.tan\alpha$ = 0.2025x²+0.869x

$\Rightarrow h = \frac{1}{2}g\left(\frac{x}{V0cos\alpha}\right)^2 + x.tan\alpha$ eşitliği ile elde edilecek sonuç ⇒ h = 0.6071x²+0.869x olacaktır.

$1{,}73x = 0.6071x^2 + 0.869x,$

x = 1.4 m, h = 2.4 m olarak bulunur.

Bu noktadaki çarpma hızı için önce düşey bileşen olan V_y Eşitlik 10'dan

$V_y = \sqrt{V_{0y}^2 + 2g\Delta h},$

$V_y = \sqrt{(2.45)^2 + 2 * (9.81) * 2.4} = 7.28$ m/s

$V_x = V_{ox} = 2.82m/s$ olduğundan,

(n+1) noktasındaki çarpma hızı Eşitlik 11'den,

$V = \sqrt{V_y^2 + V_x^2} = \sqrt{7.28^2 + 2.82^2} = 7.80$ m/s olacaktır.

(n) ve (n+1) noktaları arasındaki sıçrama esnasında bloğun kazanabileceği maksimum yükseklik Eşitlik 14, 15, 16, 17 ve 18'den; $hmax = 0.30\ m,$

Maksimum yüksekliğe ulaştığı noktanın başlangıç noktasına (n) olan yatay mesafesi;

$X = 0.72\ m$ olarak bulunur.

Bu noktaya karşılık gelen h değeri Eşitlik 12'den, $h = 1.24$ m olarak bulunur (Şekil 16).

Bloğun temas noktasına (n+1) geliş açısı, Eşitlik 19'dan;

$\alpha 1 = \text{atan}(\frac{Vy}{Vx}) = \tan(\frac{7{,}28}{2{,}82}) = 68.8°$

Kesit boyunca yukarıdaki Eşitlikler kullanılarak kaya bloğunun yüzey temas noktaları ve yörüngeleri kesit üzerinde işaretlenerek çizilir. Bu çalışmada maksimum hız ve enerjilerin bulunabilmesi amacıyla esnek çarpışma modeli uygulanmıştır. Bloğun yüzeye geliş açısı ile çarpma sonrası yüzeyden ayrılış açısı birbirine eşit olacaktır. Sıçrama esnasındaki bileşke hız, çarpma anındaki bileşke hıza eşittir. Yapılan analiz sonucunda, 839 m kotu ile 797 m kotları arasında kaya bloğunun 5 ayrı noktada yüzey ile temas ettiği görülmektedir. (n) ve 797 m kotları arasında kaya bloğunun izlediği yörüngede, (n) noktası "0" başlangıç noktası kabul edilirse;

2 nolu topografik kesit üzerinde yapılan düşme analizinde, 797 m kotuna kadar kaya bloğunun ulaşabildiği maksimum yükseklik değeri (n+5) ile bariyer arasında, 802 m kotlarında 1.45 m olarak tespit edilmiştir.

Bariyerin konulmak istendiği 797 m kotunda ise sıçrama yüksekliği Rocfall8.0 yazılımına göre yaklaşık 65 cm, manuel hesaplara göre yaklaşık 96 cm olduğu tespit edilmiştir. Blok, daha alt kotlarda enerjisini (hızını) arttırarak hareketine devam edeceğinden daha yüksek sıçrama değerlerini yakalayacaktır. Bariyerin önerildiği 797 m kotundaki toplam kinetik enerji, Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'ten 2515.26 kJ olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 4 ile, 836 m kotunda 5.14 ton ağırlığındaki bir kaya bloğunun 797 m kotuna göre potansiyel enerjisinin de en az 1966.5 kJ olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 1'de, 2 nolu topografik kesit üzerinde kaya bloğunun hareketine başladığı ilk noktadan itibaren (n) izlediği yörünge ve hızları ile 797 m kotundaki bariyere gelen toplam kinetik enerji değerleri verilmiştir.

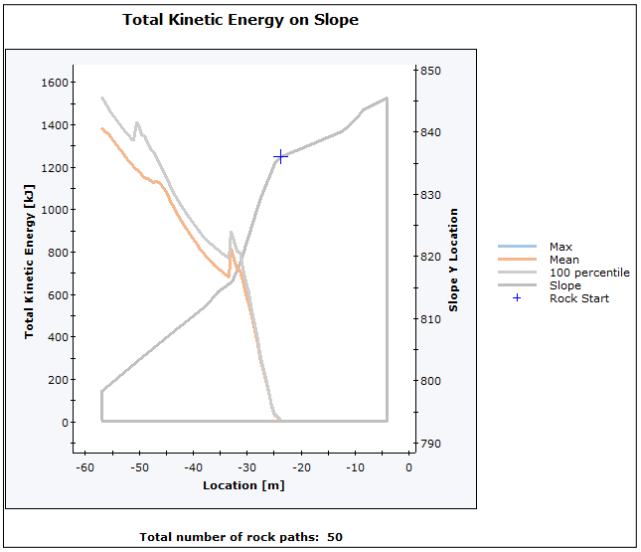
İnceleme alanındaki kaynak zon alt kotunda yer alan yamaç yüzeyi boyunca düşmesi muhtemel kaya bloklarına engel olabilecek yapısal bir unsurun olmayışı, blok hızlarının hareket süresi boyunca artacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla yamaç yüzeyinde 797 m altında daha fazla enerji ve de daha fazla sıçrama yükseklikleriyle karşılaşılacaktır (Şekil 16). Yapılan bu kaya düşmesi analizinin, kaya düşmesi analizleri konusunda sıklıkla kullanılan Rocscience Rocfall8.0 yazılımı ile karşılaştırıldığında (Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19) 2 numaralı kesitte hesaplanan düşme analizinde 797 m kotunda toplam kinetik enerjinin 1600 kJ civarında, sıçrama yüksekliğinin ise yaklaşık 65 cm olduğu görülür. Aradaki enerji farkının sebebi, burada yazılımın yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarını da dikkate almasından kaynaklanmaktadır. Güvenli tarafta kalma adına yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarının hesaplarımızda ihmal edilmesinin nedeni, eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerinin gerçekleşebilme olasılığıdır.



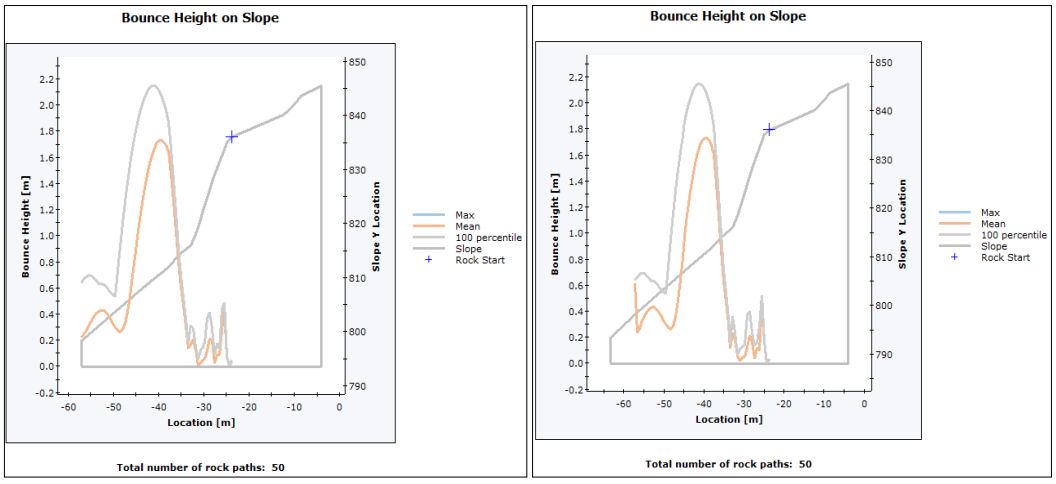
Şekil 16: Kaynak alan alt kotlarında, düşen kaya bloğunun yamaç yüzeyinde (760-750 m kotları) sıçrama yüksekliklerinin 3 metrenin üzerine çıktığı anlaşılmaktadır.

Tablo 1: B-B' topografik kesit üzerinde yapılan kaya düşmesi analizinde bloğun yüzey temas noktaları, yörüngesine ait koordinatları ve temas noktalarına geliş/çıkış hızları

Nokta No	Temas Noktası H (m)	Temas Noktası X (m)	Geliş Hızları (m/s)	Çıkış Hızları (m/s)
n	0.00	0.00	V_0=3.74 V_{0x}=2.82 V_{0y}=2.45	
n+1	-0.29	-0.28	V=7.80 V_x=2.82 V_y=7.28	V_0=7.80 V_{0x}=4.90 V_{0y}=6.06
	-0.69	-0.56		
	-1.18	-0.85		
	-1.77	-1.13		
	-2.42	-1.40		
n+2	-0.66	-0.49	V=11.91 V_x=4.90 V_y=10.86	V_0=11.91 V_{0x}=7.00 V_{0y}=9.60
	-1.40	-0.98		
	-2.26	-1.47		
	-3.21	-1.96		
	-4.14	-2.46		
n+3	-0.49	-0.35	V=17.09 Vx=7.00 V_y=15.60	V_0= 17.09 V_{0x}=11.87 V_{0y}=7.98
	-1.01	-0.70		
	-1.55	-1.05		
	-2.12	-1.40		
	-2.71	-1.75		
	-3.17	-2.02		
	-3.96	-2.45		
	-4.62	-2.80		
	-5.31	-3.15		
	-6.03	-3.50		
	-7.53	-4.20		
	-7.71	-4.28		
n+4	-0.85	-1.19	V=16.20 V_x=11.98 V_y=10.92	V_0=16.20 V_{0x}=15.40 V_{0y}=5.00
	-1.79	-2.37		
	-2.30	-2.97		
	-2.84	-3.55		
n+5	-0.10	-0.31	V=22.42 V_x=15.40 V_y=15.86	V_0=22.40 V_{0x}=20.13 V_{0y}=9.80
	-0.32	-0.92		
	-0.55	-1.54		
	-1.94	-4.62		
	-2.78	-6.16		
	-4.77	-9.24		
	-7.14	-12.32		
	-8.47	-13.86		
	-9.47	-14.93		
Bariyer	-1.03	-2.01	V=26.44 V_x=20.13 V_y=17.15 E_k=2515.26 kJ	
	-3.38	-6.04		
	-6.13	-10.07		
	-9.26	-14.09		
	-10.10	-15.16		

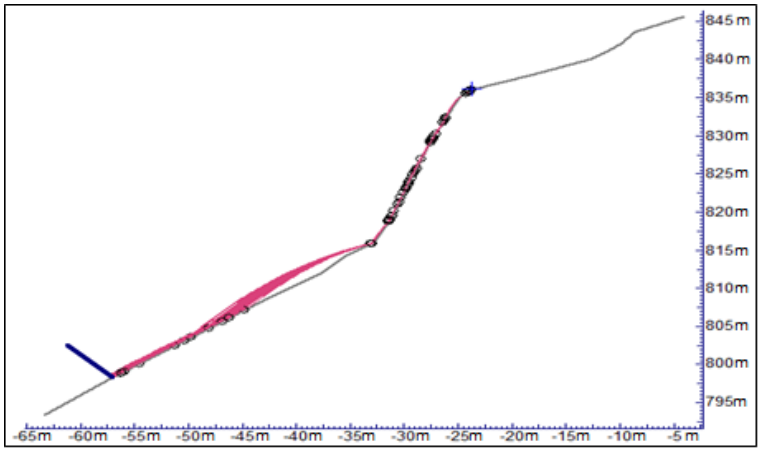


Şekil 17: B-B' topografik kesit üzerinde kaya düşmesi analizinde toplam kinetik enerjinin Rocfall8.0 yazılımında görünümü



(a) (b)

Şekil 18: B-B' topografik kesit üzerinde bariyersiz (a) ve bariyerli (b) sıçrama yüksekliklerinin Rocfall8.0 yazılımında görünümü



Şekil 19: B-B' topografik kesit üzerindeki düşme yörüngelerinin Rocfall8.0 yazılımı ile yapılan bariyerli düşme analizi görünümü (Rocscience Inc., 2023)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Kaynak alandaki süreksizliklerin mühendislik özellikleri ve kaynak alan yamaç geometrisi dikkate alınarak değerlendirilen kinematik analiz sonuçlarına göre kaynak alan yamaç yüzeyindeki yenilmelerin daha çok kamalanma ve devrilme şeklinde gerçekleşebileceği sonucuna varılmaktadır. Süreksizliklerin mühendislik özellikleri nedeniyle kaynak alan yamaç yüzeyinde kaya düşmelerine karşı doğrudan bir çelik ağ ile örtüleme işlemi uygun bulunmamıştır. Bu işlemde kaynak alan yamaç yüzeyine ve yamaç tepe hattına sistematik olarak yerleştirilecek 1.5-2.0 m boyundaki pasif ankraj (yüzey ve tepe ankrajları) uygulaması sırasında duraylı zonun dışında kalan ankrajlar kaynak alan yamaç yüzeyindeki makaslama gerilmelerinin artmasına sebep olacaktır. Yapılan değerlendirmelerden sonra, kaynak zonu bitiminde yamaç yüzeyinde yüksek enerji sönümlemeli kalıcı bir kaya bariyeri uygulaması için en uygun kot olan 797 m kotundaki darbe enerjilerinin hesaplamalara göre toplamda 2297 kJ ile 2515.26 kJ arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Sıçrama yüksekliği ise B-B' topografik kesite göre 797 m kotunda 96 cm olduğu görülür. Kaynak zon ile 797 m arasında maksimum sıçrama yüksekliği 802 m kotlarında 1.45 m değeri elde edilmiştir. Bilgisayar yazılımında ise 802 m kotunda bu değer yaklaşık 2.11 cm'dir. Sahada, kaya ortamının tek eksenli sıkışma dayanımını belirlemek için yapılan Schmitd çekici testlerinde dayanım değerlerinin 55-110 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Güvenli tarafta kalmak amacıyla hesaplamalarda dayanım değerleri 55-80 MPa aralığında kabul edilmiştir. Bu değerlere göre ankraj boylarının 2 metrenin altında olmaması önerilmiştir. Ancak dayanım testlerinin laboratuvar ortamında doğrudan tek eksenli deneye tabi tutulması daha doğru bir yaklaşım olarak görülmektedir. Kaya düşmesi analizlerinde, bitkisel örtüye ait (ağaçlık, ormanlık sahalar) enerji ve hız sönümlemelerinin dikkate alınmaması önerilir. Eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı çoklu blok düşmelerine bağlı olarak bu tür ortamlar enerji ve hız sönümlemelerine dair beklenen etkiyi göstermeyecektir; ilk düşen blok veya blokların ağaçları yıkarak ya da devirerek arkasından gelecek blok veya bloklar için engelsiz bir düşme hattı açabileceği unutulmamalıdır.

Yenice mahallesi kuzey doğusundaki kaynak zon alt kotunda (797 m) konulacak bir kalıcı esnek kaya bariyeri için 2 ayrı kesit üzerinde hesaplanan toplam kinetik enerji değerleri 2297-2515.26 kJ olarak tespit edildiğinden, 797 m kotunda konulacak bir kaya bariyerinin enerji sönümleme kapasitesi en az 3000 kJ olarak tasarlanmıştır. Topoğrafik kesitler üzerinde yapılan düşme analizlerinde 797 m kotunda maksimum toplam kinetik enerji değerinin yaklaşık 1600 kJ, aynı kotta (797 m) maksimum sıçrama yüksekliğinin ise yaklaşık 65 cm olduğu görülmüştür. Bilgisayar yazılımına göre B-B' topografik kesit üzerinde en fazla sıçrama yüksekliği, 812 m kotlarında 2.15 m civarındadır. Görüldüğü üzere, yapılan hesaplamalar ile bilgisayar yazılımı karşılaştırıldığında, B-B' topografik kesit üzerinde düşme hattı boyunca maksimum sıçrama yükseklikleri ve düşüş yörüngeleri arasında büyük farklar bulunmamaktadır. Toplam kinetik enerji bakımından bilgisayar yazılımı ile aradaki farkın sebebi ise, hesaplamalarda yüzey sürtünmeleri ve geri verme katsayılarının güvenli alanda kalınması amacıyla ihmal edilmesidir. Güvenli alanda kalma öngörüsü; eş zamanlı veya kısa zaman aralıklı blok düşmelerinin gerçekleşebilme olasılığı nedeniyledir.

Yapılan düşme analizleri sonucunda, kaynak zon alt kotlarında (797-790 m) enerji kapasitesi ve sıçrama yükseklikleri de göz önünde bulundurulduğunda en uygun bariyer hattının 797 m kotu olduğu tespit edilmiştir: 797 m kotu altında blok sıçrama yükseklikleri 3 metrenin de üzerine çıkabilmekte, ayrıca kaya bloğunun temas noktasındaki toplam kinetik enerjisi de artmaktadır. Düşen bir bloğun enerjisinin ve sıçrama yüksekliği değerlerinin artmasına izin verilmemesi gerektiği düşünüldüğünde, 797 m kotunun yüksek enerji sönümlemeli kaya bariyeri için uygun bir hat olduğu kanaatine varılmıştır. Bu durumda, 797 m kotunda ETAG 027 (2013) yönergesi dahilinde h = 5 m yüksekliğine sahip, 3000 kJ enerji sönümlemeli esnek kaya bariyeri uygulaması gerekmektedir. Yapılacak bariyerin hat uzunluğu ise, daha önce düşmüş kaya bloklarının düşme hatları, düşmesi muhtemel blokların muhtemel düşme doğrultuları, mevcut yamaç topografik eğim değerleri göz önüne alındığında 70 m uzunluğunda olacaktır.

Geçen süre zarfında 2.5 m^3'ten daha küçük boyutlu (0.5-1.0 m^3 arasında) az sayıda kaya blokları düşmüş, ancak yüksek enerji sönümlemeli esnek kaya bariyeri nedeniyle yerleşim alanına ulaşamamışlardır. Kaynak zondaki 2 m^3 veya daha büyük boyutta tespit edilmiş düşmesi muhtemel kaya blokları, çoklu blok düşmelerinin de önüne geçilebilmesi amacıyla kaynak zon üst kotlarındaki uygun kaya ortamlarına çelik halatlar ile ankrajlanarak stabilizasyon sağlanmıştır. Bu uygulama, kaya bariyerinin sahadaki ömrünü de uzatmıştır. Bu türde kaya ıslahı imalatlarının belirli aralıklarla kontrol edilmesi, kaya düşmesine maruz kalıp kalmadıklarının incelenmesi gerekir; 2 m^3 veya daha büyük boyutlu bir kaya bloğunun bariyere ulaşması halinde kaya bariyerine ait elemanların (fren sistemi, halat panel ağ gibi) bakım ve onarımının da yapılması gerekir.

Teşekkür

Kaynak zondaki süreksizlik denetimli yenilmelerin analizleri için Rocscience Dips8.0 deneme sürümü kullanılmıştır. Yazarlar, çalışmanın gerçekleşmesinde kullanılan verileri sağlayan İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Artvin İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü ile çalışmadaki kaya düşmesi analizleri için Rocscience Rocfall8.0 yazılım desteği sağlayan Dynamica Mühendislik firmasına teşekkür eder.

Kaynaklar

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2020). *Kaya düşmelerinden kaynaklı afetlerin değerlendirilmesine yönelik teknik kılavuz*. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Yayını.

Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics, 13*(9), 255–279.

Caltrans. (2020). *Caltrans geotechnical manual – Rockfall Section*, California Department of Transportation. 15 Ocak 2025'de https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/geotechnical-services/202012-gm-rockfall-a11y.pdf adresinden alındı.

Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock* (Technical Report No. AFWL-TR-65-116). Air Force Weapons Laboratory, Research and Technology Division. https://doi.org/10.21236/ad0646610

Dorren, L. K. A. (2003). A review of rock fall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography, 27*(1), 69-87.

ETAG 027. (2013) *Guideline for European technical approval for falling rock protection kits.* EOTA (European Organization for Technical Approvals). https://www.eota.eu/sites/default/files/uploads/ETAGs/etag-027-april-2013.pdf

Evans, S., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal, 30*(4), 620–636. https://doi.org/10.1139/t93-054

Hoek, E., & Bray, J. W. (1977). *Rock slope engineering*. The Institute of Mining and Metallurgy.

Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. (1998). *Artvin ilinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.

Maden Tetik Arama Genel Müdürlüğü. (2012). *Artvin F47-F48-G46-G48 paftaları sayısal jeoloji haritaları*. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Record, 17*, 13–28.

Rocscience Inc. (2023). *RocFall version 8.0 – Statistical analysis of rockfalls*. https://www.rocscience.com

Rocscience Inc. (2024). *Dips version 8.0 – Graphical and statistical analysis of orientation data*. https://www.rocscience.com/portal/free-trials

Ulusay, R. (2001). *Uygulamalı jeoteknik bilgiler.* Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını.

Ulusay, R., & Hudson, J. A. (Eds.). (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization: Testing and Monitoring (1974-2006)*. ISRM Turkish National Group.

Wang, T., & Lee, Y. C. (2012). Simulation and statistical analysis of motion behavior of a single rock fall. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, 16*(1), 17–26.

Wyllie, D. C. (2014). *Rock fall engineering: development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways*. The University of British Columbia.

Wyllie, D.C. (2015). *Rock fall engineering*. CRC Press.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 157–169, DOI: 10.21324/dacd.1495772

The Impact of River Mouth Sediment Deposition on Flood Risk: The Case Study of The Sakarya River

Osman Sönmez[1,*], Temel Temiz[2], Beytullah Demirci[3]

[1]*Department of Civil Engineering, Sakarya University, Esentepe Campus, 54050, Sakarya.*
[2]*Department of Civil Engineering, Yalova Üniversitesi, Central Campus, 77200, Yalova.*
[3]*Floodis Engineering, Project Desing and Consultancty Ltd., Ankara.*

Abstract

Flooding is a natural disaster that causes loss of life and property worldwide. Floods can be predicted and their damages can be reduced. Various natural and man-made factors can cause floods. Sediment movement can be counted as one of the causes of floods, albeit rarely. The Sakarya River bed and river mouth is one of the risky areas for flooding due to sediment deposition. Due to the activities of quarries on the Sakarya River, the amount of sediment carried by the river increases, and the damage to the river bed morphology. In rare cases, the mouth of the river is completely closed due to sedimentation, which has caused many disasters such as coastal flooding and capsizing of marine vessels, leading to loss of life and property. Therefore, the occurrence of floods due to sediment deposition at the mouth of Sakarya River was investigated. The 5, 10, 25, 50, 100, and 500-year return period flows in the downstream part of the Sakarya River and Karasu district were analyzed with the 2D flood model in case of insufficient discharge from the river mouth. Water depth, velocity, and flood hazard maps for these return periods were prepared. The impact of flooding on Karasu district was analyzed in terms of affected buildings and affected area (ha). Thus, the effects of the floods occurring in the downstream region as a result of the interventions to the river bed in the upstream region were analyzed.

Keywords

Sakarya River, Sediment, Flood, Depth, Hazard

Nehir Ağzı Sediment Birikiminin Taşkın Riskine Etkisi: Sakarya Nehri Örneği

Özet

Taşkın, dünya çapında can ve mal kaybına neden olan doğal bir afettir. Taşkınlar tahmin edilebilir ve zararları azaltılabilir. Çeşitli doğal ve insan kaynaklı faktörler taşkınlara neden olabilir. Sediment hareketi nadiren de olsa taşkınların nedenlerinden biri olarak sayılabilir. Sakarya Nehri yatağı ve nehir ağzı, sediment birikimi nedeniyle taşkınlar için riskli alanlardan biridir. Sakarya Nehri üzerindeki taş ocaklarının faaliyetleri nedeniyle nehrin taşıdığı sediment miktarı artmakta ve nehir yatağı morfolojisi zarar görmektedir. Nadiren de olsa sedimantasyon nedeniyle nehir ağzı tamamen kapanmakta, bu durum kıyı taşkınları ve deniz araçlarının alabora olması gibi can ve mal kaybına yol açan birçok felakete neden olmaktadır. Bu nedenle, Sakarya Nehri ağzında sediment birikimine bağlı taşkınların oluşumu araştırılmıştır. Sakarya Nehri'nin mansap kısmında ve Karasu ilçesinde 5, 10, 25, 50, 100 ve 500 yıllık dönüş periyodu akışları, nehir ağzının sediment birikimi sebebiyle yetersiz deşarj olması durumunda 2D taşkın modeli ile analiz edilmiştir. Bu dönüş periyotları için su derinliği, hız ve taşkın tehlike haritaları hazırlanmıştır. Taşkının Karasu ilçesi üzerindeki etkisi, etkilenen binalar ve etkilenen alan (ha) açısından analiz edilmiştir. Böylece memba bölgesinde nehir yatağına yapılan müdahaleler sonucunda mansap bölgesinde meydana gelen taşkınların etkileri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Sakarya Nehri, Sediment, Taşkın, Derinlik, Tehlike

1. Introduction

Around 1 million people worldwide live in floodplains (Alfieri et al., 2017). This makes the flood a natural phenomenon that many societies should consider. In addition, floods are becoming a more frequent and more widespread problem with climate change. Between 1900 and 2006, floods are approximately one-third of all-natural disasters. The number of people affected by these disasters equals almost half that of those affected by all-natural disasters (Birkholz et al., 2014).

More than half of the world's population lives in cities with rivers and coastlines. The total urban area exposed to flooding in Europe has increased by 1000% over the last 150 years (Jongman, 2018). From the 1950s to the 1990s, the number of floods in European basins increased from 11 to 64 percent, while between 2000 and 2005 there were 104 flood disasters. Flood disaster affects the socioeconomic life of countries and their economic development (Rupal & Agnihotri, 2019).

* Corresponding Author: Tel: +90 (264) 2955713 Faks: +90 (264) 2955601
E-mail: osonmez@sakarya.edu.tr (Sönmez O.), temel.temiz@yalova.edu.tr (Temiz T.) bdemirci@floodis.com (Demirci B.)

Gönderim Tarihi / Received : 04/06/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 20/10/2024

The estimated damage caused by flood disasters in Central Europe in 1 year is 16.5 billion dollars (Alphen et al., 2009). In addition to the economic damage and loss of life caused by the flood, there are also effects on the long-term health of the victims (Bubeck et al., 2017).

As in the rest of the world, Turkey has been one of the countries most affected by global climate change. Since it is located on a front where air currents of different pressures and temperatures from Siberia in the north, Africa, and the Arabian Peninsula in the south meet, it is heavily affected by heavy rainfall and the floods that cause it.

In Turkey, flooding is accepted as the riskiest natural disaster due to irregular flow regimes of rivers, geographical location, and geological reasons (Sonmez & Dogan, 2017). Since the green areas are less in the settlements that have been exposed to the effects of urbanization, it prevents the infiltration of precipitation into the soil. For this reason, the risk of flooding in cities may increase six times (Uzuntaş & Özturk, 2019). There were 111 floods in Turkey between the years 1989-1998. A total of 306 people lost their lives in these floods. 255,640 hectares of agricultural land were flooded, and the total property damage was US$ 1,935.4 million (Kopar et al., 2011).

Sakarya River Basin in Turkey is a region where frequent floods occur, and it is in the status of a risky area in terms of floods. Karasu is located at the mouth of the Sakarya River, where flows into the Black Sea. Karasu is a region with high economic value due to its port, industrial area, and fertile agricultural lands (Dogan et al., 2013). For this reason, it is necessary to obtain flood hazard maps of the region.

Between 0-8 km from the mouth of the river, there was an increase of 1 m due to the accumulation in the thalweg elevation and a decrease of 7 m due to the scour of the thalweg elevation between 8-84 km (Işık et al., 2006). Although the three dams located on the Sakarya River seem to control the sediment movement, the effects of the flow discharged by the closest dam, which is 150 km away from the mouth of the river, are reflected up to the mouth of the river.

Since 1965, the Sakarya River bed has expanded due to scour, and the water level and depth in the river have decreased, except for the first 10 km from the Black Sea (Sonmez & Dogan, 2017; Uzuntaş & Özturk, 2019). The main reason for these changes is that incoming solids are kept in the reservoir by the dams built on the river bed and cannot reach the downstream of the dam. Thus, since the solid material carried in the downstream section is larger (Qst>Qsg) than the solid material coming in, it shows that scours occur in the river downstream (Rupal& Agnihotri, 2019; Sonmez & Dogan, 2017). In other words, clean water with a high carrying capacity left from the dam causes scour of downstream. After the dams, some of the amounts of suspension material carried by the river were fed by scour from the river bed.

Besides the dam effect, there has been commercial sand extraction in the Sakarya River in the last 30 years. Sand extraction both carves the river bed and makes the river bed suitable for carving with the river flow. The sediment carried along the river accumulates due to the decrease in flow velocity and carrying capacity as it approaches the river mouth and closes the riverbed, causing the flow to swell backward and causing coastal flooding.

The devastating effects of river floods can be predicted by the results of finite difference hydrodynamic models for estimating and mapping flood hazards. Flood hazard maps allow for disaster preparedness and response. Flood mapping is essential for land use planning and disaster management in areas with a high probability of flooding. On the other hand, reliable and rapid flood forecasting tools are necessary to develop adequate emergency response strategies and to prevent impacts and mitigate catastrophic effects (Dottori et al., 2016). The first step in the preparation of hazard maps is to create a data collection digital elevation model (Prinos, 2008). Geographical information systems and remote sensing techniques are used to collect and process the data needed in flood disaster forecasting (Yanmaz, 2007).

Many programs are used in flood mapping. Hydrological Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS), one of the software packages developed by the US Army Corps of Engineers and using physically-based equations, is one of the most well-known and widely used programs in scientific literature and practice (HEC-RAS, 2021). It offers the opportunity to model in 2D.

In this study, instead of HEC-RAS 1D hydraulic modeling, 2D HEC-RAS hydraulic modeling is used. Because the 1D method is weak in calculating the multidirectional flood wave propagation, on the other hand, 2D hydraulic models are the most suitable solution for simulating flood wave lateral diffusion (Costabile et al., 2020). The 2-dimensional analysis of river floods caused by estuary blockages is not a very common study in the literature. The studies in the literature are generally addressed within the scope of the exposure of the river bed to flows above its capacity and the inadequacy of the capacities of hydraulic structures (Barredo, 2009; Bouwer et al., 2010; Kreft, 2011; United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2011; Barredo et al., 2012; Quiroga et al., 2016; Lim & Brandth, 2019; Merwade et al., 2008; Pinos & Timbe, 2019). Studies on the determination of flood risk due to river mouth blockage are limited and there are none for the study area. In this respect, the study is unique and deals with the relationship between sediment transport and flooding.

2. Methodology

2.1. Study Area

Karasu district is an important region in terms of economic development impact for the Eastern Marmara region due to reasons such as the Black Sea trade port, industrial facilities, and tourism investments. The regional settlement distribution is concentrated in the region close to the Black Sea coastline and the Black Sea trade port.

On the other hand, the Sakarya River flows through this residential area and empties into the Black Sea. As the study area, a river length of 10 km was determined from downstream of the Sakarya River. This region was determined by taking into account the changes in river morphology, topography, and population distribution. The study area is approximately 22.38 km^2. The river width varies between 180 m and 40 m. On average, the width of the river can be considered as 100 m. The depth of the river from thalweg varies from 3 m to 5 m along the river. There are four water channels in total, one from the district center and 3 to be used in fields and gardens, with an estimated average width of 10 m, which are connected to the river. These channels are also included in the terrain model as they can act as a drain and may affect the hydraulic modeling.

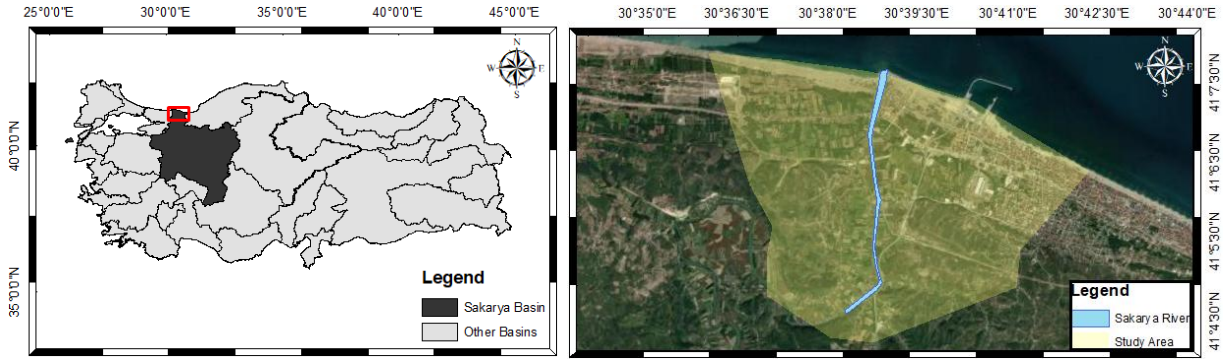


Figure 1: Sakarya River Basin and Karasu region

In Figure 1, the study area is located between latitude $30^0$35'0"E-$30^0$45'0"E and longitude $42^0$8'0"N-$41^0$4'0"N according to topographic region maps and region satellite images. The flood risk analyses in this study area were made according to the flow diagram in Figure 2.

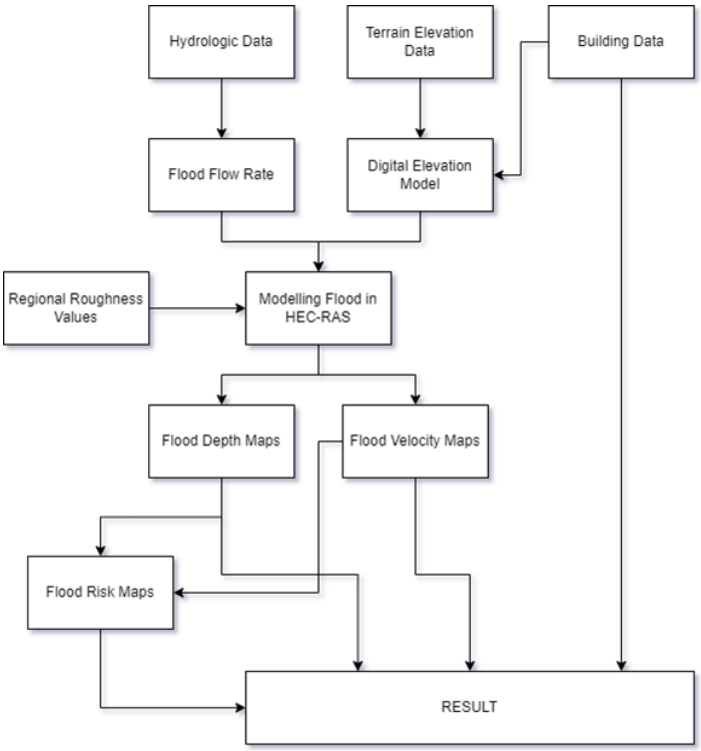


Figure 2: Flow diagram for flood risk analysis

2.2. Manning Roughness Data

The 2018 land use map from the EEA data pool was applied to create the Manning roughness map of the research area. The land use classification on the map determines the CLC code that has been assigned. The manning values chosen to correspond with these codes are also listed in Table 1. The regional roughness map was produced by importing the data from Table 1 and Figure 3 into the CLC land use map.

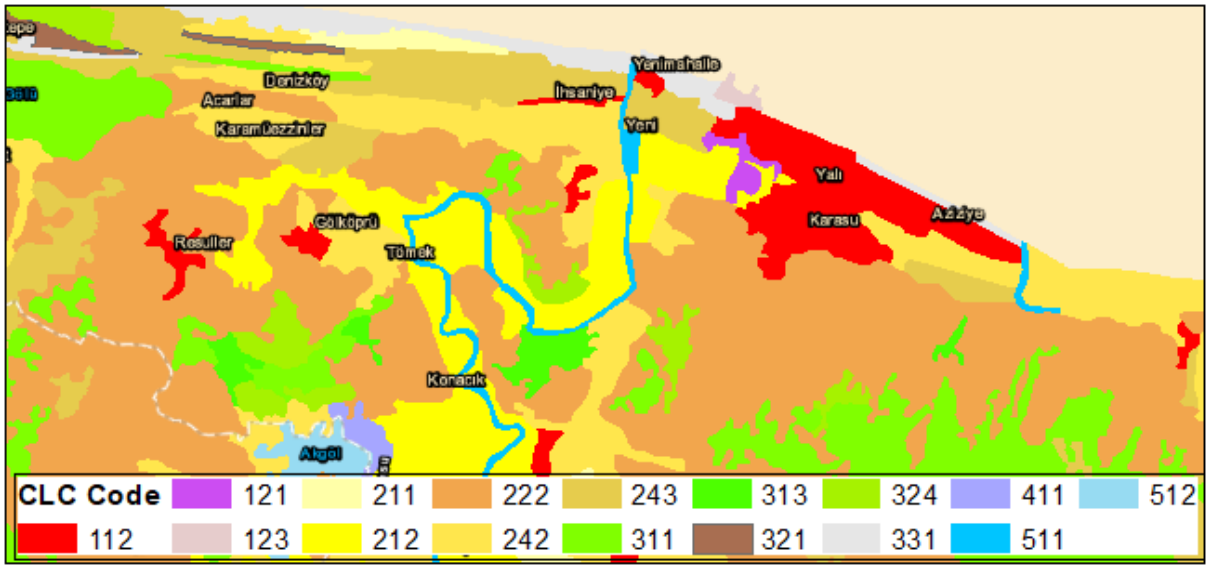


Figure 3: Corine land use map

Table 1: Manning roughness values (Copernicus Land Monitoring Service, 2018)

CLC Code	Label	Manning Values
112	Discontinuous urban fabric	0.013
121	Industrial or commercial units	0.013
123	Port areas	0.013
211	Non-irrigated arable land	0.03
212	Permanently irrigated land	0.03
222	Fruit trees and berry plantations	0.08
242	Complex cultivation patterns cultivation patterns	0.04
243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	0.05
311	Broad-leaved forest	0.1
313	Mixed forest	0.1
321	Natural grasslands	0.04
324	Transitional woodland-shrub	0.06
331	Beaches, dunes, sands	0.025
411	Inland marshes	0.04
511	Water courses	0.05
512	Water bodies	0.05

2.3. Hydrological Data for Upstream Boundary Condition

Due to the missing flow records of the Sakarya River, the flood flow rates for different recurrences were calculated using deterministic methods depending on the extreme precipitation for the recurrent flood flow.

In the study, calculations were made with the data taken from the observation station of Sakarya province. The extreme precipitation data between 1929 and 2015 are as in Figure 4.

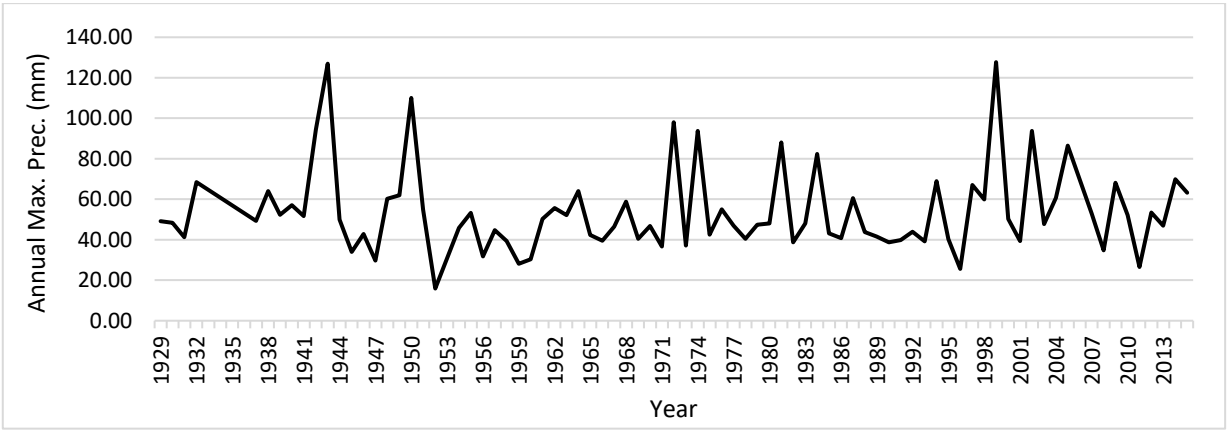


Figure 4: Variation of precipitation over the years

Considering the basin precipitation area, the extreme distribution of annual maximum precipitation was calculated by different methods in the calculation of recurrent flood flow and hydrographs. To choose between the methods, the Kolmogorov-Smirnov method was tested. The Log-Pearson Type III method was determined as the distribution type with the most optimum results. The Non-Superposed Mockus Method was used to calculate the recurrent flood flow with the Log-Pearson Type III distribution. The reason for using the non-superposed Mockus method is that it gives effective and accurate results in basins where precipitation concentration time is less than 30 hours. Also, in the FEMA 17/B bulletin, it was stated that Log-Pearson Type III distribution should be used in the calculation of recurrence flood flow. The results given according to the Kolmogorov-Smirnov Test Method also gave values that support the criteria specified in the literature. In the Mockus method, hydrographs are triangular in shape and are preferred due to their ease of calculation and drawing (Koca, 2014; Çıtakoğlu et al., 2017). This method can be applied in regions where there is no current observation station or there is no recorded data based on long years. In the Mockus (non-superposite) method, it can be used in drainage basins where the collection time (t_c) is <30 hours. If t_c is greater than 30 hours, the drainage area is divided into secondary parts. The hydrographs to be drawn separately for each subdivided area are superposed by considering the delay times.

The flood flow values calculated according to these methods are given in Table 2. According to the Kolmogorov-Smirnov Test Method, the significance values of the Log-Pearson Type-3 distribution calculation are acceptable (Table 3).

Table 2: Return period discharges

	2	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**	**200**	**500**
Normal	50.14	70.85	81.68	93.23	100.68	107.38	113.50	120.88
Log-Normal II	45.02	66.55	81.64	101.53	116.85	132.63	148.86	171.11
Log-Normal III	47.71	69.60	82.61	97.84	108.45	118.58	128.32	140.74
Pearson III	45.21	68.04	83.10	101.68	115.12	128.19	140.98	153.78
Log-Pearson III	49.89	68.00	80.46	96.73	109.19	122.01	135.25	149.92
Gumbel	44.07	69.15	85.76	106.75	122.32	137.77	153.16	173.48

Table 3: Kolmogorov-Smirnov test results

	Theoric P	**Empirical P**	**Max. P Δmax**	**Measured P**	**Significance Percentages**				
					0.80	*0.85*	*0.90*	*0.95*	*0.99*
Normal	0.679	0.136	0.184	38.7	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject
Log-Normal II	0.628	0.136	0.236	38.7	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject
Log-Normal III	0.653	0.136	0.211	38.7	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject
Pearson III	0.376	0.136	0.240	38.7	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject
Log-Pearson III	0.242	0.136	0.105	38.7	Accept	Accept	Accept	Accept	Accept
Gumbel	0.413	0.136	0.277	38.7	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject

Different recurrent flood flow rates Q_{500}, Q_{100}, Q_{50}, Q_{25}, Q_{10}, Q_5, Q_2 were calculated by synthetic methods and the flood hydrographs are as in the Figure 5 below.

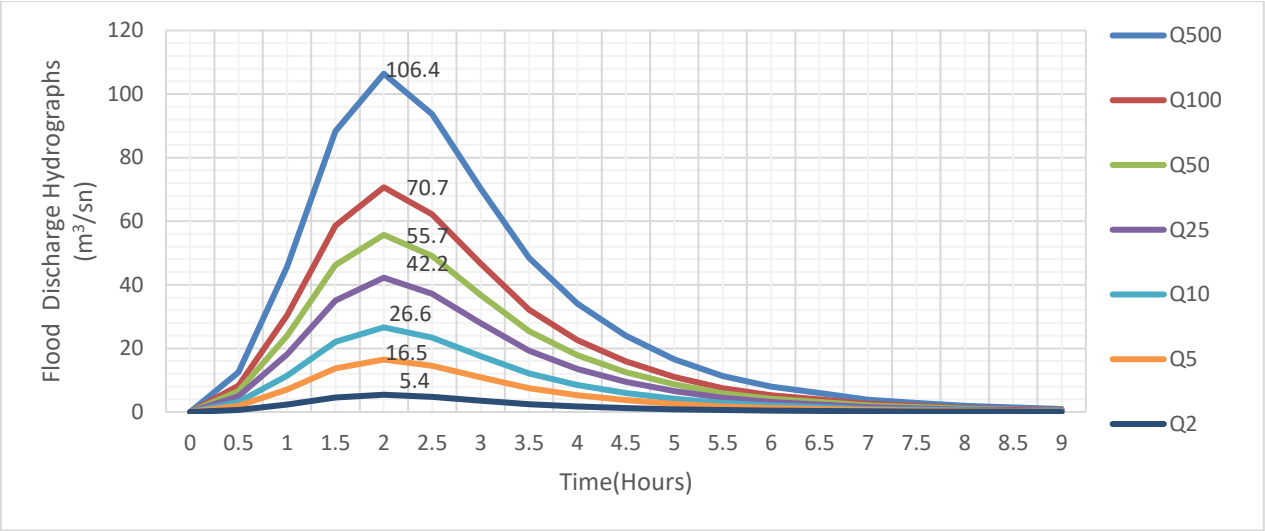


Figure 5: Flood hydrographs for different recurrent flood flows

2.4. Sediment Data for Downstream Boundary Condition

As a result of sediment transport in streams, the economic life of the structures on the stream is reduced due to sedimentation in their reservoirs, and it also damages agricultural areas due to erosion of the top layer, which is the most productive part of the soil. In addition, estimations of sediment transport amount have an important place in river transport, flood control, in the selection of types and locations of hydroelectric power plants, in terms of determining the amount of scour or piling up and taking the necessary precautions. The sediment movement of the Sakarya River is quite high due to its length, basin shape, and soil characteristics. However, after the dams built on the Sakarya River, a decrease was observed in the amount of sediment transport downstream of the river. Because the dam reservoir has stopped the sediment movement due to sedimentation. With the retention of the sediment by the dam, the clean water, whose energy increases in the downstream part, creates scour (Işık et al., 2006).

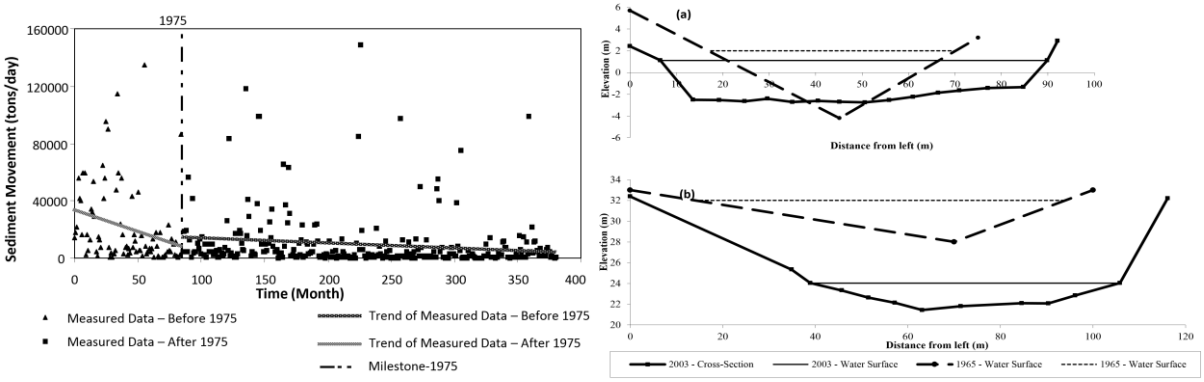


Figure 6: Differences in bathymetry by years (Işık et al., 2006)

The trend of suspended sediment amount for before and after 1975 was examined and it is understood that it has a decreasing trend. The average flow between 1964 and 1974 is 197.32 m^3/s and the daily suspended sediment transport is 21490 tons. Between 1975 and 1999, the average flow was 157.4 m^3/s and the daily suspension material transport was 9500 tons (Figure 6).

Cross-sections measured from the 8th and 84th km of the river in 1965 and 2003 are given in Figure 5, respectively. While accumulations occur at the mouth of the river, scour continue increasingly towards the downstream. There was a 1 m increase (accumulation) in the thalweg elevation at the 8th km from the river mouth, and a 7 m scour of the thalweg elevation at the 84th km. The riverbed has widened since 1965, except for the first 10 km from the mouth, the water level and depth in the river have decreased (Işık et al., 2006).

This causes the flow velocity to decrease and sedimentation to accumulate at the river mouth. Accumulations at the river mouth cause floods.

In this study, the effect of upstream flood risk due to blockage of the river mouth due to sediment transport and accumulation, preventing the discharge of the flow, will be investigated.

2.5. Digital Elevation Model

In 2-dimensional flood models, it is necessary to represent the effect of structures that cause sudden height changes such as buildings and walls, which are frequently encountered in residential areas. Because, unless the obstacles to the physical progress of water on the land are defined in the model, realistic analysis cannot be made. This is one of the biggest differences between two-dimensional analysis and one-dimensional analysis, which affects the result. In one-dimensional analysis, the accuracy rate decreases because it calculates the flow between the section that coincides with the structure and the sections before and after it, and calculates it according to the average height. In the two-dimensional analysis, since the calculation is made according to the interaction of the mesh with the neighboring meshes, if the terrain model and boundary conditions are correct, the error rate due to elevation is very low. In the study area, a digital elevation model was created with 0.5-metre precision obtained from the Sakarya Metropolitan Municipality. Buildings were added to the raster data, resulting in a comprehensive representation of the terrain (Figure 7).

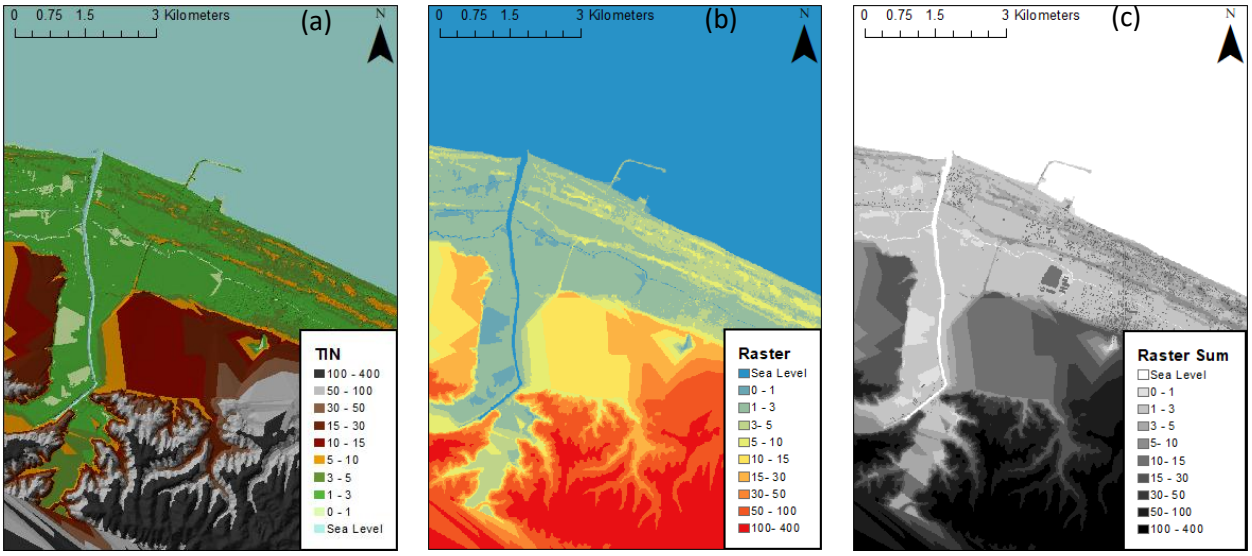


Figure 7: a) TIN, b) raster, and c) modified Digital Elevation Model

2.6. Hydraulic Model

The hydraulic model was created with the HEC-RAS 6.1 program. The HEC-RAS program is used for river hydraulic analysis, graphical representation, flood and flood propagation animation. This program can simulate one-dimensional and two-dimensional or combined-dimensional flow in open channels (Zelenakova et al., 2018). 2-dimensional flood analysis was used in this study. In the HEC-RAS program, the region is divided into square areas (smallness of the square areas increases the study detail) and a 2-dimensional flood analysis is performed above the water depth, velocity and lateral variability. It is recommended to enter precipitation as effective precipitation, as the program does not take into account soil infiltration and other losses (Zeiger & Hubbart, 2021; Urzică et al., 2021).

Although the 1D model is the same with the principles of conservation of mass and momentum, the 2D flow changes over time in 2D spatial dimension. The 2-dimensional continuity equation is as follows (Betsholtz & Nordlöf, 2017):

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial(\mathrm{hv})}{\partial \mathrm{y}} + \mathrm{q} = 0 \tag{1}$$

In equation 1, H is the water surface elevation, h is the water depth, the mean velocity depths in the u and v, x and y directions, and q is the unit discharge. The 2-dimensional momentum equation is in the x direction in equation 2 and in the y direction in equation 3.

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} = -\mathrm{g}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{x}} + v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - c_f u + fv \tag{2}$$

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} + \mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}} = -\mathrm{g}\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{y}} + v_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - c_f u + fv \tag{3}$$

In these equations, H represents the water surface elevation, vt is the eddy viscosity coefficient, c_f is the friction coefficient, f is the Coriolis parameter, v and u are the mean velocity depths in x and y directions.

3. Results and Discussion

It can define flood risk as the probability that parameters such as life and property safety will be affected by flood waters in a certain area, within a certain period. There is an inverse relationship between the water level and the probability of its occurrence. That is, the probability of occurrence of high water levels is lower than that of shallow water levels. As long as it does not exceed natural levees or flood walls, there is a relationship between the water level and the return period. According to conventional 1D flood maps, for such a situation, the flood risk of all lands below the waterline is at the same level as the flood wall risk, so there is an assumption that if this level is exceeded, the entire land will be at risk. This approach does not take into account the spread of the runoff and all land below the waterline is designated as at risk of flooding without grading. The flood will not immediately spread over the entire land. It will take time to propagate into the inundation area. How long it will take depends on the extent of the water, the character of the land, the roughness of the land cover, and the presence of obstructions such as buildings. This time component is of great importance for decision-makers. While some people will be faced with the risk of flooding within a few hours, for others, this risk will become a danger after days. Decision makers need to know in advance which people should be evacuated first and which roads are available. As 1D flood maps identify flood areas on a cross-sectional basis, they are unable to provide the requisite accurate information to develop such regional plans. In addition, it will not be beneficial in making these plans for possible future floods. In this study, the HEC-RAS program, which is used for two-dimensional hydrodynamic modeling, has been developed for 2-dimensional comprehensive analysis. It is used in many hydraulic analyses such as tides, dam failure, and flood waves. The model simulates the change of flow and water level due to various forces. Water levels and flows are analyzed for meshes within the defined area, with determined bathymetry, bed roughness coefficient, wind field, and hydrographic boundary conditions. The modeling system analyzes according to the full-time and non-linear continuity and conservation of momentum equations. The output of the simulation is the water level and the water velocity. The model simulates 2D unsteady flows of laminar and turbulent fluids. Continuity and momentum equations are solved for each mesh in the study area using the finite difference method.

As mentioned, a model boundary was determined to cover possible areas of flood inundation and this study area was divided into meshes. For the land cover roughness values, the roughness data with the same mesh resolution was also prepared and superposed with the digital elevation model. Upstream and downstream boundary conditions are determined and defined in the model. The flood hydrograph, which indicates the time-flow relationship of the calculated recurrent flood flows, was defined in the model as an upstream boundary condition. Also, the downstream boundary condition was defined as the limited flow resulting from the blockage of the river mouth due to sediment accumulation. The model was analyzed for different recurrences and inundation, depth, and water velocity were determined for each mesh. The areal distributions are given in Figure 8.

Since flood inundation was not observed outside the river for Q_2 and Q_5 flows, the flood depth and water velocity maps of the flow hydrographs in these recurrence were not included.





Figure 8: Depth (m) and velocity (m/s) maps of different recurrence

Flood depths vary depending on topography. The depth is quite high in the region close to the river banks and in the places where the elevation is low. As a result of the flood analysis, it was determined that the inundation areas for the 500, 100, 50, 25, and 10-year repeated flood analyses of the Sakarya River were 5.37 km^2, 2.57 km^2, 1.75km^2, 1.72km^2, and 0.67 km^2, respectively. It was determined that the depth of the flood varied between 8.63 m and 1.00 m for the 500-year recurrence with the highest flood inundation. For all recurrence intervals, it was determined that the flood depths were higher in the upstream part of the study area depending on the topography. It was determined that the spread occurred due to accumulation in the plain area, close to the river mouth, where the city center is located.

The flood hazard is directly proportional to the flood depth and water velocity. The hazard rating was evaluated according to these two factors. The limit ranges of the parameters used in the hazard rating are given in the table. Boundary intervals were calculated using the minimum and maximum values of depth and velocity (Alphen et al., 2009).

The hazard rating is set at five levels, from very low to very high hazard. Using the created water depth and water velocity maps, raster superposition operations were performed with the raster calculator module of the ArcGIS program (Table 4). Accordingly, the areal graded hazard maps for 10, 25, 50, 100, and 500-year recurrent floods are given in Figure 9.

Table 4: Flood hazard rating parameters (Alphen et al., 2009)

Hazard Levels	a : Depth (m)		b : Velocity (m/s)		Danger=a*b	
	min	max	min	max	min	max
Extreme Low Hazard	0	0.25	0	0.5	0	0.125
Low Hazard	0.25	0.5	0.5	1	0.125	0.5
Moderate Hazard	0.5	0.75	1	1.25	0.5	0.9375
High Hazard	0.75	1	1.25	1.75	0.9375	1.75
Extreme High Hazard	1	Max	1.75	Max	1.75	Max



Figure 9: Flood hazard maps

Sakarya River recurrent flood inundation maps have been examined and it has been determined that it can carry the 2 and 5-year flood recurring flows. In other words, the stream cross-section is sufficient for these flood flows. The flood inundation map of the 10-year recurrent flood flow rate was examined; It is seen that the flood waters that spread over 1.3 km^2 of agricultural area in the left floodplain of the river between 1-2,3 km affect a small number of residences in the fields. The flood inundation map of 25 years of recurrent flood flow has been examined; It is seen that 2.3 km^2 of agricultural area and a few houses in the floodplain of the river between 0-4.5 km have been affected by the flood (Figure 10). The flood inundation map of the 100-year recurrent flood discharge was evaluated; In addition to the 50-year hazard map, the flood appears to have affected residential areas in the left overbank section. It is seen that the irrigation channels passing through this region are effective in the discharge of the flood. In addition, it was determined that many houses were affected by the flood. The flood inundation map of 500 years of recurrent flood flow was analyzed; It was determined that the flood caused a spread over an area of 7.4 km^2, and the extent and flow depth increased in the left overbank section. It is seen that the residences in the Karasu district center are not affected by this flood.

According to the 500-year recurrent hazard distribution in the floodplain; 5 houses are as an Extreme High Hazard, 11 houses are as High Hazard, 49 houses are as Moderate Hazard, 104 houses are as Low Hazard, and 347 houses are as an Extreme Low Hazard were determined.



Figure 10: Percentage information on flood modeling for different return period discharges

4. Conclusion

The findings of the study on the flood risk due to sediment accretion and considering the economic value of the region, it is considered that possible risks may have negative effects on the country's economy. For this reason, it is necessary to prevent the occurrence of floods due to sediment transport in the region. For this, scours should be prevented by constructing sediment traps in the river bed downstream of the dam. In this way, sedimentation occurring at the river mouth will be prevented. If the carrying capacity of the river is sufficient, it will prevent flooding. In addition, the Black Sea wave height and intensity are very high, causing momentum forces to arise at the mouth of the river and forcing the sea discharge. For this reason, the momentum force effect should be eliminated with offshore breakwaters constructed parallel to the river mouth.

5. Acknowledgment

This article was produced from the project titled; "Creating Flood Inundation Maps of Karasu County of Sakarya Province and Investigating The Risk-Damage Status of The Region According to Different Scenarios", Project No. 2020/AP/0003, supported by Yalova University Scientific Research.

References

Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., Roo, A. de, Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future, 5*(2), 171–182. https://doi.org/10.1002/2016EF000485

Alphen, J. V., Martini, F., Loat, R., Slomp, R., & Passchier, R. (2009). Flood risk mapping in Europe, experiences and best practices. *Journal of Flood Risk Management, 2*(4), 285–292. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01045.x

Barredo, J. I. (2009). Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 9*(1), 97–104.

Barredo, J. I., Saurí, D., & Llasat, M. C. (2012). Assessing trends in insured losses from floods in Spain (1971–2008). *Natural Hazards and Earth System Sciences, 12*(5), 1723–1729. https://doi.org/10.5194/nhess-12-1723-2012

Betsholtz, A., & Nordlöf, B. (2017). *Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS: A case study on Höje River* [Master thesis, Lund University]. https://www.lunduniversity.lu.se/lup/publication/8904721

Birkholz, S., Muro, M., Jeffrey, P., & Smith, H. M. (2014). Rethinking the relationship between flood risk perception and flood management. *Science of The Total Environment, 478*, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.061

Bouwer, L. M., Bubeck, P., & Aerts, J. C. J. H. (2010). Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. *Global Environmental Change, 20*(3), 463–471.

Bubeck, P., Otto, A., & Weichselgartner, J. (2017). Societal impacts of flood hazards. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.281

Copernicus Land Monitoring Service. (2018). *CORINE Land Cover 2018 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly*. Retrieved from https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018

Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the-art model. *Water, 12*(9), Article 2326. https://doi.org/10.3390/w12092326

Çıtakoğlu, H., Demir, V., & Haktanır, T. (2017). L-momentler yöntemiyle Karadeniz'e dökülen akarsulara ait yıllık anlık maksimum değerlerin bölgesel frekans analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6*(2), 571–580.

Dogan, E., Sönmez, O., Yapan, E., & Othan, K. (2013). Aşağı Sakarya Nehrinde taşkın yayılım haritalarının elde edilmesi. *Sakarya University Journal of Science, 17*(3), 363–369. https://doi.org/10.16984/saufbed.44256

Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F. A., & Feyen, L. (2016). Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources, 94*, 87–102. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002

HEC-RAS. (2021, June 14). *Hydrologic Engineering Center's (CEIWR-HEC) River Analysis System (HEC-RAS)*. Retrieved from https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

Işık, S., Şaşal, M., & Doğan, E. (2006). Sakarya Nehrinde barajların mansap etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*(3), 401–408.

Jongman, B. (2018). Effective adaptation to rising flood risk. *Nature Communications, 9*, Article 1986. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04396-1

Koca, Y. C. (2014). *Rize İyidere alt havzası İkizdere kesiti için birim hidrografın belirlenmesi* [Uzmanlık tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı]. https://kutuphane.tarimorman.gov.tr/vufind/Record/1181327

Kopar, İ., Polat, S., Hadimli, H., & Özdemir, M. (2011). 4-6 Mart 2004 Pulur Çayı (Ilıca-Erzurum) sel-taşkın afeti. *Doğu Coğrafya Dergisi, 10*(13), 187–218.

Kreft, M. (2011). *Quantifying the impacts of climate-related natural disasters in Australia and New Zealand*. Munich Re, Wellington.

Lim, N. J., & Brandt, S. A. (2019). Flood map boundary sensitivity due to combined effects of DEM resolution and roughness in relation to model performance. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 10*(1), 1613–1647.

Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in flood inundation mapping: Current issues and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering, 13*(7), 608–620.

Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering, 12*(1), 11–18.

Prinos, P. (2008). Review of flood hazard mapping. *Global NEST Journal, 13*(3), 193–214.

Quiroga, V. M., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua, 3*(1), 25–33.

Rupal, K. W., & Agnihotri, P. G. (2019). Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 40*, Article 101155. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101155

Sonmez, O., & Doğan, E. (2017, September 29 – October 1). *Asi Nehri yatağının taşkın taşıma kapasitenin belirlenmesi* [Conference presentation]. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku, Azerbaijan.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2011). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – Revealing Risk, Redefining Development.* United Nations, Geneva.

Urzică, A., Mihu-Pintilie, A., Stoleriu, C. C., Cîmpianu, C. I., Huţanu, E., Pricop, C. I., & Grozavu, A. (2021). Using 2D HEC-RAS modeling and embankment dam break scenario for assessing the flood control capacity of a multi-reservoir system (NE Romania). *Water, 13*(1), Article 57. https://doi.org/10.3390/w13010057

Uzuntaş, Ö., & Öztürk, S. (2019). An assessment on the flood and flash flood regulations in Turkey: A comparison with different countries and legal deficiency analysis. *Journal of International Scientific Research, 4*(2), 146–159. https://doi.org/10.23834/isrjournal.520732

Yanmaz, A. M. (2007, May 28–29). *Akarsu geçişlerinde taşkın kaynaklı problemlerin değerlendirilmesi* [Bildiri Sunumu]. Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu, Samsun, Türkiye.

Zeiger, S. J., & Hubbart, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management, 285*, Article 112125. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125

Zelenakova, M., et al. (2018). Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Krušlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production, 212*, 109–118. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.008

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 170–180, DOI: 10.21324/dacd.1509157

Bibliometric Analysis in the Context of Earthquake and Türkiye

İbrahim Halil Çelik[1,*]

[1]*Artvin Çoruh University, Artvin Vocational School, Civil Defense and Firefighting Program, 08100, Artvin, Türkiye.*

Abstract

Türkiye has experienced many earthquakes of different magnitudes throughout history. Since the destructive consequences of these earthquakes lead to disasters, they have an important place in terms of disaster management. Considering the seismicity of Türkiye, this study aims to present a bibliometric analysis of the studies on earthquakes and Türkiye from the Web of Science (WOS) database. In the study, filters were applied within the framework of various criteria, and analyses were made in the VOSviewer program. Within the scope of the study, it was determined that studies on Earthquake & Türkiye have increased in recent years, the journal with the most publications is Geophysical Journal International, and the most cited study is "Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering".It was determined that Barka, Aykut stand out among the authors regarding total link strength and citations, and Ergintav, Semih regarding number of documents and co-authorship. In terms of countries, the USA is the country with the most publications after Türkiye. In terms of keywords, earthquake, Türkiye and the North Anatolian Fault Zone came to the fore. It is thought that this study will be an important reference for researchers who want to study earthquakes in Türkiye.

Keywords
Earthquake, Türkiye, Bibliometric Analysis, Web of Science, VOSviewer

Deprem ve Türkiye Bağlamında Bibliyometrik Analiz

Özet

Türkiye tarih boyunca farklı büyüklüklerde birçok deprem yaşamıştır. Bu depremlerin yıkıcı sonuçları afetlere yol açtığı için afet yönetimi açısından önemli bir yere sahiptir. Bu çalışma, Türkiye'nin depremselliğini göz önünde bulundurarak, Web of Science (WOS) veri tabanından depremler ve Türkiye üzerine yapılan çalışmaların bibliyometrik bir analizini sunmayı amaçlamaktadır. Çalışmada çeşitli kriterler çerçevesinde filtreler uygulanmış ve analizler VOSviewer programında yapılmıştır. Çalışma kapsamında, deprem & Türkiye üzerine yapılan çalışmaların son yıllarda arttığı, en fazla yayın yapan derginin Geophysical Journal International olduğu, en fazla atıf alan çalışmanın ise "Progressive Failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering" olduğu belirlendi. Yazarlar arasında toplam bağlantı gücü ve atıf açısından Barka, Aykut, doküman sayısı ve ortak yazarlık açısından ise Ergintav, Semih öne çıkmıştır. Ülkelere göre bakıldığında Türkiye'den sonra en fazla yayın yapan ülkenin ABD olduğu tespit edilmiştir. Anahtar kelimeler açısından ise deprem, Türkiye ve Kuzey Anadolu Fay Zonu öne çıkmıştır. Bu çalışmanın, Türkiye'de deprem konusuyla ilgili çalışma yapmak isteyen araştırmacılar için önemli bir referans olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler
Deprem, Türkiye, Bibliyometrik Analiz, Web of Science, VOSviewer

1. Introduction

Earthquake is defined as the event in which the energy generated as a result of the fracture of the earth's crust due to the effect of tectonic forces spreads in the form of seismic waves and strongly shakes the environments and the earth (AFAD, 2024a). Earthquakes are natural events that have the potential to cause disasters, are included in the group of natural disasters, do not allow sufficient time for evacuation to the people of the region where they occur, and damage the infrastructure and superstructure. According to Kalafat (2023), although its source is a natural event, societies cause earthquakes to turn into disasters. The level of societies affected by earthquakes varies according to their level of socio-economic development (Özceylan & Coşkun, 2012; Şahin & Bilik, 2024), the importance they attach to risk mitigation activities (Kılıç, 2023), and their level of institutional and individual preparedness (Genç, 2007; Ünal et al., 2017). The integrated management approach in disaster management has not been fully realized in Türkiye (Parlak, 2023). In this respect, especially, earthquakes, cause devastating consequences for a large part of the country. In this framework, while an earthquake of similar magnitude can be overcome with minor damages in a region that prioritizes and implements disaster risk management, it can turn into a disaster with loss of life and property in another area where disaster risk culture has not yet been formed.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (462) 2151075 Faks: +90 (462) 2151076
E-posta: ibrahimhalil@artvin.edu.tr (Çelik İ.H.)

Gönderim Tarihi / Received : 02/07/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 23/09/2024

Earthquakes, one of the most destructive natural disasters, have many negative effects. It causes socio-economic problems, epidemic diseases, theft, looting, social inequality, and short- and long-term psychological problems (acute stress disorder, post-traumatic stress disorder, anxiety), especially loss of life, physical and property in the disaster area (Avdar & Avdar, 2022; Aydınbaş, 2023; Akbıyık & Tekindal, 2023; Gülyol, 2024).

In the Alpine Himalayan earthquake belt, Türkiye is one of the most active earthquake-deformation countries in the world where destructive earthquakes have been experienced frequently throughout history. Due to active strike-slip, normal and reverse faulting in the country, many regions have unique structural features (Bozkurt, 2001). In Türkiye, a large part of which is located in the active earthquake zone, many large earthquakes have occurred due to the mobility of the North and East Anatolian fault lines (Karagöz, 2007). Türkiye, which is one of the leading countries in terms of loss of life in earthquakes occurring in the world, ranks first in terms of the annual recurrence rate of earthquakes resulting in loss of life (Özel & Solmaz, 2012). In Türkiye, which is located in one of the most risky regions of the world in terms of earthquakes, destructive earthquakes that can cause loss of life and property are experienced every five years. On average, Türkiye experiences at least one earthquake between magnitude 5.0 and 6.0 every year. Among disasters, earthquakes caused 60 percent of the loss of life and the highest loss of property (AFAD, 2018).

EM-DAT (2024), which records disaster data from around the world, requires at least one of the following criteria to be met for a natural or man-made event to be registered as a disaster. These criteria are; at least 10 people have lost their lives (including missing persons), at least 100 people have been affected by this event (injury, homelessness, evacuation, etc.) and an emergency situation has been declared with international assistance. AFAD's (2024a) definition of disaster emphasizes the impact on the whole or a certain part of the society, physical and socio-economic losses, interruption of daily life, and exceeding the coping capacity of the community experiencing the event. In terms of both EM-DAT criteria and AFAD's definition, moderate earthquakes in Türkiye occasionally result in disasters.

In Türkiye, a large part of the country's territory is under earthquake risk, and approximately 98% of industrial organizations are also under earthquake risk (Altun, 2018). The rapid increase in the number of multi-storey buildings in the cities due to immigration to the cities in the last 70 years in Türkiye and the deficiencies and negligence in the inspection of these buildings are among the factors that cause loss of life and property in earthquakes that occur (Akdemir & Günaydın, 2024). Some prominent earthquakes in Türkiye in terms of magnitude are as follows: the 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6), the 1999 Marmara earthquakes (Mw 7.6 and Mw 7.1), and the 1939 Erzincan earthquake (MS 7.9), as well as 1926 Datça offshore (MS 7.7), 1942 Erbaa-Tokat (MS 7.0), 1943 Ilgaz-Çankırı (MS 7. 2), 1944 Gerede-Bolu (MS 7.3), 1953 Çanakkale (MS 7.2), 1957 Düzce-Bolu (MS 7.1), 1964 Karacabey-Bursa (MS 7.0), 1970 Kütahya (MS 7.2), 1976 Çaldıran-Van (Mw 7.0), and 2011 Van (Mw 7.1) (AFAD, 2024b). Considering the seismicity of Türkiye, it offers a wide field of study for scientists (Bozkurt, 2001).

There are various bibliometric studies on earthquakes in Türkiye in the literature. Okutkan and Gün (2023) conducted a bibliometric study of postgraduate theses in the field of earthquake-related education in Türkiye. Balbay et al. (2024) conducted a study on earthquake-related lung diseases. Kaçmaz and Kaçmaz (2023) discussed post-earthquake rehabilitation studies in children. In addition, in the international literature, earthquake has been addressed in bibliometric studies from various aspects (Liu et al., 2012; Ho, 2013; Arık et al., 2023; Wang et al., 2019; Morante-Carballo et al., 2023).

Although bibliometric studies, which have recently come to the forefront as visual mapping of studies, have been included in the literature on earthquakes, bibliometric analysis of studies on Türkiye & earthquakes has not been included. In this respect, this bibliometric study on earthquake & Türkiye has a unique structure. The study aims to reveal the academic research on earthquake & Türkiye obtained from the WOS database from a bibliometric perspective. In this context, answers to the following questions were sought:

- What is the number of articles on Earthquake & Türkiye, their distribution by years, and what are the prominent journals?
- What are the most cited studies on Earthquake & Türkiye?
- Which researchers are prominent in terms of co-authorship in studies on Earthquake & Türkiye?
- What is the level of the number of documents, citations, and total link strength of the authors on Earthquake & Türkiye?
- What is the number of countries' documents, citations, and links in studies on Earthquake & Türkiye?
- What are the prominent keywords in studies on Earthquake & Türkiye?

2. Materials and Methods

Web of Science (WOS) database was used as the data source in the study. The WOS database, which academics see as the main data source with the highest quality standards, contains many important journals and articles with high impact factors (Merigó et al., 2015). In addition, studies in WOS can be transferred to bibliometric programs such as VOSviewer (Yu et al., 2020). The WOS database provides some metadata for bibliometric analysis. These are data such as abstracts, references, citations, authors, organizations, countries, and impact factors of journals (Carvalho et al., 2013). VOSviewer, one of the tools used for bibliometric analysis, has powerful functionalities such as relationship networks in the literature, discovering new concepts, visualizing and mapping data, and providing different analyses of data (Dirik et al., 2023).

VOSviewer, a free computer program, facilitates the interpretation of large bibliometric maps and emphasizes graphical representation (Van Eck & Waltman, 2010). Bibliometric analysis facilitates researchers in exploring and analyzing large datasets. It also provides researchers with an overview of their topic, identifying knowledge gaps in the field, deriving new ideas, and positioning intended contributions (Donthu et al., 2021).
The study process started on 01.05.2024 by selecting TOPIC on the WOS database and typing the keywords "Earthquake" and "Turkey" or "Earthquake" and "Türkiye" in the search button. The study was limited from 1980 to 2023 in terms of publication year, articles as publication type, English as publication language, SCI-EXPANDED, and SSCI in terms of WOS indexes. The data exported from WOS were transferred to the VOSviewer 1.6.20 program for data analysis and visualization.

Regarding the ethical permissions of the study, the WOS database is an open source. Therefore, there was no need to obtain ethics committee approval. The data in the WOS database is considered valid and reliable.

3. Results

3.1. Findings Related to WOS

First of all, the keywords "Earthquake" and "Turkey" or "Earthquake" and "Türkiye" were typed into the search button by selecting topic on the Web of Science Core Collection database. 4,257 publications were found. According to the type of publication on Earthquake & Türkiye in the WOS, it is understood that most studies are Articles (3,757 documents). Other studies are Proceeding Papers (424 documents), Early Access (78 documents), Review Articles (71 documents), Editorial Materials (60 documents), Book Chapters (57 documents), and Letters (24 documents). Then, when it is examined in which indexes the studies were scanned, it is understood that Science Citation Index Expanded (3,360 documents) has the highest number of indexes.

The other indexes are Conference Proceedings Citation Index - Science (397 documents), Social Sciences Citation Index (372 documents), Emerging Sources Citation Index (315 documents), Conference Proceedings Citation Index - Social Science & Humanities (54 documents), Book Citation Index - Science (48 documents), Arts & Humanities Citation Index (48 documents), and Book Citation Index - Social Sciences & Humanities (14 documents).

When the languages used in the studies are analyzed; it is understood that most of the publications are in English (4,134 documents). Then Turkish (100 documents), Chinese (7 documents), Croatian (6 documents), German (4 documents), Russian (2 documents), Italian, Dutch, Spanish, and Ukrainian are listed with 1 study each.

Various filters were applied in the study. First, filters were applied in terms of publication years. It was understood that the publications on the subject were between 1980 and 2024. In this study, the year 2024 was excluded since WOS data was obtained as of 01.05.2024 and the calendar for 2024 is still in progress. The distribution of studies according to years is given in Figure 1.

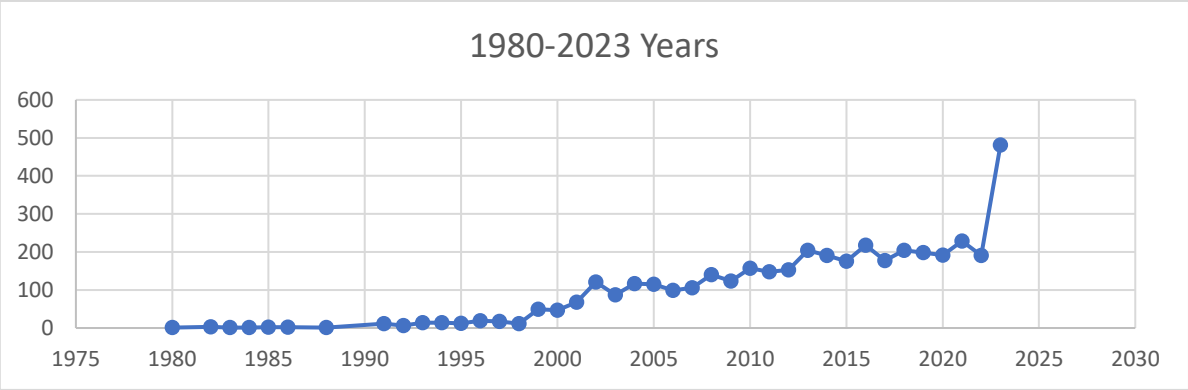


Figure 1: Distribution of studies by years (1980-2023)

When the distribution of the studies on Türkiye and earthquakes by years is analyzed; in the detailed examination of the visuals in Figure 1 prepared in Excel program environment, the highest number of publications was made in 2023 with 481 documents. It was determined that there were no documents in 1990, 1989, 1987, and 1981. Marmara earthquakes in 1999, Van earthquake in 2011, Elazığ and İzmir earthquakes in 2020, and finally Kahramanmaraş earthquakes in 2023, which are important dates in terms of Türkiye's earthquake experience, come to the fore. In Figure 1, it is observed that studies have increased especially after these dates.

As the second filtering, only articles were included in the study in terms of document types. As the third filtering, SCI-EXPANDED (3127 documents) and SSCI (323 documents) were filtered in terms of WOS indexes and included in the study. As the last filtering, only English language was filtered in terms of the languages used in the studies and the analysis continued. As a result of these filters in the WOS database, 3,243 articles were included in the analysis.

In the examination of the WOS database, it is understood that Türkiye ranks first with 2202 studies in the order of the countries with the highest number of publications. Then, USA (456 documents), England (201 documents), Germany (200 documents), France (198 documents), Italy (188 documents), China (148 documents), Japan (142 documents), Greece (128 documents), and Iran (97 documents).

Academic journals are important tools for communicating scientific studies and disseminating academic achievements. By analyzing journals, the prominent journals in any field can be identified (Liu et al., 2020). As a result of the restrictions applied in the study, the top 10 journals with the most publications on earthquake & Türkiye in the WOS database are shown in Figure 2 in different colors.

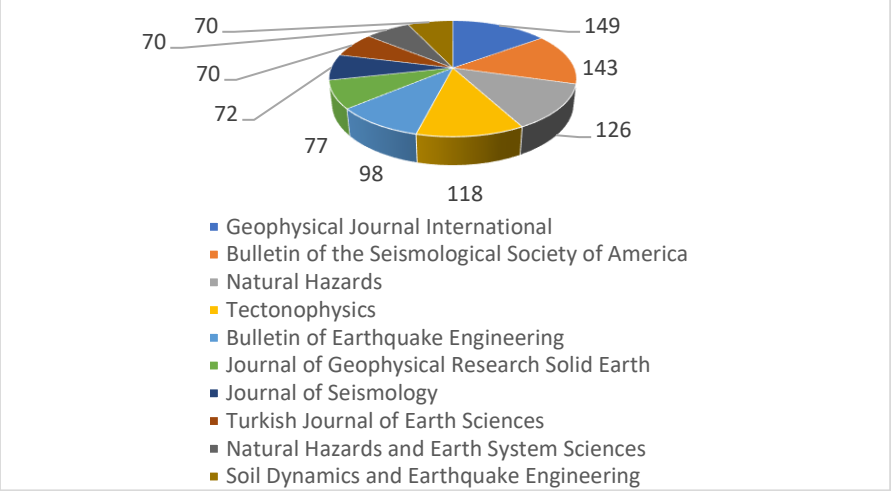


Figure 2: Prominent journals

Figure 2 shows that the journals with the highest number of publications are Geophysical Journal International, Bulletin of the Seismological Society of America, Natural Hazards, Tectonophysics, Bulletin of Earthquake Engineering, Journal of Geophysical Research Solid Earth, Journal of Seismology, Turkish Journal of Earth Sciences, Natural Hazards and Earth System Sciences, and Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

3.2. Bibliometric Analysis

3.2.1. Citation & Documents

In the bibliometric analysis, the minimum number of citations for a document was set as 50. The 5 most cited documents (Stein et al., 1997; Bozkurt, 2001; Taymaz et al., 1991; Barka & Kadinsky-Cade, 1988; Berberian, 1995) were identified through VOSviewer program and created by the author and shown in Table 1.

Table 1: Most cited studies (Source: Web of Science)

Title	Journal	Year	Author(s)	Average Per Year	Citations
"Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering"	Geophysical Journal International	1997	Stein, R.S.; Barka, A; Dieterich, J.H.	33.50	939
"Neotectonics of Turkey–a synthesis"	Geodinamica Acta	2001	Bozkurt, E.	35.29	847
"Active tectonics of the North and Central Aegean Sea"	Geophysical Journal International	1991	Taymaz, T; Jackson, J ; Mckenzie, D.	24.26	825
"Strike-slip-fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity"	Tectonics	1988	Barka, A., & Kadinsky-Cade, K.	21.19	784
"Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds-active basement tectonics and surface morphotectonics"	Tectonophysics	1995	Berberian, M.	24	720

In the visual analysis, items: 297, clusters: 18, and Links: 1153. In terms of links, Barka & Kadinsky-Cade (1988) study (links=197) ranks first. In addition, bibliometric visuals within the framework of citations are given in Figure 3.

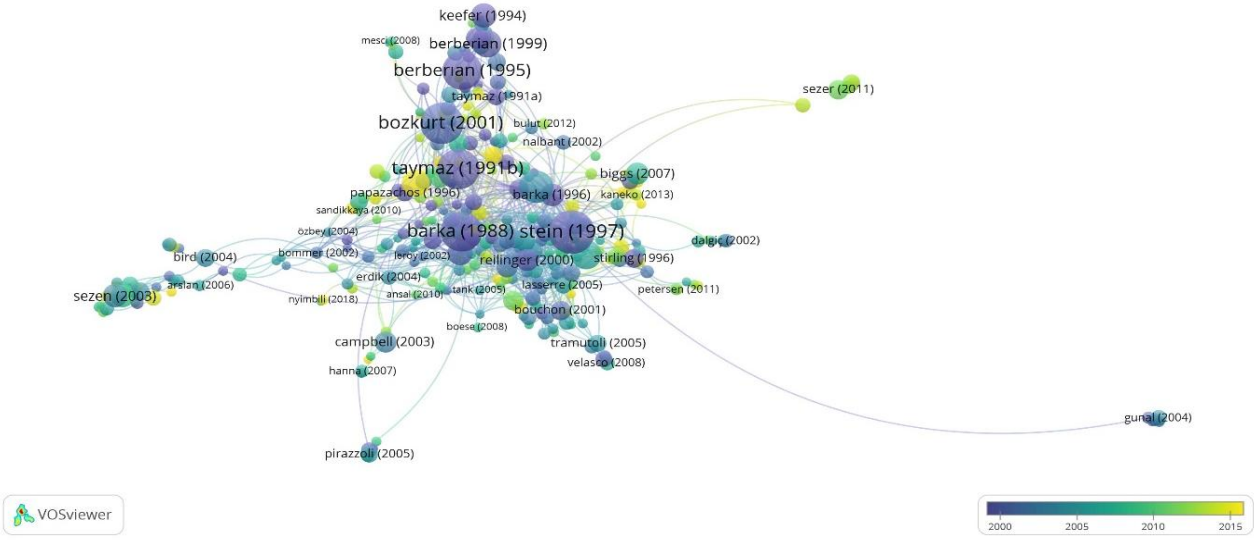


Figure 3: Citation & documents - overlay visualisation

3.2.2. Analysis of Co-Authorship & Authors

Co-authorship analysis examines the collaboration and interaction of researchers in any field of science. This analysis allows authors' collaborations to be mapped over different periods. Thanks to the information in this analysis, enables scientists who want to conduct research in their field of expertise to contact and collaborate with pioneering scientists (Donthu et al., 2021). In terms of co-authorship relationship, the minimum number of documents and citations of an author was set as 5. The ranking in terms of total link strength is as follows: Ergintav, Semih (149 total link strength), Bohnhoff, Marco (86 total link strength), Altunisik, Ahmet Can (67 total link strength), Askan, Aysegul (65 total link strength), and Kalafat, Dogan (64 total link strength). Bibliometric visualization in the context of co-authorship is given in figure 4.

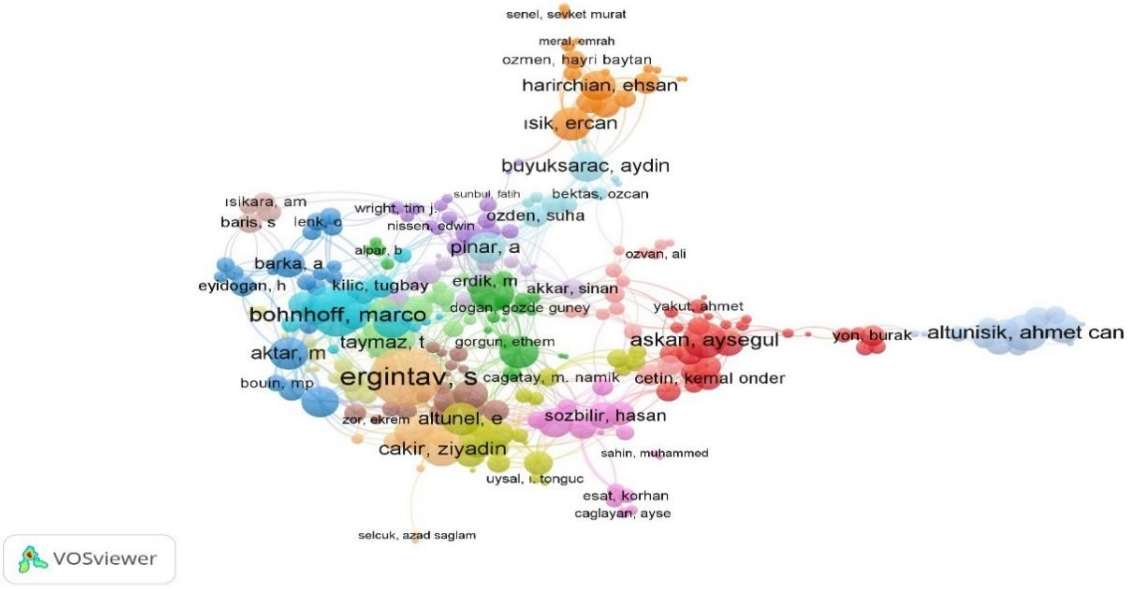


Figure 4: Co-authorship & authors - total link strenght (network visualization)

3.2.3. Analysis of Authors

The minimum number of documents and citations of an author was determined as 10. In the image created in the bibliometric map, it was determined that there are 80 items, 6 clusters, 1386 Links, and Total Link Strength 8327.

In terms of total link strength, Barka, Aykut (1238 total link strength) ranks 1st, Ergintav, Semih (966 total link strength) ranks 2nd, Bohnhoff, Marco (645 total link strength) ranks 3rd, Taymaz, Tuncay (552 total link strength) ranks 4th, and Pinar, Ali (537 total link strength) ranks 5th. The bibliometric visualization in terms of total link strength is given in Figure 5.

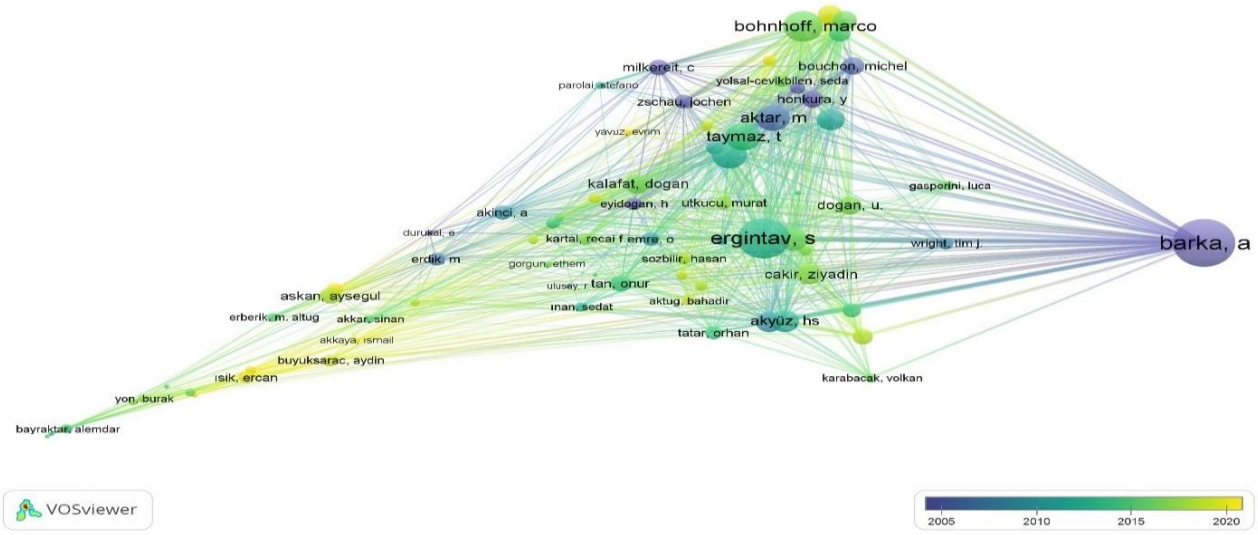


Figure 5: Prominent authors - total link strenght (overlay visualization)

The ranking of the authors in terms of the number of documents is as follows: Ergintav, Semih (56 documents), Pinar, Ali (37 documents), Bohnhoff, Marco (35 documents), Askan, Aysegul (35 documents), and Isik, Ercan (31 documents). The bibliometric visualization in terms of the number of documents is shown in Figure 6.

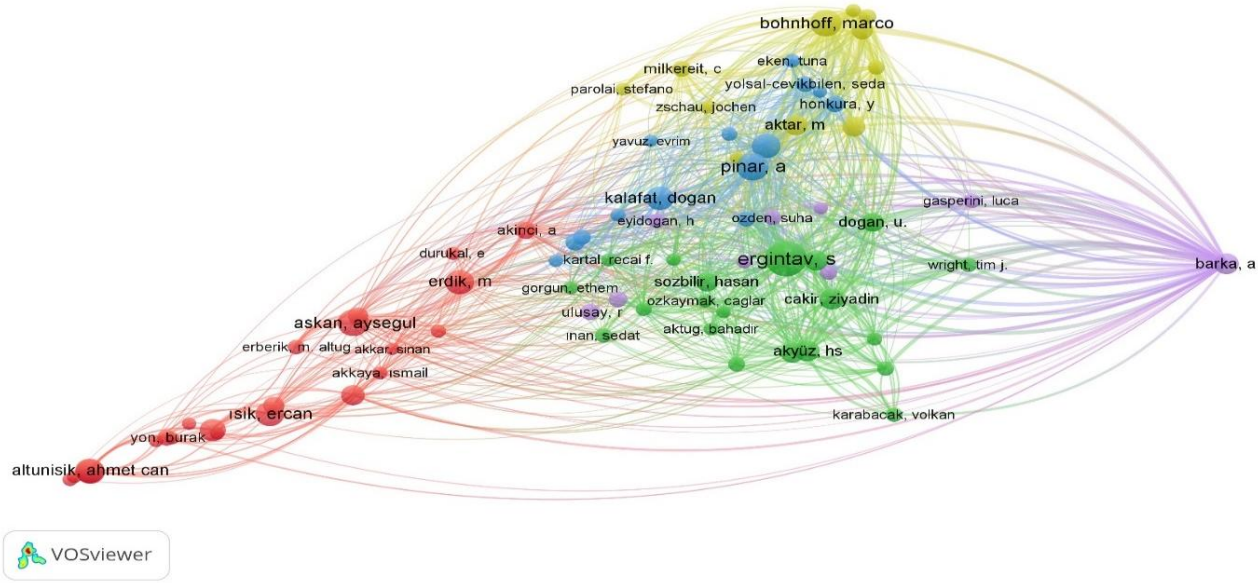


Figure 6: Authors documents(network visualization)

The ranking of the authors in terms of citations to their works is as follows: Barka, Aykut (3702 citations), Ergintav, Semih (2372 citations), Taymaz, Tuncay (1891 citations), Wright, Tim J. (1578 citations), and Aktar, Mustafa (1404 citations). The bibliometric map of the authors in terms of citations is shown in figure 7.

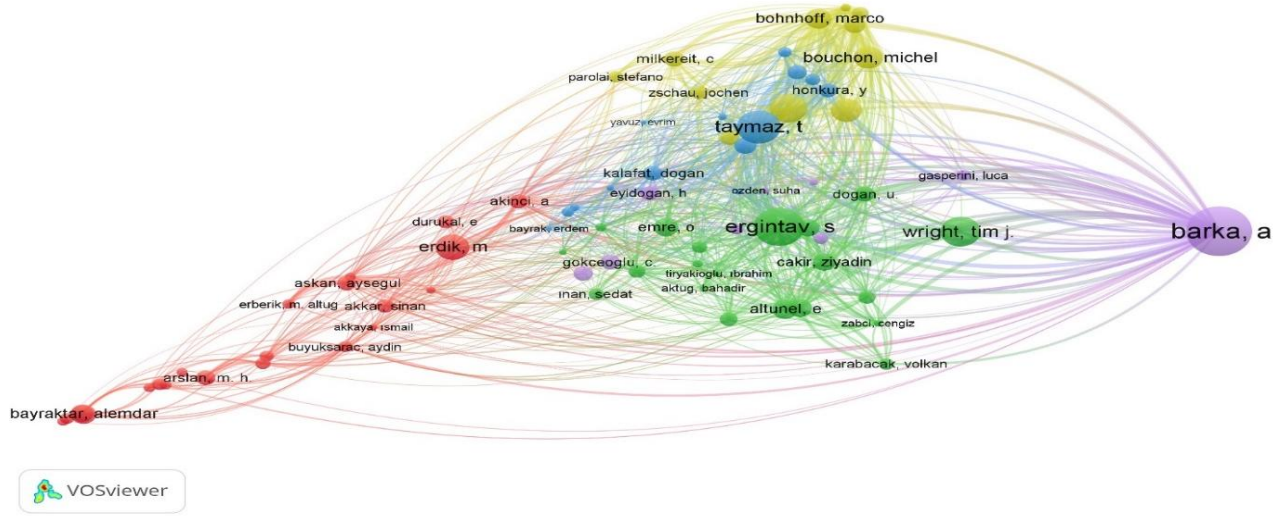


Figure 7: Authors - citations (network visualization)

3.2.4. Prominent Countries

The number of documents of a country is set as at least 5 and the number of citations as 1. 51 items, 8 clusters, links: 642, total link strength: 24020. In terms of document distribution, Türkiye (2188 documents), the USA (437 documents), Germany (195 documents), France (194 documents) and England (189 documents) stand out. In terms of citations, Türkiye (46484 citations), the USA (19491 citations), France (8882 citations), England (8699 citations) and Italy (5950 citations). In terms of total link strength in terms of countries, Türkiye ranks first (14126), followed by the USA (6636), France (4759), Germany (3050), and England (2900). Visuals related to this issue are shown in Figure 8.

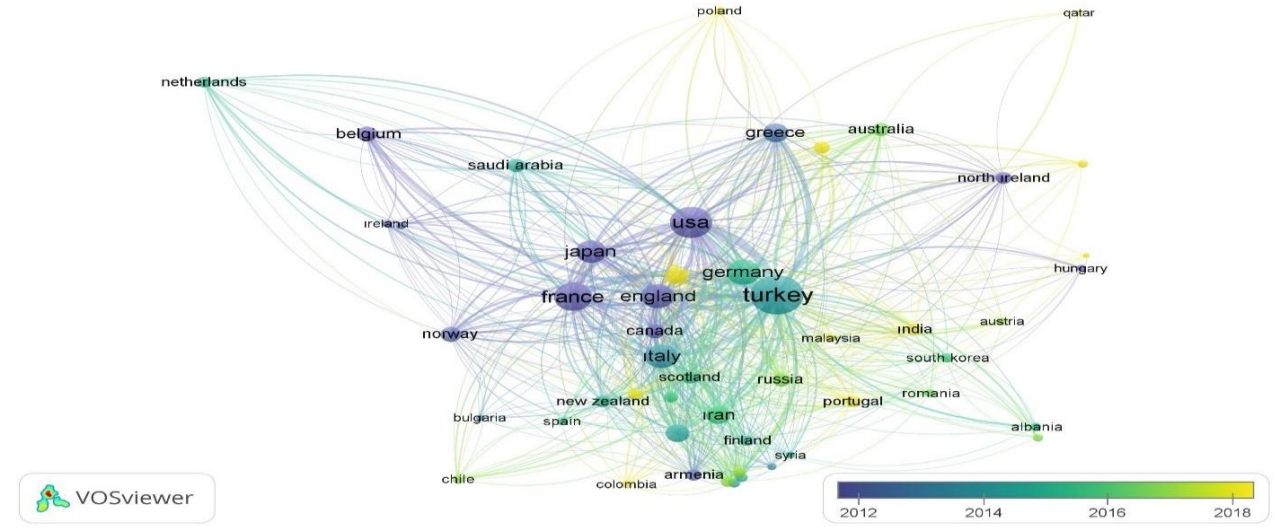


Figure 8: Prominent countries total link strength (overlay visualization)

3.2.5. Co-occurrence & Author Keywords (Analysis of Author Keywords)

Analyzes were made on the condition that a keyword (Minimum number of occurrences of a keyword) was used at least 10 times. The first 10 keywords are earthquake (occurrence: 527), Turkey (occurrence: 252), North Anatolian Fault Zone (occurrence: 147), liquefaction (occurrence: 75), seismicity (occurrence: 69), seismic hazard (occurrence: 65). , disaster (occurrence:64), landslide (occurrence:45), post-traumatic stress disorder (occurrence:43), and reinforced concrete (occurrence:43). Bibliometric visual analysis revealed a total of 148 items, 8 clusters, 1209 links and 2721 total link strength.

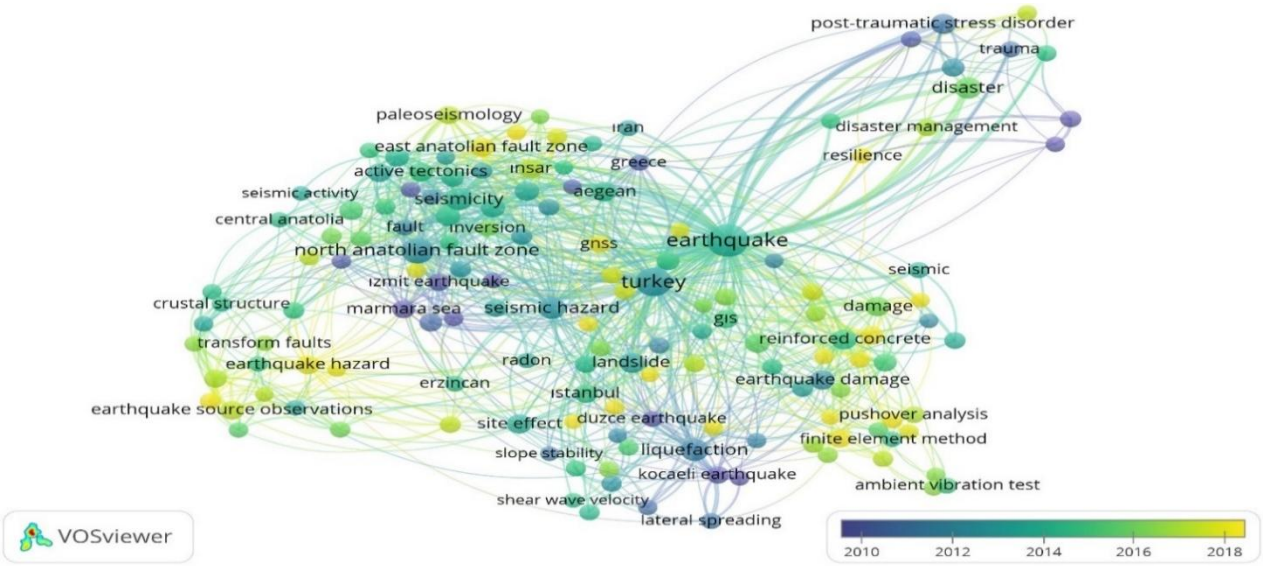


Figure 9: Co-accurence & author keywords (overlay visualization)

4. Discussion and Conclusion

This study, aimed to analyze the studies on Earthquake & Türkiye in the WOS database in a bibliometric framework. Within the scope of bibliometric analysis of the studies on Earthquake & Türkiye, it is understood that there were no publications in some years in terms of publication years. It is seen that the number of studies on the subject has increased in recent years. It is thought that the earthquake disasters that first affected Elazığ province in Türkiye in 2020 and Izmir province in the following months, as well as the earthquake disasters centered in Kahramanmaraş on February 6, 2023, had an impact.

It is understood that Geophysical Journal International, Bulletin of the Seismological Society of America, and Natural Hazards journals are prominent on the subject. The fact that these prestigious journals emphasize the study topics in fields such as natural disasters, earth sciences, tectonics, and seismology may have influenced their prominence. In this context, researchers who want to conduct studies on Earthquake and Türkiye should not ignore the prominent journals on this subject.

In terms of documents; when the top 5 most cited studies on Earthquake & Türkiye are examined, it is understood that they are generally discussed within the framework of faults and tectonic movements. The citation of any publication in scientific studies indicates the popularity of that publication (Chen et al., 2022). In this context, in line with the data shown in Table 1, it is understood that Stein et al. (1997) "Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering" ranks first within the framework of study constraints. Their findings such as earthquake sequences due to stress triggering on the North Anatolian Fault line between 1939-1992 and the interaction of earthquakes in this context may have brought this study to the forefront as a reference.

In terms of authors and co-authorship, the number of publications is an indicator of the author's productivity. The number of citations is an indicator of the impact of the author on the scientific community related to the field of study (Merigó et al., 2015). In terms of total link strength, Barka, Aykut; Ergintav, Semih, and Bohnhoff, Marco are the authors with larger nodes in Figure 5. In terms of the number of documents, Ergintav, Semih; Pinar, Ali, and Askan, Aysegul were the most productive authors. In terms of the number of citations, Barka, Aykut; Ergintav, Semih, and Taymaz, Tuncay stood out as the authors with the highest level of impact on the study topic. In terms of co-authorship, Ergintav, Semih; Bohnhoff, Marco; Altunisik, Ahmet Can; Askan, Aysegul, and Kalafat, Dogan were identified as the authors with the highest linkage strength. These findings are thought to be a reference for national and international researchers on co-authorship.

In terms of countries, it is an expected result that Türkiye ranks first. In terms of total link strength, number of citations, and number of documents in terms of countries, the USA, France, Germany, England, and Italy were identified as the main countries related to the subject of the study in addition to Türkiye. In their bibliometric study, Liu et al. (2012) found similarities between the prominent countries identified in earthquake-related studies and the prominent countries in this study. In terms of the total link strength between countries, Figure 8 shows that there is a high level of relationship between Türkiye and the USA, France, Italy, the UK, Germany, and Japan in line with the thickness of the connection between nodes. In particular, the similarity between the North Anatolian Fault Zone, which has a large study area in Türkiye, and the San Andreas Fault Zone in California (Allen, 1982) can be shown as one of the indicators of the strong relationship between the USA and Türkiye.

In recent years, it is understood that countries such as Australia, Russia, the People's Republic of China, Poland, India, Pakistan, Iraq, Qatar, United Arab Emirates, Malaysia, Colombia, Czechia, Portugal, Sweden, Chile, and Georgia have come to the forefront. Increasing scientific studies on earthquakes within the cooperation framework between countries will provide important contributions to countries regarding earthquake resistance.

In terms of author keywords; earthquake, Turkey, North Anatolian Fault Zone, liquefaction, seismicity, seismic hazard, and disaster have become prominent words. The destructive earthquakes that occurred in the North Anatolian Fault zone in Türkiye from the 1939 Erzincan earthquake to the 1999 Marmara earthquakes seem to be frequently reflected in the keywords in academic studies. In this regard, Stein et al. (1997) stated that although there are different examples of migration of earthquake sequences, the North Anatolian fault line is quite remarkable. In this context, the North Anatolian fault zone (Rockwell et al., 2001; Cakir et al., 2005; Bohnhoff et al., 2017; Pinar et al., 1996), and Liquefaction have also come to the fore as keywords in various studies on seismicity in Türkiye (Cetin et al., 2021). In addition, it is understood from the keywords that earthquakes are handled in terms of earth science such as seismicity (Bohnhoff et al., 2016; Yamamoto et al., 2022), seismic hazard (Paradisopoulou et al. 2010; Askan et al., 2015; Işık et al., 2021) as well as disaster (Sever et al., 2004). Landslides were also among the keywords that came to the fore regarding earthquakes being a triggering factor (Martino et al., 2018; Karakas et al., 2021). The cluster formed by keywords such as post-traumatic stress disorder (Alfuqaha et al., 2023; İlhan et al, 2023), mental health, trauma, and depression shows the importance of studies on mental health after the earthquake disaster (Altindag et al., 2005; Harada et al., 2015; Liang et al., 2021; Wang et al., 2021; Çelik, 2023; Lu et al., 2023). In addition, the keyword child in this cluster may also indicate that children are addressed in the context of vulnerability after the earthquake. In addition, keywords such as resilience, disaster, disaster management, mental health, InSAR, GNSS, earthquake hazards, paleoseismology, and deformation have been used more frequently recently.

In this study, the most frequently cited studies in high impact indexes in terms of earthquakes and Türkiye, the linkage relations between countries, co-authorship networks, who are the most productive, most active and most connected authors, and the most frequently used keywords were determined. Considering the seismicity of Türkiye, bibliometric analysis of scientific studies will be an important reference for researchers who will conduct academic studies in this field. For future studies, more detailed bibliometric research on earthquake & Türkiye can be conducted by analyzing the indexes, databases, and types of publications outside the limitations of this study.

5. Limitations of the Study

One of the most important limitations of the study was the use of data from the WOS database. In addition, it was restricted to SCI-EXPANDED and SSCI in terms of WOS indexes. Although there were studies on history in 2024, the data in WOS were restricted to 1980 and 2023 within the framework of calendar year and analysis. In terms of publication type, the study was limited to articles and in terms of publication language, the study was limited to English.

References

AFAD. (2018). *Türkiye'de afet yönetimi ve doğa kaynaklı afet istatistikleri*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf

AFAD. (2024a). *Açıklamalı afet yönetimi terimleri sözlüğü*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). https://www.afad.gov.tr/aciklamali-afet-yonetimi-terimleri-sozlugu

AFAD. (2024b). *Aletsel dönem deprem kataloğu (1900-Günümüz M>=4.0)*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).https://deprem.afad.gov.tr/event-instrumental

Akbıyık, A., & Tekindal, M. A. (2023). Deprem sonrası salgın oluşturma potansiyeline sahip enfeksiyon hastalıklarının belirlenmesi. *İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi, 8*(2), 489–499.

Akdemir, A., & Günaydın, T. İ. (2024). Türkiye'nin depremselliği ve burulma düzensizliği. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR), 11*(104), 301–309. https://doi.org/10.5281/zenodo.10731964

Alfuqaha, O. A., Al-Masarwah, U. M., Farah, R. I., Yasin, J. A., Alkuttob, L. A., Muslieh, N. I., ... & Alshubbak, N. A. H. (2023). The impact of Turkey and Syria earthquakes on university students: Posttraumatic stress disorder symptoms, meaning in life, and social support. *Behavioral Sciences, 13*(7), Article 587. https://doi.org/10.3390/bs13070587

Allen, C. R. (1982). Comparisons between the North Anatolian Fault of Turkey and the San Andreas Fault of California. In A.M. Isikara & A. Vogel (Eds.), *Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction* (pp. 67–85). Vieweg+ Teubner Verlag.

Altindag, A., Ozen, S., & Sir, A. (2005). One-year follow-up study of posttraumatic stress disorder among earthquake survivors in Turkey. *Comprehensive Psychiatry, 46*(5), 328–333. https://doi.org/10.1016/j.comppsych.2005.01.005

Altun, F. (2018). Afetlerin ekonomik ve sosyal etkileri: Türkiye örneği üzerinden bir değerlendirme. *Sosyal Çalışma Dergisi, 2*(1), 1–15.

Arık, M., Azazi, H., & Akcan, M. B. (2023). A review of "earthquake" based on bibliometric mapping. *Journal of Current Debates in Social Sciences, 6*(2), 119–130.

Askan, A., Karimzadeh, S., Asten, M., Kilic, N., Şişman, F. N., & Erkmen, C. (2015). Assessment of seismic hazard in the Erzincan (Turkey) region: Construction of local velocity models and evaluation of potential ground motions. *Turkish Journal of Earth Sciences, 24*(6), 529–565. https://doi.org/10.3906/yer-1503-8

Avdar, R., & Avdar, R. (2022). Türkiye'de yaşanan doğa kaynaklı afetlerin sosyo-ekonomik etkileri. *Afet ve Risk Dergisi, 5*(1), 1–12.

Aydınbaş, G. (2023). Sosyoekonomik boyutuyla Türkiye'de depremler üzerine bir inceleme: Kahramanmaraş depremi örneği. In G. Karakuş, F. Yakut & N. D. Şimşek (Eds.), *Sosyal bilimlere çok yönlü yaklaşımlar: Tarih, turizm, eğitim, ekonomi, siyaset ve iletişim* (pp. 177–212). Özgür Yayın Dağıtım Ltd. Şti.

Balbay, E. G., Kurutkan, M. N., Yıldız, P., & Balbay, Ö. (2024). Earthquake-related lung diseases: A bibliometric analysis of publications. *Sağlık Bilimlerinde Değer, 14*(1), 8–17. https://doi.org/10.33631/sabd.1299277

Barka, A. A., & Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. *Tectonics, 7*(3), 663–684. https://doi.org/10.1029/TC007i003p00663

Berberian, M. (1995). Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds-active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics, 241*(3–4), 193–224. https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C

Bohnhoff, M., Dresen, G., Ceken, U., Kadirioglu, F. T., Kartal, R. F., Kilic, T., ... & Mencin, D. (2017). GONAF–The borehole geophysical observatory at the North Anatolian Fault in the eastern Sea of Marmara. *Scientific Drilling, 22*, 19–28. https://doi.org/10.5194/sd-22-19-2017

Bohnhoff, M., Ickrath, M., & Dresen, G. (2016). Seismicity distribution in conjunction with spatiotemporal variations of coseismic slip and postseismic creep along the combined 1999 Izmit-Düzce rupture. *Tectonophysics, 686*, 132–145. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.029

Bozkurt, E. (2001). Neotectonics of Turkey–A synthesis. *Geodinamica Acta, Special Issue: SI, 14*(1–3), 3–30. https://doi.org/10.1016/S0985-3111(01)01066-X

Cakir, Z., Akoglu, A. M., Belabbes, S., Ergintav, S., & Meghraoui, M. (2005). Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian Fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR. *Earth and Planetary Science Letters, 238*(1–2), 225–234. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.044

Carvalho, M. M., Fleury, A., & Lopes, A. P. (2013). An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. *Technological Forecasting and Social Change, 80*(7), 1418–1437. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.11.008

Cetin, K. O., Cakir, E., Ilgac, M., Can, G., Soylemez, B., Elsaid, A., ... & Gor, M. (2021). Geotechnical aspects of reconnaissance findings after 2020 January 24th, M6.8 Sivrice–Elazig–Turkey earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering, 19*(9), 3415–3459. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01112-1

Chen, Y., Lin, M., & Zhuang, D. (2022). Wastewater treatment and emerging contaminants: Bibliometric analysis. *Chemosphere, 297*, 133932. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133932

Çelik, A. K. (2023). Deprem sonrası travma belirtileri, umut ve iyi oluş arasındaki ilişkinin incelenmesi. *TRT Akademi, 8*(18), 574–591. https://doi.org/10.37679/trta.1275268

Dirik, D., Eryılmaz, İ., & Erhan, T. (2023). Post-truth kavramı üzerine yapılan çalışmaların VOSviewer ile bibliyometrik analizi. *Sosyal Mucit Academic Review, 4*(2), 164–188. https://doi.org/10.54733/smar.1271369

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

EM-DAT. (2024). Entry criteria: Minimal requirements for a disaster to be entered in EM-DAT. https://doc.emdat.be/docs/protocols/entry-criteria/.

Genç, F. N. (2007, 5–7 Aralık). *Türkiye'de kentleşme ve doğal afet riskleri ile ilişkisi* [Bildiri Sunumu]. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Gülyol, Y. (2024). Deprem kaynaklı ikincil travmatik strese genel bir bakış. *HABITUS Toplumbilim Dergisi, 5*, 37–60.

Harada, N., Shigemura, J., Tanichi, M., Kawaida, K., Takahashi, S., & Yasukata, F. (2015). Mental health and psychological impacts from the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster: A systematic literature review. *Disaster and Military Medicine, 1*, 1–12. https://doi.org/10.1186/s40696-015-0008-x

Ho, Y. S. (2013). Comments on "A bibliometric study of earthquake research: 1900–2010." *Scientometrics, 96*, 929–931. https://doi.org/10.1007/s11192-012-0915-2

Işık, E., Harirchian, E., Büyüksaraç, A., & Levent Ekinci, Y. (2021). Seismic and structural analyses of the eastern Anatolian region (Turkey) using different probabilities of exceedance. *Applied System Innovation, 4*(4), Article 89. https://doi.org/10.3390/asi4040089

Kaçmaz, K. S., & Kaçmaz, C. (2023). Çocuklarda deprem sonrası rehabilitasyon çalışmalarının bibliyografik analiz yöntemiyle incelenmesi: Sistematik derleme. *İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi, 8*(2), 537–543.

Kalafat, D. (2023). Türkiye'de deprem oluş düzenleri. *Yerbilimleri, 44*(3), 222–233.

Karagöz, K. (2007, 5–7 Aralık). *1999 Marmara depreminin ekonomik etkileri: Ekonometrik bir yaklaşım* [Bildiri Sunumu]. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Karakas, G., Nefeslioglu, H. A., Kocaman, S., Buyukdemircioglu, M., Yurur, T., & Gokceoglu, C. (2021). Derivation of earthquake-induced landslide distribution using aerial photogrammetry: The January 24, 2020, Elazig (Turkey) earthquake. *Landslides, 18*(6), 2193–2209. https://doi.org/10.1007/s10346-021-01660-2

Kılıç, M. (2023). Kahramanmaraş depremlerinin etkilediği 10 ilin il risk azaltma planlarındaki yapı stoğu durumlarının incelenmesi ve deprem sonrası durum ile karşılaştırılması. *Acil Yardım ve Afet Bilimi Dergisi, 3*(2), 49–56.

Liang, Y., Zeng, H., Liu, Y. G., Xu, A. M., & Liu, W. H. (2021). Prevalence of post-traumatic stress disorder after earthquakes among the elderly in China: A meta-analysis. *World Journal of Emergency Medicine, 12*(2), 137–142. https://doi.org/10.5847/wjem.j.1920-8642.2021.02.009

Liu, H., Hong, R., Xiang, C., Lv, C., & Li, H. (2020). Visualization and analysis of mapping knowledge domains for spontaneous combustion studies. *Fuel, 262*, Article 116598. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116598

Liu, X., Zhan, F. B., Hong, S., Niu, B., & Liu, Y. (2012). A bibliometric study of earthquake research: 1900–2010. *Scientometrics, 92*(3), 747–765. https://doi.org/10.1007/s11192-011-0599-z

Lu, W. T., Zhao, X. C., Wang, R., Li, N., Song, M., Wang, L., ... & Wang, X. Y. (2023). Long-term effects of early stress due to earthquake exposure on depression symptoms in adulthood: A cross-sectional study. *Injury, 54*(1), 207–213. https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.07.047

Martino, S., Lenti, L., & Bourdeau, C. (2018). Composite mechanism of the Büyükçekmece (Turkey) landslide as conditioning factor for earthquake-induced mobility. *Geomorphology, 308*, 64–77. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.028

Merigó, J. M., Mas-Tur, A., Roig-Tierno, N., & Ribeiro-Soriano, D. (2015). A bibliometric overview of the *Journal of Business Research* between 1973 and 2014. *Journal of Business Research, 68*, 2645–2653. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.04.006

Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, L., Montalván-Burbano, N., & Carrión-Mero, P. (2023). Bibliometric analysis of earthquake research in America: A comparative study using Web of Science and Scopus databases. *International Journal of Safety & Security Engineering, 13*(5), 965–973. https://doi.org/10.18280/ijsse.130520

Okutkan, C., & Gün, R. Ş. (2023). Türkiye'de depremle ilgili eğitim alanında yapılan lisansüstü tezlerin bibliyometrik analiz yöntemiyle incelenmesi. *Korkut Ata Türkiyat Araştırmaları Dergisi, 13*, 1699–1715. https://doi.org/10.51531/korkutataturkiyat.1394975

Özceylan, D., & Coşkun, E. (2012). Türkiye'deki illerin sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyleri ve afetlerden sosyal ve ekonomik zarar görebilirlikleri arasındaki ilişki. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 41*(1), 31–46.

Özel, G., & Solmaz, A. (2012). Türkiye'de deprem tekrarlanma zamanının tahmini ve neotektonik bölgelere göre depremselliğin Markov zinciri ile incelenmesi. *Çankaya University Journal of Science and Engineering, 9*(2), 125–138.

Paradisopoulou, P. M., Papadimitriou, E. E., Karakostas, V. G., Taymaz, T., Kilias, A., & Yolsal, S. (2010). Seismic hazard evaluation in western Turkey as revealed by stress transfer and time-dependent probability calculations. *Pure and Applied Geophysics, 167*(8–9), 1013–1048. https://doi.org/10.1007/s00024-010-0085-1

Parlak, B. (2023). Bütünleşik afet yönetişimi: Hibrid model önerisi. *TESAM Strateji Dergisi, 3*, 21–24.

Pinar, A., Honkura, Y., & Kikuchi, M. (1996). A rupture model for the 1967 Mudurnu Valley, Turkey earthquake and its implication for seismotectonics in the western part of the North Anatolian Fault Zone. *Geophysical Research Letters, 23*(1), 29–32. https://doi.org/10.1029/95GL03667

Rockwell, T., Barka, A., Dawson, T., Akyuz, S., & Thorup, K. (2001). Paleoseismology of the Gazikoy-Saros segment of the North Anatolian Fault, northwestern Turkey: Comparison of the historical and paleoseismic records, implications of regional seismic hazard, and models of earthquake recurrence. *Journal of Seismology, 5*(3), 433–448. https://doi.org/10.1023/A:1011435927983

Stein, R. S., Barka, A. A., & Dieterich, J. H. (1997). Progressive failure on the North Anatolian Fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International, 128*(3), 594–604. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x

Şahin, R., & Bilik, M. B. (2024). Deprem ve yoksulluk ilişkisi. *Sosyoloji Dergisi, 47*, 77–113. https://doi.org/10.59572/sosder.1462907

Taymaz, T., Jackson, J., & McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean Sea. *Geophysical Journal International, 106*(2), 433–490. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03906.x

Ünal, Y., Işık, E., Şahin, S., & Yeşil, S. T. (2017). Sağlık afet çalışanlarının depremlere ilişkin bireysel hazırlık düzeylerinin değerlendirilmesi: Ulusal Medikal Kurtarma Ekipleri (UMKE) derneği örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi, 31*(2), 71–80.

Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics, 84*(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Wang, C., Wu, J., He, X., Ye, M., Liu, W., & Tang, R. (2019). Emerging trends and new developments in disaster research after the 2008 Wenchuan earthquake. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(1), Article 29. https://doi.org/10.3390/ijerph16010029

Wang, S., Shi, X., Chen, X., Zhu, Y., Chen, H., & Fan, F. (2021). Earthquake exposure and PTSD symptoms among disaster-exposed adolescents: A moderated mediation model of sleep problems and resilience. *Frontiers in Psychiatry, 12*, Article 577328. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2021.577328

Yamamoto, Y., Kalafat, D., Pinar, A., Takahashi, N., Polat, R., Kaneda, Y., & Ozener, H. (2022). Seismic velocity structure along the North Anatolian Fault beneath the Central Marmara Sea and its implication for seismogenesis. *Geophysical Journal International, 228*(1), 396–411. https://doi.org/10.1093/gji/ggab351

Yu, Y., Li, Y., Zhang, Z., Gu, Z., Zhong, H., Zha, Q., ... & Chen, E. (2020). A bibliometric analysis using VOSviewer of publications on COVID-19. *Annals of Translational Medicine, 8*(13), Article 816. https://doi.org/10.21037/atm-20-4235

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 181–193, DOI: 10.21324/dacd.1562860

Air Quality of Bursa: Temporal and Spatial Evaluation of PM10, PM2.5, NO2 and SO2 Pollutants Using IDW Geostatistical Technique

Duygu Arıkan İspir [1,*], Ferruh Yıldız[1]

[1]*Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Geomatics Engineering, 42075, Konya, Türkiye.*

Abstract

One of the most significant environmental issues is air pollution. Human health is negatively impacted by this issue in addition to the environment. In this study, spatial and temporal analysis of particulate matter 10 (PM10), particulate matter 2.5 (PM2.5), sulfur dioxide (SO2) and nitrogen dioxide (NO2) pollutants for 2022 was conducted within the provincial borders of Bursa, Turkey. The monthly and seasonal air pollution maps have been generated using 24-hour measurements obtained from air quality monitoring stations within the city. Data for PM10, PM2.5, SO2, and NO2 were utilized in the creation of these maps. The pollution maps were analyzed based on the criteria outlined in the World Health Organization (WHO) report, as well as the limit values set by the European Union and the national regulations. According to the results obtained, the amount of pollutants in summer is lower than in winter. While PM10 was on average 39.32 µg/m³ in the summer months, it exceeded the national legislation by 3.09% in the winter. When evaluated during the average summer season, the concentrations of PM2.5 and SO2 were observed to be 19.29 µg/m³ and 5.82 µg/m³, respectively. In contrast, during the winter season, the concentrations were found to be 47.30 µg/m³ for PM2.5 and 11.07 µg/m³ for SO2. There is no legal limit for PM2.5 in national legislation. SO2 was found to be below the specified legal regulations. While NO2 was on average 25.13 µg/m³ in the summer months, it exceeded the national legislation by 9.74% in the winter. The main sources of pollutants in the region were examined and according to the findings, factors such as the city being an industrial zone and high traffic density increased the pollutants. The results of this investigation show that air pollution poses a significant issue in Bursa.

Keywords

Air Quality, Atmospheric Particulate Matter, Inverse Distance Weighting, Temporal Evaluation, Spatial Evaluation

Bursa'nın Hava Kalitesi: IDW Jeoistatistik Tekniğini Kullanarak PM10, PM2.5, NO2 ve SO2 Kirleticilerinin Zamansal ve Mekansal Değerlendirilmesi

Özet

En önemli çevresel sorunlardan biri hava kirliliğidir. Bu sorun, çevreye ek olarak insan sağlığını da olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Bursa ili sınırları içinde 2022 yılına ait partikül madde 10 (PM10), partikül madde 2.5 (PM2.5), kükürtdioksit (SO2) ve azotdioksit (NO2) kirleticilerinin mekânsal ve zamansal analizi yapılmıştır. Şehirdeki hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen 24 saatlik ölçümler kullanılarak aylık ve mevsimlik hava kirliliği haritaları oluşturulmuştur. Bu haritaların oluşturulmasında PM10, PM2.5, SO2 ve NO2 verileri kullanılmıştır. Kirlilik haritaları, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) raporunda belirtilen kriterler ile Avrupa Birliği ve ulusal mevzuat tarafından belirlenen sınır değerler baz alınarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yaz aylarında kirletici miktarı kış aylarına göre daha düşüktür. Yaz aylarında PM10 ortalama olarak 39.32 µg/m³ iken, kış aylarında ulusal mevzuatı %3.09 oranında aşmıştır. Ortalama yaz mevsiminde değerlendirildiğinde, PM2.5 ve SO2 konsantrasyonları sırasıyla 19.29 µg/m³ ve 5.82 µg/m³ olarak gözlemlenmiştir. Buna karşılık, kış mevsiminde PM2.5 ve SO2 konsantrasyonları sırasıyla 47.30 µg/m³ ve 11.07 µg/m³ olarak bulunmuştur. PM2.5 için ulusal mevzuatta yasal bir sınır bulunmamaktadır. SO2'nin belirlenen yasal mevzuatın altında olduğu tespit edilmiştir. NO2 yaz aylarında ortalama olarak 25.13 µg/m³ iken, kış aylarında ulusal mevzuatı %9.74 oranında aşmıştır. Bölgedeki kirleticilerin ana kaynakları incelenmiş ve bulgulara göre şehrin sanayi bölgesi olması ve yüksek trafik yoğunluğu gibi faktörlerin kirleticileri artırdığı belirlenmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, Bursa'da hava kirliliğinin önemli bir sorun teşkil ettiğini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kalitesi, Atmosferik Partikül Madde, Ters Mesafe Ağırlıklandırma, Zamansal Değerlendirme, Mekânsal Değerlendirme

1. Introduction

The increasing acceleration in population growth, coupled with the rapid industrialization bringing about economic challenges and unplanned urbanization issues exacerbated by uncontrolled migration, triggers problems. The escalation of these negative factors also adversely affects air quality. Air pollution is a condition in which the quantity of foreign or unwanted substances in the atmosphere exceeds normal levels, reaching elevated levels, ultimately impacting living

* Corresponding Author: Tel: +90 (332) 2051669 Faks: +90 (332) 2410635
E-mail: darikan@ktun.edu.tr (Arıkan İspir D.), fyildiz@ktun.edu.tr (Yıldız F.)
Gönderim Tarihi / Received : 07/10/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 15/12/2024

organisms negatively. There are two types of air pollutants: primary and secondary. While secondary pollutants are caused by a combination of two or more primary pollutants or by common atmospheric components, primary pollutants are released straight from their sources (Yener & Demirarslan, 2022).

An increase in this pollution may be brought about artificially by human sources, or naturally by events like lightning, forest fires, and desert dust (Kampa & Castanas, 2008; Arikan & Yildiz, 2023). Air pollution that arises naturally is far less than that which exists artificially (Yağmur, 2022). Human activity-induced increases in air pollution have an adverse impact on people's quality of life as well (Demirarslan & Akıncı, 2016a). This situation causes an increase in health problems such as respiratory illness, stroke, lung cancer, and heart diseases in individuals (Suthar et al., 2024). According to the report published by the World Health Organization (WHO), the majority of the global population breathes highly polluting air. According to this report, 7,000,000 people die prematurely every year from indoor and outdoor air pollution (World Health Organization, 2022).

Various studies are conducted by researchers to monitor and simulate air quality, track the levels of pollutants, and determine the primary sources and causes of pollution. The effects of each pollutant parameter, its dispersion across the atmosphere and the events it causes were investigated. Hashim et al. (2004), investigated the primary pollutant conditions resulting from a forest fire in Indonesia in 1997. They utilized the Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) satellite to monitor the quantity of 10 μm-sized particulate matter (PM10), one of the pollutants. Arikan and Yildiz (2023) similarly observed carbon monoxide (CO) and ultraviolet aerosol index (UVAI) values following a forest fire in Antalya in 2021. They used the Sentinel-5P TROPOMI satellite for observation and compared the results with data obtained from national air quality stations.

Various mathematical methods and artificial intelligence algorithms are employed to reduce the level of pollutants in the atmosphere or improve air quality. Among the preferred mathematical models for this purpose are physical or deterministic models based on atmospheric chemistry and physics principles. Additionally, statistical models, which predict future air quality based on past data, are commonly used. Source emission models, designed to determine the quantity of pollutants emitted from sources such as industrial facilities and transportation vehicles, also play a significant role. Dispersion models are utilized to ascertain the spread of pollutants in the atmosphere, analyzing how pollutants disperse and their effects. Finally, multi-criteria optimization methods can be applied to optimize these complex processes (Goyal & Kumar, 2011).

Studies on the assessment and prediction of air quality using different machine learning algorithms—a subfield of artificial intelligence—have been published in the literature. A subfield of artificial intelligence known as "machine learning" develops models of real-world problems and the data that has been received about them in order to extract knowledge (El Naqa & Murphy, 2015; Zhou, 2021). Yağmur (2022), estimated the amount of particulate matter for a metropolitan metropolis using Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), and Artificial Neural Networks (ANN). MLR yielded a worse outcome than other algorithms, however the RF method did the best. In a similar study by Bozdağ et al. (2020), Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), SVM, RF, K-nearest neighbor (kNN), eXtreme gradient boosting (XGBoost), ANN machine learning algorithms were used. Performance and error rates were calculated for each algorithm specified. According to the values they obtained, they obtained the best results using ANN with values of R^2 = 0.58, RMSE = 20.8, MAE = 14.4. These algorithms provide advantages in calculation and scenario simulation according to the characteristics of the input data. However, as these models were inadequate in determining particulate matter concentrations, deep learning algorithms began to be used. In their study, Chang et al. (2020), examined the spatiotemporal characteristics of the PM2.5 concentration status and implemented it on the Self-organizing map (SOM). Then, they tested the accuracy of the model by creating an ANN model. Zhou et al. (2019) combined mini-batch gradient descent, dropout neuron and L2 regularization models and designed Deep Multi-output LSTM (DM-LSTM) neural network models. With this model, PM2.5, PM10 and nitrogen oxides (NOx) pollutant parameters were estimated. They compared the new model results with the Shallow Multi-output Long Short-Term Memory (SM-LSTM) model. According to the results obtained, SM-LSTM achieved a mean squared error of 0.87, while DM-LSTM achieved 0.72. In addition to artificial intelligence algorithms, geographic information systems (GIS) are also used in modeling air quality. These systems contribute to finding solutions to environmental problems by collecting various geographical and attribute information on the earth's surface (Khan et al., 2019; Masroor et al., 2020; Bugdayci et al., 2023). With GIS, statistical and geostatistical analyses are feasible. For spatial interpolation, various techniques such as Kriging (a geostatistical method), and deterministic approaches including inverse distance weighted (IDW), weighted average interpolation, polynomial interpolation, multiquadric interpolation, linear interpolation in the network of triangles, small curvature surface interpolation, and nearest neighbor interpolation are commonly utilized (Arıkan et al., 2021; Roy, 2021; Kumar et al., 2022; Gokul et al., 2023; Samal et al., 2023; Zhou et al., 2023). Demirarslan and Akıncı (2016a) ve Demirarslan and Akıncı (2016b) used the Inverse Distance Weighting (IDW) technique to detect air pollution in the Eastern Black Sea region. In these studies, the IDW method was applied to visualize the spatial distribution of air pollution data, and density maps of the pollutants in the region were created using this method. These studies demonstrate that the IDW technique is an effective tool for air pollution analysis. Through the system based on the acquisition, analysis, and interpretation of data and information, important trends related to air quality can be identified. Pollution sources can be detected, and relationships between various environmental variables can be understood.

Consequently, more effective policy and intervention strategies can be developed for environmental sustainability goals, leading to positive impacts on public health and environmental quality. To achieve these objectives, a total of 365 air quality monitoring stations have been uniformly distributed throughout Turkey as of the year 2022 (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2022a).

In this study, National air monitoring stations were utilized to assess the air quality of the city. The focus of the study was not only on the changes in particulate matter (PM10, PM2.5) but also on the status of other air pollutants, namely NO2 and SO2. Pollution conditions were examined on a monthly and seasonal basis. The aim of this study was to understand the trends of pollution in the summer and winter seasons by analyzing different temporal periods and to identify the main sources of pollutants. The city covers an approximate area of 10,819 km², with 9 distributed ground stations in 2022. Monitoring the air quality for the entire city is not possible with a limited number of stations. In the literature, numerous studies have utilized interpolation techniques, such as IDW, to generate air pollution maps and perform spatial analyses. These studies, however, often focus on larger scales or specific monitoring station data, without delving into localized urban characteristics. Unlike these broader studies, this research focuses on Bursa province, a major urban and industrial center in Turkey. By employing the Inverse Distance Weighting (IDW) technique, this study aims to estimate air pollutant concentrations not only at monitoring station locations but across the entire urban area, including regions without direct monitoring. In this study, the focus was expanded to detect air pollution in other parts of the city, not just at station locations. For this purpose, an Inverse Distance Weighting (IDW) analysis, an interpolation technique, was performed to visualize the concentration of air pollutants, and pollution maps were generated. At the core of the study, information explaining emissions from all relevant sources in the city, including emissions from residential heating, traffic, and industry, was collected to evaluate air pollution for the Bursa province.

2. Material and Method

2.1. Study Area

Bursa is a city located between the northern latitudes of 40°15’ and 41°38’ and the eastern longitudes of 28°40’ and 30°48’ (Figure 1). The city's average elevation above sea level is around 150 meters, and its population is approximately 3 million people (Turkish Statistical Institute, 2022). The population density is 291 people per square kilometer in the province. As an industrial city, Bursa's economy and population are increasing every year. Consequently, monitoring and tracking air quality become crucial.

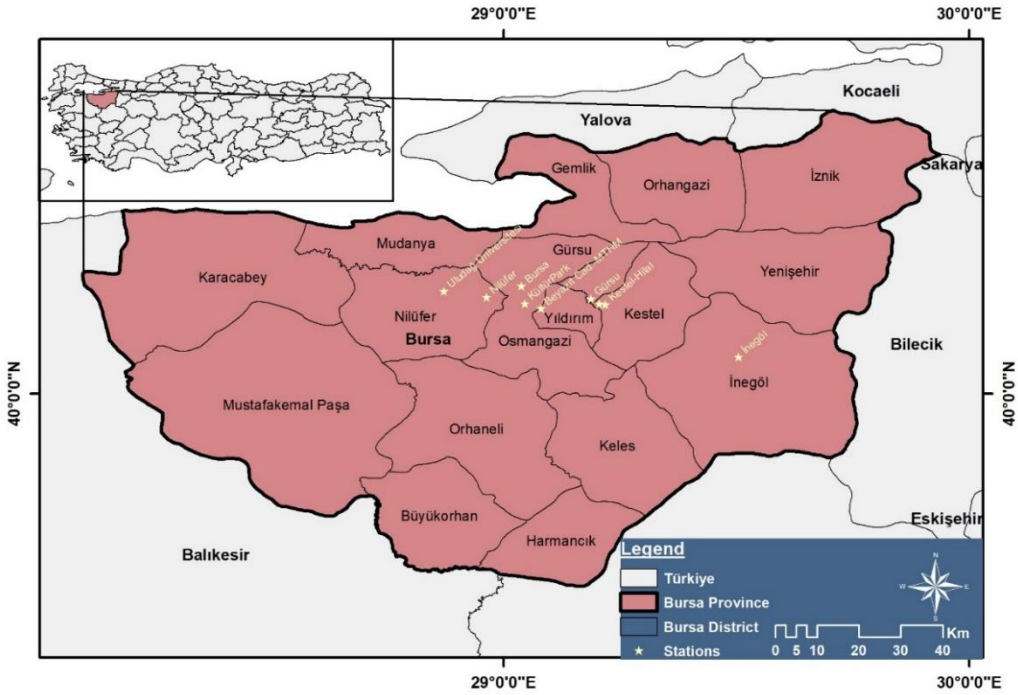


Figure 1: The map of Bursa Province

In the long term, economic growth depends on technological progress. Bursa, the fourth largest city in Turkey, has a share of more than 50% in the country's automotive industry, together with its main industry and sub-industry suppliers (Temel, 2023). Bursa is one of the cities with the highest sectoral diversity and in this sense, employment is divided into various industrial branches (Sungur & Yaman, 2021).

It comes in first for the automotive, metal, and machinery industries; second for the number of machinery and equipment manufacturers; third for food producers; fourth for exports from the defense sector industry; and fifth for quantity of industrial establishments (Görener & Görener, 2008; Turkish Statistical Institute, 2022; Albayrak, 2023; Temel, 2023). Being an industrial city is one of the factors that significantly affects urban structuring.

2.2. Data Collection

Since air pollution has significant effects on human health, great importance is given to air quality all over the world (Altıkat et al., 2011). To effectively conflict air pollution, raise public awareness, and develop methods for management, accurate recording of air pollution levels is essential. For this reason, 36 stations were established in 2005 by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change in order to monitor air quality in Turkey (Bugdayci et al., 2023). Monitoring of air quality in Turkey is increasing day by day. The number of stations in Turkey has been steadily rising every day, as seen in Figure 2. While only 10 µm sized particulate matter PM10 and SO2 pollutant parameters can be collected from the first established stations, as of 2022, NO2, NOX, CO, ozone (O3) and 2.5 µm diameter particles PM2.5 parameters was also possible to collect. These compounds' general characteristics are described.

- Carbon monoxide (CO); Chemically, it is a structure formed as a result of the covalent bonding of two carbon atoms with oxygen (Şahin & Kubilay, 2023). In the event of insufficient oxygen during the combustion reaction, the carbon atom cannot be fully oxidized. As a consequence, carbon monoxide gas, a highly potent toxic gas, is released (Aydinoğlu et al., 2022). This colorless, odorless, and tasteless gas, when reaching levels around 30% in the air, can lead to respiratory obstruction, causing health problems (Şahin & Kubilay, 2023). Prolonged exposure can result in death because oxygen transported through the blood cannot reach the cells, leading to cellular death (Aydinoğlu et al., 2022).
- Sulfur dioxide (SO2); The main sources include coal used in thermal power plants, production activities in industries (such as raw material processing, petroleum refineries, cement factories, metallurgical industry), solid and liquid fuels used for residential and workplace heating in urban areas, and events originating from natural sources (such as forest fires, volcanic activities) (Zencirci & Işıklı, 2017; Kırbıyık, 2023). Since this gas dissolves in water, it largely affects the respiratory tract. It is a cough-inducing and throat-irritating gas (Bayrı, 2023).
- Nitrogen oxides (NOX); They are gases formed as a result of the reaction of nitrogen and oxygen in the atmosphere. These gases are produced especially during burning. When it reacts with water vapor in the atmosphere, it causes acid rain. This harms ecosystems (Erickson et al., 2020).
- Ozone (O3); It is a molecule formed by the combination of three oxygen atoms. Ultraviolet rays from the sun split O2 molecules into two separate oxygen atoms. The O3 molecule emerges as a result of the combination of free oxygen atoms in the atmosphere with other O2 molecules. In recent research, it has been determined that ozone in the air is not only in the formula O3, but also in the form of O4, O6....Ox, and is given the name Aran (Bayrı, 2023). While ozone gas has a protective effect in the upper layers of the atmosphere, it has negative effects on the environment and human health in the troposphere. As a result of the increase in ozone gas in the troposphere, people have to breathe less amount of oxygen. This situation causes asthma and cardiovascular diseases due to respiratory failure in individuals (Aydinoğlu et al., 2022).
- Particulate matter (PM); They are small solid or liquid particles suspended in the air consisting of many different components (Aydinoğlu et al., 2022). An aerodynamic diameter of 10 µm is called PM10, and a diameter of 2.5 µm is called PM2.5.

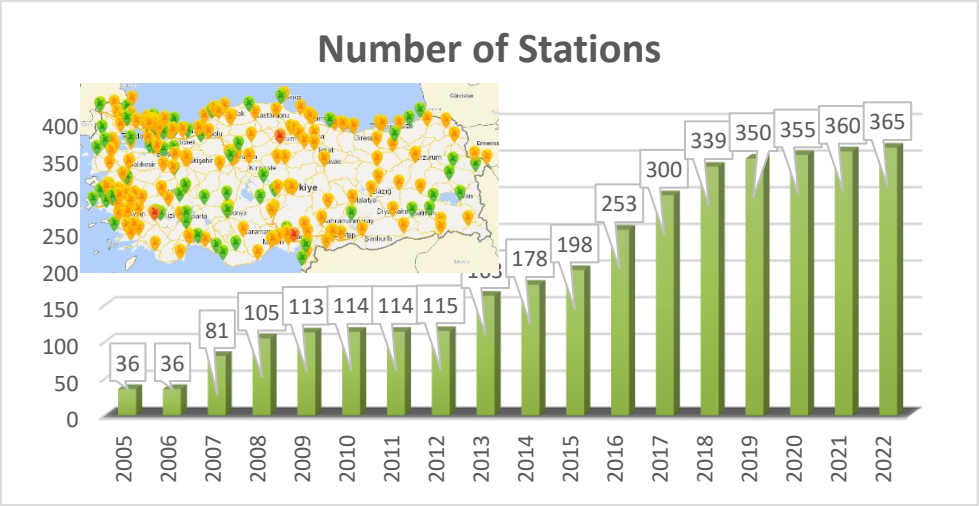


Figure 2: Number of national air quality monitoring station in Türkiye

These parameters are used to measure the concentrations of pollutants using specialized devices, and later converted to the Air Quality Index (AQI) through the use of specific algorithms. Globally, the air quality index consists of six categories ranging from good to hazardous, based on the concentration levels of pollutants present in the air (Aydinoğlu et al., 2022). Different colors are used to symbolize each group (Yağmur, 2022). The color scale starts from green and continues through yellow, orange, red, purple and burgundy. Each color represents the degree of cleanliness of the atmosphere. Green symbolizes the highest air quality, while other colors indicate that the air is respectively less clean. The values of pollutant parameters at the stations are open to sharing free of charge. Data is published in two ways: hourly and daily. Individuals and researchers working on these issues can access it via "www.havaizleme.gov.tr".

In the study, daily recorded air quality parameter results of 7 of 9 stations in Bursa between the dates 01.01.2022-31.12.2022 were provided. Stations used; Nilüfer, Bursa, Beyazıt Cad. - MTHM, Kestel-MTHM, İnegöl, Kültür Park, Uludağ University. Since the other two stations were newly established, they were not included in the study because there was not enough data. General information about the air quality stations used, such as minimum and maximum average values and availability of data, is given in Table 1. Days on which data were not recorded at the station were not included in the study. Except for the PM10 parameter of Nilüfer station, the availability of other data is over 90%.

Table 1: General information about data

	Parameter	Unit	Min. Value	Max Value	Average Value	Data Percentage
Nilüfer	PM10	$\mu g/m^3$	24,15	192,97	64,47	83,56
Bursa			12,55	185,06	47,40	95,62
Beyazıt Cad.-MTHM			12,73	175,81	48,40	92,88
Kestel-MTHM			7,66	212,68	60,30	94,79
İnegöl			7,97	357,87	67,24	92,33
Nilüfer	PM2.5		15,35	112,93	37,21	90,68
Bursa			2,35	146,61	29,38	96,71
KültürPark			4,82	152,74	30,61	95,89
Uludağ Üniversitesi			1,71	90,05	21,34	95,89
Nilüfer	SO_2		3,31	28,60	8,67	90,32
Bursa			1,85	45,97	10,51	97,81
Beyazıt Cad.-MTHM			1,57	30,93	4,97	93,42
Kestel-MTHM			1,05	56,30	12,20	95,62
İnegöl			3,08	38,74	11,87	93,70
KültürPark			2,05	30,18	7,78	97,26
Uludağ Üniversitesi			1,38	20,08	4,35	97,26
Beyazıt Cad.-MTHM	NO_2		8,66	128,09	57,41	92,33
Kestel-MTHM			5,06	73,51	27,58	93,97
İnegöl			3,81	130,68	38,15	94,52
KültürPark			5,12	94,61	41,06	97,26
Uludağ Üniversitesi			3,10	59,99	18,69	93,70

In the study, GIS software ArcMap v.10.3 was used for spatial modeling of pollutant gases. Thanks to GIS technology, it is possible to access both spatial and attribute information of information on the earth's surface (Khan et al., 2019; Masroor et al., 2020). Based on this information, it is possible to use the monitoring and analysis of air quality, which is one of the factors contributing to global warming.

2.3. IDW Interpolation

In the study, the pollution status of areas around the station was addressed using the IDW method. The reason for choosing this method is its frequent preference in literature and its widespread use for spatial modeling of climatic data interpolation (Willmott & Matsuura, 1995; Jumaah, et al., 2019; Kumar et al., 2022). IDW, a spatial interpolation technique, relies directly on neighboring sampled values (Shepard, 1968). In other words, it involves predicting and calculating the unsampled value within a region based on the known points of sampled values. The IDW formula is given in Equation 1.

$$Z(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i Z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (1)$$

Here, $Z(x_0, y_0)$) is the value of the predicted point, n is the number of points (stations) used, Z_i is the value of each point, w_i is the inverse distance weight of each point to (x_0, y_0). Since it is the inverse distance, w_i in the equation is expressed as follows.

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

Here d_i, (x_0, y_0) is the distance to the point.

3. Results

To evaluate the air quality of Bursa, the measurement results of air pollutant parameters were examined. Maps of pollutants (Figures 3, 4, 5 and 6) and the box chart in Figure 7 were evaluated according to the legislation. For PM10 parameter; Nilüfer, Bursa, Beyazıt Cad. - MTHM, Kestel-MTHM, İnegöl stations were used.

Figure 3 shows the monthly averages of PM10 air pollution for a year in 2022. Minimum, maximum, average and standard deviation values for each month are indicated. In the national legislation, the limit value for PM10 is set at 70 µg/m³, while EU member states have established a limit value of 50 µg/m³, and according to WHO, the recommended level is 15 µg/m³ (World Health Organization, 2021; World Health Organization, 2022). When the values were examined, the months in which the average value exceeded the national limit were determined as January, November and December. In addition, it is observed that EU member states' limit values are exceeded in February, March and April. In these months, it was determined to be above the EU member states limit value of 10-20 µg/m³. The month with the lowest average PM10 value (34.66 µg/m³) is July, while the month with the highest (80.54 µg/m³) is December. The maximum value in 2022 was 119.93 µg/m³ in January. The amount of PM10 tends to decrease starting from January, except for September, October, November and December. November, December and January are the coldest months of winter in Bursa. Therefore, there are increases in the amount of PM10 in the city during this period. The main reason for the increase in these months is due to warming activities. High concentration values were recorded at Kestel station in the months when there were no warming activities (May, June, July, August, September). The main reason for this is that the terrain is mountainous, and the station is close to the foot of the mountain. In this case, it makes it difficult for pollutant gases to disperse.

Apart from Kestel station, it was observed that the amount of PM10 was higher in the areas where Nilüfer station is located. It is known that industry is dominant in these regions, routes of transportation are mostly present, and fuels such as fuel oil and coal, other than natural gas, are used in industry.

The main factors that cause an increase in PM10 are various industrial activities, vehicle exhausts or energy production. As a result of these activities, the amount of PM10 increases in the atmosphere and negatively affects human health. These structures, with a diameter of 10 µm, have an effect that can cause respiratory diseases and heart diseases when they enter the human respiratory system.

The amount of PM10 in summer is lower than in winter. This decrease is due to the increase in air temperature. Because warm air is lighter than cold air, it causes surface pollutants to rise and disperse faster into the atmosphere. In some cases, pollutants may be transported by the wind.

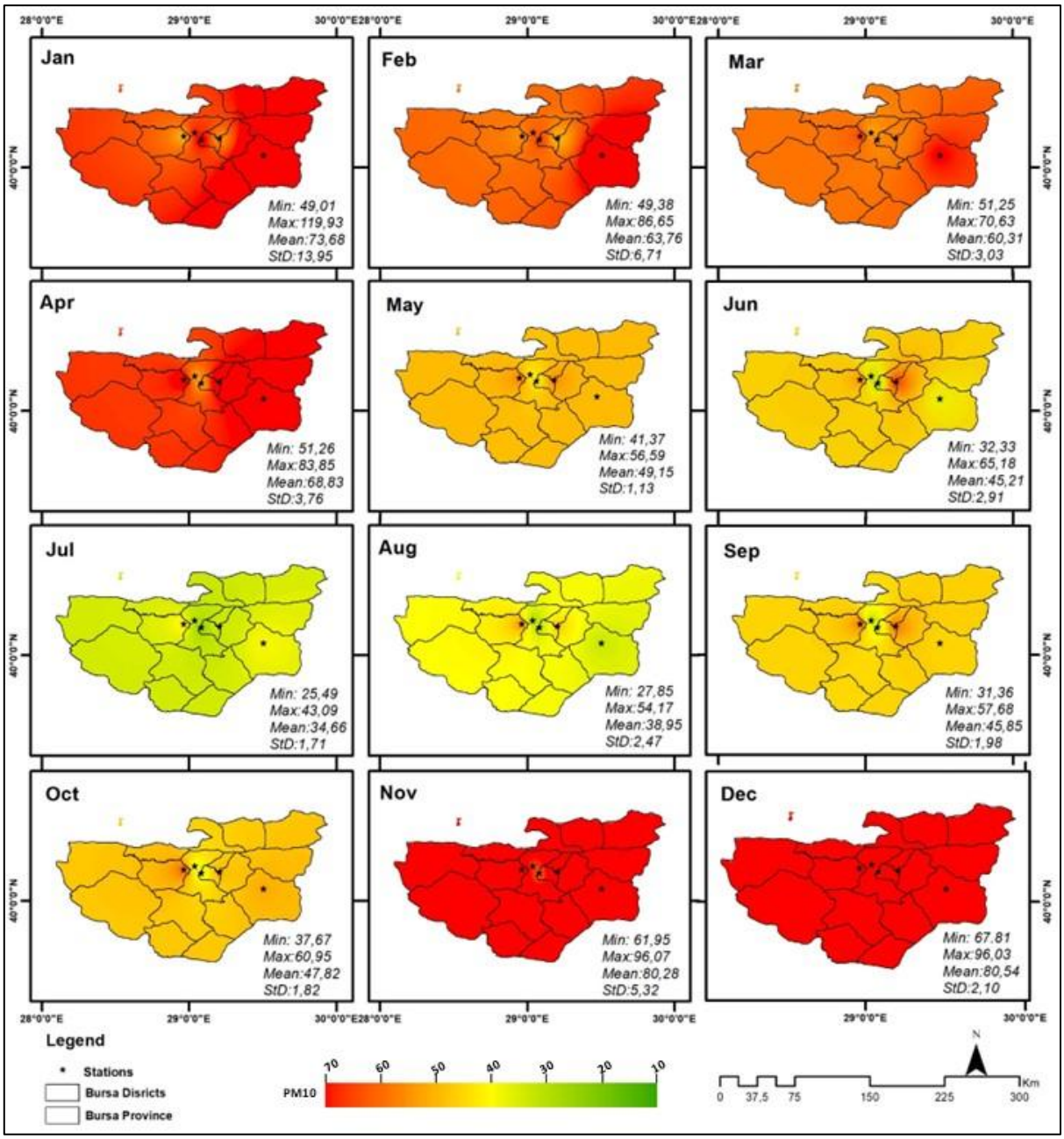


Figure 3: Spatial-temporal distribution of PM10 air pollutant concentrations in 2022

Figure 4 shows the temporal and spatial situation of PM2.5 air pollutants for 2022. For this pollutant, Nilüfer, Bursa, Kültür Park and Uludağ University stations were used.

According to the 2021 WHO report, it is recommended that the monthly average PM2.5 concentration should not exceed 5 μg/m³. This value is 5 μg/m³ less than the limit value determined in 2005 (World Health Organization, 2022). While it is stated that the EU member states limit value should not exceed 25 μg/m³, no limit value is specified for PM2.5 concentration in the "Air Quality Assessment and Management Regulation" published by the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of the Republic of Turkey (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2022b).

When the values are examined, it is seen that the average PM2.5 values in all months of the year are above the limit value that has not been determined by the World Health Organization. When EU member states are examined in terms of limit value, it is seen that it is below the limit value in all months. The month with the highest monthly average PM2.5 concentration is March with 53.88 μg/m³. During this month, depending on seasonal conditions, air temperatures are low and evaporation is reduced. In this case, it is due to the presence of more polluting particles in the atmosphere. The month with the lowest monthly average PM2.5 concentration is July with 17.08 μg/m³. Air temperatures increase in summer. The amount of moisture in the overheated air increases and the evaporated water creates precipitation. In this way, pollutant gases in the atmosphere are dissolved and their amount decreases.

When considering the map, it is observed that pollution, especially around the Nilüfer station, has increased. Particularly, values recorded from the Nilüfer station in January, March, and December exceed 50 µg/m³. In May, the highest concentration amount was recorded at Nilüfer station compared to other stations. In this month, the value was recorded as 17.63 µg/m³ at Bursa station, 17.92 µg/m³ at Kültürpark station, 13.43 µg/m³ at Uludağ University and 32.02 µg/m³ at Nilüfer station. There are various industrial establishments in Bursa's Nilüfer district. One of these is the automotive industry. Automotive parts are produced in many regions of Bursa. Processes such as paint, varnish and solvent are carried out in these facilities during production. During these processes, polluting gases and particles are dispersed into the atmosphere. There are also facilities that produce chemicals and various food products. These facilities also cause an increase in pollutants such as chlorine, acids, solvents, dust and smoke. The PM2.5 value taken from the air quality station at Uludağ University is lower than the values recorded at the other station. Given that the station is located at high altitude, it is a major factor in the dispersion of pollutant particles in the atmosphere.

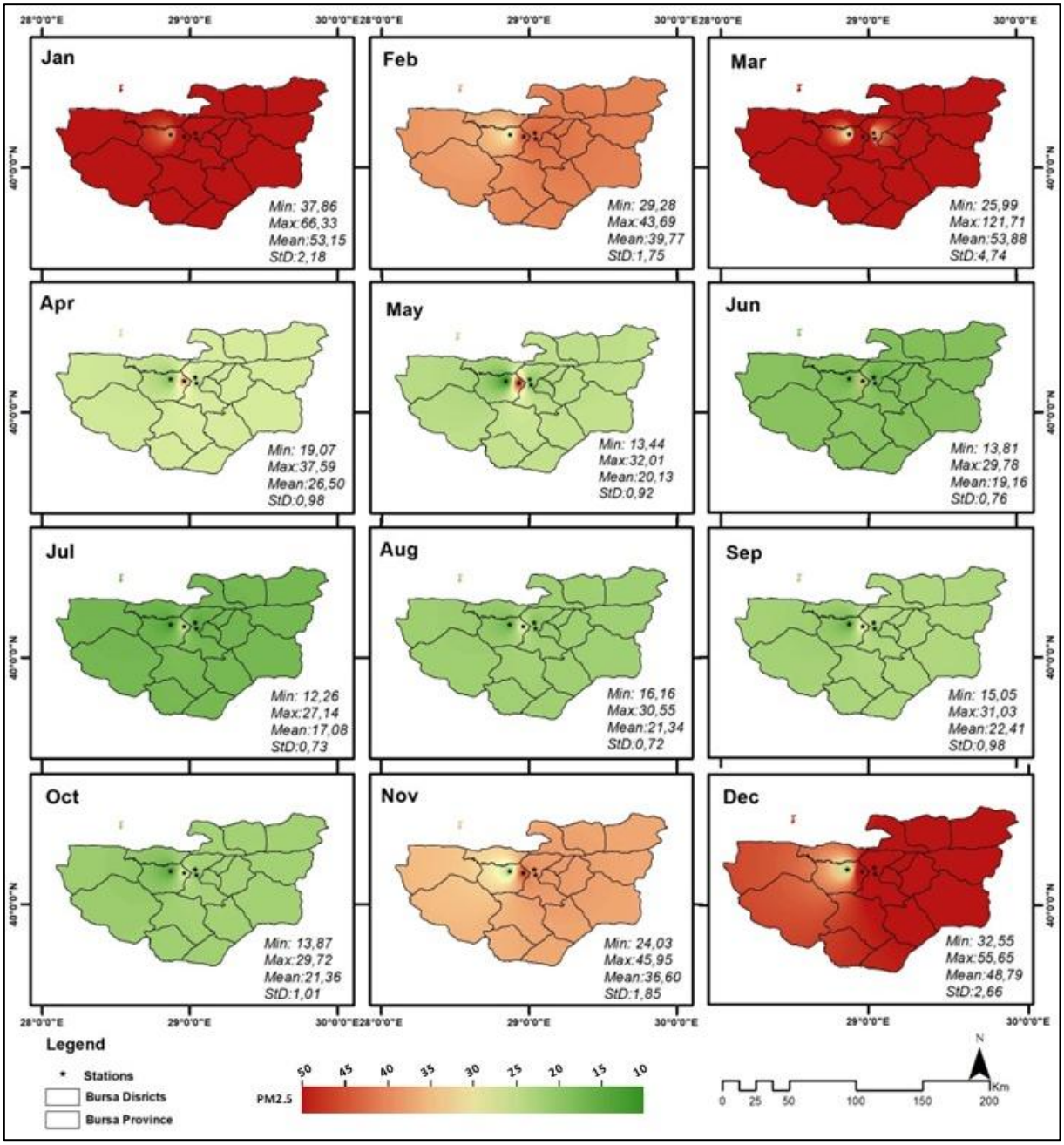


Figure 4: Spatial-temporal distribution of PM2.5 air pollutant concentrations in 2022

Figure 5 shows the temporal and spatial situation of SO2 air pollutant for 2022. A total of 7 stations were used for this pollutant. The names of these stations are Nilüfer, Bursa, Beyazıt Cad.-MTHM, Kestel-MTHM, İnegöl, KültürPark, Uludağ University. The national and EU member states limit value for SO2 in Turkey is 125 µg/m³ on an hourly average.

This value should not be more than 35 times in 1 year (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2022b). According to WHO, this limit is determined as 40 µg/m³ (World Health Organization, 2022). According to the three legislations, it is possible to say that SO2 is below the specified limit and air quality is good in all months. However, when the maps are examined, it is seen that the SO2 concentration at Kestel station increased in January, February, March and April compared to the others. The observation of an increase, especially in the months corresponding to the winter season, may be associated with the fact that pollutants tend to remain in the atmosphere for longer periods of time in cold weather conditions. Kestel district, close to Bursa city center, is a region with industrial facilities, traffic density and high population. There are various industrial enterprises in this district, such as coal, cement and iron-steel. It is known that similar industrial facilities are also located in İnegöl. These facilities release polluting gases such as SO2, NOx and dust during their production processes. Considering all months, the concentration at İnegöl station is approximately 46% higher than the average value of other stations. Traffic density in İnegöl district has increased even more in recent years. Because highway and railway connections pass through this region.

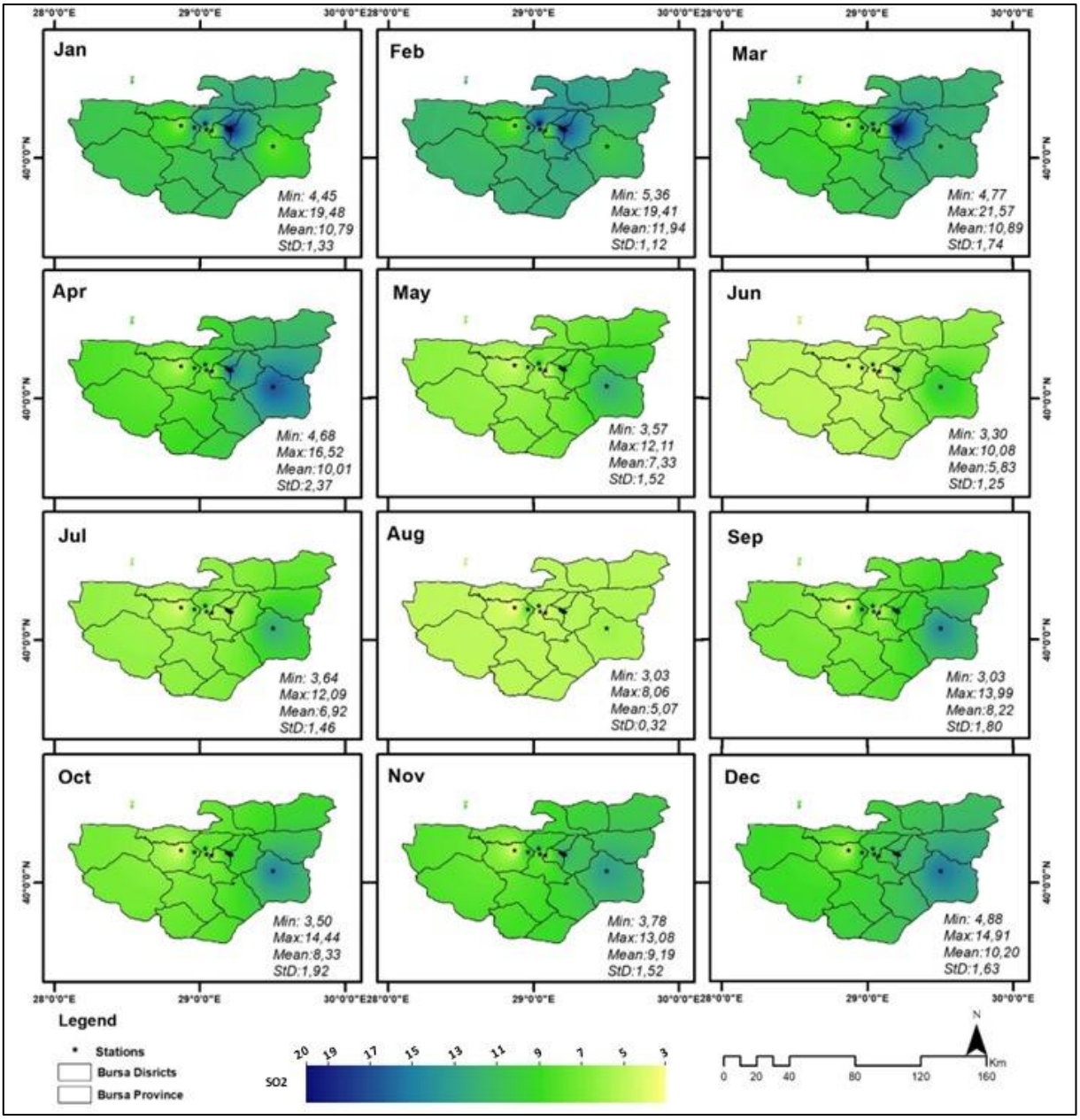


Figure 5: Spatial-temporal distribution of SO2 air pollutant concentrations in 2022

Figure 6 shows the temporal and spatial situation of NO2 air pollutant for 2022. For this polluting gas; Beyazıt Cad.-MTHM, Kestel-MTHM, İnegöl, KültürPark, Uludağ University stations were used. In national legislation in Turkey and in EU member states, the limit value for NO2 concentration is 40 µg/m³ on a daily average (Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, 2022b). According to WHO, this value is 25 µg/m³ (World Health Organization, 2021).

According to the average NO2 values, the limit value determined by WHO exceeded except for July and August. Months exceeding the limit value in national legislation and EU member states are January, February, November and December. NO2 concentration is high in Beyazıt Cad.-MTHM, KültürPark and İnegöl stations.

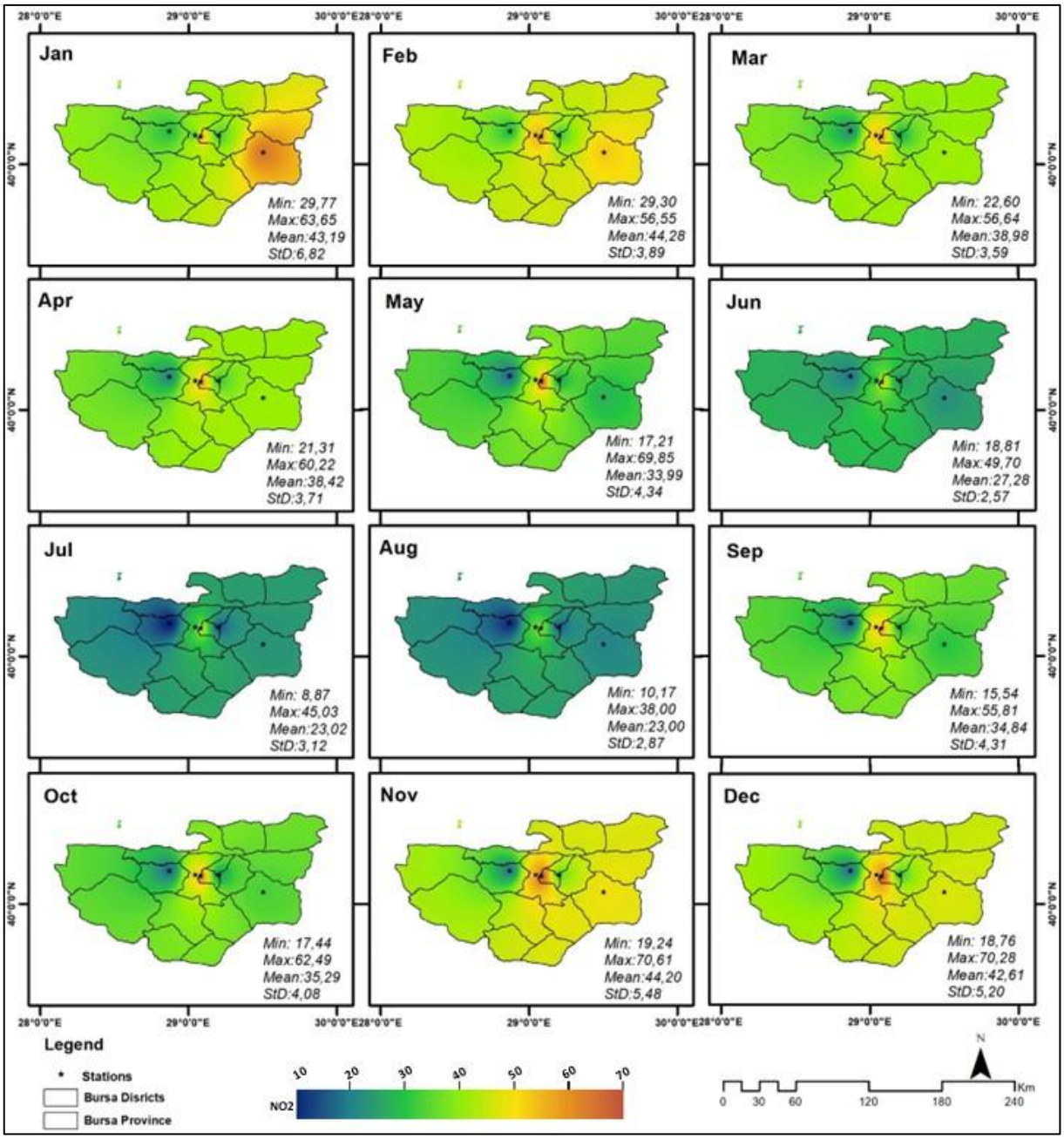


Figure 6: Spatial-temporal distribution of NO2 air pollutant concentrations in 2022

In order to determine seasonal average values, months are grouped according to seasons. All months are divided into seasons: summer (June, July, August), autumn (September, October, November), winter (December, January, February) and spring (March, April, May). For all gases examined, it was observed that a slight increase occurred in the autumn and winter seasons, while it remained at lower values in the spring and summer seasons. The main reason for this is that rainfall due to extreme temperatures in the summer reduces the amount of pollutants. The opposite is true for the winter season. Furthermore, the city's location near Uludağ's base keeps gas concentrations from spreading.

In Figure 7, a box plot illustrates the status of air quality stations and pollutant levels. When evaluating the graph for PM10, the average concentration is observed to be 62.84 μg/m³ for Nilüfer station, 47.60 μg/m³ for Bursa station, 48.50 μg/m³ for Beyazıt Cad.-MTHM station, 60.15 μg/m³ for Kestel-MTHM station, and 65.92 μg/m³ for İnegöl station. According to these data, İnegöl station has the highest PM10 concentration. The maximum recorded PM10 level at İnegöl station is 119.93 μg/m³ in January, while the minimum is in August at 33.19 μg/m³.

For the PM2.5 pollutant, data from four stations were used. The highest PM2.5 concentration is observed in the Nilüfer region, while the lowest is recorded in the Uludağ University region. In March 2022, the PM2.5 value reached 121.78 µg/m³, exceeding legal limits. The SO2 concentration has not exceeded legal limits at any station. The station with the maximum SO2 concentration is Kestel-MTHM, recorded at 21.57 µg/m³ in March. The station with the highest observed NO2 concentration is Beyazıt Cad.-MTHM, while the lowest is Uludağ University.

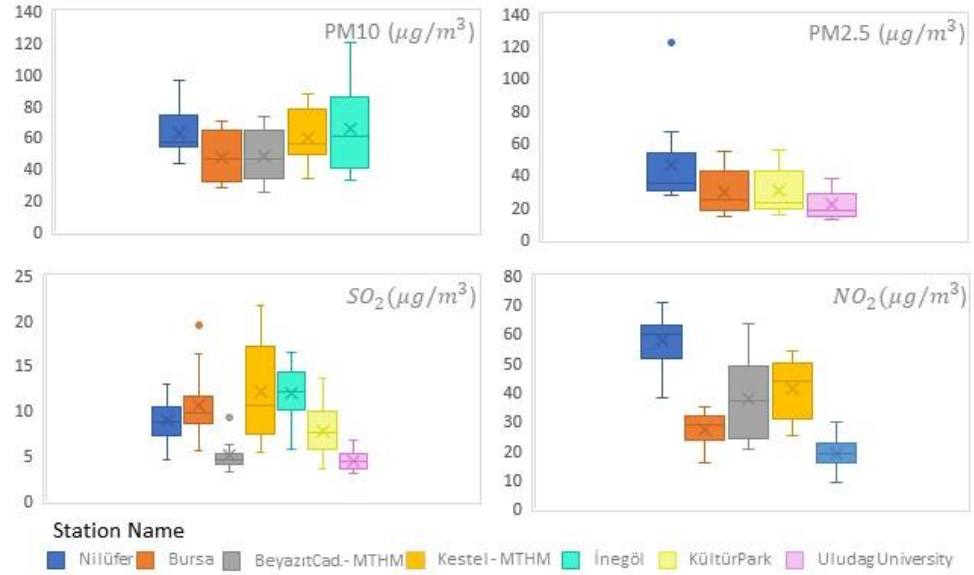


Figure 7: Air quality stations and pollutants quantities

4. Discussion

Better understanding air pollution in daily life is important for human health and ensuring a sustainable environment. For this, it is important to express the air pollution level in numbers, considering the density and exposure times of various pollutants from different sources. In this study, the amount of pollutants in Bursa was examined according to the national, EU member and WHO legal limits specified in Table 2.

Table 2: Limit values of some pollutants specified in the legislation

Air Quality Standards (24 h Average)	**PM10 µg/m³**	**PM2.5 µg/m³**	**SO2 µg/m³**	**NO2 µg/m³**
National legal limit value	70	-	125	25
EU member states limit	50	25	125	25
According to World health organization report	15	5	40	40

It has been determined that the districts of Nilüfer, Osmangazi, Yıldırım and Nilüfer are close to industrial areas and the population density is high. It has been determined that environmental problems are observed in these districts due to industry and population. In particular, it has been observed that air quality is above national limits. The presence of quarries close to the Kestel region also affects the measured values.

The following results have been observed in the study.

- It has been determined that during the summer season, the concentrations of air pollutants are lower compared to the winter season. November, December, and January are the coldest months in the city, experiencing winter conditions, with maximum levels of PM10, PM2.5, NO2, and SO2 gases leading to a greater increase in air pollution during these periods.
- Bursa, being a city with low temperatures during the winter season, causes the atmospheric pollutants to linger in the air for a longer duration. This situation has become a contributing factor to increased air pollution throughout the city.
- Pollutants were evaluated according to national air quality legislation, World Health Organization reports, and EU member states' limit values. While SO2 gas does not exceed the limit set by all three regulations, PM10, PM2.5, and NO2 gases have exceeded legal limit values in some months.

- Considering the spatial distribution of pollutant concentrations, an increase in pollution levels was observed, especially in the intersection areas of industrial zones and transportation routes.

Bugdayci et al. (2023), Suthar et al. (2024), Gokul et al. (2023) found similar results in their study. They determined that there was an increase in pollutant gas levels in months when the temperature dropped, such as October, November, December and January. Demirarslan and Akıncı (2016a) conducted a study in the Eastern Black Sea region and obtained similar results. Using the IDW technique, they analyzed the pollution levels in the region and found that the fuels used for heating during the winter months significantly increased PM10 concentrations. In another study by Demirarslan and Akıncı (2016b) the SO_2 levels were monitored, and it was highlighted that traffic and industrial activities were among the factors contributing to the increase in pollutant concentrations.

Another interpretation derived from this study is related to the location of the city. The polluted air coming from Istanbul is carried to the city. Makineci (2022) and Yağmur (2022) examined the air quality in the Istanbul region. Considering the values, air pollution in Istanbul is higher than in Bursa. Therefore, the polluted air coming from Istanbul further increases the air pollution level in Bursa. Cities such as Bursa and Istanbul are cities with a high level of industrialization. These factors cause air pollution to increase.

5. Conclusions

This study investigated the spatial-temporal variations of PM10, PM2.5, SO2, NO2, air pollutants recorded from 7 NAQS (National Air Quality Stations) throughout Bursa during the year 2022. The analysis reveals that the İnegöl station recorded the highest levels of PM10 pollution, with an average concentration of 65.92 μg/m³. The peak concentration of PM10 was observed in January, reaching 119.93 μg/m³. In contrast, the Nilüfer station exhibited the highest PM2.5 concentration, with a notable value of 121.78 μg/m³ recorded in March 2022. This concentration exceeded the legal limits set by both the European Union and the World Health Organization. Consequently, while İnegöl station experienced the highest PM10 pollution levels, Nilüfer station recorded the most significant PM2.5 pollution, surpassing critical health thresholds. Regarding other pollutants, no station exceeded the legal limits for SO2 concentrations. For NO2 concentrations, the Beyazıt Cad.-MTHM station recorded the highest value, while the lowest concentration was observed at the Uludağ University station.

The data obtained from the study help us understand the distribution and change over time of air pollutants in Bursa and cities in developing countries. This information can be used to develop more effective air quality policies. Considering findings, various measures can be taken to reduce the amount of polluting air in the city. For example; In order to make the automotive, textile, metal and machinery manufacturing industries in the city environmentally friendly, measures such as adopting more sustainable production methods, effective implementation of waste management and supporting investments to increase energy efficiency can be taken. The use of public transportation should be encouraged, the types of fuel used for domestic heating should be changed and the system should be switched to systems that consume less fuel. Afforestation efforts should be carried out in urban areas to ensure ecological balance. Most importantly, individuals should be made aware of air pollution and environmental protection.

References

Albayrak, B. (2023). *Türkiye'de zeytin üretiminin kümeleme yöntemi ile analizi* [Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Altıkat, A., Torun, F. E., & Bayram, T. T. (2011). Küresel kirlilik: Dünya, Avrupa Birliği ve Türkiye'de hava kirliliği örneği. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 27*(2), 134–149.

Arikan, D., & Yildiz, F. (2023). Investigation of Antalya forest fire's impact on air quality by satellite images using Google earth engine. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *29*, Article 100922. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100922

Arıkan, D., Yıldız, F., & Makineci, H. B. (2021). Hava lidari verilerine uygulanan farklı enterpolasyon yöntemlerinin SAM doğruluğuna etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences, 9*(2), 377–394. https://doi.org/10.36306/konjes.850250

Aydinoğlu, A. Ç., Bovkir, R., & Bulut, M. (2022). Akıllı şehirlerde büyük coğrafi veri yönetimi ve analizi: hava kalitesi örneği. *Geomatik, 7*(3), 174–186. https://doi.org/10.29128/geomatik.938855

Bayrı, F. (2023). Ankara Şehrinde Hava Kirlenmesi. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, *63*(1964), 64–74.

Bozdağ, A., Dokuz, Y., & Gökçek, Ö. B. (2020). Spatial prediction of PM10 concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey. *Environmental Pollution, 263*, Article 114635. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114635

Bugdayci, I., Ugurlu, O., & Kunt, F. (2023). Spatial analysis of SO2, PM10, CO, NO2, and O3 pollutants: the case of Konya province, Turkey. *Atmosphere, 14*(3), Article 462. https://doi.org/10.3390/atmos14030462

Chang, F. J., Chang, L. C., Kang, C. C., Wang, Y. S., & Huang, A. (2020). Explore spatio-temporal PM2. 5 features in northern Taiwan using machine learning techniques. *Science of the Total Environment, 736*, Article 139656. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139656

Demirarslan, K., & Akıncı, H. (2016a). Doğu Karadeniz Bölgesindeki partikül madde dağılımlarının coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2*(1), 30–45.

Demirarslan, K. O., & Akıncı, H. (2016b). Doğu Karadeniz Bölgesinde kükürtdioksit (SO2) dağılımlarının coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 2*(2), 81–99.

El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2015). *What is machine learning?*. Springer.

Erickson, L. E., Newmark, G. L., Higgins, M. J., & Wang, Z. (2020). Nitrogen oxides and ozone in urban air: A review of 50 plus years of progress. *Environmental Progress & Sustainable Energy, 39*(6), Article e13484. https://doi.org/10.1002/ep.13484

Gokul, P., Mathew, A., Bhosale, A., & Nair, A. T. (2023). Spatio-temporal air quality analysis and PM2. 5 prediction over Hyderabad City, India using artificial intelligence techniques. *Ecological Informatics, 76*, Article 102067. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102067

Goyal, P., & Kumar, A. (2011). Mathematical modeling of air pollutants: an application to Indian urban city. In D. Popovic (Ed.), *Air Quality-Models and Applications* (pp. 101–130). InTech. https://doi.org/10.5772/16840

Görener, Ö., & Görener, A. (2008). Otomotiv Endüstrisinin Türkiye Ekonomisindeki Yeri: Sektörel Bir İnceleme. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 7*(26), 306–319.

Hashim, M., Kanniah, K., Ahmad, A., Rasib, A., & Ibrahim, A. (2004). The use of AVHRR data to determine the concentration of visible and invisible tropospheric pollutants originating from a 1997 forest fire in Southeast Asia. *International journal of remote sensing, 25*(21), 4781–4794.

Jumaah, H. J., Ameen, M. H., Kalantar, B., Rizeei, H. M., & Jumaah, S. J. (2019). Air quality index prediction using IDW geostatistical technique and OLS-based GIS technique in Kuala Lumpur, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 10*(1), 2185–2199.

Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution, 151*(2), 362–367.

Khan, J., Kakosimos, K., Raaschou-Nielsen, O., Brandt, J., Jensen, S. S., Ellermann, T., & Ketzel, M. (2019). Development and performance evaluation of new AirGIS–a GIS based air pollution and human exposure modelling system. *Atmospheric Environment, 198*, 102–121. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.036

Kırbıyık, B. (2023). *Antalya ili hava kalitesinin değerlendirilmesi ve 2021 yılı orman yangınlarının etkisinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kumar, A., Dhakhwa, S., & Dikshit, A. K. (2022). Comparative evaluation of fitness of interpolation techniques of ArcGIS using leave-one-out scheme for air quality mapping. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 6*(1), Article 9. https://doi.org/10.1007/s41651-022-00102-4.

Makineci, H. B. (2022). İstanbul İli Merkez İlçelerindeki NO2 ve CO Emisyonlarının Uzaktan Algılama ve Yersel İstasyon Verileri Kullanılarak İncelenmesi. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 4*(2), 62–74. https://doi.org/10.51489/tuzal.1160333

Masroor, K., Fanaei, F., Yousefi, S., Raeesi, M., Abbaslou, H., Shahsavani, A., & Hadei, M. (2020). Spatial modelling of PM2. 5 concentrations in Tehran using Kriging and inverse distance weighting (IDW) methods. *Journal of Air Pollution and Health, 5*(2), 89–96.

Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2022a). *Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change National Air Quality Monitoring Network (NAQMN)*. 20 Haziran 2024'de https://www.havaizleme.gov.tr/ adresinden alındı.

Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2022b). *Air Quality Bulletin September 2023 Report*. 10 Kasım 2023'de https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/eylul-2023_bulten-raporu-20231110091236.pdf adresinden alındı.

Roy, A. (2021). Atmospheric pollution retrieval using path radiance derived from remote sensing data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 5*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s41651-021-00093-8

Samal, K. K. R. S., Babu, K. S., & Das, S. K. (2023). Spatial-temporal prediction of air quality by deep learning and kriging interpolation approach. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems, 10*(5). https://doi.org/10.4108/eetsis.3325

Shepard, D. (1968, August 27 - 29). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data* [Conference presentation]. 23rd ACM national conference, New York, United States.

Sungur, O., & Yaman, H. (2021). Bölgesel çeşitlilik mi uzmanlaşma mı? İllerin İmalat sanayinde çeşitlilik/uzmanlaşma düzeylerine göre sıralanması. *İdealkent, 12*(32), 76–94.

Suthar, G., Singhal, R. P., Khandelwal, S., Kaul, N., Parmar, V., & Singh, A. P. (2024). Annual and seasonal assessment of spatiotemporal variation in PM2. 5 and gaseous air pollutants in Bengaluru, India. *Environment, Development and Sustainability*, *26*, 20629–20652.

Şahin, O., & Kubilay, K. (2023). Bitlis İli, Güroymak ilçesi, Gölbaşı Beldesindeki Anadolu Mandası İşletmelerinde Barınak İçi Karbondioksit (CO2) Emisyonu Üzerine Barınak Hacmi ve Sürü Büyüklüğünün Etkisi. *Palandöken Journal of Animal Sciences Technology and Economics, 2*(2), 44–52. https://doi.org/10.5152/JASE.2023.1224595

Temel, K. (2023). *Yeni sınıf hareketleri ve mekânsal etkileri: Bursa örneği.* [Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Turkish Statistical Institute. (2022). Turkish Statistical Institute (TSI). 16 Aralık 2022'de https://www.tuik.gov.tr/ adresinden alındı

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2. 5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*: World Health Organization.

World Health Organization. (2022). World Health Organization. 20 Aralık 2024'de https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 adresinden alındı.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (1995). Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 34*(12), 2577–2586.

Yağmur, E. Ç. (2022). Atmosferik partikül maddelerin makine öğrenmesi ile tahmini: Beşiktaş, İstanbul Örneği. *Konya Journal of Engineering Sciences, 10*(4), 807–826. https://doi.org/10.36306/konjes.1082866

Yener, İ., & Demirarslan, K. O. (2022). Determining the factors affecting air quality in marmara, turkey, and assessing it using air quality indices. *Journal of Natural Hazards and Environment, 8*(2), 383–395. https://doi.org/10.21324/dacd.1081167

Zencirci, S. A., & Işıklı, B. (2017). Hava kirliliği. *ESTÜDAM Halk Sağlığı Dergisi, 2*(2), 24–36.

Zhou, F., Wang, Y., Liu, J., Yang, X., Hu, Z., Guo, T., Han, Y. (2023). Influence of ship emission control area policy on air quality at Shanghai Port—local and regional perspectives. *Ecological indicators, 155*, 110951. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110951

Zhou, Y., Chang, F. J., Chang, L. C., Kao, I. F., & Wang, Y. S. (2019). Explore a deep learning multi-output neural network for regional multi-step-ahead air quality forecasts. *Journal of cleaner production, 209*, 134–145. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.243

Zhou, Z. H. (2021). *Machine learning.* Springer Nature.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 194–205, DOI: 10.21324/dacd.1559696

Hydrometeorological Disasters in the Context of the Climate Crisis: A Regional Disaster Inventory Study in Türkiye

Mustafa Kemal Yaşar[1], Mahnaz Gümrükçüoğlu Yiğit[1,*]

[1]*Sakarya University, Department of Environmental Engineering, Serdivan, 54050, Sakarya, Türkiye.*

Abstract

The rapid growth of the global population, irregular urbanization and industrialization, present challenges to the sustainability of life and the world is currently facing an increasing prevalence of both natural and anthropogenic disasters. Climate change further exacerbates this situation by contributing to the rising frequency and intensity of hydrometeorological events. To effectively minimize the negative impacts of disasters, knowing assessing and analyzingtheir frequency, intensity, and consequences is essential. This necessitates the development of comprehensive disaster inventories. Such studies involve collecting and analyzing critical data to identify and manage potential disaster risks within specific regions. In this present study evaluates the long-term diversity of hydrometeorological disasters in the Sakarya, Kocaeli, and Istanbul provinces, situated in the Çatalca-Kocaeli section in the Marmara Region of Turkey. The study utilizes data from the General Directorate of Meteorology to analyze hydrometeorological disasters occurring from 1975 to 2020 across these provinces, with a focus on diversity, frequency, damages, and fatalities, evaluated on both an annual and seasonal basis. Damages are classified as light, moderate, or severe. This inventory is designed to offer valuable insights for researchers and policymakers aimed at mitigating loss of life and property damage. Additionally, it encompasses recommendations for disaster risk reduction strategies.

Keywords

Hydrometeorological Disaster, Disaster Inventory, Sakarya, Kocaeli, Istanbul, Loss of Life and Property

İklim Krizinde Hidrometeorolojik Afetler: Türkiye'de Bölgesel Bir Afet Envanter Çalışması

Özet

Küresel olarak, dünya şu anda doğal ve insan kaynaklı artan afetler ile karşı karşıyadır. İklim değişikliği de, hidrometeorolojik afetlerin sıklığı ve yoğunluğunun arttırarak bu durumu daha da kötüleştirmektedir. Afetlerin olumsuz etkilerini en aza indirmek için; bunların sıklığını, yoğunluğunu ve sonuçlarını bilmek, değerlendirmek ve analiz etmek esastır. Bu da afet envanterlerinin geliştirilmesini gerektirir ki bu tür çalışmalar, bölgesel olarak potansiyel afet risklerini tanımlamayı ve yönetmeyi amaçlayan kritik verilerin toplanmasını ve analitik olarak değerlendirilmesini içerir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin Çatalca-Kocaeli bölümünde yer alan Sakarya, Kocaeli ve İstanbul illerindeki hidrometeorolojik afetlerin uzun vadeli çeşitliliği değerlendirilmiştir. Çalışmada; Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verileri kullanılarak 1975-2020 yılları arasında meydana gelen hidrometeorolojik afet çeşitliliği, oluş sıklığı, zarar durumu ve bu afetlerden kaynaklanan ölümler hem yıllık ve hem mevsimlik olarak değerlendirilmiş ve afet envanteri oluşturulmuştur. Ayrıca, afetlerin yarattığı hasar durumu hafif, orta ve ağır hasar olarak sınıflandırılarak incelenmiştir. Bu envanter çalışması, yirmi milyondan fazla nüfusun yaşadığı bölgede; can kaybı, mal hasarı ve zarar görebilirliği en aza indirmeyi amaçlayan yönetim, planlama ve uygulama önlemleri açısından araştırmacılar ve yöneticiler için stratejik bilgiler sunmayı amaçlamaktadır. Son olarak da, bölgesel bir perspektiften afet riskinin azaltılması için alınması gereken temel önlemlere ilişkin tavsiyelerde sunulmaktadır.

Anahtar Sözcükler

Hidrometeorolojik Afetler, Afet Envanteri, Sakarya, Kocaeli, İstanbul, Can-Mal Kaybı

1. Introduction

The swift escalation of the global population, coupled with accelerated urbanization, industrialization, and inadequate land management practices, is contributing to increasingly complex environmental challenges, as well as a rise in natural disasters and the attendant loss of life and property. The threats and risks associated with hydrometeorological disasters are increasing due to both inadequate planning strategies and the impacts of the climate crisis (Avcı & Ünsal, 2023).

Hydrometeorological disasters are natural events precipitated by water and atmospheric phenomena. These disasters generally result from the interplay between atmospheric and hydrological systems, significantly affecting human life, natural resources, and infrastructure.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (264) 2955637 Faks: 0 (264) 2955031
e-posta: mustafakemalyasar41@gmail.com (Yaşar M.K.)
mahnaz@sakaya.edu.tr (Gümrükçüoğlu Yiğit M.)

Gönderim Tarihi / Received : 01/10/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 17/01/2025

Hydrometeorological disasters associated with atmospheric phenomena such as precipitation, temperature fluctuations, and pressure variations—encompass a range of events including droughts, heatwaves, wildfires, cold waves, tornadoes, hailstorms, lightning, hurricanes, tempests, floods, snow storm, heavy snowfall, and fog. The ramifications of climate change are intensifying the occurrence, severity, and duration of hydrometeorological events by altering temperature and water cycles (Kadıoğlu, 2011a). For instance, relief and lithological characteristics, when combined with adverse climatic conditions, result in intensive landslide occurrences, subsequently amplifying flood-related damages (Avcı, 2023).

Between 2000 and 2006, there was a 187% surge in disaster occurrences globally compared to the period from 1987 to 1998 (Hoyois et al., 2007). From 1998 to 2017, a striking 91% of nature-based disasters worldwide were attributable to climate-related factors, with floods being the most prevalent type, accounting for 43% of incidents, followed by storm-related disasters at 28%. Additionally, between 2010 and 2020, approximately 1.7 billion individuals were impacted by climate and weather-related disasters (Aygün, 2020).

The Mediterranean Basin, which encompasses Türkiye, is among the most susceptible regions globally to the effects of climate change. The country, characterized by diverse climate zones, experiences a variety of severe hydrometeorological events that culminate in disasters (Kadıoğlu, 2011b). A projected increase in temperature of 2°C is anticipated to elevate both the frequency and severity of disasters in Turkey, including heatwaves, wildfires, droughts, and floods. Since the early 2000s, there has been a notable rise in the incidence of hydrometeorological disasters, with storms, floods, hail, frost, snow, and drought resulting in both loss of life and significant economic impact (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2016). For example, in 2017, approximately 60% of individuals affected by disasters were impacted by floods, while storms accounted for 85% of the economic damages (The International Disaster Database, 2020), (Figure 1). Looking ahead, it is expected that there will be a marked increase in extreme rainfall events, daily maximum precipitation, rainfall intensity, flood occurrences, drought duration, and the frequency of storms (Demircan et al., 2017).

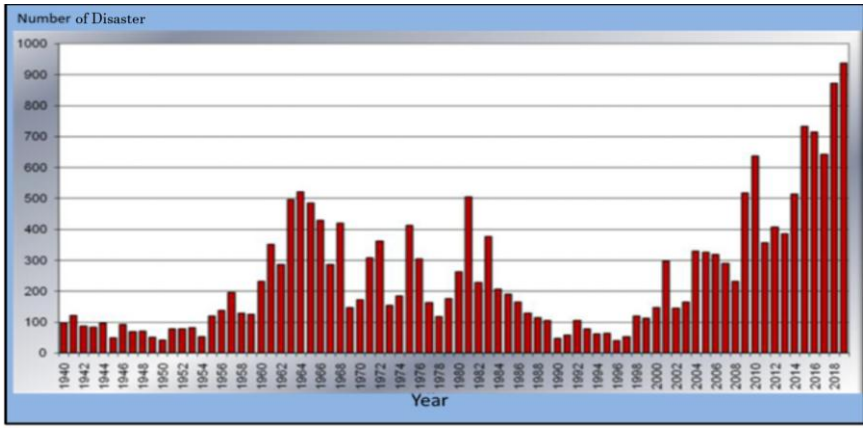


Figure 1: Meteorological disasters observed in Turkey during the period 1940-2019 (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2016)

In light of the rising frequency and magnitude of disasters, it is imperative to analyze historical events and develop future projections to enhance both regional and sectoral strategic planning, as well as to implement necessary preventive measures. This context highlights the critical need to comprehend disaster histories and identify emerging trends. Disaster Inventory Studies, undertaken to facilitate this understanding, serve as valuable instruments for assessing the spatial and temporal distribution of disasters and for evaluating global disaster forecasting models. These studies, which examine the diverse range of disasters, are essential for mitigating the effects of both natural and anthropogenic disasters on a global scale, ensuring the establishment of safe living conditions, and equipping communities to respond effectively to such challenges.

Numerous studies have examined the assessment of disaster diversity and the compilation of disaster inventories. A significant portion of the scientific research conducted in this area consists of inventory studies that facilitate post-disaster management planning and logistical considerations (Ozguven & Ozbay, 2011). One noteworthy study by Yadavalli et al. (2015) proposed and analyzed a disaster inventory model focused on essential materials and supplies required in the aftermath of a disaster. Another research endeavor aimed to enhance existing databases by creating a comprehensive digitized global flood inventory covering the period from 1998 to 2008 (Adhikari et al., 2010). Ekinci et al. (2020) conducted a temporal and spatial analysis of various natural disasters, including landslides, avalanches, rockfalls, and floods within the boundaries of Bitlis province. Based on the damages incurred, risk values were assessed, and a risk classification was established. Additionally, research has been conducted on data repositories that systematically organize and store information related to disasters. One such study examined databases that regularly and methodically maintain information about disasters both domestically and globally (Duman & Gökgöz, 2018). Furthermore, in the development of the Australian Natural Disaster Resilience Index, a design was implemented based on the common characteristics of resilience assessment. This study employed a top-down approach utilizing indicators derived from national-level secondary data (Parsons et al., 2016).

In another study, the flood disaster that occurred in Kastamonu-Bozkurt in 2021 was analyzed based on the morphometric parameters of the basin. The analysis results indicate that urban areas within the river basin affected by floods have doubled over the past thirty years (Avcı & Ünsal, 2023). Özdemir and Özkaynak Yolcu (2024) conducted a study aimed at enhancing the flood resilience of residential areas and mitigating the impacts of potential disasters. In a study conducted by Kundzewicz et al. (2013), the relationship between hydrometeorological disasters and climate change was examined at both global and regional levels. In other study examining management strategies in natural disasters, the concept of risk reduction in disaster management and risk reduction efforts at both national and international levels are explained. After addressing disaster management and its importance, the concept of risk reduction in disaster management and related efforts at national and international levels are elaborated (Tümer, 2024).

This study evaluates the meteorological disasters that transpired in Istanbul, Kocaeli, and Sakarya three of Turkey's most populous provinces between 1975 and 2020, culminating in the creation of a comprehensive disaster inventory. Together, these provinces account for approximately one-quarter of Turkey's population, which exceeds 85 million individuals. The geographical alignment of these three provinces along an east-west axis contributes to their similar weather and climate conditions. Given the region's physical and demographic characteristics, coupled with the size of the exposed population, the impact values associated with disasters in this area are markedly substantial. Recognizing the well-developed industrial and agricultural sectors, alongside the dense population, underscores the importance of understanding historical disaster events and implementing preventative measures against potential future incidents. In light of these considerations, this study meticulously examines the disasters that have occurred in these provinces and compiles a disaster information inventory. The findings detail the types, frequency, magnitude, and damage status of hydrometeorological disasters in the region, accompanied by recommendations for measures aimed at mitigating potential damages. Disasters have been systematically analyzed on an annual and seasonal basis over ten-year intervals. The assessment includes data on damage and fatalities associated with these disasters, along with their respective locations and dates. The objective of this study is to establish a comprehensive reference source concerning disasters in the three provinces, to underscore the impact of these events, to foster the development of a disaster-aware society, and to offer a valuable resource for decision-makers, practitioners, and researchers in the field.

2. Material And Method

2.1 Study Area

Figure 2 present the Çatalca-Kocaeli region constitutes a significant geographic area that encompasses Istanbul, the most populous city in Turkey, along with the provinces of Kocaeli and Sakarya (41°N 29°E). The region stretches from Istanbul's Çatalca Peninsula in the west to the Sakarya River in the east. It is bordered by the Black Sea to the north and the Sea of Marmara to the south. This geographical region includes the entirety of Istanbul, all of Kocaeli, and a significant portion of Sakarya. Among the most notable geographical features of the region are the Çatalca Peninsula, the Kocaeli Plateau, and the Sakarya Plain (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). The region is one of Turkey's most economically developed and densely populated areas. The commercial and cultural richness of Istanbul, the strong industrial base of Kocaeli, and the agricultural-industrial integration of Sakarya enhance the economic diversity and importance of the region. Spanning along the Black Sea and Marmara coasts, this region also holds strategic significance due to its position at the intersection of major transportation networks (Doğanay & Orhan, 2019; Atalay, 2011).

The climate of the Çatalca-Kocaeli section generally exhibits transitional characteristics between the Black Sea and Mediterranean climates. Due to its location and geographical structure, the region has developed a unique climatic character. Summers are mild and moderately humid, with average temperatures ranging between 22-25°C, and the heat is not excessively oppressive. Winters are mild and rainy, with temperatures rarely dropping below 0°C. Although snowfall occurs, it does not remain on the ground for long periods. Precipitation is observed throughout the year, with the highest amounts recorded in autumn and winter. The annual average precipitation ranges between 600-800 mm. Humidity levels are generally high, which can create a stifling effect, particularly during the summer months. The moderating influence of the sea is evident in the coastal areas, while inland areas exhibit slightly more pronounced continental climate characteristics. In the southern parts closer to the Sea of Marmara, the effects of the Mediterranean climate are noticeable. Summers in these areas are hot and dry, while winters are mild and rainy. The amount of precipitation is lower compared to the Black Sea climate (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2016).

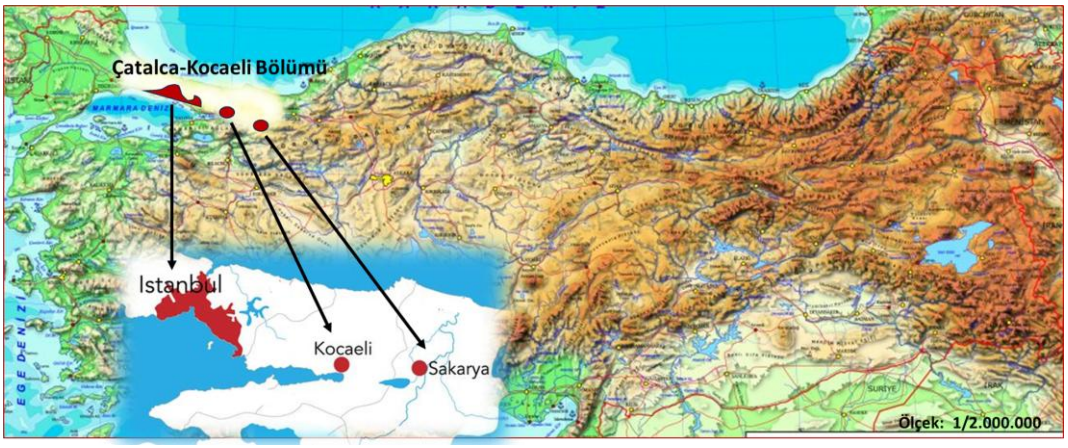


Figure 2: Location map of region and provinces in the study area

a) Sakarya: The province is an increasingly significant area in Turkey, boasting a population of 1,075,463. It is shaped by the climatic influences of the Marmara and Black Sea regions. Temperatures can fall below 0°C for approximately forty days each year, while they may exceed 30°C for up to thirty days. The region experiences an average annual precipitation of 840mm, distributed over roughly 130 rainy days. Of this precipitation, approximately 96% is consistent, whereas 4% is characterized by heavy downpours. The economy of the province is predominantly driven by industry and agriculture, with the agricultural sector employing 65% of the workforce, underscoring its national significance (İkiel, 2018).

b) Kocaeli: Kocaeli boasts a total population of 1,997,258 residents (Türkiye İstatistik Kurumu, 2022). The city has experienced significant development in various sectors, including industry, agriculture, fishing, animal husbandry, and tourism. Contributing 13% to the nation's industrial output, Kocaeli ranks as the second-largest industrial hub in Turkey, following Istanbul. Its climate features warm and dry summers, contrasted with rainy winters, and exhibits mild temperatures relative to the national average. The annual average temperature is recorded at 14.8°C, with total yearly precipitation surpassing 1000mm. The predominant wind direction is from the north and northeast. Industry constitutes 73% of Kocaeli's economic activities, and in 2019, the city achieved a ranking of fifth in the country based on gross domestic product. Notably, Kocaeli accounts for 5% of Turkey's total exports. The province is serviced by two major highways and an intercity road, in addition to a comprehensive railway network extending 312 km (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2022).

c) Istanbul: Istanbul, situated in the northwest of Turkey, serves as a crucial link between the continents of Europe and Asia. The city experiences a minimum temperature that can drop to -11°C and a maximum that can soar to 40°C, with an average relative humidity of 75% The climate features dry and hot summers, while winters are characterized by mild and rainy conditions. With a population of 15,655,924, Istanbul is the most populous city in Turkey. It leads the nation in industrial, commercial, financial, and tourism sectors and is ranked thirty-fourth globally in economic performance. The city contributes to 20% of Turkey's workforce and accounts for 50% of its exports. Istanbul is home to the largest enterprises in industries such as manufacturing, trade, transportation, and tourism. The city's infrastructure is enhanced by three bridges spanning the Bosphorus and a road tunnel beneath it, supplemented by a total railway line of 152 km (İstanbul Valiliği, 2022).

2.2 Method

In this study, official records pertaining to hydrometeorological disasters from the Çatalca Kocaeli Department of the General Directorate of Meteorology in the Marmara Region have been meticulously analyzed. The research encompasses data from the provinces of Istanbul, Kocaeli, and Sakarya over a span of forty-five years, specifically from 1975 to 2020. Consequently, the research adopts a quantitative approach. No sampling methodology was employed; instead, all available records from this period were thoroughly reviewed and incorporated into the study. The analysis includes the years in which hydrometeorological disasters occurred, their types, frequency, as well as the documented damages resulting from these disasters, including casualties (both fatalities and injuries). Furthermore, the study examines the temporal and seasonal distribution of these disasters, drawing from the extraordinary event reports issued by the General Directorate of Meteorology. The disasters were systematically categorized and analyzed according to the severity of damage incurred: minor, moderate, and severe. The types of disasters evaluated in the study include: Storm, heavy storm, drought, snow, snowstorm, heavy snowfall, tornado, rainfall, harmful rainfall without flooding, flood, lightning, hail, frost, fog, strong fog, landslide, flooding, heavy rainfall, fire, hoarfrost, and extreme cold. Data analysis was conducted using the SPSS 22.0 software program.

3. Findings and Discussion

An analysis of hydrometeorological disasters in Kocaeli, Sakarya, and Istanbul has been conducted, focusing on their occurrence by year and season. Figure 3 illustrates the distribution and percentages of meteorological disaster incidents specifically in Sakarya province. Within Sakarya, the recorded disaster events include 58 instances of flooding, 26 storms, 8 droughts, 14 snow events, 7 tornadoes, 30 rainfall occurrences, 3 lightning strikes, 25 hail events, 1 frost incident, 3 landslides, 28 heavy rainfall events, 1 fire, 1 instance of harmful rain that did not result in flooding, and 1 frost event. The aggregate total of such disasters amounts to 234, with flooding being identified as the predominant type of disaster.

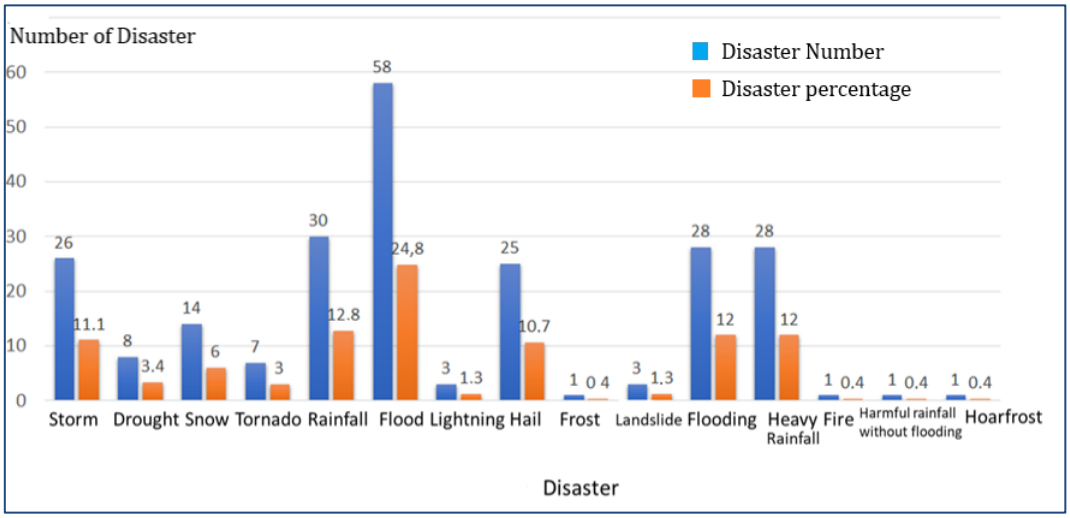


Figure 3: Distribution and percentages of the number of general meteorological disasters in Sakarya

Figure 4 presents the distribution and percentages of general hydrometeorological disaster occurrences in Kocaeli province. During the observed period, a total of 100 storms, 3 droughts, 15 snow events, 16 tornadoes, 47 rainfall incidents, 71 floods, 12 lightning strikes, 21 hail, 1 frost event, 5 instances of fog, 1 landslide, 26 occurrences of water inundation, 28 heavy rain events, and 1 fire were recorded. The cumulative total of documented disasters is 347, with storms being identified as the most prevalent disaster type.

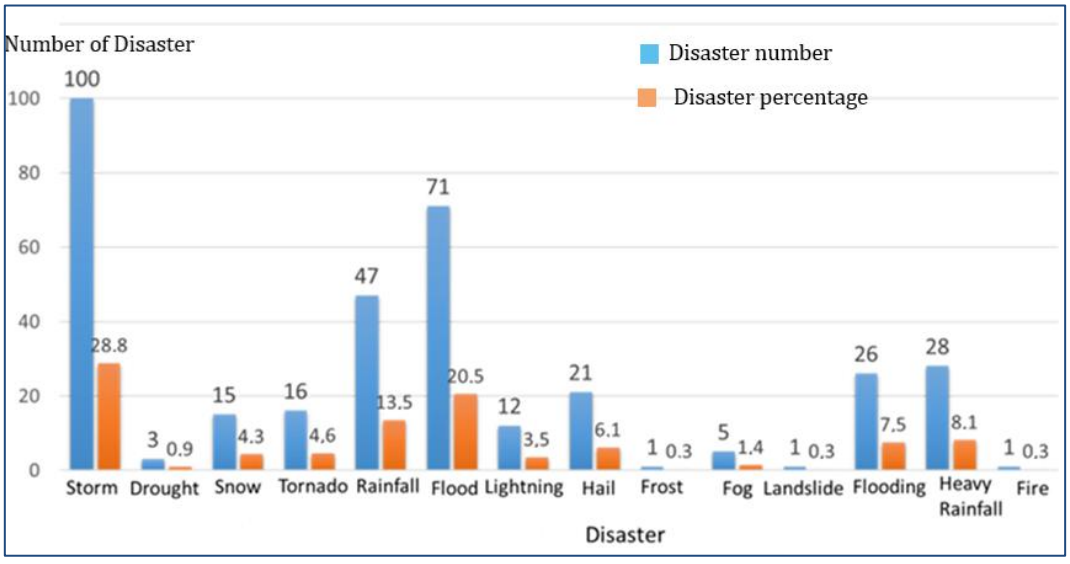


Figure 4: Distribution and percentages of the number of general meteorological disasters in Kocaeli

Figure 5 illustrates the distribution and percentages of general meteorological disasters in Istanbul from 1975 to 2020. During this period, Istanbul encountered a total of 125 storms, 40 snow events, 65 tornadoes, 48 rainfall incidents, 95 floods, 4 lightning strikes, 29 hail occurrences, 2 frosts, 14 fog events, 1 landslide, 49 instances of water inundation, 53 cases of heavy rainfall, 1 fire, 2 non-flooding rain events that caused damage, 5 severe cold spells, 2 occurrences of

continuous snowfall beyond typical levels, 2 full storms, 1 snowstorm, 1 instance of dense fog, and 1 frost. In total, 540 meteorological disasters were recorded, with storms representing the most frequent occurrence.

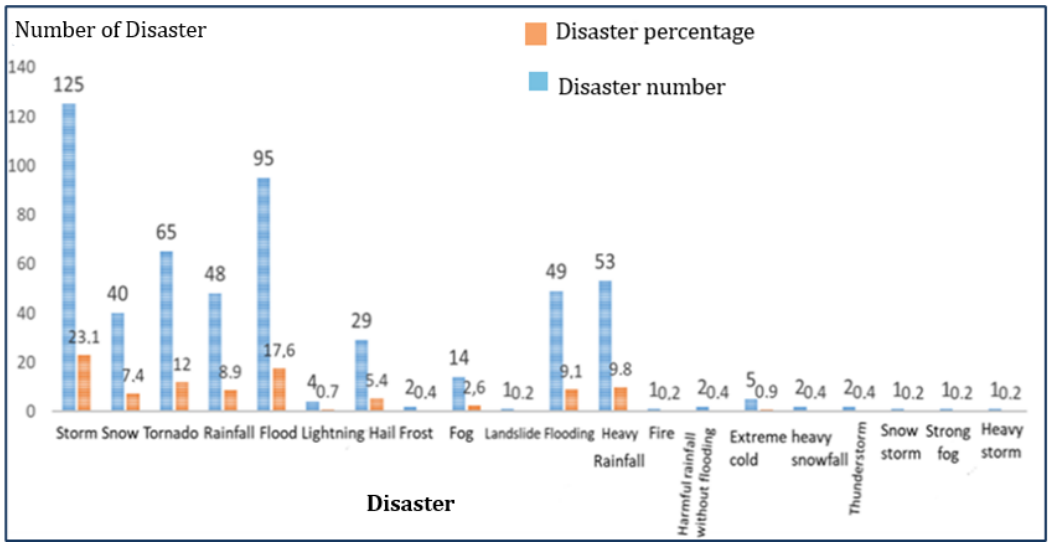


Figure 5: Distribution and percentages of the number of general meteorological disasters in Istanbul

A total of 251 storms, 11 droughts, 69 snowfalls, 88 tornadoes, 125 rainfall events, 224 floods, 19 lightning strikes, 75 hail, 4 frosts, 19 fog incidents, 5 landslides, 103 water inundations, 109 heavy rainfalls, 3 fires, 3 occurrences of harmful rainfall without resulting in flooding, 1 frost, 5 severe cold spells, 2 instances of continuous snowfall surpassing the norm, 2 full storms, 1 snowstorm, 1 heavy fog, and 1 strong storm were recorded across three provinces. The cumulative total of meteorological disasters was 1,121, with storms identified as the most prevalent type of disaster.

An analysis of the distribution of meteorological disasters by season reveals 167 events in spring, 417 in summer, 242 in autumn, and 295 in winter. A detailed overview of the number of disasters and their seasonal distribution is provided in Table 1.

Table 1: Seasonal distribution of total number of meteorological disasters in Kocaeli, Sakarya and Istanbul provinces (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2016)

Disaster	Spring		Summer		Autum		Winter	
	Number	Percentage	Number	Percentage	Number	Percentage	Number	Percentage
Storm, Heavy storm	55	32.9	29	6.7	48	19.8	123	41.7
Drought	4	2.4	5	1.2	2	0.8		
Snow, snow storm, heavy snowfall	5	3	-	-	-	-	65	22
Tornado	11	6.6	9	2.2	15	6.2	53	18
Rainfall, Harmful rainfall without flooding	17	10.2	57	13.7	41	16.9	10	3.4
Flood	24	14.4	123	29.3	66	27.3	12	4.1
Lightning	2	1.2	13	3.1	3	1.2	2	0.3
Hail	26	15.6	40	9.6	9	3.7		
Frost	2	0.6	-	-	-	-	4	1
Fog, Strong fog	4	2.4	-	-	8	3.3	8	2.7
Landslide	1	0.6	3	0.7	-	-	1	0.3
Flooding	7	4.2	66	15.8	25	10.3	5	1.7
Heavy Rainfall	7	4.2	70	16.8	25	10.3	7	2.4
Fire	1	0,6	2	0,5	-	-	-	-
Hoarfrost	1	0,6	-	-	-	-	-	-
Extreme cold	-	-	-	-	-		5	1.7

In Kocaeli, the predominant weather phenomena during the spring season include storms and floods, while summer is characterized by floods accompanied by rainfall. The fall season is marked by a continuation of floods and storms, and winter typically experiences storms and snowfall. In Sakarya, spring is marked by significant occurrences of hail and floods, followed by summer, which is defined by floods, waterlogging, and heavy rainfall. The fall season brings further floods and precipitation, while winter is characterized by storms and snow.

In Istanbul, spring generally presents with storms, floods, and hail, contrasting with summer, which is notable for floods and intense rainfall. During the fall, floods and storms prevail, whereas winter is marked by storms and tornado activity.

It is essential to assess the changes and increases in the frequency of disasters occurring annually and seasonally for effective future planning. Figure 6 illustrates the trends in disaster occurrences over the years in Sakarya Province. Notably, floods and heavy rainfall have shown a consistent upward trajectory. It is observed that floods have been recurrent annually since 2014, leading to predictions of an increased frequency of such events in the future. The escalating incidents of heavy rains and flooding in recent years underscore the necessity for a thorough review of the existing infrastructure, urban planning, and building stock, along with the implementation of appropriate measures. Comparative analysis of storm occurrences over the years reveals a significant upward trend in recent times. Consequently, it is imperative to issue timely warnings to residents along the Black Sea coast of the province, particularly those engaged in fishing activities. Tornado occurrences have been documented since 2015, with a discernible increase in frequency. Of particular concern is the notable rise in tornado events recorded in the northern coastal region of the city in recent years compared to earlier periods. Prior to the onset of a tornado, it is crucial to alert the public and undertake preventive measures to mitigate potential damages, such as roof damage and fallen trees. Additionally, it is important to note that landslides have been reported in years marked by flooding and heavy rainfall events. As hail have become increasingly significant in recent years, it is anticipated that their frequency will continue to escalate in the future. In light of the impact of hail, it is essential to implement initiatives that advocate for farmers in the region, which holds considerable agricultural importance, to obtain crop insurance and disseminate early warning notifications. While droughts are relatively uncommon, the diminishing water resources and the agricultural sector's dependence on water in the area underscore the necessity for widespread adoption of water conservation practices.

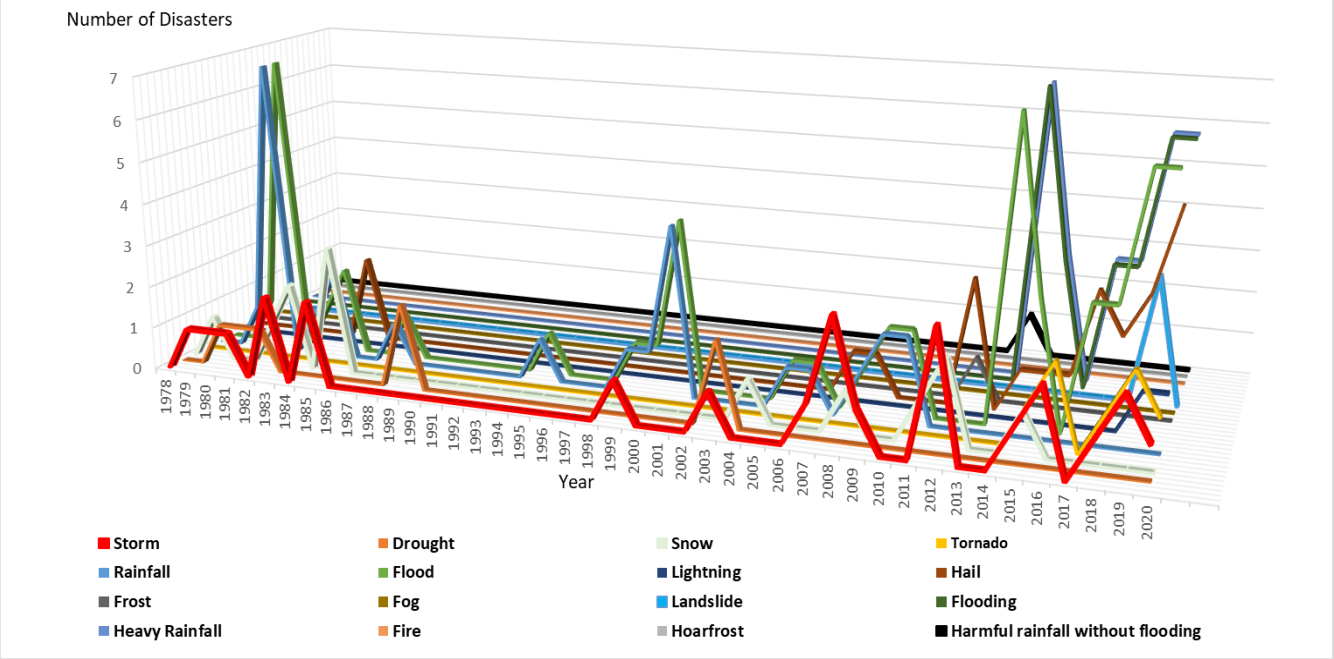


Figure 6: Change in meteorological disasters in Sakarya province

In the Kocaeli province, the predominant natural disasters, ranked in order of prevalence, are storms, floods, heavy rainfall and hail. Since 2001, there has been a marked increase in the incidence of these disasters. The frequency of storms has notably escalated, particularly in recent years. Flood events have been occurring with increasing regularity each year, and the patterns of rainfall and flooding appear to be closely related. Additionally, landslides have become more frequent during periods of significant flooding and heavy rainfall. The trend of severe rainfall and flooding has intensified since 2014, indicating a continual rise in these occurrences. Waterlogging has had a particularly pronounced impact over the past three years compared to earlier periods. Tornadoes were first recorded in 2013 and have emerged as a significant concern in the past two years. Given the implications of climate change, it is probable that the incidence of tornado events will increase in the future. Although the occurrence of droughts remains low, their frequency appears to be on the rise and warrants consideration for future implications. Furthermore, the incidence of lightning strikes and hail has generally increased. As the frequency of hail-related disasters is upwardly trending, it is essential to implement alert systems to mitigate potential damages (Figure 7).

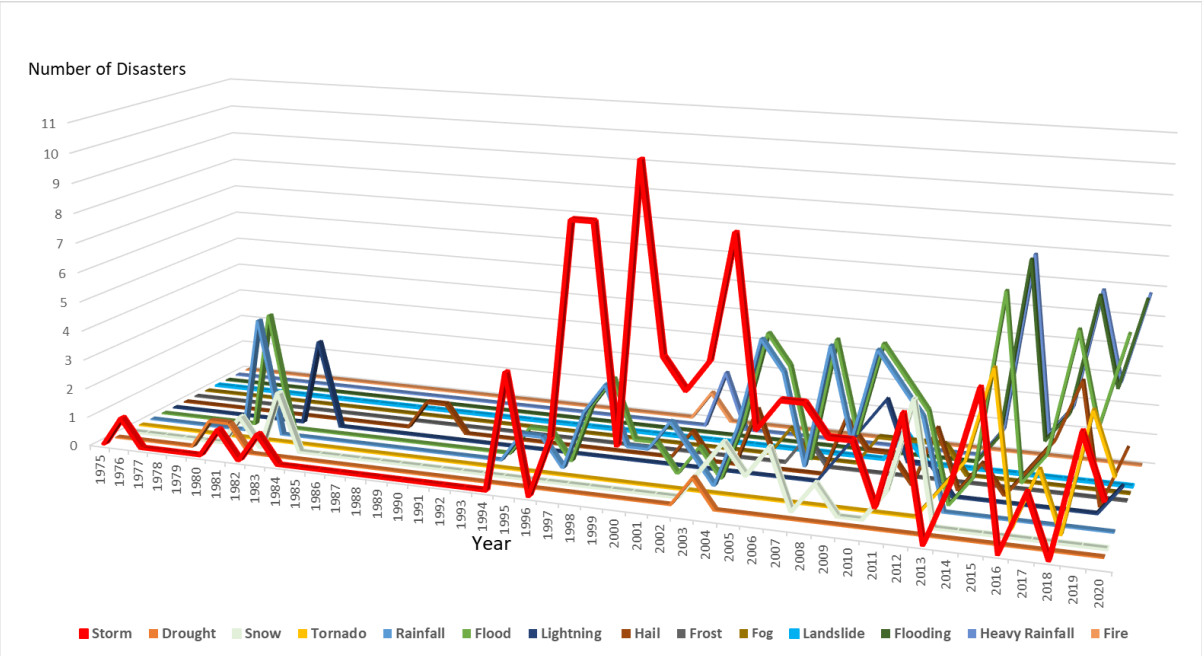


Figure 7: Changes in meteorological disasters in Kocaeli Province

Between 1975 and 2020, Istanbul witnessed a significant increase in the occurrence of storms, floods, tornadoes, heavy rains events. Notably, post-2010, there has been a marked rise in the frequency of such disasters. An analysis of the trends reveals that storms are the predominant form of disaster, with their frequency notably escalating since 2006. The persistent occurrence of storm-related incidents from 2006 to the present underscores the necessity for Istanbul, recognized as one of the world's major cities, to enhance its preparedness in mitigating potential damages. The annual observation of waterlogging since 2013 is particularly noteworthy, indicating a concerning trend of increasing frequency. A significant contributing factor to the unanticipated floods alongside infrastructural inadequacies and suboptimal land use—is attributed to global climate change. Since 2014, heavy rainfall has markedly intensified, with the last three years exhibiting particularly severe impacts compared to previous years. Flooding events and heavy rainfall occurrences have generally shown a parallel increase. The frequency of floods has been rising since 2004, and the occurrence of floods over eight consecutive years since 2012 highlights a troubling escalation in their severity. Given the ongoing trend of flood events in recent years, it is probable that their frequency will continue to augment in the future. The increasing frequency of heavy rainfall, flooding, and disaster incidents in recent years underscores the need for a comprehensive evaluation of Istanbul's infrastructure. Given the city's size and unique characteristics, it is imperative to implement the necessary precautions. There has also been a noticeable rise in tornado occurrences. The timing of tornado activity, floods and heavy rainfall coincides with incidents of lightning strikes and landslides. Furthermore, there is a significant increase in hail events, particularly in recent years. Additionally, it is crucial to adopt measures to mitigate the effects of fog, which has become more prevalent, especially to ensure that urban transportation remains unaffected (Figure 8).

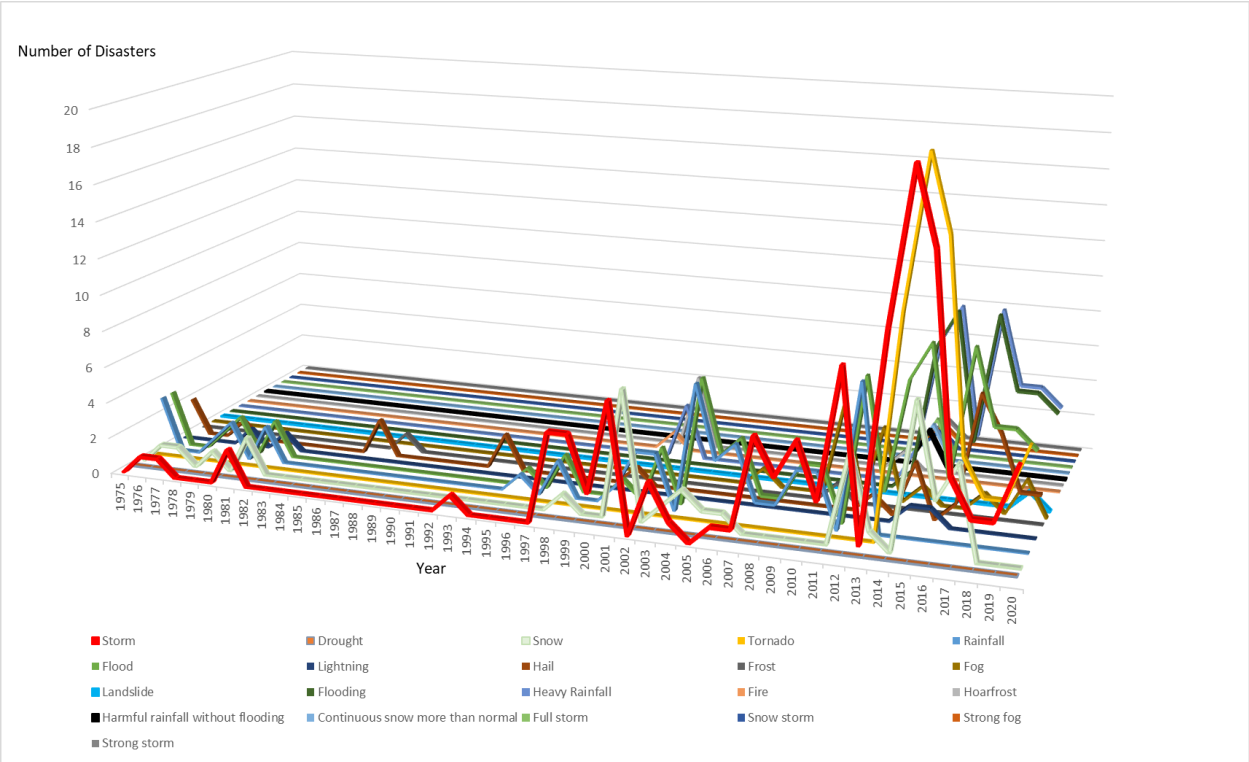


Figure 8: Changes in meteorological disasters in Istanbul Province

Across three provinces, storms are most frequently observed in Istanbul, which also experiences a range of other meteorological phenomena including droughts, rainfall, floods, hail, frosts, fog, waterlogging, heavy rains, severe cold, excessive snowfall, damaging non-flood-related rains, tornadoes, and snow-related disasters. Kocaeli records the highest incidence of lightning strikes, with 12 occurrences, while landslides are predominantly observed in Sakarya, with a reported 3 incidents.

In comparison to other regions of Turkey, certain types of disasters, such as snowfall, may be less frequent in the working area. However, it is crucial to acknowledge that the impact, damage incurred, and economic challenges associated with these disasters can be substantially greater, influenced by factors such as population density, geographical characteristics, and the status of economic and urban development. Consequently, the severity of disasters occurring in regions like Istanbul, Kocaeli, and Sakarya strategically significant areas for the country in terms of population, agriculture, and industry is notably high. This underscores the growing necessity of understanding the historical context of disasters to effectively implement potential disaster prevention measures in these regions.

In Turkey, floods and waterlogging represent some of the most prevalent natural disasters, accounting for 15% of all incidents and resulting in substantial economic damage. Given the anticipated impacts of climate change on our country, this percentage is particularly noteworthy. On a global scale, flood statistics indicate that they constitute the majority of natural disasters at 44%, followed by storms at 28%. These figures closely align with those observed in the provinces included in the study (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2017)

3.1. Meteorological Disaster-Related Fatalities

In the combined regions of Kocaeli, Sakarya, and Istanbul, the most prevalent meteorological disasters included storms, floods, rainfall, heavy rainfall, inundation, and tornadoes. Storms and tornadoes accounted for the highest number of fatalities, resulting in a total of 20 deaths across the three provinces.

Figure 9 present, in Kocaeli, storms and tornadoes emerged as the primary cause of fatalities, with 5 deaths recorded. Among these, 4 were attributable to storms and tornadoes, while 1 resulted from heavy rainfall, flooding, and inundation. In Sakarya, the deadliest events included heavy rainfall, flooding, inundation, landslides, and lightning strikes, leading to a total of 3 fatalities. Specifically, this included 1 death due to heavy rainfall and flooding, 1 from a landslide, and 1 from lightning. In Istanbul, meteorological disasters resulted in a total of 12 deaths, with snowfall being the predominant cause. Across Turkey, the most deadly disasters between 2010 and 2020 were floods and storms.

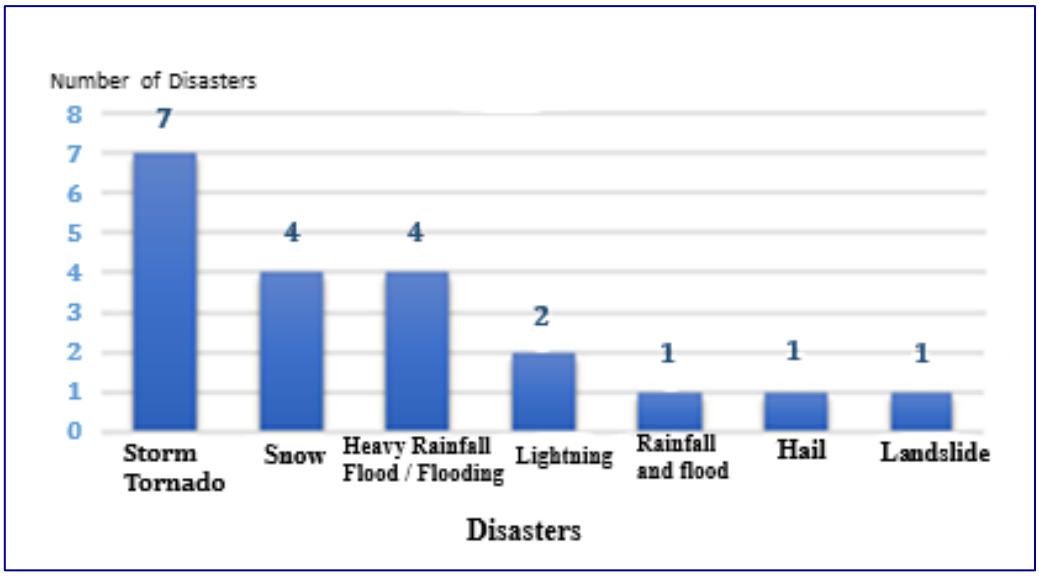


Figure 9: Distribution of the number of deaths caused by meteorological disasters in Kocaeli, Sakarya and Istanbul provinces for 1975-2020

3.2. Damage Assessment Following Disasters

In the provinces of Kocaeli, Sakarya, and Istanbul, the damage resulting from disasters has been categorized into light, medium, and heavy damage. Light damage includes broken tree branches, damage to parks, and missing roof tiles. Medium damage encompasses flooding of residences and damage to agricultural products. Heavy damage pertains to all disasters resulting in fatalities and forest fires.

In terms of the extent of damage, Istanbul ranks first, followed by Kocaeli and Sakarya. Across all three provinces, disasters primarily resulted in medium damage, with light damage being the second most common. Heavy damage has been the least frequently reported category across the provinces.

According to the data presented in Table 2, which shows the number of damages identified based on the damage classification, Istanbul has experienced the most significant impact in terms of the total damage caused by hydrometeorological disasters. High population density and concentrated urban development exacerbate the severity of disasters and increase the number of fatalities.

Table 2: Number of damages according to damage classification

City	Slight damage	Moderate damage	Heavy damage
Sakarya	143	187	17
Kocaeli	56	172	6
İstanbul	210	298	32

4. Conclusion And Suggestions

Currently, we are witnessing an increase in the frequency and intensity of disasters, driven by the climate crisis, particularly as a result of population growth, unplanned urbanization, and industrialization. Predictions indicate that we are likely to encounter even more catastrophic disasters in the future.

According to climate change projection studies conducted for Turkey, the average annual temperature is anticipated to increase by 1.5-2.0°C during the period from 2016 to 2040 and by 1.5-4.0°C from 2041 to 2070 (Demircan et al., 2017). Consequently, it is expected that hydrometeorological disasters will occur with greater frequency in our country in the forthcoming years. Given that past disasters in a region are likely to reoccur, maintaining a disaster inventory will be instrumental in guiding the necessary measures. Disaster inventories function as reference documents that present the current situation and establish a database for proposals and plans aimed at addressing the increasing frequency and severity of climate change-induced disasters. They also serve as a valuable indicator to mitigate human-induced land use errors, poor planning, and urbanization, which exacerbate disasters and their impacts. With these plans in place, we can conduct analyses of the current situation, perform hazard and risk assessments, implement disaster risk reduction actions, and engage in monitoring and evaluation. Utilizing the inventories created will enable the formulation of disaster risk reduction plans that effectively diminish risks at the local level.

In this context, the inventory developed in this study delineates the types, frequency, and magnitude of hydro-meteorological disasters, alongside an assessment of the current damage situation. It also offers recommendations regarding necessary measures and establishes a database aimed at mitigating damages.

If risk and damage reduction strategies are effectively implemented within disaster management processes, the losses resulting from disasters can be minimized. While developed countries prioritize preventive measures prior to the occurrence of disasters, such measures in undeveloped or developing nations are frequently insufficient. Enhancing public awareness about disasters and conducting disaster drills can significantly improve communities' capacity to manage disasters and unforeseen emergencies (Chou et al., 2015). Customized training for diverse target groups can help reduce social and economic losses from disasters and accelerate recovery efforts post-event (Dufty, 2008). Urban planning should incorporate potential disaster risks, enabling projections based on historical disaster data. Areas deemed unsuitable for construction should not be designated for settlement, illegal construction should be curtailed, and building permits should not be issued in flood-prone riverbeds.

Agricultural insurance should be expanded and necessary awareness must be raised in response to product losses and damages caused by disasters in agricultural areas. The beds of streams in agricultural lands should be cleaned. Non-structural methods such as flood zones, land expropriation, laws, special usage and construction permits, disaster management, and insurance should also be utilized. The use of disaster early warning systems should be made widespread (Kadıoğlu & Özdamar, 2008).

In our country, the Disaster and Emergency Management Authority (AFAD) was established to monitor, assess, and identify risks, reduce them, and coordinate disaster responses from a central point. The disaster risk reduction plans prepared with the establishment of AFAD serve as a guiding framework for both central and local governments in planning. This will create more resilient settlements against disasters and minimize losses caused by them (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2022).

Preparing disaster inventories ensures accurate information and timely intervention. Globally, efforts are being made to enhance disaster resilience, track knowledge production in the field, and strengthen the relationship between practical disaster resilience assessments and resilience principles.

References

Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J., Adler, R., & Brakenridge, G. R. (2010). A digitized global flood inventory 1998–2008: compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, *55*(2), 405–422.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2022). *Türkiye Afet Müdahale Planı*. Retrieved January 7, 2024, from https://www.afad.gov.tr/turkiye-afet-mudahale-plani

Atalay, İ. (2011). *Türkiye coğrafyası ve jeopolitiği*. Meta Basım.

Avcı, V., & Ünsal, Ö. (2023). A morphometric approach to Bozkurt (Kastamonu-Türkiye) flood. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *9*(2), 216–239. https://doi.org/10.21324/dacd.1210797

Avcı, V. (2023). Esmahanım Deresi Havzası'nın (Akçakoca-Düzce) morfometrik özellikleri ve taşkınlara etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, *25*(1), 96–118. https://doi.org/10.24011/barofd.1148666

Aygün, E. (2020). *Dünya Afet Raporu Yönetici Özeti*. Uluslararası Kızılhaç ve Kızılay Dernekleri Federasyonu, Cenevre. https://www.kizilay.org.tr/Upload/Dokuman/Dosya/wdr2020-26-11-2020-64501291.pdf

Chou, J. S., Yang, K. H., & Ren, T. C. (2015). Ex-post evaluation of preparedness education in disaster prevention, mitigation and response. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *12*, 188–201. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.002

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2017). *Centre for research on the epidemiology of disasters (CRED) Technical Report.* Retrieved May 14, 2021, from http://cred.be/sites/default/files/CredCrunch50.pdf.

Demircan, M., Türkoğlu, N., & Çiçek, İ. (2017, November 8–10). *İklim değişikliği: modelden sektörel uygulamalara* [Bildiri Sunumu]. Türkiye Coğrafya Kurumu 75. Kuruluş Yılı Uluslararası Kongresi, Ankara, Türkiye.

Doğanay, H., & Orhan, F. (2019). *Türkiye Beşeri Coğrafyası*. Pegem Akademi.

Dufty, N. (2008). A new approach to community flood education. *The Australian Journal of Emergency Management*, *23*(2), 4–8.

Duman, O., & Gökgöz, B. (2018). *Türkiye'de ve dünyada afet veri tabanları*. *SETSCI Conference Indexing System*, *3*, 556–561.

Ekinci, R., Büyüksaraç, A., Ekinci, Y. L., & Işık, E. (2020). Bitlis ilinin doğal afet çeşitliliğinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *6*(1), 1–11. https://doi.org/ 10.21324/dacd.535189

Hoyois, P., Below, R., Scheuren, J. M., & Guha-Sapir, D. (2007). *Annual disaster statistical review: numbers and trends.* Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.

İkiel, C. (2018). *Sakarya'nın fiziki, beşeri ve iktisadi coğrafya özellikleri*. Sakarya Üniversitesi.

İstanbul Valiliği. (2022). *Bir bakışta İstanbul*. Retrieved August 25, 2022, from http://www.istanbul.gov.tr/iklim-istanbul

Kadıoğlu, M. (2011a). *Afet yönetimi beklenilmeyeni beklemek, en kötüsünü yönetmek*. T.C. Marmara Belediyeler Birliği Yayını.

Kadıoğlu, M. (2011b). Climate change and Turkey. *Makine ve Mühendis*, *50*, 593, 15–25.

Kadıoğlu, M., & Özdamar, E. (2008). *Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri*. JICA Türkiye Ofisi Yayınları.

Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., … Sherstyukov, B. (2013). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2016). *Meteorolojik karakterli doğal afetler 2015 yılı değerlendirmesi*. Retrieved February 7, 2022, from https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/kitaplar/dogalafet-2015.pdf

Özdemir, Z., & Özkaynak Yolcu, M. (2024). İklim değişikliğinin ve kentleşmenin etkilerini akarsu kıyısı yerleşim alanlarında sel felaketi üzerinden tartışmak. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *10*(2), 314–333. https://doi.org/10.21324/dacd.1383055

Ozguven, E. E., & Ozbay, K. (2013). A secure and efficient inventory management system for disasters. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, *29*, 171–196. https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.08.012

Parsons, M., Glavac, S., Hastings, P., Marshall, G., McGregor, J., McNeill, J., Morley, P., Reeve, I., & Stayner, R. (2016). Top-down assessment of disaster resilience: A conceptual framework using coping and adaptive capacities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *19*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022), *Marmara Bölgesi coğrafi özellikleri*. Retrieved May 1, 2022, from https://mthmm.csb.gov.tr/bolgemiz-i-85694

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2022). *Kocaeli genel bilgiler*. Retrieved February 7, 2022, from https://kocaeli.ktb.gov.tr/TR-69185/genel-bilgiler.html

The International Disaster Database. (2020). *Inventorying hazards & disasters worldwide since 1988*. Retrieved February 2, 2022, from https://www.emdat.be

Tümer, Ö. (2024). Doğal afetlerde afet yönetimi ve risk azaltmada yerel yönetimlerin rolü. *Fiscaoeconomia, 8*(3), 1495–1515. https://doi.org/10.25295/fsecon.1491393

Türkiye İstatistik Kurumu, (2022). *Nüfus ve demografi istatistikleri*. Retrieved February 7, 2022, from https://www.tuik.gov.tr/

Yadavalli, V.S.S., Sundar, D. K., & Udayabaskaran, S. (2015). Two substitutable perishable product disaster inventorysystems. *Annals of Operations Research*, *233*, 1, 517–534. https://doi.org/10.1007/s10479-014-1783-3

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 206-219, DOI: 10.21324/dacd.1563581

Afetlerde Aydınlatma, Haberleşme ve Enerji İhtiyacının Tek Noktadan Karşılanması için Şebeke ve Direk Tasarımı

Levent Aksoy[1], İlknur Yardımcı Coşkun[2,*]

[1]*Bahçeşehir Üniversitesi, İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, Lojistik Yönetimi, 34353, İstanbul.*
[2]*Maltepe Üniversitesi, İşletme ve Yönetim Bilimleri Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik, 34857, İstanbul.*

Özet

Afetlerin ardından, afetzedeler acil maddi ve tıbbi yardımın ötesine geçen çok sayıda ihtiyaçla karşı karşıyadır. Bununla birlikte nüfus yoğunluğunun fazla olduğu şehirlerde afet sonrası müdahale süresi uzamaktadır. Artan nüfus ve kentleşme, afetlerin etkilerini daha da artırmakta ve müdahale planlarının daha karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır. Bu sebeple kentler afet sonrası aydınlatma, haberleşme, enerji gibi temel gereksinimleri kendi kendilerine karşılayabilecekleri şekilde donatılmalıdır. Afetlerde aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyaçlarının tek bir kaynaktan karşılanması, enerji verimliliği ve sağlam altyapı çözümleri gerektiren çok disiplinli bir yaklaşıma dayanır. Afet sonrası süreçlerin hızla ve etkili bir şekilde yürütülebilmesi, bu hizmetlerin kesintisiz devamına bağlıdır. Bu çalışmada, sistematik bir literatür taraması sonucunda, mühendislik tasarımı yöntemi ile çok fonksiyonlu bir direk tasarımı geliştirilmiş ve matematiksel modelleme ile sistemin kapasite ve diğer parametreleri değerlendirilmiştir. Bu hibrit direk, afetlerde aydınlatma, enerji ve haberleşme hizmetlerini bir arada sunan bir ağ yapısına sahiptir. Direk, farklı enerji üretim yöntemleri, veri aktarım seçenekleri, kablosuz erişim noktası, mobil şarj noktaları, sensörler ve IoT cihazları gibi donanımları entegre eder. Bu tasarımın, afet anında ve sonrasında afetzedelerin temel ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler

Afet Yönetimi, Afetlerde Mobil İletişim ve Güç Sistemleri, Entegre Direk Tasarımı, Enerji Sistemleri, Haberleşme Sistemleri, Yenilenebilir Enerji

Design of Network and Pole for Meeting Lighting, Communication, and Energy Needs from a Single Source in Disasters

Abstract

After disasters, survivors face numerous needs beyond immediate material and medical aid. However, in densely populated cities, post-disaster response times are prolonged. Growing urbanization and population increase the impact of disasters and complicate response plans. Therefore, cities should be equipped to meet essential post-disaster needs, such as lighting, communication, and energy, autonomously. Addressing lighting, communication, and energy needs from a single source in disasters requires a multidisciplinary approach that involves energy efficiency and robust infrastructure solutions. The swift and effective management of post-disaster processes depends on the uninterrupted continuation of these services. In this study, following a systematic literature review, a multifunctional pole design was developed using engineering design methods, and the system's capacity and other parameters were evaluated through mathematical modeling. This hybrid pole provides a network structure offering integrated lighting, energy, and communication services during and after disasters. The pole incorporates various energy generation methods, data transmission options, wireless access points, mobile charging stations, sensors, and IoT devices. This design is expected to play a crucial role in meeting the basic needs of disaster survivors both during and after a disaster.

Keywords

Disaster Management, Mobile Communication and Power Systems in Disasters, Integrated Pole Design, Energy Systems, Communication Systems, Renewable Energy

1. Giriş

Afet sonrası hazırlıklar, afetlerin hem bireyler hem de altyapı üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek için çok önemlidir. Bu hazırlıklar, dayanıklılığı artıran ve iyileşmeyi kolaylaştıran önlemlerin stratejik planlanmasını ve uygulanmasını içerir (Jia vd., 2023). Bir felaketten sonra kalabalık şehirlerde kendi kendine yeterlilik, gıda, iletişim ve altyapı gibi temel kaynaklara erişimin sağlanmasını içeren çok yönlü bir zorluktur (Flikkema & Hayes, 2017).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (216) 6261050 Faks: +90 (216) 6261070
E-posta: levent.aksoy@ou.bau.edu.tr (Aksoy L.), ilknuryardimci@maltepe.edu.tr (Yardımcı Coşkun İ.)

Gönderim Tarihi / Received : 08/10/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 10/12/2024

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), İstanbul Planlama Ajansı (İPA), 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ve Hatay'da meydana gelen depremler sonrasında 25 Şubat 2023 tarihinde bir çalıştay düzenlemiştir. Bu çalışmanın sonuçları İstanbul Deprem Çalışma Grubu Toplantısı Özet Raporu olarak yayınlanmıştır (İstanbul Planlama Ajansı, 2023). Bu çalıştayda 7 çalışma grubu oluşturulmuş ve ilgili boyutlar incelenmiştir. Bunlardan Lojistik Boyut kapsamında Enerji ve İletişim başlıkları da incelenmiştir. Çalışmada afet sonrasında meydana gelecek geniş enerji ve iletişim kesintileri, bu kesintilerin doğuracağı yaşamsal sorunlar, enerji ve iletişimin sürekliliğinin sağlanmasının önemi belirtilmiştir (İstanbul Planlama Ajansı, 2023). Afetlerde enerji ve iletişim konusunda hayati sorunların yaşanma olasılığı ve bunlara karşı tedbir alınması gereği daha önce yapılan çalışmalarda da ifade edilmiştir.

İPA raporunun kendisinde enerji ve iletişim başlıklarının bir arada ele alınması gereği açıkça belirtilmiş olmakla beraber (s.35) yine de ayrı olarak ele alınmışlardır. Raporda belirtilen çözüm önerilerinin bazıları (sağlık tesislerine öncelik verilmesi gibi) çok genel, bazıları ise (İstanbul ve çevre iller için jeneratör envanteri oluşturulması gibi) çok detaylı belirtilmiştir. Ancak öneriler, stratejik yönetimin öngördüğü stratejik amaç, hedef, faaliyet hiyerarşik yapısından ne yazık ki çok uzaktır.

Aydınlatma, afet senaryolarında çok önemli bir rol oynar ve tahliye, iletişim ve güvenlik için gerekli görünürlüğü sağlar (Takano vd., 2021; Akizuki vd., 2023). Afetlerde etkili aydınlatma sistemlerine duyulan ihtiyaç, güvenliğin sağlanmasında ve acil müdahalelerin kolaylaştırılmasında önem arz etmektedir (Kobayashi & Kakudate, 2014). Afetler sırasında ve sonrasında etkili haberleşme, zararı en aza indirmek ve verimli müdahale ve kurtarma çabalarını sağlamak için çok önemlidir (Tan & Hao, 2022). Afet senaryolarının karmaşıklığı, çeşitli paydaşları ve stratejileri içeren çok yönlü bir iletişim yaklaşımını gerektirir (Smith vd., 2024).

Afet senaryolarında, etkili yardım operasyonlarının sağlanması ve temel hizmetlerin sürdürülmesi için enerji ihtiyaçları kritik öneme sahiptir. Afetler genellikle enerji kesintilerine yol açarak insani operasyonları desteklemek için dayanıklı enerji sistemlerini gerektirir (Minguito & Banluta, 2023). Enerji erişimi, kriz durumlarında geçim kaynaklarının sürdürülmesi için çok önemli olan fiziksel sermayenin temel bir bileşenidir (Kuang vd., 2023). Afet sonrası kullanılabilir olan bölgelerde enerji temiz su, sanitasyon, sağlık ve iletişim hizmetleri için gereklidir (Thulstrup & Joshi, 2017).

Yazar tarafından belirlenmiş olan İPA hedeflerinden ve aydınlatma, enerji ve haberleşme ihtiyacını tek nokta üzerinden karşılayacak olan "Aydınlatma direkleri üzerinden hizmet verecek açık bir Wi-Fi şebekesinin geliştirilmesi aynı zamanda vatandaşların telefon ile iletişim faaliyetlerinin sürdürülebilmesi için aydınlatma direklerinin birer telefon şarj noktası haline getirilmesi" önerisi (İstanbul Planlama Ajansı, 2023) bu makalenin motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmayı gerçekleştirmek üzere öncelikli olarak sistematik bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında mühendislik tasarımı ile sistemin bileşenleri alternatifleri ile oluşturulmuş ve matematiksel modelleme ile sistemin kapasite ve diğer parametreleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, afet sonrası süreçlerde aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyaçlarının tek bir kaynaktan karşılanmasını hedefleyen çok fonksiyonlu bir direk tasarımı, güç üretim ve aktarımı da içeren bir şebeke tasarımını önererek literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Literatürde, bu tür temel ihtiyaçları bireysel olarak ele alan çalışmalar bulunmasına rağmen, bu ihtiyaçları bütünleşik bir çözümle karşılayan bir ağ tasarımı eksikliği olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmamız, modüler ve enerji verimli bir tasarım sunarak afet yönetimi alanında yenilikçi bir altyapı modeli geliştirmiştir. Bu model, farklı enerji üretim yöntemlerini (örneğin, güneş ve rüzgâr enerjisi), kablosuz iletişim teknolojilerini ve veri aktarım bileşenlerini bir araya getirerek, afet sonrası süreçlerde dayanıklılığı artıracak ve müdahaleleri hızlandıracak bir sistem sunmaktadır.

Ayrıca, önerilen sistem, gerçek dünya senaryolarında uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından değerlendirilmektedir. Afet parkları, toplanma alanları ve güvenli yol hatları gibi kritik bölgelerde kullanılabilirliği, bu çalışmayı hem pratik hem de teorik katkılar açısından değerli kılmaktadır. Bu bağlamda, çalışma afet yönetimi literatürüne çok disiplinli bir perspektif sunmaktadır.

1.1. Literatür Analizi

Afetlerde aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyacının tek noktadan karşılanması için şebeke ve direk tasarımı konusunda literatürde yer alan çalışmalarını incelemek için sistematik literatür taraması yöntemi ile Tablo1'de yer alan anahtar sözcükler veri tabanlarında yıl sınırlaması olmaksızın incelenmiştir. İnceleme sonrası aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyacı için ayrı ayrı çözümler üreten çalışmalar olduğu tespit edilmiş olup (Tablo 2), tek noktadan tüm bu ihtiyaçların karşılanması için şebeke ve direk tasarımına ilişkin yeterli sayıda çalışmaya rastlanmamıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalarda akıllı şehir çalışmaları kapsamında çeşitli direkler mevcut olup, afet sonrası şebeke elektriğine bağlı çalışmaları sebebi ile dirençliliğini koruyamayacağı öngörülmektedir. Bu çalışmanın özgün yanı, afet sonrasında yedeklenmiş enerji kaynaklarıyla desteklenen ve ticari kaygılardan bağımsız olarak kullanılabilecek bir çözüm önerisi sunmasıdır. Bu amaçla, mevcut teknolojilerin adaptasyonu yoluyla afet sonrası süreç yönetimine özgün bir çözüm önerilmektedir.

Tablo 1: Sistematik literatür taramasında kullanılan anahtar kelimeler ve veri tabanları

Anahtar Kelimeler	Veri Tabanları
▪ Afet Dayanıklı Altyapı Tasarımı ▪ Çok Fonksiyonlu Direk Tasarımı ▪ Afet Durumunda Enerji ve İletişim Sistemleri ▪ Afet Yönetiminde Entegre Aydınlatma ve İletişim ▪ Tek Noktadan Enerji ve Haberleşme Çözümleri ▪ Afet Senaryoları İçin Akıllı Direkler ▪ Afet Müdahalesi İçin Şebeke Tasarımı ▪ Afetlerde Mobil İletişim ve Güç Sistemleri	▪ DergiPark Akademik (TUBİTAK) ▪ Ebsco ▪ Elsevier eBooks ▪ Emerald Insight (Dergiler) ▪ Google Scholar ▪ IEEE Xplore Digital Library (Dergiler, ▪ bildiriler, standartlar) ▪ PlumX Metrics ▪ ProQuest Dissertations and Theses Global ▪ ProQuest Ebook Central ▪ Scopus (Elsevier endeksi/özet veri tabanı) ▪ Springer E-Books ▪ Taylor & Francis Online ▪ Web of Science

Tablo 2: Literatürde yer alan çalışmalar

Yazar/Yıl	Çalışma Özeti
Helal & Puckeridge (1990)	Çalışma merkezi bir izleme ve kontrol ünitesi, tek noktalı aydınlatma üniteleri ve döngü topolojisine sahip bir iletişim sistemi içeren bir acil durum aydınlatma sistemini tartışmaktadır.
Aljada vd. (2006)	Makale, bir felaketin neden olduğu iletişim ağı tesislerinde kısmi hasar olması durumunda kolayca kurulacak şekilde tasarlanmış, tamamen optik bir merkezi ünite ve optik alıcı-vericiler kullanan bir optik kablosuz iletişim sistemi mimarisi önermektedir.
Saha vd. (2012)	Makale, felaket sonrası iletişim için dört katmanlı planlı bir hibrit mimari önermektedir.
Ngo vd. (2014)	Makale, sınırlı spektrum ve enerji kaynaklarına sahip afetle etkilenen alanlarda iletişim hizmetleri sağlamada hareketli ve dağıtılabilir bir kaynak birimi (MDRU) tabanlı bir ağın uygulanmasını tartışmaktadır.
Ali vd. (2015)	Makale, afetler sırasında etkili iletişimi sağlamak için mevcut altyapıyı pekiştirme teknikleri ve bulut işleme konseptleriyle bütünleştiren bir ağ mimarisi tasarımı önermektedir.
Lee vd. (2015)	Makale, CFDP, BP ve LTP protokolleri ile gecikmeye dayanıklı ağ katmanını kullanarak ağ bağlantısının kesilmesine karşı bağışık olan bir acil durum ağı tasarımı önermektedir.
Austin vd. (2017)	Makale, afet yardım çabaları için hızla dağıtılabilir, ölçeklenebilir ve uygun maliyetli bir iletişim altyapısı oluşturmak için ölçeklenebilir konteynerli ağ hizmetleriyle birlikte düşük maliyetli Tek Kartlı Bilgisayarların, özellikle Raspberry Pi cihazlarının kullanılmasını önermektedir.
Dargahi vd. (2017)	Makale, afet sonrası iletişim altyapıları için tasarım yönergeleri önermekte ve bir çözüm olarak Araç Ad-hoc Network'leri (VANET'ler) kullanan esnek bir iletişim altyapısı sunmaktadır.
Ju vd. (2017)	Makale, felaket sonrası zaman dilimlerinde kritik yüklerin taleplerini karşılamak için elektrik ve termal güç üretmek için yerel kombine ısı ve güç (CHP) tesislerini kullanan birden fazla enerji hizmeti içeren radyal dağıtım sistemlerinde yük restorasyonu için bir yeniden yapılandırma modeli önermektedir.
Shah (2017)	Makale, iletişim yollarını kesintiye uğratan bir felaket durumunda verilerin hayatta kalmasını sağlamak için statik Rota ve Dalga Boyu Atamasına (RWA) odaklanarak felakete dayanıklı veri merkezi WDM ağlarını tasarlamak için yeni bir yaklaşım sunmaktadır.
Wen vd. (2018)	Makale, dağıtım şebekesi hatlarındaki elektrik direği süspansiyon noktalarındaki kuvvet etkisini ve etki nedenlerini analiz ederek kutup kuvveti modelini (meteorolojik afetler için) incelemektedir.

Tablo 2'nin devamı

Yazar/Yıl	Çalışma Özeti
Hazra vd. (2019)	Makale, uçtan uca ağ gecikmesini en aza indirmek ve her barınak noktasına en az bir ağ kaynağı tarafından hizmet verilmesini sağlamak için sınırlı ağ kaynaklarını verimli bir şekilde tahsis etmeyi amaçlayan, kaynak kısıtlı felaket sonrası senaryolar için özel olarak tasarlanmış yeni bir ağ mimarisi önermektedir.
Shah vd. (2019)	Makale, enerji verimli ve bileşen arızalarına karşı sağlam olmayı amaçlayan SparseDRN adı verilen yeni bir Afet Müdahale Ağı (DRN) ağ topolojisi tasarlamaya odaklanmaktadır.
Hazra vd. (2020)	Makale, ağ kaynaklarının sınırlı olduğu afet sonrası durumlar için verimli bir iletişim altyapısı tasarlamaya odaklanmaktadır.
Manimegalai vd. (2022)	Makale, 5G ağlarında çift yönlü fiber üzerinden radyo (RoF) iletişimi için çift kaplamalı fiber (DCF) kullanan ve felaketlerin neden olduğu elektrik kesintileri sırasında hem çok bantlı veri sinyalleri hem de elektrik gücü sağlamayı amaçlayan bir fiber üzerinden güç (PoF) sistemini incelemektedir.
Xiao & Asiri (2022)	Makale, afet yardım senaryoları için düşük maliyetli, az bakım gerektiren kablosuz Serbest Alan Optik İletişim (FSOC) sistemleri geliştirmeye odaklanmaktadır.
Karaman vd. (2024)	Afet senaryolarında dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği artırmak için HAPS gibi iletişim teknolojilerini ve RES gibi enerji teknolojilerini kullanan entegre bir uzay-hava-yerdeniz ağ mimarisi önermektedir.
Noaman & El-Ghafour (2024)	Makale, afetlerden sonra zorluklarla karşılaşan evsiz nüfus için konforlu, sürdürülebilir ve geçici bir çözüm olarak enerji verimli konteyner evlerin (EECH'ler) uygulanmasını tartışmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmanın ilk adımı, afet sonrası ihtiyaçların ve müdahale süreçlerinin belirlenmesi için geniş kapsamlı bir literatür taramasıdır. İlgili literatür taraması, bilimsel makaleler, mühendislik raporları, afet yönetimi stratejileri ve enerji verimliliği konusundaki çalışmalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Taramada, afet sonrası aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyaçlarına odaklanan mevcut sistemler incelenmiş ve bu sistemlerin eksiklikleri ile güçlü yönleri değerlendirilmiştir. Literatür taraması, çok disiplinli yaklaşımları ve mühendislik çözümlerini anlamak için kullanılmıştır. Literatür taramasından elde edilen bulgulara dayanarak, afet sonrası kullanılacak direğin tasarım kriterleri oluşturulmuştur. Bu kriterler şunlardır:

- Modülerlik: Direğin çok fonksiyonlu hizmetler (aydınlatma, enerji, haberleşme) sunabilmesi için modüler bir yapıda olması gerekmektedir.
- Enerji Verimliliği: Direğin enerji ihtiyacını karşılayacak sistemlerin enerji verimli olması ve alternatif enerji kaynaklarıyla (güneş, rüzgâr gibi) desteklenebilmesi önemli bir kriterdir.
- Dayanıklılık: Direğin afetlerdeki olumsuz koşullara dayanıklı olması, özellikle rüzgâr ve deprem gibi doğal afetlere karşı mukavemet göstermesi gerekmektedir.
- Kesintisiz Haberleşme: Afet sonrası iletişim ihtiyaçlarının karşılanması için, kesintisiz veri iletimi sağlayabilecek haberleşme altyapısının entegrasyonu gereklidir.
- Çok Fonksiyonlu Kullanım: Direk, aydınlatma, kablosuz internet erişimi, enerji üretimi ve mobil cihaz şarjı gibi çoklu hizmetleri tek bir noktadan sağlamalıdır.

İlk aşamada, mevcut direk tasarımlarına alternatif olarak, aydınlatma, haberleşme ve enerji gereksinimlerini karşılayabilecek bir direk tasarımının kavramsal modeli oluşturulmuştur. Kavramsal tasarım aşamasında, direğin fiziksel yapısı, yük taşıma kapasitesi ve modüler sistem entegrasyonu gibi temel bileşenler tasarlanmıştır. Kavramsal tasarımın ardından, Direğin performansını ve kapasitesini değerlendirmek amacıyla matematiksel modelleme yapılmıştır. Modelleme kapsamında yük kapasitesi, enerji üretimi ve tüketimi, veri iletim hızı parametreleri değerlendirilmiştir.

3. Bulgular

Yapılan analizler sonrası afet ortamlarında haberleşme ve mobil haberleşme, enerji, güvenilir, gürbüz ve dirençli sistem yapıları belirlenmiştir. Afet aydınlatma, enerji, haberleşme bütünleşik ağı tasarımı gerçekleştirilerek kapasite ihtiyaçları hesaplanmıştır.

3.1. Afet Ortamlarında Haberleşme

Afetler gerçekleştiğinde haberleşmede yaygın kesintiler yaşanabilmektedir. Bunların sebeplerinden birincisi mevcut şebekelerin afet anında ve hemen sonrasında artan haberleşme ihtiyacının doğurduğu talebi karşılayamayarak kapasitelerinin doygunluğa ulaşması ve sistemin çağrıları iletememesidir. Bu duruma ağ tıkanıklığı (network congestion) adı verilir (Al-Bahadili, 2012). Artan talep kaybolan veri paketlerinin oranının artmasına yol açar. Gönderilen paketler kaybolmaya başladığında bu paketler tekrar tekrar gönderilerek sorunu büyütür ve nihayetinde haberleşme etkin olarak durur.

İkinci sebep ise afet bölgelerinde fiziksel hasarlardan ve enerji kesintilerinden iletişim altyapısının etkilenmesidir. Örneğin uzun süreli elektrik kesilmesi, veri hatlarının kopması, yönlendirici ve sunucuların, anten ve benzeri ekipmanın hasar görmesi haberleşmenin kesilmesine yol açar. Bu iki sebebin (artan talep ve hasar) birleşmesi haberleşmenin tamamen durmasına yol açabilir.

Afet bölgelerinde meydana gelecek hasarların yaygınlığı bu hasarları giderecek ve şebekenin işleyişini sürdürmesini sağlayacak ekiplerin kendilerinin de afetzede olmaları haberleşmenin tekrar başlayabilmesi yönünde ciddi bir engel oluşturmaktadır. Şebekenin çalışması bu sebeple bölge dışından tamir ve bakım ekiplerinin gerekli teçhizat ile bölgeye ulaşmasına bağlı olacaktır. Bu da oldukça uzun bir süre alacağından bölgedeki haberleşmenin en çok ihtiyaç duyulan anlarda yapılamaması demektir.

Her ne kadar afet arama-kurtarma, sağlık ve diğer yardım ekiplerinin kendi aralarında telsiz haberleşmesi mümkün olsa da sivil halkın haberleşmesi ve hatta yardım istemek amacıyla 112 ve benzeri hatlara ulaşmaları mümkün olmayacaktır.

3.2. Afetlerde (veya Afetzedelerin) Mobil Haberleşme İhtiyacı

Afetlere hazırlık dokümanlarında afet çantaları bireylerin afetlere hazırlıklı olmalarının birinci şartı olarak görülmektedir. AFAD gibi kurumların web sitelerinde çantanın nasıl hazırlanacağı anlatılmaktadır (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019). Hatta AKUT sitesinde hazır olarak satılmaktadır (AKUT Vakfı, 2024). Ancak yeni yaklaşım cep telefonun deprem çantasından daha faydalı olacağı yönündedir (Yeditepe Üniversitesi Hastaneleri, 2019).

Afetten etkilenen bir kişi enkaz altında mahsur kalıyorsa durumunu bildirmek, yardım istemek için haberleşmeyi sürdürebilmeye, bunun için ise çalışan bir cep telefonuna ihtiyacı vardır (İzmir Ekonomi Üniversitesi. 2020). Deprem sonrası hayatta kalanların yine yakınlarıyla haberleşebilmesi, ailelerin bir araya gelebilmeleri, yardımlarla ilgili bilgi alabilmeleri, e-devlet ve bankacılık işlemlerini sürdürebilmeleri vb. işler için yine cep telefonlarına ihtiyaçları vardır. Bu sebeplerle kişilerin cep telefonlarının çalışabilirliğinin sağlanması temel ihtiyaçlar arasında görülmelidir.

3.3. Afet Ortamında Enerji

Afet anlarında yangın ve çarpılma risklerine karşı elektrik enerjisinin kesilmesi özellikle gerekmektedir. Kopan enerji hatları ile hasar gören bağlantılar hasarın yakınında bulunan insanlar için büyük tehlike oluşturmaktadır. Tekrardan elektrik verilmeden önce hasar bilgisinin toplanmış ve hatların güvenliğinin sağlanmış olması gerekmektedir. Bu durum afet anlarında eksik personel ile çalışan elektrik dağıtım şirketleri için neredeyse imkânsız bir durumdur (Tanyaş vd., 2014).

Afetzedelerin aydınlanma ihtiyaçlarının yanı sıra günümüz iletişiminin ayrılmaz parçası haline gelmiş mobil cihazları çalıştırmaları için bunları şarj etmeye ihtiyaçları vardır. Evlerin hasar gördüğü, elektriğin yaygın olarak kesildiği durumda mobil cihazların şarj edilmeleri başlı başına bir sorun oluşturacaktır. Bunun için afetzedelerin kolaylıkla erişebilecekleri şarj noktalarının sağlanması yiyecek, içecek, barınama, temizlik gibi temel afet yardımı olarak kabul edilmelidir.

Mobil iletişimin bir ucunda kullanıcı cihazları bulunurken diğer tarafta ise antenler, kara hattı bağlantıları ve yönlendiriciler bulunmaktadır. İletişimin sürdürülebilmesi için bu cihazların da afetten etkilenmeden çalışır durumda olmaları gerekmektedir; çalışması için de yine elektriğe ihtiyaçları vardır.

Enerji aynı zamanda basit sokak aydınlatmasının sağlanması için de gereklidir. Afet bölgelerinde en azından toplanma alanları ile ana caddelerin kısmen aydınlatılmaları gerekmektedir.

3.4. Güvenilir, Gürbüz ve Dirençli Sistemler

Bir sistemin çalışmasını sürdürmesini farklı tanımlarla ifade edilebilmektedir. Bunlardan birincisi “Güvenilir” tanımıdır (Reliable). Bir sistemin tasarlandığı ortamda beklenildiği gibi çalışmasına güvenilirlik adı verilir. Tasarımcıların sorumluluğu yalnızca başta belirtilen ortam ile sınırlıdır. Tasarlandığı ortam dışında zorlayıcı ortamlarda da çalışmasını arıza vermeden sürdüren sistemler “Gürbüz Sistemler” (Robust) olarak tanımlanır. Beklenen çalışma ortamının ötesinde bir ortam için tasarlanmış olduğunu da söyleyebiliriz. Ancak bu genişletilmiş ortam sınırlarının da aşılıp hasar veren beklenmeyen olaylarla karşılaşıldığında bu durumdan kendisini kurtarma veya duruma uyum sağlama yeteneğine ise “Dirençlilik” (Resilience) adı verilmektedir. Beklenmeyen ve hasar veren durumlara örnek olarak arızaları, kazaları, amaç değişikliklerini (Repurposing) ve doğal afetlerle diğer dış etkileri verebiliriz.

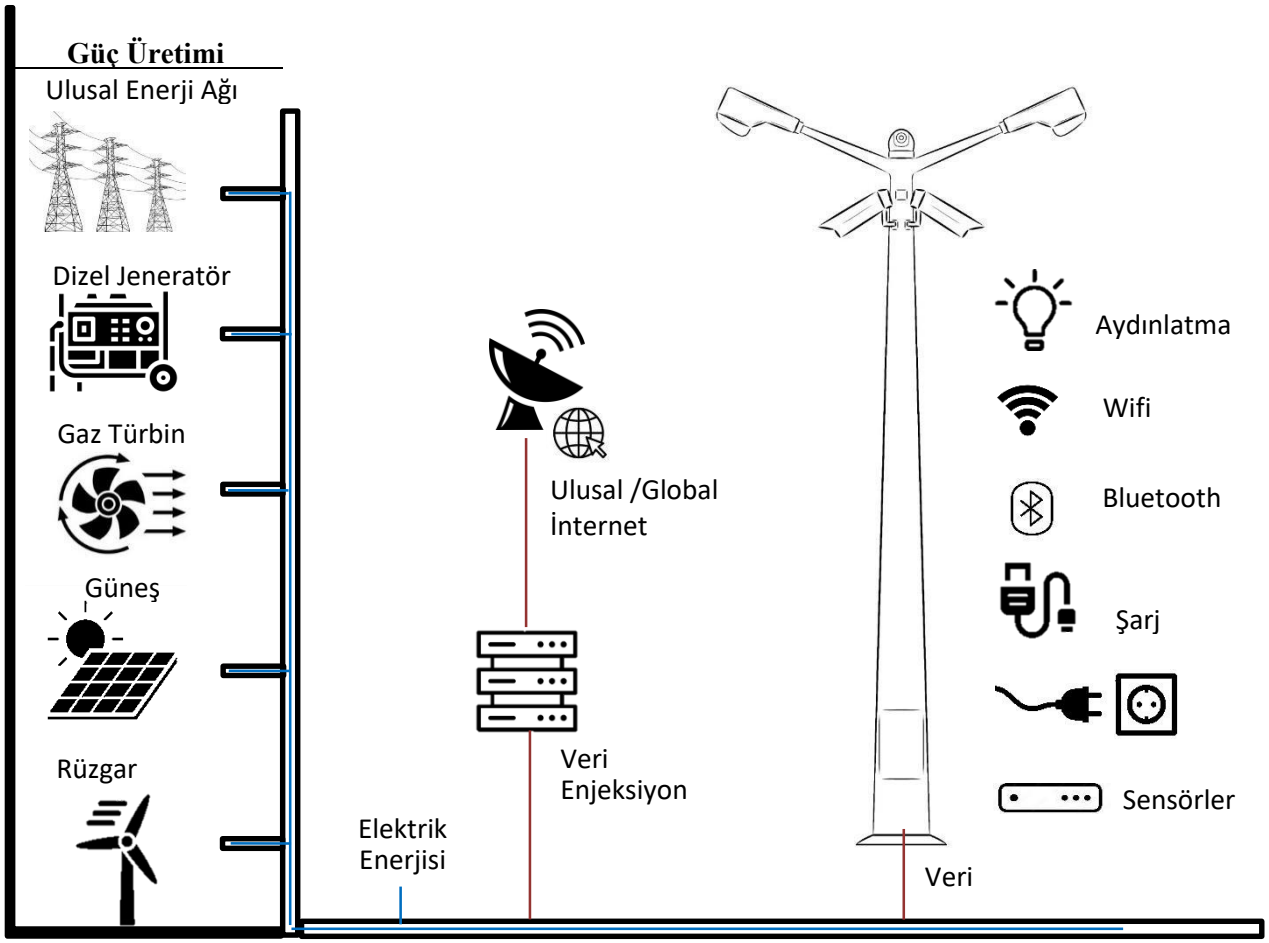
Güvenilirlik, Gürbüzlük ve Dirençlilik dış ortamda gittikçe artan oranda meydana gelen zorluklara karşı bir sistemin çalışabilirliğini belirlemektedir (Jones, 2021). Ancak bir sistemi gürbüz olarak tanımlayabilirken, nominal çalışma ortamının kapsamını genişletip sadece güvenilir olarak da tanımlamak mümkündür. Ancak dirençlilik tanımına beklenmeyen unsurlar da dahil edildiğinden çalışma ortamının kapsamını genişleterek güvenilir veya gürbüz olarak tanımlamak mümkün olmayacaktır. Afet ortamları özellikle beklenmeyen durumları içerdiğinden sistemlerin özellikle dirençli olarak tasarlanmaları gerekmektedir.

Dirençli sistemlere 4 adımda erişilir: Birinci adımda güvenilirlik şartları belirlenir, parça sayısı azaltılır, güvenilir parçalar kullanılır, yedekler bulundurulur. İkinci adımda yedeklemeler çeşitlendirilir. Üçüncü adımda güvenilirlik şartları genişletilerek bilinen risklere karşı önlem alınır. Dördüncü adımda ise kapasite artırılır, yeniden yapılandırılabilir ve yeniden amaçlandırılabilir parçalar kullanılır, hasar yaratacak durumlar azaltılmaya çalışılır ve izleme/düzeltme altyapısı kurulur (Jones, 2021).

3.5. Afet Aydınlatma, Enerji, Haberleşme Bütünleşik Ağı Tasarımı

Afet bölgesinde bulunan bir kişinin cep telefonu vasıtasıyla iletişimini sağlayabilmesi için iki temel unsur bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kişinin telefonunun çalışabilir durumda ve şarjlı olması, ikincisi ise aktif bir internet ağına bağlanabilmesidir. Bu iki şartı aynı anda yerine getirecek basit yapıda tek bir çözüm muhtemelen en kullanışlı ve dirençli çözüm olacaktır.

Afetzedelerin haberleşme gereksinimlerinin bütünleşik olarak sağlanması amacıyla bir Afet Enerji-Haberleşme Ağı önerilmektedir. Bu ağ İBB-İPA raporunda bahsi geçen öneriler doğrultusunda tasarlanacaktır. Bu haberleşme ağının gerek fiziksel yapı gerekse operasyonel anlamda gürbüz veya mümkünse dirençli olarak kurulması gerekmektedir. Gürbüz sistem tasarımına afet sonrası ortamının nasıl olacağının tahmin edilmesi ve bu tahminlerin dahil edilmesi gerekir. Sistemin dirençli olarak tanımlanabilmesi için afetin tahmin edilen sonuçlarının ötesinde bir takım dış etkilerin gerçekleşebileceği ve sistemin buna rağmen kendisinin çalışmaya devam edebilmesi veya hızlı bir şekilde tamir edilebilmesi gerekmektedir.



Şekil 1: Afet şebeke-direk tasarımı

Bu haberleşme ağının bileşenleri Tablo 3'de gösterilmektedir. Temel bileşenler güç üretimi, güç aktarımı (transmisyon), ulusal haberleşme ağı bağlantısı, veri modülasyonu ve gerekirse enjeksiyonu, afet haberleşme ve aydınlatma direğidir.

Tablo 3: Afet şebeke-direk bileşenleri

Bileşen	**Kaynak ve ek ekipmanlar**
Güç Üretimi	Ulusal enerji ağı, dizel jeneratör, gaz türbin, güneş ve rüzgar (yenilenebilir enerji kaynakları)
Güç Aktarımı	-
Veri Aktarımı	BPL, fiber
Kablosuz Erişim Noktası	-
Mobil Şarj Noktaları	-
Sensörler ve IoT Cihazları	İnternet bağlantılı ortam kamerası, bilgi ekranı, ivme ölçer, aktüatörler, sensörler
Aydınlatma ve Özel İhtiyaçlar	-

Şekil 1'de ilgili direğin mühendislik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı güç üretim kaynaklarından alınabilecek elektrik enerjisi ile diğer bileşenler için gerekli olan güç sağlanacaktır.

3.5.1. Güç Üretimi

Afet anlarında elektrik üretimi ve aktarımında yaşanan sorunlara karşı acil durum güç üretimi yapacak karma bir tesis önerilmektedir. Bu tesis ulusal elektrik ağına mevcut elektrik dağıtım şebekelerinden ayrı bir hatla bağlanacak, ayrıca kendisi de muhtelif yöntemlerle elektrik üretecektir. Elektrik üretimi için yüksek güçlü standart dizel jeneratörler (2.000 KVA), gaz türbin çevrim santrali (50 MW), güneş panelleri ve rüzgâr türbinlerinin bazılarını veya hepsini kullanmak mümkündür. Güneş panellerinin günlük döngüleri, rüzgâr türbinlerinin de depreme dayanıklılık sorunları nedeniyle kullanımlarının kısıtlı olmaları beklenmelidir. Dizel jeneratörler ile gaz türbin santrali arasındaki seçim ihtiyaç duyulacak güce ve kullanım süresine bakarak belirlenecektir. Güç kapasitesi gaz türbin santrallerinde daha yüksek olmakla beraber yakıtın saklanması ve santralin işletilmesi daha karmaşıktır. Dizel jeneratörleri ise yaygın ve olgun teknolojilere sahiptir; ölçeklendirme ile de istenilen güç kapasitelerine ulaşılabilir. Bu sebeplerle güç üretimi için öncelikle dizel jeneratörler seçilmelidir. Elektrik üretimi yöntemleri Tablo 4'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 4: Elektrik üretimi yöntemleri

Yöntem	**Olumlu**	**Olumsuz**
Ulusal Enerji Ağı	Sürekli, düzenli, yüksek güçte	Depremden etkilenme olasılığı yüksek
Dizel Jeneratör	Güvenilir, basit, kolay bakım	Sınırlı kapasite, yakıt tedariki ihtiyacı
Gaz Türbin	Yüksek güç	Karmaşık, eleman ihtiyacı, yakıt ihtiyacı
Güneş	Ölçeklendirilebilir, yakıt ihtiyacı yok	Gündüz belirli saatlerde enerji sağlar
Rüzgâr	Ölçeklendirilebilir, yakıt ihtiyacı yok	Kule deprem riski taşır, güvenilir değil.

Direklerde güneş veya rüzgârdan güç üretimi teknik olarak mümkün olsa da bu yöntemin sistemin karmaşıklığını artıracağından, kaynakta enerji kesilmesi durumunda zaten direklerin bağımsız olarak görevlerini yerine getiremeyeceğinden ve direkte üretilen gücün yeterli olamayacağından dolayı uygun görülmemiştir ($1m^2$ güneş paneli güneşin en parlak olduğu anlarda ancak 300 W enerji üretmektedir. Bir direğin taşıyabileceği güneş paneli ile kullanışlı bir güç üretmek ya da direğin ihtiyacının güneş panelinden karşılanması mümkün gözükmemektedir. Direğin tepesine yerleştirilecek dikine kanatlı kompakt yapıda rüzgâr türbinleri ile 3-10 KW arasında enerji üretmek mümkün olsa da bunun rüzgârın yeterince kuvvetli estiği anlarda mümkün olacağını, batarya kullanımının karmaşıklığı artıracağı, fırtınalarda direğin ve tüm ekipmanların hasar görebileceğini ve diğer olumsuzlukların da yaşanabileceğini unutmamak gerekir.).

3.5.2. Güç Aktarımı

Güç aktarımında yapılacak en temel seçim sistemin voltajı olacaktır. Sistem 220/380 volt üzerinden aktarım yapabileceği gibi daha yüksek voltaj da kullanılabilecektir. Düşük voltajın avantajı kullanılan cihazların büyük bölümünün bu tüketici voltajına ayarlı olmaları ve ayrı bir transformatöre gerek duymamalarıdır. Yalnız düşük voltaj üzerinden akım çekilmesi durumunda sistem uzak mesafelerde voltaj kaybına uğrayacaktır. (Bir direğin çekeceği akımın 30A civarında olacağı varsayımıyla, 0,01 Ohm/km dirençli $2500mm^2$ kablo bağlı direk başına km'de 0,3 V voltaj kaybına uğrayacaktır. Buna göre 1 km aralıklarla direk yerleştirilen 10 km'lik bir hattın sonundaki voltaj kaybı ise yaklaşık 17V olarak hesaplanır.)

Ancak günümüzde sisteme bağlanacak cihazların neredeyse tamamının elektronik güç kaynaklarına sahip olması nedeniyle bu durum kullanımda herhangi bir etki yaratmayacaktır. Kullanılacak kabloların çekilecek gücü sorunsuz karşılayacak ölçüde (kalınlıkta) olması, yer hareketlerinin doğuracağı esnemelere karşı boşluklarının olması, olası yapısal hasarlardan etkilenmeyecek şekilde sağlam olması, parazitlere karşı ekranlanmış olması gibi özellikleri olmalıdır.

3.5.3. Veri Aktarımı

Veri aktarımı için 2 alternatif önerilmektedir. Bunlardan birincisi Elektrik Şebekesi üzerinden Geniş Bant yöntemdir. İngilizcesi Broadband over Power Line (BPL) olan bu yöntem elektrik dağıtım şebekesi üzerinden (aynı kabloları kullanarak) yüksek hızlı (400 Mbps) haberleşme yapılmasıdır. Alternatif akım 50 Hz (düşük) frekansa sahip olduğu için 2-80 MHz (yüksek) frekans kullanılarak sinyaller karışmadan veri haberleşmesi yapmak mümkündür. Elektrik şebekesi üzerinden veri haberleşmesi 100 yıldan fazladır uygulanmakta olup, dağıtım şirketlerince cihazların kontrolü ve düşük hızlarda veri aktarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin en büyük iki sorunu benzer frekanslardaki radyo ve telsiz yayınlarının elektrik şebekesine karışabilmesi ve şebekeye bağlı cihazların oluşturdukları gürültüdür. Bu olumsuzluklar ekranlı (elektromanyetik yalıtılmış) kablo kullanılarak ve bağlı cihazların sayısını ve kalitesini kontrol altında tutarak ortadan kaldırılabilir.

İkinci yöntem ise elektrik şebekesi yanında ikinci bir veri hattı çekilmesi ile ve haberleşmenin bu hat üzerinden yapılmasıdır. Bu hat günümüzde fiber kablo kullanmakta olup çok yüksek haberleşme hızları sağlayabilmektedir. İkinci bir hattın bulunması sistemin karmaşıklığını artıracak dolayısıyla az da olsa güvenirliğini düşürecektir.

Tablo 5: Veri aktarım yöntemleri

Yöntem	Olumlu	Olumsuz
BPL	Tek hat, daha az karmaşık	Nispeten düşük hız, niş teknoloji
Fiber	Çok yüksek hız, yaygın teknoloji	İkinci hat, artan hasar riski.

İki teknolojiden birinin diğeri üzerine net bir üstünlüğü görülmemektedir (Tablo 5). Ancak Türkiye'de fiberoptik teknolojilerinin yaygın olarak kullanılması ve bu konuda bilgi ve deneyime sahip elemanların bulunması sebebiyle fiberoptik haberleşme ağı kullanılması daha uygun bulunmuştur.

3.5.4. Kablosuz Erişim Noktası

Kablosuz Erişim Noktası (KEN) dizüstü bilgisayarı, tablet ve cep telefonu gibi mobil cihazların en yaygın ağ bağlantısı biçimidir. Bu haberleşme yöntemi IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association)'nin 801.11X standartlarıyla belirlenmiştir. KEN'ler kablolu veri hattından gelen sinyali mobil cihazlara aktarır. Bağlanan cihaz sayısı, bunların antenden uzaklıkları, arada engel olup olmadığı gibi etmenler her birinin erişeceği maksimum hızları etkilemektedir. Bir bağlantı noktasına 100 cihaza kadar bağlanabilmektedir; toplam cihaz sayısını artırmak için KEN sayısını artırmak yeterlidir. KEN'e erişim şifreli veya açık olabilir. Açık erişimin destekleyicileri arasında Electronic Frontier Foundation bulunmaktadır (EFF Elektronik Sınır Vakfı, 2011). Afet bölgelerinde şifresiz açık erişimin avantajları aşikârdır.

3.5.5. Mobil Şarj Noktaları

Cep telefonları ve benzeri mobil cihazların şarj edilebilmeleri için şarj standartları belirlenmiştir. 2015 Yılından itibaren yaygın olarak Quick Charge 2.0 (QC) standardı kullanılmaktadır. Bu standarda göre 5V ve 9V voltajla 1,67A, 2A ve 3A akımla maksimum 18W'a (2A x 9V) kadar şarj gücü sağlanabilmektedir. 2020 Yılından itibaren yaygınlaşan Quick Charge 4 standardıyla da 25W (2,6A x 9V) ve 100W (5A x 20V) şarj desteği sağlanmaktadır (Wikipedia, 2024). Yeni nesil mobil cihazlar daha üst standartları destekleyerek daha hızlı şarj olabilme imkanına sahip olmanın yanında düşük güçlü kaynaklardan daha yavaş da olsa şarj olabilmektedirler.

Mobil cihazların şarj cihazlarının bağlantı uçları da çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitliliğin azaltılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Avrupa Birliği'nde yıllardır süren standartlaşma çalışmaları önce micro-USB (European Commission, 2009) daha sonraları ise USB-C (European Parliament, 2022) bağlantı uçları standart olarak kabul edilmiştir. Apple Bilgisayar'ın Lightning standardı da böylece sona ermiştir.

Mevcut mobil cihaz stoğuna dayanarak micro-USB ve Lightning QC2 ile USB-C QC4 standardında şarj uçlarının sağlanması uygun olacaktır. Bunlarla uyumlu olmayan farklı tipteki bağlantı uçları için ise USB güç çıkışı ile desteklenebilir. Bunların dışındaki tüm şarj cihazlarının uygun olduğu durumlarda 220V prizleri kullanması hala mümkün olacaktır.

USB şarj noktaları aynı zamanda internet bağlantısı da sağlayabilirler. Bu yöntem Wi-Fi bağlantılarını destekleyerek toplam bağlanan cihaz sayısını artıracaktır (USB üzerinden bağlantı (İngilizce'de Tethering) mobil cihaz modellerine göre farklılık gösterecek ve kullanıcıya özel ayarların yapılmasını gerektirecektir.).

Mobil cihazların haberleşme dışında kullanım alanları içinde aydınlatma (fener) ve çocukların oyalanması için oyunlar da bulunmaktadır.

3.5.6. Sensörler ve IoT Cihazları

Veri ağlarına doğrudan bağlanabilen cihazlar arasında sensörler, minyatür eyleyiciler (aktüatör), ses cihazları ve gösterge panelleri bulunur. Bu cihazlar ortamı algılayıp ölçümleri sunucu bilgisayarlara aktarır, basit hareketler sağlayabilir veya iletişim kurulmasını sağlayabilir. Örneğin ivmeölçerler bir nesnenin ayakta olup olmadığını, voltaj veya akım ölçerler elektrik enerjisini veya kaçağın olup olmadığını, aktüatörler bir kapağın açılıp kapanmasını, ışıkların yanıp sönmesini sağlayabilirler. Yine internete bağlı cihazlar üzerinden tek veya çift taraflı olarak yazılı, sesli veya görsel iletişim sağlanabilir. Bu cihazlar sırasıyla şunlardır:

İnternet bağlantılı ortam kamerası: Direğin bulunduğu ortamın gözlenmesi ve afet desteği sağlayan tüm kuruluşlara görsel bilgi aktarılması için farklı çözünürlüklerde (geniş açı, telefoto, vb.) farklı ışıklarda çalışan (görünür, infrared vb.) kameralardır.

Bilgi ekranı: Afetzedeleri bilgilendirmek, anlık mesajlar iletmek, kullanım yönergeleri gösterebilmek ve benzeri amaçları gerçekleştirecek internet bağlantılı dokunmatik ekranlardır. Bir içerik yönetim uygulaması ile gerektiğinde tek taraflı genel duyurular, gerektiğinde ise çift taraflı kişisel haberleşme sağlanabilir.

İvme ölçer: Bu cihazlar sarsıntıların büyüklüğü hakkında hassas veri sağlayabileceği gibi deprem sonrasında bir direğin ayakta olup olmadığını veya ne kadar yatık olduğunu da ölçebilir.

Aktüatörler: Uzaktan komut verilmesi ile basit fiziksel işlemleri gerçekleştirmeye yarayan cihazlardır. Bir elektrik düğmesinin veya sigortanın açılıp kapanması, bir kapağın açılıp kapanmasını aktüatörler sayesinde uzaktan yapmak mümkündür. Aktüatörler ile hasarlı direklerin elektrik bağlantıları kesilerek kullanıcı güvenliği sağlanabilir.

Sensörler: İnternet bağlantılı sensörler ortam ile ilgili fiziksel verileri (sıcaklık, nem, elektrik akımı, ışık miktarı vb.) tek taraflı olarak bir merkeze iletmeye yarayacaktır. Bu veriler afetzedelerin ihtiyaç önceliklerinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır.

3.5.7. Aydınlatma ve Özel İhtiyaçlar

Haberleşme öğelerinin yanında direğin aydınlatma ve özel enerji ihtiyaçları için de kullanılması mümkündür. Enerjinin ulaşabildiği noktaların aydınlatılması düşük güçle çalışan LED sokak lambalarıyla yapılacaktır. Bu cihazlar hem yüksek enerji verimine sahiptir hem de katı hal yapıları sebebiyle fiziksel darbelerden daha az etkilenmektedir. Lambaların gücü, sayısı ve yönlendirmeleri direklerin boyu ve aydınlatılacak alanın büyüklüğüne bağlı olacaktır.

Özel enerji ihtiyaçları içerisinde akülü tekerlekli sandalyeleri ve elektrikle çalışan tıbbi destek cihazlarını (Örn. solunum cihazları, oksijen konsantratörleri, beslenme pompaları) sayabiliriz. Akülü tekerlekli sandalyeler için 3-pin bağlantı uçlu 24V/2-8A standart şarj sağlanacaktır. Tıbbi cihazlar için ise 220V/5A (1KW) topraklı prizler bulundurulacaktır.

3.6. Kapasite İhtiyacı

Sistemin kapasitesi farklı boyutlarda hesaplanır. Bunlar veri, enerji ve kullanıcı boyutlardır. Her bir direkteki ihtiyaç hesaplandıktan sonra toplam sistem kapasitesi hesaplanacaktır.

Veri: Veri aktarımı iki farklı kapasite ölçüsünü gerektirir. Bunlardan birincisi bir direğin aynı anda kaç kullanıcıya hizmet vereceği yani bağlantı sayısı. İkincisi ise her bir bağlantının ve direğin toplam veri hızları. Huawei tarafından stadyumlarda kablosuz veri aktarımı sağlanması için yapılmış olan vaka analizinde bir bağlantı noktasından %30 kullanım oranı ile yaklaşık 300 kişiye 2Mbps hızlarla haberleşme erişimi verileceği öngörülmüştür (Huawei, 2024). Bu değer bir KEN'in yaklaşık 100 bağlantıyı destekleyeceği varsayımı ile de uyumludur. Buna göre bir direğe kurulacak 4 KEN ile aynı anda 400 bağlantı ile direğin çevresinde bulunan 1.200 kişiye erişim sağlanabilecektir. Gün içerisinde direğin çevresinde bulunan kişilerin 4 kez yenileneceği varsayımıyla toplamda 5 bin kişiye (mobil cihaza) haberleşme desteği sağlanabilecektir. Her bir cihazın 2 afetzede tarafından kullanılacağını varsayarsak bir direğin yaklaşık 10 bin afetzedeye erişim imkânı sağlayacaktır. Afet bölgesinde minimum haberleşme hızının 1 Mbps olması düşünülmüştür. Amaç temel iletişimin (ses, yazı, küçük boy dosya) sağlanması olacağı için oyunlar, video akışı ve yoğun veri kullanan diğer sitelere erişim engellenebilir, bağlantı hızları kısılabilir. Bu varsayımlara göre bir direğin toplam veri ihtiyacının 400 kişi x 1 Mbps = 400 Mbps civarında olacağı öngörülmektedir. Bu ise tipik bir ticari fiberoptik bağlantının sınırları içerisindedir. Direkte kurulu diğer gözlem ve haberleşme cihazlarının veri ihtiyacını karşılamak ve birinci bağlantıyı yedeklemek için ikinci bir fiber bağlantı veya BPL bağlantısı yeterli olacaktır.

Enerji: Bir direkte afetzedeler için şarj bağlantıları, veri cihazları ve aydınlatma için enerji ihtiyacı bulunmaktadır.

Sokak Aydınlatma: Şehir aydınlatması için kullanım alanlarına göre direk başına 3.000 lumen (ara sokaklar) ila 50.000 lumen (ana caddeler ve kavşaklar) arasında aydınlatma (ışık akısı) önerilmektedir. Yeni nesil LED aydınlatma gerek ömürleri gerek ek cihaz (balast vs) ihtiyacı olmaması gerekse katı hal yapıları sebebiyle diğer ışık kaynaklarına göre avantajlıdır. LED'in ışık verimi 100 lumen/watt'dan daha yüksektir.

Direkler için üst sınır olan 50.000 lumen önerilmektedir. Bu miktarda ışığın sağlanması için ise 500 W kaynak gerekmektedir. Tasarımda aydınlatma için emniyet faktörleri de dahil 1.000 W kaynak ayrılacaktır (Design Manual, 2020).

Mobil Şarj Noktaları: Mobil cihazlar şarj standartlarına göre 18, 25 veya 100 Watt güç çekmektedirler. En yaygın bağlantı uçları da micro-USB, Lightning ve USB-C standartlarıdır. Bunlardan Lightning Apple tarafından iPhone ve iPad modellerinde Eylül 2023 yılına kadar kullanılmış ve USB-C ucuna geçilmiştir (Shakir, 2023). Samsung ve diğer telefon üreticileri ise çok daha önceden USB-C kullanmaya başlamışlardı (Brian, 2020). Geleceğe yönelik bir tasarımın ağırlıklı olarak USB-C kullanırken mevcut telefonları da desteklemesi beklenmelidir. Direğin fiziksel tasarımı 10'lu bağlantı destelerinden 6 adedine izin verecektir. Bu destelerden 1 adedi micro-USB, 1 adedi Lightning, 3 adedi 25W USB-C ve 1 adedi de 100W USB-C standardına ayrılacaktır. Böylece toplam 20 adet 18W, 30 adet 25W ve 10 adet 100W bağlantı noktası olacaktır. Kayıplar ve emniyet payı ile kapasite ihtiyacı yaklaşık olarak 2,500 W olarak belirlenecektir.

Engelli Şarj Noktası: Engelliler tarafından kullanılan akülü tekerlekli sandalyelerin şarjı için 3-pin 24V (27V) 8A şarj cihazları mevcuttur. Bu cihazlar bir sandalyeyi 6-10 saatte şarj edebilmektedir. Bir tam şarj kişinin günlük mobilite ihtiyacını (10-30 km menzil) rahatlıkla karşılayabilmektedir. (kaynak: muhtelif web sayfaları) İstanbul'da bulunan akülü sandalye sayısı hakkında bir istatistiğe erişilememiş olmakla beraber nüfusun %1'inin tekerlekli sandalye ihtiyacı olduğundan (World Health Organization, 2010) yola çıkarak İstanbul'da yaklaşık 150.000 kişinin tekerlekli sandalye ihtiyacı olacağı, akülü sandalye sayısının ise 50-100 bin arasında olacağını varsayabiliriz. Sandalye genişlikleri 70-75 cm olarak kabul edilirse bir direğin yakınlarında 2 ya da 3 sandalye park edilebilecektir. Kapasite ihtiyacının 600W civarında olacağı düşünülmektedir

Standart Priz: Ev tipi tıbbi destek cihazları kullandıkları enerjiyi 220V tek fazlı topraklı elektrik prizlerinden almaktadır. Bu cihazların elektrik kullanımları genellikle 200W'ın altında olmakla beraber bazı modeller 900W'a kadar güç çekebilmektedir. Bu güç ihtiyacını karşılayacak 220V 5A (1.000W) standart prizler eklenecektir. Prizler medikal amacı dışında müsait olmaları halinde taşınır bilgisayar, elektrikli bisiklet, vb düşük güçte cihazların şarj edilmesi için de kullanılabilecektir (Heltman, 2024).

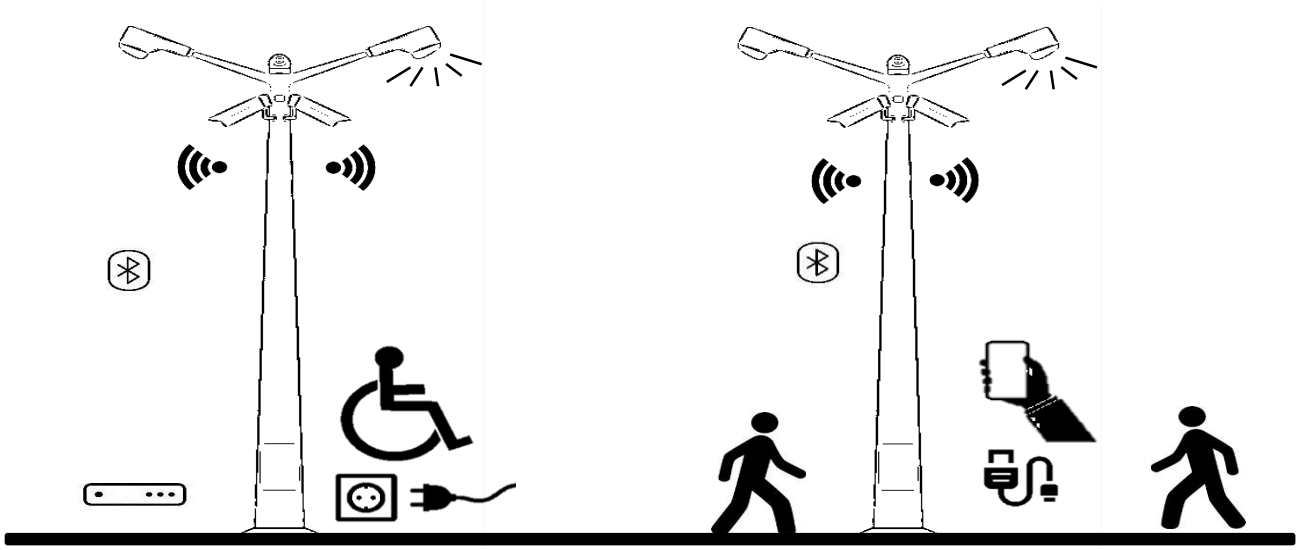
Bir direk civarında medikal ihtiyacı olan 2 kişiyi oturtmak veya yatırmaya yetecek alan bulunacaktır. Toplam kapasite ihtiyacı yaklaşık 2.500 W'tır.

Elektronik Haberleşme Cihazları: Aktüatörler, sensörler, kameralar, ekranlar vb cihazların çoğu düşük güçlerle çalışmaktadır. Bu sebeple toplamda 1.500 W gücün yeterli olacağı düşünülmektedir. Ancak antenler, yönlendiriciler ve diğer haberleşme cihazlarının da 1.000 W'a yakın güç çekeceğini düşünürsek elektronik haberleşmeye ayrılacak güç kapasitesi 2.500 W olarak hesaplanmaktadır (Cisco, 2019; Huawei, 2024).

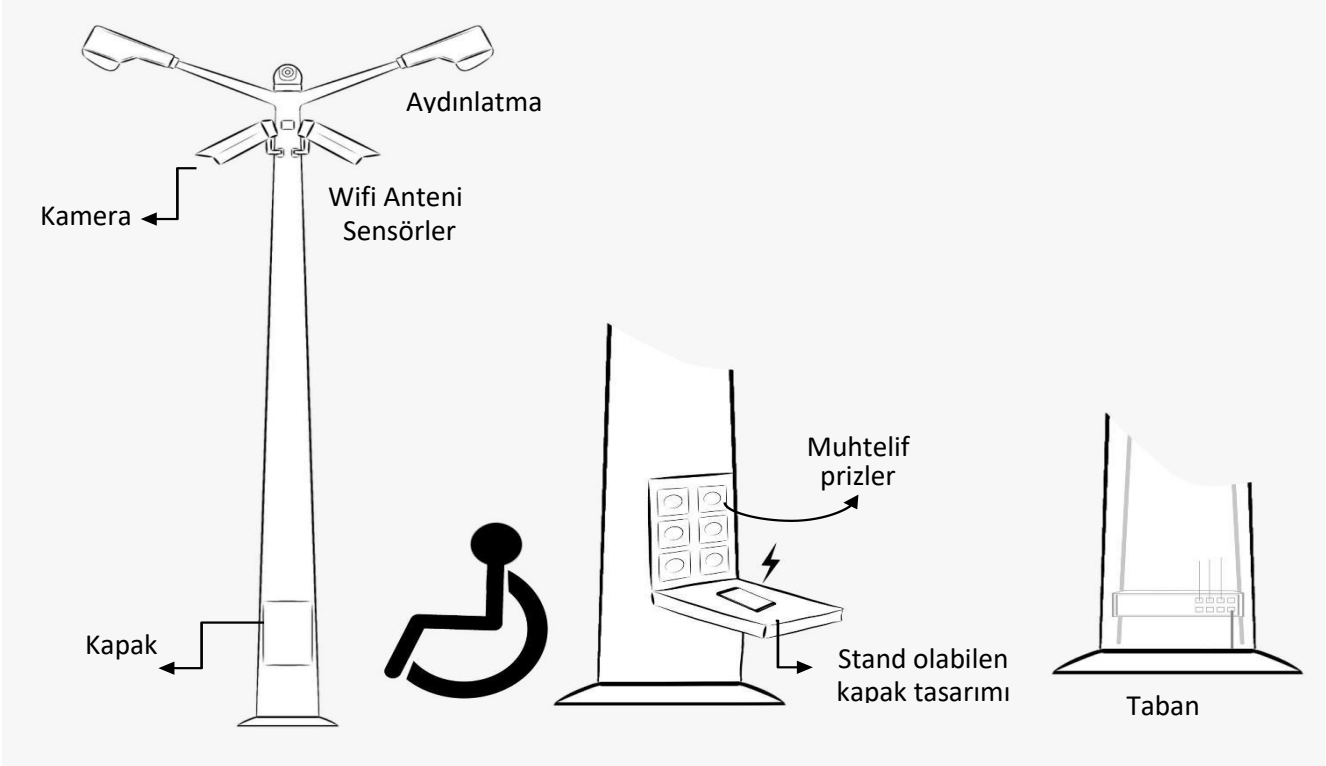
Bir direğin güç ihtiyacı çekilecek maksimum bağlantı sayısına ulaşıldığında ana hattan çekilecek maksimum güce eşittir. Bu miktar 7 kW civarında olmakla beraber emniyet payları ile birlikte ayrılmış güç kapasitesi 10 kW'tır. Güç kullanımının detayları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 6).

Tablo 6: Güç kullanım detayları

Cihaz	Güç	Adet	Toplam Güç	Ayrılmış Kapasite
LED Aydınlatma	500 W	1	500 W	1.000 W
USB (hızlı şarj)	18 W	20	360 W	500 W
USB-C	25 W	30	750 W	1.000 W
USB-C (yüksek güç)	100 W	10	1.000 W	1.000 W
12/24 8A 3 fişli	200 W	3	600 W	600 W
220V 5A	1.100 W	2	2.200 W	2.500 W
Wi-Fi erişim noktaları	125 W	4	500 W	500 W
Yönlendiriciler	200 W	2	400 W	400 W
Sensörler	10 W	20	200 W	250 W
Aktüatörler	10 W	20	200 W	250 W
Muhtelif	---	---	500 W	1.000 W
Emniyet payı				1.000 W
TOPLAM			**7.210 W**	**10.000 W**



Sekil 2: Afet şebeke-direk prototipi



Şekil 3: Afet şebeke-direk tasarımı

Afet şebeke-direği gövde üzerine donanımları barındıracak yuvaları içermektedir (Şekil 2). Bu yuvalar hava koşullarından etkilenmeyi engellemek adına korumalı olarak tasarlanmıştır. Şarj için priz, kablo giriş noktaları, internet dağıtımı için donanımlar, aydınlatma ünitesi ve sensörler gövde üzerinde yer almaktadır (Şekil 3).

3.6.1. Afet Enerji-Haberleşme Bütünleşik Ağı Kapasiteleri

Sistem bir bölgesel yönlendirici veri merkezi ve buna bağlı direklerden oluşmaktadır. Direklerin enerji ihtiyacı yukarıda hesaplanmıştı. Veri merkezinin enerji ihtiyacı ise kişi başı enerji ihtiyacı ile bağlı kişi sayısının çarpımı ile bulunacaktır (Hinton vd., 2011).

Kenar ağlar için (İngilizce'de edge network) için kişi başı güç kullanımının 5 W'ın altında olduğunu hesaplamışlardır. Buna göre aynı anda 400 kişinin bağlı olduğu her direğin karşılığı olarak yaklaşık 2.000 W sunucu gücü (toplamda 12 KW) olacaktır.

Üretilen elektrik gücü açısından ele alındığında bir adet 2.000 KVA gücündeki jeneratör ile bu direklerden yaklaşık olarak 120 adedini desteklemek mümkündür. Direkler 1'er km aralıklarla yerleştirilmesi durumunda her biri 1 km^2'lik bir alana hizmet vereceklerdir.

İstanbul'da depremden en çok etkilenecek bölgelerin yerleşim alanının yaklaşık 1.200 km^2 ve nüfusun 13 milyon kişi olduğunu varsayarsak ortalama nüfus yoğunluğu yaklaşık 10 bin kişidir. Bu sayı da bir direğin 1km2 alanı kapsaması varsayımı ile uyumludur. Bu alanı ise 10 adet veri merkezi ve 1.200 direk ile etkin olarak kapsamak mümkün olacaktır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, afet sonrası süreçlerde kritik öneme sahip olan aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyaçlarının tek bir kaynaktan karşılanması amacıyla çok fonksiyonlu bir direk tasarımı geliştirmiştir. Literatür taraması ve mühendislik tasarımı yöntemlerine dayanan bu hibrit direk, farklı enerji üretim sistemlerini, kablosuz iletişim teknolojilerini ve çeşitli veri aktarım bileşenlerini entegre ederek, afetzedelerin temel ihtiyaçlarını hızlı ve etkili bir şekilde karşılamayı amaçlamaktadır. Direğin modüler yapısı, şehirlerin farklı bölgelerinde esnek bir şekilde uygulanabilme potansiyeli sunmaktadır.

Sonuç olarak, afetlerde aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyaçlarının tek bir kaynaktan karşılanması bazı zorluklar barındırsa da, dayanıklı şebeke mimarileri, enerji verimli tasarımlar ve yenilikçi altyapı çözümlerinin birleşimi bu ihtiyaçların etkili bir şekilde karşılanabileceği görülmüştür. Bu sistemin öncelikli olarak bir pilot alanda uygulanması ve zaman içerisinde belediyeler, bakanlıklar ve diğer kuruluşların ortaklığı ile tüm şehir boyunca afete dayanıklı alanlara entegre edilmesi gerekmektedir. Afet parkları, toplanma alanları, güvenli yol hatları gibi alanlara uygulanacak olan bu çok fonksiyonlu afet direkleri aydınlatma, haberleşme ve enerji ihtiyacının tek noktadan ve sürdürülebilir şekilde giderilmesini sağlamaktadır.

Farklı ihtiyaçlar doğrultusunda çok fonksiyonlu afet direk tasarımında yenilik ve eklemeler yapılabileceği gibi, gelişen teknoloji ile farklı donanımlar vasıtası ile ihtiyaçlar giderilebilecektir. Standart tasarıma sosyo demografik yapıyı da dikkate alarak bölge veya kentler özelinde farklı eklentiler ilave edilebilir.

Bununla birlikte, gerçek dünya felaket senaryolarında etkinliklerini sağlamak için sürekli bakım ihtiyacı ve bileşen arızası riski gibi bu sistemlerin potansiyel sınırlamalarını dikkate almak önemlidir. Bu sistemlerin nesnelerin interneti gibi teknolojiler ile uzaktan bakımlarının ve güncellemelerinin yapılması, periyodik olarak izlenmesi gibi faaliyetler afet sonrasına hazırlıkta önemli rol oynamaktadır.

Kaynaklar

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2019). *Afet ve acil durum çantası nasıl hazırlanmalı?* 16 Eylül 2024'te https://www.afad.gov.tr/afet-ve-acil-durum-cantasi-nasil-hazirlanmali adresinden alındı.

Akizuki, Y., Komatsu, Y., Yamaguchi, H., & Nagamachi, S. (2023). *Application of night-time landscape lighting to disaster prevention.* [Conference presentation]. Commission Internationale de L'Eclairage. https://doi.org/10.25039/x50.2023.PO046

AKUT Vakfı. (2024). *Acil Durum Çantası*. 16 Eylül 2024'te https://akutvakfi.org.tr/magaza/acil-durum-cantasi/ adresinden alındı.

Al-Bahadili, H. (Ed.). (2012). *Simulation in Computer Network Design and Modeling: Use and Analysis: Use and Analysis*. IGI Global.

Ali, K., Nguyen, H. X., Vien, Q. T., & Shah, P. (2015, March 23–27). *Disaster management communication networks: Challenges and architecture design* [Conference presentation]. 2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), St. Louis, USA.

Aljada, M., Alameh, K., & Al-Begain, K. (2006, January 17–19). *Distributed wireless optical communications for humanitarian assistance in disasters* [Conference presentation]. Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'06), Kuala Lumpur, Malaysia.

Austin, R., Bull, P., & Buffery, S. (2017, August 21–23). *A raspberry Pi based scalable software defined network infrastructure for disaster relief communication* [Conference presentation]. IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Prague, Czech Republic.

Brian, K. (2020). *Samsung Galaxy Note 3 Review*. 16 Eylül 2024'te https://www.anandtech.com/show/7376/samsung-galaxy-note-3-review adresinden alındı.

Cisco. (2019). *Cisco Aironet 1552S Outdoor Access Point*. 16 Eylül 2024'te https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1550-series/data_sheet_c78-711419.pdf adresinden alındı.

Dargahi, T., Momeni, S., & Shafiei, H. (2017). *Post disaster resilient networks: design guidelines for rescue operations*. 16 Eylül 2024'te https://svs.informatik.uni-hamburg.de/publications/2017/DaMS2017-iNetSec2017-talk.pdf adresinden alındı.

Design Manual. (2020). *Street lighting*. 16 Eylül 2024'te https://cdn-wordpress.webspec.cloud/intrans.iastate.edu/uploads/sites/15/2020/03/Chapter_11.pdf adresinden alındı.

EFF Elektronik Sınır Vakfı. (2011). *Why We Need An Open Wireless Movement*. 16 Eylül 2024'te https://www.eff.org/deeplinks/2011/04/open-wireless-movement adresinden alındı.

European Commission. (2009). *Commission welcomes industry's commitment to provide a common charger for mobile phones*. 16 Eylül 2024'te https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_09_1049 adresinden alındı.

European Parliament. (2022, April 20). *USB-type C to become EU's common charger by end of 2024*. 16 Eylül 2024'te https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20220413STO27211/usb-type-c-to-become-eu-s-common-charger-by-endof-2024 adresinden alındı.

Flikkema, P. G., & Vigil-Hayes, M. (2017, December 11–14). *Self-adaptive and resilient urban networking infrastructure for disasters and smart city services* [Conference presentation]. IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Boston, USA.

Hazra, K., Shah, V. K., Bilal, M., Silvestri, S., Das, S. K., Nandi, S., & Saha, S. (2019, January 7–11). *A novel network architecture for resource-constrained post-disaster environments* [Conference presentation]. 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Bengaluru, India.

Hazra, K., Shah, V. K., Silvestri, S., Aggarwal, V., Das, S. K., Nandi, S., & Saha, S. (2020). Designing efficient communication infrastructure in post-disaster situations with limited availability of network resources. *Computer Communications*, *164*, Article 5468. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.09.019

Helal, M. A., & Puckeridge, L. (1990). *Communication system for single point emergency lighting* (U.S. Patent No. 4,977,353). Patent and Trademark Office.

Heltman. (2024). *Çok Fonksiyonlu Oksijen Konsantratörü*. 16 Eylül 2024'te https://www.heltman.com.tr/urunler.php?id=20 adresinden alındı.

Hinton, K., Baliga, J., Feng, M., Ayre, R., & Tucker, R. S. (2011). Power consumption and energy efficiency in the internet. *IEEE Network*, *25*(2), 6–12.

Huawei. (2024). *Scenario-based WLAN Planning Design for Stadiums*. 16 Eylül 2024'te https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100144761 adresinden alındı.

İstanbul Planlama Ajansı. (2023, Şubat 25). *İstanbul Deprem Çalışma Grubu Toplantısı Özet Rapor*. 16 Eylül 2024'te https://ipa.istanbul/wp-content/uploads/2023/03/DEPREM-CALISTAYI-OZET-RAPOR-WEB-2.pdf adresinden alındı.

İzmir Ekonomi Üniversitesi. (2020). *Depremde cep telefonları hayat kurtarıyor*. 16 Eylül 2024'te https://ce.ieu.edu.tr/tr/news/type/read/id/7439 adresinden alındı.

Jia, C., Zhang, C., Li, Y. F., & Li, Q. L. (2023). Joint pre-and post-disaster planning to enhance the resilience of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, *231*, Article 109023. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.109023

Jones, H. (2021, July 12–15). *Going beyond reliability to robustness and resilience in space life support systems* [Conference presentation]. 50th International Conference on Environmental Systems, US.

Ju, C., Yao, S., & Wang, P. (2017, November 26–28). *Resilient post-disaster system reconfiguration for multiple energy service restoration* [Conference presentation]. IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China.

Karaman, B., Basturk, I., Taskin, S., Kara, F., Zeydan, E., & Yanikomeroglu, H. (2024). Enhancing resiliency of integrated space-air-ground-sea networks with renewable energies: a use case after the 2023 Turkiye earthquake. *IEEE Communications Magazine*, *62*(12), 104–111.

Kobayashi, S., & Kakudate, M. (2014, November 5–7). *City lights to a disaster area-lighting ınstallation of escape routes and the outdoor environment at the temporary architecture district* [Conference presentation]. 1st International Conference on Sustainable Lighting and Light Pollution, Seoul, Korea.

Kuang, B., Sanni, T. O., Shi, Y., Liu, M., Shao, W., & Chen, J. (2023). Investigation of the importance of residential energy services in normal days and natural disasters. *Computing in Civil Engineering, 2023*, 944–952. https://doi.org/10.1061/9780784485248.113

Lee, J., Aziz, A., Ma, S., Joe, I., & Choi, Y. (2015). The design and implementation of mesh-based dtn for disaster situations. In J.J. Park, H-C. Chao, H. Arabnia, & N. Y. Yen (Eds.), A*dvanced multimedia and ubiquitous engineering: Future Information Technology* (pp. 211–216). Springer.

Manimegalai, C. T., Kalimuthu, K., & Gauni, S. (2022). A research on bi-directional double clad optical fiber for 5G communication with multiband radio signal and power for disaster management in remote units. *Wireless Personal Communications*, *124*(1), 475–488.

Minguito, G., & Banluta, J. (2023). Resilient energy systems for disaster relief operations in the Philippines. *Journal of Asian Energy Studies*, *7*, 48–61.

Ngo, T., Nishiyama, H., Kato, N., Sakano, T., & Takahara, A. (2014). A spectrum-and energy-efficient scheme for improving the utilization of MDRU-based disaster resilient networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *63*(5), 2027–2037.

Noaman, D. S., & El-Ghafour, S. A. (2024). Holistic design of energy-efficient temporary houses: Meeting ventilation, heating, cooling, and lighting demands. *Journal of Building Engineering*, *86*, Article 108534. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108534

Saha, S., Shah, V. K., Verma, R., Mandal, R., & Nandi, S. (2012, August 22). *Is it worth taking a planned approach to design ad hoc infrastructure for post disaster communication*? Seventh ACM international workshop on challenged networks, Istanbul, Turkey. https://doi.org/10.1145/2348616.2348637

Shah, U. (2017). *Design of Disaster-Resilient Datacenter WDM Networks* [Master thesis, University of Windsor]. Electronic Theses and Dissertations. https://scholar.uwindsor.ca/etd/7396

Shah, V. K., Roy, S., Silvestri, S., & Das, S. K. (2019, January 4-7). *Towards energy-efficient and robust disaster response networks*. [Conference presentation]. 20th International Conference on Distributed Computing and Networking, Bangalore, India.

Shakir, U. (2023). *A history of Apple making us buy new cables*. 16 Eylül 2024'te https://www.theverge.com/2023/9/12/23859659/apple-cable-history-iphone-15-usb-c-lightning-mac-thunderbolt adresinden alındı.

Smith, N., Donaldson, M., Mitton, C., & Lee, E. (2024). Communication in disasters to support families with children with medical complexity and special healthcare needs: a rapid scoping review. *Frontiers in public health*, *12*, Article 1229738. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1229738

Takano, H., Hisano, D., Nakahara, M., Suzuoki, K., Maruta, K., Onodera, Y., ... & Nakayama, Y. (2021, April 25–28). *Visible light communication on LED-equipped drone and object-detecting camera for post-disaster monitoring* [Conference presentation]. IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), Helsinki, Finland.

Tan, H., & Hao, Y. (2022). Mapping the global evolution and research directions of information seeking, sharing and communication in disasters: a bibliometric study. *International journal of environmental research and public health*, *19*(22), Article 14878. https://doi.org/10.3390/ijerph192214878

Tanyaş, M., Aksoy, L., Dökmeci, H., Günalay, Y., & Küçük, B. (2014). Elektrik dağıtım şebekesi afet planlaması ilkeleri. *Ekonomik, Toplumsal ve Siyasi Analiz Dergisi*, *II*(4), 85–96.

Thulstrup, A., & Joshi, I. (2017). *Energy access: building resilience in acute and protracted crises* (WB no: 115061). World Bank Group.

Wen, J., Hu, Q., Lin, Z., & Xiao, K. (2018, October 13–15). *The Design and Research of the Pole Damage Prevention Device of Distribution Lines in Meteorological Disasters* [Conference presentation]. 2017 International Conference on Mechanical Design (ICMD2017), Beijing, China.

Wikipedia. (2024). *Quick Charge*. 16 Eylül 2024'te https://en.wikipedia.org/wiki/Quick_Charge adresinden alındı.

World Health Organization. (2010). *Fact sheet on wheelchairs*. 16 Eylül 2024'te https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/205041/B4616.pdf adresinden alındı.

Xiao, C., & Asiri, S. (2022, April 18–20). *A low-power, machine learning-based optical communications system for disaster relief* [Conference presentation]. 2022 ACM Southeast Conference (ACMSE '22), New York, United States.

Yeditepe Üniversitesi Hastaneleri. (2019). *Depremde çanta değil, yaşam üçgeni kurtarır*. 16 Eylül 2024'te https://yeditepehastaneleri.com/saglik-rehberi/saglik-yasam/depremde-canta-degil-yasam-ucgeni-kurtarir adresinden alındı.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 220–248, DOI: 10.21324/dacd.1532721

Antalya İlinde Yüzey Sıcaklıklarındaki Değişimler ve Orman Yangınları ile İlişkisi

Yasin Furkan Şenlik[1,*], Erkan Yılmaz[2]

[1]*Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, 06500, Ankara.*
[2]*Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 06410, Ankara.*

Özet

Bu çalışmada Antalya ilinin 2000-2022 yılları arasındaki ortalama yüzey sıcaklığı dağılışı ve eğilimleri incelenmiştir. Ayrıca 2003-2021 yılları arasında yüzey sıcaklıkları ile orman yangınları arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Çalışmada en düşük yüzey sıcaklıkları yükseltinin etkisiyle Bey Dağları ve Geyik Dağlarında belirlenmiştir. En sıcak yerlerin ise Aksu Ovası, Antalya Tufa Platosu ve Kestel Polye Sistemi olduğu görülmüştür. Çalışma sahasında gündüz saatlerinde genellik yüzey sıcaklıklarında azalış eğilimi görülürken, geceleri ise artış eğiliminin olduğu görülmektedir. Yüzey sıcaklığı ile orman yangını ilişkisini incelemek için 11 yangın belirlenmiştir. Yangın çıkış noktalarına ait uzun yıllık yüzey sıcaklıklarına uygulanan regresyon analizi sonucunda günün en sıcak saatinde, hiçbir yangın çıkış noktasında anlamlı bir sıcaklık artışının olmadığı görülmüştür. Yangınlardan önceki son 10 günde ise yalnızca 1 yangında sıcaklık artış eğiliminin olduğu tespit edilmiştir. 23 yıllık periyotta Antalya'da toplam 5076 orman yangınının gerçekleştiği ve bunların %87'sinin insan kaynaklığı olduğu görülmüştür. Sonuçta Antalya'da orman yangınları üzerinde ana faktörün insan olduğu, yüzey sıcaklıklarının ancak dolaylı olarak orman yangınlarını etkileyebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler
Yüzey Sıcaklığı, Orman Yangınları, MODIS, Antalya

Changes in Surface Temperatures and Their Relationship with Forest Fires in Antalya Province

Abstract

In this study, the distribution and trends of the average surface temperature of Antalya province between 2000-2022 are analyzed. It was also investigated whether there is a significant relationship between surface temperatures and forest fires between 2003-2021. The lowest surface temperatures were found in Bey Mountains and Geyik Mountains due to the effect of elevation. The warmest places are Aksu Plain, Antalya Tufa Plateau and Kestel Polje System. In the study area, there is generally a decreasing trend in surface temperatures during daytime hours, while there is an increasing trend at night. 11 fires were selected for examination of the relationship between surface temperatures and wildfire. As a result of the regression analysis applied to the long years surface temperatures of the fire exit points, it was observed that there was no significant temperature increase at any fire exit point during the hottest hour of the day. In the last 10 days before the fires, only 1 fire was found to have a temperature increase trend. In the 23-year period, a total of 5076 forest fires occurred in Antalya, 87% of which were caused by human activity. As a result, it is understood that the main factor affecting forest fires in Antalya is anthropogenic and that surface temperatures can only indirectly affect forest fires.

Keywords
Surface Temperature, Forest Fires, MODIS, Antalya

1. Giriş

Ormanlar; kendine mahsus bir ortamı olan, kendi kendine yetişebilen ya da insanlar tarafından yetiştirilebilen, asıl elemanları çalılık ve ağaç olmakla beraber bunlara farklı hayvan ve bitki türlerinin, mikroorganizma ve minerallerin de eşlik ettiği ve tüm unsurların etkileşim halinde bulunduğu yerlerdir (Kurt, 2014; Lund, 2014; Duran, 2023).

Orman yangınları; ister canlı ister cansız olsun ormanda bulunan ve yanabilen ağaç, yaprak, ibre, dal vb. gibi varlıkların tamamını ya da bir kısmını yakan ve zarar veren, ormanı meydana getiren biyotik ve abiyotik faktörleri etkileyen ve en önemlisi etrafının açık olmasından ötürü serbest yayılma özelliği gösteren yangınlar şeklinde tanımlanmaktadır (Çanakçıoğlu, 1979; Hızal & Akkuzu, 2002; Zile, 2018; Özdemir & Çelik, 2020; Ergün, 2023).

Dünya yüzeyinin ışınım sıcaklığı olan yüzey sıcaklığı, yer yüzeyindeki doğal (toprak, bitki örtüsü, su yüzeyleri vd.) ve beşeri (binalar, yollar vd.) tüm yüzeylerin sıcaklığını ifade etmekte ve su dengesi, yüzey enerjisi ve insanlar üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Li vd., 2021; Cho vd., 2022; Adeyeri vd., 2024).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (236) 2013326 Faks: +90 (236) 2013326
E-posta: yasin.senlik@cbu.edu.tr (Şenlik Y.F.), eryilmaz@ankara.edu.tr (Yılmaz E.)
Gönderim Tarihi / Received : 13/08/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 24/12/2024

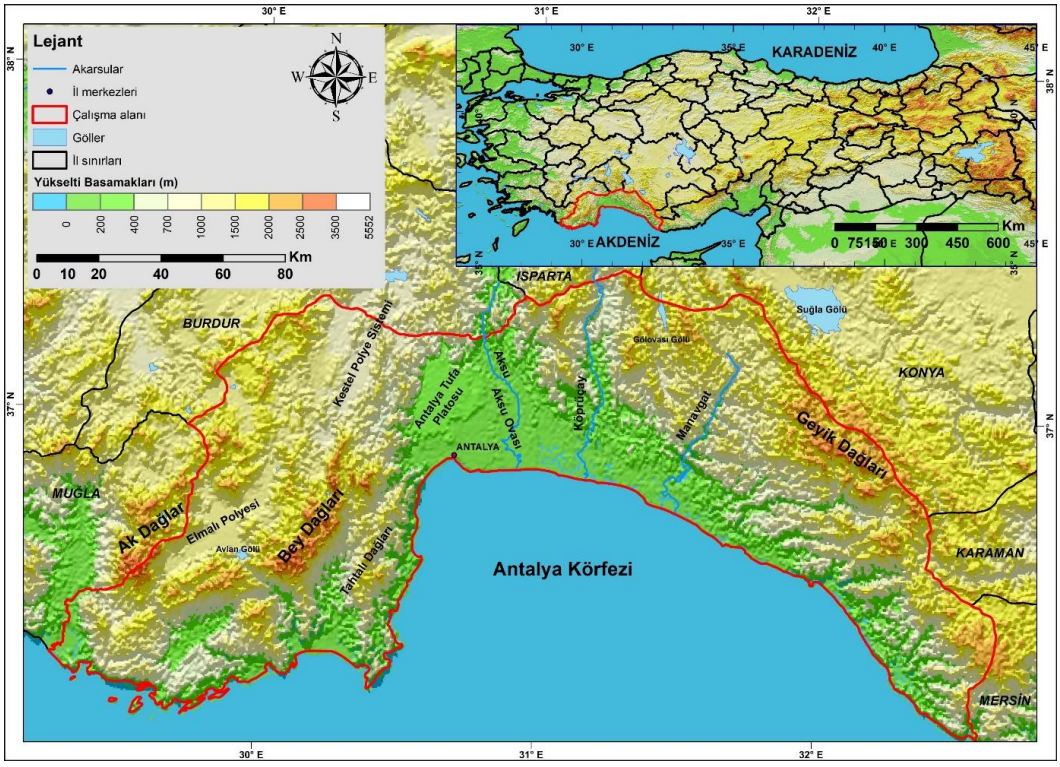
Yüzey sıcaklığı iklim değişikliği, hidrolojik döngü, tarımsal kuraklık, bitki örtüsü değişimi ve orman yangınları gibi farklı çalışmalarda kullanılabilen önemli bir parametredir (Akyürek, 2020; Guo vd., 2021; Li vd., 2021; Lata & Ghosh, 2022; Adeyeri vd., 2024).

Yüzey sıcaklığı parametresi yukarıda bahsi geçtiği üzere orman yangını çalışmalarında kullanılabilen önemli bir parametredir. Bu çalışmalarda orman yangınlarından sonra yüzey sıcaklıklarındaki değişimler ortaya konmakta (Lewis, 1998; Zhao vd., 2021; Cihan vd., 2022; Mesut, 2022), bir orman yangınının öncesi ve sonrasındaki yüzey sıcaklığı değişimi belirlenerek yanan alanlar belirlenmekte (Çolak & Sunar, 2018), yüzey sıcaklığından yararlanarak orman yangınları tespit edilmekte (Lavanya & Padmaja, 2014; Beşli & Tenekeci, 2020) ve orman yangını öncesinde yüzey sıcaklığındaki değişimlerin yangın üzerindeki etkileri incelenebilmektedir (Guangmeng & Mei, 2004; Manzo-Delgado vd., 2004; Stoyanova vd., 2022).

Akdeniz Bölgesinin en büyük ili ve önemli bir turizm şehri olan Antalya aynı zamanda Türkiye'nin en büyük orman varlığına sahip ilidir. Antalya gerek iklimi gerekse sahip olduğu bitki örtüsünden dolayı sık sık orman yangınları ile mücadele etmektedir. Nüfusun giderek artması ve iklim değişikliğinin etkisiyle orman yangınlarının sayısının ve büyüklüklerinin artması muhtemeldir. Hem Antalya hem de Türkiye tarihine rekor olarak geçen büyük Manavgat yangını bunu destekler niteliktedir. Antalya'yla ilgili birçok orman yangını çalışması bulunmakta ve bu çalışmalarda orman yangınlarına sebep olabilecek farklı parametreler üzerinde durulmaktadır (Neyişçi, 1986; Sarıbaşak, 2000; Kantarcı, 2009; Kılıç, 2012; Güney vd., 2016; Sabancı, 2016; Karabacak vd., 2019; Soydan, 2022; Zainalabden, 2022). Bu çalışmada ise Antalya ilinde ortalama yüzey sıcaklıklarının dağılışı ve eğilimlerinin belirlenmesi ve yüzey sıcaklıklarının Antalya'da meydana gelen orman yangınları üzerinde bir etkisinin olup olmadığının ortaya konması hedeflenmektedir.

2. Çalışma Alanı

Akdeniz Bölgesinin, Antalya Bölümünde ve 29°20'-32°35' doğu boylamları ile 36°07'-37°20' kuzey enlemleri arasında yer alan Antalya ili, 20.874 km^2 yüzölçümü ile Türkiye'nin en büyük altıncı ilidir (Şekil 1) (Dinç vd., 2016). Ayrıca sahip olduğu 1.177.241 ha orman alanı ile Türkiye'nin en fazla orman varlığına sahip ili durumundadır (Orman Genel Müdürlüğü, 2024).



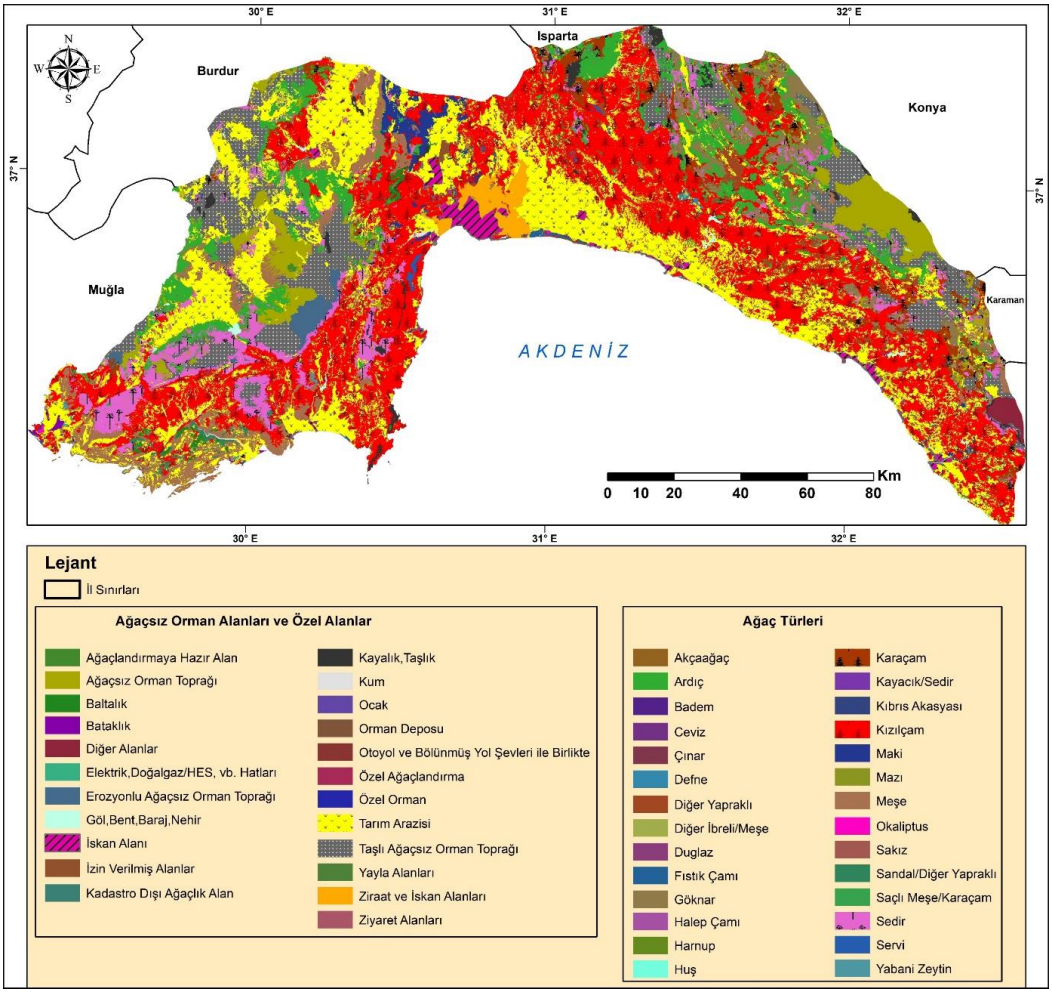
Şekil 1: Çalışma alanının (Antalya) lokasyon haritası

Antalya ili kuzeyde Batı Toroslar ve Batı Torosların güneyinde yer alan kıyı kesim olarak kabaca ikiye ayrılmaktadır. Kıyı kesimden dağlık sahaya kadar olan bölümde tipik Akdeniz iklimi görülmektedir. Bu sahalarda yazları sıcak ve kurak, kışları ise ılık ve bol yağışlıdır (Türkeş, 2021). Batı Torosların bulunduğu kuzey kesime doğru yükselti arttıkça tipik Akdeniz ikliminden, yazları daha serin, kışları ise daha soğuk olan bir geçiş iklimine geçildiği görülmektedir (Dinç vd., 2016; Sarıbaşak, 2000). Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Antalya'da kışı ılıman, yazı kurak ve sıcak (Csa) ve yazı kurak ve serin (Csb) iklim tipleri görülmektedir (Yılmaz & Çiçek, 2018).

Yıllık toplam yağış ortalaması 1053,4 mm olan Antalya'da, ortalama sıcaklık 18,8 °C, en yüksek sıcaklık 45 °C ve en düşük sıcaklık -4,6 °C olarak kaydedilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024).

Akdeniz vejetasyon sahası içinde bulunan Antalya ilinde, bitki örtüsünü oluşturan asli unsur ormanlar olup, makiler ise çoğunlukla ormanların tahrip olduğu sahalarda yayılış alanı bulmaktadır (Avcı, 1993; Berberoğlu & Ertürk, 2020). Birçok ağaç ve bitki türünün yayılış gösterebildiği Antalya ilinde en büyük alana yayılış göstermiş ve ormanların asıl unsurunu oluşturan ağaç türü kızılçamlardır (*Pinus brutia*) (Şekil 2). Kızılçamlar, tahribe uğramadığı sahalarda kıyı kesimlerden başlayarak 1200 metreye kadar yayılış göstermektedirler. 1000 metreden yaklaşık 2200 metrelere kadar ise karaçam (*Pinus nigra*), sedir (*Cedrus libani*), göknar (*Abies cilicica*) ve ardıç (*Juniperus* sp.) gibi türler yayılış göstermektedir. Kızılçam ormanları çalışma sahasının % 30'luk bölümünü kaplarken, ardıç ormanları % 7, sedir ve meşe ormanları ise % 5'lik bölümünü kaplamaktadır (Şenlik, 2024).

Kızılçamlar ışık ağacı olmaları, kuraklığa karşı bir mekanizma olarak geliştirdikleri bol reçineli ve yağlı yapıya sahip olmaları gibi özelliklerinden ötürü orman yangınlarına karşı oldukça hassas bir tür olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra kızılçamlar daha geniş bir sahaya yayılabilmek için orman yangınlarına ihtiyaç duymaktadır. Antropojenik etkiler devreye girene kadar, bir denge içerisinde ilerleyen kızılçam-yangın ilişkisi, insan etkisiyle beraber bozulmaya başlamıştır.



Şekil 2: Çalışma alanının (Antalya) meşcere haritası

3. Materyal ve Yöntem

Çalışma alanına ait yüzey sıcaklığı verileri ise MODIS uydu sistemlerinin TERRA ve AQUA uydularından temin edilmiştir. Söz konusu uydulardan elde edilen yüzey sıcaklığı verileri 1 km çözünürlüğe sahiptirler. Veriler TERRA uydusu için 01.06.2000 ile 31.10.2022 tarihleri arasını kapsarken, AQUA uydusu için ilk ölçüm tarihi olan 04.07.2002'den 31.10.2022 tarihine kadar olan zamanı kapsamaktadır. Yüzey sıcaklığı verileri bu tarihler arasındaki tüm aylar için değil, Antalya için yangın sezonu olan haziran-ekim ayları arası için temin edilmiştir. Bu 5 aydaki orman yangınları 2000-2022 yılları arasındaki tüm yangınların %78'lik bölümüne karşılık gelmektedir (Şenlik, 2024).

Uydular çalışma sahasından gündüzleri yerel saat ile 11:30 ve 14:30'da yüzey sıcaklığı verisi toplarken, geceleri yerel saat ile 22:30 ve 03:30 saatlerinde yüzey sıcaklığı verisi toplamaktadır (NASA/Level-1 and Atmosphere Archive & Distiribution System, 2024).

MODIS uydu verileri NASA'nın AppEEARS platformu üzerinden NetCDF formatında indirilmiştir. Daha sonra Panoply uygulaması kullanılarak NetCDF formatındaki veriler EXCEL formatına çevrilmiştir. EXCEL ortamındaki veriler öncelikle zaman serisine çevrilmiş, daha sonra bu serilerden aylık ortalama yüzey sıcaklığı verileri elde edilmiştir. Yüzey sıcaklıklarındaki eğilimler Mann-Kendall eğilim analizi ile belirlenmiştir. Bunun için öncelikle S değeri (Eşitlik 1) belirlenmiş, ondan sonra varyans (Eşitlik 2) ve Z_{MK} (Eşitlik 3) değerleri hesaplanmış ve değerler standart normal dağılıma göre değerlendirilmiştir.

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

$$\mathrm{Var(S)} = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n_t} t_i(t_i-1)(2t_i+5)\right] \quad (2)$$

$$m = 1 \quad eğer \quad S < 0$$
$$m = 0 \quad \text{eğer} \quad S = 0$$
$$m = -1 \quad \text{eğer} \quad S > 0$$

$$Z_{MK} = \frac{S + m}{\sqrt{\mathrm{Var(S)}}} \quad (3)$$

Elde edilen sonuçlar p<0,05 (%95 anlamlılık) ile p<0,01 (%99 anlamlılık) düzeyinde sınanmış, Z değeri 1,96'dan daha büyükse anlamlı artış, -1,96'dan düşük ise anlamlı azalış, 2,575'ten büyük ise şiddetli anlamlı artış, -2,575'ten küçük ise şiddetli anlamlı azalış olarak değerlendirilmiştir (Dikici, 2019; İrcan & Duman, 2022).

Son aşamada çalışma alanı için AppEEARS platformundan temin edilip, Panoply uygulamasıyla EXCEL'e çevrilip daha sonra da düzenlenen aylık ortalama yüzey sıcaklığı verileri (Şekil 3-8) ve Mann-Kendall eğilim testi sonuçları (Şekil 9-14) ArcGIS 10.8.1 yazılımında haritalandırılmıştır.

Çalışma alanının amenajman verileri Orman Genel Müdürlüğünden (OGM) temin edilmiş ve bu verilerden yararlanılarak ArcGIS 10.8.1 yazılımında sahanın meşcere haritası üretilmiştir (Şekil 2). Çalışma alanına ait orman yangını verilerinin temini için ise Antalya Orman Bölge Müdürlüğüne (OBM) başvurulmuştur. OBM'den 2000-2022 yılları arasına ait orman yangını çıkış noktalarının konum bilgisi ve yangın çıkış sebebi verileri temin edilmiştir. Yangın kayıt defterlerinde bulunan konum bilgilerinden yararlanılarak yangın çıkış noktaları meşcere verilerinin üzerinde olacak şekilde Coğrafi Bilgi Sistemleri (ArcGIS 10.8.1) ortamında haritalandırılmıştır (Şekil 15). Yine kayıt defterlerinde yer alan yangın çıkış sebeplerinden faydalanılmış ve yangınlar çıkış sebeplerine göre sınıflandırılmıştır. Kayıt defterlerinde birçok yangın sebebi olmakla beraber, yangın sebepleri temelde doğal ve beşeri olarak 2 sınıfa ayrılmaktadır. Bu sayede çalışma alanında meydana gelen orman yangınlarında asli sebebin doğal mı yoksa beşeri mi olduğu görülmüştür. Temin edilen yangınların 2000'den sonra başlatılmasının sebebi karşılaştırma yapmak için kullanılan MODIS uydu sistemlerinin ölçümlerinin bu yıldan sonra başlamasıdır. Aynı dönemler arasındaki orman yangınları ve yüzey sıcaklığı ölçümleri elde edilmiş ve iki parametre arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çalışma alanının ortalama yüzey sıcaklığı dağılışı ve eğilimleri belirlendikten sonra orman yangınları ile ilişkilerinin incelenmesi için 11 örnek orman yangını seçilmiştir. Orman yangınlarının seçiminde bazı hususlara dikkat edilmiştir. Uzun yıllara ait değişimin incelenebilmesi için yangınlar 2022 yılından seçilmiştir. Sadece büyük Manavgat yangını 2021 yılında gerçekleşmiştir. Ayrıca yangın sezonu içerisindeki tüm ayların (haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim) durumunun görülebilmesi için her ayın en büyük 2 orman yangını (en geniş alanın yandığı) tercih edilmiştir. Yangın çıkış noktalarına ait yüzey sıcaklıklarına uygulanan Mann-Kendall ve regresyon analizleri, eksik yüzey sıcaklığı verisinin bulunmadığı 2003 yılından yangının gerçekleştiği yıldan bir önceki yıla (10 yangın için 2003-2021/Manavgat yangını için 2003-2020) kadar olan dönemi kapsamaktadır. Yangının gerçekleştiği yılda yüzey sıcaklığı değerleri ortalamaların çok üstüne çıktığından dolayı tüm değerleri etkilemektedir. Bu yüzden çalışmada yangın senesi değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Yukarıda açıklandığı üzere TERRA ve AQUA uyduları ikisi gündüz, ikisi gece olmak üzere toplamda 4 kez yüzey sıcaklığı verisi toplamaktadır. Çalışma sahasından gündüzleri saat 11:30 ve 14:30'da veri toplanmaktadır (NASA/Level-1 and Atmosphere Archive & Distiribution System, 2024) ve bu ölçümlerden 14:30 ölçümü öğleden sonra ölçümü olması nedeniyle günün en sıcak saati olarak değerlendirilmiştir. Her bir yangın çıkış noktasında günün en sıcak saatine (14:30) ait ortalama yüzey sıcaklığı verisine basit doğrusal regresyon analizi uygulanarak orman yangınları ile yüzey sıcaklığı arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir. Denklemde *Y* bağımlı, *X* ise bağımsız değişkeni ifade etmektedir (Eşitlik 4). Çalışmada bağımlı değişken yüzey sıcaklığı, bağımsız değişken ise zamandır. Basit doğrusal regresyon analizi ile her bir yangın çıkış noktasında yıllar boyunca günün en sıcak saatinde anlamlı bir yüzey sıcaklığı değişimi olup olmadığı 0,05 anlamlılık seviyesinde sınanmıştır. Ayrıca tüm ölçüm saatlerinde (11:30, 14:30, 22:30, 03:30) ve yangından önceki son 10 günde yüzey sıcaklığında anlamlı bir değişim olup olmadığı Mann-Kendall eğilim analizi ile test edilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad (4)$$

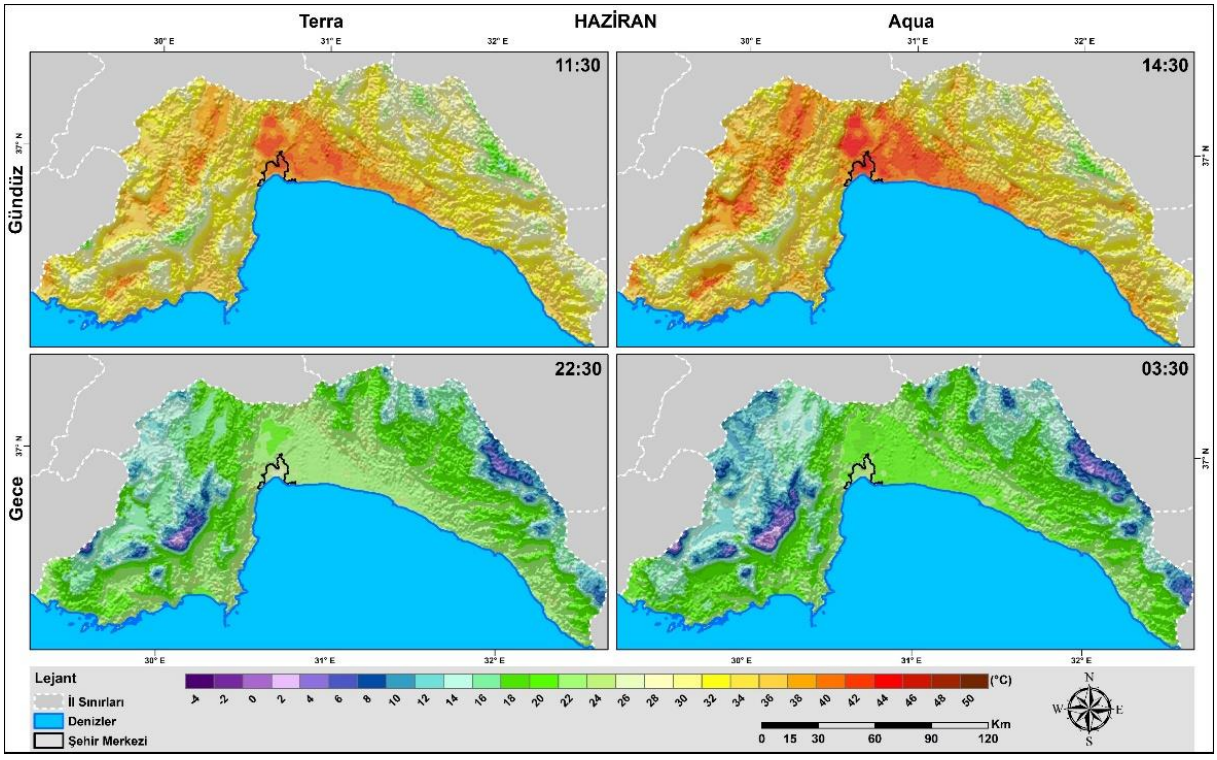
4. Bulgular

Çalışmada öncelikle Antalya ilinde ortalama yüzey sıcaklıklarının dağılışı ve eğilimi anlatılacak daha sonra belirlenen örnek orman yangınları üzerinden yüzey sıcaklığı ve orman yangınları ilişkisi incelenecektir. Gerekli yerlerde literatürden de faydalanılacaktır.

4.1. Ortalama Yüzey Sıcaklıkları ve Eğilimleri

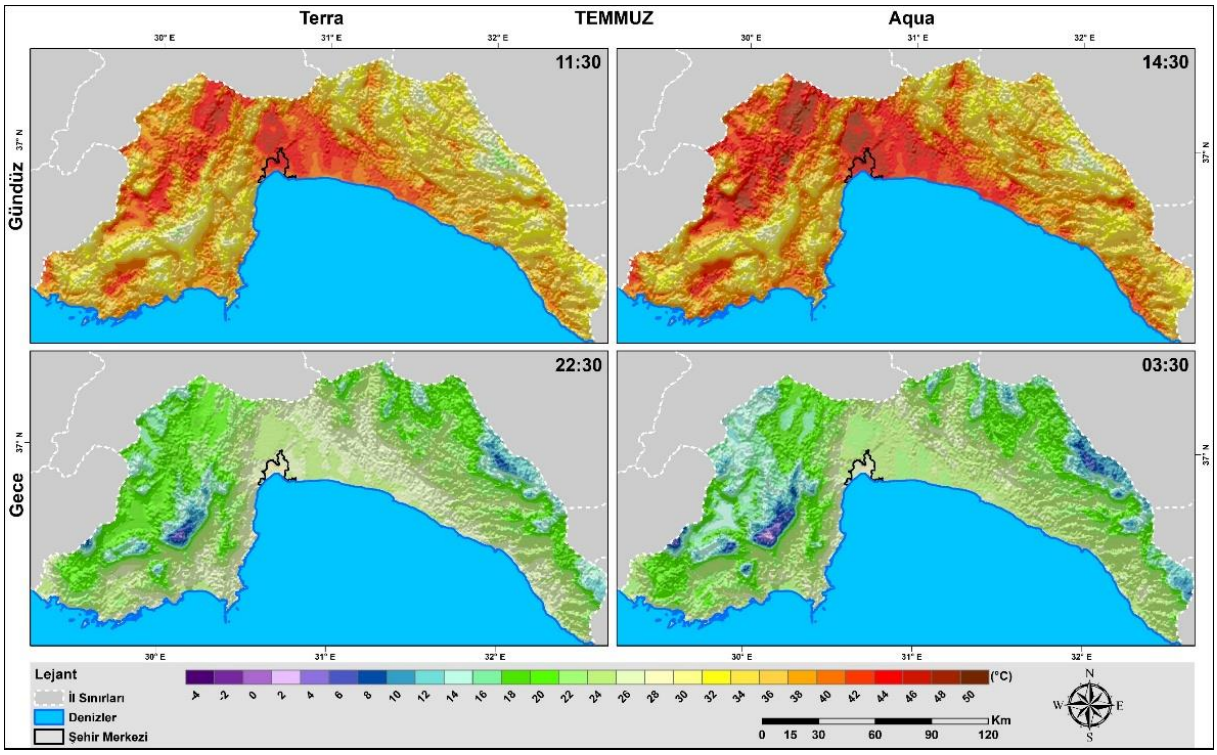
Antalya ili için orman yangını sezonu olan haziran ile ekim ayları arasında günün farklı saatlerine göre yüzey sıcaklığı analizleri incelendiğinde, yüzey sıcaklığını etkileyen en önemli faktörlerin başında yükseltinin geldiği görülmüştür (Şekil 3). Batı Torosları meydana getiren dağlık sahalarda yükselti arttıkça sıcaklıkların düştüğü görülmektedir. Yükseltiye bağlı olarak sıcaklıkların düşmesi beklenen bir durumdur (Erol, 2014). Bunun yanı sıra denizellik-karasallık etkisinin de yüzey sıcaklığı üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Aksu Ovası ve Antalya şehir merkezi gibi düşük yükseltiye sahip ve deniz etkisine açık sahalarda gece ve gündüz sıcaklık farklarının az olduğu belirlenmiştir. Ancak Antalya Tufa Platosu ve Kestel Polye Sistemini oluşturan sahada gece ile gündüz arasında sıcaklık farkının bir hayli yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey sıcaklığı üzerinde etkisi olan diğer bir faktör ise arazi örtüsüdür. Antalya genelinde özellikle orman sahalarının düşük, şehir alanları ve tarım arazileri gibi beşeri yüzeylerin ise yüksek sıcaklara sahip olduğu görülmektedir.

Yangın sezonunun ilk ayı olan haziranda en düşük sıcaklıklar yükselti etkisiyle, Bey Dağları, Geyik Dağları ve Ak Dağlarda belirlenmiştir (Şekil 3). Bu ayda Bey Dağlarının en yüksek zirvesi olan Kızlar Sivrisi Tepesinde (3070 m) sıcaklar 0 °C'nin altına düşebilmektedir. Gündüz saatlerinde Antalya şehir merkezinin kuzey bölümünün ve Antalya Tufa Platosunun en yüksek sıcaklıklara sahip sahalar olduğu görülmektedir. Söz konusu sahalarda sıcaklık 42 °C'nin üzerine çıkmaktadır. Antalya şehir merkezinin kuzey bölümünde seraların geniş alanlara yayılması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Bey Dağları ve Ak Dağlar arasında kalan Kestel Polye Sistemi ve Antalya Tufa Platosunda gündüz ile gece arasında ortalama olarak 26 °C'lik bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Ancak deniz etkisine açık olan Aksu Ovasında sıcaklık farkının ortalama olarak 22 °C civarında olduğu görülmektedir. Bu durumun özellikle denizellik-karasallık etkisinden ötürü olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca arazi kullanımının da bu durumun ortaya çıkmasında etkili olduğu, sıcaklık farkının en yüksek olduğu sahaların çoğunlukla kuru tarım yapılan sahalar olduğu belirlenmiştir. Antalya şehir merkezi hem gündüzleri hem de geceleri pozitif yüzey ısı adası (YIA) özelliği göstermektedir. YIA gündüzleri seraların bulunduğu kuzey bölümde meydana gelirken, geceleri ise yoğun yerleşimin bulunduğu güney bölümde meydana gelmektedir.



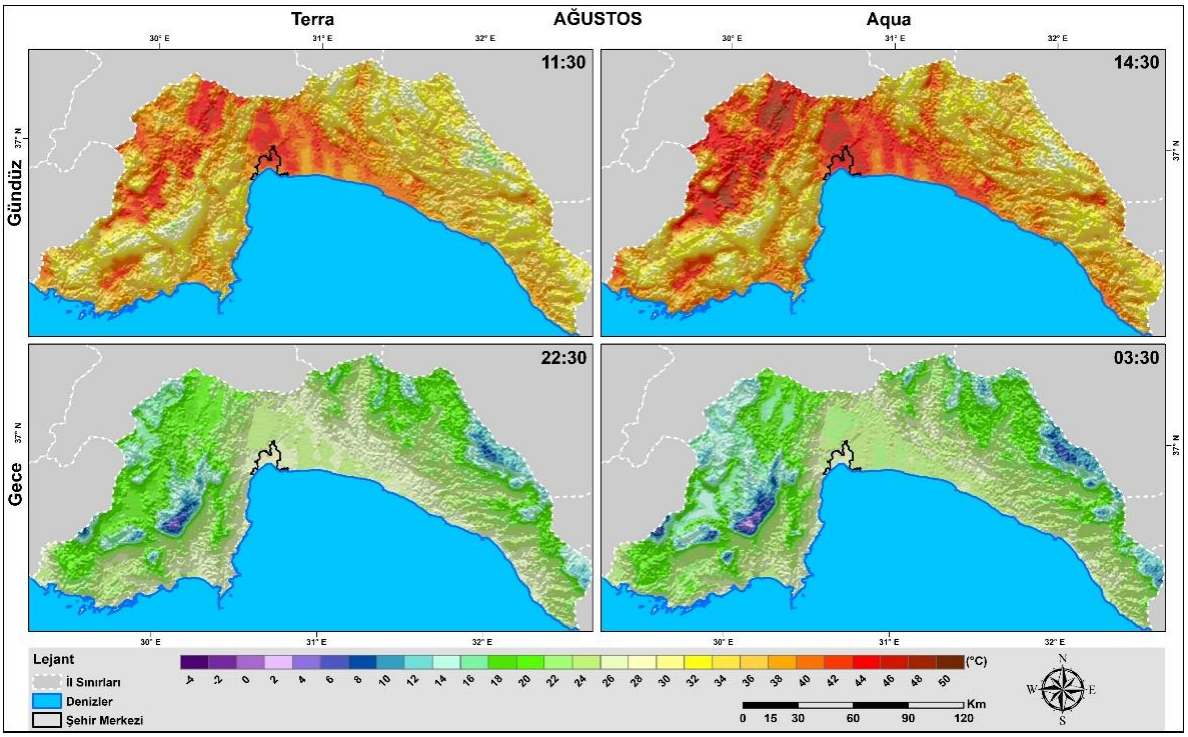
Şekil 3: Antalya ili haziran ayı ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Temmuz ayında gündüzleri en düşük sıcaklıklar Geyik Dağında, en yüksek sıcaklıklar ise Aksu Ovası, Antalya Tufa Platosu ve dağlar arasında kalan Kestel Polye Sisteminde belirlenmiştir (Şekil 4). Bu sahalarda sıcaklık 40-48 °C arasında değişmektedir. Bazı sahalarda (Döşemealtı/Altınkale, Korkuteli/İmecik) ise sıcaklığın 50 °C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Geceleri ise en düşük yüzey sıcaklıkları Bey Dağlarında, en yüksek yüzey sıcaklıkları ise sahil şeridinde gözlemlenmektedir. Ayrıca temmuz ayı gecelerinde Antalya şehir merkezi ve Kaş ilçe merkezinde YIA oluşumu görülmektedir. Saat 03:30 ölçümlerinde Antalya şehir merkezinin çevresinden 2 °C daha sıcak olan bir YIA oluşumu görülürken, bu YIA içinde kendisine göre 2 °C, şehir merkezinin çevresine göre ise 4 °C daha sıcak olan ikinci bir YIA oluşumu dikkat çekmektedir.



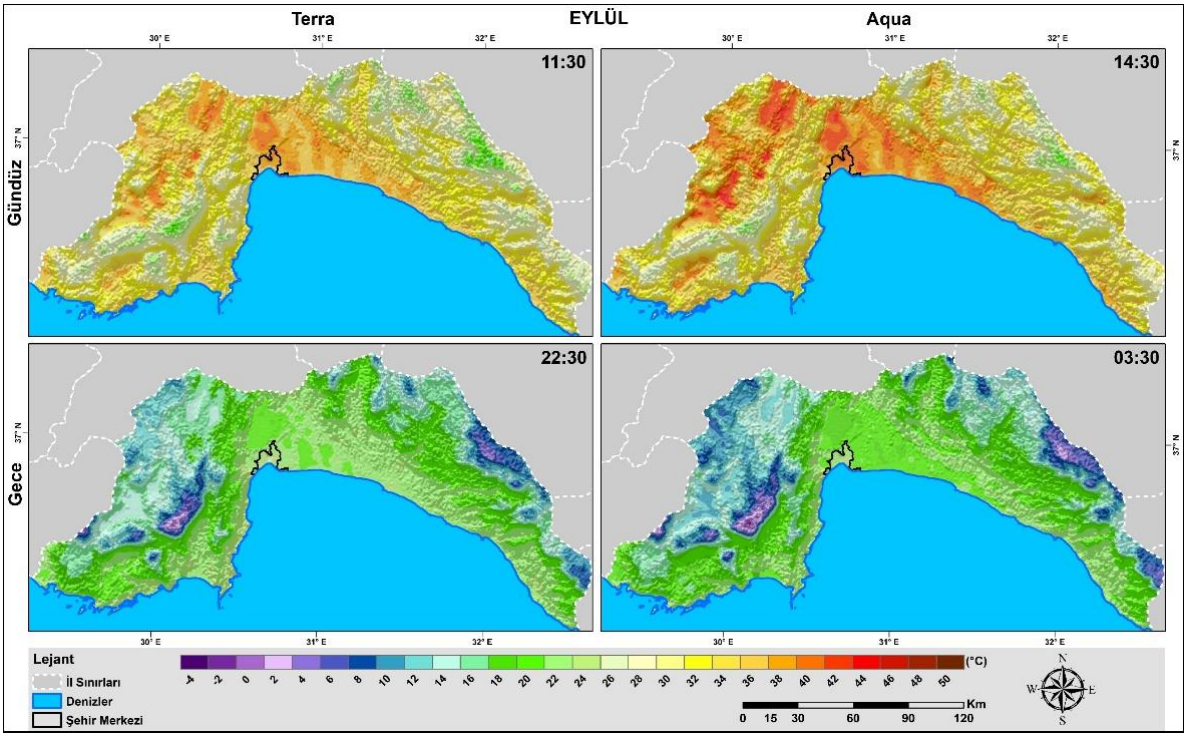
Şekil 4: Antalya ili temmuz ayı ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Ağustos ayının gündüz ve gecelerinde en yüksek ve en düşük yüzey sıcaklıklarına sahip alanların, temmuz ayına benzer şekilde aynı sahalar olduğu görülmektedir (Şekil 5). Gündüz saatlerinde en sıcak olan sahalarda temmuz ayına benzer şekilde sıcaklıklar 40-48 °C arasında değişirken, yine dar bir sahada (Korkuteli/İmecik, Korkuteli/Yalınlıgediği, Korkuteli/Küçükköy) sıcaklıkların 50 °C'ye kadar çıkabildiği görülmektedir. Ağustos ayında özellikle Elmalı Polyesinde ortaya çıkan sıcaklık farkı dikkat çekmekte, bu sahada gündüz ile gece arasındaki sıcaklık farkı yer yer 26 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Geceleri Antalya şehir merkezinde YIA oluşumu görülmekte ve sıcaklık 26 °C'nin üzerine çıkmaktadır.



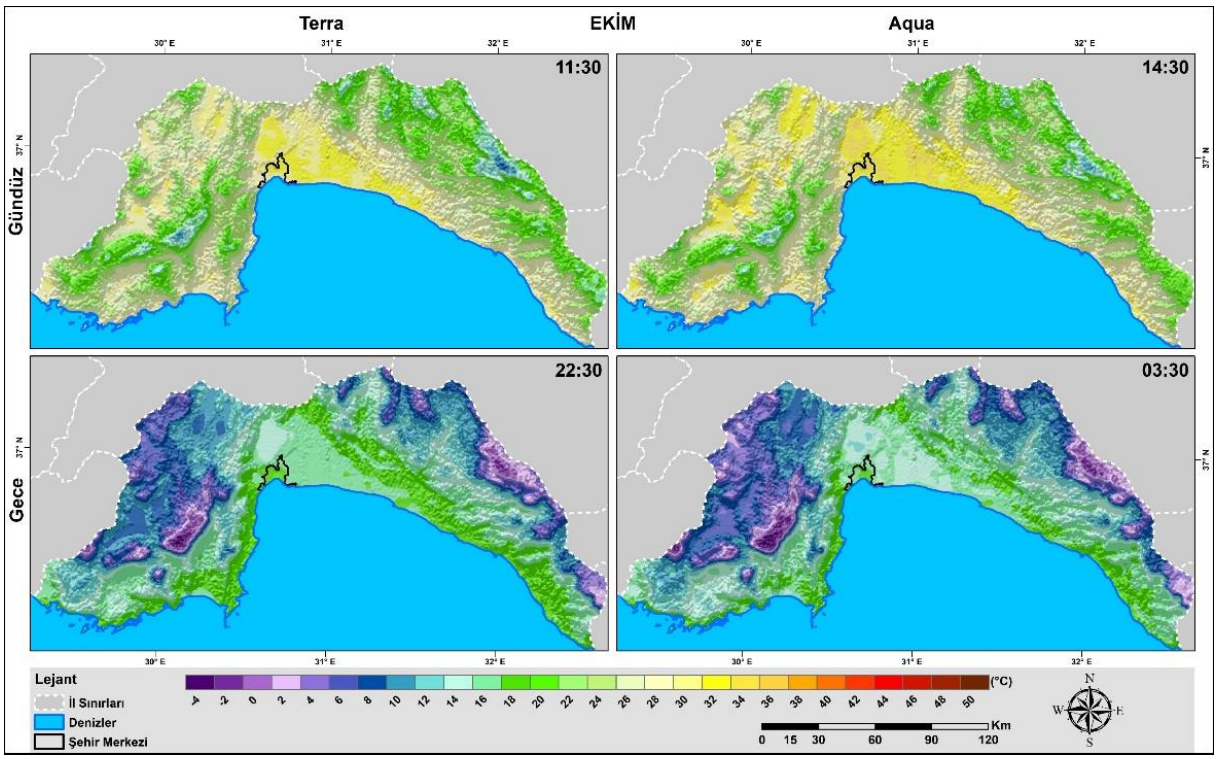
Şekil 5: Antalya ili ağustos ayı ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Temmuz ve ağustos aylarında zirveye ulaşan yüzey sıcaklıklarının eylül ayıyla birlikte düşüş sürecine girdiği görülmektedir (Şekil 6). Sıcaklıklar düşmekle beraber gündüzleri yine Aksu Ovası, Antalya Tufa Platosu ve Kestel Polye Sisteminin en sıcak sahalar olduğu görülmektedir. En sıcak sahalarda sıcaklıklar eylül ayında 36-44 °C arasında değişmektedir. Geceleri şehir merkezinden Kaş ilçe merkezine kadar uzanan kıyı hattında en yüksek sıcaklıklar belirlenmektedir. Bu sahada sıcaklıklar 24 °C'ye ulaşmaktadır. Buna ek olarak Manavgat, Serik ve Alanya ilçe merkezlerinde YIA oluşumu görülmektedir. En düşük sıcaklıklar ise yine Bey Dağlarında belirlenmekte ve zirvede sıcaklıkların -4 °C'ye kadar düştüğü görülmektedir.



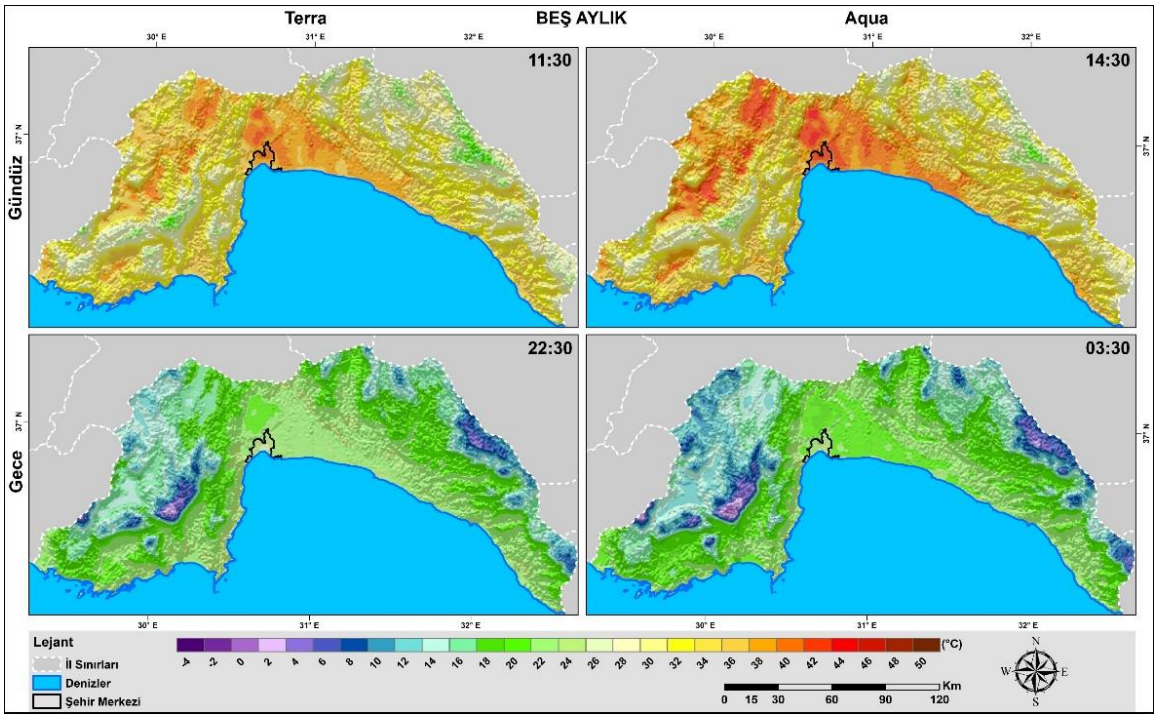
Şekil 6: Antalya ili eylül ayı ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Ekim ayında tüm yangın sezonu boyunca en düşük sıcaklıklar belirlenmektedir (Şekil 7). Antalya'nın en sıcak sahalarında gündüzleri sıcaklıklar diğer aylarda 50 °C'ye kadar çıkabilirken, ekimde bu sahalarda sıcaklıkların günün en sıcak saatinde 28-34 °C arasında değiştiği görülmektedir. Geceleri yine Antalya şehir merkezi, Alanya ve Manavgat ilçe merkezlerinde YIA oluşumu görülmektedir. Geceleri Bey Dağları yine en düşük sıcaklıklara sahip saha iken, bu sefer Geyik Dağları da ona eşlik etmekte ve sıcaklık -4 °C'ye kadar düşmektedir. Karasallığın ve arazi örtüsünün de etkisiyle Kestel Polye Sistemini meydana getiren depresyonlarda gece ile gündüz arasındaki sıcaklık farkının bazı sahalarda 28 °C'ye kadar çıktığı belirlenmiştir.



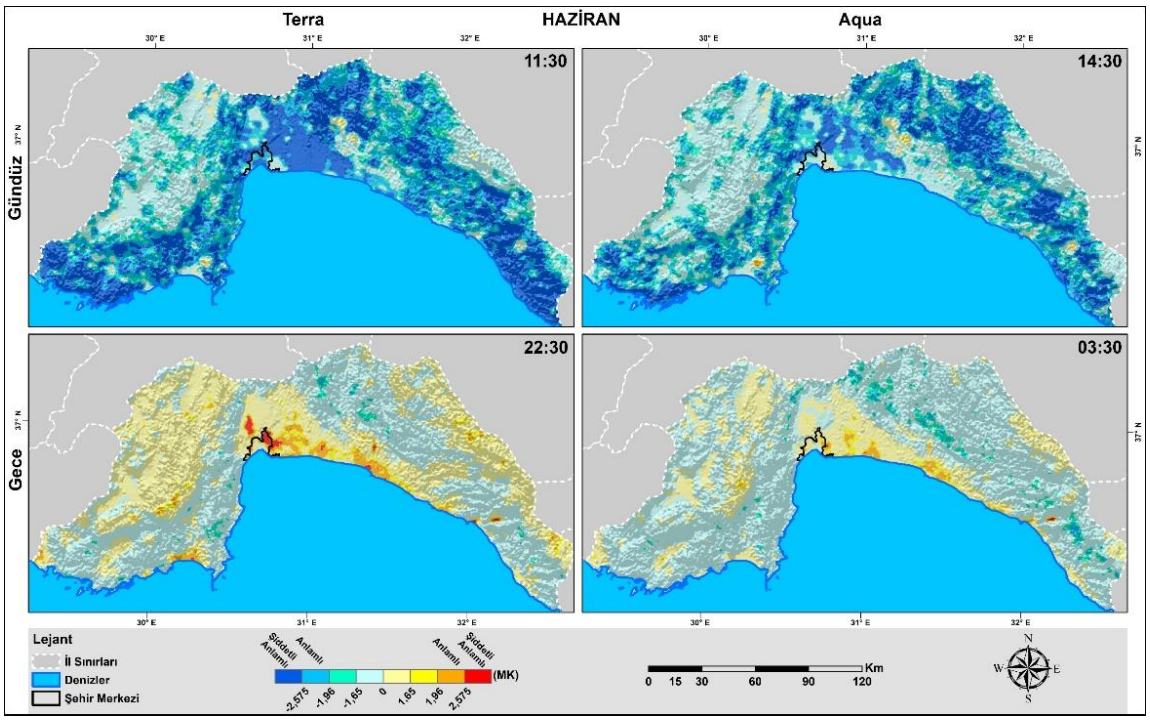
Şekil 7: Antalya ili ekim ayı ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Antalya'nın yangın sezonunu oluşturan haziran-ekim aylarının ortalamasına bakıldığında; gündüzleri sıcaklıkların 14 ila 44 °C arasında değiştiği, Antalya Tufa Platosu ve Ak Dağlar ile Bey Dağları arasında yer alan Kestel Polye Sisteminin en yüksek yüzey sıcaklığına sahip sahalar olduğu görülmektedir (Şekil 8). Geyik Dağlarında ise en düşük sıcaklıklar belirlenmiştir. Geceleri ise sıcaklıkların -2 ila 26 °C arasında değiştiği, Bey Dağlarının en düşük sıcaklığa sahip saha olduğu, kıyı şeridinde yer alan ilçe merkezlerinin ise en sıcak sahalar olduğu ve pozitif YIA oluşumu meydana geldiği görülmektedir. Antalya şehir merkezinde hem gündüz hem de geceleri YIA oluşmaktadır. YIA gündüzleri seraların bulunduğu kuzey bölümde meydana gelirken, geceleri ise yerleşmelerin yoğunlukta olduğu güney bölümde meydana gelmektedir. Antalya ilinin batı bölümünde birçok dağ sırasının olması ve bu dağ sıraları arasında yer alan depresyon sahalarından ötürü sıcaklıkların kısa mesafelerde değiştiği de göze çarpmaktadır.



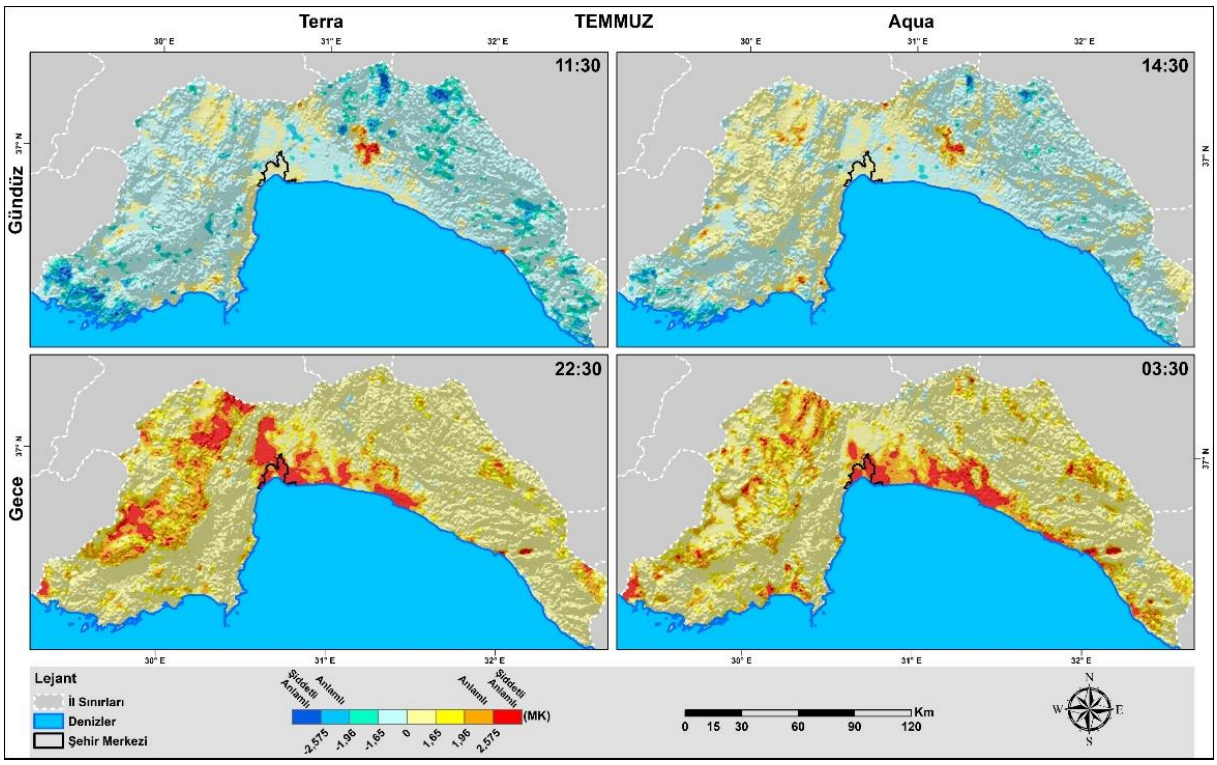
Şekil 8: Antalya ili beş aylık ortalama yüzey sıcaklığı haritası (2000-2022)

Çalışma alanındaki yüzey sıcaklığı eğilimleri incelendiğinde; haziran ayının gündüzlerinde il genelinde anlamlı sıcaklık azalışlarının olduğu görülmektedir (Şekil 9). Geyik Dağları, Ak Dağlar, Kestel Polye Sistemi ve Elmalı Polyesinde ise anlamlı bir değişim söz konusu değildir. Haziran ayının gecelerinde ise anlamlı sıcaklık değişimlerinin çok dar bir sahada sıkıştığı görülmektedir. Kıyı hattında ve kıyıya yakın olan Serik, Kumluca, Alanya ve Manavgat gibi ilçe merkezleri ve çevrelerinde sıcaklık artışları görülmektedir. Mann-Kendall eğilim testine göre özellikle Antalya şehir merkezinin kuzey bölümü ile Antalya Tufa Platosunun güney kesiminde şiddetli anlamlı sıcaklık artışlarının söz konusu olduğu belirlenmiştir. Gece saatlerinde görülen sıcaklık azalış eğilimleri ise ilin doğu bölümünde, gündüz saatlerine kıyasla oldukça dar bir alanda karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca gündüzleri $p<0,01$ düzeyinde olan yüzey sıcaklığı azalış eğilimlerinin, geceleri ancak $p<0,05$ düzeyinde olduğu görülmektedir.



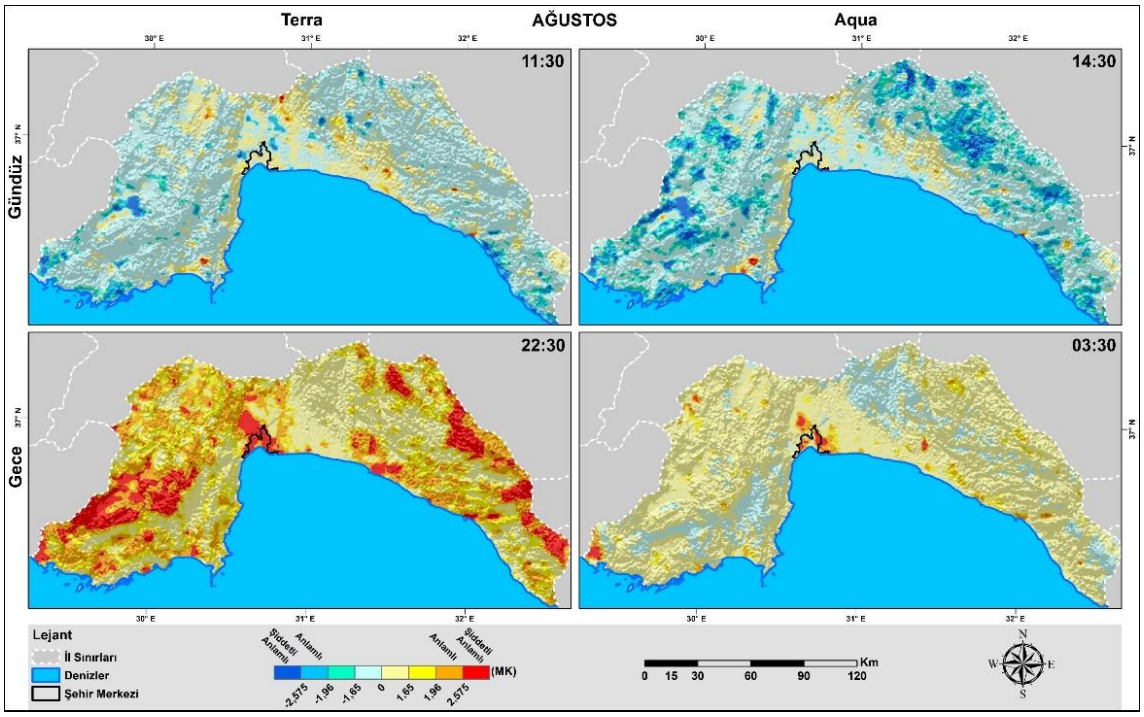
Şekil 9: Antalya ili haziran ayı yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

Haziran ayının aksine temmuz ayının gündüzlerinde anlamlı sıcaklık eğilimleri geniş bir alan kaplamamaktadır (Şekil 10). Kaş ilçesinin batı kesiminde ve ilin kuzeydoğusundaki dağlık bölgelerde anlamlı sıcaklık azalışları görülmektedir. Sıcaklık artışları ise Serik ve Manavgat arasında yer alan tarım arazileri ile seraların bulunduğu sahada ve Alanya ilçe merkezinde karşımıza çıkmaktadır. Geceleri ise sıcaklıklarda artış eğilimi görülmekte, bu eğilimler Antalya Tufa Platosu, Kestel Polye Sistemi, Elmalı Polyesi, Antalya şehir merkezi, ilin kıyı hattı ve kıyıda bulunan ilçe merkezlerinde kendini göstermektedir. Hali hazırda en sıcak sahalar olarak belirlenen bu yerlerin giderek daha sıcak bir hale geldiği görülmektedir. Antalya ilinde gece ölçümlerine göre anlamlı bir sıcaklık azalışı olmadığı da belirlenmiştir.



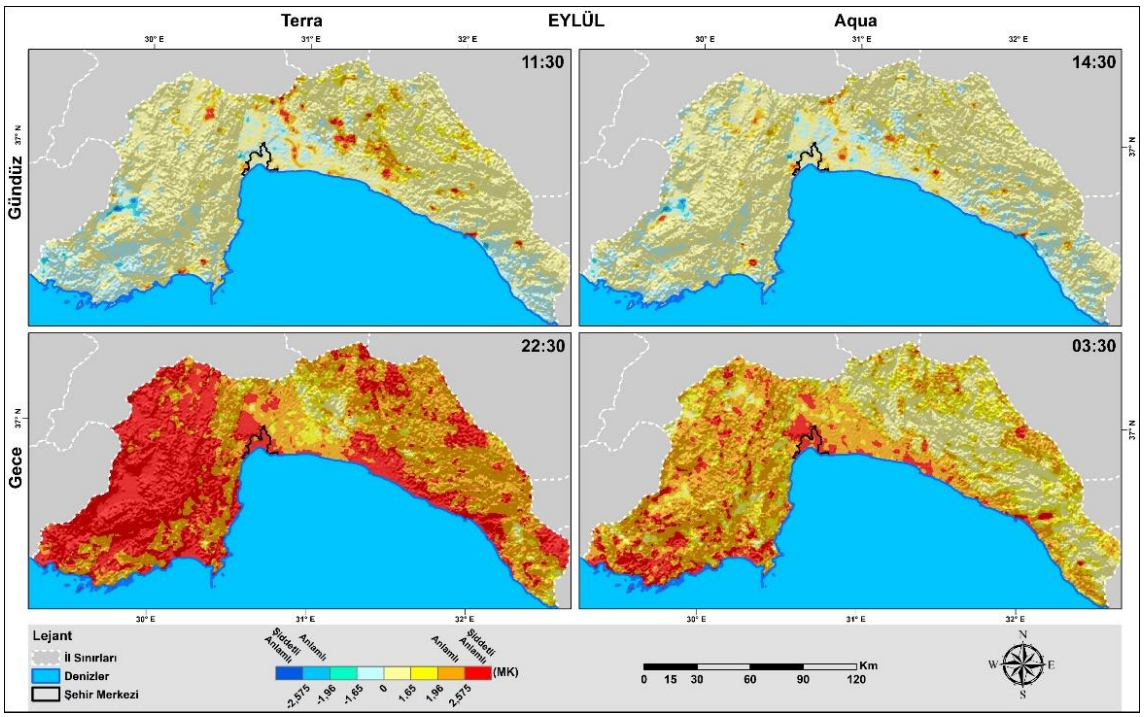
Şekil 10: Antalya ili temmuz ayı yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

Ağustos ayına gelindiğinde gündüzleri yine ilin kuzey ve kuzeydoğusundaki dağlık sahalarda ve Elmalı Polyesinde sıcaklıklarda bir azalış eğilimi görülmektedir (Şekil 11). Gündüzleri oldukça dar bir sahada karşımıza çıkan sıcaklık artışlarının en belirgini Kumluca/Beşikçi köyündedir. Normalde ormanlık bir saha olan alan, 2016 yılında orman yangınlarına maruz kalmıştır. Sıcaklıklardaki artış eğiliminin sahanın çıplak kalmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Gece saatlerinde ve özellikle saat 22:30'da sıcaklıklarda bir artış eğiliminin olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık artışlarının Geyik Dağları, Akçalı Dağları ve Bey Dağları gibi dağlık sahalarda, Antalya şehir merkezi ve kıyıdaki ilçe merkezlerinde ve Antalya Tufa Platosunun güney bölümünde olduğu anlaşılmaktadır. Saat 03:30'da ise anlamlı sıcaklık artışları Antalya şehir merkezinde, Antalya Tufa Platosunun güney bölümünde ve Kaş ilçesinin batısında kendini göstermektedir.



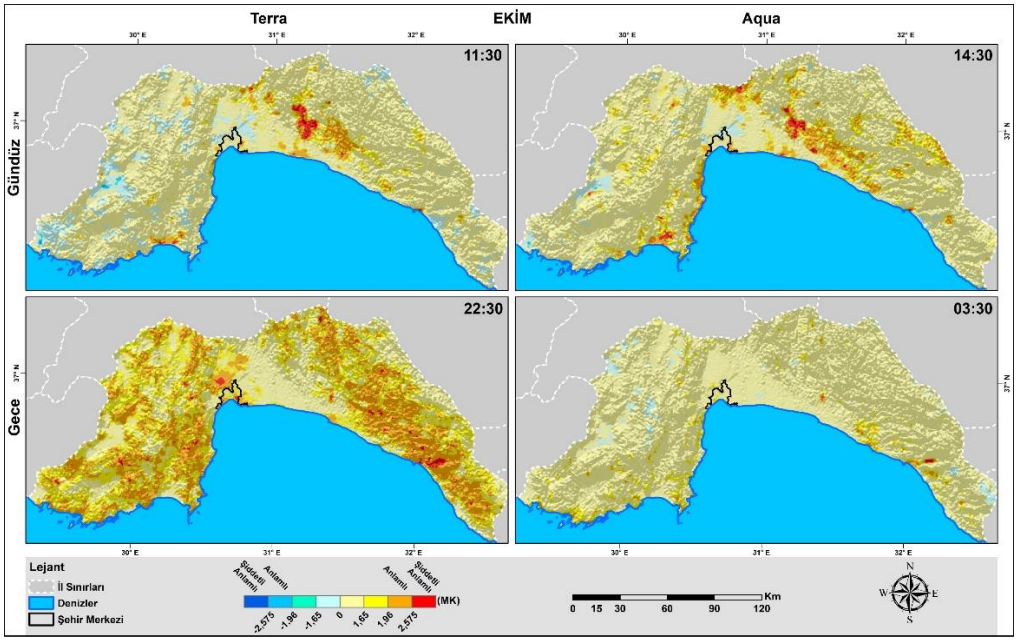
Şekil 11: Antalya ili ağustos ayı yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

Eylül ayının gündüzlerinde de temmuz ve ağustos aylarına benzer şekilde yüzey sıcaklığındaki anlamlı eğilimler geniş bir alan kaplamamaktadır (Şekil 12). Gündüzleri Elmalı Polyesinde sıcaklıklarda azalış eğilimi belirlenirken, sıcaklıklardaki artışları ise Aksu, Manavgat ve Köprüçay gibi akarsulara paralel bir şekilde kendini göstermektedir. Akarsular boyunca yoğun bir şekilde tarım ve seracılık faaliyetlerinin yürütülmesi bu sonucun çıkmasında etkili olmaktadır. Eylül ayının gecelerinde ise hiçbir ayda olmadığı kadar geniş bir alanda yüzey sıcaklığı artış eğilimi görülmektedir. Özellikle saat 22:30'da Antalya'nın büyük bölümünde $p<0,01$ düzeyinde sıcaklık artışlarının olduğu belirlenmiştir. Saat 03:30'da da diğer aylara kıyasla oldukça geniş bir sahada sıcaklık artış eğilimlerinin olduğu görülmektedir. Ancak bu artış eğilimleri 22:30 ölçümlerine göre hem daha dar bir sahada görülmekte hem de anlamlılık seviyesinin yer yer daha düşük olduğu anlaşılmaktadır.



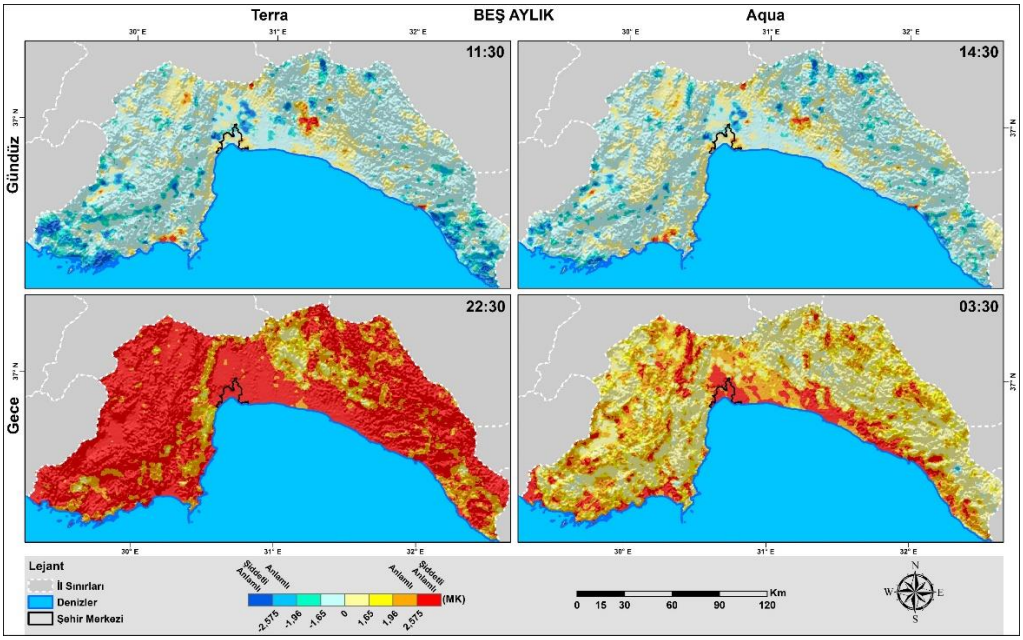
Şekil 12: Antalya ili eylül ayı yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

Ekim ayının gündüzlerinde Elmalı Polyesi ve Kaş ilçesinde oldukça kısıtlı bir alandaki azalış eğilimleri dışında yüzey sıcaklıklarında azalış eğilimi görülmemektedir (Şekil 13). Manavgat ilçesi ve bazı ilçe merkezlerinde (Alanya, Demre, Finike, Kemer, Kumluca, Manavgat) ise sıcaklıklarda artış eğiliminin olduğu görülmüştür. Geceleri ise ağustos ve eylül aylarındakine benzer şekilde sıcaklıklardaki artış eğilimleri saat 22:30'da daha geniş bir alana yayılmış durumdadır. İl genelinde sıcaklıklardaki artışlar $p<0,05$ düzeyinde kalırken, Dim Barajı ve Döşemealtı şehir merkezinde artışların $p<0,01$ düzeyine eriştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 13: Antalya ili ekim ayı yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

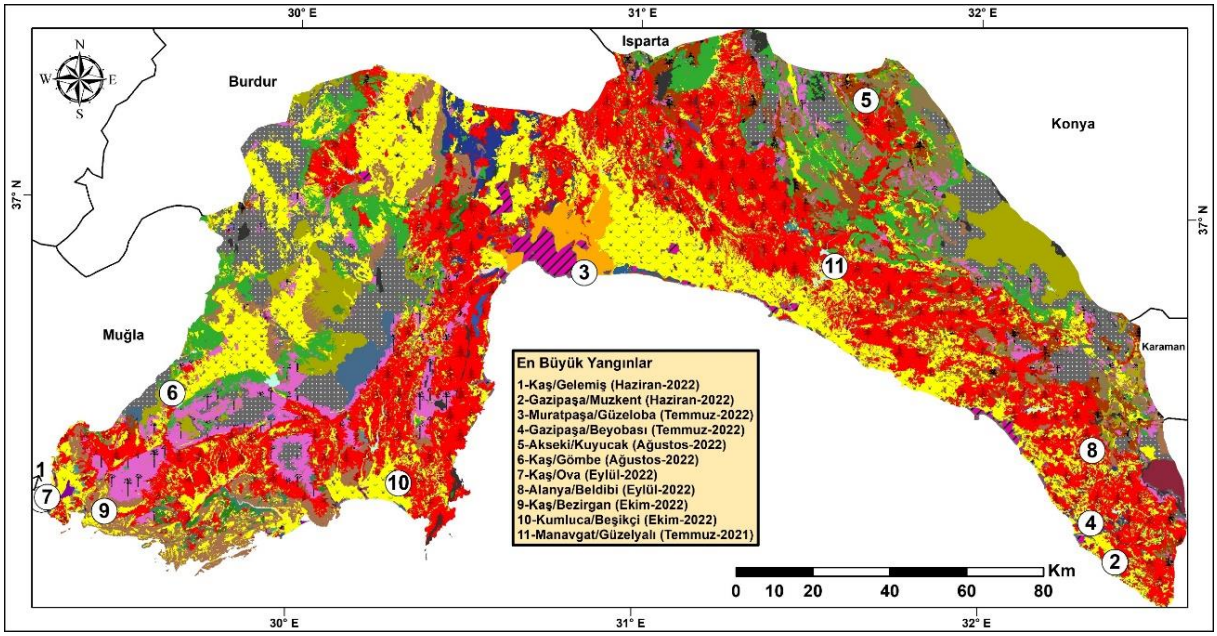
Haziran-ekim arasındaki 5 aya ait yüzey sıcaklıklarının eğilimlerine bakıldığında; gündüzleri anlamlı eğilimlerin çok geniş alan kaplamadığı görülmektedir (Şekil 14). İlin batısındaki Kaş ilçesi ile doğusunda yer alan Gazipaşa ilçelerinde sıcaklıklarda azalış eğilimi olduğu belirlenmiştir. Sıcaklıklardaki artışlar ise temmuz ayında da bahsi geçen, Serik ve Manavgat arasında yer alan tarım arazileri ve seraların bulunduğu sahada karşımıza çıkmaktadır. Bunun dışında ise Alanya ilçe merkezi ve Finike ile Kumluca arasındaki sahada da sıcaklıklarda artış eğilimi söz konusudur. Geceleri ise tüm aylarda olduğu gibi daha geniş bir alana yayılmış sıcaklık artışlarının olduğu görülmektedir. Özellikle saat 22:30'da ilin neredeyse tamamında $p<0,01$ düzeyinde sıcaklık artışlarının olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 14: Antalya ili beş aylık yüzey sıcaklığı Mann-Kendall eğilim haritası (2000-2022)

4.2. Orman Yangınları ile Yüzey Sıcaklığı İlişkisi

Orman yangını ile yüzey sıcaklığı ilişkisini incelemek üzere seçilen orman yangınları çalışma sahasının farklı ortamlarını yansıtmaktadır. Yangınların 5'i Antalya'nın doğu kesiminde, 5'i ise batı kesiminde yer almaktadır (Şekil 15). 1 yangın ise şehir merkezinin doğusunda kalan küçük ormanlık sahada meydana gelmiştir. Bu sayede orman yangını ve yüzey sıcaklığı ilişkisini farklı ortamlarda ve farklı aylarda test edebilme olanağı bulunmuştur. Orman yangınların 6'sı (Kaş/Gelemiş, Gazipaşa/Muzkent, Muratpaşa/Güzeloba, Kaş/Gömbe, Alanya/Beldibi, Manavgat/Güzelyalı) saf kızılçam ormanlarında, 2'si (Akseki/Kuyucak, Kumluca/Beşikçi) karışık kızılçam ormanlarında, 3 yangın ise (Gazipaşa/Beyobası, Kaş/Ova, Kaş/Bezirgan) farklı meşcerelerin (Badem, Okaliptus, Pırnal meşesi) bulunduğu sahalarda meydana gelmiştir.



Şekil 15: Yüzey sıcaklığı ilişkisinin incelendiği 11 orman yangının dağılışı

Birinci orman yangını 21.06.2022'de Antalya/Kaş/Gelemiş'te meydana gelmiş ve bir günden kısa sürede söndürülen yangında 9 ha orman arazisi yanmıştır. İkinci yangın 01.06.2022 tarihinde Antalya/Gazipaşa/Muzkent'te meydana gelmiş ve 3,09 ha alan yanmıştır. Üçüncü yangın Antalya/Muratpaşa/Güzeloba'da, 24.07.2022 tarihinde gerçekleşmiştir. İki gün süren yangın sonucunda 8,29 ha orman arazisi tahrip olmuştur. Dördüncü yangın olan Antalya/Gazipaşa/Beyobası yangını ise yine 24.07.2022 tarihinde meydana gelmiş ve aynı gün içinde söndürülmüştür. Bu yangında toplam 1,76 ha orman arazisi yanmıştır. Beşinci yangın Antalya/Akseki/Kuyucak'ta, 31.08.2022 tarihinde meydana gelmiş ve 6 gün süren yangında 5,32 ha orman yanmıştır. Altıncı yangın 30.08.2022 tarihinde Antalya/Kaş/Gömbe'de çıkmıştır. Bir günden daha kısa sürede söndürülen yangında 1,94 ha alan yanmıştır. Yedinci yangın Antalya/Kaş/Ova'da, 21.09.2022 tarihinde meydana gelmiş ve 13 gün süren bu yangında 66,79 ha orman alanı yanmıştır. Sekizinci yangın 08.09.2022 tarihinde Antalya/Alanya/Beldibin'de gerçekleşmiştir. 4 günden daha uzun süren yangında 6,05 ha orman arazisi yanmıştır. Dokuzuncu orman yangını Antalya/Kaş/Bezirgan'da, 02.10.2022 tarihinde meydana gelmiş ve 1 gün süren yangında 26 ha orman yanmıştır. Onuncu yangın 10.10.2022 tarihinde Antalya/Kumluca/Beşikçi'de çıkmıştır. 4 gün süren yangın sonucunda 5,87 ha orman alanı yanmıştır. On birinci yangın olan Antalya/Manavgat/Güzelyalı yangını 29.07.2021 tarihinde başlamış ve 03.09.2021 tarihine kadar kontrol altına alınamamıştır. Antalya ve Türkiye tarihine geçen bu yangında toplam 26.903,2 ha orman arazisi tahrip olmuştur.

Her yangın çıkış noktasına ait 3 farklı grafik hazırlanmıştır. 1. grafik her yılın 6, 7, 8, 9 ve 10'uncu aylarının saat 11:30, 14:30, 22:30 ve 03:30 saatlerine ait ortalama yüzey sıcaklığını ifade etmekte ve 2003-2021 yılları arasındaki değişimini göstermektedir (Şekil 16) (Şekil 17) (Şekil 18) (Şekil 19) (Şekil 20) (Şekil 21) (Şekil 22) (Şekil 23) (Şekil 24) (Şekil 25) (Şekil 26). 2. grafikte ise yangının çıktığı aya ve günün en sıcak saati olarak belirlenen 14:30 ölçümüne ait ortalama yüzey sıcaklığı verileri ve 2003-2021 yılları arasındaki değişim görülmektedir. 3. ve son grafikte ise test edilen orman yangınında, yangından önceki son 10 günün her gününe ait ortalama yüzey sıcaklığı ve söz konusu son 10 gündeki değişim görülmektedir. Uydu bulutlu günlerde veri toplayamadığı için verisi bulunmayan günler "Bulutlu Gün" olarak belirtilmiştir.

11 orman yangını çıkış noktasında 2003-2021 yılları arasındaki ve günün en sıcak saatindeki (14:30) yüzey sıcaklıkları için uygulanan regresyon analizleri incelendiğinde, 2022 yılı haziran, temmuz, eylül ve ekiminde meydana gelen yangınlarda anlamlı bir yüzey sıcaklığı değişimi olmadığı görülmüştür (Tablo 1) (Şekil 16) (Şekil 17) (Şekil 19) (Şekil 22) (Şekil 23) (Şekil 24) (Şekil 25) (Şekil 26).

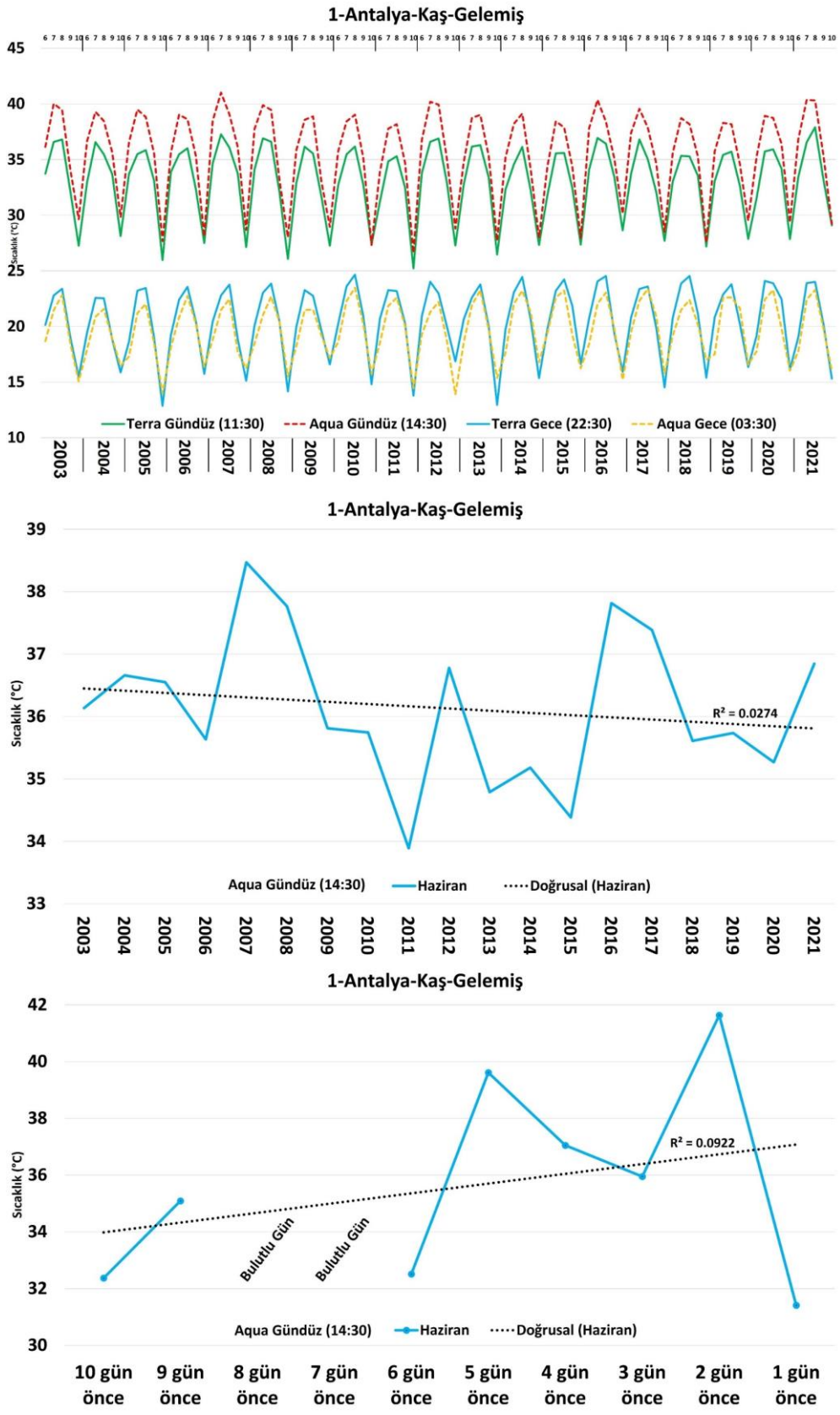
Yangın çıkış noktalarının yalnızca 2'sinde anlamlı sıcaklık değişimlerinin olduğu görülmektedir. Bunlar 2022 Ağustos'unda meydana gelen Akseki/Kuyucak ve 2021 Temmuz'unda meydana gelen Manavgat/Güzelyalı orman yangınlarıdır (Tablo 1) (Şekil 20) (Şekil 26). Söz konusu 2 yangın sahasında, sıcaklık değişimindeki anlamlılığın yönünü tespit etmek için ise Mann-Kendall eğilim analizi uygulanmıştır. 5,32 ha orman arazinin yandığı Akseki/Kuyucak yangını ile 26.903,2 ha orman arazisinin yanarak Antalya ve Türkiye tarihine rekor olarak geçen Manavgat/Güzelyalı yangınlarının 2'sinde de sıcaklıklardaki eğilimin azalış yönünde olduğu tespit edilmiştir. Tüm orman yangını çıkış noktalarının yalnızca 1'inde, 2022 Ekim'inde meydana gelen ve 5,87 ha alanın yandığı Kumluca/Beşikçi yangınında yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 25). Ancak Kumluca/Beşikçi yangın çıkış noktasındaki artış eğiliminin günün en sıcak ölçüm zamanı olan 14:30'da değil saat 11:30'da olduğu belirlenmiştir. Böylelikle günün en sıcak zamanında, seçilen hiçbir orman yangını çıkış noktasında anlamlı bir sıcaklık artışının olmadığı görülmüştür.

Tablo 1: Yangın çıkış noktalarına ait yüzey sıcaklıklarına uygulanan regresyon analizi sonuçları

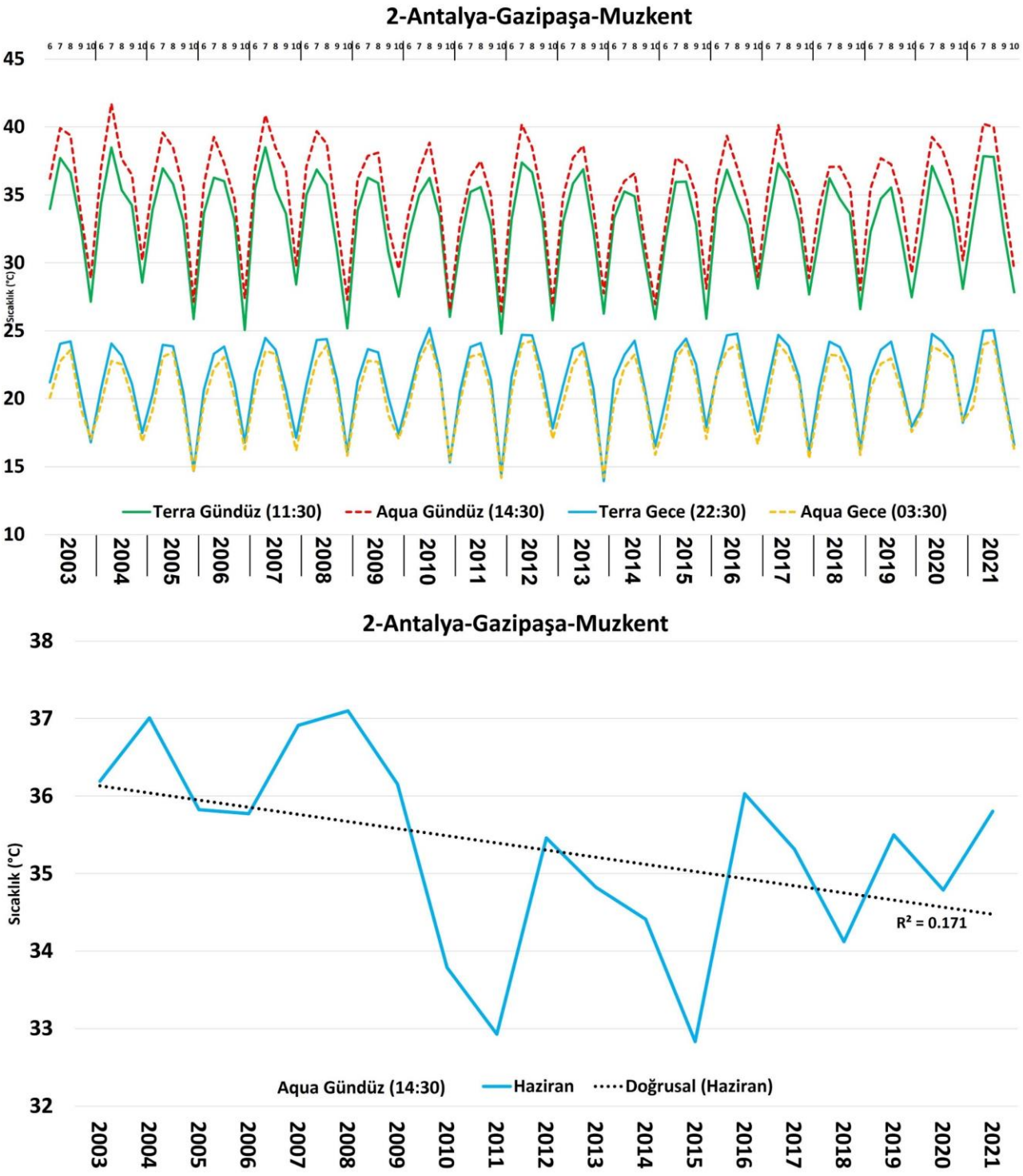
Yangın Noktası	**1-Kaş-Gelemiş**	**2-Gazipaşa-Muzkent**	**3-Muratpaşa-Güzeloba**	**4-Gazipaşa-Beyobası**
R^2	0.027440081	0.171009034	0.003943608	0.11401787
F Değeri	0.479642806	3.506857969	0.06730677	2.187745917
P Değeri	0.497936416	0.078417967	0.798414866	0.157404085
T (B_1)	-1.44391302	-0.533999575	3.854522849	-0.676085402
T (B_0)	0.960076704	0.448593867	12.61211183	0.540346198
P Değeri (B_1)	0.083470212	0.300127892	0.99936443	0.254040333
P Değeri (B_0)	0.824763103	0.670305022	1	0.702016387
HT	Eğilim Yok	Eğilim Yok	Eğilim Yok	Eğilim Yok
Yangın Noktası	**5-Akseki-Kuyucak**	**6-Kaş-Gömbe**	**7-Kaş-Ova**	**8-Alanya-Beldibi**
R^2	0.389042459	0.006751426	0.016106038	0.004981483
F Değeri	10.82517419	0.115554402	0.278284708	0.085109188
P Değeri	0.004320873	0.738070917	0.604645085	0.774019395
T (B_1)	-0.303936287	-2.941756707	-1.895637664	3.427770807
T (B_0)	0.278382599	1.329863447	1.065760645	-8.323308237
P Değeri (B_1)	0.382432546	0.004558882	0.037570012	0.998395529
P Değeri (B_0)	0.607961807	0.899434072	0.849282454	1.05971E-07
HT	Eğilim Var	Eğilim Yok	Eğilim Yok	Eğilim Yok
Yangın Noktası	**9-Kaş-Bezirgan**	**10-Kumluca-Beşikçi**	**11-Manavgat-Güzelyalı**	
R^2	0.015074316	0.189728634	0.223781389	
F Değeri	0.260185487	3.980625409	4.612749769	
P Değeri	0.61655142	0.062310255	0.046445439	
T (B_1)	1.960462166	0.501215329	-0.465607591	
T (B_0)	-3.218353939	-0.595047741	0.418774314	
P Değeri (B_1)	0.96672995	0.688676211	0.323702931	
P Değeri (B_0)	0.002522147	0.279824855	0.659687856	
HT	Eğilim Yok	Eğilim Yok	Eğilim Var	

***P değeri 0,05 anlamlılık seviyesinde sınanmıştır.*

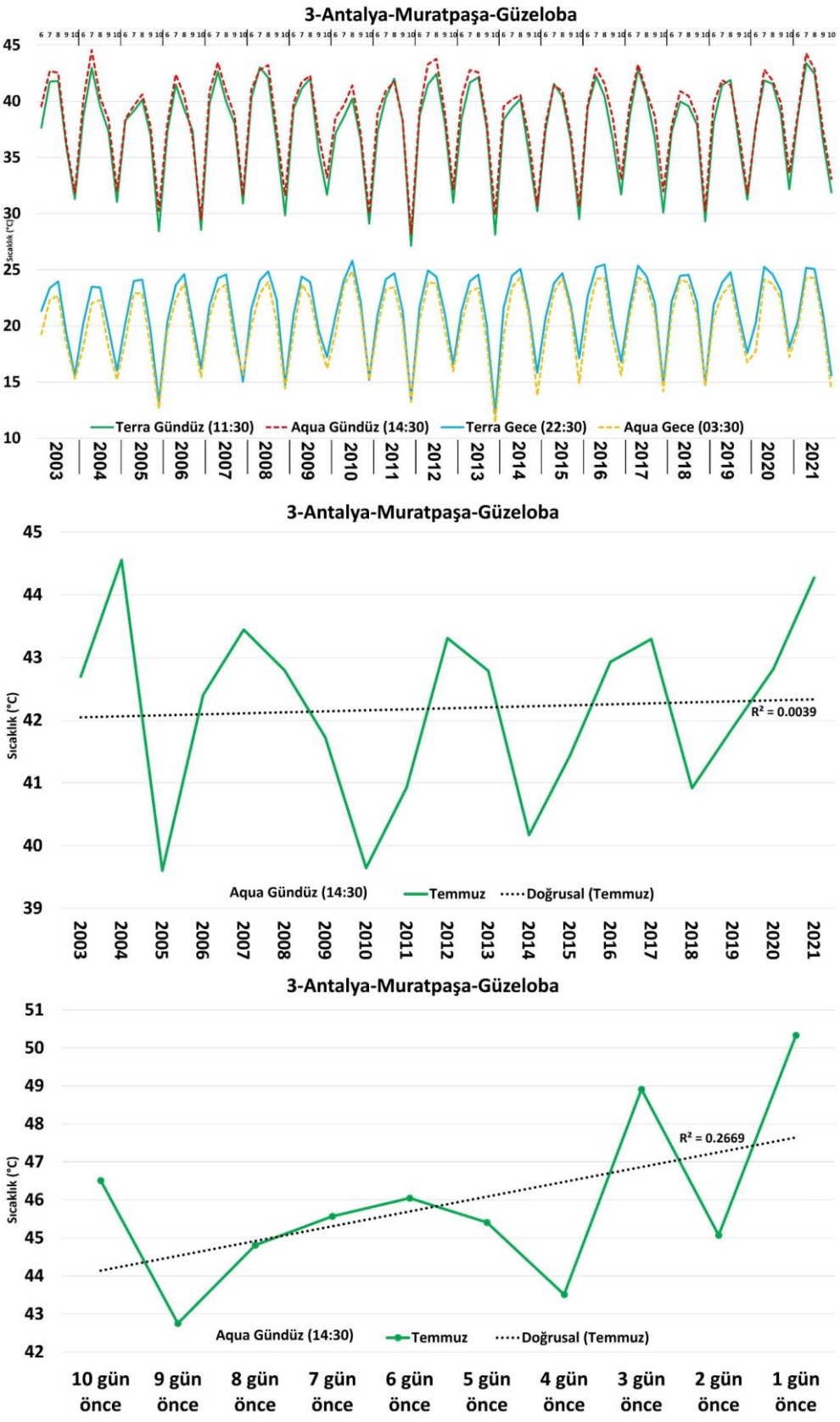
Tablo 1 incelendiğinde; basit doğrusal regresyon analizinde, B_1 regresyon katsayısını, B_0 regresyon sabitini ve R^2 ise regresyonu belirleme katsayısını ifade etmektedir. Değişen yıllara göre yüzey sıcaklığında anlamlı bir değişimin olup olmadığını görmek için yapılan testler B_1 regresyon katsayısı üzerinden yapılmış ve P değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar 0,05 anlamlılık seviyesinde test edilmiş ve yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir eğilim olup olmadığı belirlenmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere orman yangını çıkış noktalarından yalnızca ikisinde (Akseki/Kuyucak, Manavgat/Güzelyalı) bir eğilimin olduğu belirlenmiştir. Ancak eğilimin yönünün belirlenmesi için yapılan Mann-Kendall eğilim testi sonucunda her iki yangın çıkış noktasındaki yüzey sıcaklıklarının düşüş eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçta test edilen 11 orman yangını çıkış noktasının hiçbirinde anlamlı bir sıcaklık artış eğiliminin olmadığı belirlenmiştir.



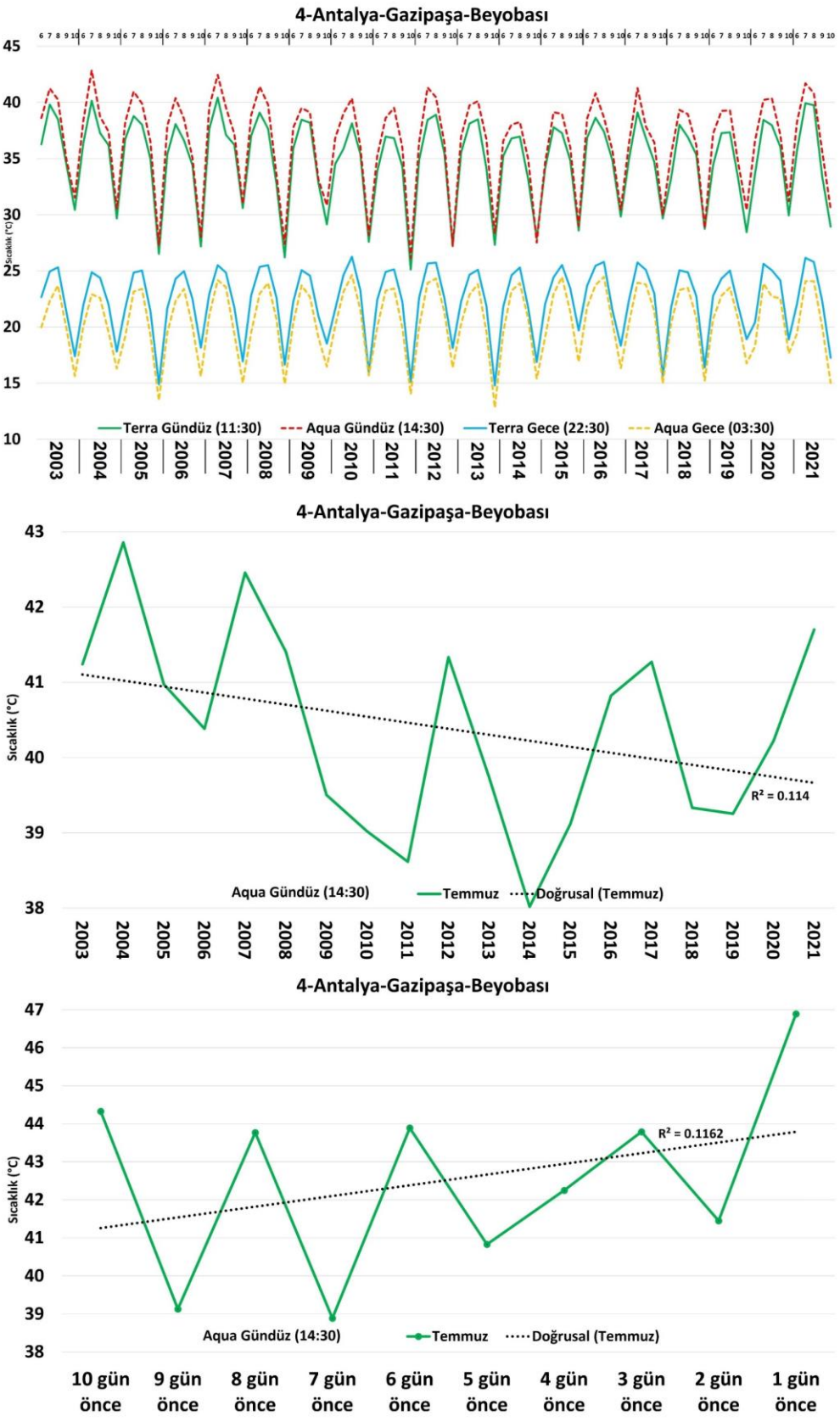
Şekil 16: Kaş-Gelemiş yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



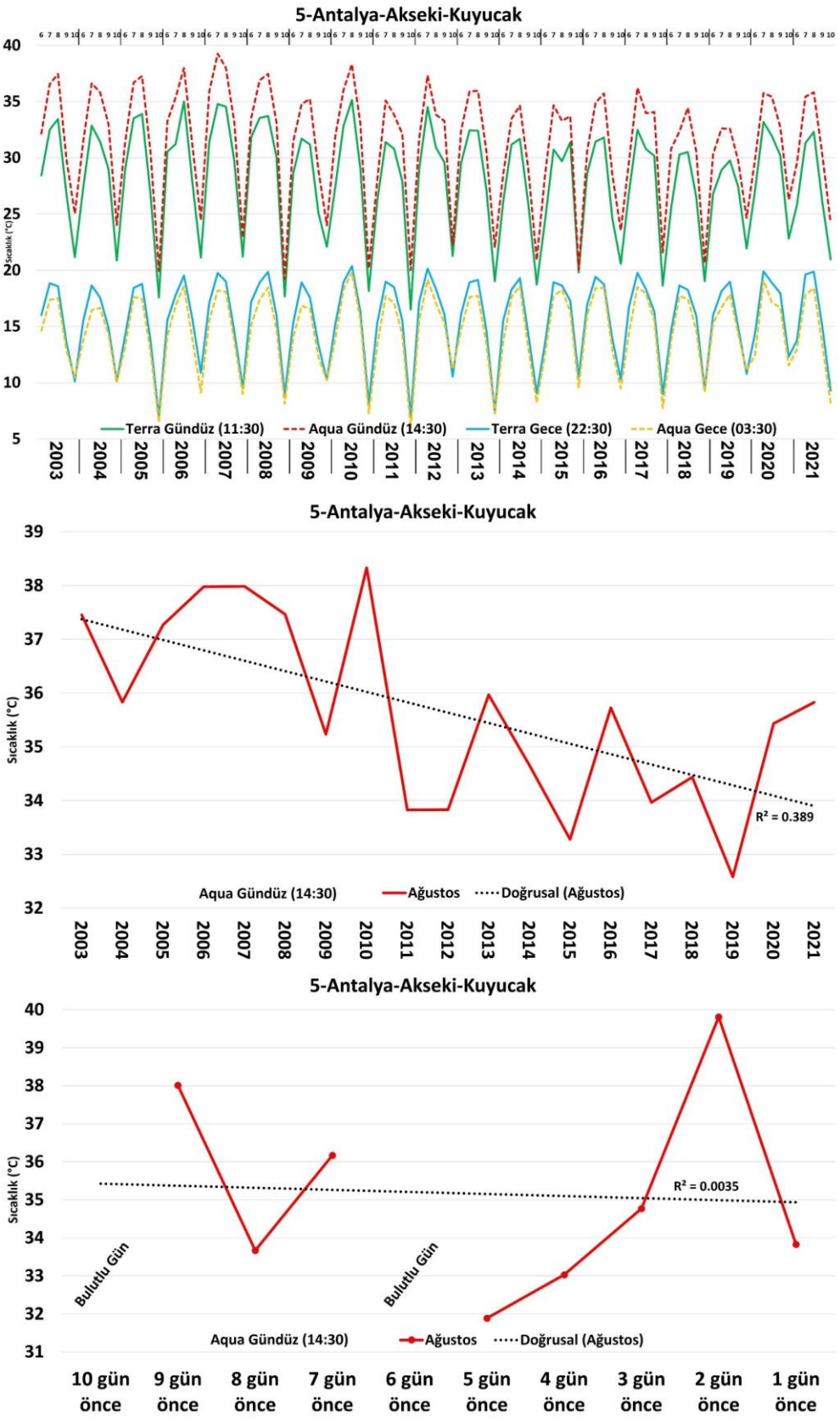
Şekil 17: Gazipaşa-Muzkent yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllardaki değişimi



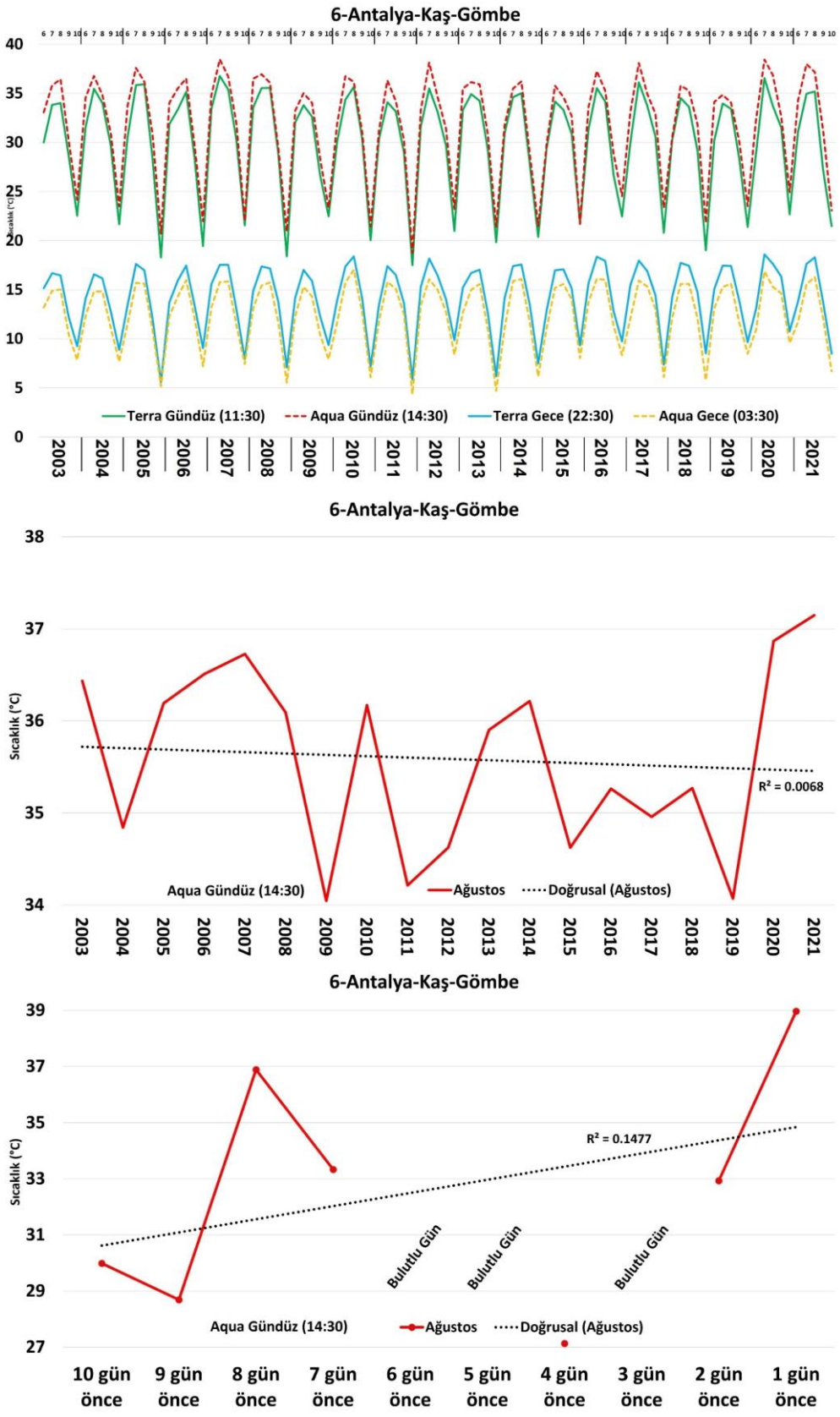
Şekil 18: Muratpaşa-Güzeloba yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



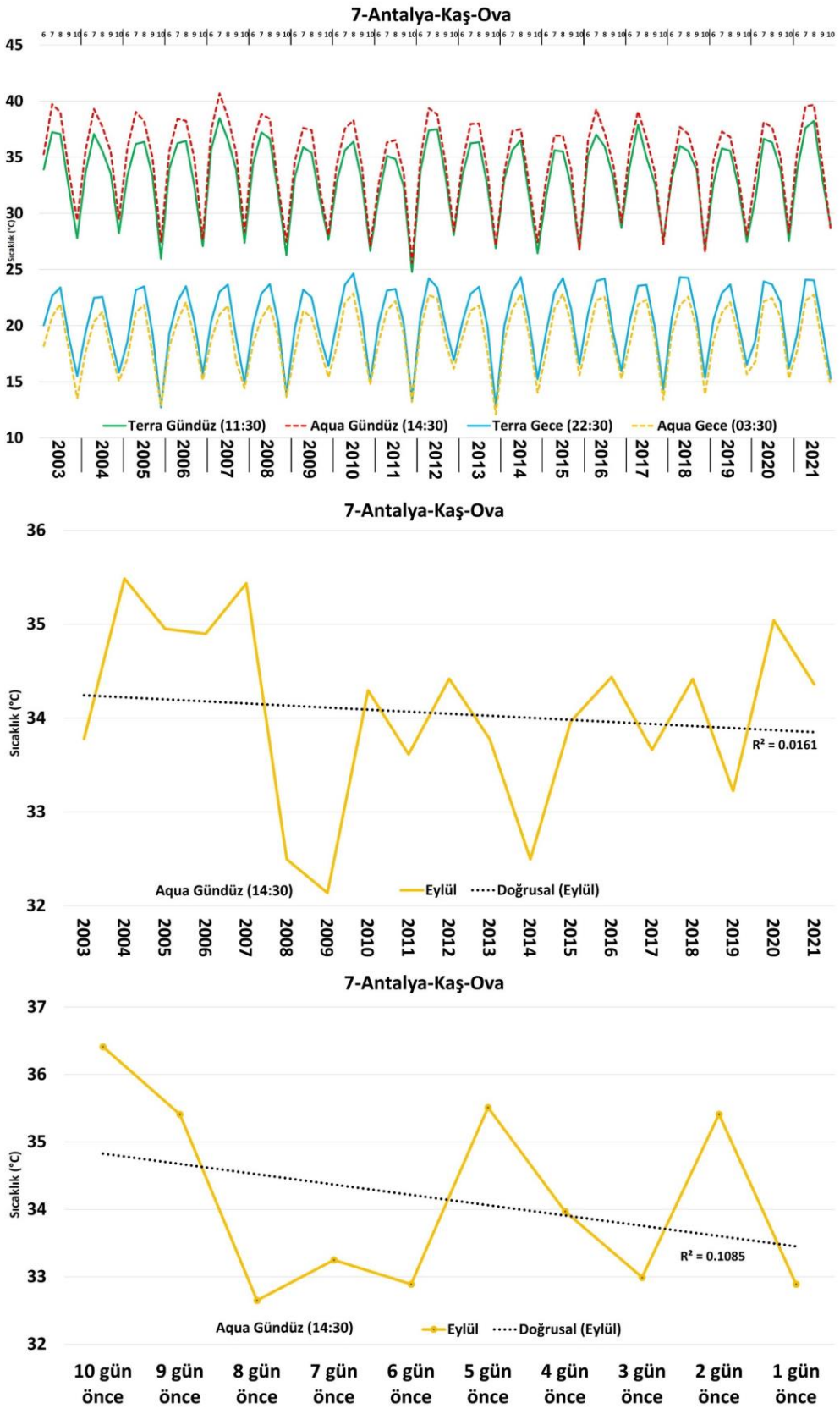
Şekil 19: Gazipaşa-Beyobası yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



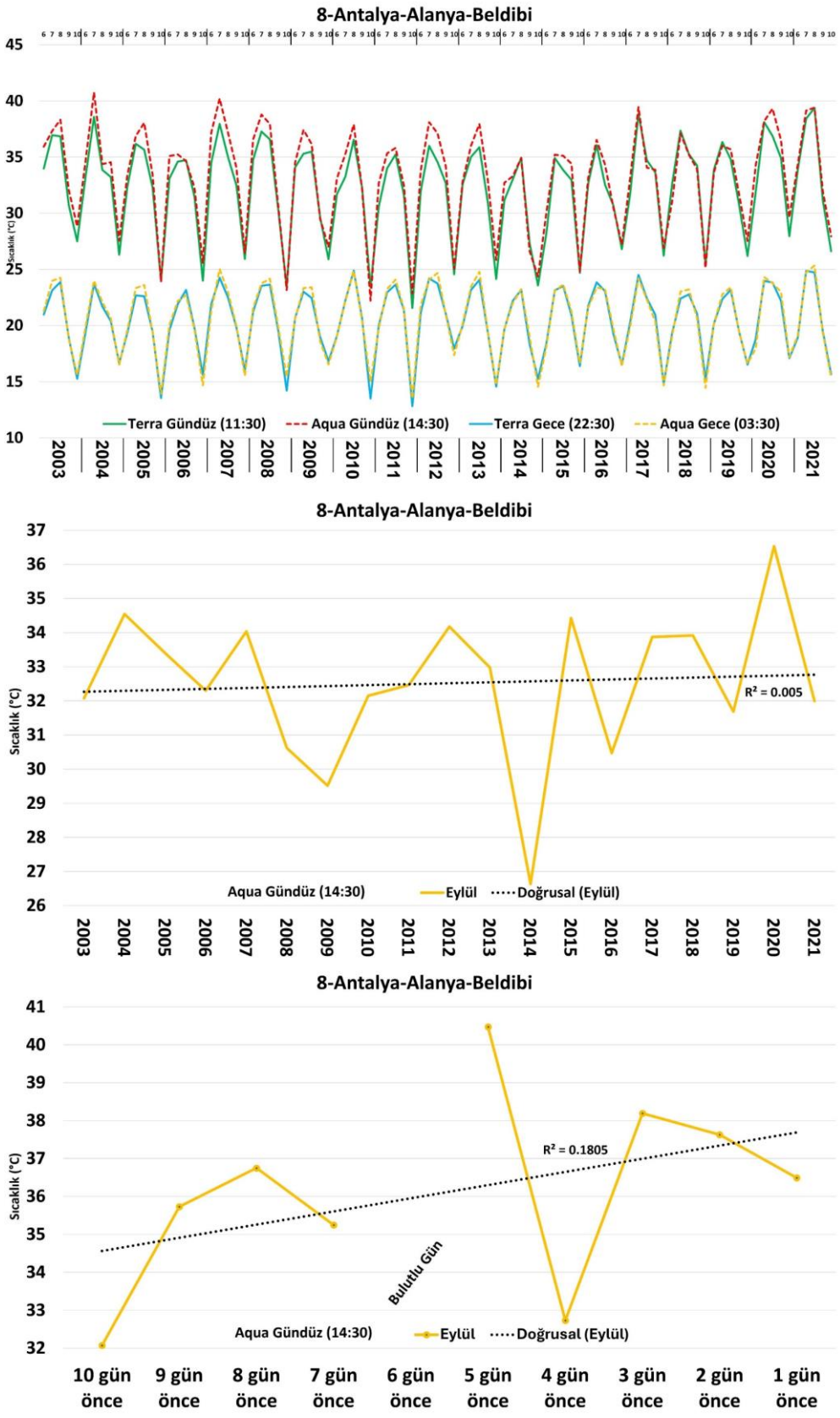
Şekil 20: Akseki-Kuyucak yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



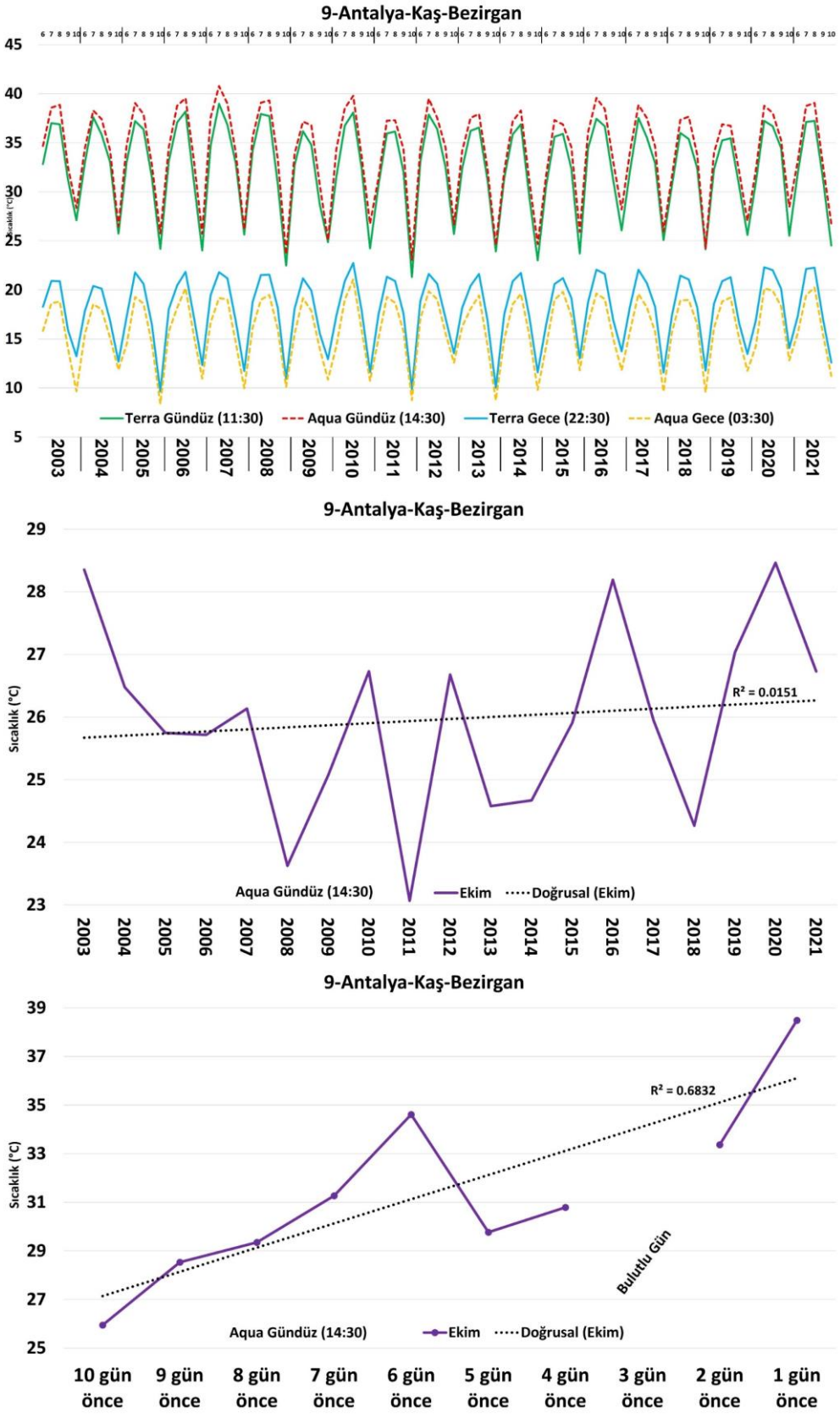
Şekil 21: Kaş-Gömbe yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



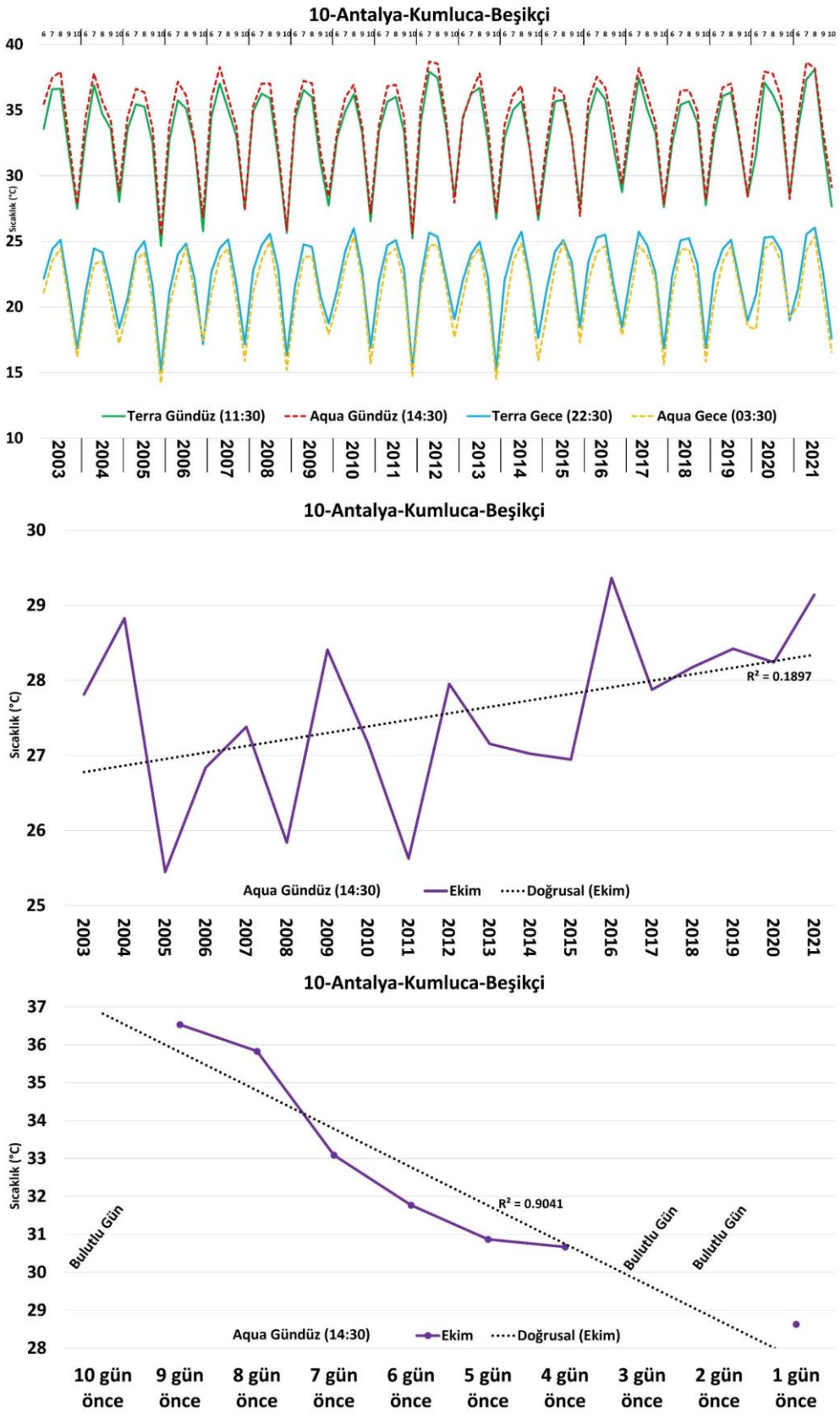
Şekil 22: Kaş-Ova yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



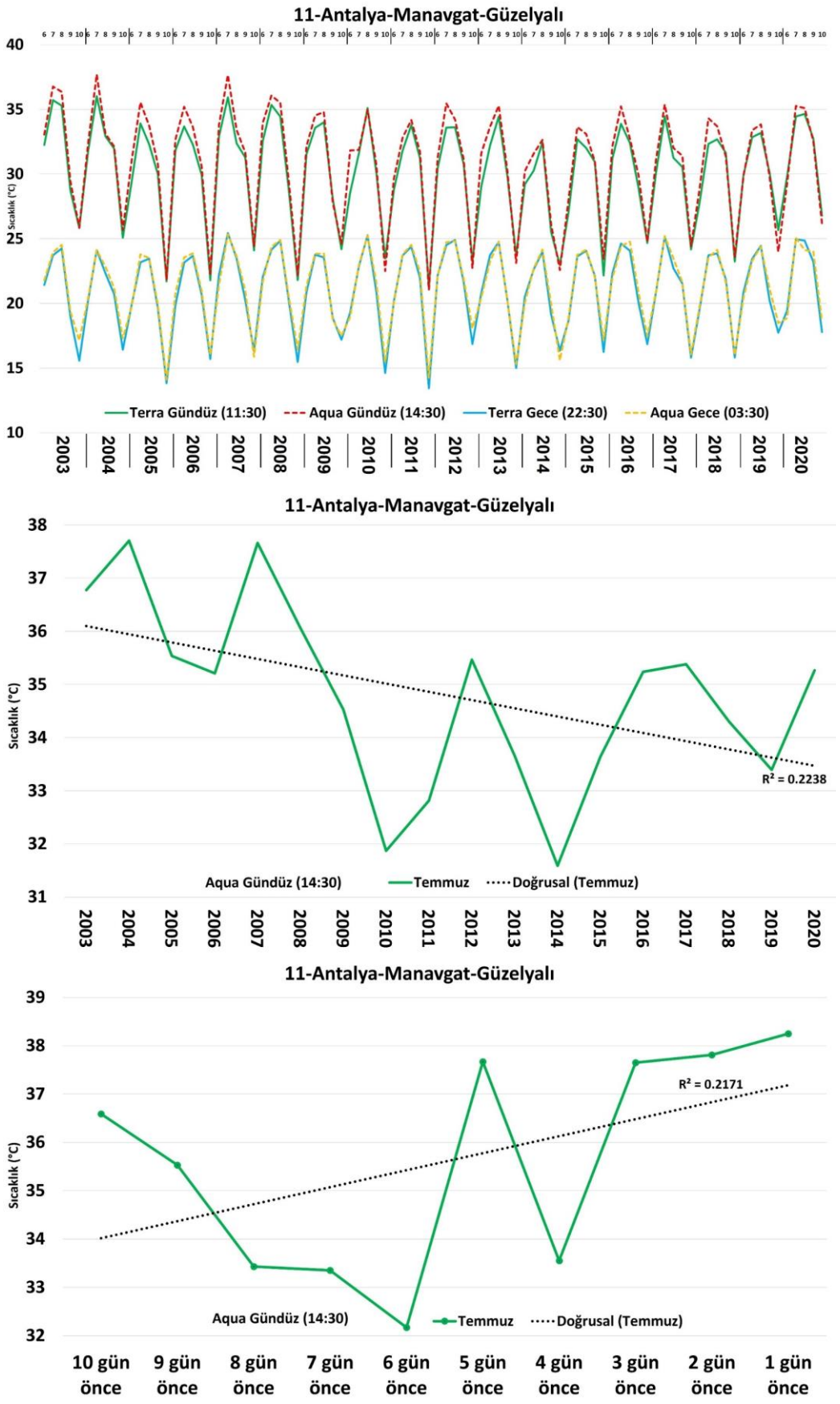
Şekil 23: Alanya-Beldibi yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



Şekil 24: Kaş-Bezirgan yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



Şekil 25: Kumluca-Beşikçi yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi



Şekil 26: Manavgat-Güzelyalı yangın çıkış noktasında yüzey sıcaklığının uzun yıllar ve son 10 gündeki değişimi

Seçilen orman yangını çıkış noktalarında son 10 gündeki durumda incelenmiş; 1 Haziran 2022'de meydana gelen Gazipaşa/Muzkent yangını veri eksikliğinden dolayı değerlendirme dışı bırakılmıştır. Yüzey sıcaklığı verilerinin Antalya için yangın sezonu olan haziran-ekim ayları arasına ait olması bu duruma neden olmuştur. Geriye kalan 10 yangına bakıldığında ise son 10 günde yalnızca 2 orman yangını çıkış noktasında anlamlı yüzey sıcaklığı değişimlerinin olduğu görülmüştür (Şekil 24) (Şekil 25). Saat 11:30'da uzun yıllara ait sıcaklık değerlerinde anlamlı artış eğilimlerinin görüldüğü Kumluca/Beşikçi orman yangınında, yangından önceki son 10 günde yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir azalış eğilimi olduğu belirlenmiştir (Şekil 25). Yangından önceki son 10 günde sıcaklıklarda istatistiksel olarak anlamlı bir artışın görüldüğü tek yangın çıkış noktası ise, ekim ayında meydana gelen ve 26 ha orman arazisinin yandığı Kaş/Bezirgan yangını olmuştur (Şekil 24).

Yangın çıkış noktalarında yangınının meydana geldiği ay dışında ve diğer ölçüm saatlerinde (11:30, 14:30, 22:30 ve 03:30) yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir değişim olup olmadığı incelendiğinde; Alanya/Beldibi, Kaş/Bezirgan ve Manavgat/Güzelyalı orman yangınları dışındaki tüm yangın çıkış noktaları ve özellikle gece saatlerinde anlamlı sıcaklık artışlarının olduğu görülmüştür (Şekil 16) (Şekil 17) (Şekil 18) (Şekil 19) (Şekil 20) (Şekil 21) (Şekil 22) (Şekil 25). Yangın çıkış noktalarında görülen anlamlı sıcaklık artışlarının çoğunlukla temmuz, ağustos ve eylül aylarında olduğu da belirlenmiştir.

5. Tartışma ve Sonuç

Antalya ilini ele alan bu çalışmada; 2000-2022 yılları arasına ait MODIS (AQUA ve TERRA) uydu görüntülerinden yararlanılarak yangın sezonu içinde olan ayların (haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim) ortalama yüzey sıcaklığı dağılışı belirlenmiş ayrıca sıcaklıklardaki eğilimler Mann-Kendall eğilim analizi ile tespit edilmiştir. Daha sonra ise Antalya OBM'den temin edilen orman yangını çıkış verileri ile yüzey sıcaklıkları arasındaki ilişkiler örnek orman yangınları üzerinden incelenmiştir. Orman yangını ve yüzey sıcaklığı arasındaki ilişkilerin incelenebilmesi için 2003-2021 yılları arasında günün en sıcak saatindeki (14:30) sıcaklıklara regresyon analizi uygulanmış ve yıllara göre sıcaklıklarda anlamlı bir değişim olup olmadığı belirlenmiştir. Daha sonra Mann-Kendall eğilim analizi ile var olan anlamlı değişimlerin yönü (artış ya da azalış) belirlenmiştir. Ayrıca örnek olarak seçilen orman yangınlarında, yangından önceki son 10 gündeki sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Son olarak diğer tüm ölçüm saatlerindeki (11:30, 14:30, 22:30, 03:30) sıcaklık değişimleri tespit edilmiştir.

Guangmeng ve Mei (2004) tarafından yapılan çalışmada Çin ve Avrupa'da meydana gelmiş örnek yangınlar seçilmiş ve bu yangınlardan önceki son 5 günde yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir değişim olup olmadığı incelenmiştir. Çin'de meydana gelen orman yangınlarında son 3 gün, Avrupa'daki yangınlarda ise son 4 gün sıcaklıklarda artış eğiliminin olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise son 10 gündeki değişimler incelenmiş ancak 1 yangın dışında (Kaş/Bezirgan) anlamlı bir sıcaklık artışının olmadığı görülmüştür. Ayrıca 1 orman yangınında (Kumluca/Beşikçi) ise anlamlı sıcaklık azalışının olduğu belirlenmiştir.

Manzo-Delgado vd. (2004) tarafından Meksika'yı konu alan çalışmada, El Nino devresinde yüzey sıcaklığı değerlerinin oldukça yükseldiği ve orman yangınlarının çoğunun bu dönemde meydana geldiği belirlenmiştir. Sonuçta El Nino'nun yüzey sıcaklığı, yüzey sıcaklığının ise orman yangınları üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise özellikle temmuz ve ağustos aylarında yüzey sıcaklıklarının diğer aylara kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmüş ancak yüksek yüzey sıcaklığı değerlerinin orman yangınları üzerinde doğrudan bir etkisi belirlenememiştir. En sıcak olarak tespit edilen sahaların genellikle tarım arazisi ve yerleşme sahaları gibi yapay yüzeyler olduğu görülmüştür.

Maffei vd. (2018) tarafından İtalya'nın Campania bölgesini konu alan çalışmada; 2003 ile 2017 yılları arasındaki orman yangınları ile AQUA-MODIS'den temin edilen yüzey sıcaklığı verileri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda pozitif yüzey sıcaklığı anomalilerinin orman yangınlarının süresi ve büyüklüğü üzerinde önemli etkilerinin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ise Antalya ilinde yer yer sıcaklık artış eğilimlerinin olduğu görülmüş ancak örnek orman yangınlarında, 2003 ile 2021 yılları arasında günün en sıcak saatinde anlamlı bir sıcaklık artışının olmadığı belirlenmiştir.

Beşli ve Tenekeci (2020) tarafından yapılan çalışma Kanada'da meydana gelen orman yangınlarını tahmin etmek için Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi, yüzey sıcaklığı ve termal anomali verileri kullanılmıştır. Sonuçta bu parametreler ile orman yangınlarının doğru bir şekilde tahmin edilebileceği ortaya konulmuştur. Çalışma sahası olan Antalya ilinde günün en sıcak saatindeki ve son 10 günlerdeki yüzey sıcaklığı değişimi incelenmiş ancak yüzey sıcaklıkları ile orman yangınları arasında doğrudan bir ilişki olmadığı ilişkinin sadece dolaylı olabileceği belirlenmiştir.

Cihan vd. (2022) tarafından İzmir'in Menderes ilçesinde gerçekleşen bir orman yangınını konu alan çalışma ile Mesut (2022) tarafından Antalya ve Muğla'da meydana gelen orman yangınlarını konu alan çalışmada; orman yangınlarından sonra yüzey sıcaklıklarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanında yer alan Kumluca/Beşikçi'de 2016 da meydana gelen orman yangınlarından sonra normalde ormanlık olan saha çıplak kalmıştır ve bu sahada özellikle ağustos ayında anlamlı sıcaklık artış eğilimlerinin olduğu belirlenmiştir.

Stoyanova vd. (2022) tarafından Bulgaristan'daki orman yangınları ile yüzey sıcaklıklarının karşılaştırıldığı çalışmada, yangın sezonu boyunca meydana gelen tüm orman yangınlarının pozitif yüzey sıcaklığı anomalilerinin olduğu günlere rastladığı belirlenmiştir. Antalya'da seçilen örnek yangınların bazılarında günler arasında sıcaklıklarda artışlar olmak beraber bu artışlar anlamlılık kazanmamaktadır. Hatta bazı yangınlardan (Kumluca/Beşikçi) önce sıcaklıklarda azalma eğilimi olduğu görülmektedir.

Antalya'da 2000-2022 yılları arasında toplam 5076 orman yangınının meydana geldiği ve bunların %87'sinin insan kaynaklı olduğu görülmüştür (Şenlik, 2024). Orman yangınları ve yüzey sıcaklığı ilişkisinin incelenmesi için seçilen yangınların tamamının da insan kaynaklı olduğu belirlenmiştir. Günün en sıcak zamanında yangın çıkış noktalarının hiçbirinde yüzey sıcaklıklarında anlamlı bir artış eğiliminin olmadığı görülmüştür. Antalya'da yüzey sıcaklıklarının en yüksek olduğu sahalara bakıldığında Aksu Ovası, Kestel Polye Sistemi ve Antalya Tufa Platosu gibi tarım arazisi olarak kullanılan sahalar olduğu görülmektedir. Bunun dışında ise Antalya şehir merkezi gibi şehirsel yerleşimlerde en yüksek sıcaklıklar görülmüştür. Sıcaklıklardaki artış eğilimlerinin ise genellikle gece saatlerinde olduğu görülmüş ve bu değişimler seçilen orman yangınlarına da yansımıştır. Geceleri bu sahaların ısınması zemindeki yanıcı maddelerin nem oranının düşürerek çıkacak yangınlara bir zemin hazırlayabileceği düşünülmektedir. Lakin burada yüzey sıcaklığının orman yangınları üzerinde ancak dolaylı olarak bir etkisinin olabileceği anlaşılmaktadır. Çalışma sahasının nüfusu 1950'den (28.000) 2022 (2.688.004) yılına kadar 96 kat artmıştır (Şenlik, 2024). Ayrıca Antalya ili 2022 yılı itibariyle yılda yaklaşık 13 milyon turisti misafir etmekte ve bu turistlerin yaklaşık %78'i yangın sezonu içerisinde çalışma sahasına gelmektedir. Örnek olarak seçilen yangınların tamamının da insan kaynaklı olması, Antalya ilinde yangına sebep olan birincil faktörün "insan" olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek nüfuslu ve turizm bölgesi olan sahalar ile yanma potansiyeli yüksek olan kızılçam ormanlarının kesişmesi bu durumu kaçınılmaz hale getirmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere yüzey sıcaklığı bu noktada ancak dolaylı etkisi olan ve insan kaynaklı yangınların ortaya çıkmasına yardımcı bir etken olarak gözükmektedir. Antalya gibi her geçen gün nüfus ve turist sayısı hızla artan şehirlerde "Büyük Manavgat Yangını" gibi mega yangınların tekrar yaşanmaması için hem insan sayısının kontrol altında tutulması hem de yangın öncesi ve sonrasına dair önlemlerin alınması son derece önemlidir. İnsan sayısının orman yangınlarına sebep olacak düzeyde artmasına engel olabilmek için, özellikle turist sayısının belirli bir düzeyin altında tutulması gerekmektedir. Özellikle yangın sezonu olarak adlandırdığımız haziran ile ekim ayları arasındaki turist sayısının azaltılması önemlidir. Turistlerin %78'inin yaz döneminde Antalya iline geldiği göz önüne alındığında bu oranın düşürülmesi için turist sayısına kota konulmalıdır. Ayrıca Antalya'da düzenlenen safari turlarının kaldırılması, ormanlarla ilgili turistik faaliyetlerin kısıtlanması ve özellikle yangın riskinin yüksek olduğu bölgelere girişlerin yasaklanması son derece önemlidir. Yeni açılacak turistik sahalarının kontrol altında tutulması ve yangın riski yüksek sahaların turizme açılmaması gerekmektedir. Turizme açılmış olan sahalarda ise yangın emniyet yol ve şeritleri gibi yangının yayılım hızını düşürecek önleyici önlemler ve uyarı levhaları gibi koruyucu önlemlerin alınması yerinde olacaktır.

Avrupa, Amerika ve Asya ülkeleri için yüzey sıcaklığı ile orman yangınları arasında ilişki kuran ve yüzey sıcaklığının yangınları doğrudan etkileyebileceğini gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada ise Türkiye'nin Antalya ili örnek olarak seçilmiş ve aynı ilişkinin burada kurulup kurulamayacağı araştırılmıştır. Ancak Antalya için yüzey sıcaklığının orman yangınları üzerinde yalnızca dolaylı bir etkisinin olabileceği anlaşılmıştır. Bu tür çalışmaların devam etmesi ve Türkiye'nin başka illerinde veya bölgelerinde yüzey sıcaklığı ile orman yangını ilişkisinin incelenmesi faydalı olacaktır. Ayrıca Antalya'nın yüzey sıcaklığı dağılışı ve eğilimlerinin ilerleyen yıllarda da takip altında tutulması ve sıcaklık artışının olduğu sahaların belirlenmesi önemlidir.

Teşekkür

Bu makale, birinci yazarın "Antalya İlinde Orman Yangınlarının Farklı Parametrelerle İlişkisi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

Adeyeri, O. E., Folorunsho, A. H., Ayegbusi, K. I., Bobde, V., Adeliyi, T. E., Ndehedehe, C. E., & Akinsanola, A. A. (2024). Land surface dynamics and meteorological forcings modulate land surface temperature characteristics. *Sustainable Cities and Society, 101*, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105072

Akyürek, Ö. (2020). Termal uzaktan algılama görüntüleri ile yüzey sıcaklıklarının belirlenmesi: Kocaeli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 6*(2), 377–390. https://doi.org/10.21324/dacd.667594

Avcı, M. (1993). Türkiye'nin flora bölgeleri ve "Anadolu Diagonali"ne coğrafi bir yaklaşım. *Türk Coğrafya Dergisi, 28*, 225–248.

Berberoğlu, E., & Ertürk, M. (2020). Antalya'nın doğal bitki örtüsünün yıllara göre alansal değişimi. In B. Koçakoğlu & D. Çakılcı (Eds.), *Antalya Kitabı: Antalya'da Doğa ve Medeniyet* (ss. 217–242). Dizgi Ofset.

Beşli, N., & Tenekeci, E. (2020). Uydu verilerinden karar ağaçları kullanarak orman yangını tahmini. *DÜMF Mühendislik Dergisi, 11*(3), 899–906. https://doi.org/10.24012/dumf.661925

Çanakçıoğlu, H. (1979). Türkiye orman yangın istatistiklerinin temeline ilişkin tartışmalar. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 29*(2), 10–19.

Cho, D., Bae, D., Yoo, C., Im, J., Lee, Y., & Lee, S. (2022). All-sky 1 km MODIS land surface temperature reconstruction considering cloud effects based on machine learning. *Remote Sensing, 14*(8), Article 1815. https://doi.org/10.3390/rs14081815

Cihan, A., Cerit, K., & Erener, A. (2022). Yangın alanında uydu görüntüleri ile yer yüzey sıcaklık değişimi gözlemi ve mekânsal alan tespiti. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8*(1), 142–155. https://doi.org/10.21324/dacd.942724

Çolak, E., & Sunar, F. (2018, 18–21 Eylül). *Yüzey sıcaklığı ve spektral yanma indekslerinin orman yangın analizinde kullanımı* [Bildiri sunumu]. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye.

Dikici, M. (2019). Asi Havzası'nda (Türkiye) kuraklık analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *5*(1), 22–40. https://doi.org/10.21324/dacd.426784

Dinç, N., Aydınşakir, K., Işık, M., & Büyüktaş, D. (2016). Standartlaştırılmış yağış indeksi (SPI) yöntemi ile Antalya ili kuraklık analizi. *Derim, 33*(2), 279–298. https://doi.org/10.16882/derim.2016.267912

Duran, M. (2023). *Taşköprü Orman İşletme Müdürlüğü sahalarında orman yangını sorunu ve yangınlar üzerinde etkili olan faktörler* [Yüksek lisans tezi, Bursa Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Ergün, O. F. (2023). Türkiye'de orman yangınları ve gönüllülük. *Emergency Aid and Disaster Science, 3*(1), 7–14.

Erol, O. (2014). *Genel klimatoloji* (10. Baskı). Çantay Kitapevi.

Guangmeng, G., & Mei, Z. (2004). Using MODIS land surface temperature to evaluate forest fire risk of Northeast China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1*(2), 98–100. https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.826550

Güney, C. O., Özkan, K., & Şentürk, Ö. (2016). Antalya-Manavgat yöresi ormanlarında tutuşma riskinin coğrafi dağılım modellemesi. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 66*(2), 459–470. https://doi.org/10.17099/jffiu.42696

Guo, D., Wang, C., Zang, S., Hua, J., Lv, Z., & Lin, Y. (2021). Gap-filling of 8-day terra MODIS daytime land surface temperature in high-latitude cold region with generalized additive models (GAM). *Remote Sensing, 13*(18), 3667–3685. https://doi.org/10.3390/rs13183667

Hızal, E., & Akkuzu, E. (2002). Orman yangınlarının yaban hayatı üzerindeki etkileri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 52/53*(2/1-2), 87–94. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/176194

İrcan, M. R., & Duman, N. (2022). Van Gölü Havzası'ndaki maksimum ve minimum sıcaklıkların trend analizi. *Türk Coğrafya Dergisi*, *80*, 39–52.

Kantarcı, M. D. (2009). Taşağıl-Serik (Antalya) orman yangını (31.7.2008-4.8.2008) ve yangın sonrası öngörülen işlemler üzerine ekolojik değerlendirmeler. *Orman Mühendisleri Odası Yayın Organı, 1-2–3*, 33–37.

Karabacak, K., Bayar, R., & Türkşen, Ö. (2019, 20-22 Haziran). *Antalya ilinde orman yangınlarının mekânsal istatistiksel yöntemler ile analizi* [Bildiri sunumu]. 1. İstanbul Uluslararası Coğrafya Kongresi, İstanbul, Türkiye.

Kılıç, H. (2012). *Orman Yangınları ve İnsan İlişkisi: Antalya Orman Bölge Müdürlüğü örneği* [Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Kurt, B. (2014). *Türkiye'de orman yangınlarının coğrafi dağılışı* [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Lata, R., & Ghosh, S. (2022). Assessing the impact of spatio-temporal land cover changes on land surface temperature using satellite data in Beas Valley, Himachal Pradesh, India. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 986*(1), 1–15. https://doi.org/10.1088/1755-1315/986/1/012050

Lavanya, B., & Padmaja, B. (2014). A novel approach for identification of forest fires using land surface temperature images. *IOSR Journal of Computer Engineering, 16*(5), 78–83. https://doi.org/10.9790/0661-16547883

Lewis, T. (1998). The effect of deforestation on ground surface temperatures. *Global and Planetary Change, 18*(1–2), 1–13. https://doi.org/10.1016/S0921-8181(97)00011-8

Li, S., Wang, J., Li, D., Ran, Z., & Yang, B. (2021). Evaluation of landsat 8-like land surface temperature by fusing Landsat 8 and Modis land surface temperature product. *Processes, 9*(12), 2262–2279. https://doi.org/10.3390/pr9122262

Lund, H. G. (2014). Orman nedir? tanımlar farklı sonuçlar doğurur Türkiye örneği. *Avrasya Terim Dergisi, 2*(1), 9–16. http://dergipark.gov.tr/download/article-file/59836

Maffei, C., Alfieri, S. M., & Menenti, M. (2018). Relating spatiotemporal patterns of forest fires burned area and duration to diurnal land surface temperature anomalies. *Remote Sensing, 10*(11), 1777–1797. https://doi.org/10.3390/rs10111777

Manzo-Delgado, L., Aguirre-Gómez, R., & Álvarez, R. (2004). Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fires. *International Journal of Remote Sensing, 25*(20), 4417–4423. https://doi.org/10.1080/01431160412331269643

Mesut, M. N. (2022). *Orman yangınlarının hava kalitesi ve yer yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerinin uzaktan algılama yöntemleri ile incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi] YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024, 7 Şubat). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü İllerimize Ait Genel İstatistik Verileri: Antalya*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=ANTALYA

NASA/Level-1 and Atmosphere Archive & Distiribution System (2024, 5 Mart). *Orbit Tracks and Overpass Times*. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/viewdata/#l:Sentinel_2B_Orbit_Dsc;@31.2,38.4,6.4z

Neyişçi, T. (1986). *Antalya Doyran yöresi kızılçam (Pinus brutia Ten.) ormanlarından yangınların tarihsel etkileri* (Teknik Rapor Seri No: 29). Ormancılık Araştırma Enstitüsü Yayınları.

Orman Genel Müdürlüğü. (2024, 29 Mayıs). *Orman Genel Müdürlüğü Ormancılık İstatistikleri 2022*. https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler

Özdemir, N. C., & Çelik, İ. (2020, 4–5 Aralık). *Akıllı şehirlerde orman yangınları özelinde afet ve acil durum yönetimi* [Bildiri sunumu]. International Marmara Sciences Congress, Kocaeli, Türkiye.

Sabancı, S. (2016, 13–14 Ekim). *Antalya'nın doğusu-Akseki, Gündoğmuş ve Manavgat (Karpuz Çayı Havzası)'ta orman yangınları'nın sebepleri ve alınması gereken önlemler* [Bildiri sunumu]. TÜCAUM Uluslararası Coğrafya Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Sarıbaşak, H. (2000). *Batı Akdeniz (Antalya) yöresinde orman yangınlarının topografik, meteorolojik ve sosyo-ekonomik açılardan değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Soydan, O. (2022). Detection of burnt areas by remote sensing techniques: Antalya Manavgat forest fire. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 10*(2), 3029–3035. https://doi.org/10.24925/turjaf.v10isp2.3029-3035.5763

Stoyanova, J. S., Georgiev, C. G., & Neytchev, P. N. (2022). Satellite observations of fire activity in relation to biophysical forcing effect of land surface temperature in Mediterranean climate. *Remote Sensing, 14*(7), 1747–1771. https://doi.org/10.3390/rs14071747

Şenlik, Y. F. (2024). *Antalya ilinde orman yangınlarının farklı parametrelerle ilişkisi* [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Türkeş, M. (2021). *Genel klimatoloji atmosfer, hava ve iklimin temelleri* (5. Baskı). Kriter Yayınevi.

Yılmaz, E., & Çiçek, İ. (2018). Türkiye'nin detaylandırılmış Köppen-Geiger iklim bölgeleri. *Journal of Human Sciences, 15*(1), 225–242. https://doi.org/10.14687/jhs.v15i1.5040

Zainalabden, T. I. A. (2022). *Çok kriterli karar analizi ile oluşturulan orman yangını risk haritalarının gerçekleşen orman yangınları ile karşılaştırılması (Manavgat örneği)* [Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Zhao, J., Wang, L., Hou, X., Li, G., Tian, Q., Chan, E., Ciais, P., Yu, Q., & Yue, C. (2021). Fire regime impacts on postfire diurnal land surface temperature change over North American boreal forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126*(23), 1–14. https://doi.org/10.1029/2021JD035589

Zile, M. (2018). Orman yangınlarının olay yerinde analizi, kusurluların ile kusur oranlarının belirlenmesi ve alınması gereken önlemler. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 4*(2), 89–97.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 249–267, DOI: 10.21324/dacd.1533641

Ankara'da Partikül Madde (PM_{10}) ve Kükürt Dioksit (SO_2) Konsantrasyonlarının İklim Parametreleri İle Mekânsal-Zamansal Analizi

Olgu Aydın[1,*], Nussaïbah Begum Raja[2]

[1]*Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye.*
[2]*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, GeoZentrum Nordbayern, 91054, Germany.*

Özet

Türkiye'de hava kirliliği, özellikle büyük şehirlerde, nüfus artışı, plansız kentleşme, sanayi ve enerji tesislerindeki artış nedeniyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Partikül Madde (PM_{10}) ve Kükürt Dioksit (SO_2) konsantrasyonları, sanayi ve enerji üretimindeki yüksek emisyonlar sonucu hava kalitesini önemli ölçüde bozmaktadır. Hava kirliliği sorunuyla karşılaşan büyük şehirlerden biri olan Ankara, 2022 Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu'nda hava kirliliğinin öncelikli sorunlar arasında ikinci sırada yer aldığı belirtilmiştir. Bu çalışmanın amacı, 2011–2014 yılları arasında Ankara'da PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini Kriging with External Drift (KED) yöntemi kullanarak incelemektir. 2011 yılında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri, diğer yıllara göre daha düşük seviyelerde olup, Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) tarafından belirlenen yıllık konsantrasyon değerlerinin üzerinde kalmıştır. 2012 ve 2013 yıllarında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiş ve şehrin farklı bölgelerinde değişkenlik göstermiştir. 2014 yılında, artan yağış ve sıcaklık değerleri ile birlikte, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarında dikkat çekici bir azalma yaşanmıştır. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performansı değerlendirildiğinde, PM_{10} modelinin %66, SO_2 modelinin %78 oranında açıklayıcı güce sahip olduğu görülmektedir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının meteorolojik faktörler kullanılarak yapılan mekânsal-zamansal KED analizi, hava kirliliğinin değişimlerini anlamak ve mekânsal değişkenler arasındaki ilişkileri ile zaman içindeki etkileşimleri kavrayabilmek açısından önemlidir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kirliliği, Partikül Madde (PM_{10}), Kükürt Dioksit (SO_2), Mekânsal-Zamansal Dağılım, Kriging with External Drift (KED)

Spatial-Temporal Analysis of Particulate Matter (PM_{10}) and Sulphur Dioxide (SO_2) Concentrations in Ankara Using Climate Parameters

Abstract

Air pollution in Turkey has become a significant issue, particularly in large cities, due to population growth, unplanned urbanization, and increases in industrial and energy facilities. Particulate Matter (PM_{10}) and Sulphur Dioxide (SO_2) concentrations significantly deteriorate air quality due to high emissions from industrial and energy production. Ankara, one of the major cities facing air pollution problems, is noted as having air pollution among the top issues in the 2022 Turkey Environmental Issues and Priorities Assessment Report. This study aims to investigate the spatial-temporal changes in PM_{10} and SO_2 concentrations in Ankara from 2011 to 2014 under the influence of meteorological factors using the Kriging with External Drift (KED) method. In 2011, PM_{10} and SO_2 concentration levels were lower compared to other years but remained above the annual concentration limits set by the World Health Organization (WHO). In 2012 and 2013, increases in PM_{10} and SO_2 concentrations were observed, showing variability across different regions of the city. In 2014, a notable decrease in PM_{10} and SO_2 concentrations was observed, coinciding with increased rainfall and temperature values. When evaluating the performance of the prediction models for PM_{10} and SO_2 concentrations, it is found that the PM_{10} model explains 66% and the SO_2 model explains 78% of the variance. The spatial-temporal KED analysis of PM_{10} and SO_2 concentrations using meteorological factors is crucial for understanding the changes in air pollution and comprehending the relationships between spatial variables and their interactions over time.

Keywords

Air Pollution, Particulate Matter (PM_{10}), Sulphur Dioxide (SO_2), Spatio-Temporal Distribution, Kriging with External Drift (KED)

1. Giriş

Sanayileşme etkisi ve enerji kullanımının yaygınlaşması, hava kirliliği sorunlarının dünya genelinde ciddi bir şekilde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Hava kirliliği, günümüzde sadece çevresel bir sorun olarak değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve ekolojik sistemlerden kaynaklanan bir risk olarak değerlendirilmektedir (Feng vd., 2024).

*Sorumlu Yazar: Tel: +90 (312) 3103282 Faks: +90 (312) 3105713
E-posta: oaydin@ankara.edu.tr (Aydın O.), nussaibah.raja.schoob@fau.de (Raja N.B.)

Gönderim Tarihi / Received : 15/08/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 20/09/2024

Bu sebeple, hava kirliliği, kamu, hükümet ve bilim topluluğu için küresel bir endişe kaynağı haline gelmiştir (Fan vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü'ne (World Health Organization, WHO) göre, hava kirliliği her dakika dünya genelinde on üç kişinin yaşamını tehdit etmektedir (World Health Organization, 2021). Bu kritik durum, hava kalitesinin iyileştirilmesi için acil önlemler alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. WHO, 2010 yılında hava kalitesine ilişkin ilk yönergeleri yayımlayarak iç mekân hava kalitesi standartlarının oluşturulmasına yönelik bir adım atmıştır. 2014 yılında, hava kirliliği ile mücadele, Birleşmiş Milletler Çevre Asamblesi'nde (United Nations Environment Assembly, UNEA) bir karar olarak kabul edilmiştir. UNEA'nın 2016 yılında düzenlediği ikinci toplantısında, *"Eylem Hava Kalitesi"* ve *"Pekin'de Hava Kirliliği Kontrol Süreci: 1998–2013"* başlıklı iki önemli rapor sunulmuştur. İlk raporda, 1998–2015 dönemi küresel hava kalitesinin değerlendirilmesi ve hava kalitesinin on ölçütünü açıklamıştır. İkinci raporda, Pekin'de 1998–2013 yılları arasında hava kirliliğini kontrol etmek için uygulanan önlemler değerlendirilmiştir. 2017 yılında yapılan üçüncü UNEA toplantısında, hava kirliliği konusuna odaklanılmış ve acil çevresel sağlık sorunlarına küresel bir yanıt çağrısında bulunulmuştur. 2018'de, WHO, UNEA ve diğer ajanslar tarafından düzenlenen Küresel Hava Kirliliği ve Sağlık Konferansı'nda, 2030 yılına kadar hava kirliliğinden kaynaklanan ölümlerin üçte iki oranında azaltılması hedeflenmiştir. 2021 yılında UNEA tarafından yayımlanan *"Hava Kirliliği Serisi: Hava Kalitesinin Düzenlenmesi"* raporunda ise, 194 ülke ve Avrupa Birliği'nin hava kalitesi yasaları gözden geçirilmiş ve çeşitli yasal ve kurumsal çerçeveler incelenmiştir (Feng vd., 2024). Son birkaç on yılda, hava kalitesini iyileştirme yönünde ilerlemeler kaydedilmiş olsa da hava kirliliği insan sağlığı ve ekonomi üzerinde risk oluşturmaya devam etmektedir (Pinho-Gomes vd., 2023). Hava kirliliği, sadece insanların solunum ve kardiyovasküler gibi çeşitli hastalıklara neden olmakla kalmamış (Tran vd., 2023; Alahmad vd., 2023), aynı zamanda hava durumu ve iklimi de etkileyerek sel ve kuraklık gibi daha ekstrem hava olaylarına da yol açmıştır (Pei & Shiliang, 2016; Cenlin vd., 2024). Bu etkilerin azaltılması için daha kapsamlı stratejilere ve küresel iş birliğine ihtiyaç duyulmaktadır, çünkü hava kirliliğinin neden olduğu sorunlar, sadece bireysel sağlık değil, toplumsal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük tehditler oluşturmaktadır (Feng vd., 2024).

Türkiye, 85 milyon 372 bin 377 kişilik nüfusu ile nüfus büyüklüğüne göre, 194 ülke arasında 18. sırada yer almakta ve dünya toplam nüfusunun %1.1'ini oluşturmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024a). Artan nüfus, trafik ve sanayinin giderek büyümesi, şehirlerde hava kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu duruma paralel olarak, Türkiye'de hava kirliliği sorunları, özellikle büyük şehirlerde, nüfus artışıyla beraber aşırı ve plansız kentleşme, sanayi tesislerindeki ve enerji tesislerindeki artış, fosil yakıt kullanımındaki artış ile derinleşmektedir. Partikül Madde (PM_{10}) ve Kükürt Dioksit (SO_2) konsantrasyonları, özellikle sanayi ve enerji üretiminden kaynaklanan yüksek emisyonlarla önemli bir hava kirliliği kaynağı oluşturmakta ve hava kalitesini ciddi şekilde etkilemektedir. Türkiye'de, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştıran 15 sağlık, çevre ve iklim örgütünün oluşturduğu Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) tarafından yayımlanan Kara Rapor 2022'ye göre, 2021 yılında Türkiye'de $PM_{2.5}$ seviyeleri, WHO tarafından izin verilen yıllık kütle konsantrasyon değerinin (15 µg/m³) (World Health Organization, 2023) 4 katına çıkmıştır. Özellikle, Kahramanmaraş depreminden (06 Şubat 2023) etkilenen şehirlerde, büyük miktarda enkazın yol açtığı toz ve halkın ısınmak için açık alanda yaktığı ateşler nedeniyle, $PM_{2.5}$ değeri 7.5 kat arttığı gözlemlenmiştir (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2023). Ayrıca, bu bölgelerde asbest riskinin varlığı, hava kirliliğinin ciddi bir halk sağlığı sorunu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye'de, $PM_{2.5}$ kaynaklı ölüm riski, Hava Kirliliği Yükü–2021 Raporuna göre, trafik kazaları, uyuşturucu kullanımı veya cinayetler gibi diğer risk faktörlerinin toplamından çok daha yüksektir (Greenpeace, 2022). 2021 yılında, kirli havayı soluyan ilk beş il sırasıyla Iğdır, Ağrı, Şırnak ve Malatya, PM_{10} değerleri açısından WHO'nun belirlediği yıllık eşik değerinin (15 µg/m^3), 5-8 katına çıkmıştır (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2023). Bu durumlar, hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki ciddi etkilerini ve yerel seviyede belirginleşen sorunları gözler önüne sermektedir. Özellikle, Türkiye'de hava kirliliğinin sorun yarattığı büyük şehirlerden biri olan Ankara, 2022 yılı Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu'nda hava kirliliğinin öncelikli sorunlar arasında ikinci sırada yer almaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). Bu rapora göre, Ankara'da hava kirliliğini arttırıcı etkenler değerlendirildiğinde, iç mekân ısınma, karayolu trafiği, iklim parametreleri ve topografik yapı en temel sebepler arasında gösterilmektedir. Oral vd. (2015) Ankara merkez olmak üzere çevresinde yer alan 12 şehirde yapmış oldukları hava kirliliği dağılım kontrolü ve emisyon envanter dağılımı çalışmalarında, hava kirliliğine katkıda bulunan ana emisyon kaynaklarını tanımlamış ve bunların kirlilik üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, Ankara'nın iç mekân ısınma, trafik ve sanayi kaynaklı emisyonlar açısından en yüksek oranları verdiğini ortaya koymuştur. Ankara'da hava kirliliği seviyelerinin, şehir içinde çeşitli bölgelerde farklılık gösterdiği (Toros vd., 2018), trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma kaynakları ve sanayi bölgeleri gibi faktörlerin kirlilik seviyelerini etkilediği yapılan çalışmalarla değerlendirilmiştir (Genc vd., 2010; Turgut & Temiz, 2015; Toros vd., 2018; Raja vd., 2018). Ayrıca, meteorolojik ve topografik faktörlerin de (Arslan & Dursun, 2024), Ankara'da hava kirliliğini artıran diğer etmenler arasında yer aldığı belirtilmiştir. Ankara'da, hava kirliliği konsantrasyonlarını meteorolojik faktörlerle ilişkilendirerek yapılmış çalışmalar, bu sorunun önemini açıkça göstermektedir (Sahin vd., 2001; Genc vd., 2010; Ulutas vd., 2021; Akbal & Ünlü, 2022). Son yıllarda, Ankara'daki atmosfer kirliliği ve halk sağlığı üzerindeki etkilerini konu alan çalışmalara da önem verilmiştir (Aydın, 2023; Koçak & Balcılar, 2024; Arslan vd., 2024).

Hava kirliliğinin dinamiklerini ortaya koymak ve etkili stratejiler geliştirmek için mekânsal-zamansal analizler önemli bir rol oynamaktadır. Hava kirliliğinin zaman içindeki değişimleri ve farklı mekânlardaki dağılımı, kirliliğin kaynaklarını ve etkilerini daha iyi anlamayı sağlar ve böylece etkili müdahale ve politika önerilerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Literatürde, bu konuya yönelik yapılan çalışmaların sayısında da artış bulunmaktadır (Fan vd., 2020; Butenko & Topchıy, 2023; Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024). Ankara'da, Turgut ve Temiz (2015) Sıhhıye istasyonuna ait geçmiş hava kirliliği verilerini (1 Ocak 2010 ile 31 Ekim 2014 tarihleri arasında) kullanarak, Box-Jenkins yöntemiyle gelecekteki PM_{10} konsantrasyon değerlerinin, zaman içindeki değişimini incelemişlerdir. Ankara'nın en yüksek PM_{10} değerlerine sahip Sıhhıye bölgesinde, hava kalitesinin iyi seviyelerde olmadığını, gelecekte de aynı şekilde kalacağını tahmin etmişlerdir. Yoğun trafik sorunu, Sıhhıye bölgesindeki hava kirliliğinin en temel nedenlerinden biri olarak gösterilmiştir. Raja vd. (2018) Ankara'da 2015 yılına ait 9 farklı istasyondan elde ettiği PM_{10} konsantrasyonlarının, mekânsal-zamansal değişkenliğini ve dağılımını, Kriging with External Drift (KED) mekânsal-zamansal analiz yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Ölçüm değerleri, kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar olmak üzere dört mevsim boyunca 6 saatlik periyotlarla analiz edilmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, özellikle kış aylarında, artan iç mekân ısınma faaliyetlerinin, PM_{10} seviyelerini yükselttiğini belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, şehir merkezinde ve sanayi bölgelerinde daha yüksek PM_{10} seviyeleri ölçülürken, kırsal bölgelerde bu seviyelerin daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bozdağ vd. (2020) Ankara'da, 7 istasyondan elde edilen 2009–2017 yıllarına ait PM_{10} konsantrasyonunu tahmin etmek için makine öğrenme algoritmalarından faydalanmışlardır. Çalışmada, en iyi performans, Yapay Sinir Ağ (ANN) algoritması ile elde edilmiştir. PM_{10} değerlerinin mekânsal dağılımını, bölgenin arazi kullanım özellikleri (nüfus yoğunluğu, gelir değişimi, doğal gaz kullanımı, ulaşım ve sanayi yoğunluğu) ile birlikte değerlendirmişler ve hava kirliliğinin iyileştirilmesine yönelik mekânsal stratejilerin geliştirilmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Akbal ve Ünlü (2022), Ankara'da 2015–2020 yılları arasında günlük PM seviyelerini tahmin etmek ve PM seviyelerini etkileyen ana özellikleri belirlemek için, derin öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. PM seviyelerini etkileyen ana faktörler için geçmiş PM değerleri, diğer hava kirliliği bileşenleri, yüzey sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi önemli değişkenler belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında halk sağlığını korumak amacıyla kullanılabilecek, bir erken uyarı sistemi geliştirmeyi de amaçlamışlardır. Geliştirdikleri modelde, PM_{10} seviyeleri, WHO standartlarına göre yapılan sınıflandırmada %94 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu durum, modelin erken uyarı sistemleri için etkili bir sınıflandırma sonucu olduğunu göstermektedir. Seçilen ana faktörlerin, $PM_{2.5}$ seviyelerini kontrol etmek ve azaltmak için önemli veri noktalarını olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmalar, Ankara'daki hava kirliliği araştırmalarını kapsamlı ve bulgularını detaylı bir şekilde sunmakta, farklı yöntem ve yaklaşımlar kullanarak, hava kirliliği dinamiklerini anlamaya yönelik sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmanın amacı, 2011–2014 yılları arasında Ankara'da PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini KED yöntemi kullanarak araştırmaktır. Çalışma, iki temel araştırma sorusuna odaklanmaktadır: (1) Belirtilen yıllar arasında PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde bir artış gözlemlenmiş midir? (2) Gözlenen bir artış varsa, Ankara şehrinin hangi bölgelerinde yoğunlaşmaktadır? Bu sorulara verilen cevaplar, hava kirliliği eğilimlerini ve yerel etkileri daha iyi anlamak ve etkili hava kalitesi yönetim stratejileri geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, çalışmada kullanılan mekânsal-zamansal KED yönteminin, başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini göstermeyi hedeflemektedir.

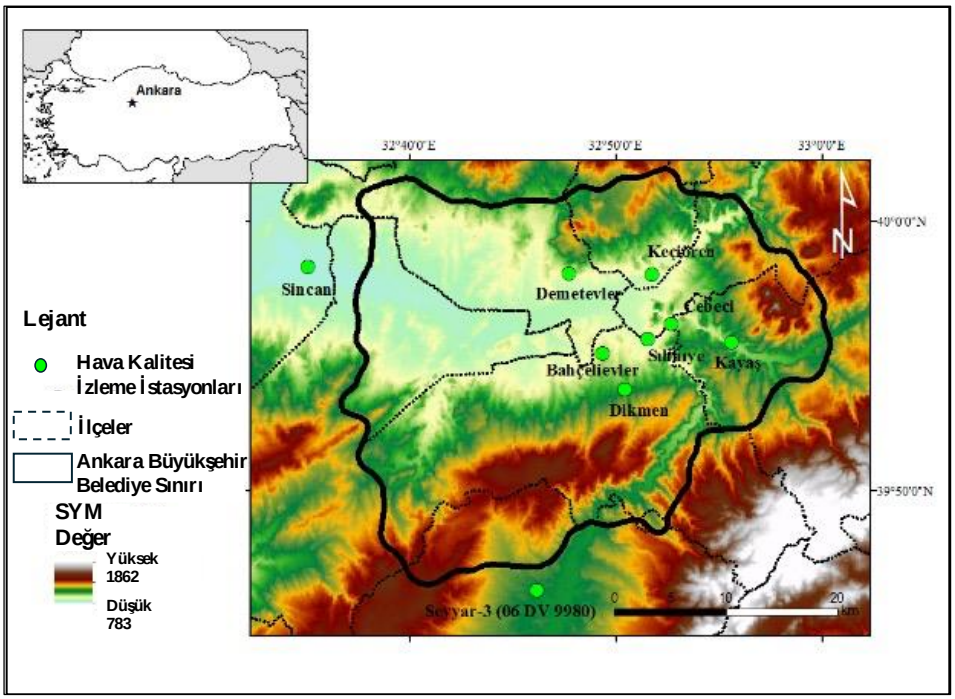
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri

İç Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Sakarya Bölümü'nde yer alan Ankara, adını aldığı Ankara Ovası'nın doğu kesiminde konumlanmaktadır. Bu ova, kuzeyde 1200-1500 metre yüksekliğindeki Mire-Karyağdı Dağları, güneyde Haymana Platosu'nun devamı olan bir plato alanı, doğu ve güneydoğuda, 1800 metreye kadar yükselen Elmadağ gibi hâkim topografya unsurları ile çevrilidir (Erol, 1968) (Şekil 1). Bu topografik özellikler hem Ankara'nın iklim koşullarını hem de hava kirliliği dinamiklerini doğrudan etkilemektedir. Ankara'nın iklimi, tipik bir kıtasal iklim özellikleri gösterir; kışları nispeten kuru ve soğuk, yazları sıcak ve kuru geçmektedir. 1927–2023 yılları arası, yıllık ortalama toplam sıcaklık 12.0 °C'dir. Ortalama en yüksek sıcaklık, 30.5°C ile ağustos ayına, ortalama en düşük sıcaklık, -3.2 °C ile ocak ayına karşılık gelmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, t.y.). Aynı yıllar arası, aylık toplam yağış miktarı ortalaması, 392.4 mm'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, t.y.). Özellikle, bahar döneminde sağanak yağışların olduğu görülmektedir. Bu yağışlar, Ankara'da termik etkiler sonucu oluşan, konveksiyonel yağışlar olarak bilinmektedir (Köse vd., 2024). Yaz aylarında, yağışlar az ve genellikle şiddetli yerel konvektif olaylarla ilişkilidir (Sahin vd., 2001). Şehirde güneşlenme süresi oldukça yüksektir. Aralık ve ocak en nemli aylardır; ağustos ise en kuru aydır. Yıl boyunca hâkim rüzgâr yönü, kuzey ve kuzeydoğudan eser; yıllık ortalama rüzgâr hızı, 2.3 m/sn'dir (Sahin vd., 2001; Raja vd., 2018).

Osmanlı İmparatorluğu'nun son dönemlerinde yaklaşık 30.000 kişinin yaşadığı ve günümüzde kentin merkezinde kalan kalenin içi ve çevresine yayılan Ankara, Cumhuriyet döneminde hızlı bir büyüme süreci geçirerek, 4 milyonu aşan nüfusu ile Türkiye'nin ikinci en büyük metropolü haline gelmiştir (Aydın & Özgür, 2009). Günümüzde, 2023 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçlarına göre, 5 milyon 803 bin 482 kişilik bir nüfusa sahiptir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024b). Ankara'daki nüfus artışına neden olan faktörler, il içinden ve başka illerden şehre gerçekleşen göçler (Özgür, 1995), doğal nüfus artış hızının yüksekliği ve kentin yakın çevresindeki kırsal yerleşmelerin ve bazı kasabaların zamanla kent tarafından yutulması (Aydın & Özgür, 2009) olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, şehir gelişimi ve arazi kullanımı bakımından da büyük bir değişim ve dönüşüm yaşamıştır. Aydın ve Özgür (2009), 2005 yılında toplam yerleşim alanlarındaki değişimi, 1942 yılına kıyasla, 20 kat artış göstermiş olduğunu bulmuşlardır.

Bu hızlı nüfus artışı ve kentsel dönüşüm (altyapı ve üstyapı hizmetlerinin sağlanması, kamu binaların, fabrikaların, küçük ölçekli özel işletmelerin, sanayi alanlarının kurulması, ulaşım ağının büyümesi, plansız kentleşme vb. gibi), hava kirliliğinin artışıyla doğrudan ilişkilidir (Turgut & Temiz, 2015; Akbal & Ünlü, 2022).

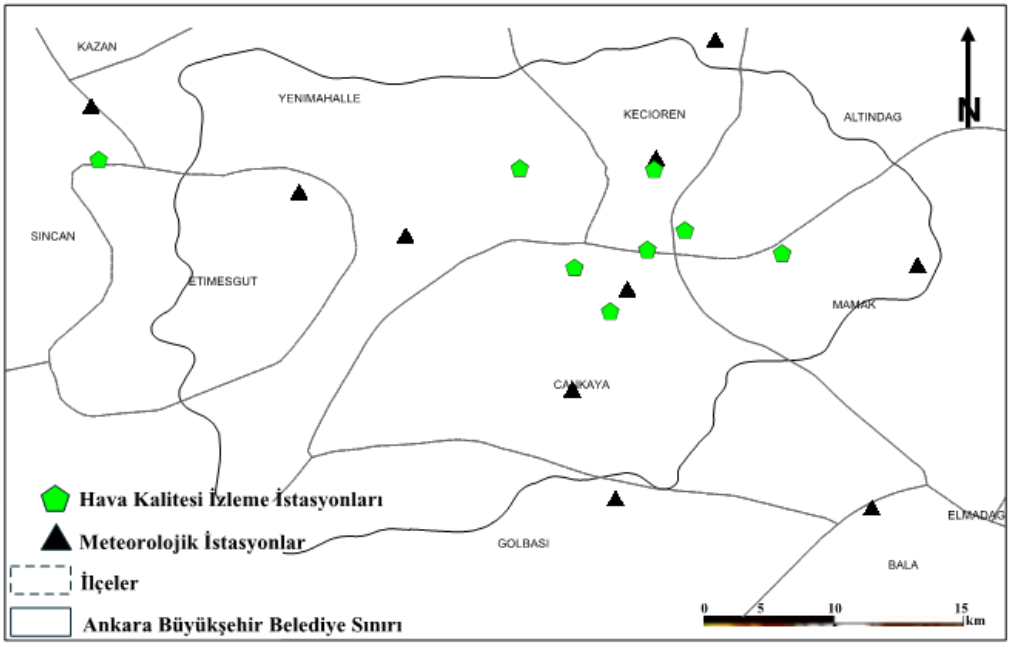


Şekil 1: Çalışma alanına ait lokasyon haritası

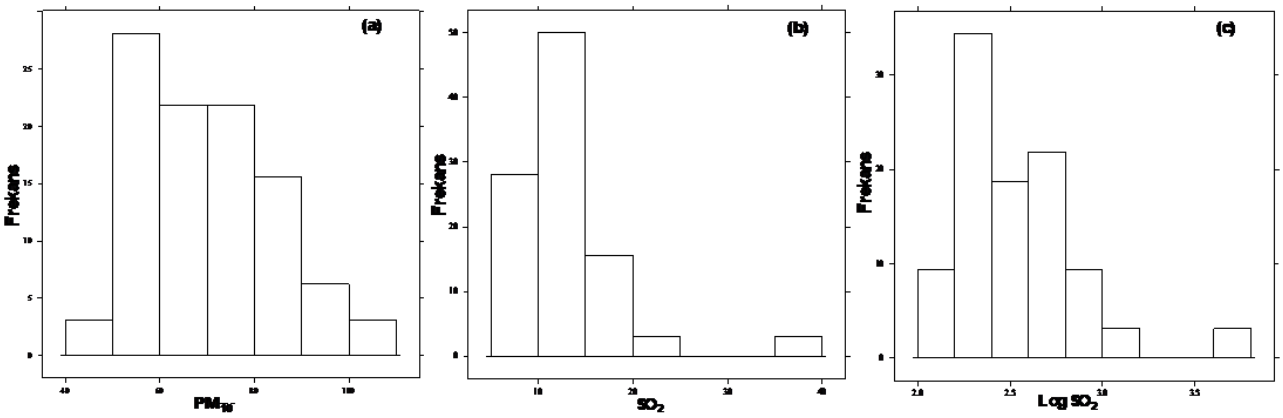
2.2. Çalışmada Kullanılan Veri

Türkiye'de, kirletici konsantrasyonlarının saatlik ölçümlerini almak ve ülke genelinde hava kalitesindeki günlük ve mevsimsel değişiklikler hakkında bilgiler sağlamak amaçlı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Ulusal Hava Kalite İzleme Ağı kurulmuştur. 2005 yılında kurulan bu ağ, hava kalitesi izleme istasyonları ile veri toplama sürecini başarılı bir şekilde yürütmektedir. Bu çalışmada, Ankara'nın PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait 2011–2014 aylık ortalama değerleri, Ulusal Hava Kalite İzleme Ağı'dan elde edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, t.y.). 2005 yılında WHO tarafından yıllık ortalama konsantrasyon değeri PM_{10} için 20 µg/m³ ve günlük konsantrasyon değeri SO_2 için 20 µg/m³ olarak verilmiştir (Breeze Technologies, 2021). Ancak, daha düşük konsantrasyonlardaki hava kirliliğinin insan sağlığı ve refahı üzerindeki etkilerinin çok daha yüksek olduğunu gösteren son kanıtlar, belirlenen eşik değerlerinin güncellenmesi gerektiğini ortaya koymuştur (Breeze Technologies, 2021). Çalışmada, 2021 yılında yapılan düzenlemeyle birlikte WHO tarafından izin verilen yıllık ortalama konsantrasyon değeri PM_{10} (15 µg/m³) ve günlük konsantrasyon değeri SO_2 (40 µg/m³) eşik değerleri (World Health Organization, 2023), kriter olarak alınmış ve karşılaştırmalar bu değerler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Ayrıca, PM_{10} ve SO_2'ın mekânsal-zamansal değişimlerini modellemede yardımcı değişken olarak kullanılacak yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik veriler, 2011–2014 yılları arasındaki aylık ortalama değerler olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) temin edilmiştir. Şekil 2, hava kalitesi izleme istasyonları ve meteorolojik istasyonların dağılımını göstermektedir. Bu çalışmada analizler, R 3.1.3 (R Development Core Team, 2016) programında, gstat (Pebesma, 2004) ve spacetime (Pebesma, 2012) paketleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PM_{10} konsantrasyonuna ait histogram grafiği, normale yakın bir dağılım (Shapiro-Wilks testi, $W = 0.9633$) vermektedir (Şekil 3a). SO_2 konsantrasyonuna ait histogram grafiği, sağa çarpık bir dağılıma (Shapiro-Wilks testi, $W = 0.69135$) sahiptir (Şekil 3b). Kriging yöntemi, veriye herhangi bir dönüşüm uygulanmasını gerektirmese de, varyansların dengelenmesi amacıyla verinin normal dağılıma dönüştürülmesi faydalı olabilir (Webster & Oliver, 2007). Bu sebeple, SO_2 konsantrasyonuna ait veri için log transformasyon işlemi uygulanmış, veri normal dağılıma (Shapiro-Wilks testi, $W = 0.90211$) dönüştürülmüştür (Şekil 3c). 2011–2014 yılları arasındaki yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik verilerin yıllık mekânsal dağılımları Şekil 4a, b, c ve d'de verilmiştir. Bu verilere göre, 2014 yılında yağış değerlerinin, özellikle şehrin kuzey bölgesinde 54 mm ile en yüksek yağış seviyelere ulaştığı gözlemlenmektedir. Şehrin kuzeybatı, kuzeydoğu ve orta kesimleri 52-54 mm yağış değerleri alırken, güney bölgesi 48-50 mm yağış değerlerine sahiptir. 2014 yılı, diğer yıllara göre en fazla yağışın ölçüldüğü yıl olmuştur. 2013 yılı ise, en düşük yağışların yaşandığı dönemdir; bu dönemde şehrin güney kesiminde neredeyse hiç yağış gözlemlenmemiş, diğer bölgelerde yağış miktarı <45 mm'den az olmuştur.

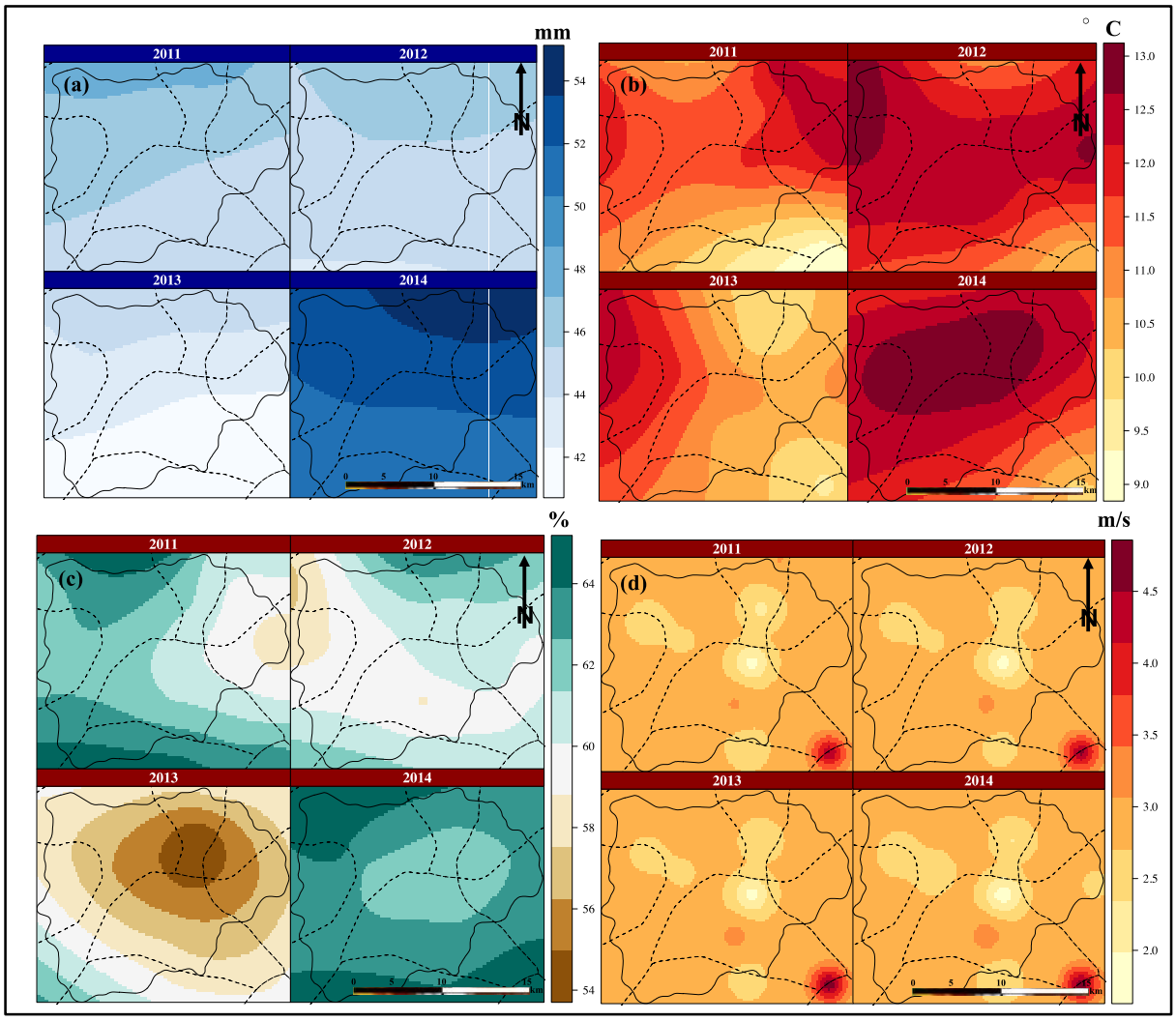
Yıllık ortalama sıcaklık değerleri 2014 yılında şehrin orta kesim ve çevresinde, 13 °C ile en yüksek seviyelere ulaşmıştır. 2013 yılında, şehrin batı bölümünde 11.5-12.5 °C değerlerinde değişiklikler bulunmaktadır. Yıllık ortalama nem oranı, farklı yıllarda değişen değer aralıklarıyla izlenmiştir; en kuru yıl 2013, en nemli yıl ise 2014 olmuştur. Yıllık ortalama rüzgâr hızı değeri, tüm yıllar için şehir genelinde benzer dağılım göstermiştir.



Şekil 2: Çalışma alanında, hava kalitesi izleme istasyonları ve meteoroloji istasyonlarının dağılımını gösteren harita



Şekil 3: a) PM_{10} konsantrasyonuna ait histogram grafiği, b) SO_2 konsantrasyonuna ait histogram grafiği, c) SO_2 konsantrasyonu, logaritmik dönüşüm uygulandıktan sonraki histogram grafiği



Şekil 4: (a) 2011–2014 yıllık ortalama yağış (mm) dağılışı; (b) 2011–2014 yıllık ortalama sıcaklık (°C) dağılışı; (c) 2011–2014 yıllık ortalama nem (%) dağılışı; (d) 2011–2014 yıllık ortalama rüzgâr hızı (m/s) dağılışı

2.3. Mekânsal-Zamansal Kriging with External Drift (KED) Analizi

Jeoistatistik, belirli bir coğrafi alanda yer alan ve belirli bir mekânsal düzen gösteren verilerin analizi, tahmini ve modellemesi işlemlerini gerçekleştiren mekânsal veri analizi yöntemleridir. Jeoistatistiğin temel bileşenlerini, yarıvariogram ve Kriging analizleri oluşturmaktadır (Isaaks & Srivastava, 1989). Yarıvariogram, veriler arasındaki mekânsal ilişkileri ölçer ve varyansın mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Kriging analizi, bilinen veri noktalarından yola çıkarak, bilinmeyen bölgelerdeki değerleri tahmin etmektir ve temeli bölgesel değişkenler teorisine dayanmaktadır. Kriging yönteminin temel eşitliği,

$$\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^{N} W_i Z(X_i) \tag{1}$$

şeklinde verilmektedir. $\hat{Z}(X_0)$, X_0 noktasına ilişkin Kriging değerini; $Z(X_i)$ değişkenlerin her bir X_i noktasında gözlenen değerleri; W_i, her bir $Z(X_i)$'ye karşılık gelen değerlerini; N, $\hat{Z}(X_0)$'ın Kriging tahmininde kullanılacak nokta sayısını ifade etmektedir. Kriging varyansı, bir mekânsal tahmin yönteminde, tahmin edilen değerlerin ne kadar güvenilir olduğunu gösteren bir ölçümdür. Tahminin belirsizliğini veya hata payını gösterir. Kriging varyans eşitliği,

$$\sigma_K^2 = 2\sum_{i=1}^{N} W_i \gamma(X_0 - X_i) - \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} W_i W_j \gamma(X_i - X_j) \tag{2}$$

$$= \sum_{i=1}^{N} W_i \gamma(X_0 - X_i) + \lambda \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir (Lichtenstern, 2013). Yüksek varyans değeri, tahminin belirsiz olduğunu, düşük varyans değeri, tahminin güvenilir olduğunu göstermektedir. Jeoistatistik analiz yöntemlerine ait ayrıntılı açıklamalar, Aydin ve Çiçek (2015) ve Raja ve Aydin (2017) çalışmalarında verilmiştir.

Kriging yöntemleri (Ordinary Kriging (OK), Simple Kriging (SK), Universal Kriging (UK), Block Kriging (BK), Indicator Kriging (IK), Regression-Kriging (RK), Co-Kriging, KED vb. gibi) çalışmaya ve verilerin yapısına uygun olarak seçilir. Yardımcı değişkenler kullanılarak mekânsal-zamansal tahminler, RK, Co-Kriging veya KED yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. RK yöntemi, yardımcı değişkenler kullanarak regresyon analizi yapar ve bu regresyon modelinden elde edilen tahmin hatalarını SK yöntemi ile değerlendirir. SK, bu hataları kullanarak, genellikle sıfır olarak kabul edilen bilinen bir ortalama etrafında tahminler gerçekleştirir (Hengl vd., 2007). Co-Kriging, yardımcı değişkenin tüm grid noktalarında mevcut olmasını gerektirmediği için veri eksikliklerinin bulunduğu durumlarda daha esnek bir yaklaşım sunar. Bu yöntemde, bağımsız değişken ve yardımcı değişkenler için ayrı yarıvariogramlar hesaplanır ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri modellemek için çapraz yarıvariogramlar kullanılır (Türkoğlu vd., 2016). Bu, çeşitli veri ilişkilerini modelleme yeteneği sağlar ancak daha karmaşık bir modelleme süreci gerektirir. Ayrıca, Co-Kriging tahminleri doğrudan yardımcı değişkene bağlıdır (Delbari vd., 2013). Hedef değişken ile yardımcı değişkenler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan bağımlılıkları yeterince iyi yakalayamayabilir, bu da yanlış tahminlere yol açabilir (Beauchamp & Bessagnet, 2023). Buna karşılık, KED yöntemi, yardımcı değişkenin tüm grid noktalarında mevcut olmasını zorunlu kılar ve tek bir yarıvariogram kullanarak modellemeyi daha basit ve doğrudan hale getirir (Adhikary vd., 2017). KED yönteminde, yardımcı değişken yalnızca eğilim bilgisini sağlar (Delbari vd., 2013), bu da tahmin sonuçlarının doğruluğunu arttırabilir. KED, belirgin bir trend olduğunda daha iyi tahmin sonuçları sunar ve veri eksikliklerine karşı daha yüksek hassasiyete sahiptir. KED ve RK yöntemleri, uygulanan hesaplama adımları bakımından farklılık gösterir. Ancak, aynı veri noktaları, yardımcı değişkenler, regresyon fonksiyonu ve regresyon uyum yöntemi kullanıldığında, her iki yöntem de aynı tahmin sonuçlarını ve tahmin varyanslarını vermektedir (Hengl vd., 2007). Çalışmalarda, özellikle hava kirletici konsantrasyonlarını tahmin etmede KED yöntemi, üstün performans göstermiş, doğruluğu arttırmış ve hataları azaltmıştır (Pearce vd., 2009; Liang vd., 2017; Ramos vd., 2016; Idir vd., 2021). Bu sebeple, çalışmada mekânsal-zamansal KED yöntemi kullanılmıştır. Mekânsal-zamansal KED yöntemi, tahmin edilmek istenen değişken ile ilişkili olduğu düşünülen faktörleri kullanarak mekânsal-zamansal tahminlerde bulunmaktadır. Bu faktörler, daha hassas ve doğru tahminlerin yapılmasına olanak sağlar. KED yönteminin mekânsal-zamansal tahminlerdeki etkinliğini artırmak için mekânsal-zamansal yarıvariogramların kullanımı kritik bir rol oynamaktadır. Mekânsal-zamansal yarıvariogramlar, mekân ve zaman olmak üzere iki boyutta gösterilmektedir. Analizlerde, adım mesafesi (lag distance), eşik değeri veya tepe varyans (sill), zaman adım mesafesi (time lag distance) gibi belirli parametreler her bir model için ayrı ayrı belirlenmektedir. Bu parametrelerden, adım mesafesi, iki veri noktası arasındaki uzaklığı; eşik değeri veya tepe varyans, yarıvariogramın düzleştiği, yani gözlem noktaları arasındaki ilişkinin sonlanıp varyansın sabit bir değere ulaştığı noktayı ifade etmektedir. Zaman adım mesafesi ise iki veri noktası arasındaki zaman farkını vermektedir. Mekânsal fonksiyon ile zamansal fonksiyonun birleştirilmesiyle kovaryans fonksiyonu elde edilmektedir. Böylece, mekânsal-zamansal modellemede değişkeni temsil eden 3D bir yarıvariogram oluşturularak, değişkenin hem mekânsal hem de zamansal davranışı incelenmektedir.

2011–2014 yılları arası PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimlerini modellemede, aynı dönem aralığı için yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik veriler, çalışmada yardımcı değişken olarak seçilmiştir. Goovaerts (1997), KED yöntemi kullanarak tahminler yapılırken, (i) Hedef değişken ile tahmin ediciler arasındaki ilişkinin doğrusal olması; (ii) Tahmin edicilerin değerleri, tüm birincil veri konumlarında X_i ve tahminlerin yapılacağı tüm yeni konumlarda X_0 değerlerinin biliniyor olması; (iii) İkincil değişkenin, KED'in değişkenliğini göz ardı etmek için, mekânda stabil bir şekilde değişmesi gibi temel şartların sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

Mekânsal-zamansal KED analizde, $Z_{KED}(s_0, t_0)$, (s_0, t_0) noktasındaki hedef değişkenin tahmin edilen değerini temsil etmektedir. Yöntem, gözlemlenen veri noktalarını $Z(s_i, t_j)$ (burada $i = 1, \dots, n$ ve j= $1, \dots, m$) kullanarak, lineer bir kombinasyon hesaplaması yapmaktadır. Mekânsal-zamansal KED formülü,

$$Z_{KED}(s_0, t_0) = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \lambda_{ij} Z(s_i, t_j), \quad (4)$$

$$= Z^T \Lambda, \quad (5)$$

şeklinde verilmektedir. Bu eşitlikte, $Z = [(s_1, t_1), \dots, Z(s_n, t_m)]^T$, hedef değişken için gözlemlenen veriyi temsil etmektedir. $\Lambda = [\lambda_{11}, \dots, \lambda_{nm}]^T$, KED ağırlık vektörünü ifade eder. Optimal ağırlık vektörü tahmin hatası varyansını minimize etmek için, Lagrange çarpanları yöntemini kullanır ve bu süreçte tarafsızlık kısıtlamasını sağlar.

Bu yaklaşım, KED tahmincisi ile $Z(s,t) = \mu(s,t) + \varepsilon(s,t)$ eşitliğinde verilen Z hedef değişken formuna dayanmaktadır (Kongsanun vd., 2024). Bu eşitlikte, $\mu(s,t)$ mekânsal ve zamansal eğilimleri, $\varepsilon(s,t)$ tahmin edilen değişkenin sapmalarını temsil etmektedir. Mekânsal-zamansal KED yöntemi için,

$$\begin{bmatrix} \frac{\Omega}{F^T} & + & \frac{F}{0_{L+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Lambda}{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Omega_0}{F_0} \end{bmatrix} \tag{6}$$

eşitliği tanımlanmaktadır. Formülde, 0_{L+1}, $(L+1) \times (L+1)$ sıfır matrisini temsil eder. $N = [n_0, \dots, n_L]^T$, Lagrange çarpanlarının vektörüdür.

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} \text{ ve} \tag{7}$$

F_j matrisi şu şekilde verilmiştir.

$$F_j = \begin{bmatrix} f_0\left(X(s_1,t_j)\right) & \cdots & f_L\left(X(s_1,t_j)\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0\left(X(s_n,t_j)\right) & \cdots & f_L\left(X(s_n,t_j)\right) \end{bmatrix} \tag{8}$$

Burada $j = 1, \dots, m$ aralığındadır. Mekânsal-zamansal KED ağırlıklarının her gözlemlenmemiş veri noktası için yeniden hesaplanması gerekmektedir. Bu zorluğu aşmak için tüm gözlemlenmemiş noktalar için tek bir ağırlık matrisinin kullanılması önerilmektedir (Kongsanun vd., 2024). KED yöntemi, mekânsal-zamansal tahminlerde sıklıkla kullanılan güçlü bir yöntemdir, ancak bazı sınırları ve hata kaynakları bulunmaktadır. KED, hedef değişken ile yardımcı değişkenler arasında doğrusal bir ilişki varsayar. Ancak, gerçek dünyada bu doğrusal ilişki her zaman geçerli olmayabilir ve bu durum modelin doğruluğunu etkileyebilir. Ayrıca, gözlemlenen verilerin eksik, hatalı veya düşük kaliteli olması tahminlerin doğruluğunu azaltabilir. Model performansının olumsuz etkilenmemesi için yardımcı değişkenlerin mekânda stabil bir şekilde değişmesi beklenmektedir. Zamansal değişkenlik özellikle uzun süreli veya mevsimsel değişkenlik, model tahminlerinde hata kaynakları oluşturabilmektedir. Veri setinde mevcut aykırı değerler, model tahminlerini bozabilir. Bu sınırlamaları ve hata kaynakları göz önünde bulundurarak gerekli düzeltme ve iyileştirmeler yapıldığında, KED, etkili bir şekilde uygulanmakta ve doğru sonuçlar vermektedir.

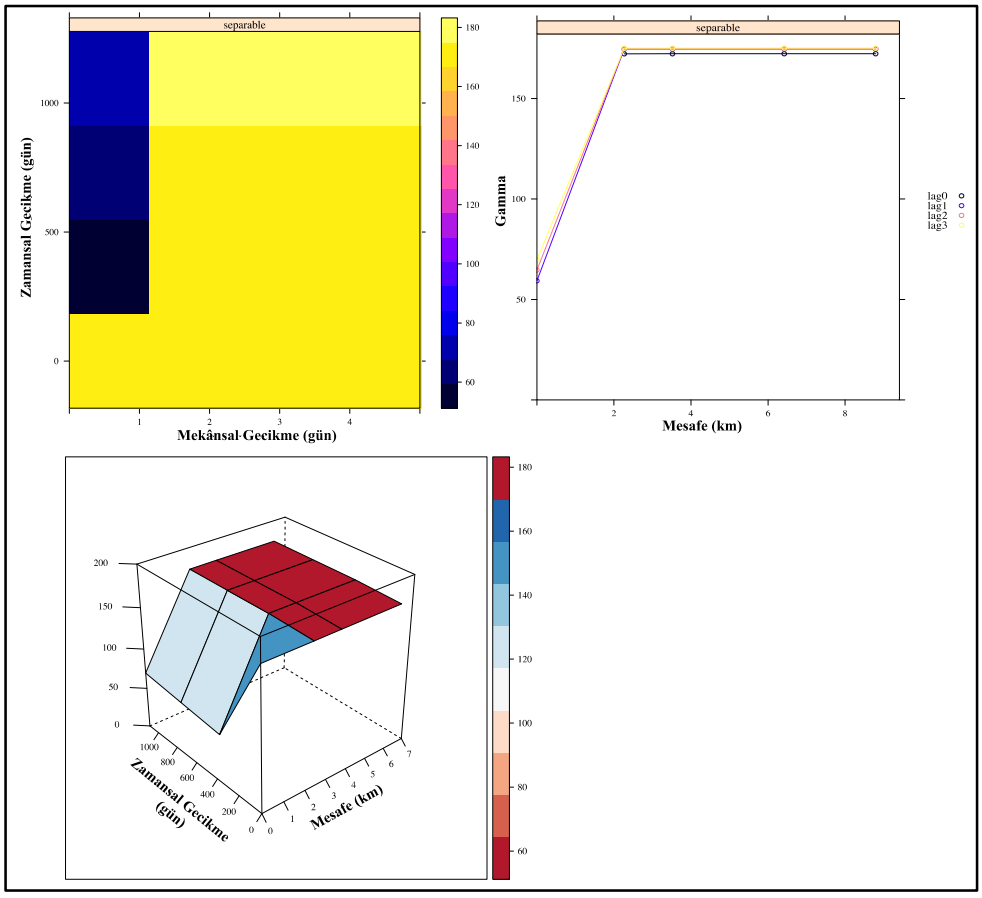
2.4. Performans Analizi

Coğrafi modelin doğruluğunu test etmek ve performansını değerlendirmek önemlidir. Bu amaçla, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin doğruluk testleri, Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi kullanılarak değerlendirilmektedir. Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi, veri setindeki mevcut bilgileri kullanarak, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi ölçmektir (Isaaks & Srivastava, 1989). Yöntem, bir lokasyondaki değer, veri setinden geçici olarak çıkartılır ve geriye kalan diğer değerler kullanılarak çıkartılan bu lokasyon için tahmin yapılması mantığı ile çalışmaktadır (One Leave Out) (Aydin & Çiçek, 2015). Bu işlem aynı şekilde geride kalan tüm örnekler için tekrarlanır (Isaaks & Srivastava, 1989). Gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki fark, hata olarak kaydedilir. Ayrıca, oluşturulan tahmin haritalarının değerlendirilmesinde, çeşitli performans ölçümlerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları, Belirleyicilik Katsayısı (Coefficient of Determination, R^2), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error, RMSE), Ortalama Hata (Mean Error, ME) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

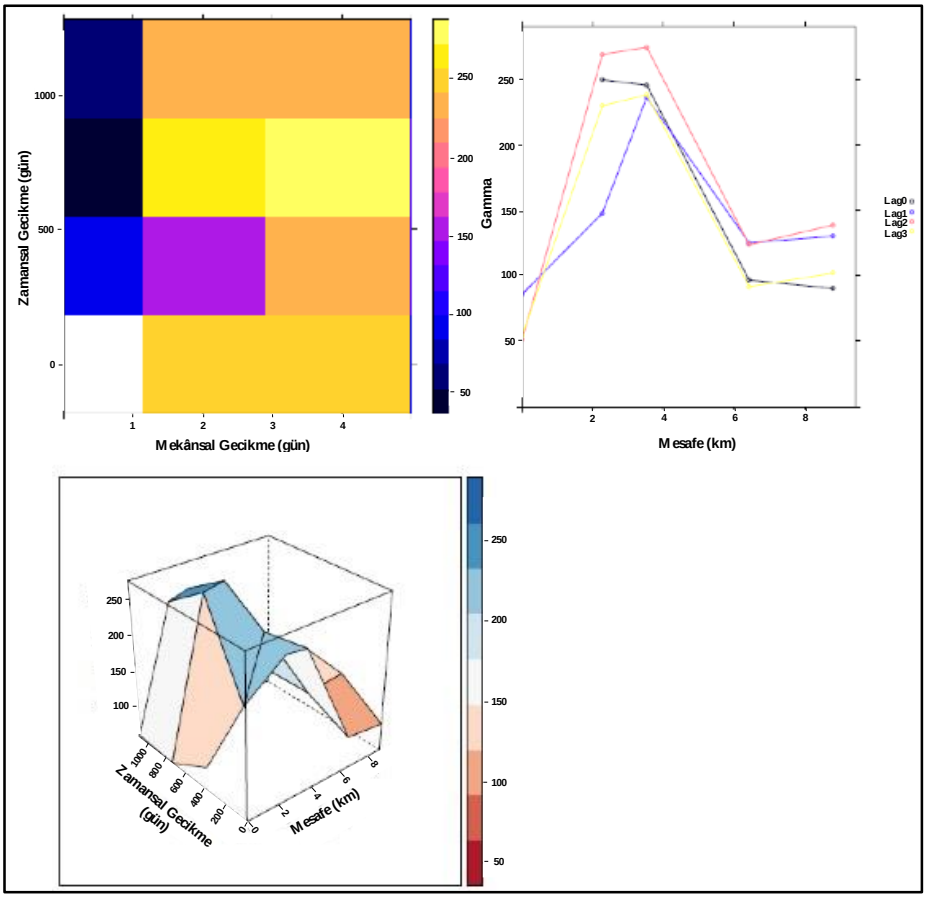
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal dağılımlarını daha iyi anlamak amacıyla, mekânsal-zamansal tahmin analizlerinde farklı yarıvariogram modelleri uygulanmıştır. PM_{10} konsantrasyonun mekânsal yarıvariogram grafiği Şekil 5'te verilmiştir. KED yöntemi, seçilen mekânsal-zamansal yarıvariogramların modeline bağlıdır. Yanlış model seçimi, tahminlerin doğruluğunu düşürebilir. Bu sebeple, incelenen değişkeni temsil edebilecek en iyi tahmin modeli elde edilene kadar değişik aralıklarda işlem gerçekleştirilmiştir. Adım mesafesi 2 km, eşik değeri veya tepe varyans değeri 180 ve uygulanan model *"Spherical"* olarak belirlenmiştir. Şekil 6, PM_{10} konsantrasyonun zamansal yarıvariogram grafiğini vermektedir. İncelenen değişkeni temsil edebilecek en iyi tahmin modeli elde edilene kadar değişik zaman aralıklarında işlem uygulanmış, zaman adım mesafesi 600 gün (yaklaşık 2 yıl), eşik değeri 180 ve kullanılan model *"Exponential"* olarak tayin edilmiştir.

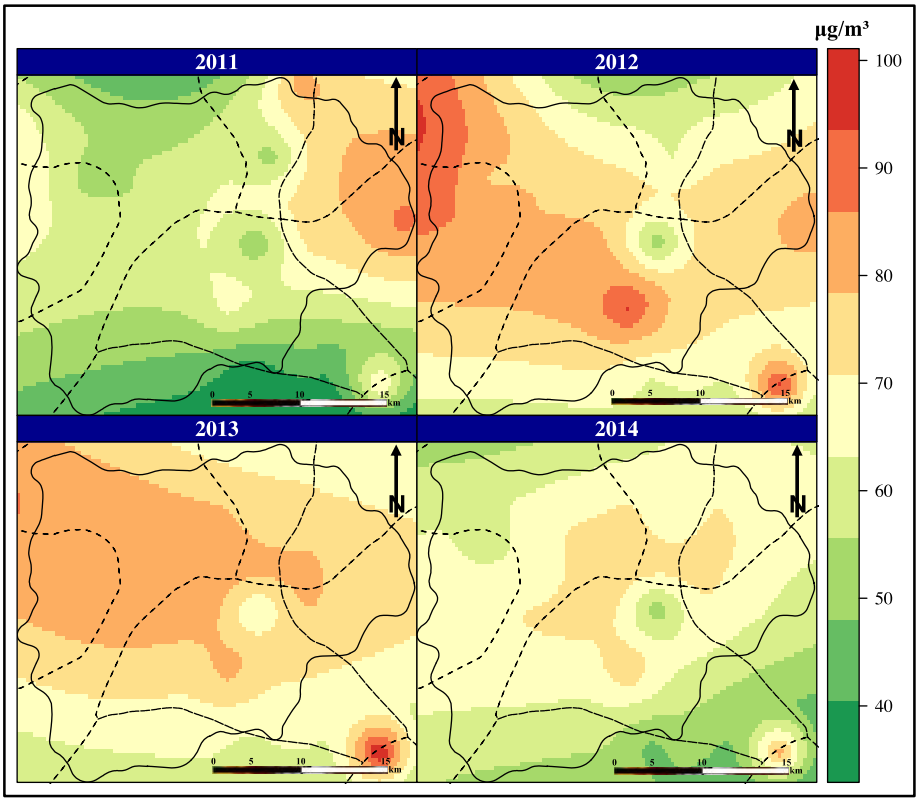
Yarıvariogram analizinden elde edilen bağımlılık kuralına göre, çalışma alanındaki PM_{10} konsantrasyonu için örneklenmemiş konumlarda değişken tahminleri için, *"Separable with joint sill"* modeli kullanılmıştır. 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli Şekil 7'de verilmektedir. 2011 yılı için PM_{10} değeri, WHO tarafından izin verilen yıllık ortalama konsantrasyon değeri (15 µg/m³) (World Health Organization, 2023) göz önünde bulundurulduğunda, eşik değerinin üzerinde ve şehir genelinde 40-60 µg/m³'lük bir dağılım göstermektedir. 2012 yılı için, özellikle Çankaya ve Sincan ilçelerinin bulunduğu bölgelerde, yıllık ortalama konsantrasyon değerlerinin limitleri aştığı gözlemlenmiştir. 2013 yılı için, şehirde PM_{10} konsantrasyon değerleri genel olarak 70-80 µg/m³ civarlarındadır. 2014 yılına ait PM_{10} konsantrasyon değerleri incelendiğinde, limit değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Şehir merkezinde 70 µg/m³ civarında gözlenen değer, şehir merkezi çevresinde 60 µg/m³, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde 50 µg/m³ değerine düşmüştür. Şekil 8 ve 9, SO_2 konsantrasyonunun mekânsal-zamansal yarıvariogram grafiklerini göstermektedir. Mekânsal yarıvariogram grafiğine göre, adım mesafesi 2 km, eşik değeri 180 ve uygulanan model *"Spherical"*; zamansal yarıvariogram grafiğinde ise, zaman adım mesafesi 400 gün (yaklaşık 1 yıl), eşik değeri 35 ve model *"Exponential"* olarak belirlenmiştir. Yarıvariogram analizinden elde edilen bağımlılık kuralına göre, çalışma alanındaki SO_2 konsantrasyonu için örneklenmemiş konumlarda değişken tahminleri için, *"Separable with joint sill"* modeli uygulanmıştır. Şekil 10, 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modelini vermektedir. 2011 yılında SO_2 değerleri, WHO tarafından izin verilen konsantrasyon değeri (40 µg/m³) (World Health Organization, 2023) dikkate alındığında, şehrin güney ve kuzeydoğu bölgelerinde bu limitin altında kalırken, şehrin orta ve kuzey bölgelerinde limit değere yakın değerlere ulaştığı gözlemlenmektedir. 2012 yılı için, özellikle Çankaya ve Sincan ilçelerin bulunduğu bölgelerde, eşik değerlerin oldukça üzerinde konsantrasyon değerleri gözlemlenmiştir. Şehrin kuzey bölümünde, konsantrasyonlar 60-70 µg/m³ arasında ölçülmüştür. 2013 ve 2014 yılları neredeyse şehrin tamamı için 60-80 µg/m³ arasında değişen konsantrasyon değerleri dikkat çekicidir.



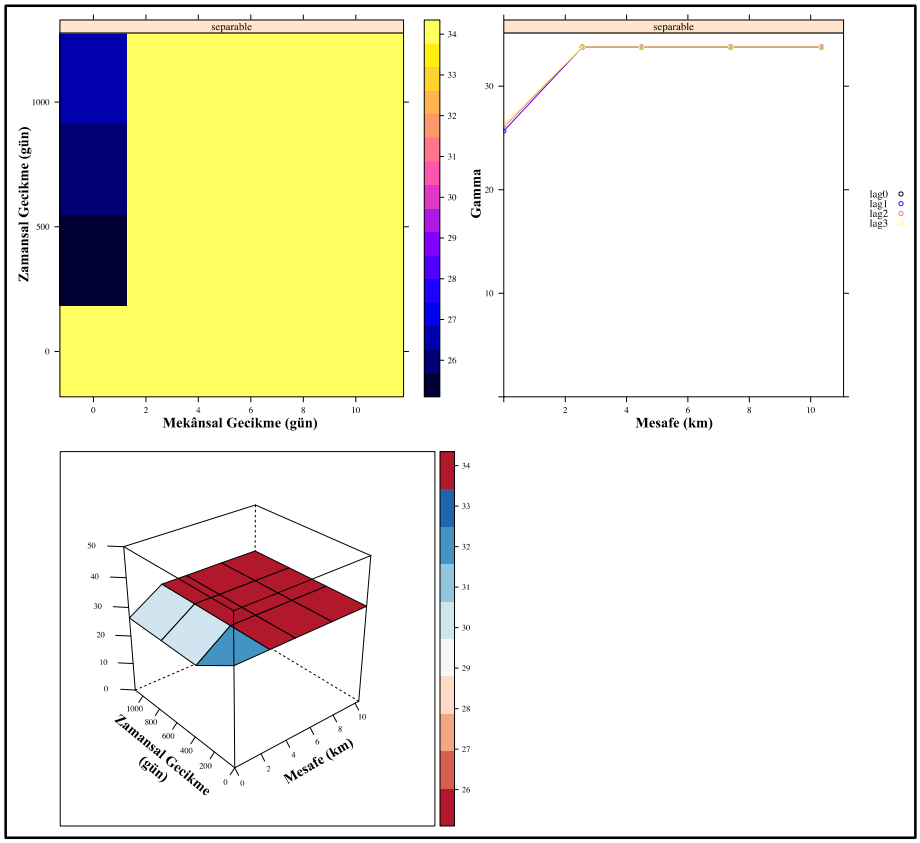
Şekil 5: PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal yarıvariogram grafiği



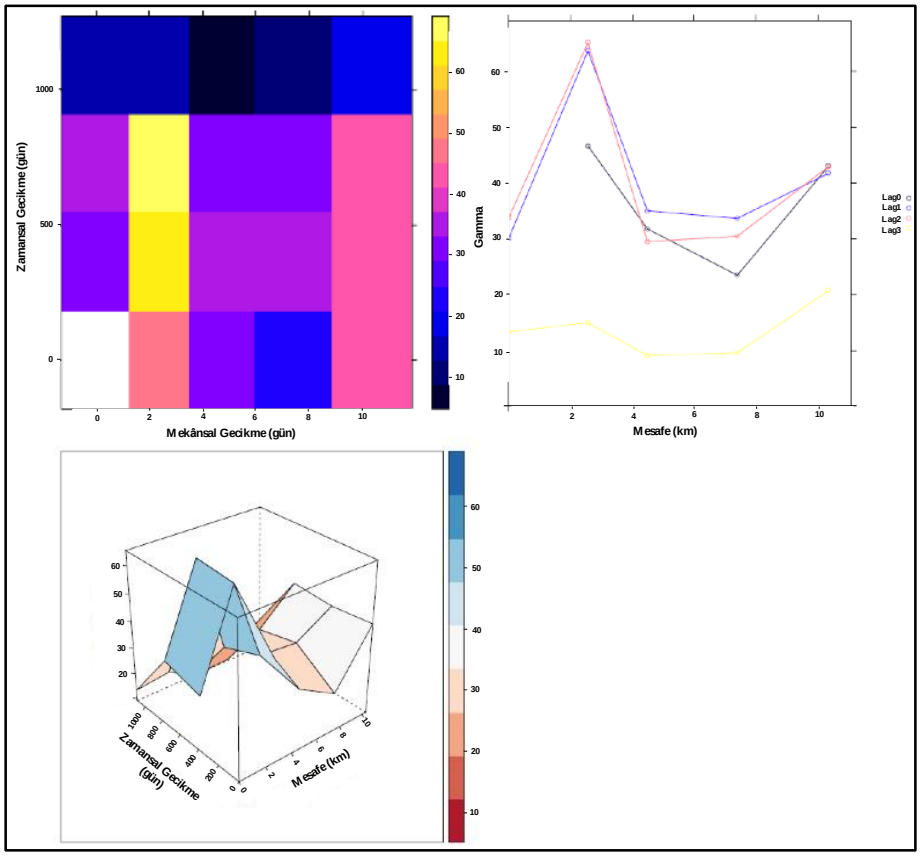
Şekil 6: PM_{10} konsantrasyonuna ait zamansal yarıvariogram grafiği



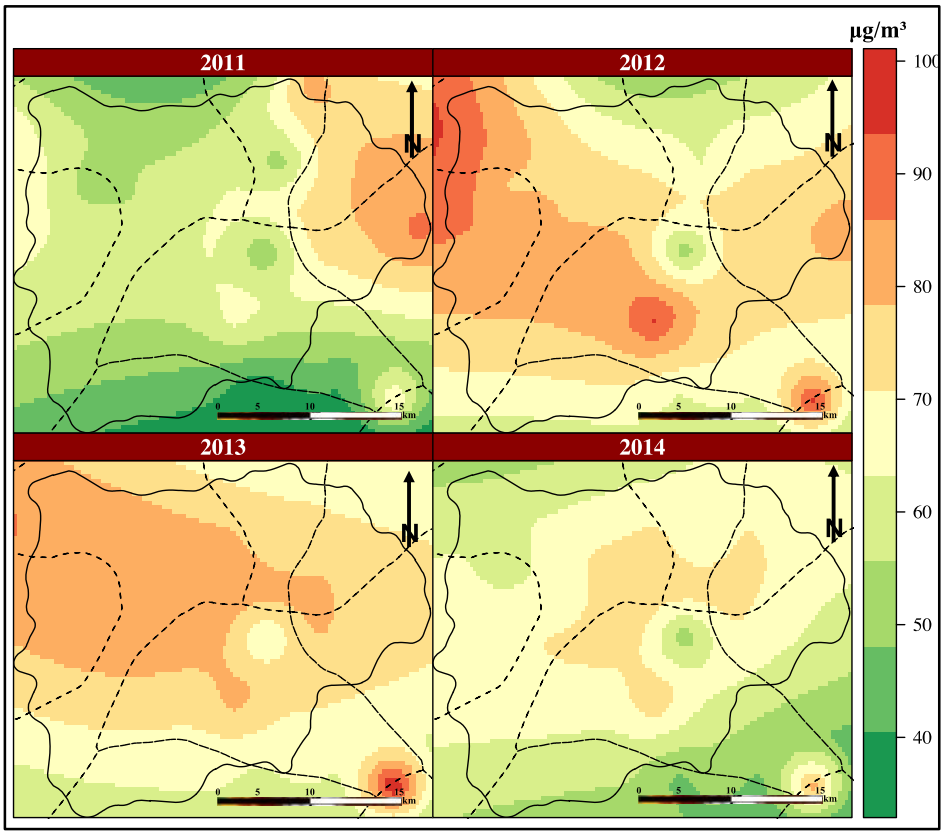
Şekil 7: 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli



Şekil 8: SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal yarıvariogram grafiği



Şekil 9: SO_2 konsantrasyonuna ait zamansal yarıvariogram grafiği



Şekil 10: 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli

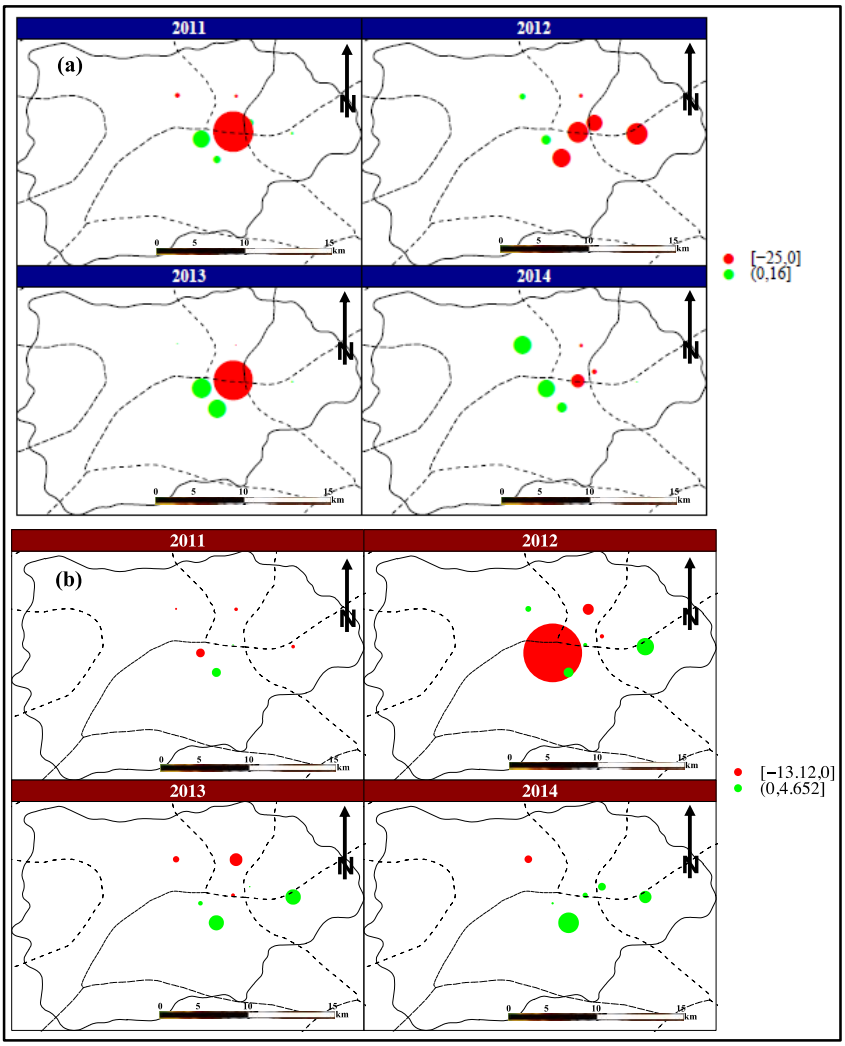
PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modelleri, çalışmada kullanılan meteorolojik faktörler göz önünde bulundurularak değerlendirildiğinde, 2011 yılı yıllık ortalama yağış (44-48 mm), sıcaklık (10.5-11.5 °C) ve nem (58-64 %) değerleri diğer yıllara göre, şehir genelinde nispeten düşük değerlerde izlenmektedir (Şekil 4a). 2012 yılı için yağış 44-46 mm ile benzer sonuçlar verirken, sıcaklık şehrin merkez bölgelerinde 12.5 °C'den, kenar bölgelerine doğru 11.5 °C'ye kadar düşmüştür. Nem oranı, şehrin merkez bölgelerinde, %60 oranında gözlemlenirken, kuzeye doğru gittikçe nem oranında bir artış olmaktadır (Şekil 4b). 2013 yılı yıllık ortalama yağış değerleri, 2011 ve 2012 yılları ile karşılaştırıldığında 42-46 mm değeri ile daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir. Sıcaklık değerleri, şehrin batı ve kuzeybatı bölgeleri için 12.5 °C ile yüksek sıcaklık gösterirken, şehrin doğusuna doğru kademeli olarak azalarak, 10.5 °C'ye düşmüştür. Şehrin batı, güney ve kuzeybatı bölgeleri %56-60 nem oranıyla kademeli bir geçiş göstermiştir. Şehrin orta ve kuzey bölgeleri en düşük nem oranına sahiptir (Şekil 4c). 2014 yılı, yıllık ortalama yağış (48-54 mm), sıcaklık (13-11.5 °C), nem (% 62-64) değerlerine sahiptir (Şekil 4d). Şehir genelinde tüm yıllar için rüzgâr hızı yaklaşık 3 m/s'dir (Şekil 4a, b, c, d). Rüzgâr hızının neden olduğu durgun hava koşulları, kirleticilerin yayılmasını engelleyerek birikmelerine ve hava kalitesi sorunlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Yan vd., 2024). Bu durum, özellikle düşük rüzgâr hızına sahip bölgelerde, trafik, sanayi kaynaklı, iç mekân ısınma ve inşaat faaliyetlerinin, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde artışa neden olabileceğini düşündürmektedir. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörler altında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri incelendiğinde, dikkat çekici bazı özellikler söz konusudur. 2011 yılı için, PM_{10} konsantrasyon değerleri limit değerinin üzerinde çıkmış olmasına rağmen, diğer yıllarla karşılaştırıldığında, yaklaşık 30 µg/m³ kadar sınır değerin altında bir değer göstermektedir. Ayrıca, SO_2 konsantrasyon değeri, aynı yılda şehrin orta ve kuzey bölgeleri dışında kalan alanlarda, limit değerine yakın gözlemlenmektedir. Yağış değerlerinin yıllık ortalama 2 mm kadar düştüğü, sıcaklık değerlerinin 1 °C arttığı 2012 yılında, şehrin orta, batı ve kuzeybatı bölgelerinde PM_{10} konsantrasyon değerleri, sınır değeri yaklaşık 65 µg/m³ kadar aşmıştır. Aynı yılda, SO_2 konsantrasyon değerleri sınır değerlerin üzerinde çıkmıştır. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin yüksek gözlemlendiği bölgeler, yağışın düştüğü, sıcaklığın yükseldiği, nem oranının % 60'a denk geldiği alanlara karşılık gelmektedir. Azalan yağış miktarları, kirleticilerin yıkanarak temizlenme sürecini engellemiş ve kirleticilerin atmosferde birikmesine, artan sıcaklıklar, havanın karışmasını etkileyerek kirleticilerin yoğunlaşmasını artırmış olabilmektedir. Sıcaklık yükseldiğinde, buharlaşma artarak nem oranını da yükseltir (Shaman & Kohn, 2009). Nem oranının %60 seviyelerinde kalması, partiküllerin havada asılı kalmasına ve havadaki su buharının kirleticilerle etkileşimine bağlı olarak PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin yükselmesiyle ilişkili olabileceği düşünülebilir. 2013 yılında PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri genel olarak 70-80 µg/m³ civarlarındadır. Şehirde yağış (mm), sıcaklık (°C) ve nem (%) değerlerinin düştüğü alanlarda, PM_{10}'un konsantrasyon değerleri yaklaşık 70 µg/m³'e karşılık gelmektedir.

Bu değer, sınır değerinin üzerinde gözlenmesine rağmen, sıcaklığın ve nem oranın yüksek olduğu şehrin orta, batı ve kuzeybatı bölgelerinde gözlemlenen PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinden 10 µg/m³ kadar aşağıda kalmaktadır. Bu durum, trafik yoğunluğunun, şehrin bu bölgelerinde daha yoğun olmasıyla açıklanabilir. 2014 yılı, diğer yıllara kıyasla, yıllık ortalama yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) değerlerinde yükselmenin, buna karşın, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde azalmanın görüldüğü bir yıl olmuştur. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin >70 µg/m³ görüldüğü bölgeler, yoğun sanayi kullanımına karşılık gelen alanları oluşturmaktadır. Bozdağ vd. (2020)'de farklı algoritmalar kullanılarak gerçekleştirdikleri mekânsal dağılım tahmin haritalarında, PM_{10} konsantrasyonunu aynı bölgelerde yoğun olarak izlemişler ve bu bölgelerin sanayi faaliyetleri alanlarına karşılık geldiğini belirtmişlerdir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin >60 µg/m³ görüldüğü bölgeler, şehrin kuzeybatı ve neredeyse merkez ve çevresine karşılık gelen alanları göstermektedir. Özellikle, şehrin kuzeybatı bölümü, sanayi kullanımı etkisi söz konusu olan bir alan olsa da, kentleşmenin oldukça düşük olduğu bir bölgedir (Bozdağ vd., 2020). Ayrıca, sanayi kullanımının hava kirliliği üzerindeki etkisi, yoğun yerleşim alanlarının varlığında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durum, sanayi faaliyetlerinin etkilerinin, yerel hava kalitesi üzerindeki etkisinin kentleşme ile doğrudan ilişkili olarak daha belirgin hale gelebileceğini göstermektedir. 2014 yılında gözlemlenen yıllık ortalama yağış miktarındaki artış, havadaki kirleticileri temizleyerek, PM_{10} ve SO_2'nin atmosferden uzaklaşmasına ve bu kirleticilerin konsantrasyonlarının azalmasına katkı sağlamış olabilir. Genc vd. (2010), şehirdeki birçok yerleşim yerinin doğalgaz ile ısıtılmasına rağmen, kömür yakımının düşük gelirli bölgelerde hala kullanılıyor olması, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin sınır değerler üzerinde çıkmasında etkileyici bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Bundan başka, İpek ve Uyanık (2022)'da çalışmalarında, PM_{10} miktarındaki azalışın, doğalgaz kullanımının artması ve kömür kullanım miktarındaki azalmadan kaynaklı olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada, özellikle 2014 yıllında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde bir düşüş eğiliminde olması, kömür yakımı oranında azalma ile ilişkilendirilebilir. Emisyon azaltımına yönelik düzenlemeler, sanayi faaliyetlerin kontrolü veya trafik düzenlemeleri gibi önlemler de PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde önemli bir azalmaya yol açmış olabilir. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörlerin yanı sıra, diğer meteorolojik koşullar da hava kirliliği üzerindeki etkileri belirleyebilmektedir. Çalışmalar, hava kirliliğini karakterize etmek için, sıcaklık, rüzgâr hızı ve yönü, bağıl nem, bulut örtüsü, çiğ noktası sıcaklığı, deniz seviyesindeki basınç, yağış ve karışım katmanı yüksekliği vb. gibi önemli meteorolojik özelliklerin olduğunu ortaya koymuştur (Hooyberghs vd., 2005; Demuzere vd., 2009; Pearce vd., 2009). Ankara özelinde, Ulutaş vd. (2021) özellikle büyük şehirlerde, yüksek basınç uzun süre etkili olduğunda kirli, puslu ve sisli bir havanın oluşacağı ve bu durumun, kirletici seviyelerini arttıracağını belirtmişlerdir. Sahin vd. (2001) 850 hPa'da negatif rotasyon eğilimi, nispeten zayıf basınç gradyanları ve inversiyonlar, Ankara'daki hava kirliliği olaylarının oluşumuna işaret eden göstergeler olduğunu, kötü hava kirliliği olaylarının antiklinal koşullar ve sıcak hava adveksiyonu ile ilişkilendirildiğini vurgulamışlardır. Raja vd. (2018) Ankara'daki vadilerde ve dağların eğimli yamaçlarındaki yerel sirkülasyon ve sıcaklık varyasyonların, kirleticilerin dağılımı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin tahmininde, Ankara genelinde önemli başka meteorolojik faktörlerin çalışmaya dâhil edilmesi çalışmayı büyük ölçüde geliştirebilir.

Ankara'daki hava kirliliğinin etkili bir şekilde anlaşılabilmesi için, bölgesel meteorolojik özelliklerinin yanı sıra, çeşitli emisyon kaynaklarından gelen verilerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) ile Hollanda Hükümeti'nin Çevre ve Halk Sağlığı Ulusal Enstitüsü (National Institute for Public Health and the Environment, RIVM) arasındaki ikili iş birliği çerçevesinde yürütülen Kentlerde Hava Kalitesi Değerlendirme Sisteminin Geliştirilmesi Projesi (KENTAIR), 2011 yılında Ankara şehrindeki emisyon envanterlerini (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma) kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013). Türkiye'nin ikinci büyük sanayi merkezi olan Ankara'da yaklaşık 3.000 küçük ve orta ölçekli sanayi tesisi bulunmaktadır. Ankara Büyükşehir Belediyesi mücavir alanında, yüksek kirletici kapasitesine sahip yaklaşık 20 büyük ölçekli sanayi tesisi yer almakta olup, İvedik ve Ostim Organize Sanayi Bölgeleri ile Sincan bölgesindeki Ankara Sanayi Odası 1. Organize Sanayi Bölgesi de çeşitli sanayi tesislerini barındırmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, Ankara'nın sanayi kaynaklı emisyon ölçümleri PM_{10} için 543 ton/yıl, SO_2 için 344 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Sanayi tesislerinin hava kirliliğine etkisi, yanlış yer seçimi, yetersiz çevre koruma önlemleri ve uygun teknolojilerin kullanılmaması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ankara'daki hızla artan nüfus ve araç sayısı, yetersiz toplu taşıma sistemleri ve çevreci ulaşım seçeneklerinin eksikliği, trafikten kaynaklanan emisyonların ciddi bir sorun olmasına neden olmaktadır. Proje kapsamında, dizel, benzinli ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas, LPG) araçlardan kaynaklanan emisyonlar hesaplanmıştır. Trafikten kaynaklı emisyon miktarları, PM_{10} için 1.893 ton/yıl, SO_2 için 21 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Projede iç mekân ısınma kaynaklı emisyonlar, mücavir alanındaki tüm konutlar değerlendirilerek hesaplanmıştır. Projede kullanılan katı yakıt ve doğalgaz kullanımı verilerine göre, Ankara'daki konutların %75'i doğalgaz, %25'i kömür ve diğer ısınma türlerini kullanmaktadır. Yakıt türüne göre kirletici miktarları, ithal kömürde PM_{10} için 3.103 ton/yıl, SO_2 için 12.240 ton/yıl olarak ölçülmüştür. Yerli kömür için bu değerler, PM_{10} için 230 ton/yıl, SO_2 için 1.370 ton/yıl olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, ithal kömürün PM_{10} ve SO_2 emisyonlarına önemli bir katkıda bulunduğunu göstermektedir. İç mekân ısınma kaynaklı kirlilik, en yüksek emisyona sahipken, bunu trafik yoğunluğu ve sanayi faaliyetleri takip etmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013). Bu bulgular, Ankara'daki hava kirliliğinin ana kaynaklarının belirlemesinin ve kirliliği azaltma stratejileri geliştirmenin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin haritalarının doğruluğu Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi kullanılarak test edilmiştir. PM_{10} için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) sonuçları değerlendirildiğinde, 2011–2013 yılları için düşük tahmin değerleri belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. 2011 ve 2013 yıllarına ait tahmin haritalarında düşük tahmin değerleri genellikle daha yüksek gözlemlenirken, 2012 yılında bu değerler nispeten daha düşük çıkmıştır. 2014 yılı için ise, düşük tahmin değerleri genel olarak daha düşüktür (Şekil 11a). Bu durum, tahmin edilen değerlerin, gözlemlenen değerlerden düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, 2011–2014 yılları için yüksek tahmin değerleri genellikle düşük olarak gözlemlenmektedir. Özellikle 2012 yılında yüksek tahmin değerleri en düşük seviyededir (Şekil 11a). Yüksek tahmin değerleri, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. SO_2 konsantrasyonu tahmin modelinin, Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) sonuçlarına göre, 2011, 2013 ve 2014 yıllarında düşük tahmin değerleri düşük seviyelerde bulunurken, 2012 yılında düşük tahmin değeri daha yüksek çıkmıştır. Yüksek tahmin değerleri ise genel olarak tüm yıllar için düşük seviyelerde kalmıştır. Ancak, 2011 yılında hem yüksek hem de düşük tahmin değerleri, diğer yıllarla kıyaslandığında en düşük seviyelerde gözlemlenmiştir (Şekil 11b). KED yönteminde hava kalitesi izleme istasyonlarının yetersiz olması, mekânsal belirsizliklerin artmasına neden olabilir ve bu durum parametre tahminlerini ve mekânsal-zamansal haritalamayı etkileyerek yüksek tahmin veya düşük tahmin sonuçlarına yol açabilir (Van de Kassteele vd., 2009; Ramos vd., 2016; Idir vd., 2021). Şehir içindeki hava kalitesi izleme istasyonlarının orta bölgelerde yoğunlaşması, kenar bölgelerde seyrek olması, yüksek tahmin ve düşük tahmin değerlerini etkileyebilir. Ayrıca, şehrin orta bölgelerinde, çeşitli hava kirliliği kaynaklarının (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu) bulunması hem yüksek hem düşük tahmin değerlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu bölgelerin farklı kullanım alanları ve yapıları (ticari, konut, yeşil alanlar vb. gibi) içermesi, hava kirliliği seviyelerinde değişkenliğe yol açabilir ve bu da tahmin değerlerinde yüksek ve düşük hata değerlerinin oluşmasına neden olabilir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları, Tablo 1'de gösterilmiştir. PM_{10} konsantrasyonuna ait tahmin modeli performans sonuçları incelendiğinde, R^2 değeri 0.662, $RMSE$ değeri, 8.459 olarak görülmektedir. R^2 değeri "0" ile "1" arasında değişir. R^2 değerine göre, çalışmada kullanılan meteorolojik parametreleri, PM_{10} konsantrasyonunun yarısından fazlasını açıklayabilme özelliği göstermiştir. $RMSE$ değeri, "0" değerine yakındır. PM_{10} gibi hava kirleticileri ölçümleri, belirli bir zaman diliminde veya mekân üzerinde sürekli bir değişim gösterdiğinden, kabul edilebilir bir performans sonucu olarak değerlendirilmektedir. ME ve MAE değerleri, sırasıyla -1.068 ve 5.943 değerleri ile uygun sonuçlar göstermiştir. Bu negatif ME değerleri, tahmin edilen değerlerin, gözlemlenen değerlerden düşük tahmin yaptığını belirtmektedir. SO_2 konsantrasyonuna ait tahmin modelinin performans sonuçları incelendiğinde, R^2 değeri, modeli %78 oranında açıkladığı görülmektedir. $RMSE$, ME ve MAE değerleri, sırasıyla 2.943, 0.073 ve 1.798 değerleri ile "0" değerine oldukça yakın sonuçlarda çıkmıştır. Bu da SO_2 hava kirleticisi konsantrasyonuna ait tahmin modelinin başarılı olduğunu ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan mekânsal-zamansal KED yöntemi, Ankara şehri için sağladığı sonuçlarla etkili bir tahmin aracı olarak değerlendirilmiştir. Ankara şehrinde olduğu gibi diğer büyük şehirlerde de hava kirliliği, nüfus artışı, plansız kentleşme ve sanayi faaliyetlerinin artışı gibi nedenlerle giderek büyük bir sorun haline gelmektedir. Her şehir, kendine özgü mekânsal ve çevresel koşullara sahip olup, hava kirliliği kaynakları ve etkileri de bu farklılıkları yansıtmaktadır. Bu nedenle, mekânsal-zamansal KED yönteminin diğer büyük şehirlerde de etkili bir şekilde uygulanabileceği ve benzer hava kalitesi sorunlarını yönetme ve tahmin etme konusunda değerli bilgiler sağlayabileceği öngörülmektedir. Ancak, farklı şehirlerin özgün mekânsal düzenlemeleri, sanayi yapıları, trafik yoğunluğu ve iklim özellikleri gibi faktörler, yöntemin performansını etkileyebilir. Dolayısıyla, KED yönteminin diğer şehirlerdeki uygulanabilirliği, bu yerel koşulların detaylı bir şekilde analiz edilmesini ve uygun veri altılıklarının hazırlanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, şehirlerin özelliklerine ve yerel koşullarına yönelik yapılan uyarlamalar, KED yönteminin etkili sonuçlar sunmasını destekleyebilir ve geniş bir uygulama yelpazesi sağlayabilir.



Şekil 11: (a) PM_{10} konsantrasyonu için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemiyle elde edilen hata haritası; (b) SO_2 konsantrasyonu için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemiyle elde edilen hata haritası
Not: Hata tahmin haritasında yeşil renkler, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden düşük olduğunu (düşük tahmin); kırmızı renkler, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden yüksek olduğunu (yüksek tahmin) göstermektedir.

Tablo 1: PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları

Hava kirleticiler	R^2	$RMSE$ µg/m³	ME	MAE
PM_{10}	0.662	8.459	-1.068	5.943
SO_2	0.782	2.984	0.073	1.798

4. Sonuç ve Öneriler

Hava kirliliğinin şehir içindeki farklı bölgelerdeki değişimlerini anlamak, mekânsal değişkenler arasındaki ilişkileri ve zaman içindeki etkileşimleri kavrayabilmek açısından önemlidir. Bu bağlamda, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının meteorolojik faktörler kullanılarak yapılan mekânsal-zamansal KED analizi, hava kirliliğinin izlenmesinde, denetim altına tutulmasında ve gerekli tedbirlerin alınmasında büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, hava kalitesinin iyi olduğu bölgelerde mevcut durumun korunmasını, hava kalitesinin düşük olduğu bölgelerde iyileştirme sağlanmasını ve eşik değerlerine göre gelecekteki limit aşımlarının öngörülmesini hedefleyen stratejiler geliştirmiştir (Fan vd., 2020; Butenko & Topchıy, 2023; Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024; Kongsanun vd., 2024; Otto vd., 2024). Bu stratejiler, sürdürülebilir çevre yönetimi ve halk sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bazı çalışmalar, jeoistatistik yaklaşımlarının hava tahminlerinde yüksek performans sağladığını ve bu yöntemlerin mekânsal ve zamansal ilişkileri daha etkili bir şekilde modelleyerek daha doğru tahminler sunduğunu ortaya koymuştur (Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024; Otto vd., 2024).

Bu bağlamda, çeşitli yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla yapılan örnek çalışmalar, KED yönteminin hava kirliliği tahminlerinde ne denli etkili olduğunu göstermek açısından önemli bir perspektif sunmaktadır. Örneğin, Pearce vd. (2009), Güney Peru'nun Cusco şehrinde $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarını incelemek amacıyla Regression Analysis (REG), OK ve KED yöntemlerini kullanmışlardır. KED yönteminin, sabah, öğleden sonra ve akşam saatlerinde elde edilen RMSE sonuçları diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha hassas olduğunu bulmuşlardır. Van de Kassteele vd. (2009), Hollanda'da kırsal ve kentsel alanlar için NO_x konsantrasyonlarının dağılımını belirlemek için Bayesian ve KED yöntemleri kullanmışlardır. Çapraz Geçerlilik test sonuçları değerlendirildiğinde, KED yöntemi çok daha düşük ortalama hata değerleri verdiği sonucuna varmışlardır. Eshraghi (2013), Almanya, Hollanda, Belçika ve Lüksemburg'u kapsayan Batı Avrupa'da 2010 yılı PM_{10} konsantrasyonunun tahmini için OK, UK, KED yöntemlerini kullanmıştır. KED yöntemi, RMSE, ME ve Hata Ortalama Kare Sapması (Mean Squared Deviation of Residuals, MSDR) açısından daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. Ignaccolo vd. (2014), İtalya'nın Piemonte bölgesinde, Ekim 2005'ten Mart 2006'ya kadar günlük PM_{10} konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimini RK ve KED yöntemleri kullanarak analiz etmişlerdir. KED yöntemi, eğrinin tamamının tahminini yapabilme yeteneğine sahip olup, kovaryantların doğrusal olmayan etkilerini doğrudan sağlayabildiğini vurgulamışlardır. Bu sonuçlar, KED yönteminin hava kirliliği tahminlerinde sağladığı performansı açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, 2011–2014 yılları arasında Ankara'da PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini, KED yöntemi kullanarak kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışmada, iki temel araştırma sorusuna cevap aranmıştır:

(1) Belirtilen yıllar arasında PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde bir artış gözlemlenmiş midir?

2011 yılında PM_{10} konsantrasyon değerleri diğer yıllara kıyasla nispeten düşük, eşik değerinin üzerinde ve şehir genelinde 40-60 µg/m³ aralığında izlenmiştir. SO_2 konsantrasyon değerleri ise şehrin bazı bölgelerinde eşik değerine yakın değerlerde çıkmıştır. Bu yıl, şehirdeki hava kalitesinin nispeten daha iyi olduğunu göstermektedir. 2012 yılında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 2013 yılında, şehirde PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri genel olarak 70-80 µg/m³ aralığında yüksek seviyelerde bulunmuştur. Bu yıllar, hava kirliliğinde belirgin bir artış yaşandığını ve hava kalitesinin ciddi şekilde bozulduğunu ifade etmektedir. 2014 yılında ise, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, hava kirliliği kaynaklarına yönelik alınan önlemler veya doğal değişkenlikler sonucu meydana gelmiş olabilir. Gözlemlenen artış ve azalma trendleri, yıllık bazda hava kirliliği kaynaklarındaki değişiklikler ve iklimsel faktörlerin etkisiyle ilişkili olabilir. Özellikle belirli yıllarda gözlemlenen yüksek konsantrasyon seviyeleri, bu yıllarda hava kirliliği üreten aktivitelerdeki artışı yansıtabilir.

(2) Gözlenen bir artış varsa, Ankara şehrinin hangi bölgelerinde yoğunlaşmaktadır?

2011 yılında, PM_{10} konsantrasyon değerleri şehrin genelinde 50-60 µg/m³ aralığında, Altındağ ve Mamak ilçelerinin bulunduğu doğu kesimlerinde 70-80 µg/m³ değerlerinde izlenmiştir. SO_2 konsantrasyon değerleri şehrin güney ve güneydoğu bölgelerinde eşik değere yakın değerlerdeyken (< 40 µg/m³), şehrin orta, kuzey ve kuzeydoğu bölgelerinde bu değerin üstünde kalmıştır. 2012 yılında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri kuzeybatı taraflarında 80-90 µg/m³, Keçiören ve Pursaklar ilçelerini içine alan şehrin kuzey taraflarında 60-70 µg/m³, Etimesgut ve Sincan ilçelerine karşılık gelen şehrin batı ve güneybatı kesimlerinde 70-80 µg/m³ olarak izlenmiştir. 2013 yılında, özellikle şehrin Sincan, Yenimahalle ilçelerinin bulunduğu şehrin batı ve kuzeybatı kesimlerinde, PM_{10} konsantrasyon değeri yüksektir. Altındağ, Mamak ve Çankaya ilçelerinin bulunduğu bölgelerde PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerleri, >70 µg/m³ olarak bulunmuştur. 2014 yılında ise, PM_{10} konsantrasyon değerleri şehrin kuzeybatı, güneydoğu ve güneybatı bölgelerinde 60 µg/m³, Sincan ilçesine karşılık gelen batı bölgesinde 70 µg/m³, şehir merkezi çevresinde <70 µg/m³ olarak dağılım göstermiştir. SO_2 konsantrasyon değerleri, önceki yıllara göre daha düşük olmakla birlikte, belirtilen eşik değerlerin üstündedir. Şehir merkezinde <70 µg/m³ civarında gözlenen değer, şehir merkezi çevresinde 60 µg/m³, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde 50 µg/m³ değerine düşmüştür. Şehir içindeki farklı bölgelerde hava kirliliği seviyelerindeki değişiklikler, yerel kaynaklardan (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma vb. gibi) veya bölgesel meteorolojik koşullardan kaynaklanabilir.

PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal tahmin haritalarının performans sonuçları, mekânsal-zamansal KED yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini göstermiştir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modeli performans sonuçları incelendiğinde, R^2 değerlerinin modelleri sırasıyla %66 ve %78 oranlarında açıkladığı görülmektedir. Diğer taraftan, hata büyüklüğünü gösteren $RMSE$ değerleri, PM_{10} için 8.459 ve SO_2 için 2.984 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, belirli bir zaman diliminde veya mekânda sürekli bir değişim gösteren hava kirleticileri için kabul edilebilir bir performans düzeyi sunduğunu göstermektedir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının ME ve MAE performans değerleri de uygun sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik parametrelerin kullanıldığı KED yöntemi, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimlerini modellemede başarılı olmuştur. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörlere ek olarak, Ankara özelinde diğer meteorolojik özelliklerin tahmin modeline dâhil edilmesi, daha hassas ve güvenilir hava kirliliği tahminleri oluşturmaya katkı sağlayabilir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin belirli bölgelerdeki değişimini sadece meteorolojik faktörler açısından değil, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma kaynakları ve sanayi bölgeleri gibi emisyon kaynakları açısından da incelemek, Ankara'da hava kirliliği yönetimi ve emisyon kontrolü için uzun vadeli eğilimlerin izlenmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, yerel yönetimlerin ve ilgili kurumların, bu tür mekânsal-zamansal analiz yöntemlerini kullanarak daha etkili ve hedeflenmiş müdahale stratejileri geliştirmeleri önemlidir.

Bu bağlamda, ÇŞB tarafından yayımlanan Ankara İli Temiz Hava Eylem Planı (THEP) (2020–2024) raporu, hava kalitesinin iyileştirilmesi için önerilen eylem planları ve stratejilerle bu performans sonuçlarını desteklemekte ve uygulamaya yönelik somut adımlar sunmaktadır. ÇŞB'nin bu raporunda, Ankara şehrinde ana kaynakların emisyonunun düşürülmesi için önerilen eylem planları ve sonraki on yıl için tahminler mevcut durum grafikler aracılığı ile incelenmiştir (ÇŞB, 2020). Raporda, sanayi faaliyetleri için gerçekleştirilmesi planlanan eylemlerin başında, sanayi alanlarının yer seçiminde, yerleşim alanlarının etkilenmeyeceği bölgelerin seçilmesine özen gösterilmesi yer almaktadır. İşyerlerinin uygun yakıt, baca ve filtre sistemleri denetlenecektir. Hava emisyonu konusunda Çevre İznine tabi olan ancak bu izne sahip olmayan işletmeler belirlenerek, gerekli izinlerin alınması sağlanacaktır. Siteler Sanayi Sitesi ve çevresindeki atölyelerde ısınma ve proses amaçlı yakılan ahşap ürünleri gibi atıkların denetimi yapılacaktır. Böylece, sanayi faaliyetleri için emisyon sınır değerlerinin daha sıkı hale getirilmesi ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesiyle, mevcut denetim sistemlerinin etkinliği arttırılacaktır. Ankara şehrinde, hava kirliliğine neden olan en önemli etkenlerden bir diğeri trafik yoğunluğudur. Raporda trafik yoğunluğu üzerine gerçekleştirilmesi planlanan eylemler arasında, bireysel araç kullanımını azaltarak toplu taşımanın teşvik edilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda, ulaşımın hızlandırılması, konforun sağlanması ve ücretlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, aktarmalı taşımanın yerine direkt taşımanın yaygınlaştırılması sağlanacaktır. Belediye ve özel halk otobüsleri, dolmuş ve taksilerde egzoz emisyon kontrolleri artırılarak, eski ve kirletici araçların kullanımı kısıtlanacaktır. Bunun yanında, toplu taşıma araçlarının kademeli olarak elektrikli araçlarla değiştirilmesi öngörülmektedir. Bisiklet yollarının oluşturulması ile güvenli bir şekilde bisiklet kullanımının sağlanması gerçekleştirilecektir. Bu raporda, iç mekân ısınma konusunda gerçekleştirilmesi planlanan eylemler arasında öncelikli olarak, şehir planlamasında hava sirkülasyonunu arttırmak amacıyla yeşil alanların ve ormanlık bölgelerin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. İmarsız alanlara yapı inşasının engellenmesi sağlanacaktır. Katı yakıt kullanımı yerine doğalgaz kullanımını teşvik eden kentsel dönüşüm projeleri ve yeni yerleşim planlarının uygulanması planlanmaktadır. İç mekân ısınmada kullanılan yakıt türleri arasında kömür kullanım oranının azaltılarak doğalgaz kullanımının yaygınlaşması teşvik edilecektir. Özellikle Siteler bölgesi ve kentsel dönüşüm alanlarında merkezi doğalgaz kullanımının zorunlu hale getirilmesi sağlanacaktır. Binalarda ısı yalıtımının yapılmasına yönelik uygulamalar desteklenecektir. Katı yakıtların izinli firmalar tarafından tedarik edilmesine özen gösterilecektir. Ayrıca, yakıtların düzenli olarak denetlenmesi ve standartlara uygunluklarının kontrol edilmesi hedeflenmektedir. ÇŞB, hava kalitesinin izlenmesi, ölçülmesi ve hava kirliliğinin önlenmesi için gerekli önlemler almakta ve kamuoyunun bilinçlendirilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda, hava kalitesi izleme istasyonlarından alınan veriler sürekli olarak takip edilmeli ve bu konuda gerekli koordinasyon sağlanmalıdır. Hava kalitesi sınır değerlerinin aşması durumunda, emisyon değerleri mevzuata uygun hale getirilinceye kadar belirlenen eylemlerin uygulanmasına özen gösterilmelidir. Böylece, hava kirliliği potansiyeli olan bölgelerin ve çevrelerinin kontrol altında tutulması sağlanmış olacaktır. Hava kirliliği yönetiminin başarısı, sadece bilimsel modelleme ve tahminlerle değil, aynı zamanda etkili politika geliştirme ve uygulama stratejileriyle de ilişkilidir. Bu nedenle, kısa ve uzun vadeli stratejiler geliştirilerek, hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesi ve iyileştirilmesi sağlanmalıdır. Bu kapsamda, mekânsal-zamansal analiz yöntemlerinin etkin kullanımı, Ankara'daki hava kirliliğinin yönetimi ve kontrolü için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 18–21 Ekim 2017 tarihinde düzenlenen *"International Symposium on GIS Applications in Geography and Geosciences"*da bildiri olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

Adhikary, S. K., Muttil, N., & Yilmaz, A. G. (2017). Cokriging for enhanced spatial interpolation of rainfall in two Australian catchments. *Hydrological Process, 31*(12), 2129–2315. https://doi.org/10.1002/hyp.11163

Akbal, Y., & Ünlü, K. D. (2022). A deep learning approach to model daily particular matter of Ankara: key features and forecasting. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*, 5911–5927. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03730-3

Alahmad, B., Khraishah, H., Althalji, K., MPhil, W. B., Al-Mulla, F., & Koutrakis, P. (2023). Connections between air pollution, climate change, and cardiovascular health. *Canadian Journal of Cardiology*, *39*(9), 1182–1190. https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.03.025

Arslan, H., Ağır, A., & Demir, G. (2024). Impacts of PM_{10} exposure on hospitalization for acute bronchitis in Ankara, Türkiye. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, *5*(1), 1–5. https://doi.org/10.51753/flsrt.1322260

Arslan, M., & Dursun, D. (2024). Planlı gelişme alanlarının hava kirliliğine olası etkilerinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10*(1), 125–139. http://doi.org/10.21324/dacd.1360742

Aydın, O., & Özgür, E. M. (2009). Ankara'nın kentsel gelişiminin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleriyle ölçülmesi. *e-Journal of New World Sciences Academy Nature Sciences*, *4*(4), 215–242.

Aydin, O., & Çiçek, I. (2015). *Geostatistical interpolation of precipitation in Turkey*. Lambert Academic Publishing.

Aydın, N. (2023). Investigating the Relationship between urban environment, air quality and childhood asthma: the case of Ankara. [Doctoral dissertation, Middle East Technical University]. OpenMETU. https://open.metu.edu.tr/handle/11511/102564

Beauchamp, M., & Bessagnet, B. (2023). An iterative optimization scheme to accommodate inequality constraints in air quality geostatistical estimation of multivariate PM. *Heliyon, 9*, Article e17413. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17413

Bozdağ, A., Dokuz, Y., & Gökçek, Ö. B. (2020). Spatial prediction of PM_{10} concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey. *Environmental Pollution, 263,* Article 114635. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114635

Butenko, O., & Topchıy, A. (2023). Analysis of pollutants in air within the territory of Ukraine using geostatistical methods. *Radioelectronic and Computer Systems*, *3*(107), 226–237. http://doi.org/0.32620/reks.2023.3.18

Breeze Technologies. (2021). *The new 2021 WHO air quality guideline limits*. Breeze Tech. https://www.breeze-technologies.de/blog/new-2021-who-air-quality-guideline-limits/

Cenlin, H., Rajesh, K., Wenfu, T., Gabriele, P., Yangyang, X., Yun, Q., & Guy, B. (2024). Air pollution interactions with weather and climate extremes: current knowledge, gaps, and future directions. *Current Pollution Reports*, *10*(3), 430–442. http://doi.org/10.1007/s40726-024-00296-9

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2013). *Kentlerde hava kalitesi değerlendirme sisteminin geliştirilmesi projesi (KENTAIR), Ankara hava kalitesi değerlendirme raporu*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Ankara%20Kentair%20Raporu.pdf

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Türkiye çevre sorunları ve öncelikleri değerlendirme raporu*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/turk-ye-cevre-sorunlari-ve-oncel-kler-_2022_3_ver3.logoduzenlendi 20230901135641.pdf

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (t.y.). *Ulusal hava kalite izleme ağı*. https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality

Delbari, M., Afrasiab, P., & Jahani, S. (2013). Spatial interpolation of monthly and annual rainfall in northeast of Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *122*(1), 103–113. https://doi.org/10.1007/s00703-013-0273-5

Demuzere, M., Trigo, R. M., Vila-Guerau de Arellano, J., & van Lipzig, N. P. M. (2009). The impact of weather and atmospheric circulation on O_3 and PM_{10} levels at a rural mid-latitude site. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *9*, 2695–2714.

Erol, O., (1968). The growth of Ankara city and the geomorphology of its site. *Colloque İnternational de Gèographie Appliquèe*, *48*, 231–245.

Eshraghi, M. (2023). *Automatic modelling and mapping of Paticular Matter (PM_{10})* [Master dissertation, University of Twente]. Essay.utwente.n. https://purl.utwente.nl/essays/93966

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 11407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114071

Genc, D. D., Yesilyurt, C., & Tuncel, G. (2010). Air pollution forecasting in Ankara, Turkey using air pollution index and its relation to assimilative capacity of the atmosphere. *Environmental Monitoring and Assessment*, *166*, 11–27. http://doi.org/0.1007/s10661-009-0981-y

Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.

Greenpeace. (2022, Ekim 13). *Türkiye'de Hava Kirliliği Yükü–2021 Raporu*. https://www.greenpeace.org/turkey/raporlar/turkiyede-hava-kirliligi-yuku-2021/

Hengl, T., Heuvelink, G., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*, *33*(10), 1301–1315. http://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001

Hooyberghs, J., Mensink, C., Dumont, G., Fierens, F., & Brasseur, O. (2005). A neural network forecast for Daily average PM_{10} concentrations in Belgium. *Atmospheric Environment*, *39*, 3279–3289. http://doi/10.1016/j.atmosenv.2005.01.050

Idir, Y. M., Olivier, O., Judalet, V., Sagot, B., & Chatellier, P. (2021). Mapping urban air quality from mobile sensors using spatio-temporal geostatistics. *Sensors*, *21,* Article 4717. http://doi.org/10.3390/s21144717

Ignaccolo, R., Mateu, J., & Giraldo, R. (2014). Kriging with external drift for functional data for air quality monitoring. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *28*, 1171–1186. http://doi.org/10.1007/s00477-013-0806-y

Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.

İpek, Z., & Uyanık, İ. (2022). Sanayi kaynaklı noktasal emisyonların hava kalitesine katkısı: Kayseri İli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *8*(2), 341–350. http://doi.org/10.21324/dacd.1056806

Koçak, E., & Balcılar, İ. (2024). Spatio-temporal variation of particulate matter with health impact assessment and long-range transport case study: Ankara, Türkiye. *Science of the Total Environment, 938,* Article 173650. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173650

Kongsanun, C., Chutsagulprom, N., & Moonchai, S. (2024). Spatio-temporal dual kriging with adaptive coefficient drift function. *Mathematics*, *12*, 400, 1–21. http://doi.org/10.3390/math12030400

Köse, Y., Şahin, Ş., & Müftüoğlu, V. (2024). Ankara Çayı Havzası'nın kentsel planlama kapsamında taşkın duyarlılığı açısından değerlendirilmesi. *İdealkent*, *43*(16), 512–543. http://doi.org/10.31198/idealkent.1360600

Liang, F., Gao, M., Xiao, Q., Carmichael, G. R., Pan, X., & Liu, Y. (2017). Evaluation of a data fusion approach to estimate daily $PM_{2.5}$ levels in North China. *Environmental Research*, *158*, 54–60. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.001

Lichtenstern, A. (2013). *Kriging methods in spatial statistics* [Bachelor's dissertation, Technische Universität München]. mediatum.ub.tum.de. https://www.semanticscholar.org/paper/Kriging-methods-in-spatial-statistics-Lichtenstern/129ba812abbcb734a973e51f102d60227d5e6f6e

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (t.y.). *İllere ait mevsim normalleri (1991–2020)*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ANKARA

Oral, H. V., Ulusoy, İ., Özelkan, E., & Toros, H. (2015, April 28–30). *Ankara ve çevre illerde hava kirliliği dağılımı ve emisyon envanterinin belirlenmesi* [Conference presentation]. VII. Atmospheric Science Symposium, İstanbul, Türkiye.

Otto, P., Moro, A. F., Rodeschini, J., Shaboviq, Q., Ignaccolo, R., Golini, N., Cameletti, M., Maranzano, P., Finazzi, F., & Fassò, A. (2024). Spatiotemporal modelling of $PM_{2.5}$ concentrations in Lombardy (Italy): a comparative study. *Environmental and Ecological Statistics*, *31*, 245–272. https://doi.org/10.1007/s10651-023-00589-0

Özgür, E.M. (1995). Türkiye'deki iç göçlerde Ankara İli'nin yeri. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, *4*, 63–76.

Pearce, J. L., Rathbun, S. L., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2009). Characterizing the spatiotemporal variability of $PM_{2.5}$ in Cusco, Peru using kriging with external drift. *Atmospheric Environment*, *43*, 2060–2069. http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.060

Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computer Geoscience*, *30*(7), 683–691.

Pebesma, E. (2012). Spacetime: spatio-temporal data in R. *Journal of Statistical Software*, *51*(7), 1–30

Pei, H., & Shiliang, W. (2016). Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality. *Scientific Reports*, *6*, Article 23792. http://doi.org/10.1038/srep23792

Pinho-Gomes, A.-C., Roaf, E., Fuller, G., Fowler, D., Lewis, A., ApSimon, H., Noakes, C., Johnstone, P., & Holgate, S. (2023). Air pollution and climate change. *The LANCET Planetary Health*, *7*(9), 7–8. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00189-4

R Development Core Team. (2016). *The R project for statistical computing*. https://www.r-project.org/

Raja, N. B, & Aydin, O. (2017). *New approaches to flash flood forecasting in the Mediterranean Region*. Lambert Academic Publishing.

Raja, N. B., Aydin, O., Türkoğlu, N., & Çiçek, İ. (2018). Characterising the seasonal variations and spatial distribution of ambient PM_{10} in urban Ankara, Turkey. *Environmental Processes*, *5*(1), 349–362. http://doi.org/10.1007/s40710-018-0305-8

Rahaman, S.N., Nelson, J., Ali, A.A.B., Shermin, N., Pricope, N. G., Kafy, A. A., Sabuj, M. S., & Toa, S. S. (in press). A multivariate geostatistical framework to assess the spatio-temporal dynamics of air pollution and land surface temperature in Bangladesh. *Earth Systems Environment*. https://doi.org/10.1007/s41748-024-00418-9

Rahim, U. A., & Masseran, N. (2023). State-space time series analysis on air pollution data. *Environment and Ecology Research*, *11*(1), 155–164. http://doi.org/10.13189/eer.2023.110111

Ramos, Y., St-Onge, B., Blanchet, J-P., & Smargiassi, A. (2016). Spatio-temporal models to estimate daily concentrations of fine particulate matter in Montreal: Kriging with external drift and inverse distance-weighted approaches. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, *26*, 405–414. https://doi.org/10.1038/jes.2015.79

Rusmilli, S. H. A., Hamzah, F. M., Choy, L. K., Azizah, R., Sulistyorini, L., Yudhastuti, R., Diyanah, K. C., Adriyani, R., & Latif, M. T. (2023). Ground-level particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration mapping in the central and south zones of Peninsular Malaysia using a geostatistical approach. *Sustainability*, *15*(23), Article 1616. https://doi.org/10.3390/su152316169

Ulutas, K., Abujayyab, S. K. M., & Abu Amr, S. (2021). Evaluation of the major air pollutants levels and its interactions with meteorological parameters in Ankara. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *9*(4), 1284–1295. http://doi.org/10.21923/jesd.939724

Sahin, M., Incecik, S., Topcu, S., & Yildirim, A. (2001). Analysis of atmospheric conditions during air pollution episodes in Ankara, Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *51*(7), 972–982. https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464334

Shaman, J., & Kohn, M., (2009). Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(9), 3243–3248. https://doi.org/10.1073/pnas.0806852106

Temiz Hava Hakkı Platformu. (2023, Mart). *Kara rapor 2022: hava kirliliği ve sağlık etkileri*. https://www.temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2023/03/KaraRapor_v6.pdf

Toros, H., Bağış, S., & Gemici, Z. (2018). Ankara'da hava kirliliği mekânsal dağılımının modellenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, *1*(1), 20–53.

Tran, H. M., Tsai, F. J., Lee, Y. L., Chang, J. H., Chang, T. Y., Chung, K. F., Kuo, H. P., Lee, K. Y., Chuang, K. J., & Chuang, H. C. (2023). The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: a review of the current evidence. *Science of the Total Environment*, *898*, Article 166340. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166340

Turgut, D., & Temiz, İ. (2015). Ankara'daki hava kirliliği için zaman serileri analizi ve tahmin: box-jenkins yaklaşımı. *Alphanumeric Journal*, 3(2), 131–138. http://doi.org/10.17093-aj.2015.3.2.5000148347-270497.pdf

Türkiye İstatistik Kurumu. (2024a, Temmuz 9). *Dünya nüfus günü, 2024*. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dunya-Nufus-Gunu-2024-53680

Türkiye İstatistik Kurumu. (2024b, Şubat 6). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023*. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2023-49684

Türkoğlu, N., Aydın, O., Duman, N., & Çiçek, İ. (2016). Türkiye'de yağışın farklı mekânsal enterpolasyon yöntemleriyle karşılaştırılması. *Journal of Human Science*, *13*(3), 5636–5659. http://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.4173

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley.

World Health Organization. (2021, October 21). *Air pollution causes 13 deaths per minute worldwide*. https://www.who.int/multi-media/details/air-pollution-climate-change

World Health Organization. (2023, January 26). *World Health Organization (WHO) air quality guidelines (AQGs) and estimated reference levels (RLs)*. https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air

Van de Kassteele, J., Stein, A., Dekkers, A. L. M., & Velders, G. J. M. (2009). External drift kriging of NOX concentrations with dispersion model output in a reduced air quality monitoring network. *Environmental and Ecological Statistics*, *16*(3), 321–339. http://doi.org/10.1007/s10651-007-0052-x

Yan, J., Chen, W. Y., Zhang, Z., Zhao, W., Liu, M., & Yin, S. (2024). Mitigating $PM_{2.5}$ exposure with vegetation barrier and building designs in urban open-road environments based on numerical simulations. *Landscape and Urban Planning*, *241*, 104918, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104918

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 268–289, DOI: 10.21324/dacd.1577479

A Comparative Spatiotemporal Analysis for Long-Term Trends of Hydrometeorological Variables in Maritsa River Basin

Mehmet Seren Korkmaz[1,*], Kevser Merkür Başkesen[2], Ertuğrul Sunan[3]

[1]*Samsun University, Özdemir Bayraktar Faculty of Aeronautics ve Astronautics, Dept. of Meteorological Engineering, 55420, Samsun.*
[2]*Basin Management, Monitoring and Allocations Branch, State Hydraulic Works (DSİ), 11th Regional Directorate,22100, Edirne.*
[3]*Samsun University, Özdemir Bayraktar Faculty of Aeronautics ve Astronautics, Dept. of Aercraft Maintenance, 55420, Samsun.*

Abstract

Revealing long-term trends in hydrometeorological variables plays a critical role in the sustainable management and planning of water resources. These analyses are necessary to understand climate change impacts, taking precautions for natural disasters, plan agricultural activities, and develop water management strategies. The aim of this study is to examine the changes in monthly and annual total precipitation and evapotranspiration values in the Maritsa River Basin, a transboundary water basin between Bulgaria, Greece, and Türkiye. For this, precipitation values for the 1982-2023 water years were taken from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) data set, and evapotranspiration values for the 1982-2023 water years were taken from the European Reanalysis 5th Generation-Land (ERA5-Land) data set. The Mann-Kendall, Sen's slope estimator, and Innovative Trend Analysis (ITA) methods were used to determine trends. According to the test results, there is a statistically significant increase in annual total precipitation values within the 95% confidence interval and in annual total evapotranspiration values within the 99% confidence interval. Specifically with all three methods positive and statistically significant trends are observed in precipitation in October, January, May and June. In the monthly evapotranspiration trend analysis, a statistically significant increase is observed except for November, December, June and July. Trend increases were visualized using the graphical method ITA. Significant increasing trends in both monthly and annual precipitation and evapotranspiration reveal changes in the hydrological cycle of the basin. The test results can be used in planning and solving problems related to the basin area.

Keywords
Maritsa River Basin, Precipitation, Evapotranspiration, Trend Analysis, Climate Change

Meriç Nehir Havzası'ndaki Hidrometeorolojik Değişkenlerin Uzun Dönem Eğilimleri için Karşılaştırmalı Mekansal ve Zamansal Analizi

Özet

Hidrometeorolojik değişkenlerdeki uzun dönem eğilimleri ortaya çıkarmak, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve planlamasında kritik bir rol oynar. Bu analizler, iklim değişikliğinin etkilerini anlamak, doğal afetler için önlemler almak, tarımsal faaliyetleri planlamak ve su yönetim stratejilerini geliştirmek için gereklidir. Bu çalışmanın amacı, Bulgaristan, Yunanistan ve Türkiye arasında sınır aşan bir su havzası olan Meriç Nehri Havzası'ndaki aylık ve yıllık toplam yağış ile evapotranspirasyon değerlerindeki değişimleri incelemektir. Bu amaçla, 1982-2023 su yılları için yağış değerleri "Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS)" veri setinden, evapotranspirasyon değerleri ise "European Reanalysis 5th Generation-Land (ERA5-Land)" veri setinden alınmıştır. Eğilimlerin belirlenmesi için Mann-Kendall, Sen'in eğim tahmini ve Yenilikçi Eğilim Analizi (ITA) yöntemleri kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, yıllık toplam yağış değerlerinde %95 güven aralığında ve yıllık toplam evapotranspirasyon değerlerinde %99 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bir artış görülmektedir. Özellikle 3 yöntemde de Ekim, Ocak, Mayıs ve Haziran aylarında yağışlarda pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı eğilimler gözlemlenmiştir. Aylık evapotranspirasyon eğilim analizinde ise Kasım, Aralık, Haziran ve Temmuz ayları dışında istatistiksel olarak anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Eğilimdeki artışlar ITA yöntemi kullanılarak grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Hem aylık hem de yıllık yağış ve evapotranspirasyondaki anlamlı artış eğilimleri havzanın hidrolojik döngüsünde değişiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Test sonuçları, havza alanıyla ilgili sorunların planlanmasında ve çözümünde kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler
Meriç Nehri Havzası, Yağış, Evapotranspirasyon, Eğilim Analizi, İklim Değişikliği

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (362) 3130055 Faks:+90 (362) 3130200
E-posta: mehmetskorkmaz@samsun.edu.tr (Korkmaz M.S.), kevsermerkur@gmail.com (Merkür Başkesen K.), ertugrul.sunan@samsun.edu.tr (Sunan E.)

Gönderim Tarihi / Received : 01/11/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 15/01/2025

1. Introduction

Climate change has become a major scientific study area that has been on the agenda and addressed from different perspectives in recent years. The impact of climate change on water resources is being determined through large projects both in the most affected geographies and globally (NASA Science, 2024). Researchers have focused on the temporal changes of hydrological variables, which feed the water resources of a particular basin and are generally called water cycle elements and are used in water budget calculations (Zhu et al., 2020; Massei et al., 2020; Yang et al., 2023). There are many studies (Table 1) conducted mainly on precipitation and temperature in river basins with different climatic characteristics of the world. The common purpose of these studies is to determine regional precipitation and temperature trends (Gulahmadov et al., 2023; D'Oria et al., 2018). Since climate, means the average of temperature and precipitation in a certain region over time by definition, it is extremely logical to conduct studies based on these variables (Hoerling et al., 2010).

Table 1: Recent researches of trends for climatological variables temperature and precipitation trends

Author	Variables	Regions	Methods
Faquseh & Grossi (2024)	Precipitation, temperature and snow water equivalent (1990-2020)	Lombardy region, located in the northwest of Italy	Mann-Kendall, Pettitt's change point detection, Sen's slope estimator
Aksu & Arikan (2017)	Evapotranspiration	Buyuk Menderes River Basin	Metric Model
Esit et al. (2024)	Temperature and precipitation (1958-2021)	Van, Türkiye	Mann-Kendall, Spearman's Rho, Sen's slope estimator, Innovative trend methods (ITA and IPTA), Sequential Mann Kendall (SQ-MK)
Acar et al. (2022)	Rainfall and temperature (1969-2020)	Türkiye	Mann-Kendall, Innovative trend signifcance test (ITST), Innovative polygon trend analyses (IPTA) with star graph
Shah et al. (2022)	Air and dew point temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation	Ontario, Canada	Mann–Kendall test and Sen's slope estimator
Katipoğlu (2022)	Temperature, precipitation, relative humidity, windspeed, sunshine duration (1934–2019)	Bursa, Türkiye	ITA, Sequential Mann-Kendall, Standard normal homogeneity test (SNHT), Pettitt test
Muia et al. (2024)	Temperature and rainfall (1991-2020)	Makueni County, Kenya	Mann-Kendall and Sen's slope estimator
Sa'adi et al. (2023)	Temperature and rainfall (1948–2016)	Sarawak, Malaysia	Mann-Kendall, modified Mann-Kendall, extreme climate indices
Larbi et al. (2018)	Temperature and rainfall (1985–2016)	Vea Catchment, Ghana	Mann–Kendall (MK), Sen's slope estimator, rainfall indices, temperature indices
Kliengchuay et al. (2024)	Temperature, relative humidity, and precipitation (2001-2020)	Thailand	Mann-Kendall, ITA
Serencam (2019)	Rainfall and temperature (1970-2013)	Yesilirmak, Türkiye	ITA
Titkova et al. (2023)	Evaporation and soil moisture (1980-2021)	South of European Russia	Ten year lineer trends, correlation analysis
Rani et al. (2023)	Precipitable Water Vapor (PWV) (1960-2021)	Indus River Basin	Sen's slope estimator and Mann Kendall
Liu & Yang (2022)	Soil moisture and soil temperature (1950-2020)	Mongolian Plateau	Correlation and Granger causality analysis

In addition to investigating trends climatological variables, many studies (Table 2) have been focused on climate indices (Frich et al., 2002) calculated to understand extreme meteorological conditions.

Future climate projections are produced for various goals, and it is revealed how the climate on a global scale changes according to different RCP (Representative Concentration Pathway) scenarios and in what direction the change will follow as a result of these projections (World Climate Research Programme, n.d.) (Table 3).

Table 2: Recent researches of climate indices

Author	Variables	Regions	Methods
Alexander et al. (2006)	Temperature and precipitation (1951-2003)	Global	Temperature indices and precipitation indices
Mohammed (2024)	Rainfall (1981-2019)	Lake Tana, Ethiopia	Rainfall indices
Felix et al. (2021)	Temperature and precipitation (1988-2020)	Geum River	Temperature indices, precipitation indices, Trend-Free Pre-Whitening (TFPW) Method, Mann-Kendall, Theil–Sen Slope (TS) Estimator, Mann–Whitney–Pettit (MWP) Test, Pearson's Correlation Coefficient
Al-Shamayleh et al. (2024)	Precipitation(1987-2017)	Wala Basin, Jordan	Precipitation indices
Medina et al. (2023)	Rainfall (1982–2019)	Northern Argentina	Rainfall indices, Mann-Kendall, Sen's slope estimator
Iqbal et al. (2024)	Precipitation (1985-2016)	Pakistan	Precipitation indices, Mann-Kendall, modified Mann-Kendall

Table 3: Researches for climate projections and trend analysis

Author	Variables	Regions	Methods
Nacar et al. (2024)	Temperature and Precipitation [(2021–2050), (2051–2080), (2081–2100)]	Eastern Black Sea, Türkiye	GCMs (CNRM-CM5.1, HadGEM2-ES, and MPI-ESM-MR, from CMIP5 (5. Climate Model Intercomparison Project)) RCP4.5, and RCP8.5, ITA, IV-ITA
Aksoy et al. (2008)	Precipitation, air temperature, and streamflow	European part of Türkiye	ECHAM4, HadCM2 and HadCM3
Koubodana et al. (2020)	Discharge, rainfall, temperature (2020-2045)	Mono River, West Africa	RCP4.5 &RCP8.5, Mann-Kendall, Sen's slope estimator, rainfall indices, temperature indices
Rahaman et al. (2024)	Temperature and rainfall (2021-2030)	India	Random forest and artificial neural network-multilayerperceptron (ANN-MLP), Mann-Kendall, Sen's slope estimator
Ali et al. (2023)	Temperature, solar radiation and precipitation (2020-2070)	Astore River, Pakistan	GCM's (BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0, and MPI-ESM1-2-HR), Mann-Kendall, Sen's slope estimator
Kant et al. (2024)	Temperature and precipitation (2000-2099)	Beas River, Northern India	GCMs (BNU-ESM, Can-ESM2, CNRM CM5, MPI-ESM MR, and MPI-ESM LR), RCP4.5, and RCP8.5 scenarios, ITA, Mann–Kendell, and Sen's slope trend

All research is carried out with certain commonly accepted parametric or non-parametric trend analysis methods whether it is just the change of current climate variables, the frequency of occurrence of extreme meteorological conditions, or research on the direction of changes in the climate of the future period (Table 4).

Table 4: Actual studies of trend analysis methods

Author	Variables	Regions	Methods
Chowdari et al. (2023)	Rainfall (1901-2002)	Karnataka, India	Mann-Kendall, modified Mann-Kendall (mMK), Spearman's rho test, ITA
Şen & Şişman (2024)	Discharge (1840-2003), precipitation (1940-2012)	Danube River and Antalya	Sen's slope calculation
Bağdatlı & Arıkan (2020)	Evaporation (1978-2019)	Nigde, Türkiye	Mann-Kendall, Spearman's Rho, Sen's slope estimator
Güçlü (2020)	Rainfall (1966-2015)	Türkiye	Mann-Kendall, ITA, IV-ITA
Kesgin et al. (2024)	Precipitation and temperature (1972–2020)	Mediterranean coastal region, Türkiye	ITA, IV-ITA
Birpınar et al. (2023)	Precipitation (1901-2002)	Assam, India	Mann-Kendall, modified Mann-Kendall, ITA
Boudiaf et al. (2022)	Rainfall (1982-2019)	Northeastern coastal part of Algeria	IPTA

Table 4 continued

Author	Variables	Regions	Methods
Karacosta et al. (2023)	Precipitation (1971-2020)	Thessaloniki, Greece	IPTA
Gopakkali et al. (2023)	Precipitation (1951-2020)	Karnataka, India	Mann-Kendall, ITA
Ashraf et al. (2023)	Precipitation (1961–2018)	Indus River	Modified Mann-Kendall, Sen's slope estimator, ITA, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)
Koycegiz & Buyukyildiz (2024)	Precipitation (1971–2020)	Konya, Türkiye	Innovative polygon trend analysis (IPTA) and trend polygon star concept (TPSC)
Hussain et al. (2022)	Temperature (1995-2020)	Soan River, Pakistan	Innovative Trend Pivot Analysis Method (ITPAM) and Trend Polygon Star Concept Method

The most widely used non-parametric statistical methods are known as Mann–Kendall (MK) test (Mann, 1945; Kendall, 1975) and Sen's slope estimator (Sen, 1968) in the literature. In recent years, with the innovative trend analysis (ITA) method developed by Şen (2012) can be used in all time series because it does not have any assumptions. Additionally, this test divides the data set into two, comparing the first and second halves and highlights extreme events in the trend (Şen, 2014).

The primary aim of this research is to evaluate the trends in precipitation and evapotranspiration over the water years from 1982 to 2023 for precipitation and evapotranspiration in the Maritsa River Basin. For this purpose, daily precipitation data for the 42-year period, sourced from the Climate Hazards Group Infrared Precipitation Station (CHIRPS) (Funk et al., 2015), and monthly evapotranspiration data for the 42-year period from the European Reanalysis 5th Generation-Land (ERA5-Land) data set (ECMWF) are analyzed. Trend analyses were conducted on both monthly and annual scales for the precipitation and evapotranspiration data. The methods employed include the Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and the Innovative Trend Analysis (ITA).

The results obtained from these three analytical methods were then compared and presented through tables and figures, offering a comprehensive view of the trends in precipitation and evapotranspiration in the Maritsa River Basin over the specified period.

2. Data and Methods

2.1. Study Area

In this study, Maritsa River Basin (Meriç (Mherich) in Turkish, Εβρος, Evros in Greece and Марица, Maritza in Bulgarian), which is a transboundary water basin between Bulgaria, Greece and Türkiye, has been chosen as the study area (Figure 1). Maritsa River Basin originates from the fountains on Musalla Peak in the Aegean Sea following a path of approximately 492 km (Korkmaz, 2019). The total surface area of the basin from the outlet point where it flows into the sea is 50903 km^2.

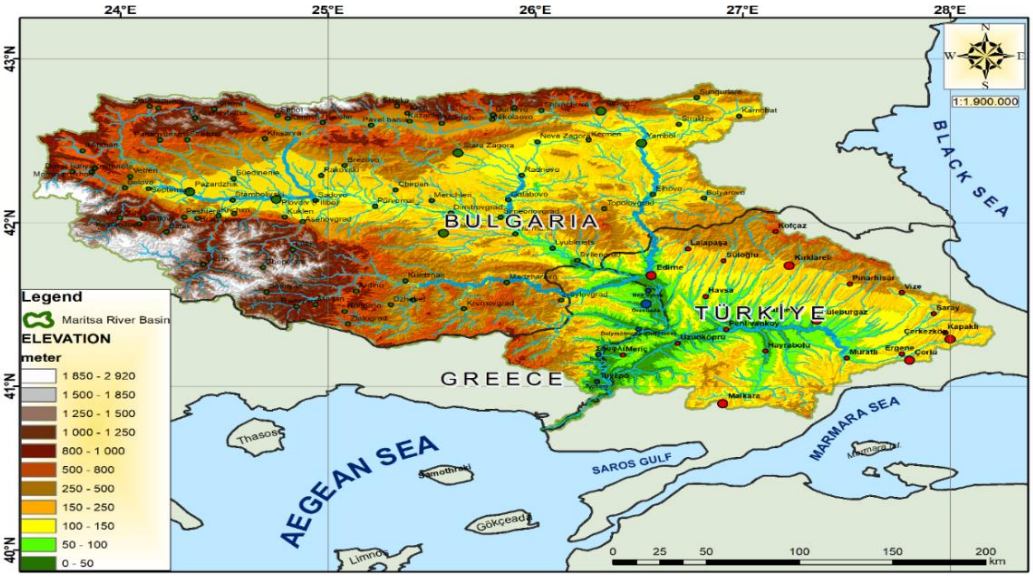


Figure 1: Location of the study area

2.2. Data

In order to understand the direction of the trends of meteorological variables in a region and to present them with quantitative results, a sufficiently long-term, uninterrupted and highly representative data set is needed on a spatial and temporal scale according to the size of the study area.

Maritsa River is a river that has come to international attention due to the floods that occurred especially in the 2000s (Figure 2). In order to prevent the river from being damaged by floods, managers and technical experts in the three countries come together through various projects and try to ensure that supportive measures such as structural measures for the rehabilitation of the river bed and flood early warning systems are taken (Malkaralı et al., 2008).



Figure 2: Maritsa river flood near Edirne in 2010 (DSI Edirne Regional Directorate, 2010)

However, the river passes through three different countries and there are many dams – small dams, irrigation channels, etc. over the tributaries of the river (Figure 3).



Figure 3: Hamzadere irrigation channel near Ipsala (General Directorate of State Hydraulic Works, 2020)

The availability of storage facilities seems to have a significant impact on water users in the basin in the coming years. For example; Turkish Farmers' Unions, which are engaged in agriculture in the very fertile plains downstream of the basin, take the water from the river bed with pumps during the winter months when the flow rate of the river is high and then store it in large man-made constructed storage facilities in the plain. This stored water is used to grow plants that consume high water, especially rice during the irrigation season. Approximately 60% of the paddy production in Türkiye is made with this water provided only from the Maritsa River (Ipsala Kaymakamlığı, n.d.). Therefore, the water potential of the Maritsa River lies at the essential of strategic agricultural production. Possible meteorological or hydrological drought risks in the river basin can lead to huge socioeconomic negativities.

Since Maritsa River Basin is the most important river in that region, both for floods and agricultural irrigation, this study is intended to be carried out as obtaining the trends of both precipitation and evapotranspiration in this river basin will provide very valuable information.

Uninterrupted and highly representative data set is needed on a spatiotemporal scale according to the size of the study area in order to understand the direction of the trends of meteorological variables in a region and to present them with quantitative results.

Dataset of the meteorological observation stations of national meteorological organizations are provided as general data sets in studies aimed at determining climatological trends in water basins. However, there is a general drawback here. There are many inadequacies, especially in precipitation datasets, regarding continuity and spatial representation of the basin. Because river basins are natural formations and rainfall supports the flow in the stream bed from the upstream of the basin. However, it is preferred to establish and operate meteorological observation stations in residential areas as a common understanding all over the world. So, there are no sufficient observation stations and qualified precipitation datasets with measurement periods at the upper elevations of the basins for this reason.

Another compelling issue is the difficulties and methodological differences in obtaining data by the meteorological organizations of many countries in transboundary river basins. Since the Maritsa River basin, is located in three different countries, it is very difficult to obtain meteorological data for the past period. Conducting a joint international project, consenting to data sharing by the meteorological institutions of all three countries, and providing meteorological data with high representativeness in the basin over a determined long-term period is not considered a practical approach for a spatiotemporal research.

In addition, we aim to work with 'evapotranspiration' datasets, which are one of the most ‘laborious’ datasets to obtain meteorologically (Aksu & Arikan, 2017). As emphasized above, when the scientific literature is scanned, there is no in-depth climatologic research on the region. One of the main goals of this study is to strive for a direct hydrological analysis for the basin water budget. Therefore, trend analysis of the evapotranspiration dataset is performed. Moreover evapotranspiration can also indirectly represent an aspect about temperature.

As a result, data sets produced from satellite observation products have been used to study with precipitation and evapotranspiration data that are both temporally and spatially representative (Table 5).

Table 5: Data used in the study

Meteorological Variable	Temporal Resolution	Spatial Resolution	Data Source	Time Period
Total Precipitation	Daily (kg/m^2)	4.8 km x 4.8 km	CHIRPS (Funk et al. 2015)	1982 - 2023 Water Years
Total Actual Evapotranspiration*	Daily (kg/m^2)	0.1° (≈ 9 km)	ERA5-Land (ECMWF)	1982 - 2023 Water Years

*: In the catalog of the dataset, it titled as ‘evaporation’, but it defines the total actual evapotranspiration.

Daily precipitation data as the CHIRPS (The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations) product (Funk et al., 2015) are provided at the basin scale for the 42-year uninterrupted period between 1981-2023. Then, daily evaporation data (including transpiration from vegetation) as the ERA5-Land (European Reanalysis 5th Generation-Land) product (ECMWF) are provided at the basin scale for the 42-year uninterrupted period between 1981-2023 for the study. Web Platform of Google Earth Engine is used to obtain whole spatiotemporal dataset. The written javascript codes gave the spatial amount of daily precipitation and evapotranspiration in the basin for each year.

As a result, meteorological data sets with a period of at least 40 years are evaluated as the most appropriate approach to conduct trend analysis using different methods in a transboundary river basin with an area of approximately 50 000 km^2 and located in three countries. Spatial precipitation and evapotranspiration data is actually a multi-dimensional dataset where there are 'temporal' average 'values' for each grid. For example, each grid contains a 'value' dependent on latitude, longitude, and time. The average of these ‘average values' contained in each grid is then reduced to a single value for that date for the whole basin (which could be the relevant day, month, or year, for example).

In this study, while conducting trend analyses, spatial datasets were transformed into time series in this way, and these daily temporal resolution values were used for the basin. These daily 'average values' representing the entire basin were downloaded on a daily basis at the water year scale using *JavaScript* scripts written in *Earth Engine Code Editor*. Then, monthly and annual (water year) totals were calculated from the daily time series produced at the basin scale using scripts written in the *R* programming language. Subsequently, trend analyses were performed with these monthly and annual datasets.

2.3. Methods

Monthly and annual trend analyses of meteorological variables were carried out in the study area using three different methods with daily total precipitation amounts and monthly total evapotranspiration amount data sets, which are considered as meteorological time series (Figure 4). Precipitation and evapotranspiration data were pre-organized using the R programming language and several R-packages. Trends in water year-based data sets were interpreted using the Mann-Kendall, Sen's Slope estimator, and Innovative Trend Analysis (ITA) methods.

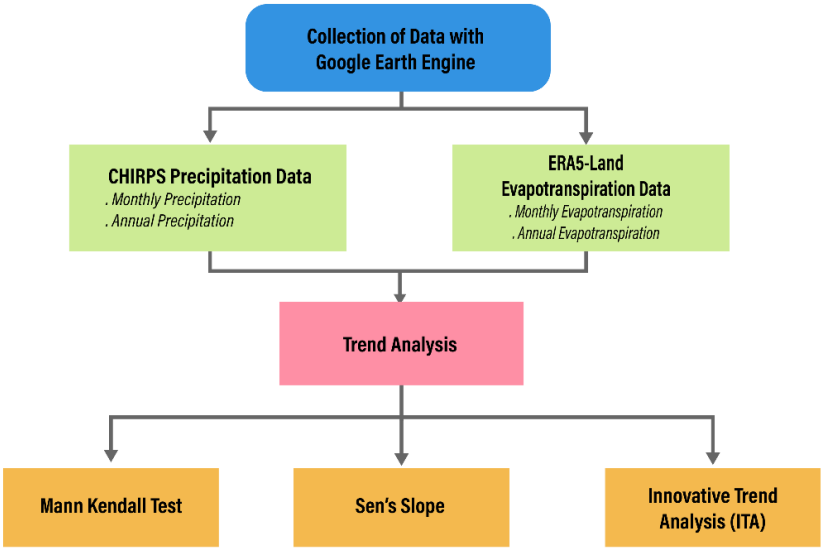


Figure 4: Flow chart of the methodology of the study

2.3.1. Mann-Kendall Trend Analysis

The Mann-Kendall test statistic S (Mann, 1945; Kendall, 1975) is calculated as (1);

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i) \tag{1}$$

where n is the number of data points, x_i and x_j are the data values in time series i and j $(j > i)$, respectively and $\mathrm{sgn}(x_j - x_i)$ is the sign function as (2):

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, if\ x_j - x_i > 0 \\ 0, if\ x_j - x_i = 0 \\ -1, if\ x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{2}$$

The variance is computed as (3);

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \tag{3}$$

where n is the number of data points, m is the number of tied groups and ti denotes the number of ties of extent i. A tied group is a set of sample data that have the same value. In cases where the sample data is bigger than 10 (n > 10), the standard normal test statistic Z_S is computed using the equation (4):

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, \text{if } S > 0 \\ 0 \qquad\quad , \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, \text{if } S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

Positive values of *S* indicate increasing trends while negative *S* values show decreasing trends. The specific α significance level is used to test trends. The null hypothesis (H_0), meaning that no significant trend is possible, is supported when the α significance level $|Z_s| \leq Z\alpha/2$.

The null hypothesis (H_0) assumes that the data are independent and identically distributed random variables, while the alternative hypothesis (H_1) indicates a statistically significant trend. If the Z value exceeds the critical value from the standard normal distribution at the chosen significance level α, the null hypothesis (H_0) should be rejected. This means that there is a statistically significant positive or negative trend in the data series.

Accordingly, significance levels of 5% (p = 0.05) and 1% (p = 0.01) were used as thresholds for identifying trends. For a 5% significance level, Z = ±1.96, and for 1%, Z = ±2.58. Statistical significance is confirmed when $p < 0.05$, and trends are considered highly statistically significant when $p < 0.01$.

Additionally, Kendall's Tau (τ) statistic, related to the Mann-Kendall test, measures the strength and direction of association between variables. The Tau value ranges from -1 to +1, where +1 indicates a perfect positive correlation, -1 a perfect negative correlation, and 0 indicates no correlation (Kendall, 1938).

2.3.2. Sen's Slope Trend Analysis

Sen (1968) developed equation (5) for estimating the slope (Q_i) of trend in the sample of N pairs of data:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad for \;\; i = 1,2,3 \ldots N \tag{4}$$

where x_j and x_k are data values at times j and k (j > k), respectively.

If there is only one datum in each time period, then $N = \frac{n(n-1)}{2}$, where *n* is the number of time periods. If there are multiple observations in one or more time periods, then $N < \frac{n(n-1)}{2}$, where *n* is the total number of observations.

The N values of Q_i are ranked from smallest to largest and the median of slope or Sen's slope estimator is computed as (6)

$$Q_i = \begin{cases} Q_{[\frac{N+1}{2}]} & if\ n\ is\ odd \\ \frac{1}{2}\left(Q_{[\frac{N}{2}]} + Q_{[\frac{N+2}{2}]}\right) & if\ n\ is\ even \end{cases} \tag{5}$$

2.3.3. Innovative Trend Analysis

Şen presented a trend analysis method based on the 1:1 line of the coordinate system (Şen, 2012). According to this approach, the hydrometeorological data series is divided into two equal halves from the median year. The two new subseries formed are sorted from smallest to largest. In the Cartesian coordinate system, the first subseries is lined up on the x-axis and the second subseries is lined up on the y-axis. If the data is above the 1:1 line, no trend can be observed; if the data is located in the lower triangular region of the 1:1 line, there is a decreasing trend; if the data is located in the upper triangular region, there is an increasing trend (Şen, 2012). In addition to determining the increasing and decreasing trend, the Şen ITA method offers 5 options; monotonic increasing, non-monotonic increasing, monotonic decreasing, nonmonotonic decreasing and no trend (Şen, 2012) (Figure 5).

1. The dataset, represented as $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, consists of data points in a time series. The data series is first divided into two equal halves based on the median year.
2. First subseries $X_1 = \{x_1, x_2, \ldots, x_m\}$ and second subseries $X_2 = \{x_{m+1}, x_{m+2}, \ldots, x_n\}$ are both sorted in ascending order.
3. X_1 is plotted on the x-axis, X_2 is plotted on the y-axis.
4. The 1:1 line defined by y=x is drawn and then the data points are placed on the Cartesian plane. The data points are plotted as (x_i, y_i), where $i = 1,2, \ldots, n$.
5. Trends are identified by looking at which side of the 1:1 line the data points fall on.

If $y_i > x_i$ then the points are above the 1:1 line and this indicates an increasing trend.
If $x_i > y_i$ then the points are below the 1:1 line and this indicates a decreasing trend.
If $y_i = x_i$ then the points are near the 1:1 line and there is no trend.

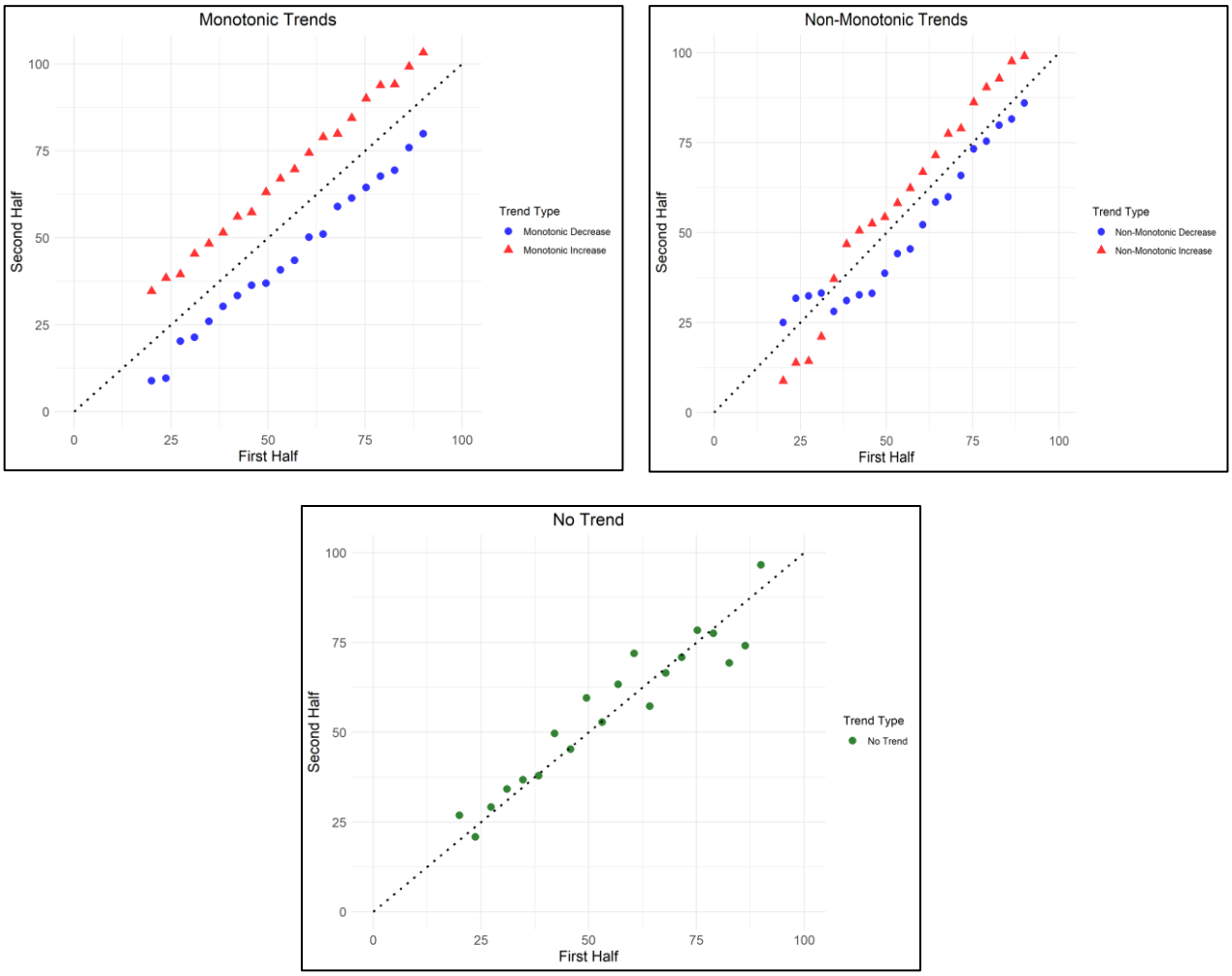


Figure 5: Trend options according to ITA (Şen, 2012)

3. Findings

3.1. Trend Analysis of Maritsa River Basin Precipitation Amount

The Mann-Kendall, Sens's slope estimator and Innovative Trend Analysis (ITA) methods are used to analyze monthly and annualannual precipitation trends in Maritsa River Basin area between 1982 and 2023. It is calculated as 685.80 kg/m^2/year is total annual precipitation for long-term period average by using CHIRPS spatial precipitation dataset (Figure 6).

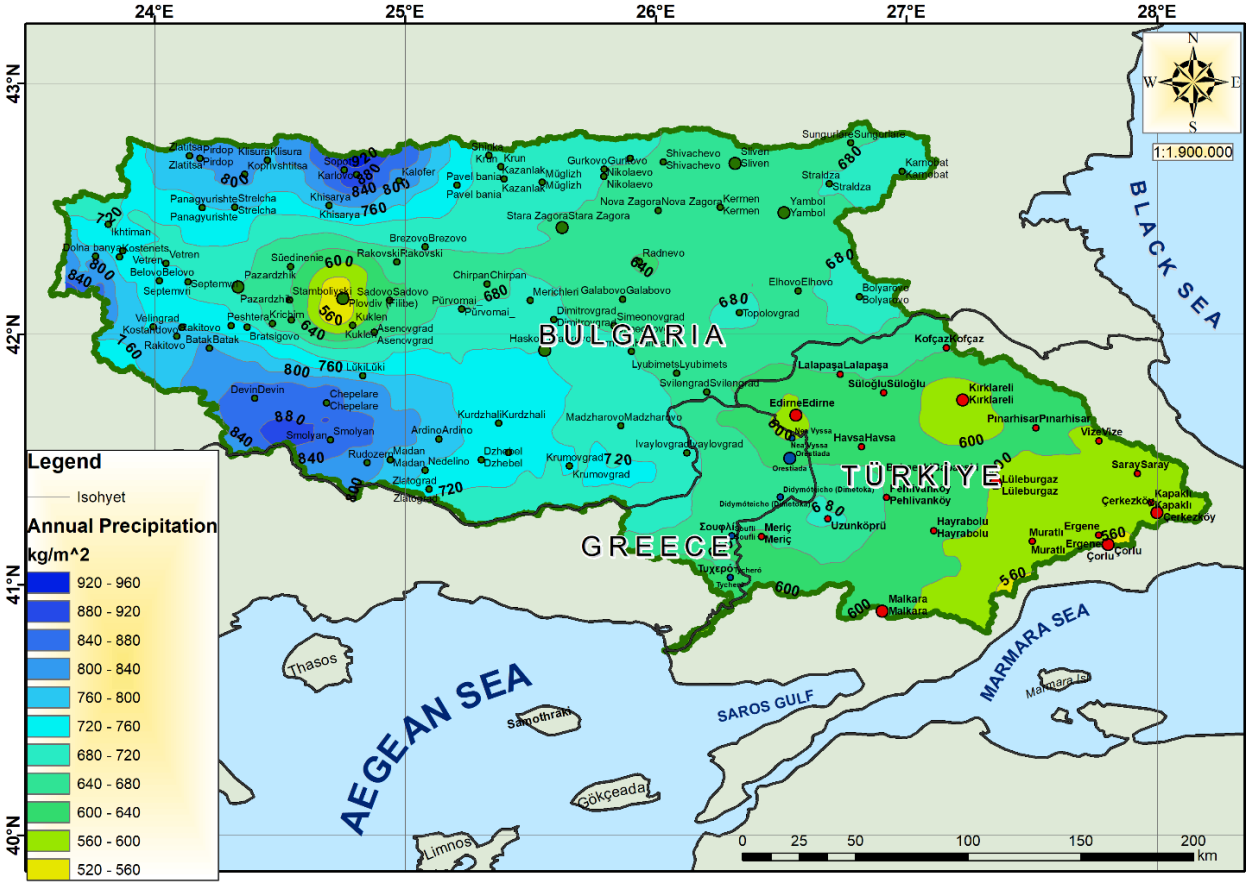


Figure 6: Spatial distribution of annual precipitation in Maritsa River Basin (Average of 1982-2023)

Similarly, but this time, according to the study conducted for Annual Evapotranspiration, the long-term average of the annual actual evapotranspiration amount is calculated as 629.78 kg/m^2/year by using ERA5-Land Evapotranspiration Dataset (Figure 7).

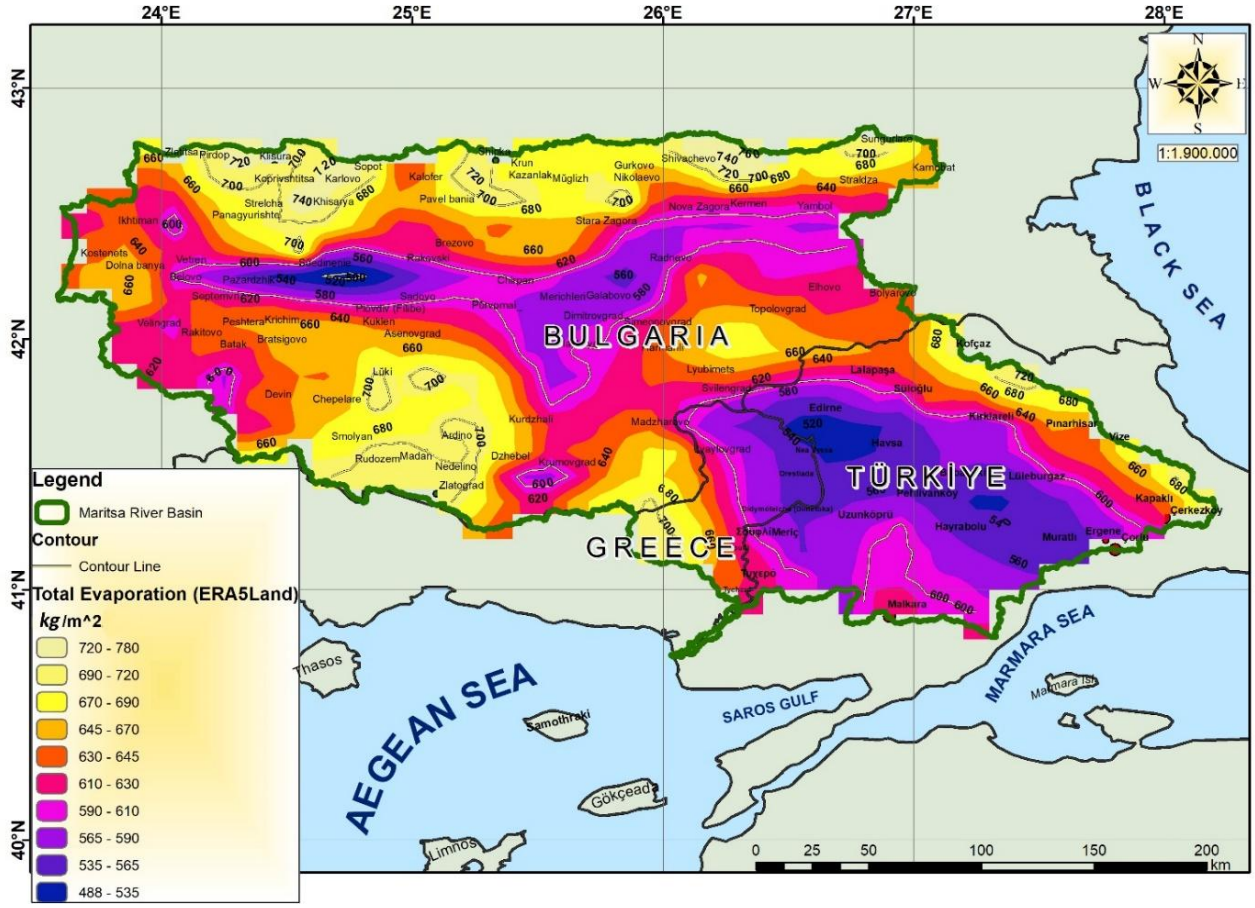


Figure 7: Spatial distribution of annual evapotranspiration in Marista River Basin (Average of 1982-2023)

3.1.1. Trend analysis of monthly precipitation data

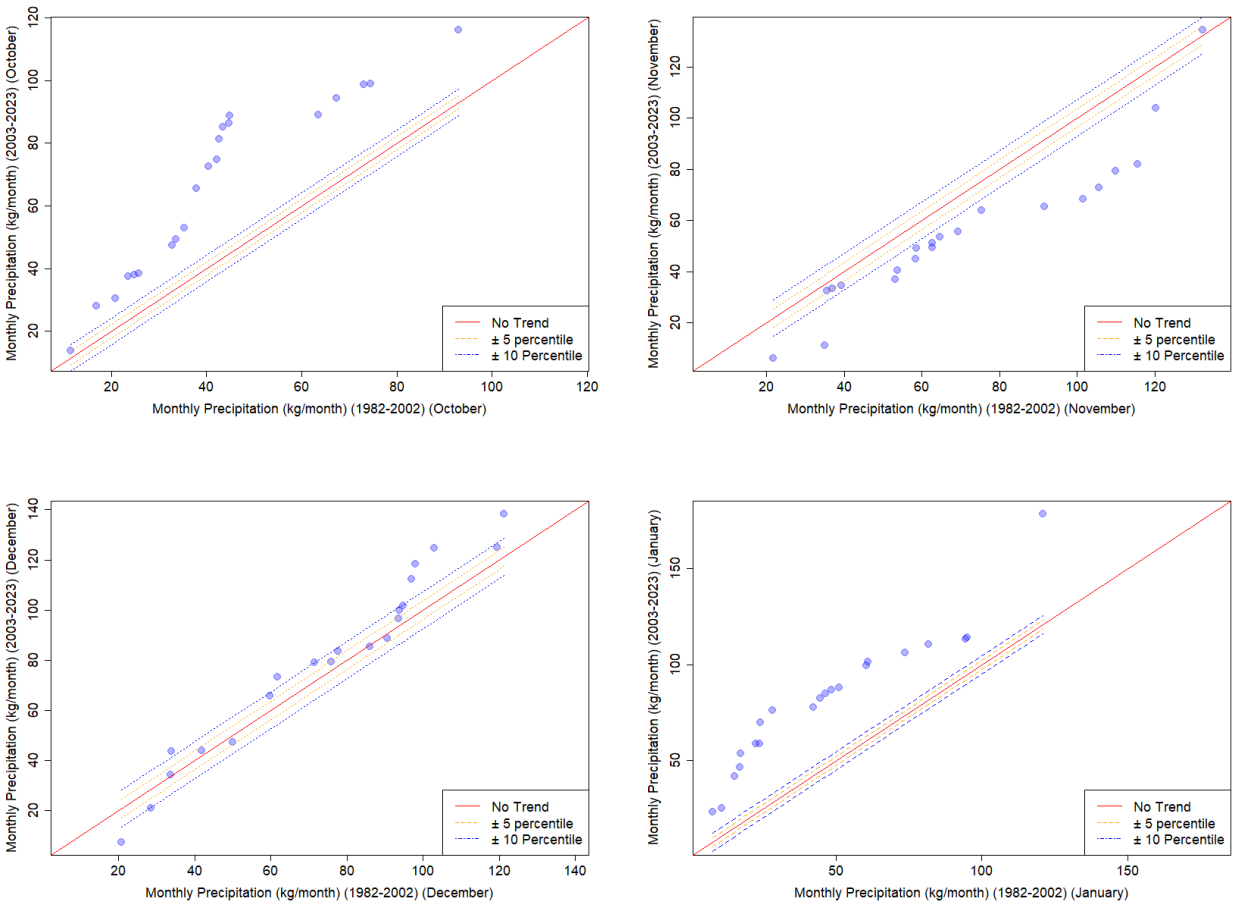
Table 6 shows the test results of Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests. In the Mann-Kendall test, the presence of a trend was evaluated at the 0.05 significance level (i.e. 95% confidence interval) to prevent false negative results due to the variability of precipitation data and seasonal fluctuations. In the trend analysis of monthly precipitation, a statistically significant increasing trend is observed in October, January, May and June. The trend is considered strong as the S value is high in these months. Although there is an increase in precipitation in December, February, March, April, July, and September, this is not statistically significant. There is a decrease in precipitation in November and August, but since the p value is greater than the significance level, the decreasing trend is not significant. In addition, since the S value is not very large, a slight decrease in precipitation is observed in August and November. When Tau values are examined, it shows that there is a moderate positive correlation in October and January, meaning that as one variable increases, the other also increases. Negative tau values in November and August indicate a weak negative correlation, meaning that as one variable increases, the other tends to decrease. Low Tau values in other months show weak or no monotonic correlation. According to these results, stronger positive trends are observed in winter months and weaker trends in summer months. For the months with statistically significant increasing trends, Sen's trend slope result shows an average monthly increase of 0.837 mm for October, 1.191 mm for January, 0.5 mm for May and 0.658 mm for June.

- **October:** A statistically significant increasing trend in precipitation is observed, with an average monthly increase of 0.837 mm according to Sen's slope estimator.
- **January:** There is a statistically significant increasing trend in precipitation, with an average increase of 1.191 mm per month. Also, the strongest trend increase is seen in this month.
- **May:** There is a statistically significant increasing trend in precipitation, with an average monthly increase of 0.5 mm.
- **June:** A statistically significant increasing trend in precipitation is present, with an average increase of 0.658 mm per month.
- **November:** Despite a decrease in precipitation, the trend is not statistically significant, as indicated by the p value being greater than the significance level.

Table 6: Mann-Kendall and Sen's slope trend test results for monthly precipitation

Period	Z value	*p* value	Sen's slope	S	Tau	Trend
October	2.298	0.022	0.837	213	0.247	↑
November	-1.344	0.179	-0.502	-125	-0.145	
December	0.650	0.516	0.293	61	0.071	
January	2.319	0.020	1.191	215	0.250	↑
February	0.975	0.329	0.337	91	0.106	
March	0.455	0.649	0.151	43	0.050	
April	1.105	0.269	0.270	103	0.120	
May	1.972	0.049	0.500	183	0.213	↑
June	2.406	0.016	0.658	223	0.259	↑
July	0.780	0.435	0.239	73	0.085	
August	-0.802	0.423	-0.184	-75	-0.087	
September	1.366	0.172	0.281	127	0.148	

For innovative trend analysis, monthly total precipitation data between 1982 and 2023 (42 years) are divided into two sub-series: the 1982–2002 period (first half) and the 2003–2023 period (second half). The graphical results obtained by applying the ITA method to the two sub-series obtained for the Maritsa Basin are presented in Figure 8. According to ITA results, while the points representing October, January, February, May, and June show a strong increasing trend because they appear to be far from the non-trend (1:1) line, it can be said that the point representing November also shows a strong decreasing trend. Additionally, as seen from the graph, an increasing trend is observed in July and September, although it is not strong. According to Mann-Kendall and Sens Slope results, December, March, April and August, which are some of the months with a statistically non-significant trend, are seen as no trend when examined with the ITA method. In addition, precipitation changes from an increasing trend to a no trend from June to August.



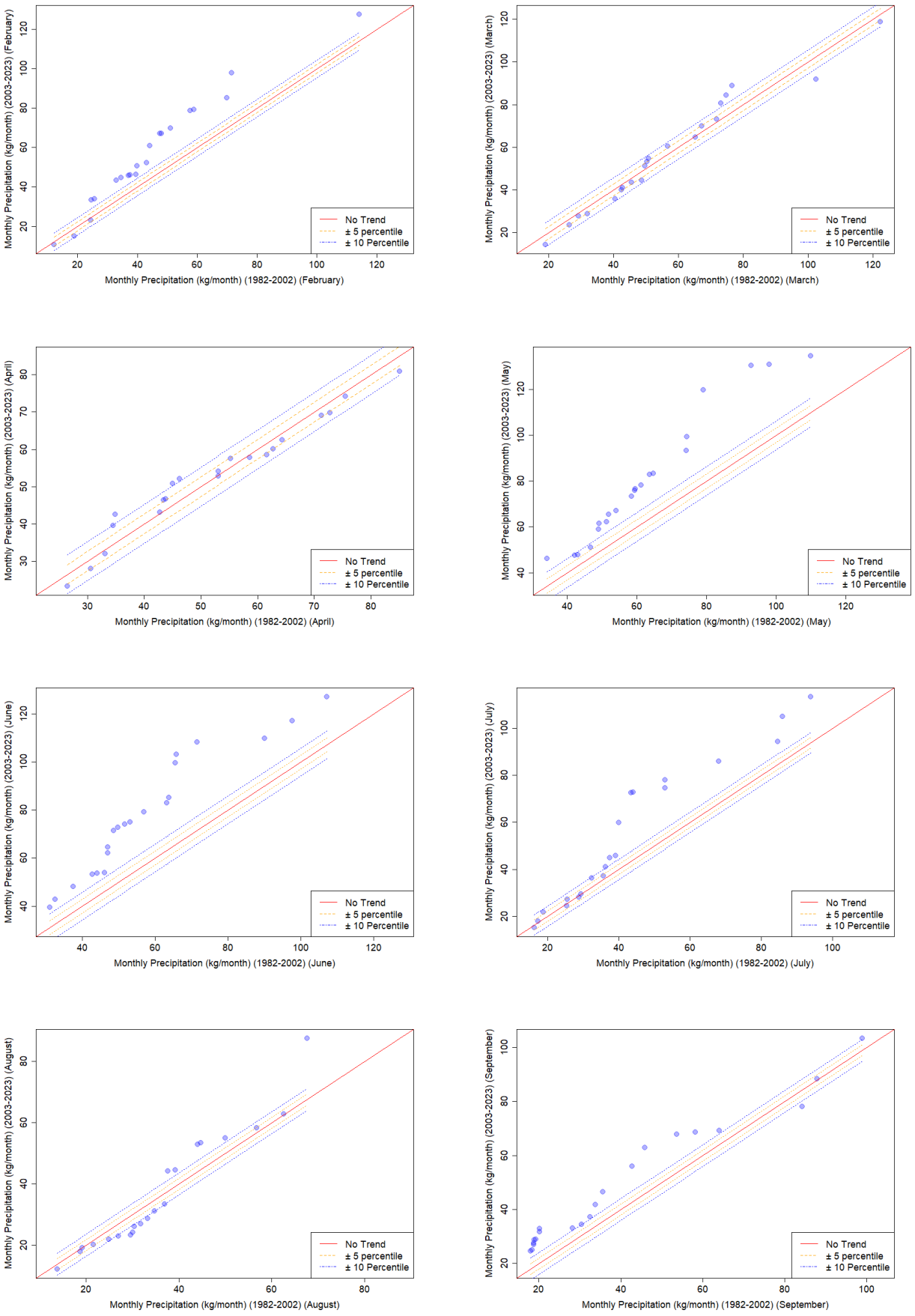


Figure 8: Results of ITA method for monthly precipitation

3.1.2. Trend analysis of water year annual precipitation data

Table 7 shows the test results of Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests for annual precipitation. According to the test results, a statistically significant increasing trend is observed within the 0.05 significance level. It was concluded that there was a statistically significant increase in precipitation amounts over time. The Tau value of 0.268 indicates a weak positive correlation between the variables in the annual data. With the Sen's Slope value, it is understood that the annual precipitation increases by approximately 3.8 mm per year.

Table 7: Mann-Kendall and Sen's slope trend test results for annual precipitation

Period	Z value	p value	Sen's slope	S	Tau	Trend
Annual	2.493	0.013	3.796	231	0.268	↑

When the innovative trend analysis result for annual total precipitation is examined in Figure 9, it is understood that there is a strong increase in precipitation values. Most of the precipitation is above the yellow dashed lines. This indicates that there is an increase beyond the 5% percentage deviation and that this increase is statistically significant, consistent with Mann-Kendall and Sen's slope estimator test results.

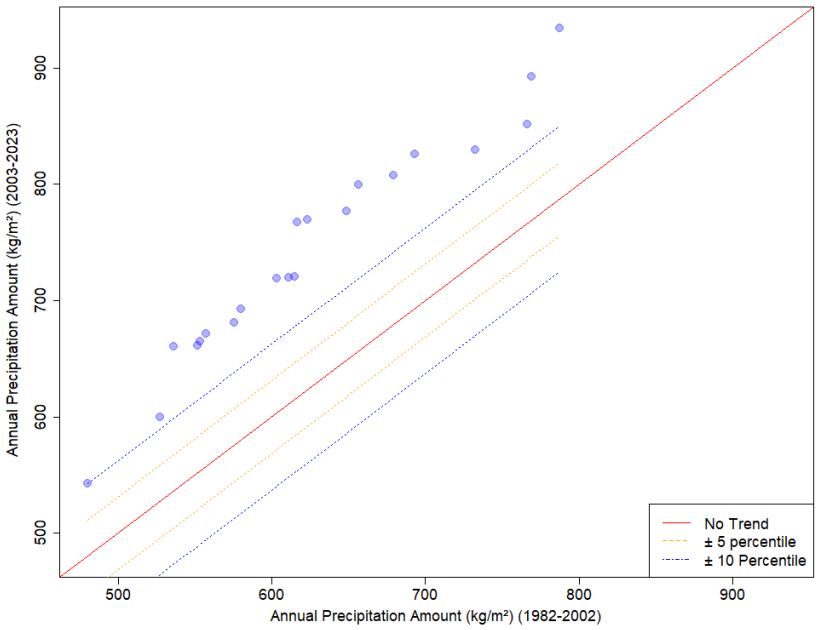


Figure 9: Results of ITA method for annual precipitation

3.2. Trend analysis of Maritsa River Basin Evapotranspiration Amount

The Mann-Kendall, Sens's slope estimator and Innovative Trend Analysis (ITA) methods were used to analyze monthly and water year annual evapotranspiration trends in Maritsa River Basin area between 1982 and 2023.

3.2.1. Trend analysis of monthly evapotranspiration data

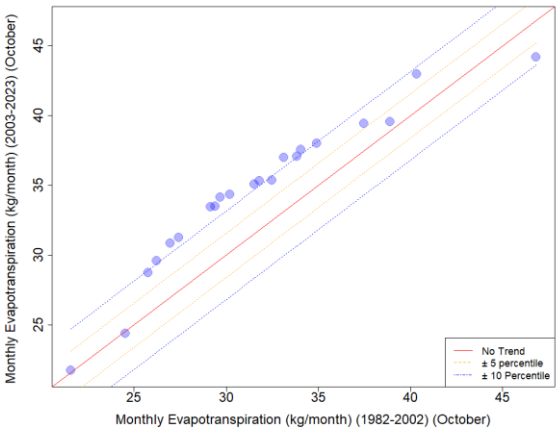
Table 8 shows the test results of Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests. In the Mann-Kendall test, the presence of a trend was evaluated at the 0.01 significance level (i.e. 99% confidence interval) to prevent false positive results since evapotranspiration data are more stable and less affected by seasonal effects. Statistically significant increasing trends are observed in December, February, March, April, May. All of this months show a strong increasing trend within the 0.01 significance interval. Although there is an increasing trend in October, November, January, June and July it is not statistically significant. There is no trend in August and September. Tau values for July, August and September are close to zero indicating weak to no correlation for these months, while August and September show negative correlations but are not statistically significant. Among the positive correlations in other months, February shows the strongest correlation with a value of 0.338. These values generally indicate a positive trend in evapotranspiration for most months, with stronger correlations in colder months.

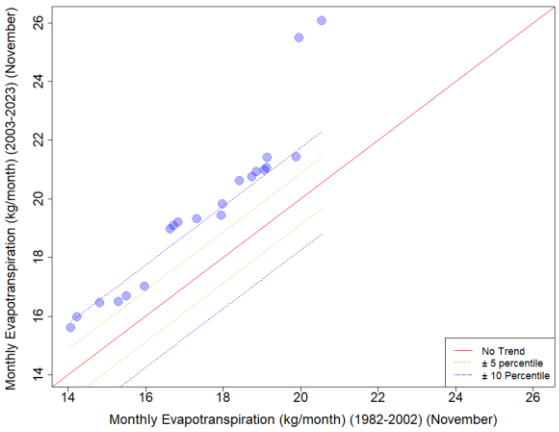
- **December:** There is a highly statistically significant increasing trend in evapotranspiration, with Sen's slope indicating an average increase of 0.095 mm per month.
- **February:** A highly statistically significant increasing trend in evapotranspiration is observed, with an average increase of 0.174 mm per month.
- **March:** There is a highly statistically significant increasing trend in evapotranspiration, with Sen's slope indicating an average increase of 0.276 mm per month. Additionally, the highest trend increase is seen this month.
- **April:** A highly statistically significant increasing trend in evapotranspiration is observed, with a monthly average increase of 0.237 mm according to Sen's slope.
- **May:** There is a highly statistically significant increasing trend in evapotranspiration, with a substantial monthly average increase of 0.272 mm as indicated by Sen's slope.

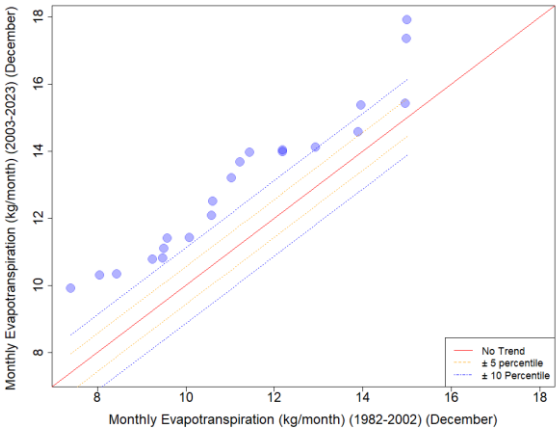
Table 8: Mann-Kendall and Sen's slope trend test results for monthly evapotranspiration

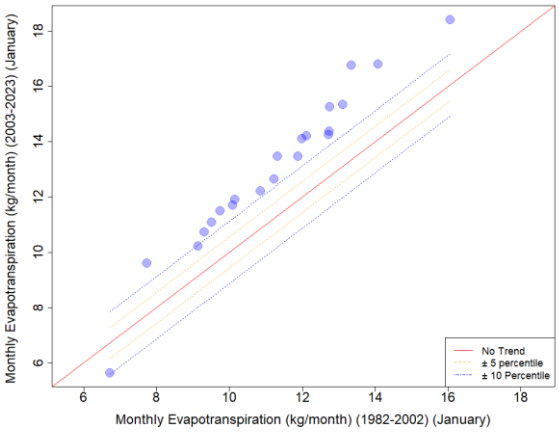
Period	Z value	p value	Sen's slope	S	Tau	Trend
October	1.604	0.109	0.132	149	0.173	
November	2.406	0.016	0.067	223	0.259	
December	2.861	0.004	0.095	265	0.308	⇑
January	2.146	0.032	0.077	199	0.231	
February	3.143	0.002	0.174	291	0.338	⇑
March	3.013	0.003	0.276	279	0.324	⇑
April	2.818	0.005	0.237	261	0.303	⇑
May	2.926	0.003	0.272	271	0.315	⇑
June	2.449	0.014	0.219	227	0.264	
July	0.585	0.558	0.075	55	0.064	
August	-0.108	0.914	-0.028	-11	-0.013	
September	-0.607	0.544	-0.059	-57	-0.066	

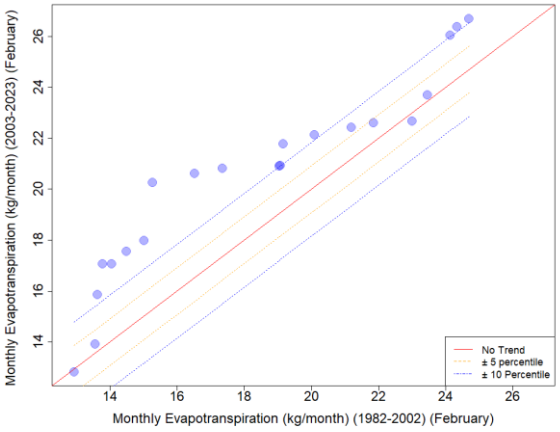
For innovative trend analysis, monthly total evapotranspiration data between 1982 and 2023 (42 years) are divided into two sub-series: the 1982–2002 period (first half) and the 2003–2023 period (second half). The graphical results obtained by applying the ITA method to the two sub-series obtained for the Maritsa River Basin are presented in Figure 10. When the graphics are examined, it is seen that there is a strong increasing trend in other months except June, July, August and September. Although an increasing trend is seen in June and July, there is no strong increase. There is no trend in August and a decreasing trend is seen in September, but there is no strong decrease. When compared with Mann Kendall and Sen's slope results, the non-significant increasing trend months of October, November and January are seen as strong increasing trends in ITA. Also, the non-significant decreasing trend month of August is seen as no trend with ITA. According to Mann Kendall, Sen's slope and ITA test results, the most significant increase is in February and March.

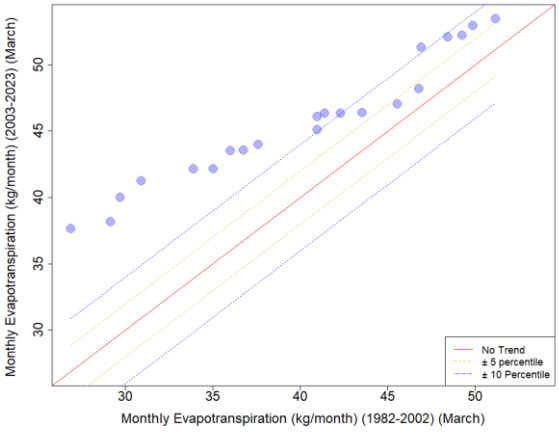

Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (October)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (October)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile


Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (November)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (November)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile


Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (December)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (December)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile


Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (January)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (January)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile


Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (February)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (February)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile


Monthly Evapotranspiration (kg/month) (2003-2023) (March)
Monthly Evapotranspiration (kg/month) (1982-2002) (March)
No Trend
± 5 percentile
± 10 Percentile

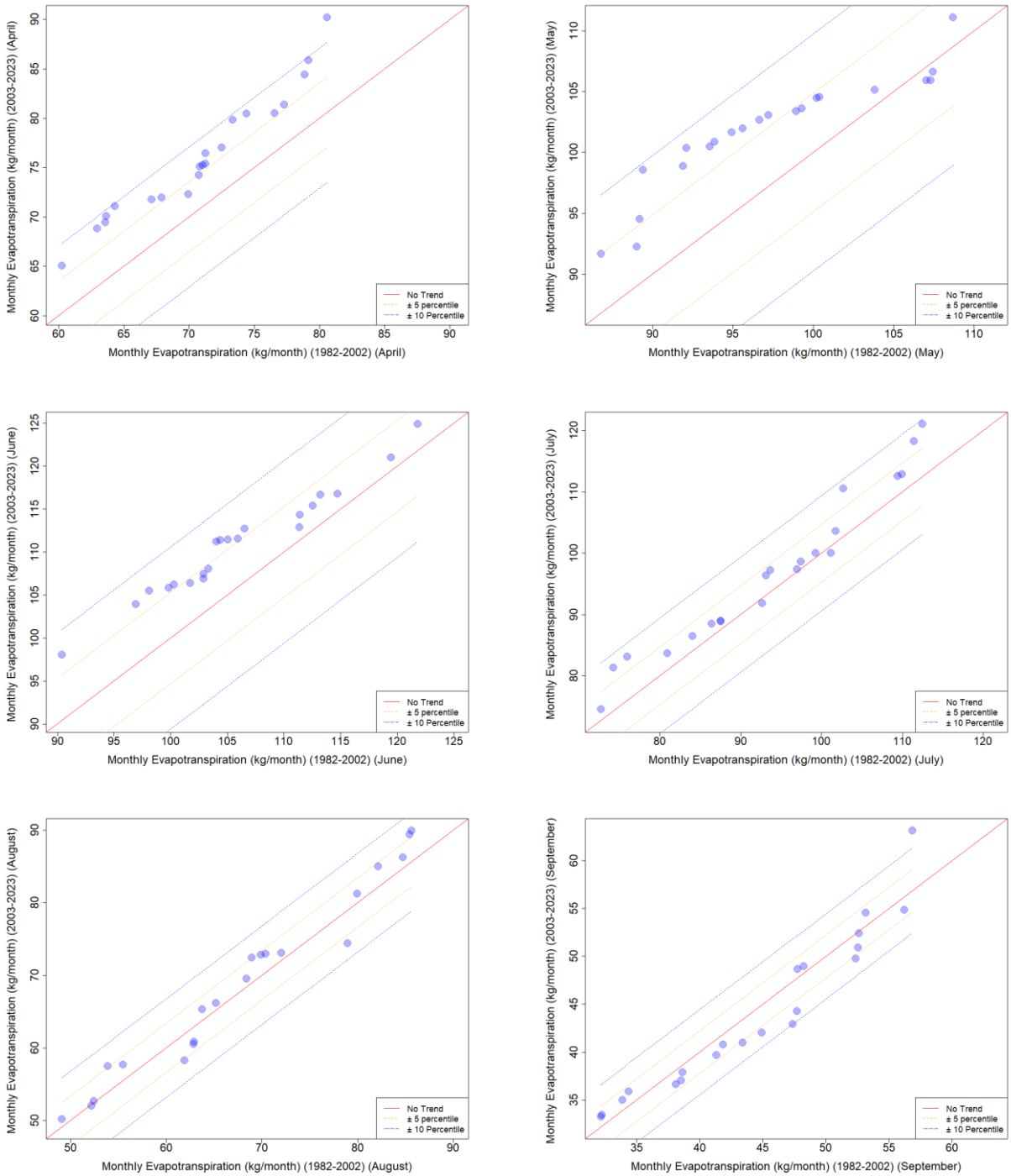


Figure 10: Results of ITA method for monthly evapotranspiration

3.2.2. Trend analysis of water year annual evapotranspiration data

Table 9 shows that there is a statistically significant increasing trend in annual evapotranspiration data at the 0.01 significance level. In addition, the ITA result in Figure 11 supports that evapotranspiration has a strong increasing trend. The Tau value of 0.324 for annual evapotranspiration indicates a moderate positive correlation. This indicates a statistically significant increasing trend in evapotranspiration throughout the year as confirmed by the positive Tau and p-value of 0.002. The annual amount of evapotranspiration increases by approximately 1.419 mm every year.

Table 9: Mann-Kendall and Sen's slope trend test results for annual evapotranspiration

Period	Z value	p value	Sen's slope	S	Tau	Trend
Annual	3.013	0.002	1.419	279	0.324	↑

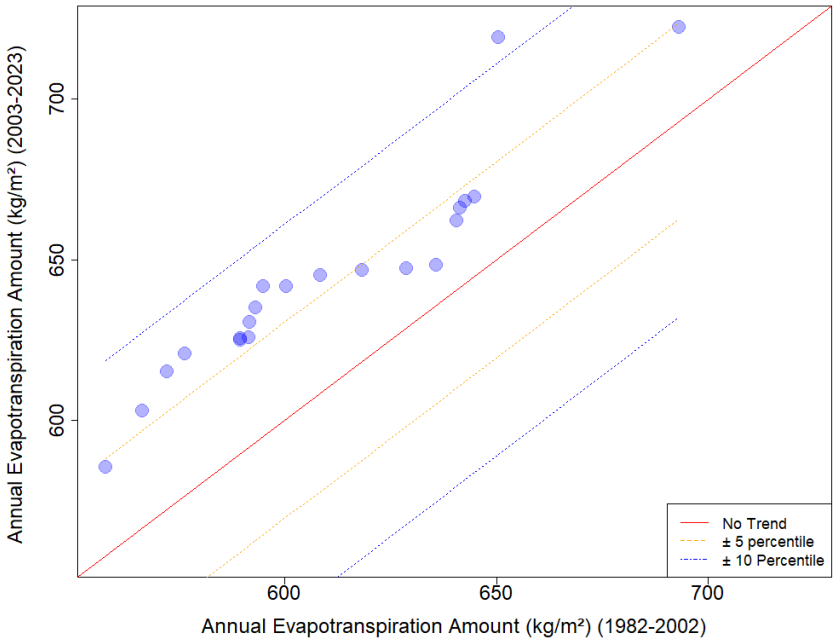


Figure 11: Results of ITA method for annual evapotranspiration

When the annual total precipitation values for the 1982-2023 water year for the Maritsa River Basin are examined (Figure 12), no specific increase or decrease trend is observed.

The year with the highest annual total evapotranspiration amount was 2014, and the year with the highest annual total precipitation amount was 2010. In addition, the year with the lowest annual total evapotranspiration was 1993, and the year with the lowest annual total precipitation was 1985.

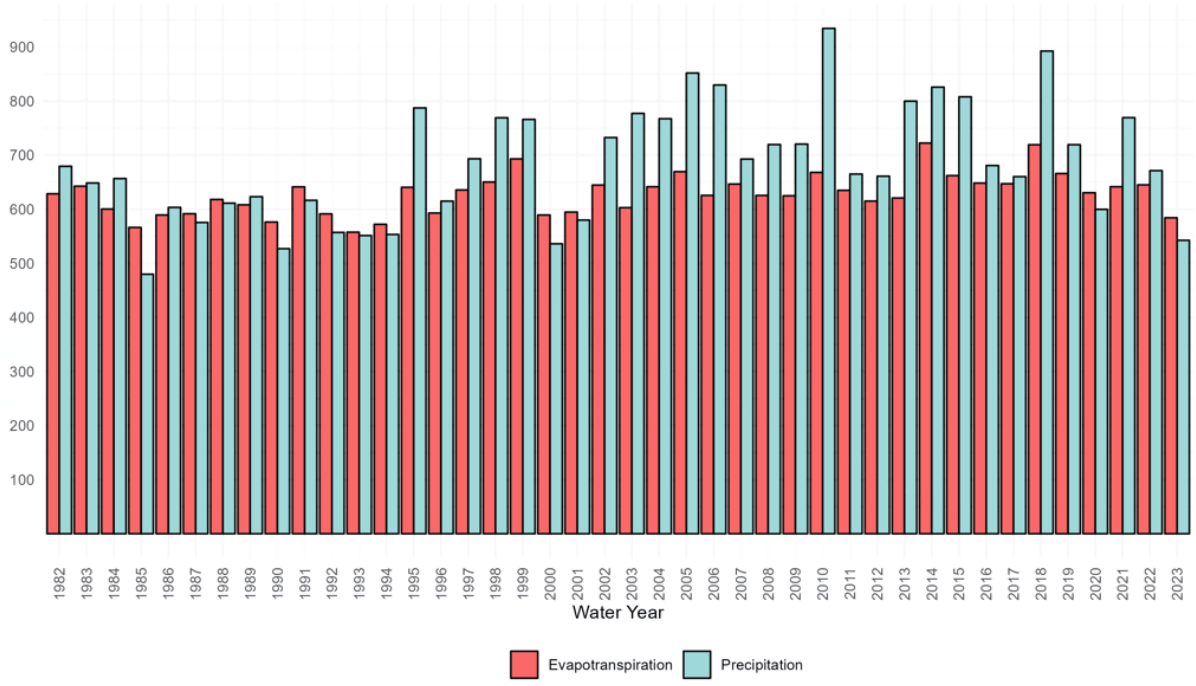


Figure 12: Annual evapotranspiration and precipitation between the water years of 1982-2023

4. Results and Discussion

In conclusion, this comprehensive analysis of long-term precipitation and evapotranspiration trends in the Maritsa River Basin has provided insights into the evolving hydrological patterns of this transboundary watershed. Using Mann-Kendall, Sen's slope estimator, and Innovative Trend Analysis (ITA) methods, the study detected significant increasing trends during the 1982-2023 water year for precipitation and evapotranspiration. These trends indicate an increase in the hydrological cycle of the region. The main conclusions from this study are:

- There is a statistically significant increasing trend in precipitation values in *October, January, May and June* at a 95% confidence interval.
- According to the annual precipitation trend test results, a statistically significant increasing trend is observed within the 0.05 significance level.
- There is an increase in evapotranspiration rates throughout most of the year except August and September. *December, February, March, April, and May* also show a strong increasing trend within the 0.01 significance interval.
- According to the annual evapotranspiration trend test results, a statistically significant increasing trend is observed within the 0.01 significance level.
- It is observed that the trend increase in precipitation is stronger than the trend increase in evapotranspiration.

These results are compatible with the precipitation and evapotranspiration trend results of some previous studies on the Maritsa River Basin and its surroundings.

In one of these studies (Touhedi et al., 2023), a trend analysis of precipitation values between 1975-2015 for seven regions of Türkiye was conducted using the Mann-Kendall (MK) test (Mann, 1945; Kendall, 1975), innovative trend analysis (ITA) (Şen, 2012), and ITA's improved visualization (IV-ITA) (Güçlü, 2020) methods. According to the results, a strong increasing trend was observed as a result of all tests conducted for the Marmara region, which includes the Maritsa River Basin.

Like the previous study (Hadi & Tombul, 2018), Mann-Kendall and Sen's slope tests were applied using precipitation values between 1901-2014 for seven regions in Türkiye. When the results were examined, an increasing trend was seen for the Marmara region.

In another study (Abbasnia & Toros, 2018) conducted for the Marmara region, it is mentioned that an increasing trend was observed when the Mann-Kendall test was applied to precipitation for the period 1961-2016.

As a result of the linear regression analysis of precipitation and evapotranspiration values for the years 1952-2021 in Edirne, a province of Türkiye, it was observed that evapotranspiration and total precipitation values decreased between 1952-1986 and increased between 1987-2021 (Aykut & Turoğlu, 2024).

In another study (Eroğlu, 2021), a trend analysis study was conducted for the Maritsa River Basin for the years 1965-2015 using the Mann-Kendall and Sen's slope method. As a result of this study, the general trend was found to be increasing in the period 1991-2015.

In another study (Erkal & Topgül, 2020), precipitation values between 1986-2016 for the lower Maritsa River Basin, the part of the basin in Türkiye, were tested with Mann-Kendall and Sen's slope. As a result of the tests, it was seen that there was an increasing trend in every season. Accordingly, it has been concluded that the form of floods has changed, and there has been a serious increase in floods.

In these and other studies, increasing precipitation trends indicate intense hydrological cycles caused by climatic changes. Increased precipitation contributes to surface and groundwater, but increased evapotranspiration can balance this increase. This negatively affects water resources management for the Maritsa River Basin. In addition, increasing evapotranspiration trends can change soil moisture levels, causing negative effects on agriculture and ecosystems. Increasing precipitation trends can reduce dependency on irrigation, but can also lead to floods.

The increasing trend in evapotranspiration indicates that cloudiness is decreasing. As cloudiness decreases, precipitation is expected to decrease, but increases in precipitation indicate heavy precipitation on a daily basis. In order to understand the long-term effects of the increase in evapotranspiration, climate indices should be examined in future studies. In addition, the effect of land use on evapotranspiration will be considered in another study, where its impact on the increase in evapotranspiration amounts will be examined.

The findings highlight the importance of continuous analysis to examine the effects of changing climate conditions. Sustainable water resource management is required to ensure the long-term availability and quality of water in the Maritsa River Basin. Because the water basin is transboundary, countries must take these trends into account and plan to reduce potential negative impacts on agriculture, ecosystems, and societies.

References

Abbasnia, M., & Toros, H. (2018). Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: A case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey.*Pure and Applied Geophysics,175*(10), 3861–3873. https://doi.org/10.1007/s00024-018-1888-8

Acar, E., Kankal, M., Akçay, F., & Şan, M. (2022). Innovative polygon trend analyses with star graph for rainfall and temperature data in agricultural regions of Turkey. *Environmental Earth Sciences, 81*(23), Article 530. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10646-9

Aksoy, H., Unal, N. E., Alexandrov, V., Dakova, S., & Yoon, J. (2008). Hydrometeorological analysis of northwestern Turkey with links to climate change. *International Journal of Climatology, 28*, 1047–1060. https://doi.org/10.1002/joc.1599

Aksu, H., & Arikan, A. (2017). Satellite-based estimation of actual evapotranspiration in the Buyuk Menderes Basin, Turkey. *Hydrology Research, 48*(2), 559–570. https://doi.org/10.2166/nh.2016.226

Alexander, L. V., et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research, 111*, Article D05109. https://doi.org/10.1029/2005JD006290

Ali, Z., Iqbal, M., Khan, I.U., Masood, M.U., Umer, M., Lodhi, M.U.K., & Tariq, M.A.R. (2023). Hydrological response under CMIP6 climate projection in Astore River Basin, Pakistan. *Journal of Mountain Science, 20*, 2263–2281. https://doi.org/10.1007/s11629-022-7872-x

Al-Shamayleh, S., Tan, M. L., Samat, N., Rahbeh, M., & Zhang, F. (2024). Performance of CHIRPS for estimating precipitation extremes in the Wala Basin, Jordan. *Journal of Water and Climate Change, 15*(3), 1349–1363. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.611

Ashraf, M. S., Shahid, M., Waseem, M., Azam, M., & Rahman, K. U. (2023). Assessment of variability in hydrological droughts using the improved innovative trend analysis method. *Sustainability, 15*, Article 9065. https://doi.org/10.3390/su15119065

Aykut, T., & Turoğlu, H. (2024). Effects of climate change on streamflow in NE Edirne (NW Türkiye): Implications for sustainable hydrological development. *Sustainable Water Resources Management, 10*, Article 2. https://doi.org/10.1007/s40899-023-00985-1

Bağdatlı, M. C., & Arıkan, E. N. (2020). Evaluation of maximum and total open surface evaporation by using trend analysis method in Nigde Province of Turkey. *International Journal of Geography and Regional Planning, 6*(1), 138–145.

Birpınar, M. E., Kızılöz, B., & Şişman, E. (2023). Classic trend analysis methods' paradoxical results and innovative trend analysis methodology with percentile ranges. *Theoretical and Applied Climatology, 153*, 1–18. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04449-6

Boudiaf, B., Şen, Z., & Boutaghane, H. (2022). North coast Algerian rainfall monthly trend analysis using innovative polygon trend analysis (IPTA). *Arabian Journal of Geosciences, 15*, Article 1626. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10907-8

Chowdari, K., Deb Barma, S., Bhat, N., Girisha, R., Gouda, K. C., & Mahesha, A. (2023). Trends of seasonal and annual rainfall of semi-arid districts of Karnataka, India: Application of innovative trend analysis approach. *Theoretical and Applied Climatology, 152*, 241–264. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04400-9

D'Oria, M., Cozzi, C., & Tanda, M. G. (2018). Future precipitation and temperature changes over the Taro, Parma and Enza River basins in Northern Italy. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2018*(Special Issue), 49–63. https://doi.org/10.4408/IJEGE.2018-01.S-05

DSI Edirne Regional Directorate. (2010). *Archive of DSI Edirne Regional Directorate*. Retrieved July 1, 2024, from https://bolge11.dsi.gov.tr/

Erkal, T., & Topgül, İ. (2020). Aşağı Meriç Nehri akımlarının mevsimsel ve yıllık değişiminin taşkınlar üzerine etkisi. *Türk Coğrafya Dergisi, 74*, 33–38. https://doi.org/10.17211/tcd.645865

Eroğlu, İ. (2021). Meriç Nehri Havzası'nda sıcaklık ve yağış değerlerinin dönemsel trend analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23*, 750–760. https://doi.org/10.31590/ejosat.882937

Esit, M., Yuce, M. I., Deger, I. H., & Yaşa, İ. (2024). Trend and variability analysis in rainfall and temperature records over Van Province, Türkiye. *Theoretical and Applied Climatology, 155*, 451–472. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04644-5

Faquseh, H., & Grossi, G. (2024). Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustainable Water Resources Management, 10*, Article 18. https://doi.org/10.1007/s40899-023-00992-2

Felix, M. L., Kim, Y.-k., Choi, M., Kim, J.-C., Do, X. K., Nguyen, T. H., & Jung, K. (2021). Detailed trend analysis of extreme climate indices in the Upper Geum River Basin. *Water, 13*, Article 3171. https://doi.org/10.3390/w13223171

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*(1), Article 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research, 19*(3), 193–212. https://doi.org/10.3354/cr019193

General Directorate of State Hydraulic Works. (2020, December 23). *Hamzadere barajı sulaması ile 131 bin 570 dekar tarım arazisi sulamaya hazır hale getirildi*. Retrieved July 1, 2024, from https://dsi.gov.tr/Haber/Detay/989

Gopakkali, P., Sridhara, S., Kashyap, G. R., & Manoj, K. N. (2023). Trend detection of annual precipitation of Karnataka, India during 1951–2020 based on the innovative trend analysis method. *Environmental Earth Sciences, 82*, Article 551. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11239-w

Güçlü, Y. S. (2020). Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA. *Journal of Hydrology, 584*, Article 124674. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124674

Gulahmadov, N., Chen, Y., Gulakhmadov, M., Satti, Z., Naveed, M., Davlyatov, R., Ali, S., & Gulakhmadov, A. (2023). Assessment of temperature, precipitation, and snow cover at different altitudes of the Varzob River Basin in Tajikistan. *Applied Sciences, 13*(9), Article 5583. https://doi.org/10.3390/app13095583

Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Long-term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey. *Meteorological Applications, 25*, 445–455. https://doi.org/10.1002/met.1712

Hoerling, M., Eischeid, J., & Perlwitz, J. (2010). Regional precipitation trends: Distinguishing natural variability from anthropogenic forcing. *Journal of Climate, 23*(8), 2131–2145. https://doi.org/10.1175/2009JCLI3420.1

Hussain, F., Ceribasi, G., Ceyhunlu, A. I., Wu, R. S., Cheema, M. J. M., Noor, R. S., Anjum, M. N., Azam, M., & Afzal, A. (2022). Analysis of temperature data using the innovative trend pivot analysis method and trend polygon star concept: A case study of Soan River Basin, Potohar, Pakistan. *Pure and Applied Geophysics, 180*, 475–507. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03203-9

Iqbal, J., Khan, N., Shahid, S., & Ullah, S. (2024). Evaluation of gridded dataset in estimating extreme precipitations indices in Pakistan. *Acta Geophysica, 72*, 4597–4612 https://doi.org/10.1007/s11600-024-01286-7

Ipsala Kaymakamlığı. (n.d). *İpsala pirinci sofralarda bir'inci*. Retrieved May 8, 2024, from http://www.ipsala.gov.tr/ipsala-pirinci-sofralarda-birinci

Kant, C., Kumar, A., & Meena, R. S. (2024). Exploring climate variables and drought patterns: A comprehensive trend analysis and evaluation of Beas Basin in Western Himalaya. *Earth Systems and Environment, 8*, 449–464. https://doi.org/10.1007/s41748-024-00376-2

Karacosta, P., Pakalidou, N., Douka, M., & Karacostas, T. (2023). Innovative Polygon Trend Analysis (IPTA): A case study for precipitation in Thessaloniki during the last 50 years (1971–2020). *Environmental Science Proceedings, 26*, Article 161. https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026161

Katipoğlu, O. M. (2022). Analyzing the trend and change point in various meteorological variables in Bursa with various statistical and graphical methods. *Theoretical and Applied Climatology, 150*, 1295–1320. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04231-0

Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika, 30*(1-2), 81–93. https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.81

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Oxford University Press.

Kesgin, E., Yaldız, S. G., & Güçlü, Y. S. (2024). Spatiotemporal variability and trends of droughts in the Mediterranean coastal region of Türkiye. *International Journal of Climatology, 44*(4), 1036–1057. https://doi.org/10.1002/joc.8370

Kliengchuay, W., Mingkhwan, R., Kiangkoo, N., Suwanmanee S., Sahanavin, N., Kongpran, J., Aung, H. W., & Tantrakarnapa, K. (2024). Analyzing temperature, humidity, and precipitation trends in six regions of Thailand using innovative trend analysis. *Scientific Reports, 14*(1), Article 7800. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57980-5

Korkmaz, M. S. (2019). Trakya Bölgesi'nin yüzey suyu potansiyeli. In F. Konukçu, S. Albut, & B. Altürk (Eds.), *TR21 Trakya Bölgesinde İklim Değişikliğinin Etkileri ve Uyum Stratejileri* (pp. 73–87). Tekirdağ Belediyesi & Namık Kemal Üniversitesi.

Koubodana, H. D., Adounkpe, J., Tall, M., Amoussou ,E., Atchonouglo, K., & Mumtaz, M. (2020). Trend analysis of hydro-climatic historical data and future scenarios of climate extreme indices over Mono River Basin in West Africa. *American Journal of Rural Development, 8*(1), 37–52. https://doi.org/10.12691/ajrd-8-1-5

Koycegiz, C., & Buyukyildiz, M. (2024). Applications of innovative polygon trend analysis (IPTA) and trend polygon star concept (TPSC) methods for the variability of precipitation in Konya Closed Basin (Turkey). *Theoretical and Applied Climatology, 155*, 2641–2656. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04765-x

Larbi, I., Hountondji, F. C. C., Annor, T., Agyare, W. A., Gathenya, J. M., & Amuzu, J. (2018). Spatio-temporal trend analysis of rainfall and temperature extremes in the Vea Catchment, Ghana. *Climate, 6(*4), Article 87. https://doi.org/10.3390/cli6040087

Liu, Y., & Yang, Y. (2022). Detecting a declining trend of multidepth soil moisture over the Mongolian Plateau from 1950 to 2020 using ERA5-Land reanalysis datasets. *IEEE Access, 10*, 1234–1245. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.1234567

Malkaralı, S., Korkmaz, M. S., & Sezen, N. (2008, June 19–20). *Meriç Nehri taşkınları ve taşkınlar için geliştirilen uluslararası projeler* [Conference presentation]. 5. Dünya Su Formu Türkiye Bölgesel Su Toplantıları Taşkın Konferansı, Edirne, Türkiye.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, 13*, 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

Massei, N., Kingston, D. G., Hannah, D. M., Vidal, J.-P., Dieppois, B., Fossa, M., Hartmann, A., Lavers, D. A., & Laignel, B. (2020). Understanding and predicting large-scale hydrological variability in a changing environment. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 383*, 141–149. https://doi.org/10.5194/piahs-383-141-2020

Medina, F. D., Zossi, B. S., Bossolasco, A., & Elias, A. G. (2023). Performance of CHIRPS dataset for monthly and annual rainfall indices in Northern Argentina. *Atmospheric Research, 283*, 106545. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106545.

Mohammed, J. A. (2024). Trend analysis of the extreme rainfall indices from Lake Tana Sub-Basin of the Upper Blue Nile, Ethiopia. *Natural Hazards Research*. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.005

Muia, M. V. K., Opere, A. O., Ndunda, E., & Amwata, D. A. (2024). Rainfall and temperature trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in Makueni County, Kenya. *Journal of Materials and Environmental Science, 15*(3), 349–367.

Nacar, S., Şan, M., Kankal, M., & Şan, M., Okkan, U. (2024). Trends and amount changes of temperature and precipitation under future projections in high–low groups and intra-period for the Eastern Black Sea, the wettest basin in Türkiye. *Natural Hazards*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06588-z

NASA Science. (2024). *Evidence*. Retrieved May 8, 2024, from https://science.nasa.gov/climate-change/evidence/

Rahaman, M. H., Saha, T. K., Masroor, M., Roshani, & Sajjad, H. (2024). Trend analysis and forecasting of meteorological variables in the lower Thoubal river watershed, India using non-parametrical approach and machine learning models. *Modeling Earth Systems and Environment, 10*, 551–577. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01799-y

Rani, S., Singh, J., Singh, S., Singh, S., Tiwari, P., & Mal, S. (2023). Decadal trends in precipitable water vapor over the Indus River Basin using ERA5 reanalysis data. *Journal of Mountain Science, 20*(11), 2928–2945. https://doi.org/10.1007/s11629-023-8112-8

Sa'adi, Z., Yaseen, Z. M., Farooque, A. A., Mohamad, N. A., Muhammad, M. K. I., & Iqbal, Z. (2023). Long-term trend analysis of extreme climate in Sarawak tropical peatland under the influence of climate change. *Weather and Climate Extremes, 40*, Article 100554. https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100554

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association, 63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Serencam, U. (2019). Innovative trend analysis of total annual rainfall and temperature variability case study: Yesilirmak region, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences, 12*(21), Article 704. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4903-1

Shah, L., Arnillas, C. A., & Arhonditsis, G. B. (2022). Characterizing temporal trends of meteorological extremes in Southern and Central Ontario, Canada. *Weather and Climate Extremes, 35*, Article 100411. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100411

Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering, 17*, 1042–1046. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556

Şen, Z. (2014). Trend identification simulation and application. *Journal of Hydrologic Engineering, 19*, 635–642. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000811

Şen, Z., & Şişman, E. (2024). Risk attachment Sen's Slope calculation in hydrometeorological trend analysis. *Natural Hazards, 120*, 3239–3252. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06329-8

Titkova, T. B., Zolotokrylin, A. N., & Cherenkova, E. A. (2023). Current climatic trends in evaporation and soil moisture changes in the south of European Russia. *Arid Ecosystems, 13*(3), 239–247. https://doi.org/10.1134/S2079096123030150

Touhedi, H., Kankal, M., & Yıldız, M. B. (2023). Trend analysis of maximum rainfall series of standard durations in Turkey with innovative methods. *Natural Hazards, 119*, 1479–1511. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06085-9

World Climate Research Programme. (n.d.). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP).* Retrieved May 8, 2024, from https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip

Yang, P., Zhang, Y., Li, J., Xia, J., Huang, H., & Zhu, Y. (2023). Characterization of precipitation and temperature equilibrium and its driving forces in the Yangtze river basin under climate change. *Climate Dynamics, 61*(11), 5861–5873. https://doi.org/10.1007/s00382-023-06888-3

Zhu, Y., Luo, P., Zhang, S., & Sun, B. (2020). Spatiotemporal analysis of hydrological variations and their impacts on vegetation in semiarid areas from multiple satellite data. *Remote Sensing*, *12*(24), Article 4177. https://doi.org/10.3390/rs12244177

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 290-317, DOI: 10.21324/dacd.1585197

3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin İncelenmesi

İbrahim Uykun[1,*], Mutluhan Akın[2], Ogün Ozan Varol[3]

[1]*Şırnak İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Jeoloji Yüksek Mühendisi, 73000, Şırnak.*
[2]*Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir.*
[3]*Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 65080, Van.*

Özet

Türkiye, jeolojik, jeomorfolojik ve iklim özellikleri nedeniyle bulunduğu coğrafyada doğal afetler sık yaşanmakta ve bu afetler arasında kaya düşmeleri, ülkenin pek çok bölgesinde ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Kaya düşme modelleme çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanılan normal (R_n) ve tanjant (R_t) arazi geri verme katsayıları, blokların kinetik enerjisi ve hızıyla birlikte yuvarlanma mesafelerini belirleyen temel parametrelerdir. Bu katsayılar, kaya düşme analizlerinde bloğun yamaç yüzeyine çarpma esnasındaki enerji ve hız kayıplarını belirler, böylece modelde bloğun nasıl bir yörünge ve hareket dinamiği izleyeceğini ortaya koymaktadır. Geri verme katsayıları, arazi deneyleri (blok düşürme) veya kaya düşmelerinin yaşandığı sahalardaki daha önce düşen blokların konumları üzerinden geriye dönük analizlerle belirlenebilmekte veya arazi deneyleri ve geriye dönük analizlerin uygulanamadığı alanlarda, benzer litolojilere sahip veya yakın bölgeler için daha önceki bilimsel çalışmalarda kullanılan verilerden yararlanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, kaya düşme modellemelerinde yapılan analizlerde farklı yöntemler kullanılarak belirlenebilen ve analizler için önemli bir parametre olan arazi geri verme katsayılarının (R_n ve R_t) yuvarlanma hattı, sıçrama yüksekliği, kinetik enerji ve yanal saçılım gibi unsurlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, gerçek bir sayısal yüzey modeli kullanılarak 3-boyutlu kaya düşme simülasyonları gerçekleştirilmiş ve yapılan analizlerde R_n ve R_t katsayılarının değerleri belirli sınırlar arasında değiştirilerek parametreler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, R_n ve R_t arazi geri verme katsayılarındaki değişimlerin tüm parametrelerde farklı oranlarda değişikliğe neden olduğu ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile R_t katsayısının R_n katsayısına kıyasla parametreler üzerinde daha etkili olduğu veri setleri ve dağılım grafikleri ile ortaya konmuştur. R_t katsayısının değerinin artması ile özellikle 0,5 değerinden itibaren yuvarlanma mesafesi ve yanal saçılımlar da önemli değişiklikler belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Kaya Düşmesi, Geri Verme Katsayısı, Kinetik Enerji, Sıçrama Yüksekliği, Yuvarlanma Mesafesi

Investigation of the Effect of Restitution Coefficient on 3-Dimensional Rockfall Analyses

Abstract

Due to its geological, geomorphological and climatic characteristics, Türkiye frequently experiences natural disasters, among which rockfalls pose significant risks, causing considerable loss of life and property in many regions of the country. In rockfall modeling studies, the normal restitution coefficient (R_n) and tangential restitution coefficient (R_t) are key input parameters that, along with the blocks' kinetic energy and velocity, determine their runout distances. These coefficients govern the energy and velocity losses of a block upon impact with the slope surface, thereby influencing the trajectory and movement dynamics of the block within the model. Restitution coefficients can be derived from field tests (such as block drop tests), back analyses based on the positions of previously fallen blocks in areas where rockfalls have occurred, or from data used in prior scientific studies for regions with similar lithological characteristics when field tests or back analyses cannot be applied. This study examines the effects of terrain restitution coefficients (R_n and R_t), which can be determined using various methods in rockfall modeling analyses, on factors such as runout paths, bounce heights, kinetic energy, and lateral dispersion. Three-dimensional rockfall simulations were conducted using a real digital surface model, and in the analyses, the values of R_n and R_t were varied within specific ranges to observe their impact on the parameters. The results revealed that changes in the values of R_n and R_t caused varying degrees of change across all parameters. Comparative analysis demonstrated that the R_t coefficient had a more pronounced effect on the parameters compared to the R_n coefficient, as supported by datasets and distribution graphs. It was also observed that an increase in the R_t coefficient, especially from values of 0.5 and above, led to significant changes in runout distances and lateral dispersions.

Keywords

Rockfall, Restitution Coefficient, Kinetic Energy, Bounce Height, Runout Distance

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (486) 2161534 Faks: +90 (486) 2161991
E-posta: ibrhmuykn50@gmail.com (Uykun İ.), mutluhanakin@nevsehir.edu.tr (Akın M.), ogunozanvarol@yyu.edu.tr (Varol O.O.)

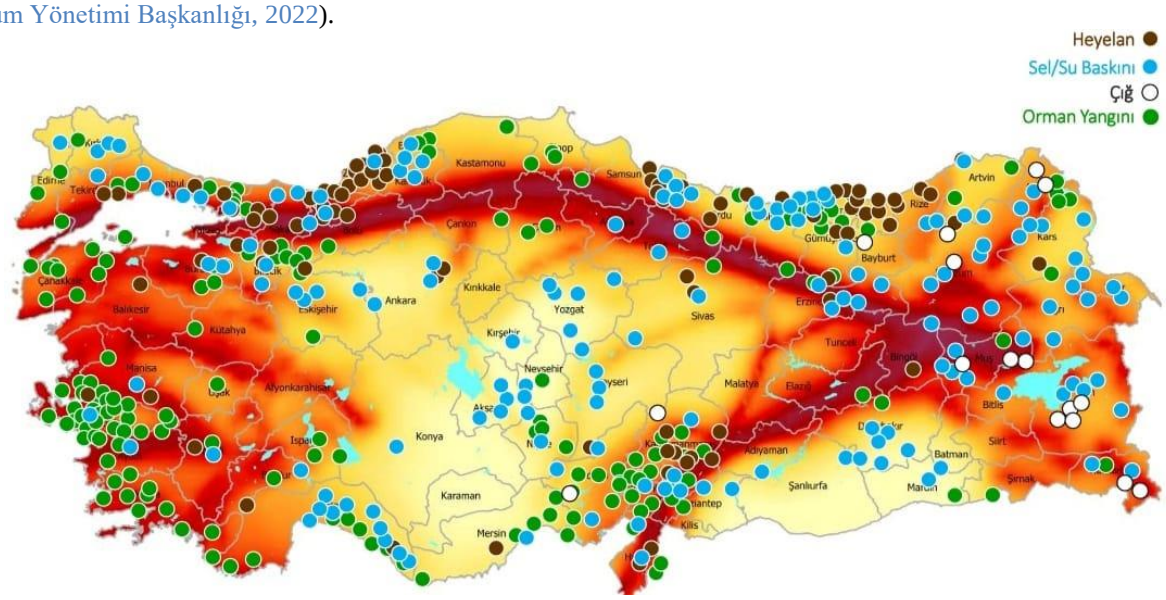
Gönderim Tarihi / Received : 14/11/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 15/01/2025

1. Giriş

Kaya düşmesi, yamaç veya şevlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca çeşitli iç ve dış etkenlerin etkisiyle kopan kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle topoğrafik eğim boyunca oldukça ani ve hızlı hareketi olarak tanımlanmaktadır (Varnes, 1978; Lambert & Nicot, 2011). Kaya düşmeleri, dik yamaçlarda, şevlerde ve açık maden ocaklarında meydana gelen; karayolu, demiryolu gibi çizgisel yapıların yanı sıra yamaç kenarlarına kurulmuş yerleşim yerlerinde yaşayanlara zarar verebilen bir doğal afettir (Volkwein vd., 2011). Kaya düşmeleri ani ve hızlı gerçekleşmesinden dolayı kestirilmesi zor bir duraysızlık türüdür. Kaya düşmelerine etki eden çok sayıda faktör mevcut olup, jeolojik ve morfolojik yapı, süreksizlik, ayrışma, deprem dalgaları vb. unsurlar kaya düşmelerinin gelişiminde önemli rol oynamaktadır (Ritchie, 1963). Bu faktörler, yapısal faktörler (yamacın jeolojik yapısı, süreksizlik takımları vb.), çevresel faktörler (yağmur, donma-çözülme, farklı ayrışma vb.) ve antropojenik faktörler (kontrolsüz patlatma uygulamaları, uygun olamayan şev tasarımı vb.) olarak üçe ayrılmaktadır.

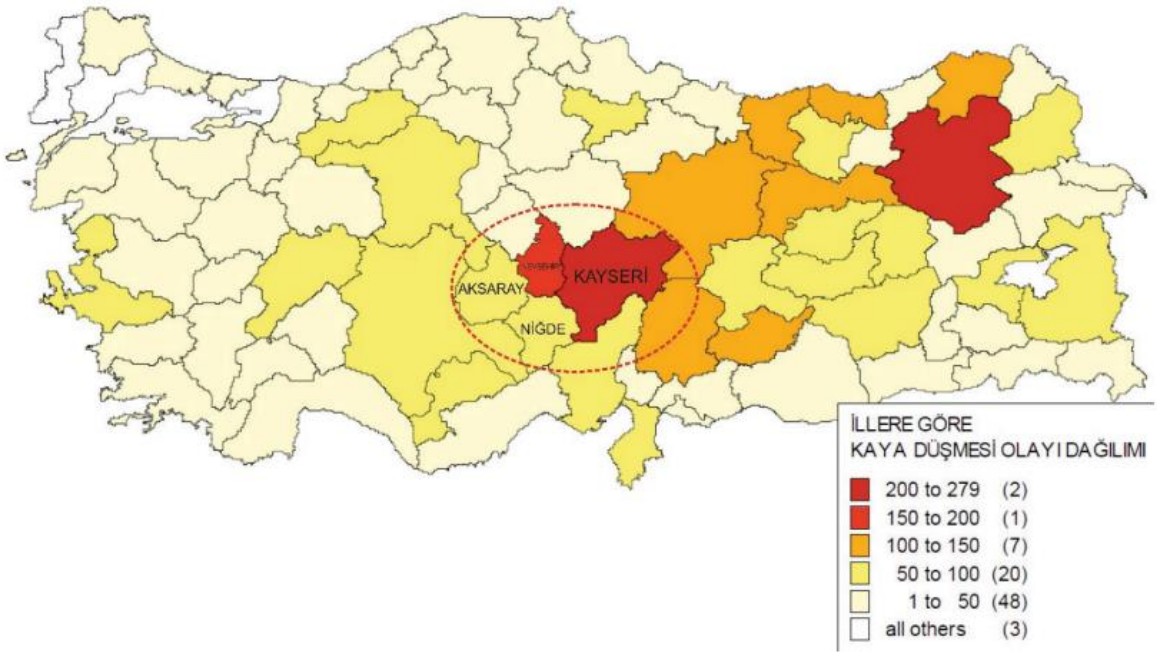
Kaya blokları, süreksizlik yüzeylerindeki suların donma-çözülme etkisiyle oluşturduğu içsel basınçlar, deprem dalgalarının oluşturduğu dinamik yükler, farklı ayrışma ve ağaç köklerinin zamanla büyümesi gibi birçok faktörden dolayı kaynak zondan kopar ve çoğunlukla dik bir yamaçtan serbest düşme hareketi sergiler (Varol vd., 2023). Kaya düşmesini hızlandıran önemli etkenlerden biri döngüsel olarak meydana gelen donma-çözülme aktivitesidir (Grove, 1972). Yoğun yağışların, donma-çözülme çevrimlerinin ve sismik aktivitenin fazla olduğu bölgelerde kaya düşmeleri daha sık gözlenmektedir (Wyllie, 2015). Atmosferik etmenler ve aşırı yağışlar, kaya düşmelerini ciddi oranda tetiklemektedir. Süreksizliklerdeki su havanın soğuması ile birlikte donarak buza dönüşür, hacminde % 9 oranında genişleme meydana gelir ve böylelikle süreksizlik duvarlarına basınç uygulayarak süreksizlik açıklığının artmasına ve kaya kütlesinin duraylılığının olumsuz yönde etkilenmesine yol açar. Kanada Rocky Dağları'nda kaya düşmeleri Gardner (1983) tarafından gözlemlenmiş ve kaya düşmelerinin özellikle çevrimsel donma ve çözülmeye maruz kalan aşırı dik yamaçlarda meydana geldiği sonucuna varılmıştır. İrlanda'da düşük şiddette, yüksek frekanslı kaya düşmeleri Douglas (1980) tarafından incelenmiş ve donma-çözülmenin kaya düşmesi üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Ayrıca kaya kütlesinin dayanım ve blokluluk özelliklerinin de önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Bu durum, kaya düşmesinin yamacın hem morfolojik hem de jeolojik karakteri ile kaya yüzeyinde etkili olan atmosferik etkenler tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Luckman, 1976).

Türkiye sahip olduğu jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel koşulları nedeniyle ve ortalama yükseltisi oldukça fazla olan dağlık ülkelerden biri olmasından dolayı, kütle hareketlerinin önemli bir tipi olan kaya düşme olaylarının aktif olarak yaşandığı ülkelerden biridir (Utlu vd., 2020). Bu nedenle kaya düşmeleri ile ilgili yapılan çalışmalarda en doğru ve sahaya en uygun çalışmanın gerçekleştirilebilmesi can ve mal kaybını asgari düzeye indirebilmek için oldukça önemlidir. Jeomorfolojik açıdan yüksek eğime ve dik yamaçlara sahip olan dağlık bölgelerde gerçekleşen kaya düşme olayları, çok büyük zararlara neden olduğu gibi zaman zaman can kayıplarına da yol açmaktadır (Alemdağ vd., 2022a). Kaya düşmeleri tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de meydana gelen afetler arasında, olay sayısı bakımından %10'luk ve etkilenen insan sayısı bakımından %7'lik bir orana sahiptir. Buna göre, kaya düşmeleri; deprem, heyelan ve su baskınından sonra dördüncü sırada yer almaktadır (Akın vd., 2022). Afet Risk Analiz Sistemi (ARAS) Projesi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından 2017 yılı itibarıyla başlatılmış ve proje kapsamında 2017-2022 yılları arasında toplamda 34 bin 593 heyelan, 4822 kaya düşmesi ve 880 çığ, 604 obruk kayıt altında alındığı belirtilmiştir (Şekil 1) (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2022).



Şekil 1: AFAD'ın ARAS projesi kapsamında kayıt altına alınan kütle hareketleri (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2022)

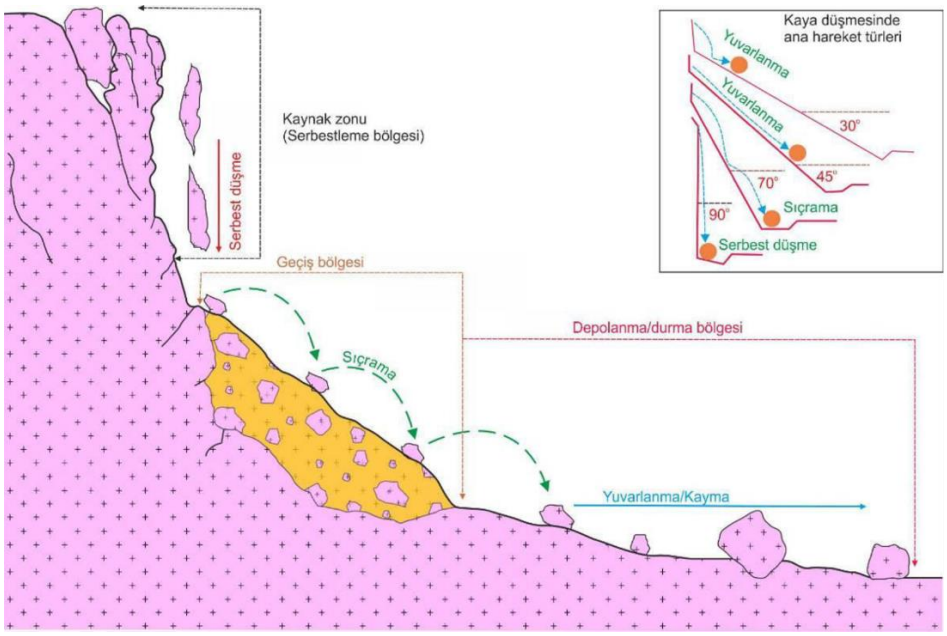
Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2008 yılında hazırladığı raporda, en fazla kaya düşmesi olayının yaşandığı iller sırasıyla, Şekil 2'de görüldüğü üzere 279 adet ile Kayseri, Erzurum (229) ve Nevşehir (179)'dir (Gökçe vd., 2008). Kaya düşmeleri Nevşehir ili ve yakın çevresinde, özellikle Ürgüp ve güneyinde yoğun bir şekilde gözlenmektedir (Uykun, 2024).



Şekil 2: 1950-2008 yılları arasında Türkiye'de yaşanan kaya düşmelerinin mekânsal olarak dağılımı (Gökçe vd., 2008)

Kaya düşmelerinde düşen kaya bloğunun boyutu ve şekli, yamacın eğimi ve yamaç pürüzlülüğü gibi etkenlerden dolayı düşen blok farklı düşme hatlarında hareketine çok hızlı ve ani olarak devam etmektedir. Bu durum kaya düşmelerinin değerlendirilmesi ve iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Kaya düşmelerinde kaynak alandan kopan bloğun durma noktasına kadar yuvarlanarak, sıçrayarak hareket ettiği hattı, depolanma durumu, yüzey morfolojisi ve yamacın eğimine göre gruplandırmak mümkündür (Akın vd., 2019). Kaya bloğunun serbest kaldığı nokta ile durma noktasına kadar uzanan mesafe "menzil mesafesi" (ulaşabileceği en uzak mesafe) olarak da tanımlanmaktadır (Kalender, 2017). Kaya bloklarının çeşitli iç ve dış etkenlerin etkisi altında süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılarak düşmeye başladığı bölüm "Kaynak Zonu" ve düşme hareketine başlayan bloğun serbest düşme hareketini tamamlaması ve yamaç üzerinde sıçrayarak/yuvarlanarak hareketine devam ettiği bölüm "Yuvarlanma Zonu" olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3). Düşen kaya bloklarının topoğrafya ile daha çok temasta olduğu Yuvarlanma zonu, düşen kaya bloklarının depolanma durumu ve yamacın eğim değerlerine göre "Geçiş Bölgesi" ve " Depolanma Bölgesi" olarak sınıflandırılabilmektedir (Evans & Hungr, 1993).

Kaynak alandan kopan kaya bloğu durma noktasına kadar çarpma etkisi altında parçalanmadan, kinetik enerjisi sönümlendiği noktada durarak hareketini tamamlayabilir. Fakat serbest düşme hareketini tamamlayan kaya bloğu çarpma etkisi altında veya yuvarlanma hattı üzerinde sıçrama/yuvarlanma etkisinde birden çok bloğa ayrılarak hareketine çoklu blok şeklinde de devam edebilir.



Şekil 3: Yamaç eğimlerine bağlı olarak kaya düşmelerinde gözlenen hareket türleri ve diğer morfolojik parametreler (Fanos & Pradhan, 2018; Evans & Hungr, 1993'den değiştirilerek)

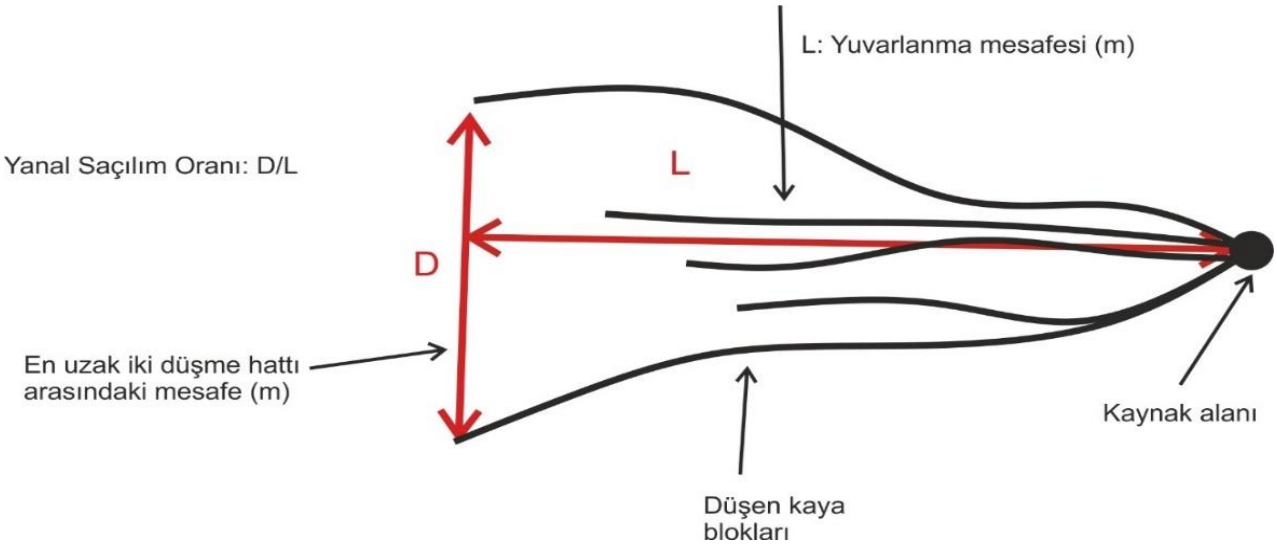
Kaya düşmesi kaynaklı problemlerin önüne geçilebilmesi için yerleşim yerlerinde ve ulaşım güzergahlarında kaya düşme analizlerinin yapılarak tehlike sınırlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Akın vd., 2018). Kaynak alandan ayrılan bloğun ne şekilde bir yol izleyeceğinin tahmininin güç olmasından dolayı kaya düşme riskini en aza indirmek için yapılacak çalışmalarda verilerin doğru ve net bir şekilde ortaya konması ve toplanan veriler ışığında analizlerin yapılması gerekmektedir. Kaya düşme riski bulunan sahalarda geçmişte yaşanan kaya düşmeleri ile ilgili veriler toplanmalı ve sahada hangi bölgelerden kaya düşmeleri yaşandığı tespit edilmelidir. Bu sayede yeniden olması muhtemel kaya düşmelerinin hasar boyutu hakkında öngörüde bulunulabilir. Çalışma yapılacak alanda yamacın topoğrafik eğimi, bölgenin ve alanın litolojisi, blok boyutları ve şekli ve tehlike altında olan ev, okul vb. yapılar kayıt altına alınmalıdır. Kaya düşme hattının kaynak alanı ve yuvarlanma hattı (geçiş bölgesi ve depolanma bölgesi) tespit edilerek analiz çalışmalarının belirlenen veriler yardımıyla yapılması gerekmektedir.

Kaya düşme sahalarında kaynak alanda bulunan kaya kütlesinde kinematik analizlerin gerçekleştirilmesi ve kaya kütlesi hakkında daha net bir bilgiye sahip olunması için süreksizlik hat etüdü çalışmalarının yapılarak, bünyesinde barındırdığı süreksizliklerin aralığı, açıklığı, devamlılığı, pürüzlülüğü, dolgu, bozunma durumu vb. gibi özelliklerin ortaya konulması gerekmektedir. Kaya kütlelerinin dayanımları arazide yapılacak Schmidt Çekici deneyi veya kaya kütlesinden örnek alarak kaya malzemesinin fiziksel ve indeks özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenebilmektedir. Sahada birden farklı litolojilerin bulunması durumunda her birim için bu özelliklerin belirlenmesi kaya kütlesinin yenilme mekanizmasının ortaya konulabilmesi için önemlidir.

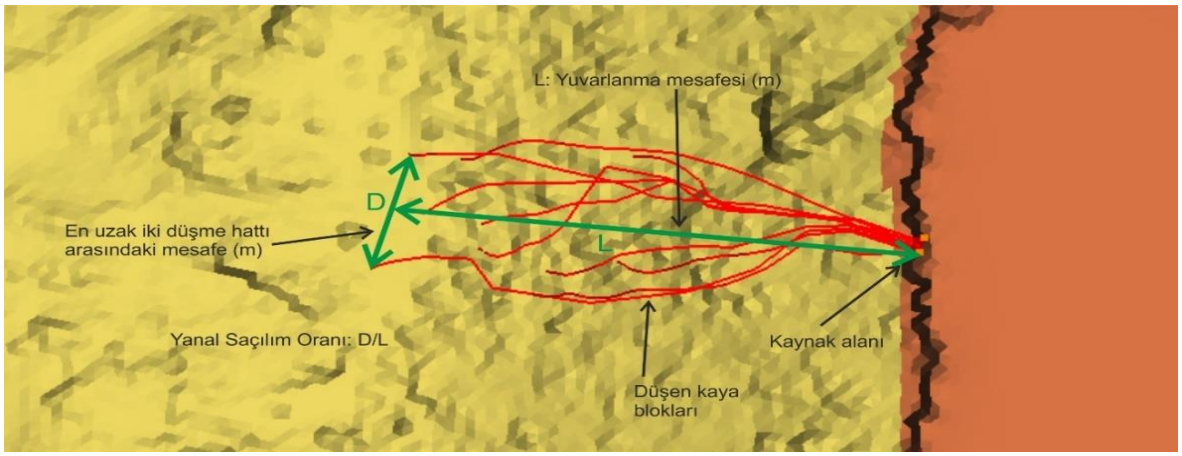
2-boyutlu veya 3-boyutlu modellerde kaya düşme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için arazinin sayısal yüzey modelinin oluşturulması gerekmektedir. Kaya düşmelerine ait yüzeylerin kantitatif açıdan 3-boyutlu yüksek doğrulukta ve hassasiyette modellenmesinde farklı veri kaynaklarından elde edilen yüksek çözünürlükte ve yersel doğrulukta üretilmiş sayısal yüzey modelleri (SYM) kritik rol oynamaktadır (Bounab vd., 2022). Arazi sayısal yüzey modeli, sahada yersel lazer tarama (TLS) veya insansız hava araçları (İHA) ile alınan görüntülerden fotogrametrik yöntemlerle elde edilen yüksek çözünürlüklü koordinatlı nokta bulutları ile oluşturulmaktadır (Polat, 2020; Alemdağ vd., 2022b, Varol vd., 2023; Utlu & Akgümüş, 2023). Hazırlanan sayısal yüzey modeli ve girdi parametresi olarak toplanan veriler ile gelişmiş yazılım programları kullanılarak analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, RocPro3D yazılımı ile 3-boyutlu kaya düşmesi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme sahalarında yapılacak analizlerin 3-boyutlu modellemelerden yararlanılarak gerçekleştirilmesi, kaya düşme mekanizmasının daha net anlaşılabilmesini sağlanmaktadır. Muhtemel kaya düşme durumu ile karşı karşıya olan kaya bloklarının modellenmesi, oluşabilecek riskin boyutunun anlaşılabilmesi için, kaynak alan, kinetik enerji (kJ), sıçrama yüksekliği (m), hız (m/s), birikim ve depolanma alanları, yörüngelerini tespit etmek açısından büyük önem taşır (Alemdağ vd., 2022b).

3-boyutlu topoğrafik değişkenliklerin kaya düşme hatları üzerindeki en önemli etkisi yanal saçılımlardır (Crosta & Agliardi, 2004). Şekil 4 ve 5'te görüldüğü üzere yanal saçılım, bir noktadan yuvarlanan bloğun, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe ile yuvarlanma mesafesi arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır (Turner & Schuster, 2012). 2-boyutlu kaya düşme analizleri belirli bir kesit üzerinde yapılabildiğinden kaynak alanından süreksizlikler boyunca ayrılan kaya bloğunun düşme hattı üzerindeki hareketi boyunca yanal saçılım etkisi tespit edilememektedir.

Yanal saçılım oranı kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun hızı ve topoğrafya pürüzlülüğü tarafından kontrol edilmektedir (Uykun, 2024). 3-boyutlu kaya düşmelerinin en önemli avantajı topoğrafyanın kaya düşme hatları üzerindeki yön değiştirici etkisinin modellere dahil edilebilmesidir. Öte yandan, 3-boyutlu kaya düşme analizleri için en önemli dezavantaj ise analizler için gerekli olan sayısal yüzey veya arazi modellerinin oluşturulabilmesi ve parametre dağılımının bu modeller üzerinde haritalanabilmesi için oldukça performanslı yazılımların ve donanımların bulunması gerekliliğidir (Volkwein vd., 2011). Son 30 yıl içerisinde 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılabilecek çok sayıda yazılım geliştirilmiştir (Akın vd., 2019). Literatürde yapılan kaya düşme analiz çalışmalarında; Crosta ve Agliardi, (2004) yaptıkları çalışmada HY-STONE yazılımını, Scioldo, (2006) yaptığı çalışmada ROTOMAP yazılımını, Dorren vd., (2004) yaptıkları çalışmada Rockyfor3-D yazılımını, Christen vd., (2007) yaptıkları çalışmada RAMMS: Rockfall yazılımını, Lan vd., (2007) yaptıkları çalışmada RockFall Analyst yazılımını, Jaboyedoff ve Labiouse (2011); Castelli vd., (2021) yaptıkları çalışmada QGIS-Qproto yazılımını ve Quanterra, (2003) yaptığı çalışmada CONEFALL yazılımını kullanarak kaya düşmesi analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca RocPro3D, (2014) tarafından geliştirilen RocPro3D yazılımı da kaya düşme analizleri için kullanılmaktadır (Uykun, 2024).



Şekil 4: Yanal saçılım oranının hesaplanması (Uykun, 2024)



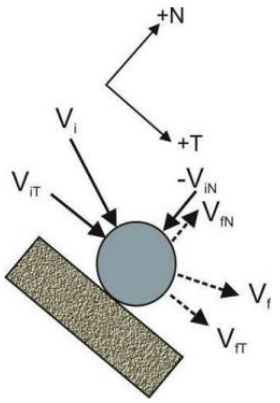
Şekil 5: RocPro3D yazılımının plan görünümü üzerinde yanal saçılım oranının hesaplanması (Uykun, 2024)

Kaya düşme analizlerinde en önemli girdi parametrelerini oluşturan arazi geri verme katsayıları, kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun serbest düşme hareketini tamamladığında şev yüzeyine çarpması ve geri sıçraması sırasındaki hız değişimleri ve enerji kayıplarını kontrol etmektedir. Sürtünme katsayısı ise düşen kaya bloğunun yüzeye çarparak sıçraması ve sonrasında yuvarlanarak veya kayarak topoğrafya üzerinde hareket etmesi sırasındaki enerji kayıplarını kontrol etmektedir. Schweigl vd., (2003) kaya düşmelerinin modellenmesinde en önemli faktörlerin yamacın geometrisi ve yamaç boyunca enerji kaybının büyüklüğünün bir ifadesi olan geri sıçrama katsayılarının olduğunu vurgulamışlardır.

Geri verme katsayısı iki cismin veya bir cisim ile bir yüzeyin çarpışması sırasında elastik olmayan yer değiştirmeler yüzünden kaybedilen enerji miktarını tanımlamakta kullanılan bir büyüklüktür (Ashayer, 2007). Geri verme katsayısının aldığı değerler teorik olarak, 0 kinetik enerji kaybının yaşandığı mükemmel esnek olmayan çarpışmayı tanımlamak üzere ve 1 kinetik enerji kaybının yaşanmadığı mükemmel esnek çarpışmayı tanımlamak üzere 0 ile 1 değerleri arasında değişmektedir (Stronge, 2000). Genellikle çarpışmadan önceki (V_{in}, V_{it}) ve sonraki (V_{rn}, V_{rt}) hız vektörleri çarpışmanın gerçekleştiği yüzeye dik ve teğet birbirine dik iki ayrı vektöre ayrılarak normal geri verme katsayısı (R_n) ve teğet geri verme katsayısı (R_t) eşitlik 1'de sunulan formüller ile hesaplanmaktadır (Ashayer, 2007).

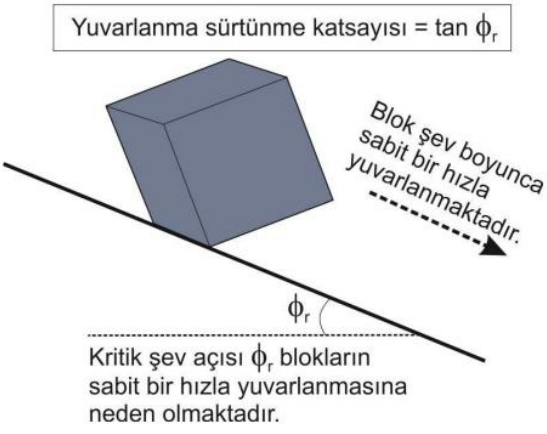
$$R_n = \frac{V_{rn}}{V_{in}} \qquad (1)$$
$$R_t = \frac{V_{rt}}{V_{it}}$$

Geri verme katsayıları Şekil 6'da görüldüğü üzere kaya bloğunun serbest düşme aşamasından sonra arazi yüzeyine çarparak sıçramasının sonucu olarak ortaya çıkan farklı hızların oranı olup, normal ve teğetsel (tanjant) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Normal geri verme katsayısı (R_n), düşen bloğun çarpma etkisi altında normal eksen yönündeki hızını tanımlar ve etki açısı ile ilişkilidir. Teğetsel geri verme katsayısı (R_t) ise, düşen bloğun çarpma etkisi altında teğetsel hızının azalımını kontrol eder ve şev/yamaç ile düşen kütle arasındaki sürtünme kuvvetleri tarafından kontrol edilir (Şekil 6) (Akın vd., 2019).



Şekil 6: Düşen blokta çarpmadan önceki ve sonraki hız vektörleri ile normal ve teğetsel bileşenleri (Wyllie, 2015)

Kaya düşmelerinde kaya bloğunun serbest düşme aşamasından sonra şev yüzeyine çarpmasından sonraki hareketi normal ve teğetsel geri verme katsayıları ile tanımlanırken, yuvarlanan bloklarda enerji kayıpları sürtünme katsayısı veya yuvarlanma sürtünme açısı kavramı ile belirlenmektedir (Statham, 1979; Okura vd., 2000). Yuvarlanma sürtünme katsayısı Şekil 7'de gösterildiği gibi, bloğun bir şev üzerinde sabit bir hızla hareketine başlaması için gerekli olan açının tanjantı olarak ifade edilmektedir. Bu açıdan daha dik bir şevde düşen blok hızlanmakta, daha yatık şevlerde ise yavaşlayarak durmaktadır. Bu nedenle, sürtünme katsayısı bloğun şev üzerindeki ufak topoğrafik düzensizliklerde yavaşlamasını veya hızlanmasını kontrol eden bir parametredir. Yuvarlanma sürtünme katsayısı malzemelerin türü ve şekli ile blok boyutu ve şev yüzeyindeki döküntü boyutu arasındaki orana bağlı olarak değişmektedir (Azzoni vd., 1995).



Şekil 7: Yuvarlanma sürtünme katsayısı (Akın vd., 2019)

Kaya düşmesi olaylarının incelenmesinde kullanılan 3-boyutlu modellerde en önemli girdi parametrelerinden biri arazi geri verme katsayısıdır (Çapar, 2018). Kaya düşmelerinin gözlendiği sahalarda, 3-boyutlu analizlerin yapılabilmesi için en önemli parametrelerden biri olan geri verme katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Arazi geri verme katsayıları arazide uygun alan bulunması halinde blok düşürme deneyleri veya daha önceden yaşanmış kaya düşmelerinde düşen blokların durdukları nokta dikkate alınarak geriye dönük analizler ile belirlenebilmektedir. Geriye dönük analizlerde düşmüş blokların boyutları ve durdukları noktalara göre, kaynak alandan kopan bloğun durduğu noktaya kadar yuvarlanmasını sağlayan farklı R_n ve R_t çiftleri belirlenmektedir. Belirlenen R_n ve R_t çiftlerinin birleştirildiği doğruların kesiştiği noktaya ait R_n ve R_t çiftleri 3-boyutlu analizlerde girdi parametresi olarak kullanılabilmektedir. İnceleme sahasında daha önceden düşmüş blokların ve blok düşürmeye uygun alanın olmadığı durumlarda R_n ve R_t çiftlerinin belirlenebilmesi için daha önceki bilimsel çalışmalara ait veriler veya literatürde farklı birimler için önerilen R_n ve R_t tablolarından elde edilen veriler kullanılabilmektedir (Uykun, 2024).

Bu çalışma ile farklı yöntemler ile seçilebilen arazi geri verme katsayılarının (R_n ve R_t) yapılan analizlerde düşen kaya bloğunun yuvarlanma hattı, yuvarlanma mesafesi, sıçrama yüksekliği, enerji miktarı ve yanal saçılımı gibi parametreler üzerindeki etkisinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Kaya düşme sahalarında sayısal yüzey modeli kullanılarak 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde en önemli girdi parametresi olan geri verme katsayılarının en doğru ve sahaya en uygun olarak belirlenmesinin ne derecede önemli olduğu ve sahaya uygun olmayan değerler kullanıldığında parametreler üzerinde ne türde değişimler olduğunun ortaya konulması hedeflenmiştir.

2. Materyal

2.1. Çalışma Alanı

Nevşehir ili Acıgöl ilçesine bağlı Tatlarin kasabasında bulunan Tatlarin Yeraltı Şehri ve civarı çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Kapadokya sınırları içerisinde bulunan Tatlarin Kasabası, Nevşehir şehir merkezine 25 km ve Acıgöl ilçe merkezine 10 km uzaklıktadır. Senozoyik ve Mesozoyik birimlerden oluşan çalışma alanının jeolojisini Üst Kreatase yaşlı Ortaköy Granotoidi, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Tuzköy, Peçenek ve Ürgüp Formasyonunun Kavak Üyesi, Kuvaterner volkanizmasının ürünleri olan Kızıldağ bazaltı ve Karnıyarık Tepe Bazaltı ve güncel yamaç molozu ve alüvyonlar oluşturmaktadır (Akın vd., 2019).

Çalışma alanının güney ve güneybatısında Ortaköy granotoidinin gabro türü kayaları gözlenmektedir. Ortaköy granotoidi gabro, bantlı gabro, diyorit, tonalit, granit, granodiyorit, diyorit porfir, monzonit, siyenit, monzodiyorit, lökogranit, granit porfir bileşimlidir. Gabro kayalarının (w), granitik kayalar içinde anklavları izlenir (Seymen, 1981; Batman, 1978).

Çalışma alanında geniş bir alanda izlenen Tuzköy Formasyonu Tatlarin Yeraltı Şehri ve yakın civarında gözlenmektedir. Birim çakıltaşı, kumtaşı, kiltaşı ve tüfit ardalanımından oluşmuştur. Çakıltaşı gevşek çimentoludur ve 10-20 santimetre çapında çakıllar (diyabaz, spilit, granit, andezit, granodiyorit, metamorfik kayaç) içermektedir (Atabey vd., 1987).

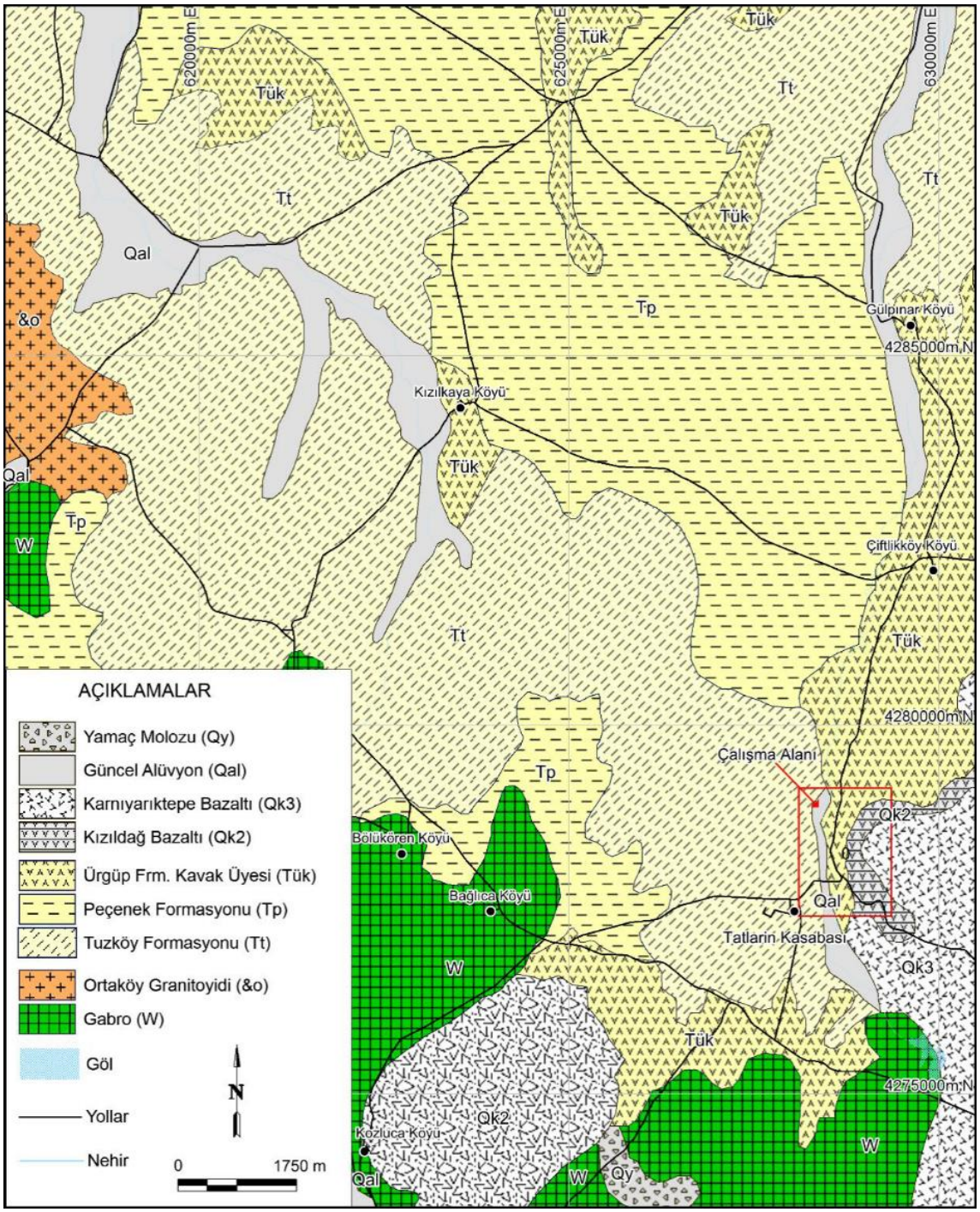
Peçenek formasyonu, beyaz gri renkli, orta-ince kum tane boyutlu ve teknesel çapraz tabakalı, gevşek tutturulmuş kumtaşı, çakıllı kumlu tüfitler, miltaşı, kiltaşı ile kaba kumtaşı ve çakıltaşlarından oluşmaktadır (Atabey, 1989a).

Çalışma alanında Kavak Üyesi (Tük) ile temsil edilen Ürgüp Formasyonu, oldukça dar bir alanda izlenmektedir. Ancak çalışmanın konusunu oluşturan Tatlarin Yeraltı Şehri'nin kaya oyma yapılarının yer aldığı birim olması nedeniyle çalışma açısından oldukça önemlidir. İgnimbirit karakterindeki birim, açık kahve, bej ve sarımsı beyaz renkli olup, yer yer ankelit ve pomza içermektedir. Kavak üyesinde beyaz–kirli beyaz, andezitik bileşenli camsı tüfitli, köşeli parçacıklı pomza külü düzeyleri de izlenmiştir. Çalışma alanında farklı seviyeler seklinde izlenen birim yörede ilk ignimbirit oluşumlarını temsil etmektedir (Atabey, 1989b).

Çalışma alanının kuzeydoğusunda yüzlek veren ve çalışmanın konusu oluşturan kaya düşmelerinin kaynak zonunu oluşturan Kızıldağ bazaltları, kızılımsı, siyah renkli, tavan düzeyleri gözenekli, taban düzeyleri sert ve siyah masiftir. Bölgedeki bazaltlar, soğuma çatlaklı, plajiyoklas ve olivince zengindir. Olivin bazalt özelliğindeki birimin kalınlığı 10 m kadardır (Atabey, 1989b).

Karnıyarıktepe Bazaltı, pembe turuncu siyah, bazaltik andezit ve traki-andezit niteliklidir. Kırıklı, sert ve dayanımlıdır. Keskin kenarlı plato şeklinde yüzeyler. Camsı hamur içinde plajiyoklaslar arasına dağılmış plajiyoklas fenokristalleri ve piroksen lataları gözlenir (Atabey, 1989b).

Yamaç molozları haritanın güneyinde sınırlı bir alanda izlenmekte olup, Kızıldağ Bazaltı çevresinde görülür. Çalışma alanında dar hatlar boyunca tali derelerin oluşturduğu güncel alüvyonların kalınlığı birkaç metre civarındadır. Alüvyonlar genelde çakıl, kum, silt ve kil tane boyutundaki malzemeden oluşmaktadır (Şekil 8) (Atabey, 1989a).



Şekil 8: Tatlarin ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Atabey, 1989a)

Kapadokya bölgesinde bulunan Tatlarin Yeraltı Şehri ve çevresi doğal, tarihi ve kültürel açıdan korunması gereken önemli değerler arasında bulunmaktadır. Tatlarin Yer Altı Şehri ve çevresinde çok miktarda kaya düşme afeti yaşanmıştır ve bölgede olumsuz bir etki oluşturmaktadır (Şekil 9). Tatlarin yerleşim alanından daha yüksek kotlarda bulunan Tatlarin Yeraltı Şehri jeolojik olarak ignimbiritler içerisinde oluşmuştur. Tatlarin Yeraltı Şehrinin oluşumunda etkili olan ignimbiritler yüksek dayanımlı bazaltlar tarafından örtülmüştür. Bölgede yaşanan kaya düşmelerinin kaynak alanını bazaltlar oluşturmaktadır. Bazaltlar bünyesinde barındırdıkları dik ve dike yakın soğuma çatlakları ve dik bir topoğrafyaya sahip olduklarından dolayı kaya kütlesinden kaya bloklarının süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılmasına oldukça elverişli bir konumdadır.



Şekil 9: Tatlarin yerleşimi ve tarihi yeraltı şehrinden genel bir görünüm (Uykun, 2024)

Bazatların duraylılığını olumsuz yönde etkileyen süreksizlik takımları dik ve dike yakın soğuma çatlakları bölgede yoğun şekilde kaya düşmelerine neden olmakta ve yerleşim alanında ciddi risk oluşturmaktadır. İnceleme alanında geçmişte yaşanmış çok sayıda kaya düşmeleri nedeniyle daha önceden düşmüş kaya blokları, daha düşük yamaç eğimine sahip depolanma bölgesi olarak tanımlanabilecek ignimbiritler üzerinde depolanmıştır (Şekil 10). Yapılan analizlerde kaya düşme hattının yuvarlanma zonu bölümünde bloklu bazaltların varlığından dolayı, 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kaynak alandan kopan kaya bloğu serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra yuvarlanma zonu bölümünde daha çok sıçrama şeklinde hareket tarzı göstermesinden dolayı bu alan çalışma sahası olarak belirlenmiştir. Çünkü geri verme katsayılarının belirli değerler arasında değiştirilmesiyle düşen bloğun yuvarlanma hattı, sıçrama yüksekliği ve enerji vb. gibi parametreleri üzerindeki etkisi daha net oraya konulması amaçlanmıştır. İnceleme alanında kaya düşme kaynak alanı ve yuvarlanma zonunu oluşturan bölgelerde düşen kaya bloğunun yörüngesini etkileyecek bitki örtüsü bulunmamaktadır (Şekil 10).



Şekil 10: Tatlarin yerleşim alanı çevresinde mostra veren bazatlarda gözlenen çok sayıda kaya düşmeleri (Uykun, 2024)

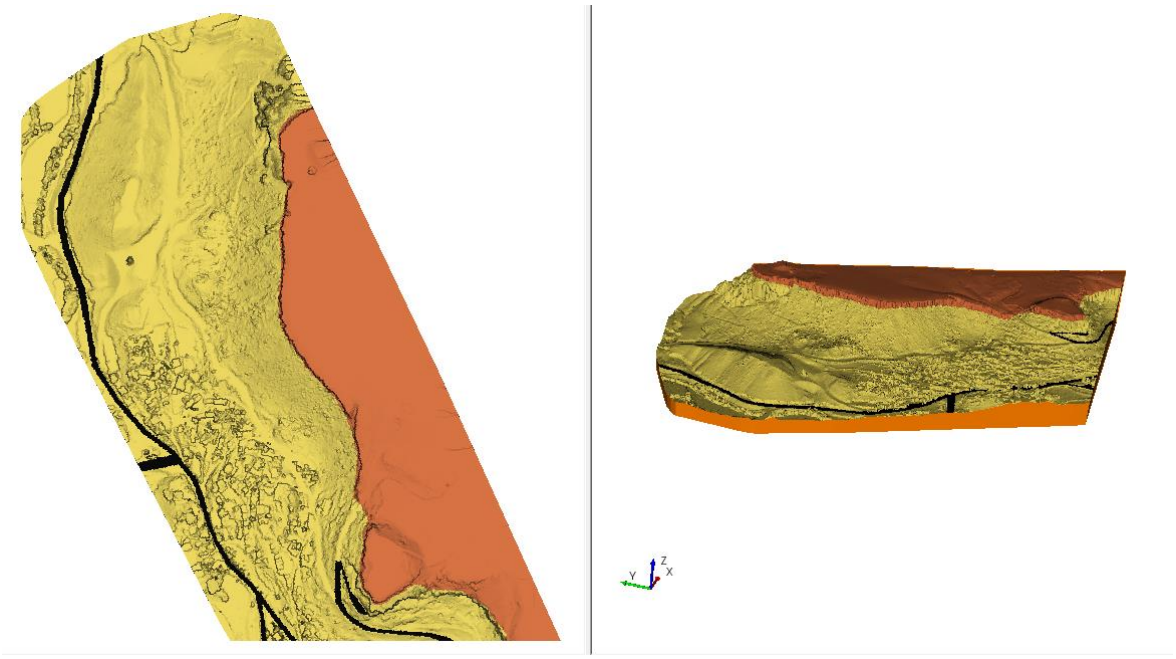
Dinçer vd. (2016) yaptıkları bilimsel çalışmada 2011 yılında Tatlarin bölgesinde yaşanan kaya düşmesi olaylarını dikkate alarak ve 2014'te sahada yapılan blok düşürme deneyleri ile elde ettikleri arazi geri verme katsayıları ile 3-boyutlu analizler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, hem 2011 yılında düşen blokları göz önünde bulundurarak hem de 2014 yılında arazi deneyleri sonucunda birbirine yakın arazi geri verme katsayıları elde etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada ise farklı arazi geri verme katsayılarının blok dinamiği üzerinde etkisi incelenmiş ve bu değerler parametrik olarak değiştirilmiştir. Fakat Dinçer vd. (2016) sahada yaptıkları blok düşürme deneyleri ve geriye dönük analizler sonucunda elde ettikleri verileri karşılaştırarak ve kalibre ederek farklı birimler için Tablo 1'de görüldüğü üzere geri verme katsayılarını (R_n ve R_t) önermişlerdir.

Tablo 1: Dinçer vd. (2016) tarafından Tatlarin Yeraltı Şehri ve çevresinde yapılan analizler sonucu belirlenen parametreler

Litoloji	Normal geri verme katsayısı (R_n)	Tanjant geri verme katsayısı (R_t)		Sürtünme katsayısı	
	2011 (kaya düşmesi)	2011 (kaya düşmesi)	2014 (arazi testi)	2011 (kaya düşmesi)	2014 (arazi testi)
Bazalt	0.80	0.85	0.80	0.35	0.45
Tüf	0.73	0.76	0.71	0.35	0.45
Kaynaşmış tüf	0.78	0.82	0.77	0.35	0.45
Bloklu bazalt molozu	0.60	0.75	0.70	0.65	0.75
Bloklu tüf molozu	0.60	0.75	0.70	0.55	0.65
Yumuşak tüf	0.55	0.70	0.65	0.55	0.65
Alüvyon	0.50	0.70	0.65	0.50	0.60
Stabilize yol	0.65	0.75	0.70	0.35	0.45
Asfalt yol	0.80	0.85	0.80	0.35	0.45

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında inceleme alanında kaya düşme analizlerinde girdi parametresi olarak belirlenmesi gereken veriler (litoloji, birim hacim ağırlık, süreksizliklerin eğim/eğim yönü vb.) toplanmıştır. Tatlarin Yeraltı Şehri ve çevresinin 3-boyutlu modeller üzerinde analizlerinin yapılabilmesi için kullanılacak olan sayısal yüzey modeli, İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen yüksek çözünürlüklü (~2.7 cm/piksel) nokta bulutu kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 3-boyutlu kaya düşme analizleri, yüksek performanslı, kullanımı kolay ve pratik çıktıları ile anlaşılabilir olan, deterministik ve olasılıksal analizler yapılmasına imkan tanıyan RocPro3D yazılımı kullanılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: RocPro3D ile hazırlanan Tatlarin Yeraltı Şehri ve çevresinin plan görünümü ve 3-boyutlu sayısal yüzey modeli

Çalışma kapsamında farklı yöntemler ile seçilebilen geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının kaya düşme analizlerinde parametreler üzerinde yaptığı etkiyi belirleyebilmek için yüksek çözünürlüklü nokta bulut verilerinden elde edilen aynı sayısal yüzey modeli üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme analizlerinde bazalt birimi kaynak alanı oluşturduğu (Şekil 12) ve düşen kaya bloğu burada çoğunlukla serbest düşme hareketini yaparak yüzey ile teması yok denilebilecek kadar az olduğu için bazalt biriminin R_n ve R_t değerleri (R_n: 0,55 ve R_t: 0,9) literatür çalışmalarından elde edilerek sabit tutulmuştur (Akın vd., 2019).

Analizlerde düşen kaya bloklarının parametrelerinde (yuvarlanma hattı, yuvarlanma mesafesi, enerji miktarı vb.) meydana gelen değişiklilerin daha net tespit edilebilmesi için kaynak alanda 5 farklı noktasal kaynak alanı belirlenmiş ve her noktasal kaynak alanından 1 adet kaya bloğu ve yanal saçılım etkisinin incelenebilmesi için 10 adet kaya bloğu düşürülmüştür. Analizlerde deterministik yaklaşım tercih edilerek analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 14). Bazalt biriminden oluşan kaynak zon genel olarak benzer özellik göstermektedir. Ancak Şekil 10 ve 13'te görülebileceği üzere yuvarlanma zonundaki daha önce düşen blokların yoğunluğu değişkenlik arz etmektedir. Bu nedenle farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeylerin etkisini de değerlendirebilmek için düşme potansiyeli olan bölgelerden ve bu blokların düşmesi halinde yuvarlanabileceği yüzeylerin değişkenlik gösterdiği 5 farklı nokta kaya düşmesi kaynak noktası olarak seçilmiştir.



Şekil 12: Kaya düşmesi kaynak alanını oluşturan bazaltlar

RocPro3D yazılımında girdi parametresi olarak belirlenmesi gereken sürtünme katsayısı kaynak alan için 0,45 ve yuvarlanma zonu için 0,75, daha önceden düşmüş kaya blokları incelenerek blok boyutu olarak 1 m^3 ve kaya bloklarının birim hacim ağırlıkları ise 2500 kg/cm^3 olarak belirlenmiştir (Akın vd., 2019). Çalışma alanında düşen kaya bloğunun serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra yuvarlanma zonunda daha önce düşmüş çok sayıda bazalt bloğu bulunmasından kaynaklı ana hareket türü olarak sıçrama tarzı hareket gösterdiğinden dolayı sürtünme katsayılarının değerleri sabit tutularak sadece R_n ve R_t katsayılarının farklı değerleri ile analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 13).

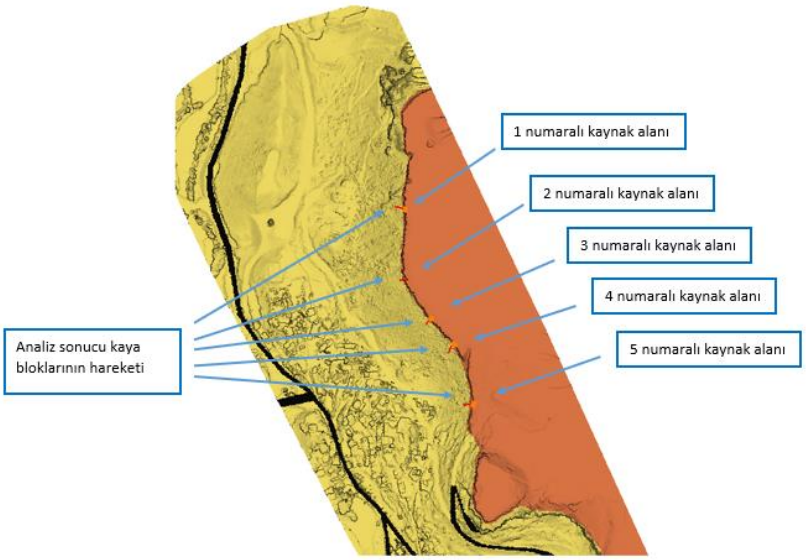


Şekil 13: Daha önceden düşen kaya bloklarının yuvarlanma zonu üzerindeki dağılımı

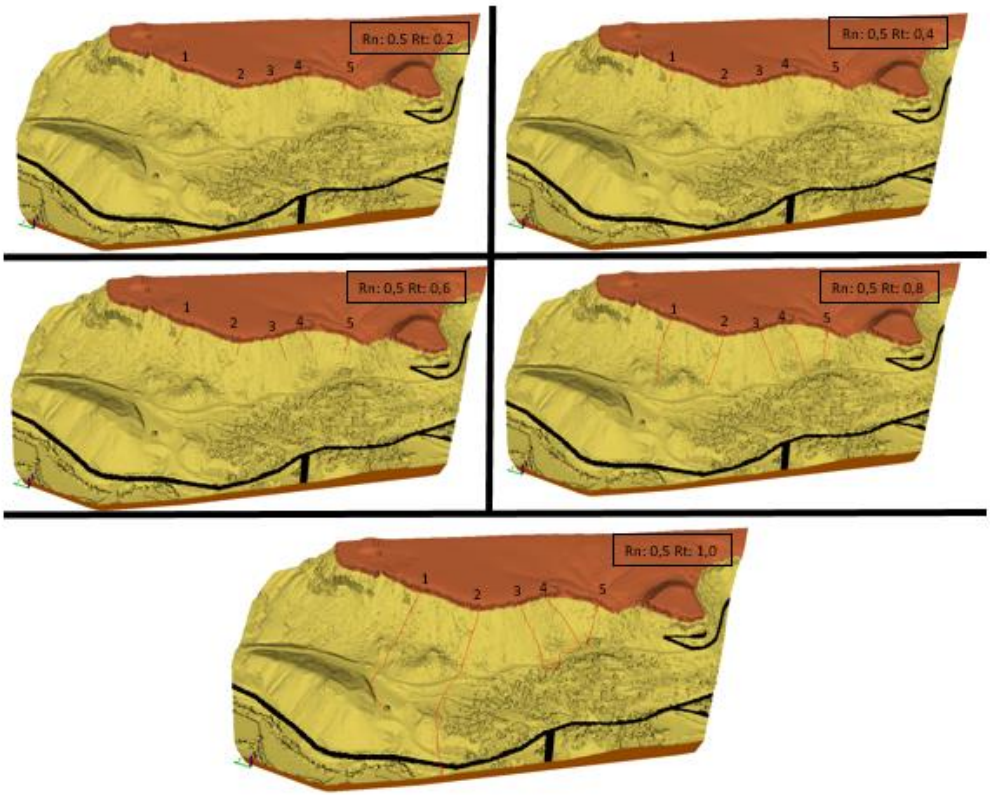
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tanjant (R_t) Geri Verme Katsayısının Etkisi

Yapılan deterministik kaya düşmesi analizlerinde normal geri verme katsayısı (R_n) 0,5 değerinde sabit tutularak tanjant geri verme katsayısı (R_t) 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1'lik miktarlarda artırılarak her kademede analizler bütün noktasal kaynak alanları için tekrarlanmıştır. Her analiz sonucunda kaynak alandan kopan kaya bloğunun durma noktasına kadar izlediği yuvarlanma hattı boyunca maksimum yuvarlanma mesafeleri, maksimum kinetik enerjileri ve maksimum sıçrama yükseklikleri kayıt altına alınarak incelenmiştir.



Şekil 14: Kaya düşme analizi sonucu kaya bloklarının izlediği yuvarlanma hattı (R_n: 0,5, R_t: 0,1)



Şekil 15. Kaya düşme analizi sonucu R_n: 0,5 ve R_t: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 değerlerinde düşen kaya bloklarının yuvarlanma hattı

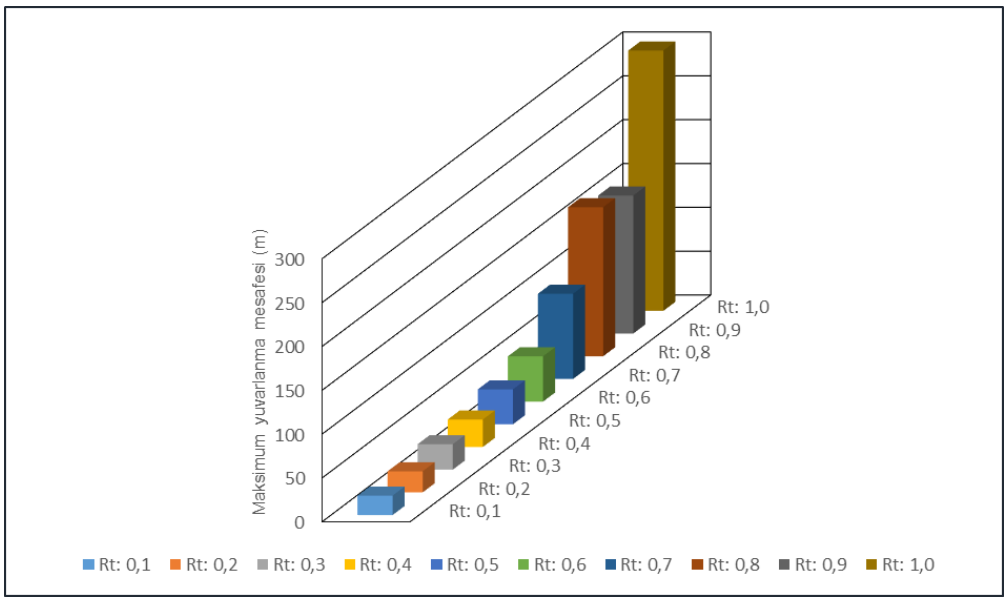
Tablo 2: 5 noktasal kaynak alanında Tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 – 1,0 değerleri arasındaki analizlerde parametrelerin ulaştığı maksimum miktarlar

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	R_t: 0,1	R_t: 0,2	R_t: 0,3	R_t: 0,4	R_t: 0,5	R_t: 0,6	R_t: 0,7	R_t: 0,8	R_t: 0,9	R_t: 1,0
Yuvarlanma mesafeleri (m)	1. Kaynak Alanı	22,153	23,998	29,008	31,295	39,831	51,639	97,157	169,982	157,405	296,910
	2. Kaynak Alanı	13,655	14,080	15,553	16,558	21,279	32,297	42,320	113,673	170,382	372,131
	3. Kaynak Alanı	16,423	16,544	16,708	24,282	31,008	51,150	68,272	94,633	163,057	210,298
	4. Kaynak Alanı	19,686	20,161	23,274	22,439	25,246	52,573	77,330	128,031	171,003	211,612
	5. Kaynak Alanı	21,072	26,778	27,303	40,486	44,871	43,782	69,185	74,204	92,714	117,727
Kinetik Enerji Miktarları (kJ)	1. Kaynak Alanı	161,33	161,33	161,33	161,33	161,33	172,86	231,16	449,01	447,04	587,9
	2. Kaynak Alanı	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	182,88	392,55	685,5
	3. Kaynak Alanı	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	398,97	667,04
	4. Kaynak Alanı	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	283,37	411,86	539,25
	5. Kaynak Alanı	112,41	112,41	112,41	123,46	135,9	151,71	170,4	192,53	302,54	390,1
Sıçrama Yükseklikleri (m)	1. Kaynak Alanı	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	10	10,56	9,25
	2. Kaynak Alanı	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	2,02	10,16	8,51
	3. Kaynak Alanı	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	5,29	10,89
	4. Kaynak Alanı	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	4,33	3,4	5,96	12,09
	5. Kaynak Alanı	2,81	3,14	3,63	4,08	4,36	4,54	4,66	4,75	5,58	10,26

Şekil 15'te tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizler kapsamında 1 numaralı noktasal kaynak alanında, düşen kaya bloğu; R_t: 0,1 değerinde 22,15 m ve R_t: 0,6 değerinde yaklaşık iki katından fazla artış göstererek 51,63 m yuvarlanma mesafesi kaydettiği belirlenmiştir. R_t: 0,6 ile 1,0 değerleri arasındaki analizler incelendiğinde R_t: 0,9 seviyesinde 0,8 seviyesine göre yuvarlanma mesafesinde azalma olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, RocPro3D yazılımında iki analiz seviyesinde (R_t: 0,8 ve 0,9) açısal hızlar incelendiğinde, R_t: 0,8 için kaya bloğunun maksimum ulaştığı normal hız miktarı 23,84 m/s ve açısal hızı 36,84 rad/s, R_t: 0,9 seviyesinde normal hız miktarı 24,88 m/s ve açısal hızı 26,18 rad/s olarak tespit edilmiştir. Düşen kaya bloğunun R_t: 0,9 seviyesinde R_t: 0,8 seviyesine göre daha düşük açısal hıza ulaştığından dolayı yuvarlanma mesafesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. R_t: 1,0 değerinde yapılan analizlerde yuvarlanma mesafesinde çok yüksek miktarlarda artış olduğu belirlenmiştir. R_t değeri 1,0 kullanılarak yapılan analizlerde serbest düşme hareketini tamamlayan kaya bloğunun yüzeye çarpması ve geri sıçraması sırasında enerji kaybına uğramadan hareketine devam ettiği varsayılmıştır. Gerçekte karşılaşılma ihtimali düşük olan bu durumda, düşen kaya bloğunun çarpma sonrası hızı ile çarpma öncesi hızı oranının bir ifadesi olan Rt katsayısının (R_t: V_{rt}/V_{it}) 1 olması, hızların eşit olduğu ve çarpma etkisinin kaya bloğu üzerinde sönümleyici bir etkisinin olmadığını göstermektedir (Tablo 2).

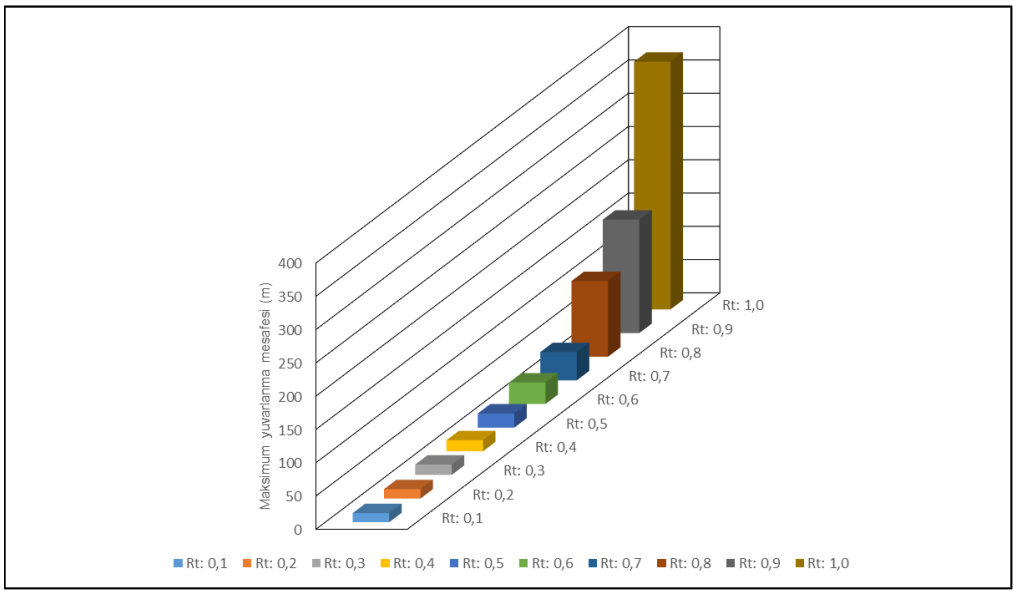
1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum kinetik enerji miktarı ve maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, R_t: 0,1 ile 0,5 arasında maksimum kinetik enerji miktarları sabit kalmış ve R_t: 0,6 seviyesinden itibaren artış göstermiştir. R_t: 1,0 seviyesinde 587,9 kJ ile en yüksek kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde de benzer bir durumla karşılaşılmış ve R_t: 0,7 seviyesine kadar maksimum sıçrama yüksekliği 3,67 m olduğu tespit edilmiştir. R_t: 0,8 seviyesinden itibaren sıçrama yüksekliklerinde artış meydana gelmiş ve en yüksek maksimum sıçrama yüksekliğinin R_t: 0,9 seviyesinde 10,56 m olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerde en yüksek parametre değerleri R_t: 0,9 ile 1,0 seviyelerinde kayıt altına alınmıştır (Tablo 2).

1 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde R_t katsayısının artışı ile birlikte her seviyede maksimum yuvarlanma mesafelerinde artış olduğu ve özellikle R_t katsayısının 0,6 değerinden itibaren artış miktarlarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 16). Yuvarlanma mesafelerinin aksine maksimum enerji miktarı ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise belirli seviyelere kadar sabit değerlerin olduğu ve R_t katsayısının artması ile orantılı olarak artışın olmadığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı tanjant (R_t) geri verme katsayısı 1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde direkt olarak etkili olduğu belirlenmiş ve kinetik enerji miktarları ve sıçrama yükseklikleri üzerinde belirli seviyelerden sonra etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 16: 1 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme *katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri*

2 numaralı noktasal kaynak alanında R_t katsayısının farklı değerleri ile yapılan analizler kapsamında, R_t: 0,1 seviyesinde düşen kaya bloğu 13,65 m'de, R_t: 0,7 değerinde ise 42,32 m mesafe almıştır. R_t katsayısının 0,1 ile 0,7 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafesi düşük miktarlarda artışların olduğu belirlenmiş ve Rt: 0,8 değerinden itibaren yüksek oranlarda artış tespit edilmiştir. R_t: 0,8 seviyesinde 113,67 m yuvarlanma mesafesine ulaşan blok, R_t: 1,0 seviyesinde çok yüksek miktarda artış göstermiş ve 372,13 m durma mesafesine ulaşmıştır (Tablo 2).



Şekil 17: 2 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

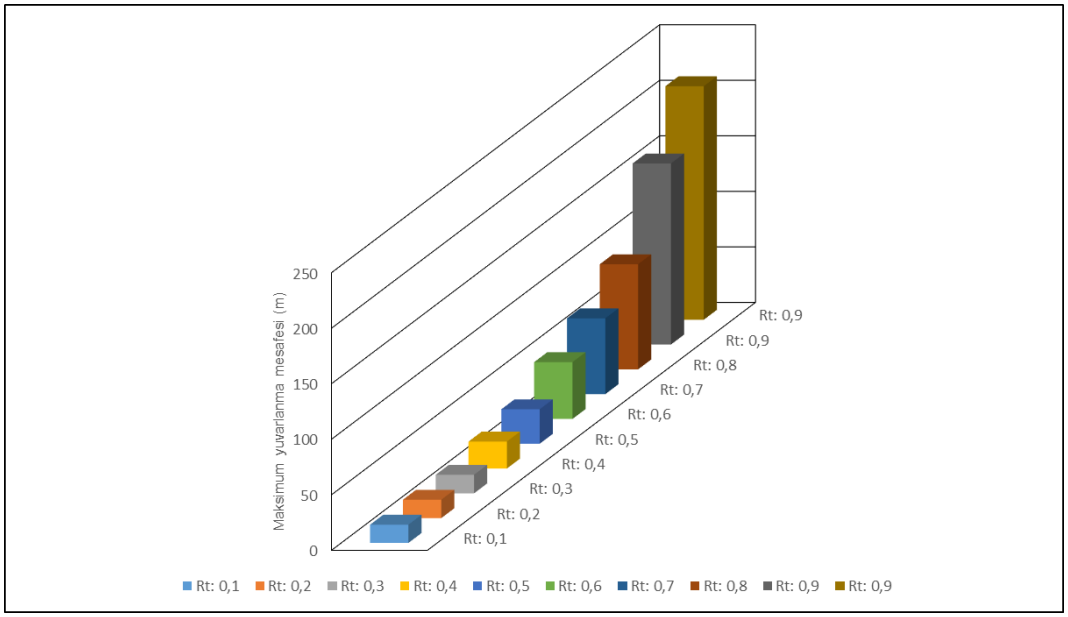
Maksimum kinetik enerji miktarlarında, R_t: 0,1 ile 0,7 seviyeleri arasında 151,88 kJ kinetik enerji miktarı değeri sabit kalmış ve artış veya azalış tespit edilememiştir. Yuvarlanma mesafelerinde olduğu gibi R_t: 0,8 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artış gözlenmiş ve R_t: 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğu yuvarlanma hattı boyunca maksimum 685,5 kJ kinetik enerji miktarına ulaşmıştır. Tablo 2 incelendiğinde maksimum sıçrama yüksekliklerinde benzer durumun olduğu ve R_t: 0,8 değerinden itibaren kaya bloğunun sıçrama yüksekliklerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir.

2 numaralı kaynak alanda yapılan analizlerde R_t katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında parametrelerin maksimum ulaştıkları değerler incelendiğinde, yuvarlanma mesafelerinde çok düşük miktarlarda artış olduğu ve maksimum kinetik enerji miktarlarında ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde değerlerin sabit kaldığı belirlenmiştir. R_t: 0,8 seviyesinden itibaren bütün parametrelerde yüksek miktarlarda artışların olduğu ve özellikle R_t: 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğu geri sıçraması sırasında hızından kayıp olmaksızın hareketine devam ettiği belirlenmiştir (Şekil 17). Dolayısıyla R_t katsayısının maksimum yuvarlanma mesafesi üzerinde diğer parametrelere nazaran daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

3 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılan kaya bloğunun, R_t katsayısının 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafeleri 16 m civarında neredeyse sabit kalmış ve R_t: 0,4 değerinden itibaren artmaya başladığı tespit edilmiştir. R_t: 0,7 seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde yüksek miktarlarda artışların olduğu belirlenmiştir (Şekil 18). En yüksek maksimum yuvarlanma mesafesi 210,29 m mesafe ile R_t: 1,0 seviyesinde kayıt altına alınmıştır (Tablo 2). Burada R_t: 1,0 seviyesinde 1 ve 2 numaralı kaynak alanlarında gerçekleşen çok yüksek miktarlarda ani artışın olmadığı tespit edilmiştir.

Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde R_t: 1,0 ile 0,8 seviyeleri arasında 197,87 kJ değeri sabit kaldığı belirlenmiştir. R_t: 0,9 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarında artış olduğu ve R_t: 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğunun 685,5 kJ maksimum kinetik enerji değerine ulaştığı tespit edilmiştir. R_t katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında 2,59 m maksimum sıçrama yüksekliğinde değişim gözlenmemiş ve maksimum kinetik enerji miktarında olduğu gibi R_t: 0,9 seviyesinden itibaren iki kattan fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. 3 numaralı kaynak alanda parametrelerin maksimum değerleri R_t katsayısının 1,0 seviyesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

3 numaralı kaynak alanda, 1 ve 2 numaralı kaynak alanda olduğu gibi Rt katsayısının en etkili olduğu parametrenin maksimum yuvarlanma mesafesi olduğu ve maksimum kinetik enerji miktarı ve maksimum sıçrama yüksekliğine R_t katsayısının yüksek değerlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.



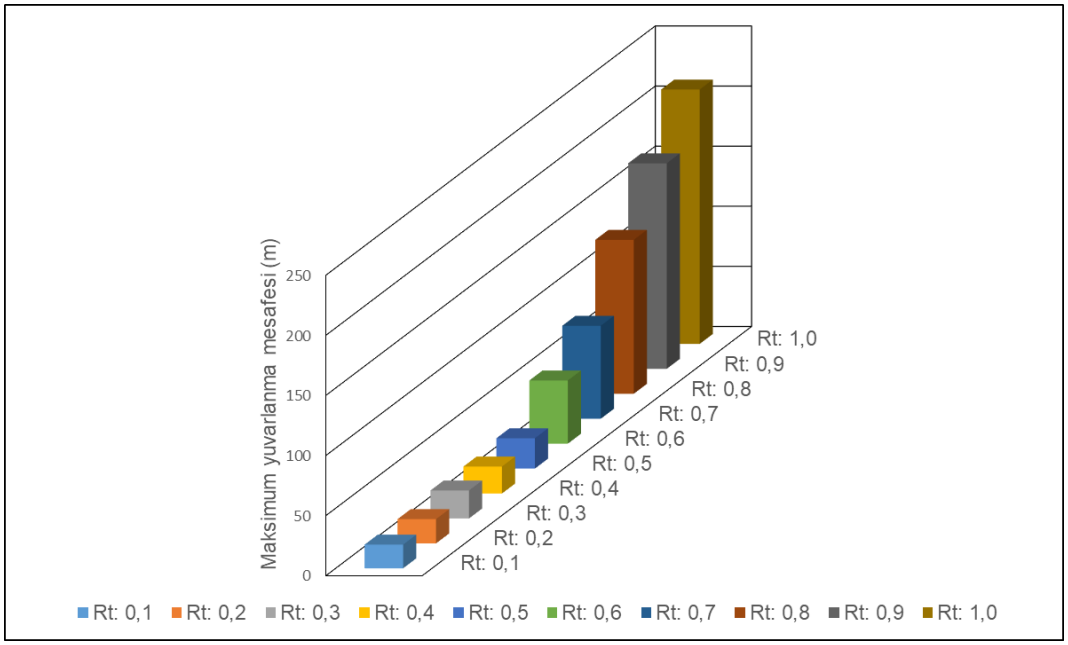
Şekil 18: 3 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

4 numaralı kaynak alanda R_t katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, R_t katsayısının değerinin artması ile maksimum yuvarlanma mesafesinin genel olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. R_t: 0,1 seviyesinde 19,68 m mesafede durma noktasına ulaşan kaya bloğu, R_t: 0,5 seviyesinde 25,24 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşmıştır. Maksimum yuvarlanma mesafesinde R_t: 0,5 seviyesine kadar düşük miktarlarda artışların olduğu belirlenmiş ve R_t: 0,6 seviyesinde 52,57 m mesafe ile iki kat fazla artış göstermiştir. R_t: 0,6 seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde kayda değer artışların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 19). R_t: 1,0 seviyesinde yapılan analizlerde düşen kaya bloğu 210,29 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşmış ve diğer noktasal kaynak alanlarında olduğu gibi yüksek mesafelere ulaşmadığı belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde, R_t katsayısının 0,1 ile 0,7 değerleri arasında 195,66 kJ maksimum kinetik enerji miktarı ile herhangi bir artış veya azalış tespit edilememiştir. R_t: 0,8 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında yüksek miktarlarda artışların olduğu ve R_t: 0,9 seviyesinde yaklaşık iki kat artış meydana gelerek 411,86 kJ'lük kinetik kinetik enerji kayıt altına alınmıştır. R_t: 1,0 seviyesinde ise düşen kaya bloğu 539,25 kJ maksimum kinetik enerji miktarına ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 2). RocPro3D yazılımında yapılan incelemeler neticesinde R_t: 0,9 ve 1,0 seviyelerinde yapılan analizlerde, kaya bloğu engele çarpıp yön değiştirmeden önce maksimum kinetik enerji miktarlarına ulaşmış ve engele çarptıktan sonra kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü kaybettiği gözlenmiştir. Bu durum maksimum yuvarlanma mesafesini de etkileyerek kaya bloğunun çok yüksek durma mesafelerine ulaşmamasına neden olduğu tespit edilmiştir.

4 numaralı kaynak alana ait maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, R_t: 0,6 seviyesine kadar 2,3 m sıçrama yüksekliğinin sabit kaldığı ve R_t: 0,7 seviyesinden itibaren artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. R_t: 1,0 seviyesinde 12,09 m ile en yüksek sıçrama yüksekliğine ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 2). R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 arasındaki değerlerinde yapılan analizlerde, R_t: 0,7 seviyesinden itibaren farklı sıçrama yüksekliklerinin görülmesinin nedeni, R_t katsayısının artması ile düşen kaya bloğunun kinetik enerji miktarı artmakta ve yuvarlanma hattı değişmektedir. Bu nedenle çalışma sahamızda daha önceden çok fazla düşmüş kaya bloğu bulunduğundan dolayı sürekli sıçrama yüksekliklerinin miktarının değişmekte olduğu gözlenmiştir.

4 numaralı noktasal kaynak alanında R_t katsayısının farklı değerleri ile yapılan analizlerde, R_t katsayısının en çok etkilediği parametrenin maksimum yuvarlanma mesafeleri olduğu ve R_t katsayısının yüksek değerlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri ve maksimum sıçrama yüksekliklerinin de etkilendiği tespit edilmiştir.

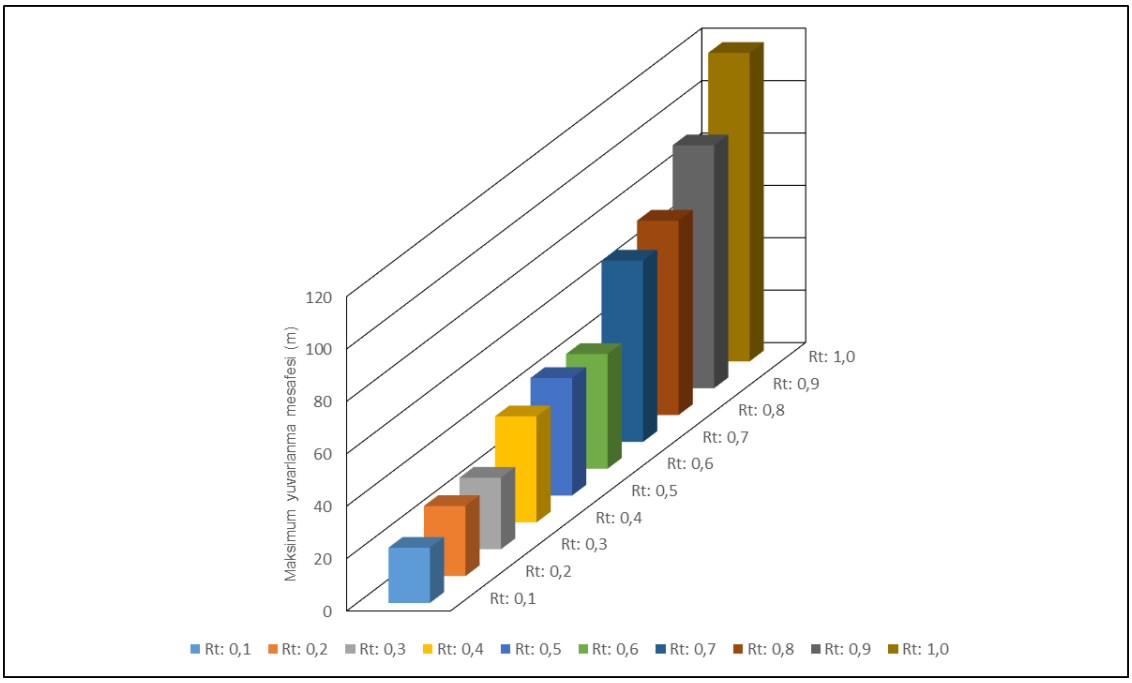


Şekil 19: 4 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

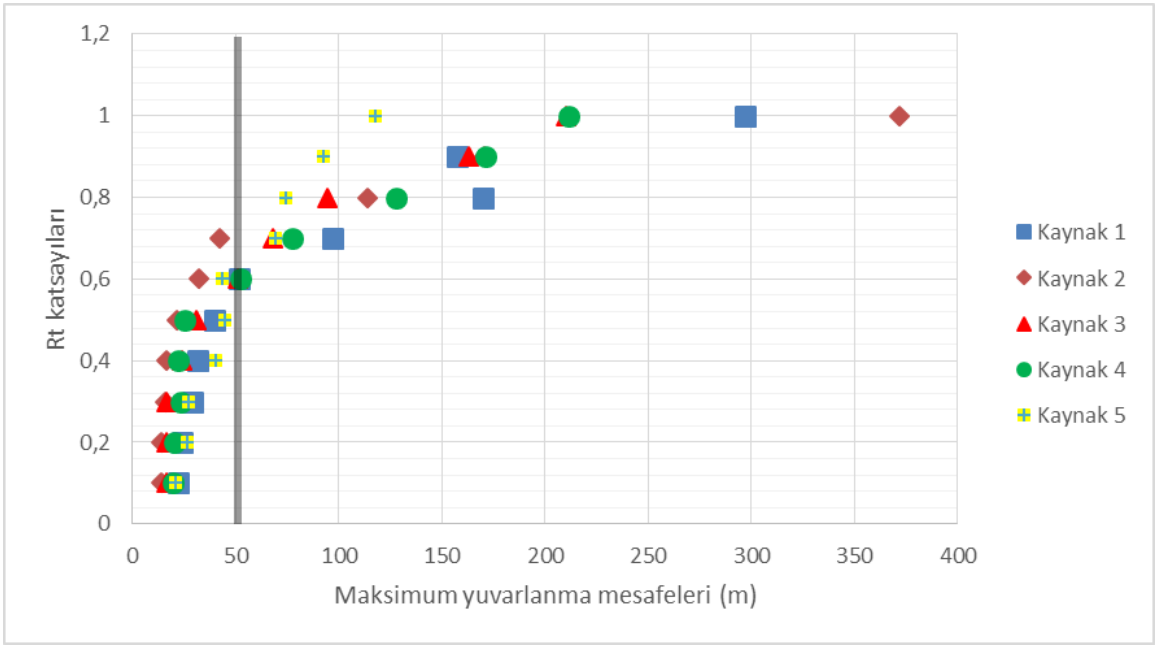
5 numaralı kaynak alanda sayısal yüzey modeli üzerinde yapılan kaya düşme analizlerinde, R_t: 0,1 seviyesinde 21,07 m ve R_t: 0,6 seviyesinde 43,78 m mesafede durma mesafesine ulaştığı belirlenmiştir. R_t: 0,1 ile 0,6 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde küçük miktarlarda artışların olduğu ve R_t: 0,7 seviyesinden itibaren değerlerin daha da arttığı tespit edilmiştir (Şekil 20). R_t: 1,0 seviyesinde 117,72 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşan blok, 4 numaralı kaynak alanda olduğu gibi, R_t: 0,9 ile 1,0 seviyelerinde yuvarlanma hattında bir engele çarparak kinetik enerjisini kaybettiği belirlenmiştir. Bundan dolayı 5 numaralı noktasal kaynak alanları, diğer kaynak alanlarına göre en düşük maksimum yuvarlanma mesafelerine sahip olduğu gözlenmiştir (Tablo 2).

5 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerden elde edilen verilerde, R_t: 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında 112,41 kJ maksimum kinetik enerji miktarında değişim gözlenmemiştir. Diğer kaynak alanlarının aksine, R_t: 0,4 değerinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artışların olduğu ve R_t: 1,0 seviyesinde 390,1 kJ maksimum kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır (Tablo 2). 5 numaralı noktasal kaynak alan maksimum kinetik enerji miktarlarında en düzenli artışların ve R_t katsayısının kinetik enerji miktarını en çok etkilediği kaynak alan olduğu belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, R_t katsayısının 0,1 seviyesinden itibaren sıçrama yüksekliklerinde artışların olduğu gözlenmiştir. R_t: 0,1 seviyesinde 2,81 m olan sıçrama yüksekliği, R_t: 0,8 seviyesine kadar küçük miktarlarda artışlar gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde R_t: 1,0 seviyesinde, R_t: 0,9 seviyesine göre yaklaşık iki kat artış meydana gelerek 10,26 m olarak tespit edilmiştir.

4 numaralı noktasal kaynak alanda olduğu gibi R_t katsayısı arttıkça kinetik enerji miktarı artan kaya bloğunun yuvarlanma hattında farklılıklar oluşmuş ve sıçrama yüksekliklerinde de artışların olduğu belirlenmiştir. 5 numaralı noktasal kaynak alanda, R_t katsayısının artması ile bütün parametreler etkilenmiş ve en çok etkilenen parametrenin maksimum yuvarlanma mesafeleri olduğu belirlenmiştir. Genel olarak noktasal kaynak alanları arasında en düzenli artışların olduğu ve bütün parametrelerin etkilendiği kaynak alanının, 5 numaralı noktasal kaynak alanı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 20: 5 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



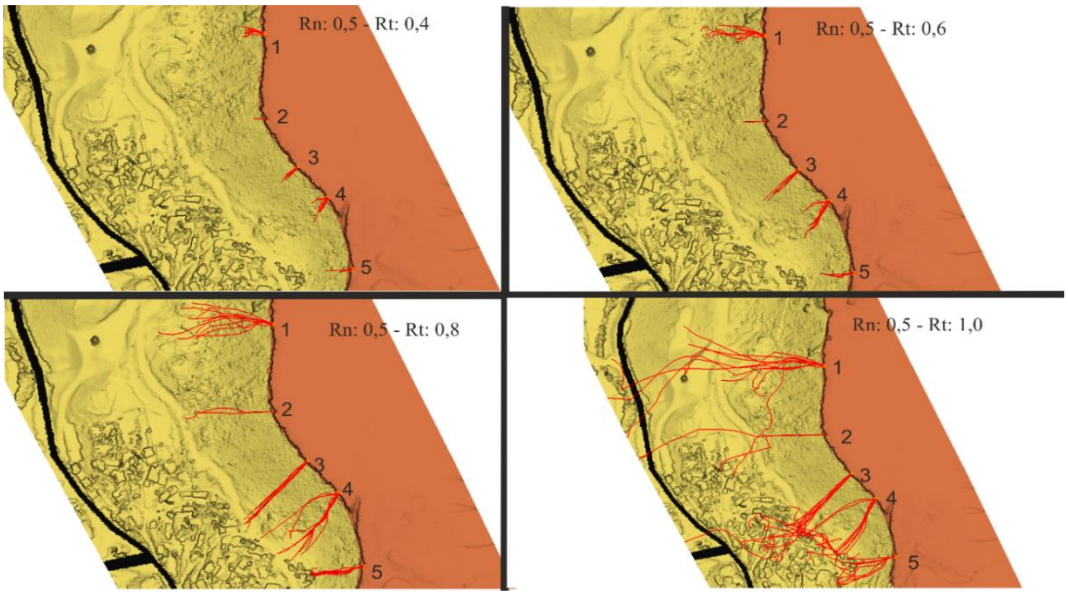
Şekil 21: 5 adet noktasal kaynak alana ait maksimum yuvarlanma mesafeleri ile R_t değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafiği

R_t katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1'er artış ile her kademede ve 5 farklı noktasal kaynak alanında yapılan analizler neticesinde, Şekil 21'de verilen R_t katsayıları ile 5 farklı kaynak zonunun maksimum yuvarlanma mesafeleri arasındaki dağılım grafiği incelendiğinde, R_t katsayısının 0,6 ve 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinin arttığı gözlenmiştir.

R_t katsayısının 0,1 ile 0,6 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde küçük miktarlarda artışların olduğu ve düşen kaya bloklarının durma mesafelerinin yüksek olmadığı tespit edilmiştir. Bütün kaynak alanlarında genellikle R_t katsayısının 0,6 – 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi artışların olduğu ve kaya bloğunun çok yüksek miktarda durma mesafelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle R_t: 1,0 seviyesinde yapılan analizlerde maksimum yuvarlanma mesafeleri yüksek miktarlara ulaşmış ve bu seviyedeki analizlerin gerçeklikten uzaklaştığı tespit edilmiştir. Çünkü kaynak zondan süreksizlik yüzeyleri boyunca duraylılığını kaybederek harekete geçen kaya bloğu, serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra çarpma etkisi altında kinetik enerjisinden hiç kayıp olmaksızın hareketine devam ettiği tespit edilmiştir. Genel olarak kaya düşme sahalarında sayısal yüzey modelleri üzerinde yapılacak kaya düşme analizlerinde R_t katsayısının doğru ve sahaya en uygun değerde seçilmesi, bu sahalarda kaya düşme mekanizmasının en net şekilde anlaşılabilmesi ve iyileştirme çalışmalarının doğru bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır. Çünkü R_t katsayısının sahaya uygun seçilemediği durumlarda parametrelerde oluşabilecek farklılıklar net bir şekilde ortaya konulmuştur. Dolayısıyla R_t katsayısının maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde direkt olarak etkili olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3: Noktasal kaynak alanlarına ait yanal saçılım oranları

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	R_t: 0,1	R_t: 0,2	R_t: 0,3	R_t: 0,4	R_t: 0,5	R_t: 0,6	R_t: 0,7	R_t: 0,8	R_t: 0,9	R_t: 1,0
1 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	8,09	10,16	14,08	17,26	24,48	36,08	38,48	55,15	128,05	312,08
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,69	23,28	28,46	33,58	46,68	92,52	102,60	164,04	210,52	389,78
	Yanal saçılım oranı	0,39	0,44	0,49	0,51	0,52	0,39	0,38	0,34	0,61	0,80
2 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	3,53	3,81	3,31	3,06	3,84	1,75	56,21	19,74	69,83	132,74
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	16,43	17,34	18,27	19,05	24,51	33,47	97,85	127,37	224,29	317,85
	Yanal saçılım oranı	0,21	0,22	0,18	0,16	0,16	0,05	0,57	0,16	0,31	0,42
3 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	12,16	15,00	19,47	16,35	21,27	23,78	28,31	16,11	66,78	226,22
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	17,27	17,74	21,95	25,06	35,17	52,02	67,73	91,22	144,30	300,12
	Yanal saçılım oranı	0,70	0,85	0,89	0,65	0,60	0,46	0,42	0,18	0,46	0,75
4 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	18,24	20,17	24,62	36,19	45,43	48,46	26,03	62,18	63,41	139,55
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	16,66	17,30	19,96	26,03	35,04	42,52	69,11	112,69	108,68	161,15
	Yanal saçılım oranı	1,10	1,17	1,23	1,39	1,30	1,14	0,38	0,55	0,58	0,87
5 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	10,02	13,12	15,78	24,06	28,15	31,48	21,47	12,56	43,19	113,58
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,36	26,25	26,63	39,77	42,84	49,32	65,27	74,34	89,60	134,13
	Yanal saçılım oranı	0,49	0,50	0,59	0,60	0,66	0,64	0,33	0,17	0,48	0,85



Şekil 22: Saçılım miktarlarının belirlenebilmesi için kaynaklardan 10 adet blok düşürülmesi sonucunda kaya bloklarının izlediği hatlar (R_n:0,5, R_t:0,4-0,6-0,8-1,0)

Yanal saçılım etkisi, topoğrafyanın pürüzlülüğü tarafından etkilense de çalışma kapsamında arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının yanal saçılım oranları üzerindeki etkisinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Yanal saçılım oranlarını hesaplayabilmek için her noktasal kaynak alanından 10 adet kaya bloğu düşürülerek R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Yapılan analizler neticesinde Tablo 3'de görüldüğü üzere, 1 numaralı kaynak alanda R_t katsayısı arttıkça en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafesinin de arttığı belirlenmiştir. Ayrıca R_t katsayısının yanal saçılım oranına etkisinin yuvarlanma mesafesi kadar olmadığı tespit edilmiştir. 2 ve 3 numaralı kaynak alanda yanal saçılım oranlarında düzensiz bir veri setinin olduğu ve R_t katsayısının yanal saçılım oranı üzerinde etkisi belirlenememiştir. 4 numaralı kaynak alanın verileri incelendiğinde, yanal saçılım oranının en yüksek olduğu ve genellikle R_t katsayısının düşük değerlerinde yüksek oranlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca R_t katsayısının değeri arttıkça yuvarlanma mesafesi, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafeye göre daha çok arttığından dolayı R_t katsayısı yuvarlanma mesafesine daha çok etki ettiği gözlenmiştir. 5 numaralı kaynak alanda yanal saçılım oranlarında düzenli bir veri setinin olmadığı belirlenmiştir. Genel olarak verilere bakıldığında, R_t katsayısının yanal saçılım oranlarına, yuvarlanma mesafelerinde olduğu gibi direkt olarak etkili olmadığı belirlenmiştir. Çünkü R_t katsayısının artması ile yanal saçılım oranlarında düzenli bir artış veya azalış belirlenememiştir.

3.2. Normal (R_n) Geri Verme Katsayısının Etkisi

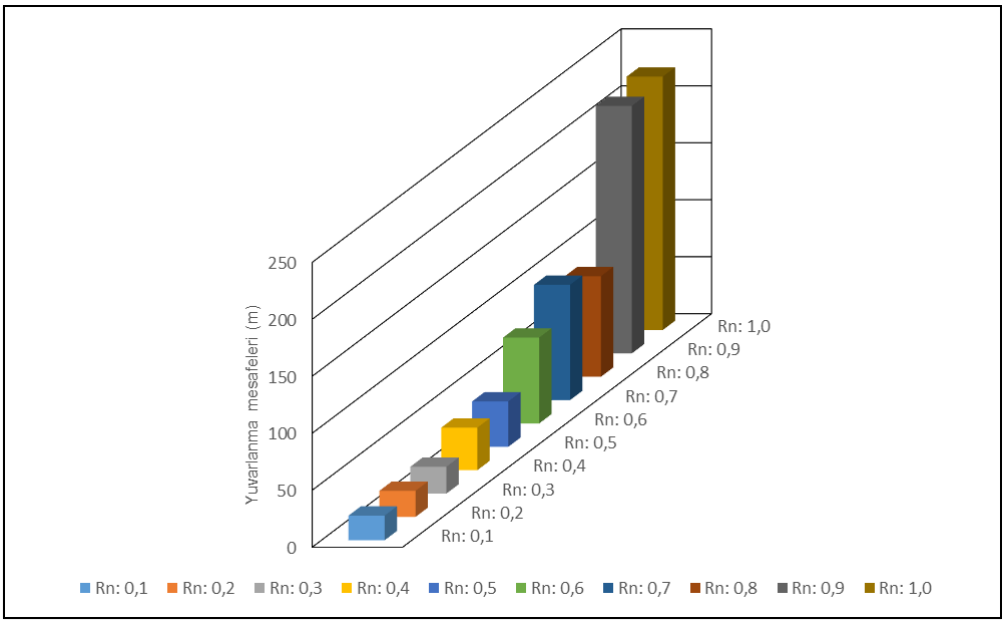
Yapılan analizlerde tanjant geri verme katsayısı (R_t) 0,5 değerinde sabit tutularak normal geri verme katsayısı (R_n) 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1'lik miktarlarda artırılarak her kademede analizler bütün noktasal kaynak alanları için tekrarlanmıştır (Şekil 24).

1 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde Tablo 4'de görüldüğü üzere R_n: 0,1 seviyesinde 21,61 m ve R_n: 0,7 seviyesinde 75,35 m maksimum yuvarlanma mesafesi gözlenmiştir. R_n katsayısının 0,1 ile 0,7 değerleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde devamlı artış olduğu belirlenmiştir. Özellikle R_n: 0,5 değerinden itibaren artış miktarlarının yüksek miktarlarda olduğu gözlenmiştir. R_n: 0,8 seviyesinde 88,24 m ile Rn: 0,7 seviyesine göre azalış olduğu tespit edilmiştir. Düşen kaya bloğu R_n: 0,8 seviyesine göre R_n: 0,9 seviyesinde iki kattan fazla artış göstererek 217,15 m durma mesafesine ulaştığı belirlenmiş ve R_n: 1,0 seviyesinde 222,38 m maksimum yuvarlanma mesafesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

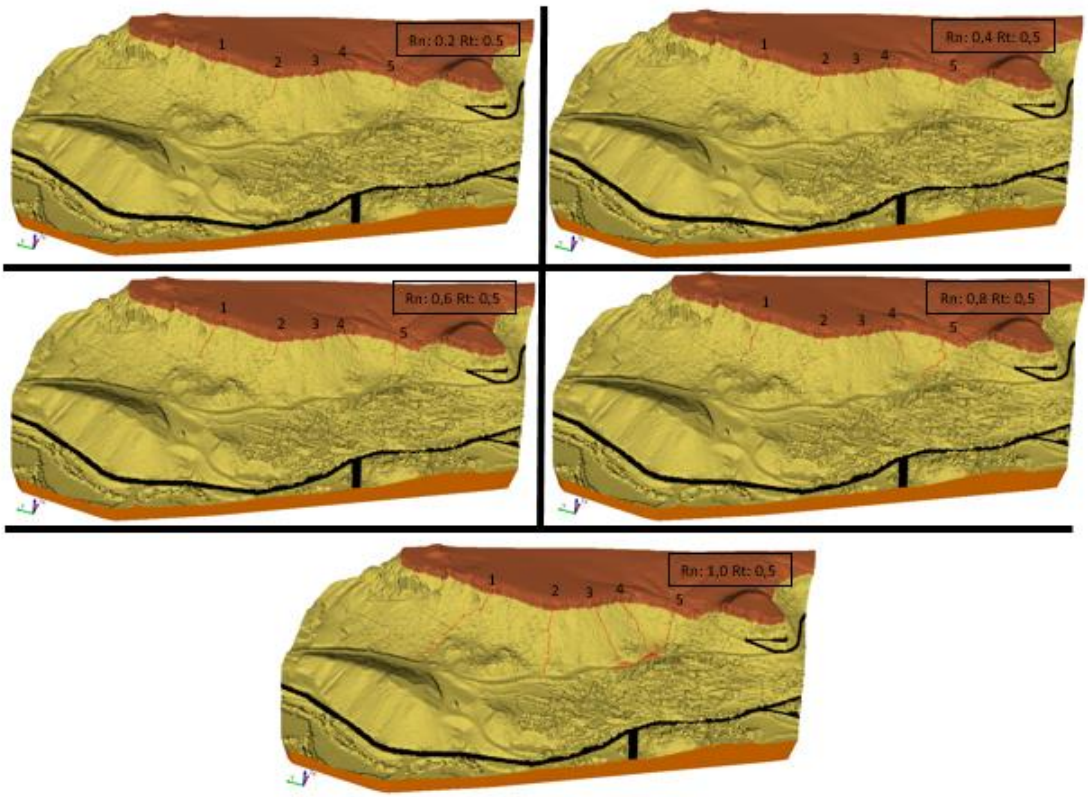
Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde, R_n: 0,1 ile 0,5 seviyeleri arasında 161,33 kJ değeri sabit kaldığı ve herhangi bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. R_n: 0,6 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artışların olduğu ve R_n: 0,8 seviyesinde 354,76 kJ değerin en yüksek maksimum kinetik enerji miktarı olduğu gözlenmiştir. R_n: 0,9 ve 1,0 seviyelerinde kinetik enerji miktarlarında azalışların olduğu tespit edilmiştir. 1 numaralı kaynak alanı için maksimum kinetik enerji miktarlarında düzensiz bir veri seti olduğu belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise kinetik enerji miktarlarına benzer şekilde R_n: 0,1 ile 0,5 değerleri arasında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n: 0,5 seviyesinden itibaren maksimum sıçrama yüksekliklerinde artışların olduğu ve R_n: 0,9 seviyesinde 10,57 m ile en yüksek değerin kayıt altına alındığı belirlenmiştir. Genel olarak 1 numaralı kaynak alanda parametrelerin değerlerinde düzenli bir veri setinin olmadığı ve R_n katsayısının 0,5 değerinden itibaren parametrelerde ciddi artışların olduğu belirlenmiştir (Şekil 23).

Tablo 4: 5 noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 – 1,0 değerleri arasındaki analizlerde parametrelerin ulaştığı maksimum miktarlar

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	R_n: 0,1	R_n: 0,2	R_n: 0,3	R_n: 0,4	R_n: 0,5	R_n: 0,6	R_n: 0,7	R_n: 0,8	R_n: 0,9	R_n: 1,0
Yuvarlanma mesafesi (m)	1. Kaynak Alanı	21,611	22,890	23,494	37,321	39,831	75,351	101,168	88,243	217,157	222,384
	2. Kaynak Alanı	40,171	40,654	31,807	32,711	21,279	32,441	18,771	19,653	44,182	131,61
	3. Kaynak Alanı	31,017	32,183	30,560	31,417	31,008	24,670	24,706	19,395	22,279	181,991
	4. Kaynak Alanı	29,721	29,581	25,587	26,625	25,246	46,182	42,509	58,069	130,352	314,121
	5. Kaynak Alanı	23,986	30,576	29,881	36,374	44,871	49,163	56,737	127,909	103,644	309,413
Kinetik Enerji Miktarları (kJ)	1. Kaynak Alanı	161,33	161,33	161,33	161,33	161,33	172,54	288,3	354,76	315,66	292,28
	2. Kaynak Alanı	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88
	3. Kaynak Alanı	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87
	4. Kaynak Alanı	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	376,29
	5. Kaynak Alanı	112,41	112,41	112,41	127,65	135,9	146,14	163,7	264,02	260,06	396,36
Sıçrama Yükseklikleri (m)	1. Kaynak Alanı	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	4,45	5,13	10,32	10,57	9
	2. Kaynak Alanı	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	2,82
	3. Kaynak Alanı	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,64
	4. Kaynak Alanı	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	5,51	12,19
	5. Kaynak Alanı	2,81	2,81	3,02	3,73	4,36	4,94	5,48	11,88	11,26	27,46

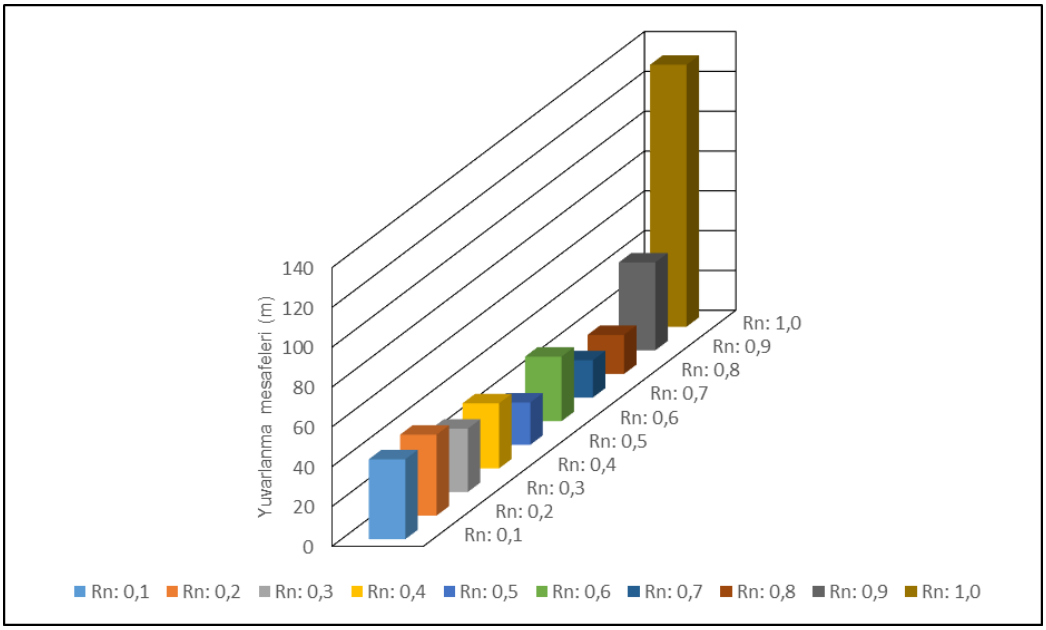


Şekil 23: 1 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



Şekil 24: Kaya düşme analizi sonucu R_n: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 ve R_t: 0,5 değerlerinde düşen kaya bloklarının yuvarlanma hattı

Yapılan analizlerde 2 numaralı noktasal kaynak alanında, R_n: 0,1 seviyesinde 40,17 m, Rn: 0,3 seviyesinde 32,71 m ve Rn: 0,9 seviyesinde 19,65 m olarak gözlenmiştir. R_n katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. Düşen kaya bloğunun R_n: 1,0 seviyesinde, R_n: 0,9 seviyesine göre yüksek bir artış meydana gelerek 131,61 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 25'de görüldüğü üzere 2 numaralı kaynak alan için R_n katsayısının artması ile maksimum yuvarlanma mesafesinde düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4).

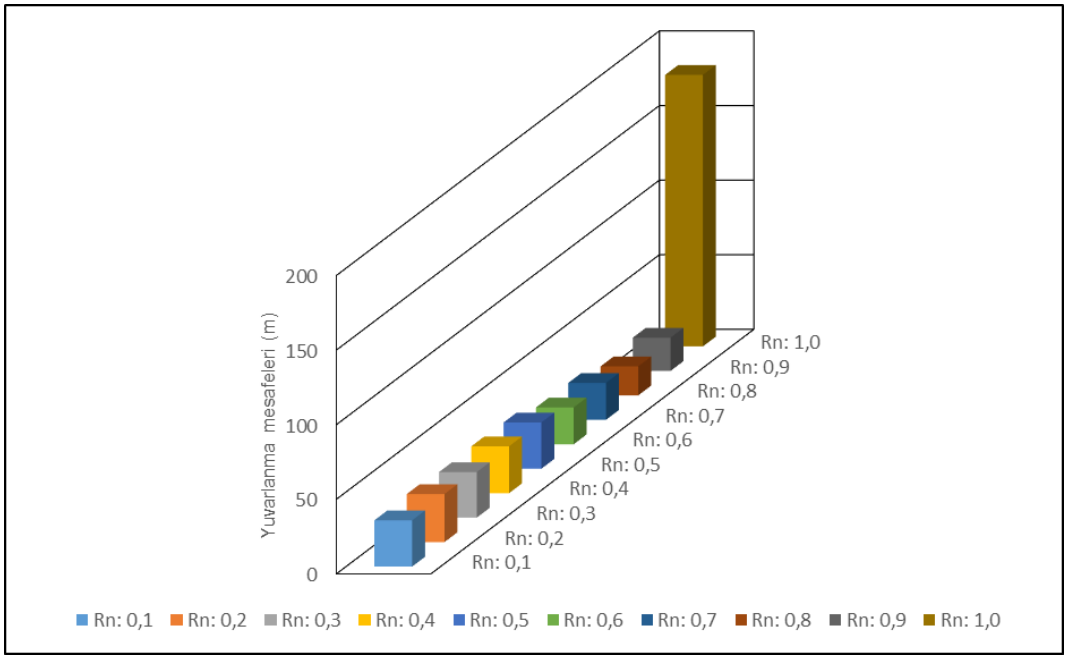


Şekil 25: 2 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

2 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum kinetik enerji miktarlarında herhangi bir değişim gözlenmemiş ve R_n: 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 151,88 kJ kinetik enerji miktarı tespit edilmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise düşen kaya bloğu, R_n: 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında 1,36 m sıçrama yüksekliği değeri sabit kalmış ve R_n: 1,0 seviyesinde 2,82 m değere ulaşmıştır (Tablo 4). Genel olarak verilere bakıldığında R_n katsayısının 2 numaralı noktasal kaynak alanında parametreler üzerinde düzenli bir veri seti oluşturmadığı belirlenmiştir.

3 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde, 2 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu gibi maksimum yuvarlanma mesafelerinde R_n: 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında küçük miktarlarda değişimlerin olduğu ve Rn katsayısının 0,5 seviyesinden 0,9 seviyesine kadar kaya bloğunun durma mesafelerinde azalmaların olduğu belirlenmiştir. Şekil 26'de görüldüğü üzere R_n: 1,0 seviyesinde ise çok yüksek bir artış ile 181,99 m maksimum yuvarlanma mesafesi gözlenmiş ve analizin bu seviyede gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde maksimum kinetik enerji miktarlarında 2 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu gibi 197,87 kJ değeri sabit kalmış ve herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise R_n: 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında 2,59 m değeri sabit kalmış ve R_n: 1,0 seviyesinde çok düşük bir artış ile 2,64 m değerine ulaşmıştır (Tablo 4). 3 numaralı noktasal kaynak alanında R_n katsayısının artması ile birlikte parametrelerde artış veya azalışın olduğu düzenli bir veri setinin olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 26: 3 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

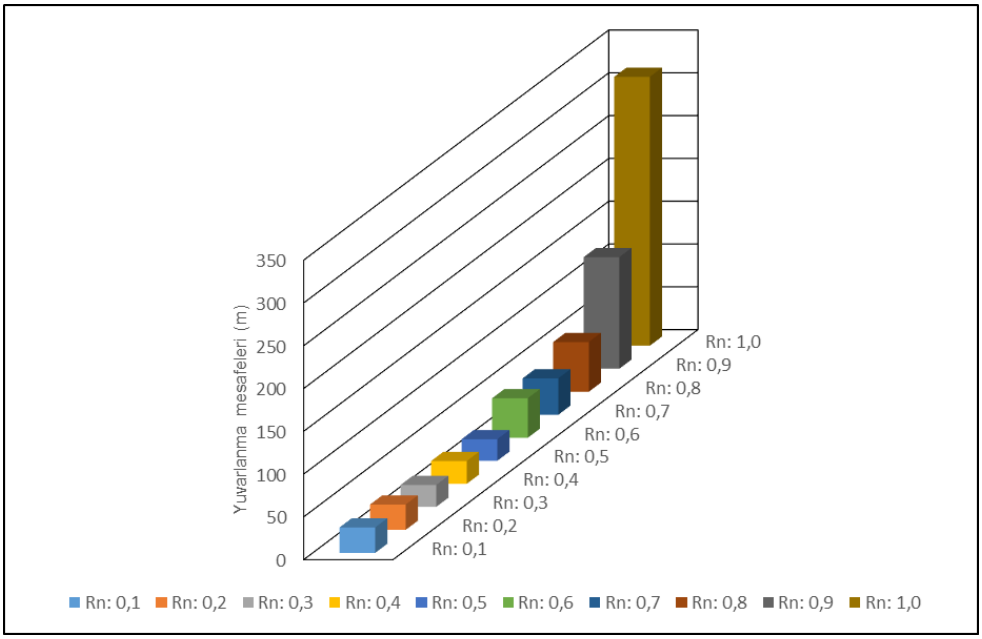
4 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde R_n: 0,1 seviyesinde 29,72 m olarak kayıt altına alınan maksimum yuvarlanma mesafesi, R_n: 0,7 seviyesine kadar düzenli bir artışın olmadığı gözlenmiştir. R_n: 0,7 seviyesinden itibaren kaya bloğunun durma mesafelerinde artışların olduğu ve R_n: 1,0 seviyesinde çok yüksek bir artış ile 314,12 m maksimum yuvarlanma mesafesi kayıt altına alınmıştır (Şekil 27).

Tablo 4'de görüldüğü üzere R_n katsayısının 0,9 seviyesine kadar 195,66 kJ değer ile maksimum kinetik enerji miktarlarında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n: 1,0 seviyesinde 376,29 kJ değer ile 4 numaralı noktasal kaynak alanı için en yüksek maksimum kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır. R_n katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında maksimum sıçrama yüksekliklerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n: 0,9 seviyesinden itibaren artış gösteren maksimum sıçrama yükseklikleri, R_n: 1,0 seviyesinde çok yüksek bir miktarda artış göstererek 12,19 m yüksekliğe ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 4). Genel olarak 4 numaralı noktasal kaynak alanı için 2 ve 3 numaralı kaynak alanlarında olduğu gibi parametrelerin değerlerinde düzenli bir veri setine rastlanmamıştır. R_n: 1,0 seviyesinde analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir.

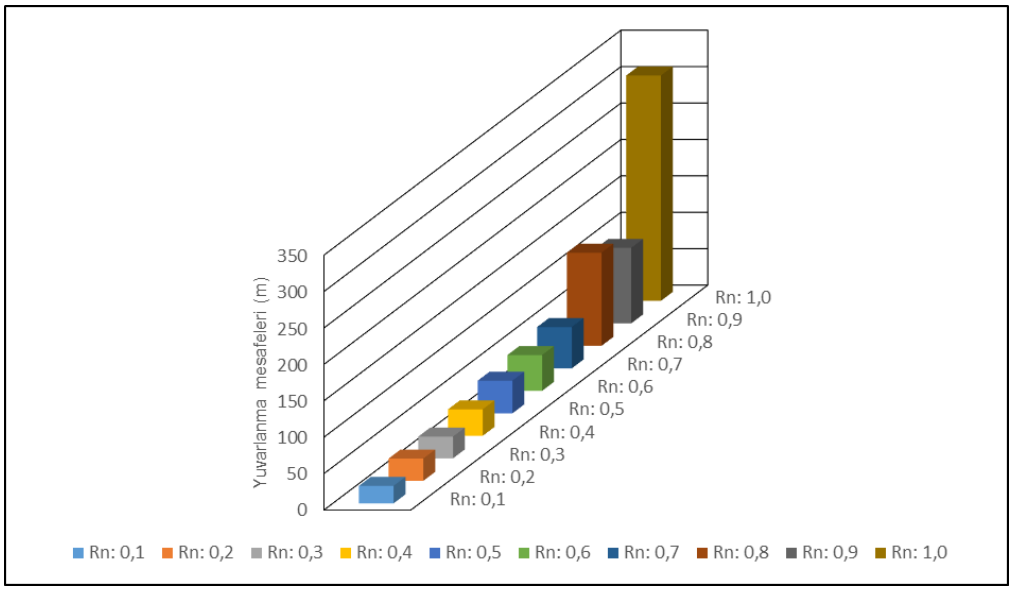
Yapılan analizler kapsamında 5 numaralı noktasal kaynak alanından düşen kaya bloğu, R_n: 0,1 seviyesinden itibaren R_n: 1,0 seviyesine kadar maksimum yuvarlanma mesafelerinde genellikle artış gösterdiği gözlenmiştir. Rn: 0,9 seviyesinde 130,35 m durma mesafesine sahip kaya bloğu, R_n: 1,0 seviyesinde yaklaşık 3 kat artış göstererek 309,41 m mesafeye ulaştığı belirlenmiştir. Dolayısıyla R_n: 1,0 seviyesinde analiz her ne kadar gerçeklikten uzaklaşsa da, 5 numaralı noktasal kaynak alanı, diğer kaynak alanlarına nazaran en düzenli veri setine ve artışa sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 28).

Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde, R_n: 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında 112,41 kJ değer sabit kalmış ve R_n: 0,3 seviyesinden itibaren sürekli olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. R_n: 0,9 seviyesinde 260,06 kJ olan kinetik enerji miktarı, R_n: 1,0 seviyesinde yüksek bir artış göstererek 396,36 kJ değere ulaştığı gözlenmiştir (Tablo 4). Diğer kaynak alanlara nazaran kinetik enerji miktarında en düzenli artışlar 5 numaralı noktasal kaynak alanında tespit edilmiştir. Maksimum sıçrama yükseklikleri ise R_n: 0,2 değerinden itibaren artış göstermiş ve R_n: 0,7 seviyesinde 5,48 m olarak kayıt altına alınmıştır. R_n: 0,8 seviyesinde yüksek bir artış göstererek 11,88 m yüksekliğe ulaşan kaya bloğu, R_n: 1,0 seviyesinde 27,46 m maksimum sıçrama yüksekliğine ulaşarak analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir (Tablo 4).

Genel olarak 5 numaralı kaynak alan, diğer kaynak alanlara nazaran R_n katsayısının değerinin artması ile birlikte parametrelerde en düzenli veri setini oluşturduğu belirlenmiştir. Fakat R_n katsayısının 1,0 değerinde parametrelerde ani artışların ve çok yüksek değerlerin olmasından dolayı analizin gerçeklikten uzaklaştığı gözlenmiştir.



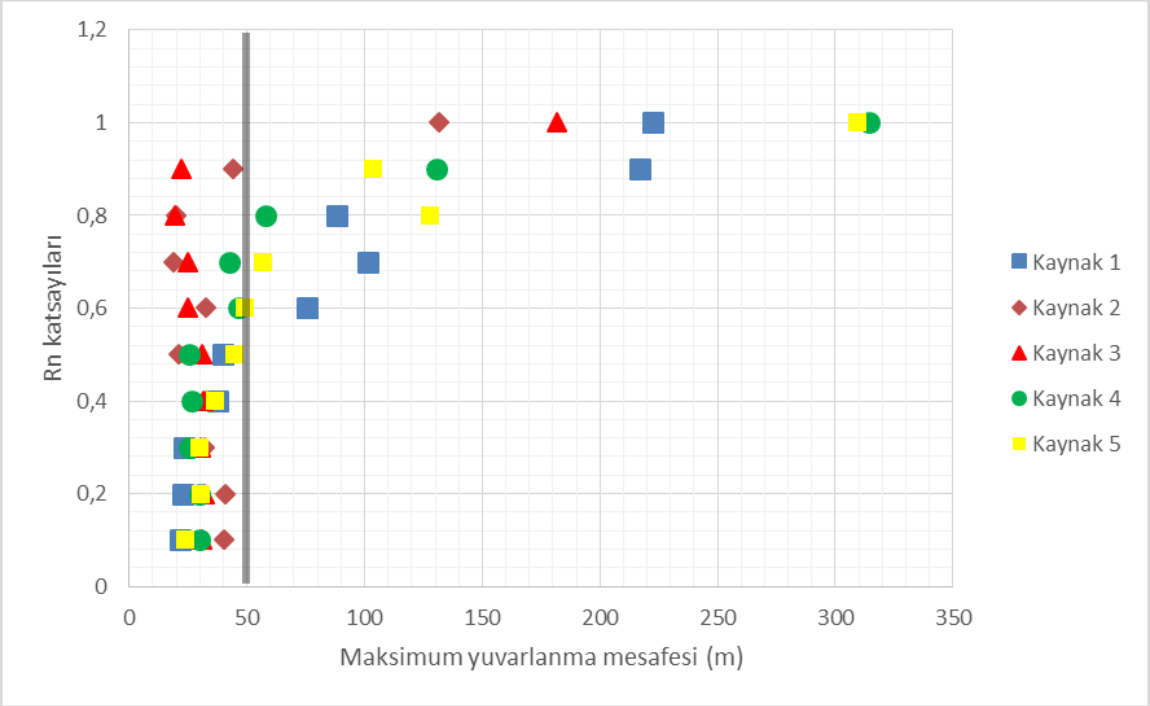
Şekil 27: 4 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



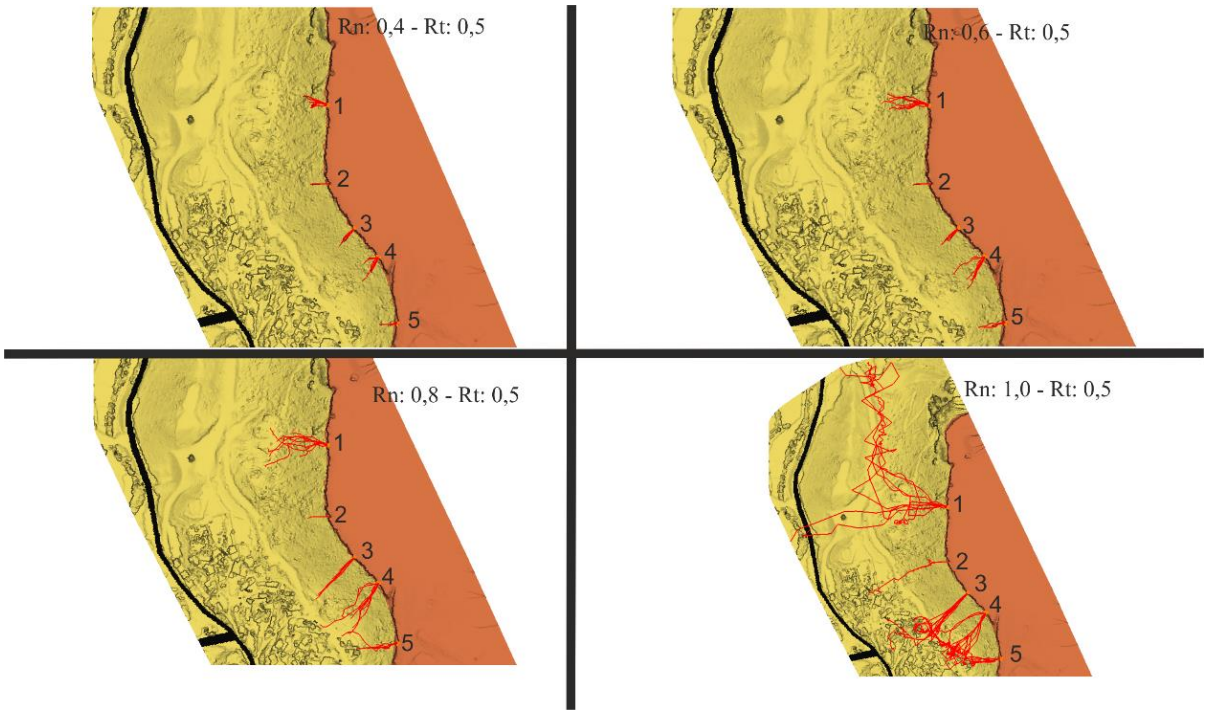
Şekil 28: 5 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

Normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, Şekil 29'de verilen dağılım grafiğinde görüldüğü üzere, Rn katsayısının 0,8 değerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde yüksek artışların olduğu belirlenmiştir.

Fakat maksimum yuvarlanma mesafelerinin artışa başladığı Rn katsayısının seviyesi 5 noktasal kaynak alanında farklı değerler olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla R_n katsayıları parametreler üzerinde düzenli bir veri seti oluşturmadığı ve parametreler üzerinde R_t katsayısı kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. Özellikle maksimum yuvarlanma mesafelerinde R_t katsayısı R_n katsayısına nazaran daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 29: 5 adet noktasal kaynak alana ait maksimum yuvarlanma mesafeleri ile R_n değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafiği



Şekil 30: Saçılım miktarlarının belirlenebilmesi için kaynaklardan 10 adet blok düşürülmesi sonucunda kaya bloklarının izlediği hatlar (R_n: 0,4-0,6-0,8-1,0, R_t: 0,5)

Şekil 30'da görüldüğü üzere bütün noktasal kaynak alanlarından 10 adet kaya bloğu düşürelerek R_n katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde yanal saçılım oranları hesaplanmıştır.

Tablo 5'de görüldüğü üzere 1 numaralı noktasal kaynak alanında R_n katsayısının 0,8 seviyesinden itibaren yanal saçılım oranları artmış olup Rn katsayısının yüksek değerlerinde yanal saçılım oranına etki ettiği tespit edilmiştir. 3, 4 ve 5 numaralı noktasal kaynak alanlarının yanal saçılım oranları incelendiğinde, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafenin genellikle artış gösterdiği fakat yanal saçılım oranlarında düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla 2, 3, 4 ve noktasal kaynak alanlarında R_n katsayısının yanal saçılım oranına etki etmediği tespit edilmiştir.

Tablo 5: Noktasal kaynak alanlarına ait yanal saçılım oranları

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	R_n: 0,1	R_n: 0,2	R_n: 0,3	R_n: 0,4	R_n: 0,5	R_n: 0,6	R_n: 0,7	R_n: 0,8	R_n: 0,9	R_n: 1,0
1 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	12,92	14,39	25,37	24,90	24,48	40,29	52,06	76,19	196,77	466,96
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	25,78	28,52	46,84	47,08	46,68	81,25	95,62	116,03	176,08	380,07
	Yanal saçılım oranı	0,50	0,50	0,54	0,53	0,52	0,50	0,54	0,66	1,12	1,23
2 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	11,07	8,20	2,30	2,70	3,84	5,80	10,75	21,74	66,30	83,31
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	39,38	39,91	33,45	34,74	24,55	31,84	28,96	40,93	108,91	190,79
	Yanal saçılım oranı	0,28	0,21	0,07	0,08	0,16	0,18	0,37	0,53	0,61	0,44
3 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	9,05	13,53	20,77	12,59	21,27	23,21	65,16	66,62	83,20	120,59
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	21,49	25,98	36,07	28,99	35,19	30,94	64,06	72,90	96,00	191,88
	Yanal saçılım oranı	0,42	0,52	0,58	0,43	0,60	0,75	1,02	0,91	0,87	0,63
4 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	21,06	21,98	22,28	38,44	45,43	50,43	56,25	68,71	36,72	150,22
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,63	23,49	24,15	32,04	35,04	56,02	59,79	110,54	113,01	169,61
	Yanal saçılım oranı	1,02	0,94	0,92	1,20	1,30	0,90	0,94	0,62	0,32	0,89
5 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	7,94	15,84	16,62	20,80	32,18	31,33	38,23	79,32	33,65	177,67
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	23,33	29,84	29,16	35,48	43,97	47,26	54,15	105,18	86,48	211,99
	Yanal saçılım oranı	0,34	0,53	0,57	0,59	0,73	0,66	0,71	0,75	0,39	0,84

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, Tatlarin sayısal yüzey modeli üzerinde yapılan 3-boyutlu kaya düşme analizlerin de en önemli girdi parametrelerinden olan arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının, kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun parametreleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Normal geri verme (R_n) katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, 1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum yuvarlanma mesafeleri R_n: 0,5 değerinden itibaren artış gösterdiği ve R_n katsayısının 0,9 ile 1,0 seviyelerinde çok yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. 2 ve 3 numaralı noktasal kaynak alanlarında R_n: 0,8 ve R_n: 0,9 seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinin çok yüksek değerler aldığı ve bu seviyelere kadar düşük durma mesafelerinin olduğu tespit edilmiştir. 4 ve 5 numaralı noktasal kaynak alanlarında maksimum yuvarlanma mesafeleri genellikle artış göstermiş ve diğer kaynak alanlara nazaran daha düzenli bir veri seti oluşturduğu gözlenmiştir. R_n katsayısının genellikle 0,8 değerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafeleri yüksek değerlere ulaşmış ve R_n: 1,0 seviyesinde analizler gerçeklikten uzaklaşmıştır.

R_n katsayısının artması ile 1 ve 4 numaralı kaynak alanlarında maksimum kinetik enerji miktarları belirli seviyelere kadar sabit kalmış ve bu seviyelerden sonra artışa geçtiği belirlenmiştir. Maksimum kinetik enerji miktarlarında en düzenli artış 5 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak R_n katsayısının artması ile maksimum yuvarlanma mesafelerinde artışların meydana geldiği fakat maksimum kinetik enerji miktarları ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde düzenli bir veri setinin oluşmadığı belirlenmiştir. Böylelikle R_n katsayısının en çok maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde etkili olduğu açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca R_n katsayısının 1,0 değerinde yapılan analizlerde, analizin gerçeklikten uzaklaştığı gözlenmiştir.

R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, genellikle R_t katsayısının artması ile bütün noktasal kaynak alanlarında maksimum yuvarlanma mesafesinin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan analizlerin verileri incelendiğinde maksimum yuvarlanma mesafelerinde düzenli artışların olduğu bir veri seti oluşturduğu gözlenmiştir. R_t katsayısının 0,6 ile 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi artışların olduğu ve özellikle R_t: 1,0 seviyesinde yüksek miktarlarda durma mesafelerinin olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla R_t: 1,0 değerinde yapılan analizlerde analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir. Rt katsayısının değerinin artması ile bütün parametrelerde artışların olduğu fakat maksimum yuvarlanma mesafelerinde diğer parametrelere nazaran daha düzenli bir veri setinin olduğu belirlenmiştir.

R_t katsayısının değerinin artması ile maksimum kinetik enerji miktarları ve maksimum sıçrama yükseklikleri bazı seviyelere kadar sabit kalmış ve bu seviyelerden itibaren arttığı belirlenmiştir. R_t katsayıları ile yapılan analizlerde bütün noktasal kaynak alanlarında maksimum kinetik enerji miktarlarında değişimin olduğu ve R_n katsayısında bazı kaynak alanlarında olduğu gibi maksimum kinetik enerji miktarlarının bütün seviyelerde aynı kaldığı veri setlerinin bulunmadığı belirlenmiştir. Genel olarak tanjant geri verme katsayısı (R_t) bütün parametreleri etkilemekte ve maksimum yuvarlanma mesafelerini etkilediği ortaya konulmuştur. Ayrıca Normal (R_n) ve tanjant (R_t) geri verme katsayılarının artması ile en çok maksimum yuvarlanma mesafelerinde değişimler gözlenmiştir. Düşen kaya bloğunun durma noktasına kadar ulaştığı maksimum parametre miktarları incelendiğinde, R_t katsayısının R_n katsayısına oranla parametreler üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. R_n ve R_t katsayılarının 1,0 seviyelerinde, düşen kaya bloğu çarpma etkisi altında enerjisinden hiç kayıp vermeksizin hareketine devam ettiği için analizlerin bu seviyede gerçeklikten uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise kaynak zondan düşen bloğun topoğrafyaya çarptığında enerjisini hiç kaybetmiyormuş gibi davranmasıdır.

Yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düşen kaya bloğunun arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının belirli bir değere ulaştıktan sonra kinetik enerjilerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Kinetik enerjisi artan kaya bloğunun sıçrama yüksekliğinin de benzer oranda arttığı tespit edilmiştir.

Dinçer vd. (2016) aynı saha üzerinde yaptıkları çalışmada, topoğrafik haritadan sayısal yükseklik modeli üreterek kaya düşme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada İHA'dan elde edilen sayısal yükseklik modeline göre daha düşük çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modelinde yapılan analizlerde, parametreler daha yüksek değerler almıştır. Buna göre, kaya düşme sahalarında yapılacak kaya düşme analiz çalışmalarında sayısal yükseklik/yüzey modelinin çözünürlüğünün yüksek olması, sonuçların gerçekçiliğini de önemli oranda artırmaktadır.

Tatlarin yüzey modeli üzerinde yapılan kaya düşme analizlerinde, normal (R_n) ve tanjant (R_t) geri verme katsayılarının doğru seçiminin önemi ortaya konulmuştur. Kaya düşme riski bulunan sahalarda 3-boyutlu modeller üzerinde yapılan analizlerde arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının seçimi büyük önem arz etmektedir. R_n ve R_t katsayılarının farklı değerlerinde, kaynak zondan koparak harekete başlayan kaya bloğunun yuvarlanma hattındaki yön değiştirmeleri, maksimum enerji miktarı, sıçrama yüksekliği ve en önemlisi maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi farklar oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle maksimum yuvarlanma mesafelerinin artması ile düşen kaya bloğunun tehlike boyutu artmakta ve böylelikle yapılması planlanan iyileştirme ve önleme çalışmalarını etkilemektedir. Dolayısıyla kaya düşme riski bulunan sahalarda, kaya düşme mekanizmasının daha net anlaşılabilmesi ve yapılacak iyileştirme çalışmalarının en uygun şekilde yapılabilmesi için geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının sahaya en uygun ve doğru değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İbrahim UYKUN'un, Prof. Dr. Mutluhan AKIN ve Dr. Öğr. Üyesi Ogün Ozan VAROL'un danışmanlığında, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde, "Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin 3-Boyutlu Modellerle Değerlendirilmesi" isimli Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2022). *AFAD Türkiye'nin Afet Risk Haritasını Çıkardı*. https://www.afad.gov.tr/afad-turkiyenin-afet-risk-haritasini-cikardi-merkezicerik

Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A. Ö., Akin, M., & Topal, T. (2018). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, *43*(2), 211–232. https://doi.org/10.24232/jmd.655005

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akın, M. K., & Topal, T. (2019). *Kapadokya (Nevşehir) Bölgesindeki Kaya Düşmelerinin Arazı Lazer Taraması (TLS) Yardımıyla 3-Boyutlu (3-D) Analizi ve Kaya Düşme Tehlike Haritalarının Oluşturulması* (Proje No: UDAP-G-16-03). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP).

Akın, M., Dinçer, İ., & Orhan, A. (2022). Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Analizi: Kapadokya Bölgesinden Bir Örnek. *Yer Mühendisliği 17*, 46–59.

Alemdag, S., Bostanci, H. T., & Gacener, E. (2022a). GIS-based determination of potential instabilities and source rock areas on the Torul-Kürtün (Gümüşhane) motorway, rockfall, and protection structure analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81*(1), Article 30. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02498-7

Alemdag, S., Kara, R. T., & Bostancı, H. T. (2022b). Evaluation of potential rock falls with three-dimensional analysis: Example of Oltanbey and Hasanbey districts (Gümüşhane city center). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 169*(169), 87–104. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.977928

Ashayer, P., (2007). *Application of Rigid Body Impact Mechanics and Discrete Element Modeling To Rockfall Simulation* [Doctoral theses, University of Toronto]. Doctoral and Master theses prior to ETD mandate (pre-2009). http://hdl.handle.net/1807/112209

Atabey, E., Tarhan, N., Papak, İ., Akarsu, B., & Taşkıran, A. (1987). *Ortaköy, Tuzköy (Nevşehir) – Kesikköprü (Kırşehir) yöresinin jeolojisi* (MTA Rapor No: 8156). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Atabey, E. (1989a). *MTA 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H18 (K32) Paftası*. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi.

Atabey, E. (1989b). *MTA 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H19 (K33) Paftası*. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi.

Azzoni, A., La Barbera, G., & Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 32*(7), 709–724. https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00018-C

Batman, B. (1978). Haymana kuzeyinin jeolojik evrimi ve yöredeki melanjın incelenmesi – I. Stratigrafi Birimleri. *Yerbilimleri, 4*(1-2), 95–124.

Bounab, A., El Kharim, Y., & El Hamdouni, R. (2022). The Suitability of UAV-Derived DSMs and the Impact of DEM Resolutions on Rockfall Numerical Simulations: A Case Study of the Bouanane Active Scarp, Tétouan, Northern Morocco. *Remote Sensing, 14*(24), Article 6205. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.977928

Castelli, M., Torsello, G., & Vallero, G. (2021). Preliminary modeling of rockfall runout: Definition of the input parameters for the QGIS plugin QPROTO. *Geosciences, 11*(2), Article 88. https://doi.org/10.3390/geosciences11020088

Christen, M., Bartelt, P., & Gruber, U. (2007). RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2007*(4), 289–292.

Crosta, G.B., & Agliardi, F., (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 4*(4), 583–598. https://doi.org/10.5194/nhess-4-583-2004

Çapar, N. (2018). *Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi* [Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi] YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards, 82*, 1075–1098. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2234-z

Dorren, L. K. A. Maier, B., Putters, U. S., & Seijmonsbergen, A. C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology, 57*(3-4), 151–167. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4

Douglas, G. R. (1980). Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, North Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms 5*(2), 123–29. https://doi.org/10.1002/esp.3760050203

Evans, S. G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of Talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal 30*(4), 620–636. https://doi.org/10.1139/t93-054

Fanos, A., & Pradhan, B. (2018). Laser Scanning Systems and Techniques in Rockfall Source Identification and Risk Assessment: A Critical Review. *Earth Systems and Environment, 2*, 163–182. https://doi.org/10.1007/s41748-018-0046-x

Gardner, J. S. (1983). Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rocky Mountains. *Zeitschrift Für Geomorphologie, 27*, 311–324.

Gökçe, O., Özden. Ş., & Demir, A. (2008). *Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri*. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü.

Grove, J. M. (1972). The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway during the little ice age. *Arctic and Alpine Research, 4*, 131–38. https://doi.org/10.1080/00040851.1972.12003633

Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Technical note: preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System* Science, *11*(3), 819–828. https://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011

Kalender, A. (2017). *Konik yayılım yaklaşımıyla kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem önerisi* [Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Lambert, S., & Nicot, F. (2011). *Rockfall Engineering*. John Wiley & Sons.

Lan, H., Martin, D., & Lim, C. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences, 33*(2), 262–279. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013

Luckman, B. H. (1976). Rockfalls and rockfall inventory data: some observations from surprise valley, jasper national park. *Earth Surface Processes, 1*(3), 287–298. https://doi.org/10.1002/esp.3290010309

Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology, 58*(2), 109–124. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00049-1

Polat, A. (2020). CBS tabanlı 3b kaya düşmesi analizi ve veri hazırlama süreçleri: Kavak köyü (Sivas-Türkiye) örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25*(3), 1205–1222. https://doi.org/10.17482/uumfd.769109

Quanterra. (2003). *Conefall (v.1.0)*. https://quanterra.ch/portfolio-items/conefall/

Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Board, 17*,13–27.

RocPro3D. (2014). *RocPro3D software*. http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php

Seymen, İ. (1981). Karaman (Kırşehir) dolayında Kırşehir Masifinin stratigrafisi ve metamorfizması. *TJK Bülteni, 24*(2), 101–108.

Schweigl, J., Ferretti, C., & Nössing, L. (2003). Geotechnical charaterization and rockfall simulation of a slope: A practical case study from South Tyrol (Italy). *Engineering Geology, 67*, 281–296. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00186-2

Scioldo, G. (2006). *User guide ISOMAP & ROTOMAP – 3D surface modelling and rockfall analysis*. http://www.geoandsoft.com/manuali/english/rotomap.pdf

Statham, I. (1979, March 29–30). *A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and field experiments* [Conference presentation]. International Colloquium of Physical and Geomechanical Models, Bergamo, Italy.

Stronge, W. J. (2000). *Impact Mechanics*. Cambridge University Press.

Turner, A. K., & Schuster, R. L. (2012). *Rockfall: Characterization and Control.* Transportation Research Board.

Utlu, M., Öztürk, M. Z., & Şimşek, M. (2020). Emli Vadisi'ndeki (Aladağlar) Talus Depolarının Kantitatif Analizlere Göre İncelenmesi. In S. Birinci, Ç. Kıvanç Kaymaz & Y. Kızılkan (Eds.), *Coğrafî Perspektifle Dağ ve Dağlık Alanlar (Sürdürülebilirlik-Yönetim-Örnek Alan İncelemeleri)* (ss.51–72). Kriter Yayınevi.

Utlu, M., & Akgümüş, M. F. (2023). QGIS-Qproto yazılımı ile Konik Temelli 3 Boyutlu Kaya Düşme Modellemesi: Mazı Köyü Örneği-Nevşehir (Ürgüp). *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 9*(2), 311–323. https://doi.org/10.21324/dacd.1292541

Uykun, İ. (2024). *Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin 3-Boyutlu Modellerle Değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides, Analysis and Control* (pp. 11–33). National Academy of Sciences.

Varol, O. O., Akın, M., Orhan, A., & Dincer, İ. (2023). Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Olasılıksal Analizlerle ve Ampirik Yöntemlerle Değerlendirilmesi: Kayseri – Soğanlı Yerleşim Yeri Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 47*(1), 1–28. https://doi.org/10.24232/jmd.1267107

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall Characterization and Structural Protection-a Review. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 11*(9), 2617–2651. https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011

Wyllie, D. C. (2015). *Rock Fall Engineering*. CRC Press.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 318–326, DOI: 10.21324/dacd.1585493

İstanbul Asya Yakası'nda DMA Tabanlı Fizikî Su Kayıpları Yönetimi ve Altyapı Sızıntı Endeksi Analizi

Mehmet Melih Koşucu [1,*]

[1]*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.*

Özet

Fizikî su kayıpları, genellikle su dağıtım şebekelerinde boru kırıkları ile boru bağlantı noktalarındaki ve depolama tesislerindeki sızıntılar nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu kayıpların yönetimi, yalnızca altyapının çalışma koşullarını iyileştirmek için değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve toplumsal faydalar sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, İstanbul Asya Yakası'nda yer alan bir DMA'da (İzole Ölçüm Bölgesi) fizikî su kayıplarının analizi ve yönetiminin nasıl gerçekleştirildiği anlatılmaktadır. Su dağıtım şebekelerinde sıkça görülen fizikî kayıpların azaltılıp yönetilebilmesi için minimum gece debisi (MNF), sızıntı debisi ve Altyapı Sızıntı Endeksi (ILI) analizlerinden yararlanılmıştır. 2023 ve 2024 yıllarına ait SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) verileri kullanılarak elde edilen debi verileriyle, gece saatlerinde vuku bulan minimum debi değerleri analiz edilmiş ve su kayıplarının mertebesi tahmin edilmiştir. Aktif sızıntı kontrolünün (akustik dinleme ve boru onarımı) ardından DMA ortalama giriş basıncının 65 m'den 60 m seviyesine indirilmesi sayesinde, su kaybı oranının % 29.8'den % 18.9'a düşürülmesi sağlanmıştır. Ayrıca, ILI değeri, yapılan iyileştirme çalışmaları ile 8.7'dan 5.6'ya indirilmiştir. Böylece DMA tabanlı su kaybı analizi ve yönetimi vesilesiyle, üzerinde çalışılan su dağıtım sisteminin daha verimli surette işletilebilmesi mümkün olmuştur. Bu çalışma kapsamında, özellikle büyükşehirlerde DMA tabanlı basınç ve debi izleme, aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi tekniklerinin sızıntıları azaltmada önemli birer araç olduğu vurgulanmaktadır. Ortaya konan bulgular, ülkemizde su kayıplarının azaltılmasına yönelik politikalara katkı sağlayabilecek sürdürülebilir su yönetimi için yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Sözcükler

Su Kayıpları, DMA, Altyapı Sızıntı Endeksi, Su Dağıtım Şebekeleri, Aktif Sızıntı Kontrolü

DMA Based Physical Water Loss Management and Infrastructure Leakage Index Analysis in Asian Side of Istanbul

Abstract

Physical water losses are usually caused by pipe breaks in water distribution networks and leaks at pipe joints and storage facilities. Managing these losses is critical to not only improve the operating conditions of infrastructure, but also to deliver economic, environmental and societal benefits. This study presents how water losses were analysed and managed in a District Metered Area (DMA) located on the Asian side of Istanbul. Minimum night flow rate (MNF), leakage flow rate and infrastructure leakage index (ILI) analyses were used to reduce and manage the physical losses frequently seen in water distribution networks. For the years 2023 and 2024, flow data obtained from SCADA measurements were used to analyze the minimum flow values occurring at night and to estimate the level of water losses. By reducing the average inlet pressure of the DMA from 65 m to 60 m together with active leakage control (acoustic listening and pipe repair), the water loss rate was reduced from 29.8 % to 18.9 %. In addition, the infrastructure leakage index value was reduced from 8.7 to 5.6 with the improvement efforts. Thus, through DMA-based water loss analysis and management, it has been possible to operate the studied water distribution system more efficiently. In this study, it is emphasised that DMA-based pressure and flow monitoring, active leakage control and pressure management techniques are important tools to reduce water losses, especially in metropolitan areas. The findings are guiding for sustainable water management that can contribute to policies to reduce water losses in our country.

Keywords

Water Losses, DMA, Infrastructure Leakage Index, Water Distribution Systems, Active Leakage Control

1. Giriş

Dünyadaki nüfusun ve şehirleşmenin artışı, su kaynakları üzerindeki baskıyı giderek şiddetlendirmekte ve bu durum, su kayıplarının etkin surette yönetilmesini gerekli kılmaktadır (Şişman & Kızılöz, 2020). Zira metropollerin ve şehirlerin sürdürülebilirliği için su kayıplarının efektif şekilde yönetilmesi zaruridir (Kıran, 2018). Su dağıtım şebekelerinde su kayıplarının gerçekleşmesi hem arıtılmış hem de terfi ettirilmiş içme ve kullanma sularının kaybedilmesi anlamına gelmektedir (Koşucu vd., 2021).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 2857062 Faks: +90 (212) 2856587
E-posta: kosucu@itu.edu.tr (Koşucu M.M.)

Gönderim Tarihi / Received : 14/11/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 15/12/2024

Özellikle metropollerde, su kayıplarının etkili bir şekilde kontrol edilmesi, su arz güvenliğini sağlamak ve belediye hizmetlerini sürdürülebilir kılmak için kritik öneme sahiptir (Kızılöz & Şişman, 2021). Mesela Öztürk ve Altay (2015), bir metropol olan İstanbul'daki su kaybı yönetimi çalışmalarından bahsetmiş ve gelecek dönemde bu çalışmalara yoğunlaşarak devam edileceğinin planlandığını belirtmiştir.

Su dağıtım şebekelerinde su kayıpları, **idarî** ve **fizikî** olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır (Bozkurt vd., 2024). İdarî kayıplar, sayaç hataları, izinsiz tüketim ve faturalandırma hatalarından kaynaklanırken; fizikî kayıplar, suyun şebeke altyapısından fizikî olarak kaybolduğu durumları ifade eder. Bu kayıplar, genellikle su temin ve dağıtım hatlarında, servis bağlantılarında, vana arızalarında ve depolarda meydana gelen sızıntılar veya taşmalarla ortaya çıkar. Bir başka ifadeyle fizikî kayıplar, suyun kullanıcıya ulaşamadan sistem dışına çıkmasıdır. Bu kayıpların meydana gelmesi neticesinde hem ekonomik zararlar ortaya çıkmakta hem de su yönetiminde verimlilik sağlanamamaktadır (Fırat vd., 2021).

Fizikî su kayıplarını kontrol altına almak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, **İzole Ölçüm Bölgelerinin (DMA)** oluşturulmasıdır. DMA'ların teşkil edilmesiyle, su dağıtım şebekeleri daha küçük ve yönetilebilir birimlere ayrılır ve bu vesileyle her bir bölgeye giren akımın debisinin ve basıncının izlenebilmesi mümkün hale gelir. Böylece, fizikî su kayıplarının ve izinsiz tüketimin tespiti kolaylaşır ve sistemin performansı daha etkin bir şekilde kontrol edilebilir (Thornton vd., 2008; Özdemir, 2018; Durmuşçelebi vd., 2020). Buna ilaveten Bozkurt vd. (2022) tarafından belirtildiği üzere DMA'ların oluşturulması, su kayıplarının kaynağını belirleyebilmek ve arızalara uygun bir şekilde müdahale edebilmek için oldukça efektif bir stratejidir. Oluşturulan DMA'larda Minimum Gece Debisi (MNF) analizinin gerçekleştirilmesi, gece saatlerinde şebekede meydana gelen sızıntıları belirlemede etkili bir yöntem olarak öne çıkmakta ve su kaybının seviyesini hesaplayabilmek için bir ön tahmin imkanı sunmaktadır (Boztaş vd., 2019).

Su dağıtım şebekelerinin DMA haline getirilmesinin yanı sıra **basınç yönetimi**nin gerçekleştirilmesi de su kayıplarının azaltılmasını sağlayan önemli bir faktördür (Vicente vd., 2016; Koşucu & Demirel, 2022, 2024). Pek çok araştırmacı, su dağıtım şebekelerinde yüksek basıncın arka plan sızıntılarını ve patlak oranını artırdığını, dolayısıyla basınç yönetimiyle bu kayıpların önemli ölçüde azaltılabileceğini vurgulamaktadır (Piller & van Zyl, 2014; Van Zyl, 2014; Schwaller & van Zyl, 2015). Denizli'de gerçekleştirilen bir çalışmada, Güngör vd. (2019), DMA girişlerine yerleştirilen basınç düşürücü vanalar (PRV) ile su kayıplarının etkin bir şekilde azaltıldığını göstermiştir. Bahsedilen çalışmada, SCADA sistemi ile entegre edilmiş veri yönetim araçları kullanılarak, DMA girişindeki akımın debisi ve basıncı gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve şebekenin performansı arttırılmıştır.

Su dağıtım şebekelerinde DMA'ların teşkil edilmesiyle sızıntı tespiti için **aktif sızıntı kontrolü** metodunun birlikte kullanılması, karmaşık şebekelerde efektif bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Kanakoudis ve Muhammetoğlu (2014) tarafından Türkiye (Antalya) ve Yunanistan'da (Kos) icra edilen çalışmada, DMA oluşturulması ile aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetiminin su kayıplarını azaltmada efektif sonuçlar verdiği ve bu tür uygulamaların su yönetimi çalışmalarına olumlu anlamda etki edebileceği belirtilmiştir. Buna ilaveten, IWA'nın (International Water Association – Uluslararası Su Teşkilatı) yayınladığı rehberde su dağıtım sistemlerinin DMA'lara ayrılarak yönetilmesinin, sızıntıların tespit edilmesi ve onarım önceliklerinin belirlenmesinde etkin bir metod olarak öne çıktığı belirtilmektedir (Morrison vd., 2007). Kızılöz (2021), İzmit'teki su dağıtım şebekelerinde teşkil edilmiş DMA'larda, aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi faaliyetlerini gerçekleştirmiş ve 2014 yılında % 45.4 olan su kaybı oranını 2019 yılı itibariyle % 29.5 seviyesine indirmeyi başarmıştır.

Su dağıtım sistemlerinde sızıntı miktarındaki değişimin izlenmesinde en önemli gösterge, **Altyapı Sızıntı Endeksi (ILI)**'dir (Winarni, 2009). ILI, fizikî kayıpların yönetiminde yaygın olarak kullanılan bir performans göstergesidir ve DMA'lara tatbik edildiğinde, sızıntıların daha etkin bir şekilde kontrol edilmesine yardımcı olur. Yılmaz vd. (2021), ILI parametresinin su dağıtım sistemleri için önemli bir gösterge olduğunu belirtmiştir. Fakat zikredilen araştırmacılar, bir su dağıtım şebekesinde aktif sızıntı kontrolü faaliyetinin ekonomik olup olmadığının belirlenebilmesi için tek başına ILI'nin yetersiz kalacağını vurgulamıştır.

Bu çalışmada İstanbul'un Asya Yakası'nda yer alan bir DMA'da su kayıplarını azaltmaya yönelik MNF, sızıntı debisi ve ILI analizleri gerçekleştirilmiş olup, bölgede icra edilen aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi faaliyetlerinin sağladığı faydalar ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar, DMA tabanlı gerçekleştirilen aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi faaliyetlerinin birlikte uygulanmasının su kayıplarını azalttığını göstermektedir. Ayrıca aktif sızıntı kontrolünün ve basınç yönetiminin tatbik edilmesinin ILI parametresi üzerindeki etkisinin bir metropol olan İstanbul'da incelenmesi bu çalışmanın özgün değeri olarak öne çıkmaktadır.

2. Çalışma Bölgesi

Su kaybı analizi ve yönetimi yapılan bölge olarak İstanbul'un Tuzla ilçesinin en doğusunda bulunan 801600482 no'lu DMA seçilmiştir (Şekil 1). Bu DMA'daki borular, toplam 34 km uzunluğa sahiptir ve düktil font malzemeden imal edilmiştir. Bölgede toplam 7060 aktif abone, ve 2011 bina bağlantısı bulunmaktadır. DMA'daki en yüksek kot 68 m, en düşük kot ise 16 m'dir. Toplam bina bağlantısı uzunluğu 21461 m'dir. Ömerli Barajı'ndan cazibeyle beslenen bölgenin giriş borusunun çapı 250 mm'dir. DMA'nın giriş basıncı 60-65 m aralığında, 68 m'deki kritik noktanın ise basıncı 30-40 m aralığında değerler almaktadır.



Şekil 1: Çalışma bölgesinin genel görünümü

2.1. Aktif Sızıntı Kontrolü

Aktif sızıntı kontrolü, DMA'ların teşkil edilmesi, minimum gece debisinin izlenmesi ve analizi, sızıntıların farkına varılması, sızıntıların konumlarının tespiti ve arızaların tamir edilmesi faaliyetlerinin tamamına verilen isimdir. Herhangi bir boruda arıza oluşması durumunda, arızanın oluştuğu DMA'nın giriş debisinde özellikle gece saatlerinde beklenenin üstünde artışlar görülmektedir. Dolayısıyla minimum gece debisinin oluşması beklenen zaman dilimindeki DMA giriş debisi incelenerek aktif sızıntı kontrolünün icra edilip edilmeyeceğine karar verilebilir. Böylece aktif sızıntı kontrolü faaliyeti vesilesiyle rapor edilmeyen sızıntılar tespit edilir ve bunlar daha sonra onarılarak minimum gece ve sızıntı debileri arızanın oluşmasından önceki seviyelere getirilir.

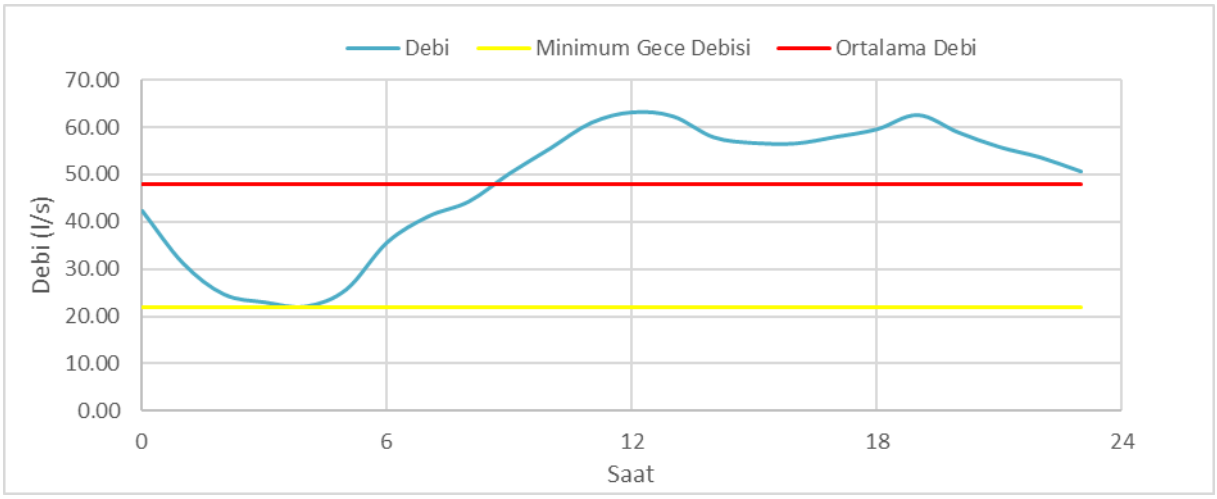
Çalışma bölgesinde bulunan 34 km'lik şebeke hattında 31.08.2023 ve 20.11.2023 tarihleri arasında akustik dinleme yoluyla arıza tespiti faaliyeti icra edilmiştir. Bu faaliyet sonucunda toplam 8 adet arıza tespit edilmiş ve tespit edilen arızalar 2023'ün Ekim ve Kasım aylarında onarılmıştır.

3. Materyal ve Metot

Çalışma bölgesinde efektif bir su kaybı analizi ve yönetiminin yapılabilmesi için bölgeye giren toplam debinin, tahmini sızıntı debisinin ve ILI değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bölgede yapılan ölçümlerin ve bu ölçümler yoluyla gerçekleştirilen analizlerin zikredilmesi önem arz etmektedir.

3.1. Debi Verileri

Üzerinde çalışılan DMA'nın giriş borusunda düzenli debi ölçümü yapılmaktadır. Düzenli ölçülmüş debi zaman serisinin tamamına bakıldığında 01.09.2023 – 30.09.2023 tarihleri arasındaki DMA giriş debisini incelemenin uygun olacağı düşünülmüştür. Zira bu dönem, arızaların tamir edilmesinden hemen önceki döneme denk gelmektedir. Debi değerleri, ortalama günlük, ortalama minimum gece debisi ve genel ortalama debi halinde Şekil 2'de verilmiştir.



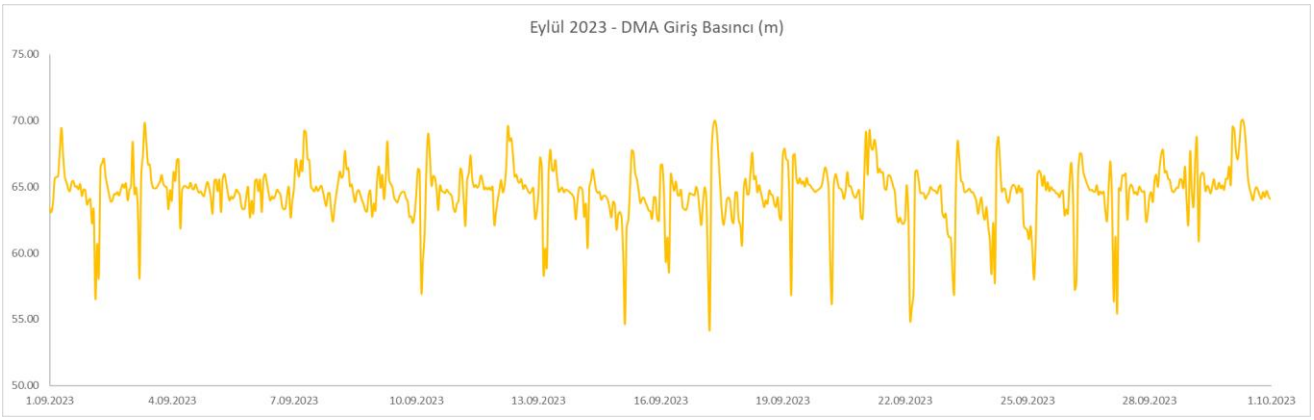
Şekil 2: 01.09.2023 – 30.09.2023 tarihleri arasındaki günlük ortalama debi

01.09.2023 – 30.09.2023 tarihleri arasında, DMA'ya verilen debinin ortalaması 48 l/s, ortalama minimum gece debisi (Q_{MGD}) 22 l/s, maksimum ortalama debi ise 63.2 l/s olarak hesaplanmıştır. Ortalama minimum gece debisi saat 04:00'da, ortalama maksimum debi ise saat 12:00'da görülmektedir.

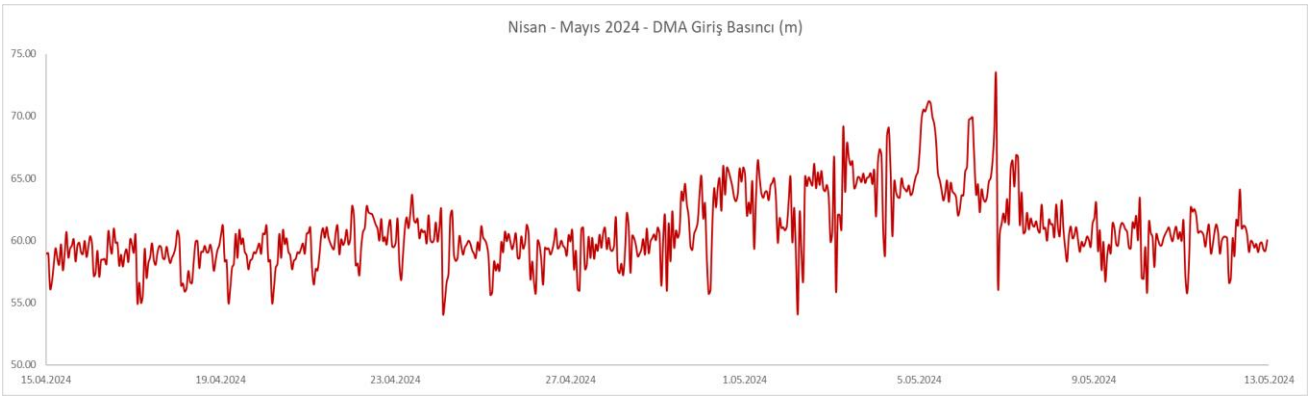
3.2. Basınç Yönetimi Uygulaması

Su dağıtım sistemlerinde basınç değeri ne kadar yüksek olursa sızıntılar da o nispette artmaktadır. Bu sebeple sızıntıları azaltmak veya bu sızıntıların önüne geçebilmek için su dağıtım sistemlerinde meydana gelen yüksek basınçları düşürmek gerekmektedir. Yüksek basınçları makul seviyelere düşürmenin en yaygın ve bilinen yolu basınç yönetimidir. Basınç yönetimi, basınç düşürücü vana (PRV) adlı bir cihazla gerçekleştirilmektedir ve bu cihaz genellikle DMA'ların giriş borularına monte edilmektedir.

Çalışma bölgesinde Şubat 2023 itibariyle basınç yönetimi faaliyetine başlanmıştır. PRV giriş basıncı 70-80 m seviyelerinde seyretmektedir. Bölgede uygulanan basınç yönetimi faaliyeti vesilesiyle ortalama PRV çıkış basıncı (DMA giriş basıncı) yaklaşık 65 m seviyesine düşürülmüştür. Şekil 3'te görüldüğü üzere Eylül 2023'te DMA giriş basıncının ortalaması 65 m seviyesindedir. 01.04.2024 tarihi itibariyle ise ortalama PRV çıkış basıncı yaklaşık 60 m seviyesine indirilmiştir. Şekil 4'te ise 15.04.2024 – 12.05.2024 tarihleri arasındaki DMA giriş basıncı değerleri görülmektedir.



Şekil 3: 01.09.2023 – 30.09.2023 tarihleri arasındaki PRV çıkış basıncı



Şekil 4: 15.04.2024 – 12.05.2024 tarihleri arasındaki PRV çıkış basıncı

3.3. Minimum Gece Debisi

Su kayıplarının en fazla ve su tüketiminin en düşük olduğu saatler gece saatleri olduğu için bu saatlerde sisteme giren debinin büyük kısmının su kaybına dönüşerek şebeke borularını terk ettiği bilinmektedir. Ayrıca sistem basıncı bu saatlerde yüksek olduğu için sızıntılar artmaktadır. Su tüketiminin ve dolayısıyla sisteme giren debinin en düşük olduğu saatteki debiye Minimum Gece Debisi denmektedir. Minimum Gece Debisi, gece saatinde borulardan dışarı sızan debi ile yine gece saatlerinde aboneler tarafından tüketilen debinin toplamıdır. Şebekede ölçülen minimum gece debisinin, gece sızıntı debisi ile muhtemel gece abone debisinin toplamına eşit olması beklenir. Bu sebeple minimum gece debisi (Q_{MGD}) analizi yaparken sistemin gece sızıntı debisini bulabilmek için (Q_{GSD}) muhtemel gece abone debisini (Q_{MGAD}) hesaplamak elzemdir. Gece sızıntı debisi (Q_{GSD}) şu şekilde hesaplanır (Denklem (1)):

$$Q_{GSD} = Q_{MGD} - Q_{MGAD} \quad (1)$$

Gece sızıntı debisini hesaplayabilmek için öncelikle muhtemel gece abone debisinin değeri belirlenmelidir. Her bir abone tipinin gece tüketimi değeri farklıdır. Mesela mesken tipi abone tüketimi hesaplanırken nüfusun % 6'sının gece uyanık olduğu, ve uyanık olanların da kişi başı su tüketiminin 10 l/saat olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir (Amoatey vd., 2014; AL-Washali vd., 2018; Negharchi & Shafaghat, 2020). Mesken dışındaki abonelerin gece tüketimi değerleri de Tablo 1'de verilmiştir (Mckenzie, 1999):

Tablo 1: Mesken dışı ortalama gece tüketim değerleri

Grup	Abone Başına Ortalama Gece Tüketimi (l * abone^{-1} * h^{-1})
Market, İşyeri, Depo, Misafirhane, Garaj ve Çiftlikler	6.2
Otel, Okul, Kafe ve Lokantalar	12.6
Hastane, Fabrika, Umumi Tuvalet ve Şantiyeler	20.5
Huzurevleri, Küçük Madenler ve Taşocakları	60.6

3.4. Sızıntı Debisi Hesabı

Sızıntı debisiyle DMA ortalama basıncı (Average Zone Pressure = AZP) arasındaki ilişki AL-Washali vd. (2018) tarafından şu şekilde verilmiştir (Denklem 2):

$$Q_i/_{Q_{MGD}} = \left(AZP_i/_{AZP_{MGD}}\right)^N \quad (2)$$

Burada Q_i i no'lu saatteki sızıntı debisi, Q_{MGD} minimum gece debisinin vuku bulduğu saatteki sızıntı debisi, AZP_i i no'lu saatteki ortalama bölge basıncı ve AZP_{MGD} de minimum gece debisi saatindeki ortalama bölge basıncıdır. Denklem (3)'teki N değerinin demir borular için 0.5 alınabileceği bilinmektedir (McKenzie vd., 2003; Cassa vd., 2010).Dolayısıyla bu çalışmada N değeri 0.5 olarak alınmıştır.

3.5. Altyapı Sızıntı Endeksi

ILI, su dağıtım şebekelerinde sızıntıların seviyesini gösteren önemli bir endekstir (Muhammetoğlu & Muhammetoğlu, 2017). Bu endeks, mevcut yıllık fiziki su kayıplarının (CARL) kaçınılmaz yıllık fiziki su kayıplarına (UARL) bölünmesiyle elde edilir (Denklem 3):

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (3)$$

Burada UARL ve CARL parametrelerinin birimleri l/gün'dür. ILI ise boyutsuz bir niceliktir ve bu parametrenin değeri 1.0'a ne kadar yaklaşırsa şebekenin su kayıpları açısından yönetimi o kadar iyi gerçekleşiyor denebilir (Muhammetoğlu & Muhammetoğlu, 2017). UARL parametresi ise ampirik bir büyüklüktür ve Denklem (4)'teki şekilde hesaplanmaktadır (Muhammetoğlu & Muhammetoğlu, 2017):

$$UARL = \left(18 * L_m + 0.8 * N_C + 25 * L_p\right) * AZP \quad (4)$$

Burada L_m şebeke ana hat uzunluğu (km), N_C servis bağlantısı sayısı ve L_p de abone servis bağlantılarının toplam uzunluğudur (km). ILI parametresinin farklı değerleri için teknik performans kategorileri belirlenmiştir. Bunlar Tablo 2'de verilmiştir:

Tablo 2: ILI Teknik Performans Kategorileri (Muhammetoğlu & Muhammetoğlu, 2017)

Kategori	A	B	C	D
ILI	1 - 2	2 - 4	4 – 8	> 8

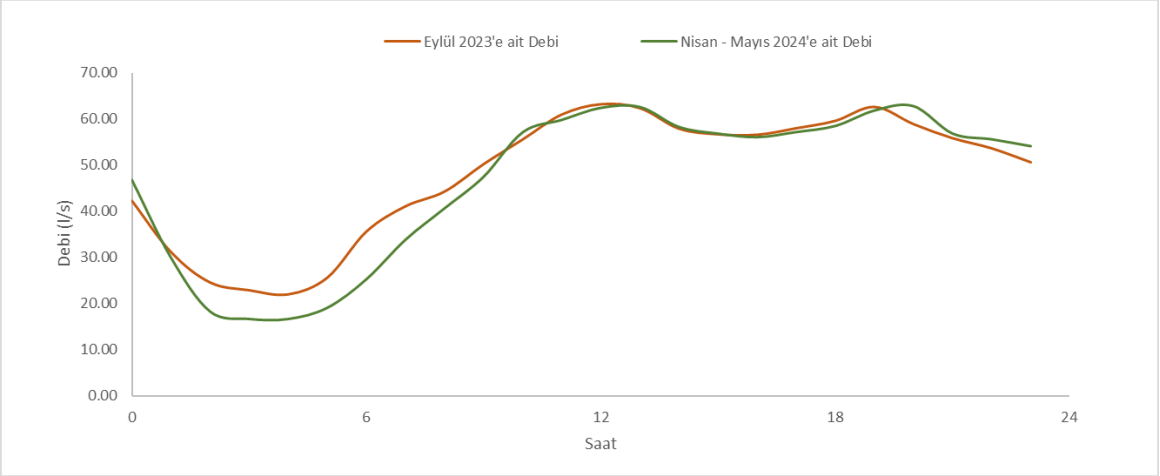
Burada **Kategori A**, şebeke durumunun iyi olduğunu, **Kategori B** durumun kötü sayılamayacağını ama iyileşme potansiyelinin bulunduğunu, **Kategori C** şebeke durumunun zayıf olduğunu ve bu zayıflığın iyiye götürülmesi gerektiğini ve **Kategori D** ise şebekenin kötü yönetildiğini ve kaynakların verimsiz kullanıldığını göstermektedir.

4. Uygulama ve Bulgular

Aktif sızıntı kontrolü faaliyetiyle 8 adet arızanın onarılması ve ortalama giriş basıncının 65 m'den 60 m'ye düşürülmesi neticesinde debi verilerinin, minimum gece debisindeki değişimin, şebeke sızıntı debisinin ve Altyapı Sızıntı Endeksi'nin incelenmesi önem arz etmektedir.

4.1. Debi Verilerinin Analizi

Arızaların tespit ve tamir edilmesinden ve sistem giriş basıncı ayarının 65 m'den 60 m'ye düşürülmesinden sonra ölçüm yapılmış tarihler arasında, sisteme verilen debinin ortalaması 46.43 l/s, ortalama minimum gece debisi (Q_{MGD}) 16.56 l/s, maksimum ortalama debi ise 62.82 l/s olarak hesaplanmıştır. DMA'nın ortalama debi değerleri grafik olarak *Şekil 5*'te verilmiştir.



Şekil 5: Eylül 2023 ve Nisan-Mayıs 2024 tarihlerindeki günlük ortalama debi

Şekil 5'ten anlaşıldığına göre 8 adet arızanın onarımı ve sistem giriş basınç ayarının düşürülmesinden sonra DMA giriş debisi değerlerinde bir düşüş olduğu görülmüştür. Öyle ki günlük ortalama debi 48 l/s'den 46.43 l/s'ye, ortalama minimum gece debisi de 22 l/s'den 16.56 l/s'ye düşmüştür. Bu düşüş neticesinde minimum gece debisinin ortalama debiye olan oranı % 36 olmuştur. Burada minimum gece debisindeki yaklaşık 5.44 l/s'lik azalış dikkat çekmektedir. Bu değer günde 470 m^3'e tekabül etmektedir.

4.3. Minimum Gece Debisi Analizi

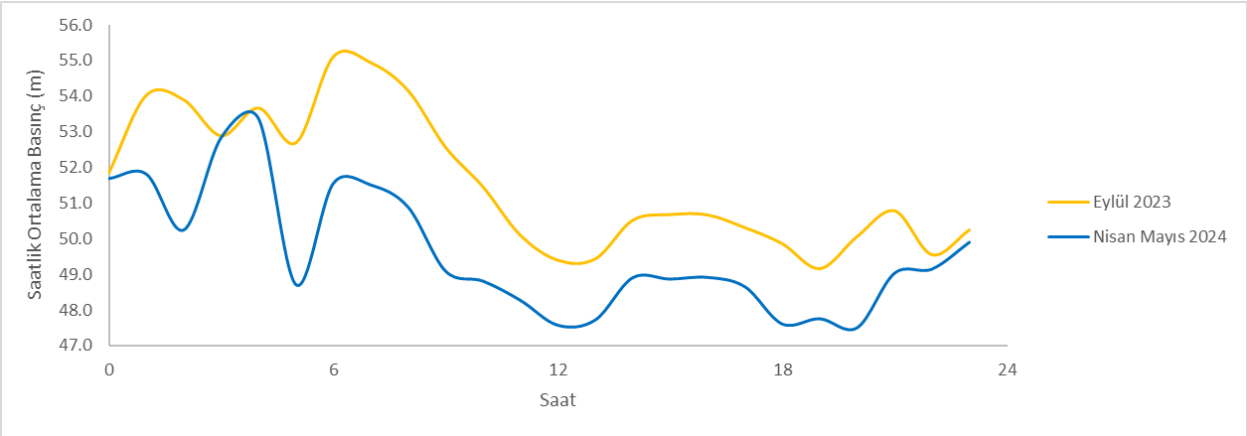
Eylül 2023'e ait fatura verilerinden anlaşıldığına göre bu DMA'da su tüketiminin yaklaşık % 84'ü mesken aboneleri tarafından gerçekleştirilmektedir. **Tablo 1** esas alınarak yapılan hesaplarda muhtemel gece abone debisi değerinin (Q_{MGAD}) 7.44 l/s olacağı öngörülmüştür.

Minimum gece debisi ile muhtemel gece abone debisi arasındaki farkın gece sızıntı debisini vereceği daha önceden belirtilmişti. Bu durumda Eylül 2023'e ait analiz sırasında 22.03 l/s (Q_{MGD}) ile 7.44 l/s (Q_{MGAD})'in farkı alınınca gece sızıntı debisinin (Q_{GSD}) 14.59 l/s olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Arızaların onarılmasından ve PRV çıkış basıncı ayarının 60 m'ye indirilmesinden sonraki muhtemel gece abone debisi (Q_{MGAD}) değerinin aynı kalacağı, yani bu değerin 7.44 l/s olacağı öngörülmüştür. Minimum gece debisinin ise (Q_{MGD}) 22.03 l/s'den 16.56 l/s'ye düşmüş olması su kaybı miktarını azaltmıştır. Öyle ki yeni gece sızıntı debisi (Q_{GSD}), 9.12 l/s olmuştur.

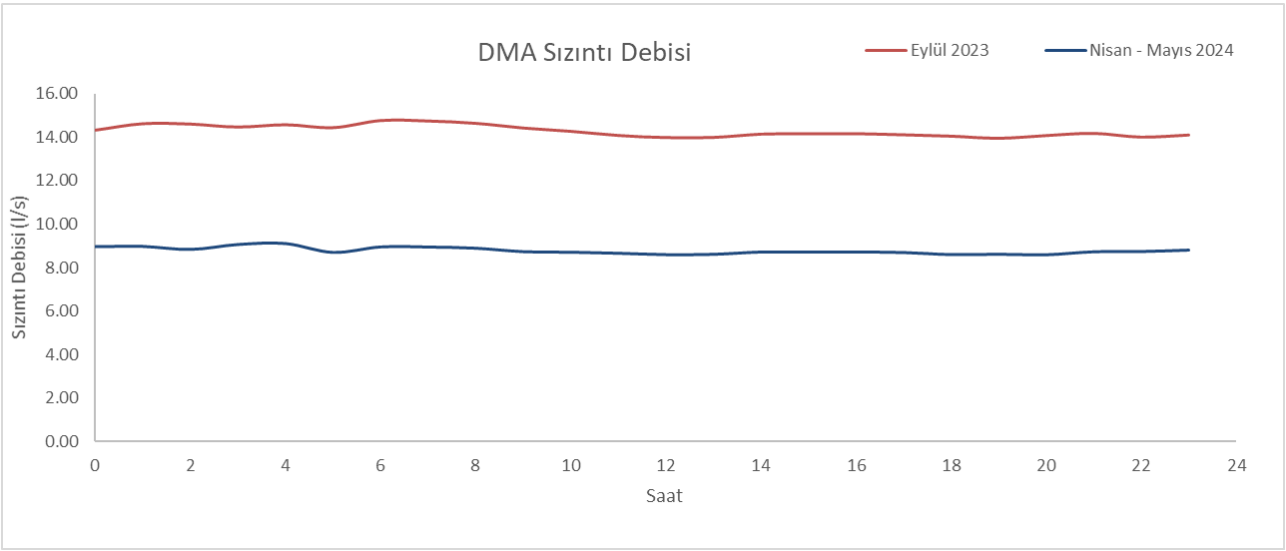
4.4. Sızıntı Debisi Analizi

Sızıntı debisinde 24 saat boyunca meydana gelen değişimin Denklem (2) ile hesaplandığı daha önce belirtilmişti. Denklem (2)'nin kullanılabilmesi için ortalama bölge basıncına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda Eylül 2023 ve Nisan – Mayıs 2024'te bu DMA'da ortaya çıkan ortalama bölge basıncı değerinin 24 saatlik değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Sızıntı debisi hesabında bu değerlerden istifade edilip Denklem (2) kullanılmıştır.



Şekil 6: DMA'daki ortalama bölge basıncı değerleri

Eylül 2023 ve Nisan-Mayıs 2024 dönemlerine ait saatlik sızıntı debileri hesaplandığında *Şekil 7* ortaya çıkmıştır.



Şekil 7: Eylül 2023 ve Nisan-Mayıs 2024 tarihlerindeki saatlik DMA sızıntı debileri

Eylül 2023 için minimum gece debisi saatinde meydana gelen su sızıntısı 14.59 l/s olarak hesaplanmıştı. Minimum gece debisi saatinde meydana gelen ortalama bölge basıncı AZP_{MGD}, Eylül 2023'te 53.68 m ve Nisan – Mayıs 2024'te 53.38 m'dir. Bundan sonra geri kalan 23 saatin sızıntı debisi Denklem (2) ile hesaplanır. Hesaplanan 24 sızıntı debisinin toplamı günlük sızıntı debisini vermektedir ki, bu da 1235.3 m^3/gün'dür. Günlük toplam sistem giriş debisi ise 4148.5 m^3 olduğuna göre, bu analiz neticesinde elde edilen su kaybı oranı % 29.8 olmaktadır.

Nisan-Mayıs 2024'te ise minimum gece debisi saatinde meydana gelen su sızıntısı 9.12 l/s olarak hesaplanmıştır. Bu dönemde 53.38 m olan AZP_{MGD} parametresinin kullanılmasıyla geri kalan 23 saatin sızıntı debisi Denklem (2) ile hesaplanır. Hesaplanan 24 sızıntı debisinin toplamı günlük sızıntı debisini vermektedir ki, bu da 759.8 m^3/gün'dür. Günlük toplam sistem giriş debisinin yeni değeri ise 4011.6 m^3 olarak hesaplandığından, bu analiz neticesinde elde edilen su kaybı oranı % 18.9 olmaktadır. Böylece 8 adet arızanın onarılması ve DMA giriş basıncının 65 m'den 60 m'ye düşürülmesiyle su kaybı oranının % 29.8'den % 18.9'a indirilmiş olduğu görülmektedir.

4.5. Altyapı Sızıntı Endeksi Analizi

İncelediğimiz şebekedeki toplam boru uzunluğu L_m = 33.988 km, toplam bağlantı sayısı N_C = 2011, ve toplam servis bağlantısı uzunluğu L_p = 21.461 km'dir. Ayrıca Şekil 6'daki AZP değerlerinin ortalaması Eylül 2023 için 51.6 m, Nisan – Mayıs 2024 için 49.6 m'dir. Daha önce de belirtildiği üzere, Eylül 2023'te 1235.3 m^3/gün, Nisan – Mayıs 2024'te ise 759.8 m^3/gün'dür. Bu değerler dikkate alındığında, $CARL_{önce}$, $CARL_{sonra}$, $UARL_{önce}$, $UARL_{sonra}$ ve ILI parametrelerinin değerleri:

$$CARL_{önce} = 1235.3\ m^3/gün$$

$$CARL_{sonra} = 759.8\ m^3/gün$$

$$UARL_{önce} = (18 * 33.988 + 0.8 * 2011 + 25 * 21.461) * 51.6 = 142231\ l/gün = 142.2\ m^3/gün$$

$$UARL_{sonra} = (18 * 33.988 + 0.8 * 2011 + 25 * 21.461) * 49.6 = 136757\ l/gün = 136.8\ m^3/gün$$

$$ILI_{önce} = \frac{CARL_{önce}}{UARL} = \frac{1235.3\ m^3/gün}{142.2\ m^3/gün} = 8.7$$

$$ILI_{sonra} = \frac{CARL_{sonra}}{UARL} = \frac{759.8\ m^3/gün}{136.8\ m^3/gün} = 5.6$$

olarak hesaplanır. ILI parametresinin Eylül 2023 itibariyle 8'den yüksek bir değer alarak **Kategori D**'de olduğu görülmektedir. Buna mukabil, 8 adet arızanın tamir edilmesi ve DMA giriş basıncı ayarının 5 m kadar düşürülmesiyle Nisan – Mayıs 2024'te ILI parametresi 4 ile 8 arasında bulunan 5.6 değerine sahip olmuştur. Bu da şebekenin son tahlilde **Kategori C**'de olduğunu göstermektedir. Arıza tamiratı ve şebeke giriş basınç ayarının düşürülmesiyle birlikte ILI parametresini 8.7'den 5.6'ya indirmek mümkün olmuştur.

Tablo 3'te Eylül 2023 ve Nisan – Mayıs 2024 tarihlerindeki DMA giriş basıncı, minimum gece debisi, minimum gece debisi saatindeki sızıntı debisi, toplam su kayıp oranı ve ILI değerleri verilmiştir. 2021 yılı itibariyle Türkiye'deki ortalama su kaybı oranının % 33.5 olduğu hesaba katılırsa mevcut DMA'daki su kaybı oranının Türkiye ortalamasının altında olduğu söylenebilir (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2023). Bu da DMA'nın su kaybı oranının Türkiye'deki pek çok büyükşehir, il ve ilçeden daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Nisan – Mayıs 2024 itibariyle su kaybı oranı, % 18.9 olarak İstanbul'un 2023 yılındaki genel su kaybı oranına eşit olmuştur (Öztürk vd., 2024).

Tablo 3: DMA'daki genel durum

Tarih	DMA Giriş Basıncı (m)	Min. Gece Debisi (l/s)	Q_{MGD} (l/s)	Su Kayıp Oranı (%)	ILI	ILI Kategorisi
Eylül 2023	65	22.03	14.59	29.8	8.7	D
Nisan - Mayıs 2024	60	16.56	9.12	18.9	5.6	C

5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışma, İstanbul'un Asya Yakası'ndaki bir İzole Ölçüm Bölgesi'nde (DMA), fizikî su kayıplarının analiz edilmesi ve yönetimi için uygulanan yöntemlerin etkinliğini ortaya koymuştur. Günümüzde su kaynaklarının verimli şekilde yönetilmesi, özellikle büyükşehirlerde su dağıtım sistemlerinin performansının arttırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında minimum gece debisi (MNF) analizi, aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi uygulamalarının fizikî su kayıplarının tespit ve azaltılmasında oynadığı rol incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, DMA'da fizikî su kayıplarının %29.8'den %18.9'a düşürüldüğünü ve Altyapı Sızıntı Endeksi'nin (ILI) 8.7'den 5.6 seviyesine indirildiğini göstermiştir. Bu azalma, 8 arızanın onarılması ve DMA giriş basıncının 65 m'den 60 m'ye düşürülmesiyle mümkün olmuştur. Su kaybı oranındaki %11'lik azalma, aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi uygulamalarının etkinliğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, ILI kategorisinin D'den C'ye getirilmesi, DMA yönetiminin daha iyi hale gelmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, daha düşük bir ILI seviyesine ulaşmanın elzem olduğu vurgulanmalıdır.

DMA tabanlı su kaybı yönetimi tekniklerinin, fizikî su kayıplarının azaltılmasında ne kadar etkili olduğu, bu çalışma vasıtasıyla gösterilmiştir. Bulgular, yalnızca lokal uygulamalar için değil, benzer su dağıtım sistemlerine sahip şehirler ve ülkeler için de yol gösterici bir nitelik taşımaktadır. Çalışmanın, su kayıplarını azaltma hedefli sürdürülebilir politikaların geliştirilmesine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazar, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne (İSKİ) ve İSKİ Asya Yakası Su Kayıpları ve Basınç Yönetimi Şube Müdürü İnş. Yük. Müh. Samet Kıran'a bu çalışmanın hazırlanmasında ve ortaya konmasında gösterdikleri destekten ötürü teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

AL-Washali, T., Sharma, S., AL-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2018). Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system. *Water*, *11*(1), Article 48. https://doi.org/10.3390/w11010048

Amoatey, P. K., Minke, R., & Steinmetz, H. (2014). Leakage estimation in water networks based on two categories of night-time users: a case study of a developing country network. *Water Supply*, *14*(2), 329–336. https://doi.org/10.2166/ws.2013.201

Bozkurt, C., Fırat, M., & Ateş, A. (2024). Su ve kanalizasyon idareleri için mevcut durum analizi ile uygun performans göstergelerinin web tabanlı hesaplama aracı ile değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *10*(1), 167–178.

Bozkurt, C., Firat, M., Ateş, A., Yilmaz, S., & Özdemir, Ö. (2022). Strategic water loss management: Current status and new model for future perspectives. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *40*(2), 310–322.

Boztaş, F., Özdemir, Durmuşçelebi, F. M., & Firat, M. (2019). Analyzing the effect of the unreported leakages in service connections of water distribution networks on non-revenue water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(8), 4393-4406. https://doi.org/10.1007/s13762-018-2085-0

Cassa, A. M., van Zyl, J. E., & Laubscher, R. F. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, *7*(2), 109–120. https://doi.org/10.1080/15730620903447613

Durmuşçelebi, F. M., Özdemir, Ö., & Fırat, M. (2020). District metered areas for water loss management in distribution systems. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, *38*(1), 149–170.

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

Güngör, M., Yarar, U., Cantürk, Ü., & Fırat, M. (2019). Increasing performance of water distribution network by using pressure management and database integration. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *10*(2). https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000367

Kanakoudis, V., & Muhammetoglu, H. (2014). Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey. *Clean - Soil, Air, Water*, 42(7), 880–892.

Kıran, S. (2018). *Mevcut içme suyu dağıtım şebekesinin hidrolik model yardımıyla yönetimi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kızılöz, B. (2021). İçme suyu dağıtım sistemlerinde su kayıplarının azaltılması: Kocaeli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *7*(2), 213–225.

Kızılöz, 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., & Demirel, M. C. (2022). Smart pressure management extension for EPANET: source code enhancement with a dynamic pressure reducing valve model. *Journal of Hydroinformatics*, *24*(3), 642–658. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.172

Koşucu, M. M., & Demirel, M. C. (2024). Cost efficiency assessment of four pressure management methods in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *150*(3). https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-5984

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.

Mckenzie, R. (1999). *Development of a standardised approach to evaluate burst and background losses in water distribution systems in South Africa* (WRC Report No TT 109/99). Water Research Commision.

McKenzie, R. S., Wegelin, W. A., & Meyer, N. (2003). *Water demand management cookbook*. Rand Water.

Morrison, J., Tooms, S., & Rogers, D. (2007). *DMA Management Guidance Notes*. International Water Association.

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.

Negharchi, S. M., & Shafaghat, R. (2020). Leakage estimation in water networks based on the BABE and MNF analyses: a case study in Gavankola village, Iran. *Water Supply*, *20*(6), 2296–2310. https://doi.org/10.2166/ws.2020.137

Özdemir, Ö. (2018). Water leakage management by district metered areas at water distribution networks. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(4), Article 182. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6559-9

Öztürk, İ., & Altay, D. A. (2015, 1–4 Aralık). *Water and Wastewater Management in Istanbul* [Bildiri Sunumu]. UNESCO HQ International Conference on Water, Megacities and Global Change, Paris, Fransa.

Öztürk, İ., Koşucu, M. M., & 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.

Piller, O., & van Zyl, J. E. (2014). Modeling control valves in water distribution systems using a continuous state formulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*(11), Article 04014052. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000920

Schwaller, J., & van Zyl, J. E. (2015). Modeling the pressure-leakage response of water distribution systems based on individual leak behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*, *141*(5), 1–8. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000984

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023). *Değişen İklime Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı*. https://suverimliligi.gov.tr/wp-content/uploads/2023/09/SU-VERIMLILIGI-STRATEJI-BELGESI-ve-EYLEM-PLANI_dikey_260923.pdf

Şişman, E., & Kızılöz, B. (2020). Trend-risk model for predicting non-revenue water: An application in Turkey. *Utilities Policy*, *67*, Article 101137. https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101137

Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control* (2nd edition). McGraw-Hill.

Van Zyl, J. E. (2014). Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems. *Procedia Engineering*, *89*, 273–277. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.187

Vicente, D. J., Garrote, L., Sánchez, R., & Santillán, D. (2016). Pressure management in water distribution systems: current status, proposals, and future trends. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *142*(2), Article 04015061. https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000589

Winarni, W. (2009). Infrastructure leakage index (ILI) as water losses indicator note from the editor. *Civil Engineering Dimension*, *11*(2), 126–134.

Yilmaz, S., Firat, M., Ateş, A., & Özdemir, Ö. (2021). Analysis of economic leakage level and infrastructure leakage index indicator by applying active leakage control. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *12*(4). https://doi.org/10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000583

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 327–339, DOI: 10.21324/dacd.1588804

İçmesuyu Şebekelerinde Su Kayıplarının Azaltılması İçin Basınç Kontrol Yönetimi Stratejisinde Basınç Dalgalanmalarının En Uygun Seviyesinin Tanımlanması

Talha İbrahim Arduçoğlu[1], Furkan Boztaş[1], Mahmut Fırat[2,*]

[1]*Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü, 44100, Malatya.*
[2]*İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44100, Malatya.*

Özet

Şebekelerde oluşan sızıntıların önemli bir kısmını yüzeye çıkmayan sızıntılar oluşturmaktadır. Sızıntılar basınç ile doğrudan ilişkili olup birçok araştırmacı basınç parametresi ile ilgili basınç yönetimi çalışmaları yürütmektedir. Basınç yönetimi metotları klasik ve ileri basınç yönetimi olarak sınıflandırılmaktadır. Dünya genelinde yapılan birçok çalışma ile işletme basıncının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada ise basınç yönetimi çalışması sırasında minimize edilecek parametre olarak saatlik basınç farkı seçilmiş ve şebekenin gün içerisindeki basınç dalgalanmasının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. EPANET programında hidrolik modeli oluşturulan pilot şebekelere ait veriler EPANET-MATLAB Toolkit ile MATLAB ortamına aktarılmıştır. İlk olarak klasik basınç yönetimi ile şebekenin analizi yapılmıştır. Sonraki aşamada ise debiye duyarlı ileri basınç yönetimi için işletme senaryosu oluşturulmaya başlanmıştır. En uygun senaryonun oluşturulması amacıyla MATLAB ortamında genetik algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon değişkeni olarak giriş basıncı seçilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak şebekenin gün içerisindeki saatlik basınç değişim farklarının toplamı seçilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda çalışma alanında basınç dalgalanmalarına ait ortalama 18.56 m'den 8.41 m'ye %55 oranında düşürülmüştür. Ayrıca şebekenin ortalama basıncı 48.2 m'den 37.3 m'ye düşürülmüştür.

Anahtar Sözcükler

Basınç Yönetimi, Basınç Dalgalanması, Optimizasyon, EPANET-MATLAB

Defining the Optimal Level of Pressure Fluctuations at Pressure Control Management Strategy for Reducing Water Losses in Water Networks

Abstract

A significant rate of the physical losses in networks are caused by unreported leaks. Leaks are directly related to pressure, and many public institutions and researchers are conducting management studies on pressure parameters. Pressure management methods are classified as classical and advanced pressure management. Many studies conducted worldwide have enabled the minimization of operating pressure. In this study, the hourly pressure difference was selected as the parameter to be minimized during the pressure management study, and it was aimed to minimize the pressure fluctuations of the network during the day. The data of the working networks, the hydraulic model of which was created in the EPANET program, was transferred to the MATLAB environment with the EPANET-MATLAB Toolkit. First, the network was analyzed with classical pressure management. In the next stage, the operating scenario for the flow-sensitive advanced pressure management was started to be created. Genetic algorithm was used in the MATLAB environment to create the most suitable scenario. Inlet pressure was selected as the optimization variable. The sum of the hourly pressure change differences of the network during the day was selected as the objective function. As a result of the optimization, the average pressure fluctuations in the working area were reduced by 55% from 18.56 m to 8.41 m. In addition, the average pressure of the network was reduced from 48.2 m to 37.3 m.

Keywords

Pressure Management, Pressure Surge, Optimization, EPANET-MATLAB

1. Giriş

Su talebinin artması, şebekenin yaşlanması, boruların basınç dayanımının giderek azalması içmesuyu dağıtım sistemlerinin işletilmesini giderek zorlaştırmaktadır. Yerleşim yerlerinin gelişmişlik düzeyi arttıkça su talebi de artmaktadır (Sınmaz, 2019). Ülkemizin de içinde bulunduğu birçok ülke iklim değişikliği ile mücadele etmektedir. İklim değişikliğinin etkileri arasında kentsel bölgelerdeki su kaynaklarının yetersiz kalması ile tarımsal ve içme amaçlı sulara ihtiyacın artacağı değerlendirilmektedir (Türkeş vd., 2000). Yeni su kaynaklarının bulunması ve yerleşim yerlerine ulaştırılması küçük şebeke ağlarında makul maliyetlerle sağlanabilmektedir.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (422) 3774829 Faks: +90 (422) 3773041
E-posta: talharducoglu@gmail.com (Arduçoğlu T. İ.), furkanboztas@maski.gov.tr (Boztaş F.) mahmut.firat@inonu.edu.tr (Fırat M.)

Gönderim Tarihi / Received : 20/11/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 12/01/2025

Ancak ihtiyacın fazla olduğu büyük içmesuyu şebekelerinde ihtiyaç debisini karşılayacak bir kaynağın tespiti ve bu kaynağın şebekeye ulaştırılması, İdareler için büyük çaba ve mali kaynak gerektirmektedir. Su kaynağından alınan ve sisteme girişi sağlanan su ile faturası kesilen temiz su miktarı arasındaki fark gelir getirmeyen su ya da diğer bir tabirle kayıp su olarak adlandırılmaktadır.

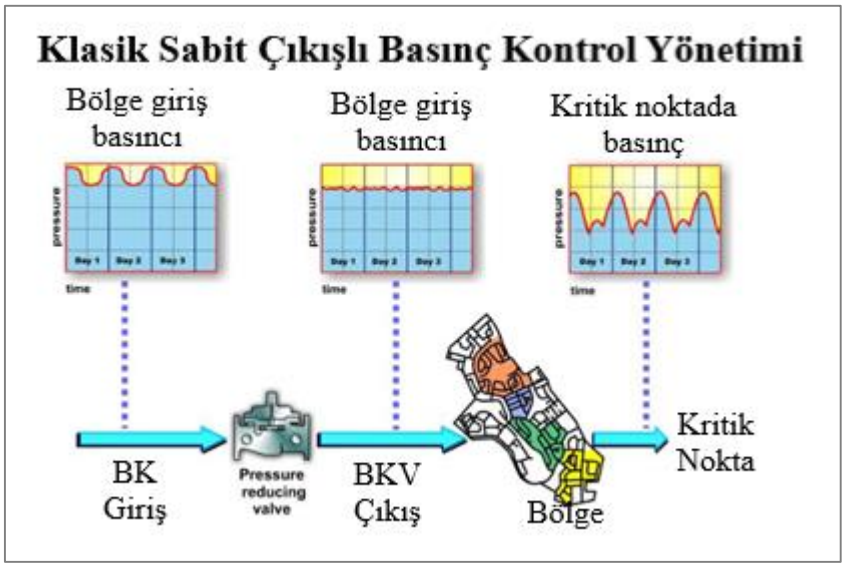
İçmesuyu şebekelerinde kayıpların azaltılması, genellikle yeni su kaynakları geliştirmekten daha ekonomik olarak görülmektedir (Fanner vd., 2007). İçme suyu dağıtım sistemlerinde oluşan su kayıpları temel olarak fiziki kayıplar (sızıntılar) ve idari kayıplar olarak iki temel bileşenden oluşmaktadır (Pearson, 2019). İdari kayıplar, sayaç hataları, veri kayıt hatalarından ve kaçak kullanımlardan kaynaklanan su kayıplarını, fiziki su kayıpları ise borularda ve bağlantı parçalarında meydana gelen kırık ve çatlaklardan, boru başı ve abone bağlantı hatalarından ve servis depolarından meydana gelen, tüketici sayacından önceki, kaçak ve taşmalardan kaynaklanan su kayıplarını ifade etmektedir (İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği, 2014). İçme suyu dağıtım sistemindeki işletme basıncı ile sızıntı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır (May, 1994). Basınç arttıkça sızıntı artmakta, basınç azaldığında ise sızıntı azalmaktadır. Ancak basıncın fazla azalması durumunda ise kullanıcılara sağlıklı su tedariki sağlanamamaktadır. Birçok Su ve Kanalizasyon İdaresi sızıntılara karşı şebeke giriş basıncını kritik noktalara göre minimum seviyeye indirmektedir. Bu durumda gün içerisindeki su kullanımının değişkenliği sebebiyle basınç dalgalanmaları oluşmakta ve şebeke elemanları olumsuz etkilenmektedir. Malzeme bilimciler tarafından 20 m basınç değerinden küçük basınç değişimleri, su dağıtım sistemlerinde yaygın görülmesi sebebiyle kabul edilebilir bulunmaktadır (Folkman & Parvez, 2020). İşletme basıncının sızıntılara ve dalgalanmalara karşı hangi aralıkta ayarlanması gerektiği ise ortaya bir optimizasyon problemi çıkarmaktadır. Durmuşçelebi (2018), içme suyu dağıtım sisteminde sızıntıların etkin yönetimi ve azaltılması için eski şebeke hatlarının iptali, şebeke borusu değiştirilmeden ve tüm boruların değiştirilmesi koşulları için izole ölçüm bölgelerinin tasarımı ve uygulanması üzerine çalışmıştır. Araştırma neticesinde şebeke hatları değiştirilmeden yapılan izole ölçüm bölgelerinin su kayıp kaçak yönetiminde önemli faydalar sağladığı ifade edilmiştir.

Su kayıplarını etkileyen birçok parametrenin olmasının anlaşılmasıyla birlikte birçok araştırmacı farklı parametreler üzerine çalışmalar yapmıştır. İçme suyu sistemlerinde su kaybını azaltarak verimi artırmak için çalışma yapılabilecek optimizasyon çalışmaları uzun yıllardır uygulanmaktadır (Suribabu, 2012). Sangroula vd. (2022) su dağıtım şebekelerinin en düşük maliyetli tasarımı problemine genetik algoritma yöntemini uygulamış ve "Su Dağıtım Şebekeleri için Akıllı Optimizasyon Programı (SOP-WDN)" algoritmasını geliştirmiştir. SOP-WDN, su dağıtım ağlarının optimum tasarımı için bir hidrolik simülasyon çözücüsü EPANET ile bağlantılı evrimsel bir optimizasyon tekniğinin, yani genetik algoritmanın uygulanmasını göstermiştir. Botella Langa vd.(2022) su dağıtım ağını boru çapı açısından optimize etmek için çalışmada Harmony Search adı verilen nispeten yeni bir meta-sezgisel algoritma kullanılmıştır. Negm vd. (2023), basınç kontrolü için vana ayar noktasını optimize etmek amacıyla temel takviyeli öğrenme algoritmasını kullanmıştır. Çalışmada, 26 m'lik optimize edilmiş bir ayar noktası bulunarak ve iki basınç kırıcı vanasında basit değişiklikler yapılarak ortalama sistem basıncı %2 düşürülmüştür.

Basınç yönetimi metotları klasik ve ileri basınç yönetimi olarak sınıflandırılmaktadır. Dünya genelinde yapılan birçok çalışma ile işletme basıncının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada ise basınç yönetimi çalışması sırasında minimize edilecek parametre olarak saatlik basınç farkı seçilmiş ve şebekenin gün içerisindeki basınç dalgalanmasının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. EPANET programında hidrolik modeli oluşturulan çalışma şebekelerine ait veriler EPANET-MATLAB Toolkit ile MATLAB ortamına aktarılmıştır. İlk olarak klasik basınç yönetimi ile şebekenin analizi yapılmıştır. Sonraki aşamada ise debiye duyarlı ileri basınç yönetimi için işletme senaryosu oluşturulmaya başlanmıştır. En uygun senaryonun oluşturulması amacıyla MATLAB ortamında genetik algoritma kullanılmıştır. Optimizasyon değişkeni olarak giriş basıncı seçilmiştir.

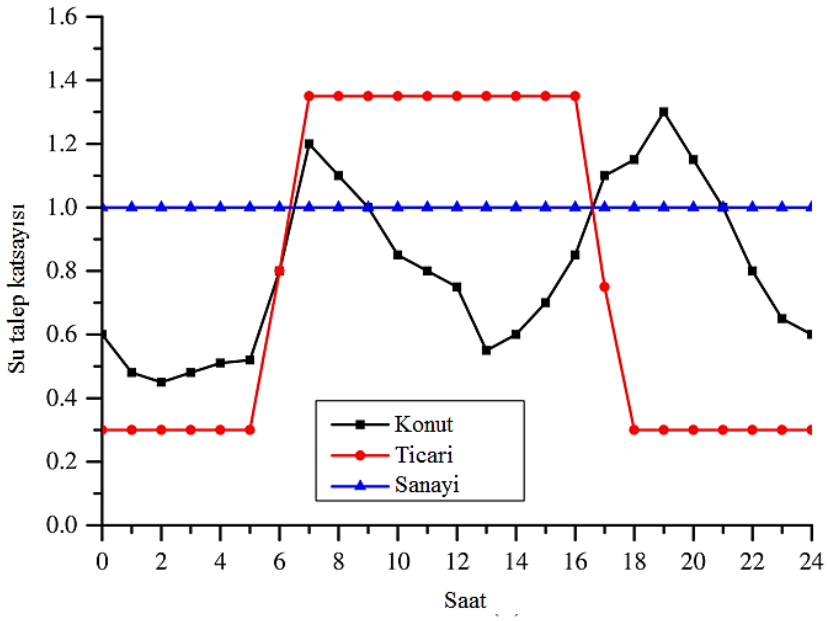
2. Materyal ve Yöntem

İçme suyu şebekelerinde sızıntıları doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biri de işletme basıncıdır. Basınç ile sızıntı miktarının arttığı literatürdeki birçok çalışmada geçmektedir (van Zyl & Cassa, 2014; Thornton & Lambert, 2005; Schwaller vd., 2015; Özdemir vd., 2021; Marzola vd., 2021; Lambert vd., 2017; Kabaasha vd., 2016; Dundović & Tadić, 2022; May, 1994). Mckenzie & Wegelin (2009) tarafından yapılan çalışmada basınç yönetimi metotları, klasik sabit ayarlı yönetim, zaman ayarlı yönetim, debi ayarlı yönetim ve kapalı devre basınç kontrolü olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan saha çalışmalarında basit olması nedeniyle genellikle klasik sabit ayarlı basınç yönetimi daha yaygındır. Bu yöntemde şebekenin girişine yerleştirilen bir basınç kırıcı vana yardımıyla işletme basıncı belirlenen bir değere sabitlenmektedir. Ancak sabit çıkış basıncı kullanıma ya da zamana bağlı olarak değişmemektedir. Bu yöntemdeki çıkış basıncının referansı, yalnızca şebekenin kritik noktasında oluşacak basınç değerine en yüksek tüketim saatinde minimum değerin altına inmemesidir. Bu minimum değere göre vanaya sabit bir çıkış basıncı tanımlanmaktadır.



Şekil 1: Klasik sabit basınç yönetimi (Mckenzie & Wegelin, 2009)

Klasik basınç yönetim senaryolarında giriş basıncının sabit olması nedeniyle sistemin işletme verimi düşmektedir. İleri basınç yönetim sistemlerinden olan zaman ayarlı yönetim, debi ayarlı yönetim ve kapalı devre basınç kontrolü yönetimlerinin uygulanması ile sistem verimi artmaktadır. Bu sayede şebekede tüketimin az olduğu saatlerde gerekli basınç değerinin üzerindeki basınçlar azaltılabilmektedir. İçmesuyu şebekelerinde tüketim saatlik olarak değişmekte ve bu değişim kaynaklı olarak işletme basıncında da dalgalanma oluşmaktadır. Konut, ticari ve sanayi bölgelerinde değişimlerin hızı ve saatleri farklı olabilmektedir. Hidrolik analiz yapılırken saatlik tüketimi modellemek için tüketim çarpanı kullanılmaktadır. Bu çarpan ortalaması "1.00" olacak şekilde tüketici türüne göre değişmektedir. Aşağıdaki şekilde Letting vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada kullanılan örnek tüketim çarpanlarının saatlik değişim ait grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2: Farklı bölgeler için saatlik su tüketim grafikleri (Letting vd., 2017)

Tüketimin artması ve azalması durumlarında sistemin işletme basıncı tüketim ile ters orantılı olarak değişmektedir. Sanayi bölgelerinde, boru çapları doğru seçilirse genellikle sistemde ani değişimler diğer bölgelere göre daha az olmaktadır. Günümüzde çoğu problemin çözümlenmesinde farklı en iyileme algoritmaları kullanılmaktadır. Meta sezgisel algoritmalar, yüksek mertebeli çalışma alanında, efektif arama işlemleri kullanarak çözümleme evrenindeki en iyi çözüme daha çabuk şekilde gidilmektedir. Bir optimizasyon çözümlemesinin üç ana bileşeni vardır.

Bunlar amaç fonksiyonu, bilinmeyenler (değişkenler) ve kısıtlardır (Kahraman & Özdağlar, 2004). Su kayıplarını etkileyen birçok parametrenin olmasının anlaşılmasıyla birlikte birçok araştırmacı farklı parametreler üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar sırasında hangi parametrenin kayıpları daha fazla azaltacağı ve abone memnuniyetini etkilemeyeceği ise ortaya bir optimizasyon problemini çıkarmıştır. İçme suyu sistemlerinde su kaybını azaltarak verimi artırmak için çalışma yapılabilecek optimizasyon çalışmaları uzun yıllardır uygulanmaktadır (Suribabu, 2012). Genetik Algoritma metodunun ortaya çıkışı 1970'li yılların başında olmuştur. Holland (1992) tarafından geliştirilen Genetik Algoritma (GA), tarihte önerilen ilk popülasyon tabanlı stokastik algoritmalardan biridir. Diğer Evrimsel Algoritmalara benzer şekilde genetik algoritmasının ana operatörleri seçme, çaprazlama ve mutasyondur. Genetik algoritma rastgele bir popülasyonla başlar. Bu popülasyon, çeşitliliği artırmak için Gauss rastgele dağılımından oluşturulabilir. Başlatma adımındaki temel amaç, popülasyon çeşitliliğini artırmak ve gelecek vaat eden bölgeleri bulma şansını artırmak için çözümleri arama uzayına mümkün olduğunca eşit bir şekilde yaymaktır.

Çalışmanın amacı klasik basınç yönetiminde olduğu üzere şebekenin işletme basıncının minimize edilmesi olarak seçilmeyip, 24 saatlik simülasyonda zaman dilimleri değiştikçe her bir düğüm noktasında oluşacak basınç dalgalanmalarının optimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu her düğüm noktasının basınç değişimlerinin toplamı fonksiyonu olarak seçilmiştir. Optimizasyon sırasında amaç fonksiyonu minimize edilerek şebeke genelinde dalgalanma dengelenecektir. Amaç fonksiyonu (objective function) Denklem 1'de gösterilmektedir. Ayrıca optimizasyon kısıtı Denklem 3'te gösterilmektedir.

$$min\ OF = \sum_{i=1}^{n}\sum_{i=0}^{m}(\Delta \mathrm{P}) \tag{1}$$

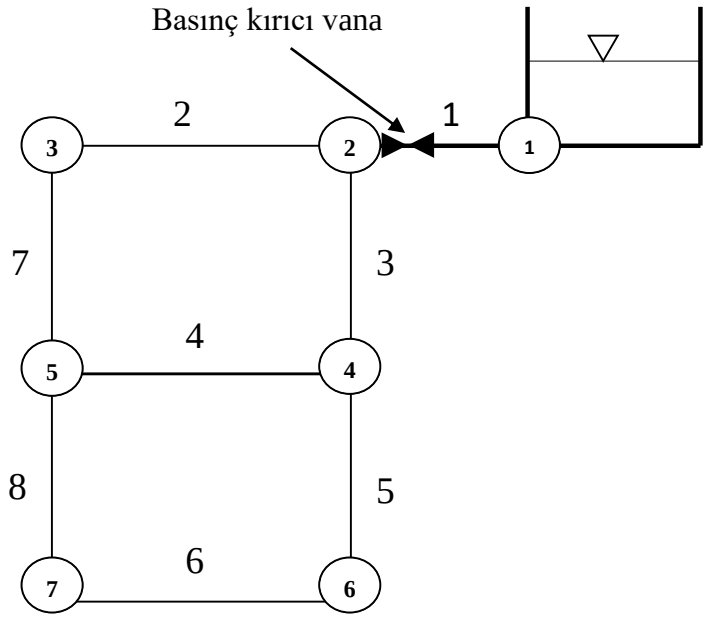
$$min\ OF = \sum_{i=0}^{m}\left(P_{(t_{i+1},1)} - P_{(t_i,1)}\right) + \ldots + \sum_{i=0}^{m}\left(P_{(t_{i+1},n)} - P_{(t_i,n)}\right) \tag{2}$$

$$65 \geq P \geq 15 \tag{3}$$

Burada, *P;* işletme basıncı, ΔP ; basınç değişimi, *n*; düğüm sayısını, *m*; analiz yapılan saati, *t*; zaman dilimi şeklinde tanımlanır. Çalışma kapsamındaki optimizasyon probleminin değişkeni şebekeye yerleştirilen basınç kırıcı vananın çıkış basıncı olacaktır. Optimizasyon sırasında algoritma amaç fonksiyonunu minimize etmek için çalışacaktır. Ancak şebeke kısıtlarından olan basınç değerinin tanımlanan referans değerlerin dışında kalması durumunda, algoritma basınç kırıcı vananın çıkış basıncını azaltıp artırarak tanımlanan aralık kümesinde tutacak ve amaç fonksiyonunun opimum değerini bulacaktır. Optimizasyon sürecinde kısıtların yetersiz olması durumunda, algoritma basınç kırıcı vananın çıkış basıncını azaltıp artırarak amaç fonksiyonunun minimum değerini bulacaktır. İLBANK "İçme suyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartnamesinde şebeke ağlarında işletme basıncının sınırları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir: "Şebekede minimum işletme basınçları müstakbel nüfusu 50.000'e kadar olan yerlerde 20 m, daha büyük nüfuslarda 30 m alınır. Ancak; yangın olduğu saatlerde min. basınç sınırı 15 m (Depo KK.' na göre) olabilir. Şebekenin topoğrafik durumu göz önüne alınarak maksimum statik basınç değeri ise 60 -65 m. olacak şekilde şebeke basınç zonları oluşturulur...". Optimizasyon probleminin kısıtlayıcıları bu şartnameye göre belirlenerek işletme basıncı 15 m ve 65 m arasında seçilmiştir.

3. Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında çalışma yürütülen alan (Alperovits & Shamir, 1977) tarafından yapılan çalışmada Şekil 2'de verilen ve 7 düğüm, bir depodan ve 8 borudan oluşan basit 2 gözlü bir şebekedir. Çalışmada kullanılmak üzere belirlenen referans şebeke, bu çalışma koşullarına uygun olacak şekilde yeniden düzenlenmiş ve hazne kotu 240 m olarak değiştirilmiştir. Bu sayede şebeke işletme basıncı basınç yönetimi uygulanabilecek seviyeye gelmiştir. Ayrıca şebeke girişine basınç kontrolünün sağlanması amacıyla basınç kırıcı vana yerleştirilerek modellenmiştir. Modifiye edilmiş şebekede basınç kırıcı vana Şekil 3 te gösterilmiştir. Şekilde gösterilen ağ birçok araştırmacı tarafından en uygun tasarıma ilaveten güvenilirlik çalışması için de referans şebeke olarak 600 den fazla çalışmada kullanılmıştır. Bunlardan bazıları, Goulter ve Coals (1986), Fujiwara vd. (1987), Kessler ve Shamir (1989), Abebe ve Solomatine (1998), Cunha ve Sousa (1999), Eusuff ve Lansey (2003), Liong ve Atiquzzaman (2004), Chandramouli (2015), Van Dijk vd. (2008), Suribabu ve Neelakantan (2006), Samani ve Mottaghi (2006), Savic ve Walters (1997), Keedwell ve Khu (2005) şeklinde verilebilir.



Şekil 3: 2 gözlü su şebekesi (Alperovits & Shamir, 1977)

4. Analiz ve Değerlendirme

Bu çalışmada hidrolik modelin oluşturulması ve kalibrasyon süreçlerine etkin bir şekilde uygulanan EPANET programı kullanılmıştır. EPANET programı, Amerikan Çevre Koruma Ajansı (US EPA) tarafından geliştirilen, ücretsiz ve açık kaynaklı kodlu bir programdır. Bu çalışmada öncelikli olarak EPANET programında hidrolik modeli oluşturulan referans şebekeler belirlenmiştir. Bu referans şebekeler EPANET-MATLAB entegrasyonu sağlanarak MATLAB programına aktarılmıştır. EPANET-MATLAB Toolkit amacı, giderek büyüyen akıllı su ağları alanında araştırma ve geliştirme için ortak bir programlama çerçevesi olarak hizmet etmektir. Model 24 saatlik simülasyon ile çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Düğümlerin 24 saatlik tüketim çarpanı tanımlanmıştır. Bundan dolayı MATLAB üzerinden yazılan kod ile şebekede zamana bağlı basınç kontrolü yöntemi ile çalışma yapılmıştır. Bu periyotta basınç dalgalanmasının optimizasyonu için bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Klasik basınç yönetimi uygulanması durumunda, kritik noktaya kullanımın en yoğun olduğu saatte yeterli basınçta su iletilmesi için basınç kırıcı vananın çıkış basıncının analizi 20 m ile başlamış ve 65 m olan sınır değere kadar yükseltilmesi gerekmiştir. İleri basınç yönetimi senaryosunda ise kritik noktadaki tüketici memnuniyeti için belirlenen minimum basınç kırıcı vana çıkış basıncı Tablo 1'de verilmiştir.

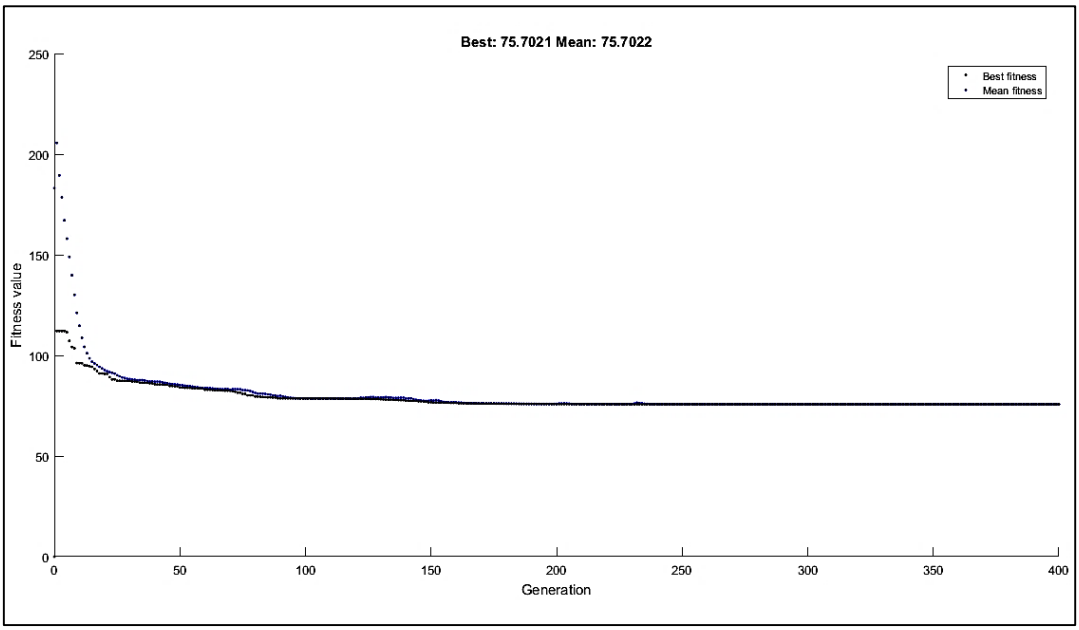
Tablo 1: İleri basınç yönetimi BKV minimum çıkış basınçları

Saat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Basınç(m)	37	37	37	37	37	38	65	65	65	40	40	40
Saat	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Basınç(m)	65	65	65	40	40	40	65	65	40	38	37	37

MATLAB optimizasyon araç kutusu yardımıyla model çalıştırılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma seçilmiştir. Optimizasyonda kullanılan iterasyon sayılarına göre amaç fonksiyonunun değişimi Tablo 2'de gösterilmiştir. İterasyon sayısının artması ile bir noktaya kadar amaç fonksiyonu minimize edilmiştir. Ancak iterasyon sayısı arttırıldığında bir değerden sonra amaç fonksiyonu değerinin değişmediği ve belirli bir bölgede kaldığı anlaşılmıştır.

Tablo 2: İleri basınç yönetimi BKV minimum çıkış basınçları

İterasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonun Değeri (OF)
10	104.35
50	84.58
100	75.94
211	79.78
260	77.72
271	75.69
359	75.69
400	75.70

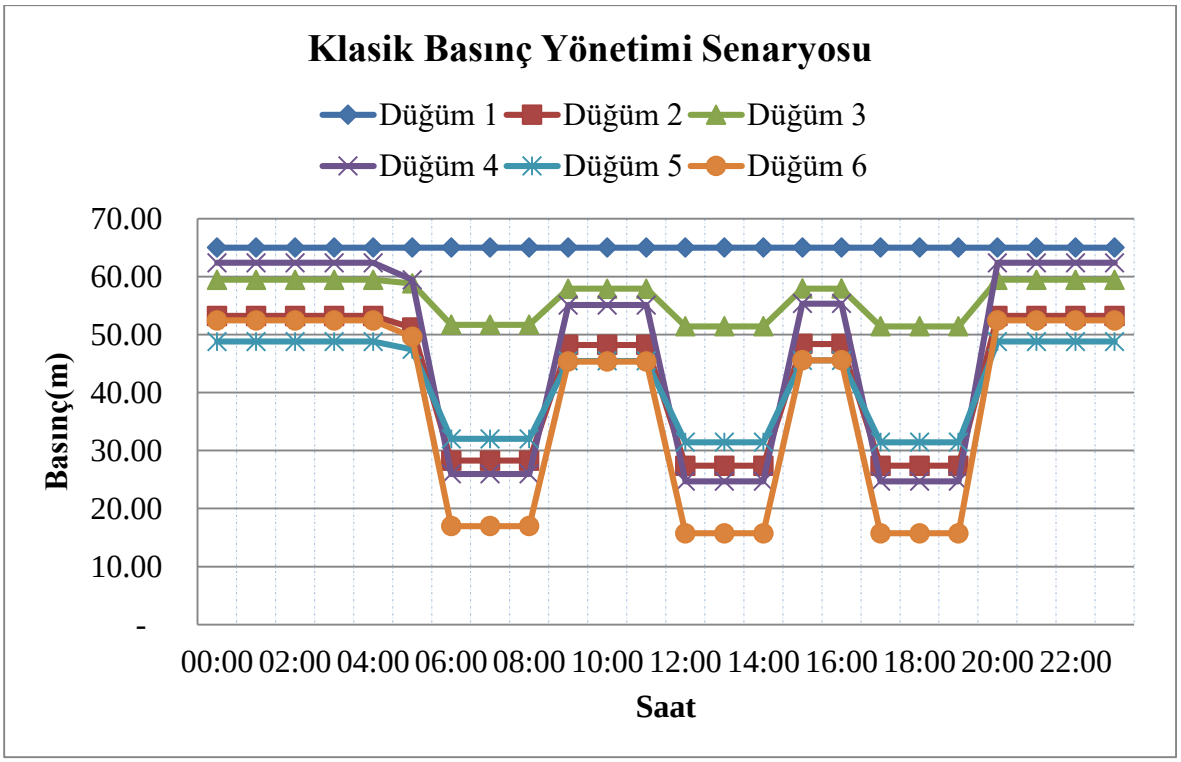


Şekil 4: İterasyon sayısına göre amaç fonksiyonu değişimi

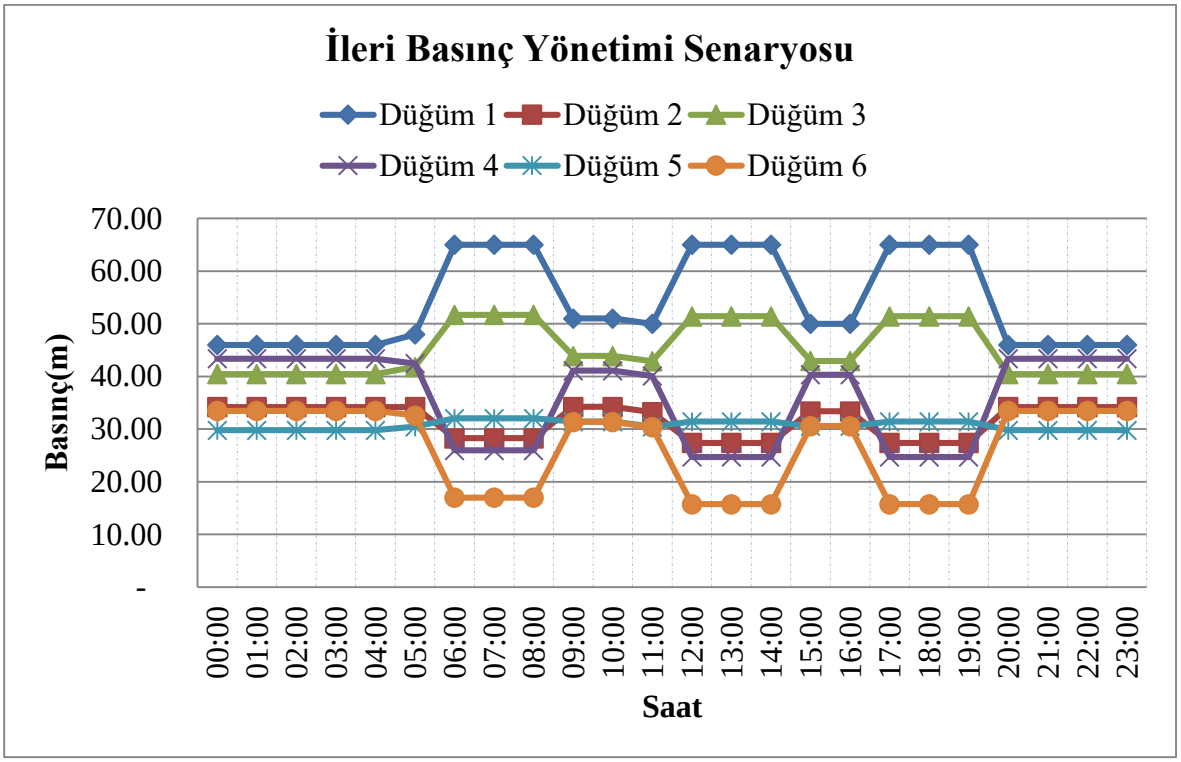
Genetik algoritma ile yapılan optimizasyonda popülasyon büyüklüğü çalışma saati sayısı olan 25 ve maksimum iterasyon sayısı ise 400 olarak seçilmiştir. Optimizasyon sonucunda oluşan ileri basınç yönetimi senaryosuna ait BKV çıkış basınçları Tablo 3'te listelenmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da klasik basınç yönetimi ve ileri basınç yönetimi uygulamalarında saatlik düğüm basınç değişim grafikleri gösterilmiştir.

Tablo 3: İleri basınç yönetimi senaryosu

Saat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Basınç(m)	40	40	40	40	40	42	65	65	65	45	44	45
Saat	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Basınç(m)	65	65	65	45	44	65	65	65	40	40	40	40

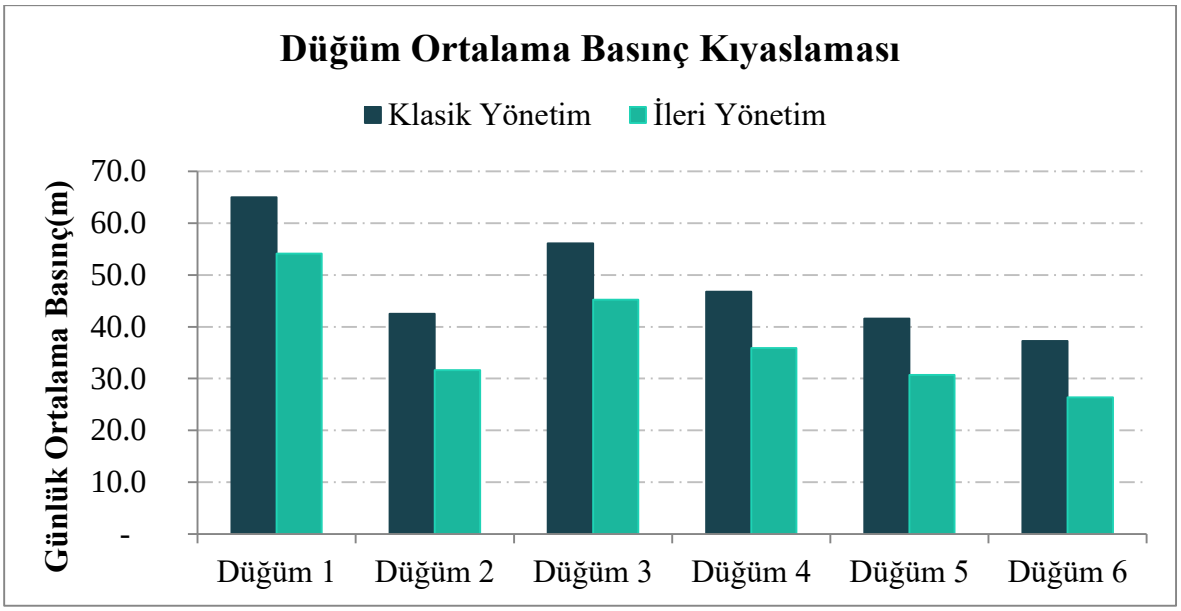


Şekil 5: Klasik basınç yönetimi düğüm basınç değişimi



Şekil 6: İleri basınç yönetimi düğüm basınç değişimi

Söz konusu çizelge ve senaryo grafikleri incelendiğinde klasik basınç yönetimi uygulanırken düğümlerde oluşan saatlik basınç değişimi 35 m'ye kadar çıkabilirken ileri basınç yönetimi ile bu değer 20 m seviyelerine indirilebilmiştir.



Şekil 7: Düğüm ortalama basınç kıyaslaması

Çalışma kapsamında asıl amaç düğümlerde oluşan basınç dalgalanmalarını azaltmak olarak seçilmiş olsa da, şekilde çalışma sonucunda düğümlerde oluşacak günlük ortalama basınç değerlerinin düşürüldüğü gözlemlenmektedir. Basınçlar kıyaslandığında bu şebeke karakteristiğine özel olarak basınçların ileri basınç yönetiminde azaldığı gözlemlenmiştir. Şebeke ve tüketim türüne bağlı olarak bu veri değişebilmektedir. Uygulanan yöntemlere göre düğümlerin saatlik basınç farkı değerlerini gösteren grafikler EK'te gösterilmektedir. İleri basınç yönetimi uygulandığında düğümlerde oluşan basınç değişimlerinin genellikle azaldığı gözlemlenmiştir. Düğüm noktasının konumuna ve karakteristiğine göre bu azalmanın oranı değişmektedir.

1 numaralı düğüm BKV'nin bulunduğu nokta olduğundan bu noktada ileri basınç yönetimi uygulandığında farklı bir değişim oluşmaktadır. Bu düğümde kullanım olmadığından ve modelleme amaçlı konulduğundan bu değişim göz ardı edilebilir. 2 numaralı düğümde tüketimin değiştiği saatlerde oluşan basınç dalgalanmasının 20-25 m seviyelerinden 5-6 m seviyelerine indirildiği görülmektedir. Dalgalanma kabul edilebilir çalışma için bir seviyede iken ileri basınç yönetimi ile daha da azaltılmıştır. Düğüm 3 te klasik yönetimde oluşan basınç dalgalanmasının düşük olması sebebiyle çok değişim olmamıştır. Ancak optimizasyon sonucunda dalgalanma bir nebze artmış ancak kabul edilebilir bir seviye içerisinde tutulmuştur. 4 numaralı düğümde 30-37 m arasında değişen dalgalanma 16-20 m seviyelerine indirilmiştir. Kabul edilebilir seviyenin çok üzerinde olan basınç dalgalanması ileri basınç yönetimi ile kabul edilebilir seviye olan 14 m seviyesine yaklaşmıştır. 5 numaralı düğümde 15-17 m arasında değişen dalgalanma 1-2 m seviyelerine indirilmiştir. 6 numaralı düğümde ise 27-37 m arasında değişen dalgalanma 14-18 m seviyelerine indirilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ile basınç yönetimi çalışması sırasında minimize edilecek parametre olarak saatlik basınç farkı seçilmiş ve şebekenin gün içerisindeki basınç dalgalanmasının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. EPANET programında hidrolik modeli oluşturulan referans şebekeye ait veriler EPANET-MATLAB Toolkit ile MATLAB ortamına aktarılmıştır. Çalışma yapılan optimizasyon sonucunda referans şebeke olan ve 6 düğümden oluşan modifiye Alperovits-Shamir şebekesinin 4 düğümünde basınç dalgalanmaları azaltılmıştır. Bir düğüm ise BKV' nin konulduğu düğümdür ve göz ardı edilebilmektedir. Basınç dalgalanmalarına ait ortalama klasik basınç yönetiminde 18.56 m iken, ileri basınç yönetimi ile 8.41 m'ye düşürülmüştür. Bu %55 oranında bir azalmaya denk gelmektedir. Ayrıca şebekenin ortalama basıncı klasik yönetimde 48.2 m, ileri yönetimde 37.3 m olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak Alperovits-Shamir şebekesinin ortalama basınç dalgalanması malzeme bilimciler için kabul edilen 14 m basıncın altına kabul edilebilir seviyeye indirilmiş ve ortalama işletme basıncıda düşürülmüştür. Yapılan çalışmanın tüm şebekelerde farklı oranlarda fayda sağlayacağı düşünülmekte ve uygulanacak şebekenin karakteristiği ile topoğrafyasına göre uygunluğu değişmektedir. Çalışmanın şebeke düğüm noktaları arasındaki yükseklik farklarının fazla olduğu, gün içerisindeki ihtiyaç debisinde oluşan dalgalanmaların fazla olduğu şebekelerde daha iyi çalışacağı düşünülmektedir. Günlük debi dalgalanmalarının az olduğu veya hidrolik kayıpların az olduğu sistemlerde çalışmanın olumlu sonuç vereceği ancak performansının düşük olacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda uygulama yapılmadan önce şebeke topoğrafyası ve debi dalgalanmaları incelenmeli, çalışmanın fayda-maliyet analizi yapılarak çıktılarının göz önünde bulundurulması önerilmektedir. Ayrıca debi duyarlı ve zaman ayarlı kontrolün yanı sıra kapalı devre basınç kontrolü çalışması yapılarak performansının değerlendirilmesi önerilmektedir.

Kaynaklar

Abebe, A. J., & Solomatine, D. P. (1998, August 24–26). *Application of global optimization to the design of pipe networks* [Conference presentation]. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Denmark.

Alperovits, E., & Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research, 13*(6), 885–900. https://doi.org/10.1029/WR013i006p00885

Botella Langa, A., Choi, Y.-G., Kim, K.-S., & Jang, D.-W. (2022). Application of the Harmony Search Algorithm for Optimization of WDN and Assessment of Pipe Deterioration. *Applied Sciences, 12*(7), Article 3550. https://doi.org/10.3390/app12073550

Chandramouli, S. (2015). Reliability-based optimal design of a municipal water supply pipe network. *Urban Water Journal, 12*(5), 353–361. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.993997

Cunha, M. da C., & Sousa, J. (1999). Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management, 125*(4), 215–221. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(215)

Dundović, I., & Tadić, L. (2022). A field experiment verification of theoretical exponent N1 for FAVAD method in defining the relationship of pressure and water losses. *Water, 14*(13), Article 13. https://doi.org/10.3390/w14132067

Durmuşçelebi, F. M. (2018). *Su kayıplarının azaltılması için içme suyu dağıtım sistemlerinin rehabilitasyonu ve fayda-maliyet analizi* [Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Eusuff, M. M., & Lansey, K. E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management, 129*(3), 210–225. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(210)

Fanner, P., Thornton, J., & Liemberger, L. (2007). *Evaluating water loss and planning loss reduction strategies.* Awwa Research Foundation.

Folkman, S., & Parvez, J. (2020). PVC pipe cyclic design method. *Pipelines, 2020*, 304–315. https://doi.org/10.1061/9780784483213.034

Fujiwara, O., Jenchaimahakoon, B., & Edirishinghe, N. C. P. (1987). A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research, 23*(6), 977–982.

Goulter, I. C., & Coals, A. V. (1986). Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks. *Journal of Transportation Engineering, 112*(3), 287–301. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1986)112:3(287)

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.* The MIT Press.

İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği. (2014, 8 Mayıs). *Resmi Gazete* (Sayı: 28994). https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19651&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

Kabaasha, A. M., van Zyl, J. E., & Piller, O. (2016, November 7–9). *Modelling pressure: Leakage response in water distribution systems considering leak area variation* [Conference presentation]. 14th CCWI International Conference, Computing and Control in Water Industry, Amsterdam, Netherlands.

Kahraman, A. M., & Özdağlar, D. (2004). Su dağıtım sistemlerinin genetik algoritma ile optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6*(3), 1–18.

Keedwell, E., & Khu, S.-T. (2005). A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18*(4), 461–472. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.10.001

Kessler, A., & Shamir, U. (1989). Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. *Water Resources Research, 25*(7), 1469–1480. https://doi.org/10.1029/WR025i007p01469

Lambert, A., Fantozzi, M., & Shepherd, M. (2017, September 5–7). *Pressure: Leak flow rates using FAVAD: An improved fast-track practitioner's approach* [Conference presentation]. CCWI 2017 – 15th International Computing & Control for the Water Industry Conference, University of Sheffield.

Letting, L. K., Hamam, Y., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Estimation of water demand in water distribution systems using particle swarm optimization. *Water, 9*(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/w9080593

Liong, S., & Atiquzzaman, M. (2004). Optimal design of water distribution networks using shuffled complex evolution. *Journal of The Institution of Engineers, 44*(1), 93–107.

Marzola, I., Alvisi, S., & Franchini, M. (2021). Analysis of MNF and FAVAD model for leakage characterization by exploiting smart-metered data: The case of the Gorino Ferrarese (FE-Italy) district. *Water, 13*(5), Article 5. https://doi.org/10.3390/w13050643

May, J. (1994). Pressure-dependent leakage. *World Water & Environmental Engineering.* http://www.leakssuite.com/wpcontent/uploads/2016/10/JOHN-MAYSEMINAL-1994 ARTICLE-4.pdf.

Mckenzie, R., & Wegelin, W. (2009, February 21). *Implementation of pressure management in municipal water supply systems*. https://www.miya-water.com/fotos/artigos/03_implementation_of_pressure_management_in_municipal_water_supply_systems_3323280065a328bc009ead_9613006875f18100f66a3f.pdf

Negm, A., Ma, X., & Aggidis, G. (2023). Review of leakage detection in water distribution networks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1136*(1), Article 012052. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012052

Özdemir, Ö., Fırat, M., Yılmaz, S., & Usluer, M. (2021). Analysis of the effect of pressure control on leakages in distribution systems by FAVAD equation and field applications. *Water Practice and Technology, 16*(2), 320–332. https://doi.org/10.2166/wpt.2021.024

Pearson, D. (2019). *Standard definitions for water losses.* IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789060881

Sangroula, U., Han, K.-H., Koo, K.-M., Gnawali, K., & Yum, K.-T. (2022). Optimization of water distribution networks using genetic algorithm-based SOP–WDN program. *Water, 14*(6), Article 851. https://doi.org/10.3390/w14060851

Samani, H. M. V., & Mottaghi, A. (2006). Optimization of water distribution networks using integer linear programming. *Journal of Hydraulic Engineering, 132*(5), 501–509. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:5(501)

Savic, D. A., & Walters, G. A. (1997). Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management, 123*(2), 67–77. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67)

Schwaller, J., van Zyl, J. E., & Kabaasha, A. M. (2015). Characterizing the pressure-leakage response of pipe networks using the FAVAD equation. *Water Supply, 15*(6), 1373–1382. https://doi.org/10.2166/ws.2015.101

Sınmaz, D. (2019). *İçme suyu dağıtım şebekelerinin hidrolik analizi ve su kayıplarının modellenmesi üzerine örnek bir çalışma* [Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Suribabu, C. R., & Neelakantan, T. R. (2006). Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water Journal*, *3*(2), 111–120. https://doi.org/10.1080/15730620600855928

Suribabu, C. R. (2012). Heuristic-based pipe dimensioning model for water distribution networks. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, *3*(4), 115–124. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000104

Thornton, J., & Lambert, A. (2005, September 12–14). *Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency, and pressure: Consumption relationships* [Conference presentation]. IWA Special Conference 'Leakage 2005', Halifax, Nova Scotia, Canada.

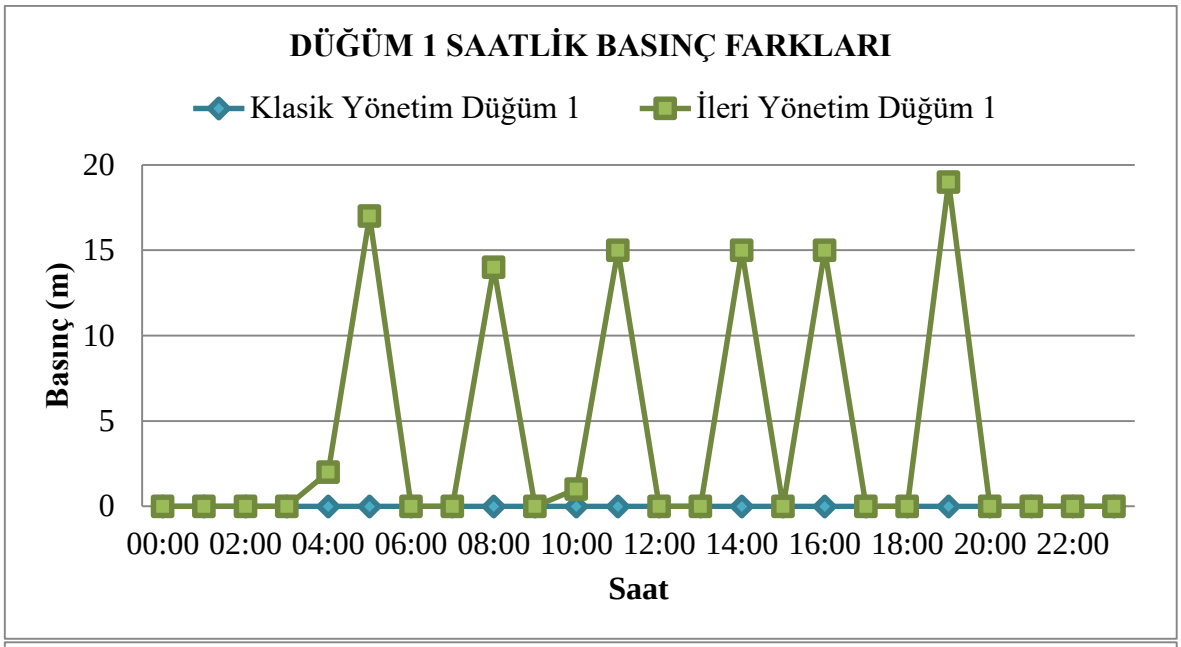
Türkeş, M., Sümer, U. M., & Çetiner, G. (2000, 13 Nisan). *Küresel iklim değişikliği ve olası etkileri*. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yayinlar/iklimetkileri.pdf.

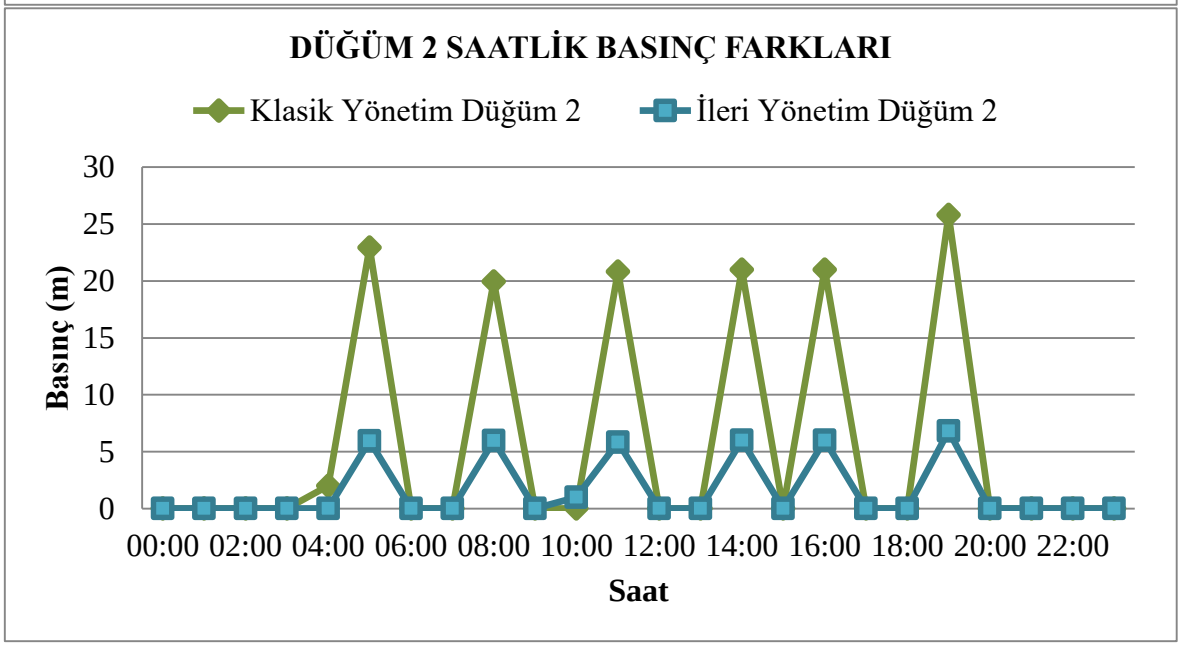
Van Dijk, M., van Vuuren, S., & Van Zyl, J. (2008). Optimizing water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm. *Water SA*, *35*(5), 537–538. https://doi.org/10.4314/wsa.v34i5.180651

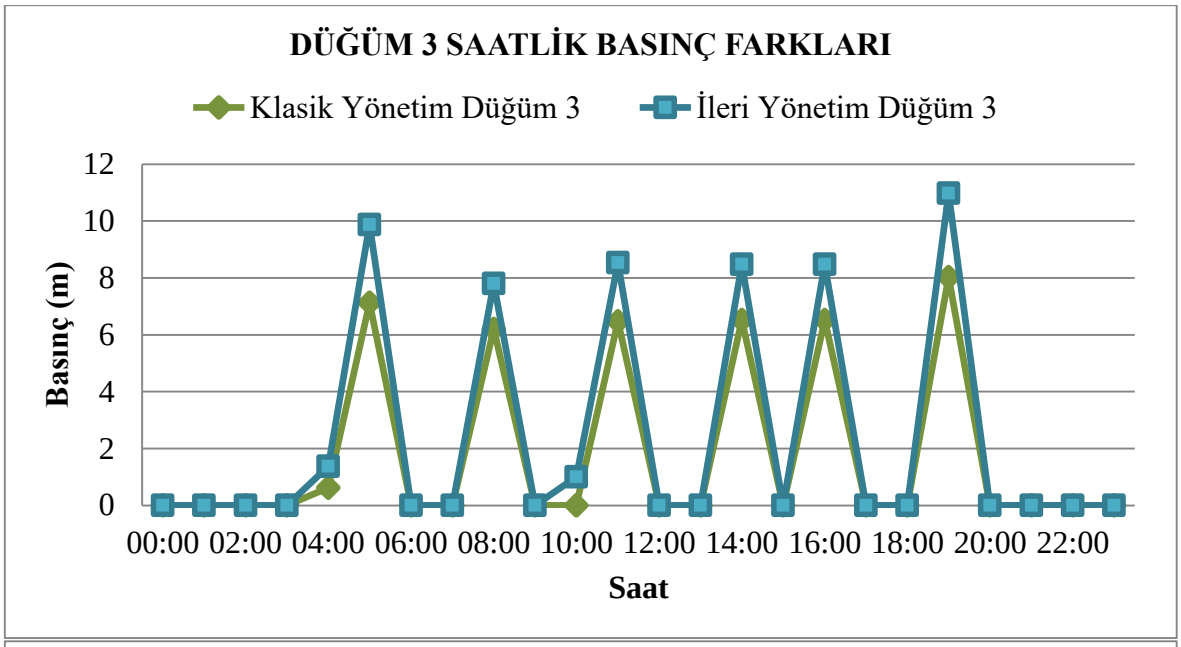
van Zyl, J. E., & Cassa, A. M. (2014). Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, *140*(2), 182–189. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000813

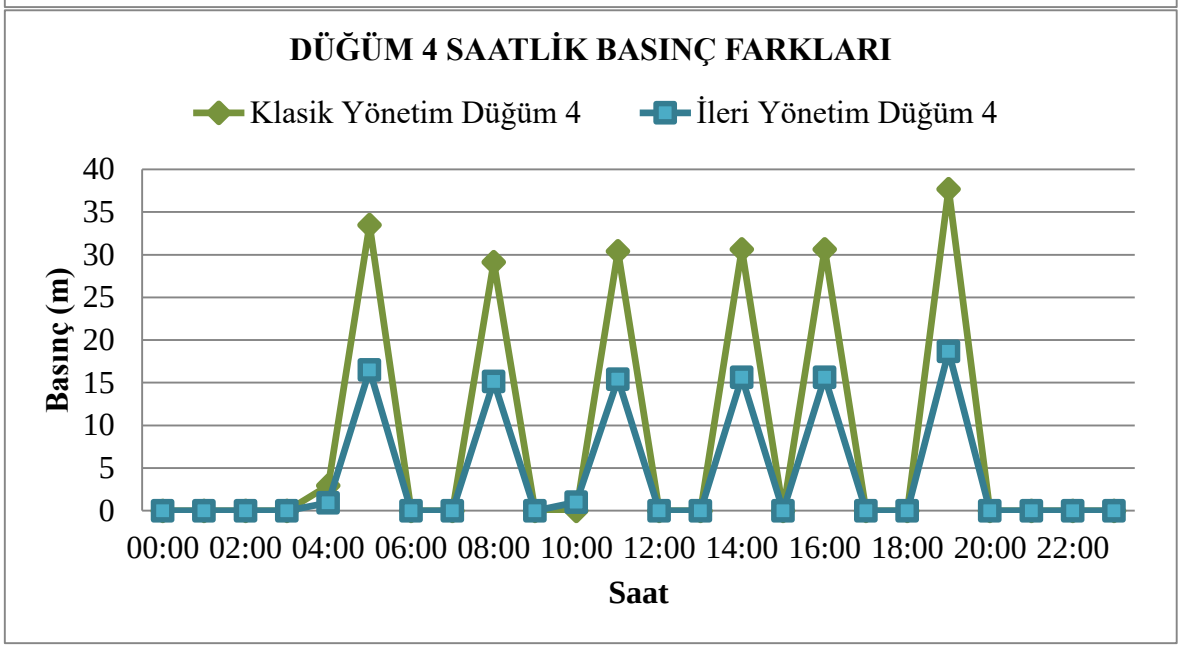
EKLER

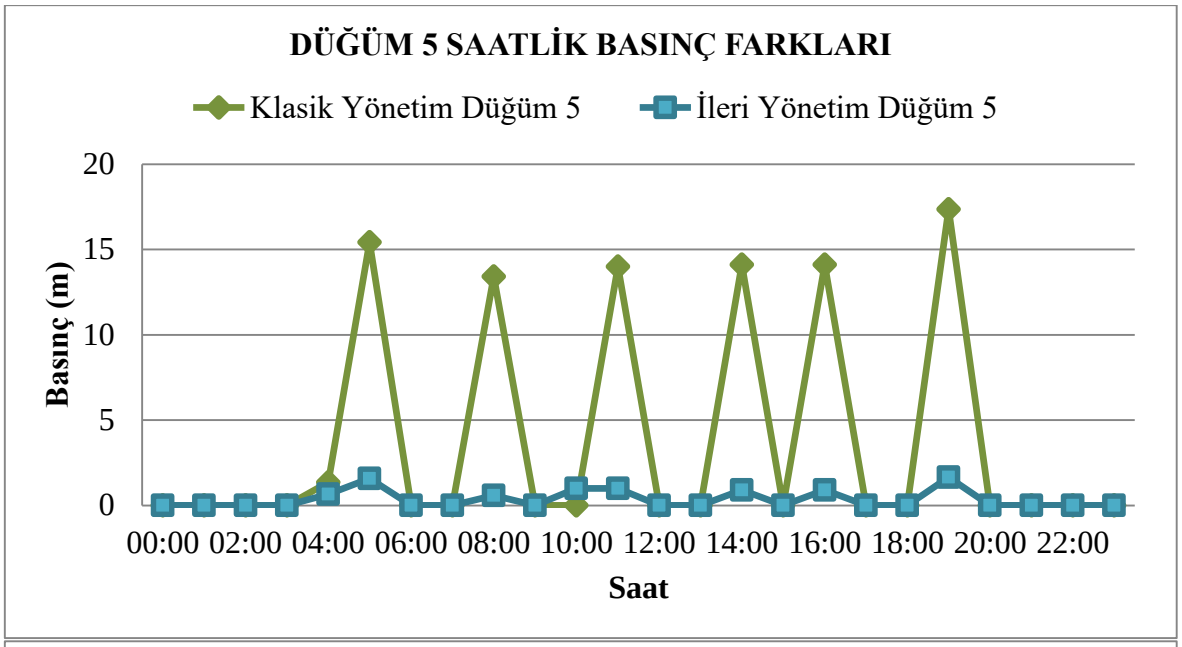
EK-1: Saatlik Basınç Farkı Grafikleri

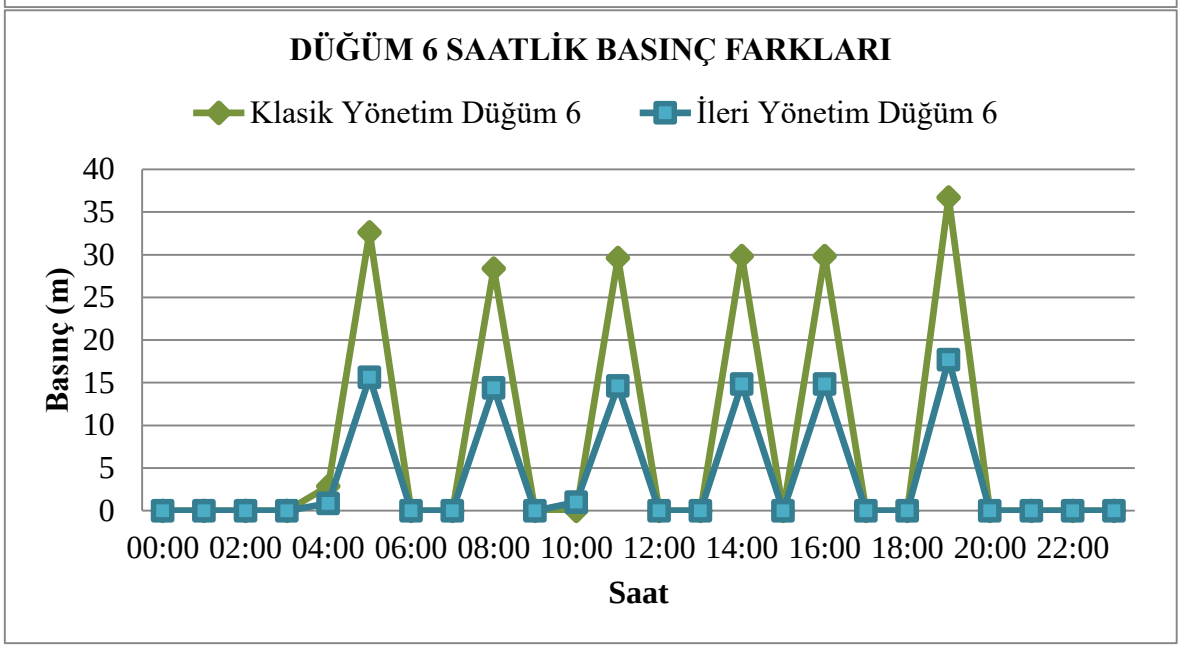





DÜĞÜM 3 SAATLİK BASINÇ FARKLARI
Klasik Yönetim Düğüm 3
İleri Yönetim Düğüm 3
Basınç (m)
0
2
4
6
8
10
12
00:00 02:00 04:00 06:00 08:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00
Saat


DÜĞÜM 4 SAATLİK BASINÇ FARKLARI
Klasik Yönetim Düğüm 4
İleri Yönetim Düğüm 4
Basınç (m)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
00:00 02:00 04:00 06:00 08:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00
Saat


DÜĞÜM 5 SAATLİK BASINÇ FARKLARI
Klasik Yönetim Düğüm 5
İleri Yönetim Düğüm 5
Basınç (m)
20
15
10
5
0
00:00 02:00 04:00 06:00 08:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00
Saat


DÜĞÜM 6 SAATLİK BASINÇ FARKLARI
Klasik Yönetim Düğüm 6
İleri Yönetim Düğüm 6
Basınç (m)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
00:00 02:00 04:00 06:00 08:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00 22:00
Saat

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Araştırma Makalesi / Research Article, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 340–353, DOI: 10.21324/dacd.1606775

Afet ve Acil Durum Toplanma Alanlarının İncelenmesi ve Potansiyel Alanların Önerilmesi: Trabzon Akçaabat Örneği

Gülten Kara[1,*], Kadir Kaan Yavruoğlu[1]

[1]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 61080 Trabzon, Türkiye*

Özet

Afet ve acil durum toplanma alanları, genellikle deprem gibi doğal afetler, yangın, terör saldırısı gibi acil durumlarda insanlara kritik saatlerde barınma imkânı sağlayan, insanların temel ihtiyaçlarını sağlayabilecekleri ve güvenli bir şekilde bekleyebilecekleri yerlerdir. Bu alanlar genellikle açık ve yeşil alanlar olarak belirlenir ve insanların kolayca ulaşabileceği konumda yer alır. Afet ve acil durum toplanma alanlarının seçilen ölçütlere göre değerlendirilmesi, toplumun güvenliği ve afet yönetimi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Toplanma alanlarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi, eksikliklerin ve gereksinimlerin belirlenmesi afet yönetimi süreçlerini kolaylaştırır. Bu çalışmanın amacı, Trabzon Akçaabat ilçesi afet ve acil durum toplanma alanlarını erişilebilirlik, kullanılabilirlik ve çok fonksiyonluluk, teknik altyapı olanakları, alansal büyüklük ve kapasite, çevresindeki binaların kat yüksekliği, çevresindeki binalar ile arasındaki mesafe, deniz ve dere yataklarına olan mesafe ölçütlerine göre değerlendirmektir. Değerlendirme sonuçlarına göre afet ve acil durum toplanma alanlarının ilçe genelinde yetersiz olduğu belirlenmiş ve potansiyel toplanma alanları önerilmiştir. Ayrıca Akçaabat ilçesi afet ve acil durum toplanma alanlarının eksikleri ve gereksinimleri için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Sözcükler

Afet ve Acil Durum Toplanma Alanları, Doğal Afetler, Deprem, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)

Examination of Disaster and Emergency Assembly Areas and Recommendation of Potential Areas: The Case of Akçaabat Trabzon

Abstract

Assembly areas for disaster and emergency situations are designated places where people can safely gather and meet their basic needs during critical times, such as natural disasters like earthquakes, fires, and terrorist attacks. These areas are mostly open and green spaces, easily accessible to the people. However, over time, due to population growth, unplanned urbanization, lack of maintenance, and changes in planning, these areas may become insufficient to meet the demand. Evaluating disaster and emergency assembly areas according to selected criteria plays a critical role in community safety and disaster management. Effective assessment *of these assembly areas, identifying deficiencies and requirements, facilitates disaster management processes. The aim of this study is to assess the disaster and emergency assembly areas in the Akçaabat district of* Trabzon in *terms of accessibility, usability, multifunctionality, technical infrastructure facilities, spatial size and capacity, the height of surrounding buildings, the distance between the assembly areas and surrounding buildings, and the proximity to sea and riverbeds. The evaluation results indicated that the disaster and emergency assembly areas are generally insufficient throughout the district, and potential new assembly areas have been presented. Additionally, recommendations have been made to address the deficiencies and requirements of the disaster and emergency assembly areas in Akçaabat district.*

Keywords

Disaster and Emergency Assembly Areas, Natural Disasters, Earthquake, Disaster and Emergency Management Presidency

1. Giriş ve Ana Bölümler

Türkiye'de deprem, sel, yangın gibi doğal afetlerin yanı sıra insan kaynaklı afetler de sıklıkla meydana gelmektedir. Bu afetlerin etkilerinin en aza indirilmesi ve insanların güvenliğinin sağlanması için, deprem öncesinde gerekli önlemlerin alınması gerekir. Özellikle deprem sırasında, insanların hızlı bir şekilde bilgilendirilmesi, ilk travmalarının atlatılması ve gerektiğinde geçici barınma alanlarına ulaştırılmaları için alınacak önlemler arasında, afet ve acil durum toplanma alanlarının kapasitesinin ve yeterliliğinin belirlenmesi öncelikli bir gerekliliktir.

Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü' ne göre risk; bir olayın belirli koşul ve ortamlarda doğurabileceği can, mal, ekonomik ve çevresel değerlerin kaybının gerçekleşme olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Afet riski ise; belirli bir tehlikenin, gelecekte belirli bir zaman içinde meydana gelmesi hâlinde, insanlara, insan yerleşmelerine ve doğal çevreye, bunların zarar veya hasar görebilirlikleri ile orantılı olarak oluşturabileceği kayıpların olasılığıdır.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (462) 3772772 Faks: +90 (462) 3280918
E-posta: gispir@ktu.edu.tr (Kara G.), kadirkaanyvr@gmail.com (Yavruoğlu K.K.)

Gönderim Tarihi / Received : 24/12/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 17/01/2025

Riskten veya kayıp olasılığından bahsedebilmek için belirli büyüklükteki tehlike veya olayın varlığı ve bundan etkilenebilecek değerlerin mevcudiyeti ile bu değerlerin tehlike veya olaydan etkilenme oranları veya zarar görebilirliklerinin tahmin edilebilmesi gerekmektedir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2024a). Tehlike varsa risk vardır. Bu nedenle afet tehlikesi altındaki alanlarda risklerin belirlenmesi, bahsi geçen tüm kayıpların en aza indirilmesinde kritik öneme sahiptir.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından belirlenen Afet ve Acil Durum Toplanma Alanları (AADTA), afet durumunda insanların güvenli bir şekilde toplanabileceği, yardım ve destek alabileceği bölgelerdir. AADTA'nın büyüklüğü, dağılımı ve altyapı özellikleri belirlenerek AFAD il müdürlükleri tarafından mahalle/bölge bazında seçilir. Bu alanlar genellikle açık ve geniş arazilerde mevcut olup, insanların bir araya toplanması, sağlık hizmetlerinin ulaştırılması ve lojistik destek sağlanması süreçlerini hızlandırmak için kritik öneme sahip alanlardır. AFAD tarafından belirlenen bu alanların, öncelikli olarak açık ve yeşil alanlar, parklar ve kamu arazileri olması gözetilmektedir.

AFAD tarafından AADTA için yapılan bilgilendirme çalışmaları insanların bu alanlara nasıl ulaşacakları, nasıl yardım alabilecekleri konusunda bilinçlenmelerine yardımcı olmaktadır. Böylece afet durumunda insanlar daha hazırlıklı ve bilinçli bir şekilde hareket edebilmektedir. AADTA'nın güvenliğinin sağlanması ve bilgilendirme çalışmaları, afetlerde can ve mal kaybını en aza indirmek ve afet yönetimini iyileştirmek için gereklidir. Bu nedenle, AADTA'nın stratejik bir şekilde belirlenmesi ve insanlara zamanında yardım ulaştırılması için sürekli bir çalışma ve koordinasyon zorunludur. Afetler geçmişten günümüze kadar etkisini sürdürmektedir ve gelecekte de sürdürmeye devam edecektir. Bu nedenle doğal afetler ile meydana gelebilecek problemlerin ve afetlerden sonra oluşabilecek ikincil tehlikelerin en aza indirgenmesine yönelik çalışmaların sürdürülebilirliğinin sağlanması oldukça önemlidir. AADTA, afet ve acil durumlarda insanların güvenli bir şekilde toplanabileceği ve gerekli yardımın sağlanabileceği alanlardır. Bu alanların tasarımı, konumlandırılması ve işlevselliği, afet anında insan sağlığı ve güvenliği için kritik rol oynar. Bu alanların kolayca erişilebilir olması, taşıdıkları risklere karşı dayanıklı olmaları ve donanımlı bir şekilde insanların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Bu bağlamda mevcut literatürde hem ulusal hem de uluslararası düzeyde birçok araştırma yapılmıştır. AADTA'nın uygunluklarının veya yeterliliklerinin değerlendirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, seçilen AADTA için yer seçim ölçütleri değerlendirilmiştir.

Kılcı (2012), İstanbul Anadolu yakasında çadırkent alanlarının belirlenmesi için 10 ölçütten oluşan ağırlıklı ortalama fonksiyonuna dayanan bir yöntem geliştirmiştir. Bu ölçütler; yardım malzemelerinin taşınması için ana yollara yakınlık, yardım malzemelerinin tedariki için market ve depolara yakınlık, sağlık kurumlarına yakınlık, arazinin yapısı (düz, vadi, dağ eteği, vb.), arazinin tipi (toprağın sertliği-yağışlara dayanıklılık), arazinin florası (orman, çalılık, vb.), arazinin eğimi (düz, küçük eğim, vb.), elektrik altyapısı, kanalizasyon altyapısı, temiz su kaynağı, arazi kullanım izni (kamu, kişi) olarak sıralanmaktadır.

Soltani vd. (2014), deprem sonrası barınma alanlarının belirlenmesinde kullanılan ölçütleri belirlemek amacıyla 273 makale tarayarak 27 ölçüt belirlemiştir. Bu ölçütler, erişilebilirlik (konutlara yakınlık, tıbbi merkezlere yakınlık, ulaşım kolaylığı, acil durum hizmetlerine erişim, lojistik destek), güvenlik (tehlikeli bölgelerden uzaklık, jeolojik tehlikeler, arazi eğimi, çevre güvenliği), kapasite (alan büyüklüğü, nüfus), altyapı (mevcut altyapı durumu, su, elektrik ve diğer enerji kaynakları, atık yönetimi, iletişim altyapısı), çevresel (çevresel etki, doğal kaynaklara yakınlık, ekolojik denge, toprak ve su kalitesi, hava kalitesi) ve sosyal (toplumsal kabul, sosyal hizmetlere erişim, kültürel uyum, topluluk katılımı, psikososyal destek) faktörler olmak üzere 6 ana kategoriye ayrılmıştır. Soltani vd. (2015), deprem sonrası barınma alanlarının belirlenmesine yönelik yapılan literatür çalışmasına ek olarak değerlendirme ölçütlerini uzman görüşlerine göre genişletmiştir. Delphi yöntemi ile tüm ölçütlerden 21'i onaylanmıştır ve arazi uygunluğu (toprak geçirgenliği, arazi eğimi, bitki örtüsü, toprak mülkiyeti, ekolojik veya çevresel olarak korunan varlıklara uzaklık), sosyo-kültürel faktörler (insanların evlerine yakınlık, önceki arazi kullanımı, uyumlu komşu arazi kullanımı), hizmet kullanılabilirliği (erişilebilirlik, su kaynağı, tıbbi hizmetler, yardım hizmetleri, güvenlik ve koruma, elektrik şebekeleri, iletişim hizmetleri) ve afet risk azaltma (jeolojik tehlikeler, hidro-meteorolojik tehlikeler, çevresel hastalıklar) olmak üzere 4 kategoriye ayrılmıştır.

Alexander (2013), acil durum ve afet planlamasının önemini ve süreçlerini belirlemek amacıyla bir araştırma yapmıştır. Çalışma kapsamında bu sürecin yönetimi için koordinasyon ve iş birliği, sürekli güncelleme, senaryo kullanımı, kapsayıcılık ve sürdürülebilirlik, kamu desteği ve katılımı hedefleri doğrultusunda, acil durum planlamasının felaketlerin artan karmaşıklığı karşısında profesyonelleşmesi gerektiği ve bilgi ve iletişim teknolojilerinin acil durum müdahalesindeki rolünün kritik olduğu tespit edilmiştir.

Maral (2016), İzmir Karşıyaka ilçesinde İzmir Afet Müdahale Planı (İZAMP) ve RADIUS Projesi kapsamında AADTA; mülkiyet, alansal yeterlilik, ulaşılabilirlik, kullanılabilirlik, altyapı (elektrik, su, wc, vb.) ölçütlerine göre uygunluklarını incelemiştir. Ölçütlerin birden fazla olması ve etki faktörleri farklı olduğu için ağırlıklı çakıştırma yöntemi kullanılmıştır. Atakent, İnönü ve Mavişehir mahallelerindeki AADTA büyüklük açısından yeterli iken diğer mahallelerdeki AADTA yetersiz olduğu belirtilmiştir.

Zengin Çelik vd. (2017), AADTA'nın kullanılabilirliğini belirleyen ölçütlerin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Sosyal altyapı alanlarının AADTA olarak kullanılması için gerekli ölçütler; demografik nitelikler ve alansal büyüklük, ulaşım ve erişilebilirlik durumu, altyapıya ilişkin nitelikler, topografik ve jeolojik nitelikler, toprak kabiliyeti, litolojik nitelikler, meteorolojik ve klimatik nitelikler, çevresel risk durumu olarak seçilmiştir.

Çınar vd. (2018), İzmir Karşıyaka ilçesinde İZAMP ve Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP) kapsamında belirlenen AADTA'nın konum ve niteliklerini ulusal ve uluslararası standartlar açısından değerlendirmiştir. İncelenen örneklerde özellikle geçici barınma alanlarının mülkiyet ve imar durumu değişiklikleri, inşaat faaliyetleri ve kurumlar arası koordinasyon eksikliği gibi sebeplerle bu alanların birincil kullanım amacını kaybettiği tespit edilmiştir.

Mengi & Erdin (2018), dünyada ve Türkiye'de afet ve acil durum yönetimine ilişkin mevcut iletişim biçimleri; yönlendirme standartları ve tasarım ölçütleri ile sağlanan hizmetler değerlendirilmiştir. Çalışma, toplanma alanları açısından tasarım yaklaşımının nasıl olması gerektiğine ilişkin önerileri, afet öncesi, afet anı, afet sonrası kısa dönem, afet sonrası uzun dönem olmak üzere dört dönem üzerinden mekân ve aksiyon planını ortaya koyan bir sistem tasarımı sunmaktadır.

Gerdan & Şen (2019), afet ve acil durum planlamasında AADTA için konum, nitelik ve ortaya çıkacak ihtiyaçları karşılayabilme açısından yeterlilik düzeylerini değerlendirmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre İzmit ilçesi için belirlenen toplanma alanlarının %80'den fazlasının elektrik ve su altyapısına sahip olduğu ve 6 mahallede belirlenmiş 14 toplanma alanı metrekare açısından uygun olduğu tespit edilmiştir.

Aman (2019), İstanbul Bağcılar ilçesinde seçilen 7 mahallede AADTA yeterliliklerini, alansal özellikler (alansal büyüklük-kapasite, bina yıkılma tehlikesi, kapalı alan barındırma, tehlikeli yapıya mesafe), doğal yapı (su baskını-sellenme tehlikesi, jeolojik yapı, sıvılaşma tehlikesi, yeraltı suyu seviyesi, eğim, heyelan tehlikesi) ve ulaşım (ulaşılabilirlik, sağlık tesislerine yakınlık) ölçütleri açısından değerlendiren bir yöntem önermiştir.

Demirkurt (2019), Zeytinburnu Çırpıcı Parkı'nı iş sağlığı ve güvenliği açısından incelemiştir. Deprem etkisiyle parkta mevcut olan tehlike kaynakları ve oluşturabileceği risklere karşılık alınabilecek önlemler değerlendirilmiştir.

Özel (2019), Kastamonu kent merkezinde yer alan AADTA için arazi kullanımı, yükseklik, eğim, bakı, drenaj, heyelan, yol, yağış dağılımı, litoloji, fay hattına yakınlık verilerini kullanarak alansal büyüklük, hizmet mesafesi, risk seviyesi, alan kullanımı ve tehlikeli alanlar açısından değerlendirmiştir.

Tufan (2019), İstanbul Küçükçekmece ilçesinde olası deprem ihtimaline karşı yapılan kentsel dönüşüm çalışmalarını değerlendirmiştir. Eskisi yerine yapılan binaların alanı aynı kalmak üzere katsayısının arttırıldığı ve bu durumun altyapı, ulaşım ve otopark ihtiyaçlarının karşılanmasında problemleri beraberinde getirdiği ifade edilmiştir. Özellikle 1999 depreminden sonra İstanbul'da AADTA ve çadırkent olarak belirlenen alanların sonrasında büyük bir oranının (3/4) yapılaşmaya açıldığı ve bu alanların yerini AVM, rezidans, toplu konut ve gökdelenlerin aldığı tespit edilmiştir.

Dabiri vd. (2020), İran'ın Sanandaj şehrinde deprem sonrası geçici barınma yerlerinin seçimi için risk yönetimi ve Sezgisel Bulanık AHP kullanarak bir model geliştirmiştir. Kriz yönetimi uzmanları ve kurum/kuruluşlardaki uzmanlar tarafından mevcut riskler, mevcut çalışmalarda belirlenen ölçütler ve ikili karşılaştırmaların değerlendirilmesi sonucunda fay hattına uzaklık, nüfus yoğunluğu, yeşil alanlara erişim, sağlık hizmetlerine yakınlık, ulaşım altyapısına erişim, su kaynaklarına yakınlık olarak belirlenmiştir.

Özkılıç (2020), İstanbul ilindeki bina, yol, deprem anında kapanacak yol, oluşacak afet bölgeleri ve güncel toplanma alanları verileri kullanılarak ağ analizi yapmıştır. AADTA'nın dağılımı ve kapasiteleri, etki alanları, yapı ve nüfus dağılımları ve erişilebilirlikleri değerlendirilmiştir.

Palazca (2020), Denizli'de bulunan AADTA niteliksel ve niceliksel olarak analiz ederek Denizli İl Afet Müdahale Planı'nın şehir planlama disiplini perspektifinde değerlendirmiştir. Denizli kent merkezindeki AADTA kullanım türü, ulaşılabilirlik, alansal büyüklük, eğim, fay hatlarına uzaklık, arazi kullanımı, nüfus dağılımı, kapasite gibi niteliksel ve niceliksel ölçütlere göre incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, çalışma kapsamında belirlenen AADTA büyüklüklerinin 16 mahallede yeterli, 48 mahallede yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır.

Şekkeli (2020), çalışmasında afet ve acil durum lojistiği kapsamında, Kahramanmaraş Onikişubat ilçesinde AHP ile erişilebilirlik, alan özellikleri, hizmetlere yakınlık ve alt yapı ölçütlerini kullanarak toplanma alanlarını değerlendirmiştir. Değerlendirme sonucunda, Kahramanmaraş Onikişubat ilçesindeki 67 toplanma alanından 3'ünün en ideal toplanma alanı olduğu ortaya çıkmıştır.

Gökgöz vd. (2020), AADTA'nın belirlenmesi aşamasında karar verme süreçlerindeki belirsizliklerin giderilmesi için alan özellikleri, jeolojik özellikler ve ulaşım-erişilebilirlik ölçütlerini dikkate alarak AHP yöntemi ile değerlendirme yapmıştır ve bu ölçütlere dayanan yerel ve merkezi idarelere AADTA'nın belirlenmesi ve değerlendirilmesi için bir model önermiştir.

Jahangiri vd. (2020), doğal afetler sonrası kentsel ortamlarda geçici barınma yerlerinin seçimi için güvenli alanların belirlenmesine odaklanmaktadır. Bu süreçte belirlenen ölçütler fiziksel (fay hattına uzaklık, topografik uygunluk, zemin stabilitesi), sosyal (nüfus yoğunluğu, eğitim kurumlarına yakınlık, sağlık hizmetlerine yakınlık), ekonomik (ekonomik faaliyetlerin yoğunluğu, iş merkezlerine yakınlık), altyapı (ulaşım ağı, elektrik, kanalizasyon, su kaynaklarına yakınlık), çevresel (yeşil alanlara erişim, iklim koşulları), güvenlik (kolluk kuvvetlerine yakınlık, yangın istasyonlarına yakınlık) ve toplumsal (toplanma alanlarına yakınlık, sosyal hizmetlere erişim) ölçütler olmak üzere 7 ana ölçüt olarak sıralanmaktadır.

Öztürk & Kaya (2020), İstanbul Küçükçekmece ilçesindeki 43 AADTA'nın değerlendirilmesi için ulaşım, arazi topoğrafyası, arazi büyüklüğü, altyapı, güvenlik, konutlara yakınlık ve tehlike unsurları olmak üzere 7 ölçüt dikkate alınarak çok ölçütlü karar verme yöntemi olan PROMETHEE kullanılmıştır.

Şirin & Ocak (2020), Gümüşhane ilinde mevcut 24 AADTA'na ek olarak 26 alan önermiştir. AHP kullanılarak nüfus, eğim, arazi kullanımı, jeoloji, yükseklik, yollara, binalara ve akarsu yataklarına uzaklık ölçütlerine göre en uygun AADTA belirlenmiştir.

Gerdan & Şen (2020), Kocaeli Başiskele ilçesi AADTA'nın yeterlikleri; ulaşım (ana caddeye cephe, denize uzaklık, yüksek yapılardan uzaklık, yaya yolu, engelli yolu), altyapı (elektrik, su, wc), kapasite açısından değerlendirmiştir. Çalışmanın sonuçları Kocaeli Başiskele ilçesi için belirlenen bu alanların %77,14'ünde elektrik ve su altyapısına sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen veriler 22 mahallede belirlenmiş toplanma alanlarından sadece 5'inin alansal büyüklük açısından uygun olmadığını göstermektedir.

Upadhyay vd. (2021), topluluk afet dayanıklılığı konusunda 2010-2020 yılları arasında yayınlanmış çalışmaların ana araştırma alanlarını ortaya koymak, ilgili disiplinleri belirlemek ve gelecek araştırmalar için araştırma gündemini belirlemek amacıyla 89 araştırma makalesini içeren bir literatür araştırması yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dayanıklılık yönetimi ve afet dayanıklılığı konusu, çalışmaların %43'ünü kapsamaktadır ve topluluk afet dayanıklılığının nasıl yönetildiği ve nasıl değerlendirildiği üzerine odaklandığı tespit edilmiştir.

Ekin & Sarıkaya (2021), Kütahya Fuat Paşa Mahallesi'nde en uygun AADTA belirlemek için altyapı (elektrik, su, kanalizasyon), çevre güvenliği (etrafındaki yapılara uzaklık, yapı yükseklikleri), alansal büyüklük, ulaşım (kara, yaya, engelli), alan tipi ve uzaklık ölçütlerini dikkate alarak değerlendirme yapmıştır. Bu değerlendirme ölçütlerine göre çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

Dursun (2021), İstanbul Esenler ilçesinde AADTA'nın ulaşılabilirlik, yol bağlantıları, kullanılabilirlik-fonksiyon, mülkiyet ve alansal yeterlilik ölçütlerine göre değerlendirme yapmıştır.

Uyar (2021), İstanbul ilinde olası bir deprem sonrası mevcut toplanma alanlarının uygunluklarını değerlendirmiştir. 1999 depreminden sonra 470 olarak belirlenen toplanma alanı sayısının 77'ye düştüğü tespit edilmiştir. AADTA'nın geçen zaman içerisinde imara açıldığı ve toplanma alanlarının yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, 1999 depreminden sonra belirlenen toplanma alanlarından imara açılan yerlerde yapılan yapılardan bazıları; Ağaoğlu My City, Anthill, Capacity AVM, Çınar Olimpia Park Sitesi, DAP Royal Center, Forum İstanbul, Kiptaş Ünalan, Meydan AVM, Onaltı Dokuz, Ora AVM, Selenium Plaza, Starcity Outlet Center, TOKİ Avrupa Konutları, Torun Center, Zaman Gazetesi Binası olarak belirlenmiştir. İlçe bazında toplanma alanları değerlendirildiğinde ise birçok ilçede kişi başına düşen alanın 1.5 m^2 nin altında olduğu saptanmıştır.

Yiğit (2021), deprem sonrası ilk 72 saat içinde vatandaşların barınma ve yaşam faaliyetlerini sürdürebilmeleri için AADTA'nın yer seçimi ve önceliklendirilmesini incelemiştir. 5 ana ölçüt (arazinin tercih edilebilirliği, elektrik altyapısı, sıhhi tesisat sistemi, güvenlik ve emniyet, yakınlık) ve 13 alt ölçüt belirlenmiştir. Uzman görüşleriyle ölçütlerin ağırlıkları hesaplanmış ve arazinin tercih edilebilirliği en önemli ana ölçüt olarak belirlenmiştir. Muş ilindeki AADTA, Aralıklı Tip-2 Bulanık Küme Tabanlı TOPSIS yaklaşımı ile önceliklendirilmiş ve en yüksek yakınlık katsayısına sahip noktalar belirlenmiştir. Sonuçlar, klasik TOPSIS ve MARCOS yaklaşımları ile karşılaştırılarak tutarlılık sağlanmıştır.

Hosseini vd. (2022), deprem sonrası acil barınma yerlerinin seçimi için bir indeks tabanlı model önermiştir. Acil barınma alanlarının yer seçimi sürecinde dikkate alınan ölçütler; fay hattına uzaklık, nüfus yoğunluğu, yeşil alanlara erişim, bina kalitesi, sağlık hizmetlerine yakınlık, ulaşım altyapısına erişim, su kaynaklarına yakınlık, elektrik altyapısına erişim, kanalizasyon altyapısına erişim, eğitim kurumlarına yakınlık, yangın istasyonlarına yakınlık, polis karakollarına yakınlık, toplanma alanlarına yakınlık, sosyal hizmetlere erişim, ekonomik faaliyetlerin yoğunluğu, topografik uygunluk, zemin stabilitesi, iklim koşulları olarak belirlenmiştir.

Partigöç (2022), Denizli Merkezefendi ilçesi 50 mahallede seçilen 48 AADTA'nın kapasite bakımından yeterliliği 3 adımlı bir yöntem kullanılarak değerlendirilmiştir. İlk adımda 50 mahalle 2021 yılı nüfusları ve bu nüfusların mekânsal dağılımı karşılaştırılmıştır. İkinci adımda, seçilen 48 AADTA, alansal büyüklükleri bakımından değerlendirilmiştir. 3. adımda ise, mahallelerin mevcut nüfusu için ihtiyaç duyulan alan kapasiteleri belirlenmiştir. AADTA büyüklük ölçütü açısından seçilen 50 mahalleden yalnızca 16'sının yeterli olduğu saptanmıştır.

Saygılı & Akpınar (2022), Aydın Efeler ilçesinde seçilen 21 mahallede olası bir afet durumunda AADTA'nın yeterliliğini belirlemek için değerlendirme yapmıştır. Elde edilen toplanma alanı verileri açık alanlar, aktif yeşil alanlar, pasif yeşil alanlar ve kamusal alanlar olarak gruplandırılmıştır. Seçilen 21 mahalleden 11'i kişi başına 2.5 m^2 alan için yeterli büyüklükte olduğu belirlenmiştir.

Kalkan (2022), Uşak ilinde 17 mahallede belirlenen 43 AADTA için standartlara uygunluk ve kapasite açısından yeterliliğini değerlendirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda Uşak ilinde sadece 8 mahallenin kapasiteye uygun olduğu tespit edilmiştir. AADTA için değerlendirme ölçütleri olarak, ulaşım ana başlığı altında yaya yolu ve engelli yolunun varlığı, yüksek yapılardan uzaklığı ve ana caddeye cephesi; altyapı ana başlığı altında su, kanalizasyon ve elektrik bulunma durumu incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre tüm ölçütleri sağlayan bir alan bulunmamıştır.

Öz (2022), Tekirdağ Süleymanpaşa ilçesinde seçilen AADTA için uzman görüşleri dikkate alınarak yeterlilik düzeylerini değerlendirmiştir. AADTA için belirlenen değerlendirme ölçütleri; kişi başına kullanım alanı, yüzey özelliği, eğimi, akarsu kaynaklarından uzaklığı, durgun su birikintilerinden uzaklığı, zemin yapısı, bitki özelliği, kamu mülkiyetinde olması, kullanım türü, alternatif ulaşım güzergâhı olması, wc ve temiz su kaynağı varlığı, atıksu ve yağmur suları için altyapı durumu, çevresindeki yapı yüksekliği, yapılara uzaklığı, akaryakıt istasyonlarına uzaklığı, fabrika ve sanayi alanlarına uzaklığı, enerji nakil hattına uzaklığı, hastanelere yakınlığı, doğalgaz dağıtım istasyonlarına uzaklığı, elektrik trafosundan uzaklığı, kimyasal biyolojik radyolojik nükleer tesislere uzaklık, yüzölçümünün 500 m^2den fazla

olması, uyarı levhası ve sesli uyarı cihazları olması, engelli rampalarının bulunması, engelli takip yüzeyi bulunması, görme engelliler için sesli yönlendirme sistemi olması, reklam tabelalarından uzaklık, beton direklerden uzaklık, istinat duvarlarından uzaklık, yangın söndürme musluğu (hidrant) bulunması, mobil haberleşme araçlarının konumlandırılmasına uygunluk gibi ölçütler açısından değerlendirilmiştir.

Baluyot vd. (2023), İtalya Po Nehri ve çevresindeki alanlarda sel riski yüksek bölgelerde tahliye merkezleri için en uygun yerlerinin belirlenmesinde GIS ve AHP yöntemlerini kullanmıştır. Çalışma, sel tehlikesi (sel derinliği, sel süresi, sel hızı), sel riski (nüfus yoğunluğu, altyapı riski, mülkiyet değeri) ve erişilebilirlik (ulaşım ağı, acil durum hizmetlerine yakınlık, toplu taşıma erişimi) ölçütlerini dikkate alarak tahliye merkezlerinin en uygun yerlerde belirlenmesini amaçlamaktadır.

Üstündağ (2023), Adıyaman Merkez ilçesinde seçilen 24 AADTA uygunluklarını değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında seçilen toplanma alanlarına ulaşımı sağlayan yol ağında riskli binaların yıkılmasından kaynaklanacak engelleri ortaya çıkarabilecek durumlar değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yol ağında risk oluşturabilecek yapıların belirlenmesine yönelik sistem önerilmiştir. Deprem öncesi ve deprem sonrası optimum erişilebilir toplanma alanları belirlenmiştir.

Öcal & Yıldız (2023), Hatay Antakya ve Defne ilçelerinde bulunan toplam 45 AADTA değerlendirilmiştir. Bu alanların uygunluklarının değerlendirilmesi için eğim durumu, fay hattı ve sakınım mesafeleri, ulaşım ağları analizi, köprü durumu, nüfus, heyelan/kaya düşmesi, akarsulara yakınlık analizi, litoloji özellikleri değerlendirme ölçütleri olarak belirlenmiştir. Konumsal analizler sonucunda toplanma alanlarının şehir nüfusu için alansal büyüklük olarak yetersizliğinin yanında fiziki ve beşerî coğrafya özellikleri açısından da yetersiz olduğu saptanmıştır.

Erdin vd. (2023), AADTA'nın belirlenmesi için kullanılan ölçütler olarak kullanılabilirlik, güvenlik ve erişilebilirlik ölçütleri temelinde uygunluk ve yeterlilik ölçütlerini kullanmıştır. Bu bağlamda AADTA'nın belirlenmesine yönelik Türkiye'nin bütün kentlerinde kullanılabilir bir ölçüt seti ve dört aşamalı bir yöntem sunulmuştur.

Kart vd. (2023), Android Studio yazılımı kullanarak Flutter programlama dili ile bir Deprem Bilgi Sistemi Mobil Uygulaması tasarlamıştır. Konya ilinde seçilen 125 toplanma alanı, yüzölçümü, nüfus, ulaşılabilirlik ve yerleşim yerlerine yakınlık ölçütleri açısından değerlendirilmiştir ve uygulamaya entegre edilmiştir. Uygulamanın olası bir deprem durumunda güvenli alanları ve deprem hakkında bilgiler vermesi hedeflenmiştir.

Doğan (2023), Malatya ili Battalgazi ilçesinde AADTA için niteliksel açıdan uygunluk ölçütü altında kullanılabilirlik, erişilebilirlik, güvenlik alt ölçütleri ve niceliksel açıdan yeterlilik ölçütü altında kişi başına düşen m^2 miktarı ve alan büyüklükleri alt ölçütleri bakımından incelenmiştir ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Taş (2023), Antalya Konyaaltı ilçesinde acil toplanma alanlarının uygunluğunu ve yeterliliğini değerlendirmiştir. Uygunluk ölçütünün alt ölçütleri kullanılabilirlik, erişilebilirlik, güvenlik ve yeterlilik ölçütünün alt ölçütü olarak alan büyüklükleri açısından incelenmiştir.

Kaynar (2023), Çankırı Merkez ilçesinde AADTA'nın standartlara uygunluğu ve yeterliliği, alan büyüklüğü ve niteliği, erişilebilirlik, teknik altyapı olanakları, kullanılabilirlik ve çok fonksiyonluluk ve güvenlik değişkenleri ölçütlerine göre değerlendirmiştir. Niteliksel olarak uygunluk ölçütü; kullanılabilirlik, erişilebilirlik ve güvenlik değişkenleriyle, niceliksel olarak yeterlilik ölçütü ise; kişi başına düşen m^2 miktarı üzerinden incelenmiştir.

Deniz (2023), açık yeşil alanların afet ve acil durumlarda kullanılabilirliğini artırmak ve organizasyonel sorunlara çözüm bulmaya odaklanmıştır. Çalışma kapsamında açık ve yeşil alanların afet sonrasında AADTA olabilirliğinin değerlendirilmesi için 344 kişiyle anket yapılmış, 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri sonrası güncellenen anket, depremden etkilenen 120 kişiyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada belirlenen ölçütler; arasında kamuoyunun bilinçlendirilmesi, ihtiyaçların ve tahliye bölgelerinin belirlenmesi, standart mevzuat çıkarılması, temel ihtiyaçların karşılanması, açık yeşil alanlarda depolar kurulması, alan kapasitesi ve arazi yapısının değerlendirilmesidir.

Köse (2023), Muğla Bodrum ilçesi mevcut AADTA için AFAD ve Japonya İşbirliği Ajansı (JICA) standartlarına uygunluğu değerlendirilmiştir ve standartlara uygun alanların sayısının yetersiz olduğu ifade edilmiştir. Değerlendirme ölçütleri olarak nüfus kapasitesi, fonksiyon kullanımı ve erişilebilirlik ölçütlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca Bodrum Yeniköy Mahallesi Uruk Parkı toplanma alanı tasarımı günlük ve afet kullanımları dikkate alınarak AFAD standartlarına (nüfus yoğunluğu, ulaşım ve tahliye kolaylığı, engelli ve yaşlılara ulaşım kolaylığı, ikincil tehlikelerden uzaklığı, engebesiz ve düz arazilerde yer alması, boş arazilerde yer alması, altyapı yeterliliği) ve JICA standartlarına (yol aksları ile bağlantı, ulaşılabilirlik, mülkiyet, alansal büyüklük, kullanılabilirlik ve çok fonksiyonluluk) göre değerlendirilmiştir.

Afet sonrası kentsel açık ve yeşil alanların AADTA'nın belirlenmesinin önemini vurgulayarak bu alanların çok fonksiyonlu olarak geliştirilmesine odaklanan çalışmalar mevcuttur. Deniz (2023), Doğan (2023), Taş (2023), Kaynar (2023), Karaçuhalılar (2023), Adıgüzel (2024), Deniz vd. (2024) çalışmalarında toplanma alanlarının kullanılabilirlik ölçütü yanında çok fonksiyonluluk ölçütünün dikkate alınmasının afet sırası ve sonrasında insanların ihtiyaçlarının karşılanmasında önde gelen ölçütlerden biri olduğunu belirtmiştir. Tokyo Rinkai Deprem Parkı, Miki Afet Parkı, Anchorage Deprem Parkı gibi örneklerin Türkiye'de yaygınlaşması, insanların afete bilinçli ve duyarlı hale getirilmesi ve afet sırası ve sonrasında insanların panik ve belirsizlik durumundan bir an önce kurtularak bu durumun üstesinden gelmesini sağlayacak ihtiyaçların belirlenmesinde çok büyük etkisinin olacağı aşikardır.

İlgili literatürün değerlendirilmesi sonucunda; AADTA'nın seçilmesi ve değerlendirilmesinde farklı ölçütlerin belirlendiği ve bu ölçütlere dayanarak AADTA farklı yöntemlere göre değerlendirildiği görülmüştür. Literatürde AADTA için farklı değerlendirme ölçütleri belirlense de seçilen ölçütlerde benzerlik gösterenler çoğunluktadır. Öncelikle AADTA'nın, yerleşim alanı içinde bulunan kamuya ait açık yeşil alanlar ve parklar olarak belirlendiği görülmektedir. Bu alanların değerlendirilmesi için incelenen çalışmaların büyük bir çoğunluğunda AFAD tarafından belirlenen ölçütlere göre değerlendirme yapılmıştır. Çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde ise; temelde ilgili literatürde yapılan çalışmalarda AADTA için seçilen ölçütler; yerel coğrafi ve iklim koşulları, nüfus yoğunluğu ve demografik yapı, ulaşım ve altyapı, ikincil tehlikelerden uzaklık, toplumsal ve kültürel faktörler, yasal ve kurumsal düzenlemeler gibi ana ölçütler altında toplanmaktadır. Ancak Doğu Karadeniz Bölgesi'nde AADTA'nın değerlendirilmesi için hem planlama literatüründe yeteri kadar çalışmanın olmaması hem de Trabzon Akçaabat ilçesi için çalışmanın yapıldığı an itibariyle böyle bir çalışmanın daha önce yapılmamış olması çalışmanın literatüre olan katkılarındandır. Trabzon, Karadeniz kıyısında yer aldığı için bol yağış alan ve nemli bir iklime sahiptir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) resmi iklim istatistiklerine göre (1991-2020) Trabzon'un yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 828.9 mm'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025). Bu miktar, Türkiye'nin yıllık ortalama yağış miktarı olan 574 mm'den oldukça fazladır. Bu nedenle, AADTA'nın özellikle sel ve heyelan risklerinden uzak, yüksek ve/veya güvenli bölgelerde olması önemlidir. Buradan hareketle, AADTA için mevcut durumun değerlendirilmesi ve gereken hassasiyetin gösterilmesine dikkat çekmek için bu çalışmada, Trabzon-Akçaabat ilçesinde yer alan AADTA, belirlenen uygunluk ve yeterlilik ölçütlerine göre değerlendirilmiştir, eksiklikler ve gereksinimler belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

AADTA, doğal afet anı ve sonrasında panik ve kaosu azaltarak insanların güvenli bir şekilde tahliye edilmesinin sağlanmasında kritik bir rol oynar. Türkiye'de AADTA, planlama aşamasında değil sonrasında açık ve yeşil alan veya kamu kurum/kuruluş bahçeleri olarak belirlenmektedir. Özellikle artan nüfusa bağlı olarak artan dikey yapılaşmanın yanında kentlerde belirlenen bu alanların sonrasında imara açılması bu alanların giderek küçülmesi ve kişi başına düşen alanların azalması anlamına gelmektedir. Bu durum mevcut toplanma alanlarının değerlendirilmesi ve sonuçlarına göre gerekli önlemlerin alınmasını gerektirir.

Akçaabat, Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde yer alan ve Trabzon iline bağlı bir ilçedir. Karadeniz kıyısında bulunan ilçe, Trabzon şehir merkezine yaklaşık 15 kilometre mesafededir. Akçaabat'ın yüzölçümü 375 km² olup, deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 10 metredir. Trabzon Akçaabat ilçesinin nüfusu 2023 yılı nüfus sayımına göre 129.628 dir. Afet ve acil durumlarda kullanılmak üzere hastaneler, okullar, kamu binaları altyapı tesisleri ve AADTA gibi birçok kritik tesis içermektedir. Özellikle nüfusun artması ile AADTA'nın mevcut durumlarının değerlendirilmesi, gerektiği durumlarda yerlerinin değiştirilmesi ve potansiyel alanların belirlenmesi gündemdedir. Bu bağlamda, Trabzon Akçaabat ilçesi Trabzon İl Jandarma Komutanlığı, Akçaabat Kaymakamlığı, Akçaabat Belediye Başkanlığı, Akçaabat İlçe Jandarma Komutanlığı, Akçaabat ilçe Emniyet Müdürlüğü, Akçaabat Tapu Müdürlüğü işbirliği ile tsunami tehlike ve risk analizleri ile riskin azaltılmasına yönelik eylem planları kapsamında riskli olarak belirtilen kıyı kesimlerinde daha önceden tespit edilmiş olan AADTA'nın tsunami gibi ikincil tehlikelerden uzak güvenli alanlara taşınmasının planlanmasına yönelik çalışma başlatılmıştır. Trabzon ili Akçaabat ilçesinin topografik yapısı nedeniyle özellikle nüfusun yoğun olduğu yerlerde AADTA'nın genellikle deniz kenarında belirlendiği görülmektedir. AADTA'nın çoğunlukla deniz kenarı ve denize yakın alanlarda belirlenmesinin nedeni, yerleşim alanlarının sahil kesiminde yoğunlaşması ve düz alanların azlığı olarak görülebilir.

AADTA bulundukları yerleşim alanının topografik, jeolojik, jeomorfolojik, demografik, sosyolojik, klimatolojik, ekonomik, ticari, sanayi ve kültürel yapısı gibi özelliklerden dolayı farklı değerlendirme ölçütleri içerebilir. Akçaabat ilçesi, deprem tehlike haritasına göre (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2025) düşük tehlike bölgesinde (PGA 475:0.201g) yer almasına rağmen, Avrasya Levhası, Anadolu Levhası ve Arap Levhası arasındaki etkileşimler sonucu diri faylar haricinde yeni faylar oluşması muhtemeldir. Ya da çevre illerde meydana gelen doğal afetler ikincil afetlere neden olabilir. Özellikle depremin meydana gelmesi ile yeryüzünde meydana gelen kırılmalar; heyelan, zeminde sıvılaşma, çökme, yangın, su baskınları ve tsunami gibi ikincil afetlere neden olabilmektedir. Yapıların yıkılmalarına neden oldukları gibi sonrasında yangınları, toprak kaymalarını, selleri ve tsunamileri tetikleyebilmekte, toprağın taşıma kapasitesini kaybetmesi sonucunda bataklık gibi binaları içine çekmesiyle veya dev tsunami dalgalarıyla kıyı kentlerini vurmasıyla sonuçlanabilmektedir. Diğer bir deyişle; mevcut diri faylar, lokal faylar ve en önemlisi Karadeniz'de sahile yakın olarak bilinen faylar nedeniyle Trabzon ili heyelan, sel ve tsunami tehlikeleriyle karşı karşıyadır. Bu noktadan hareketle; çalışma kapsamında Trabzon Akçaabat ilçesindeki AADTA değerlendirilerek mevcut durumun analizi ve alınması gereken önlemlerin belirlenmesi için gerekli işlem adımları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

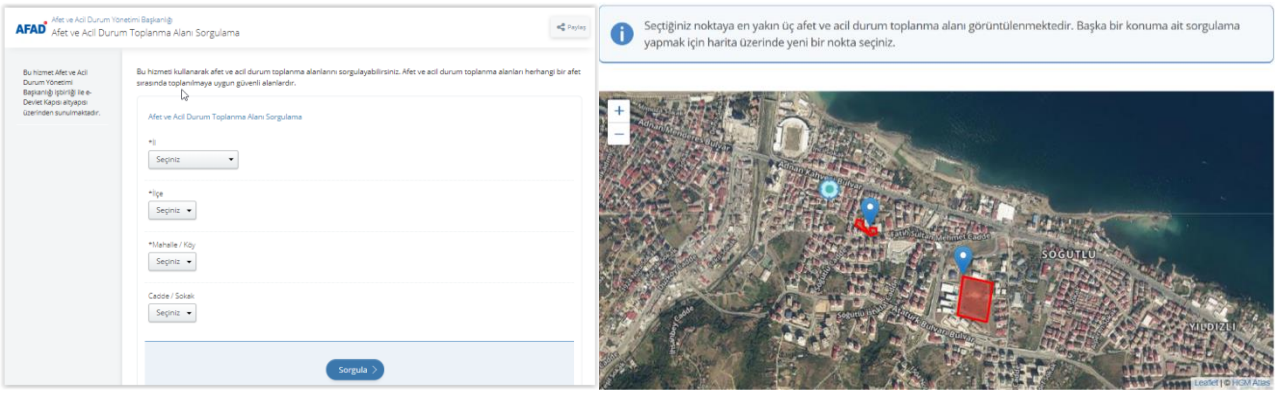
2.1. Çalışma Alanı

AADTA belirlenirken planlama sırasında değil sonrasında çoğunlukla açık ve yeşil alanların olduğu alanlardan seçilmektedir. Bu alanların yeterli olmadığı yerlerde ise meydanlar ya da kamu kurum/kuruluşlarının bahçeleri gibi sosyal altyapı alanları, AADTA olarak belirlenmektedir.

Afet sonrası insanları bilgilendirme, sağlık hizmetleri ve geçici barınma alanlarına ulaşım hizmetlerinin gerektiği gibi sağlanmasında yeterli kapasitede ve güvenli AADTA'nın bulunması hiç şüphesiz kritik öneme sahiptir. Ancak Türkiye'de bazı kentlerde nüfusun hızla artması, yapılaşma alanları ile açık ve yeşil alanlar arasındaki dengeyi bozarak geri dönüşü olmayan problemlere yol açmaktadır. Bu durum, özellikle AADTA'nın güvenlik ölçütü açısından tehdit etmekte ve bu alanların kapasitesinin azalmasına yol açmaktadır.

Çalışma alanı olarak seçilen Trabzon ili Akçaabat ilçesinde toplam 73 mahalle bulunmaktadır. Bu mahallelerden Akçakale, Akçaköy, Akpınar, Çolaklı, Darıca, Derecik, Doğanköy, Dürbınar, Işıklar, Kavaklı, Mersin, Nefsipulathane, Ortamahalle, Osmanbaba, Salacık, Sarıtaş, Söğütlü, Yaylacık, Yenimahalle, Yıldızlı mahallerinde olmak üzere toplam 28 adet AADTA bulunmaktadır. Diğer mahallelerde AFAD tarafından yayınlanan bir toplanma alanı bulunmamaktadır.

E-devlet üzerinde kullanıcıların konumlarına göre AADTA, AFAD iş birliği ile hazırlanan "Afet ve Acil Durum Toplanma Alanı Sorgulama" e-Devlet Kapısı altyapısı üzerinden sunulmaktadır. İl, ilçe Mahalle/Köy ve Cadde/Sokak bilgileri seçilerek sorgulanır ve en yakın AADTA Şekil 1 ile gösterildiği gibi görüntülenir.



Şekil 1: E-devlet üzerinden toplanma alanlarının belirlenmesi

Trabzon ili Akçaabat ilçesi için AFAD tarafından yayınlanan 28 AADTA Şekil 2 ile gösterildiği gibi harita üzerinde verilmiştir. AADTA ve diğer detaylar içindeki konumları belirlenmiştir ve değerlendirmeler QGIS Desktop 3.34.3 yazılı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 üzerinde AADTA içinde ve dışında kalan yapılar türlerine göre görselleştirilmiştir.



Şekil 2: AADTA ve konumları

2.2. AADTA için Yer Seçim Ölçütlerinin Belirlenmesi

AADTA, birçok ölçütü aynı anda sağlaması gereken alanlar olup, Türkiye'de bu alanların belirlenmesi AFAD ve yerel yönetimler tarafından yapılmaktadır. Afet veya acil durum yönetiminde afet sonrası insanların toplanma alanlarına ulaşması, tahliye etmenin ilk ve en önemli aşamasıdır.

AADTA, acil durum sonrası insanların toplandıkları, güvenli ve kısa süreli ikamet edecekleri, doğru bilgiye ulaşabilecekleri alanlar olduğu için insanların temel gereksinimlerinin sağlanması için gerekli koşullara sahip olmalıdır. İnsanların ilk travmalarını atlattıktan sonra ihtiyaç duyacakları temel hizmetler iletişim, haber alma, yakınlara ulaşma, yardım alma, yardım etme eğilimlerinde olmaktadır. AFAD tarafından yayınlanan AADTA için yer seçimi ölçütlerinin çoğunlukla ulaşılabilirlik ve altyapı olanakları olarak seçildiği yönündedir.

Türkiye'de geçmişten günümüze birçok deprem yaşanmıştır. Yakın tarihte gerçekleşen 17 Ağustos 1999 Gölcük Depremi, 12 Kasım 1999 Düzce Depremi, 1 Mayıs 2003 Bingöl Depremi, 23 Ekim-9 Kasım 2011 Van Depremi, 24 Ocak 2020 Sivrice Depremi, 30 Ekim 2020 Seferihisar Depremi ve 6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde çok fazla can ve mal kaybı yaşanmıştır. Buna rağmen deprem risklerini azaltmaya yönelik alınan tedbirler yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda akademik çalışmalar, girişim ve projeler deprem risklerinin tanımlanması ve çözüm önerileri geliştirse de uygulamada yeterince yol katedilemediği aşikardır. Deprem risklerini azaltmak için alınan tedbirlerin elbette birçok değişkeni vardır. Bu durum deprem öncesi, deprem sırasında ve deprem sonrasında olası afet zararlarının azaltılması veya en aza indirilmesi noktasında şüphesiz farklı disiplinlerin uzmanlık bilgi ve deneyimlerini birleştirerek çözüm önerileri sunmalarına dayanmaktadır. Deprem sırası ve sonrasında acil kurtarma, ilk yardım gibi hizmetlerin sağlanması için güvenli toplanma alanlarına ihtiyaç vardır. Ne yazık ki şehirlerin gelişme alanlarının sağlıksız planlanması, hızlı nüfus artışı yeterli kapasitede toplanma alanlarının oluşturulmasına veya sürdürülebilirliğinin sağlanmasına engel olmaktadır. AADTA'nın planlama öncesi ve sırasında değerlendirilerek yer seçimlerinin yapılması bu problemlerin azaltılmasında önemli derecede etkili olacaktır. İlgili mevzuatta (Türkiye Afet Müdahale Planı, Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği, Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği, Çevre Düzeni Planı) AADTA yer seçim ölçütleri ve standartları ile ilgili bir ifadenin bulunmadığı görülmektedir. AADTA'nın belirlenmesi için uygulanan standartların Türkiye Mevzuatında doğrudan karşılığı yoktur ancak AFAD tarafından yayınlanan ölçütler dikkate alınarak ilgili belediyelerce toplanma alanları belirlenmektedir. AFAD tarafından AADTA olarak belirlenecek alanların hangi ölçütleri sağlaması gerektiği aşağıda verilmiştir:

- *Nüfus yoğunluğu,*
- *Ulaşılabilirlik ve tahliye kolaylığı,*
- *Mümkün olduğunca engellilerin ve yaşlıların ulaşımına uygunluğu,*
- *Yangın, su taşkını, tsunami, altyapı ve benzerleri gibi ikincil tehlikeler ile deniz, akarsu kenarları, sıvılaşmadan etkilenmeyecek ve fay hatlarından uzak alanlar olması,*
- *Mümkün olduğunca engebesiz düz araziler olması,*
- *Konut alanlarına yakın ancak yapısal ve yapısal olmayan unsurlardan etkilenmemesi,*
- *Elektrik, su, tuvalet gibi temel ihtiyaçlar ve benzeri unsurların karşılanabileceği yapılara yakınlığı*

gibi, seçim ölçütlerine dikkat edilerek ve mümkün olduğunca kamuya ait uygun yerler seçilerek belirlenmektedir (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2024b).

İstanbul için, afet önleme/azaltma planlamasına yönelik olarak bilimsel ve teknik temellere dayalı sismik mikro bölgeleme çalışmalarını geliştirmek ve entegre etmek amacıyla JICA ve İBB iş birliği ile gerçekleştirilen çalışmada, JICA standartlarına göre AADTA beş değerlendirme ölçütüne göre belirlenir ya da seçilir (Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı, 2002).

- *AADTA'na uzaklık yürüme mesafesi en fazla 500 m. (15 dakika) olmalıdır.*
- *AADTA en kısa mesafede ana yollarla birleşmelidir.*
- *AADTA afet haricinde kullanılabilir olmalı ve en az 500 m^2 alana sahip olmalıdır.*
- *AADTA'nın mülkiyeti kamuya ait olmalıdır.*
- *AADTA'nda kişi başına en az 2 m^2 kullanım alanı olmalıdır.*

Afet anı ve sonrası için kullanılacak toplanma alanlarının belirli ölçütler doğrultusunda değerlendirilmesi için mevcut literatür ve ilgili mevzuat incelenmelidir. Mevcut durumda afet müdahale planlarında toplanma alanı olarak sosyal altyapı alanlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu çerçevede ağırlıklı olarak park ve rekreasyon alanları veya geniş açık alanı olan okul ya da resmi kurum alanları tercih edilmektedir. 14.06.2014 tarihinde yürürlüğe giren Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği'nin Mekânsal Kullanım Tanımları ve Esasları başlıklı 5. Maddesinin (i) bendinde Sosyal Altyapı Alanları: "*Birey ve toplumun kültürel, sosyal ve rekreatif ihtiyaçlarının karşılanması ve sağlıklı bir çevre ile yaşam kalitelerinin artırılmasına yönelik kamu veya özel sektör tarafından yapılan eğitim, sağlık, dini, kültürel ve idari tesisler, açık ve kapalı spor tesisleri ile park, çocuk bahçesi, oyun alanı, meydan, rekreasyon alanı gibi açık ve yeşil alanlara verilen genel isimdir*" şeklinde tanımlanmıştır. Dolayısıyla, mevcut eğilimler dikkate alındığında, hem kentsel açık alanları ve parkları hem de diğer kamu kurum alanlarını içerecek şekilde sosyal altyapı alanları toplanma alanı olarak değerlendirme kapsamına alınmaktadır.

Afet ve Acil Durum Müdahale Hizmetleri Yönetmeliği Madde 4 (a) bendine göre acil durum; toplumun tamamının veya belli kesimlerinin normal hayat ve faaliyetlerini durduran veya kesintiye uğratan ve acil müdahaleyi gerektiren olayları ve bu olayların oluşturduğu kriz halini, Madde 4 (ğ) bendine göre ise afet ve acil durum toplanma alanı; afet ve acil durumlar sonrasında geçici barınma merkezleri hazır olana kadar geçecek süre içerisinde yaşanacak paniği önlemek ve sağlıklı bilgi alışverişini sağlamak amacıyla insanların tehlikeli bölgeden uzaklaşarak toplanabileceği güvenli alanları ifade etmektedir. Yönetmeliğin 15. Maddesi (7) bendinde *"Belirlenen afet ve acil durum toplanma alanlarında Belediye tarafından değişiklik yapılması istenildiğinde; valilik, İl Jandarma Komutanlığı ve İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne*

bilgi verilerek, muadilinin belirlenmesi ve il valiliğinden uygun görüş alınması suretiyle bu alanlarda değişiklik yapılabilir." ifadesi yer almaktadır.

Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği (Resmî Gazete Tarihi: 03.07.2017 Resmî Gazete Sayısı: 30113) tanımlar bölümü 4. Madde (vvvv) bendinde *"Toplumun yararlanması için ayrılan oyun bahçesi, çocuk bahçesi, dinlenme, gezinti, piknik, eğlence, rekreasyon ve rekreaktif alanları toplamı (Metropol ölçekteki fuar, botanik ve hayvan bahçeleri ile bölgesel parklar bu alanlar kapsamındadır.) ve 19. maddede yer alan işlevleri ve yapılaşma koşullarını içeren yeşil alanlar;"* yeşil alanlar olarak tanımlanmaktadır.

İlgili mevzuat değerlendirildiğinde, açık ve yeşil alanlar, spor alanları, meydan, yollar, pazaryeri, açık alana sahip eğitim, sağlık ve resmi kurum alanları gibi kamusal niteliğe sahip alanların toplanma alanı olarak belirlendiği bilinmektedir. Bu bağlamda mevcut literatürde AADTA, birbirinden farklı ölçütler dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Mevcut literatür ve mevzuat değerlendirilerek çalışma kapsamında AADTA için belirlenen ölçütler; Erişilebilirlik, Kullanılabilirlik ve Çok Fonksiyonluluk, Teknik altyapı olanakları, Alansal büyüklük ve kapasite, Çevresindeki binaların kat yüksekliği, Çevresindeki binalar ile arasındaki mesafe, Deniz ve dere yataklarına olan mesafe olarak belirlenmiştir.

2.3. AADTA'nın Seçilen Ölçütlere göre Değerlendirilmesi

Mevcut çalışmalar değerlendirildiğinde AADTA'nin seçilmesi ve belirlenmesi için AFAD, JICA ve mevcut literatürde farklı değerlendirme ölçütlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, mevcut ölçütler değerlendirilerek Trabzon Akçaabat ilçesinde bulunan AADTA'nın değerlendirilmesi için aşağıda verilen ölçütler belirlenmiştir.

- Erişilebilirlik
- Kullanılabilirlik ve çok fonksiyonluluk
- Teknik altyapı olanakları
- Alansal büyüklük ve kapasite
- Çevresindeki binaların kat yüksekliği
- Çevresindeki binalar ile arasındaki mesafe
- Deniz ve dere yataklarına olan mesafe

Trabzon ili Akçaabat ilçesinde bulunan AADTA bu ölçütler dikkate alınarak aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

- Erişilebilirlik açısından incelendiğinde; AADTA Tablo 1 ile verildiği gibi ulaşım ağı ile büyük oranda ana yollarla bağlantısı mevcuttur. Bütün AADTA için yol aksları ile bağlantı sağlanmıştır.

Tablo 1: Trabzon Akçaabat ilçesi AADTA değerlendirme ölçütleri

Mahalle	No	Adı	Yol Durumu	Elektrik	Su	Wc Kanalizasyon	Alanı (m^2)
Dürbinar	T01	Akçaabat Sahil Parkı	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	29864.84
Söğütlü	T02	Fatih Eğitim Fakültesi	Fatih Sultan Mehmet Caddesi	Var	Var	Var	27222.47
Akpınar	T03	Akpınar Sağlık Ocağı Bahçesi	Akpınar Köyü Yolu	Var	Var	Var	671.88
Yaylacık	T04	Yaylacık Akçaabat Millet Bahçesi	Adnan Menderes Caddesi	Var	Var	Var	16400
Darıca	T05	Darıca İlkokulu	Darıca Köy Yolu	Var	Var	Yok	910.66
Orta	T06	Atatürk Parkı	Atatürk Bulvarı	Var	Var	Var	1492.95
Dürbinar	T07	Selami Yardım Orta Okulu	İnönü Caddesi	Var	Var	Var	1589.43
Dürbinar	T08	Abdullah Fazıl Ağanoğlu İlk Okulu	İnönü Caddesi	Var	Var	Var	724.85
Orta	T09	Merkez İlk Okulu	Atatürk Bulvarı	Var	Var	Var	1793.66
Kavaklı	T10	Rahman Camii Bahçesi	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	5745.86
Çolaklı	T11	Festival Alanı	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	4378.38
Yıldızlı	T12	Yıldızlı İmam Hatip İö	Cumhuriyet Caddesi	Var	Var	Var	911.02
Yıldızlı	T13	Ayyıldız Ortaokulu	Mavra Caddesi	Var	Var	Var	1565.12
Yıldızlı	T14	Yıldızlı Toki İö	Çevre Sokak	Var	Var	Var	2056.94
Söğütlü	T15	Turizm Otelcilik Okulu	Esenler Sokak	Var	Var	Var	2477.69
Yaylacık	T16	Alaattin Akçay İlk Okulu	Camili Sokak	Var	Var	Var	1979.28
Salacık	T17	Salacık İlk Okulu	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	355.37
Osmanbaba	T18	Osmanbaba İlk Okulu	İhsanbey Caddesi	Var	Var	Var	166.15
Nefsipulathane	T19	Cumhuriyet Orta Okulu	Yiğitoğlu Sokak	Var	Var	Var	1301.00
Mersin	T20	Şehit Engin Saraç İlk Okulu	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	653.48
Derecik	T21	Derecik İlk Öğretim Okulu	Derecik Yolu	Var	Var	Var	824.93
Yeni	T22	Şehit Gökhan Uzun Fen Lisesi	Pelit Sokak	Var	Var	Var	2559.56
Sarıtaş	T23	Sarıtaş İlk Okulu	Değirmenli Sokak	Var	Var	Var	1389.34
Akçakale	T24	Akçakale Merkez Camii	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	636.52
Işıklar	T25	Işıklar Fabrika Bahçesi	Akçaabat-Düzköy Yolu	Var	Var	Var	420.29
Doğanköy	T26	Doğanköy İlk Okulu	Akçaabat-Düzköy Yolu	Var	Var	Var	628.06
Akçaköy	T27	Akçaköy Okul Bahçesi	Derecik Yolu	Var	Var	Var	820.68
Yaylacık	T28	Sahil Dolgu Alanı Kamelyalar Mevkii	Adnan Menderes Caddesi	Var	Var	Var	60077.62

Kullanılabilirlik ve çok fonksiyonluluk açısından değerlendirildiğinde; Tablo 2 ile gösterildiği gibi AADTA'ndan yalnızca 5'inin açık ve yeşil alan olarak belirlendiği tespit edilmiştir. 23 AADTA kamu kurum/kuruluş bahçeleri olarak belirlenmiştir. AADTA kullanım türleri incelendiğinde; kullanım türlerinin park, stadyum, üniversite, aile sağlığı merkezi, cami festival alanı, ilkokul, ortaokul, lise, fabrika, dolgu alanı olduğu görülmüştür.

En çok okul alanları AADTA olarak belirlenirken en az park alanlarının belirlendiği tespit edilmiştir. 10 farklı kategoride yer alan kullanım türleri vardır ve en fazla alana sahip kullanım türü olarak dolgu alanı AADTA olarak seçilmiştir. En az alana sahip kullanım türleri ise ilkokul, ilköğretim okulu, sağlık ocağı, cami, fabrika alanları olarak sıralanmaktadır. Bu alanların çok fonksiyonluluk ölçütüne uyan herhangi bir kullanımları mevcut değildir.

Tablo 2: Trabzon Akçaabat ilçesi AADTA için kullanım türleri

AADTA Niteliği	AADTA Kullanım Türü	Kullanım Sayısı	Çok fonksiyonluluk
Açık ve yeşil alanlar	Park	2	-
	Millet bahçesi	1	
	Festival alanı	1	
	Dolgu alanları	1	
Kamu Kurum/Kuruluş Bahçeleri	Üniversite yerleşkesi	1	-
	ASM bahçesi	1	
	Okul bahçesi	18	
	Cami bahçesi	2	
	Fabrika bahçesi	1	

- Teknik altyapı olanakları bakımından incelendiğinde; Trabzon ili Akçaabat ilçesinde AFAD tarafından belirlenen AADTA yol durumu, elektrik, su, wc/kanalizasyon, kapasite açısından Tablo 1 ile verildiği gibi değerlendirilmiştir. Tablo 1 ile verildiği gibi TA5 hariç park ve yeşil alanlar ve kamu binalarının olduğu AADTA için elektrik, su, wc-kanalizasyon imkanları bulunmaktadır.
- Alansal büyüklük ve kapasite açısından AADTA değerlendirildiğinde; Acısu, Adacık, Ağaçlı, Akdamar, Akören, Alsancak, Ambarcık, Arpacılı, Aydınköy, Bozdoğan, Cevizli, Cevizlik, Çamlıca, Çamlıdere, Çınarlık, Çiçeklidüz, Çilekli, Çukurca, Demirci, Demirkapı, Demirtaş, Dörtyol, Esentepe, Eskiköy, Fındıklı, Fıstıklı, Gümüşlü, Helvacı, Kaleönü, Karaçayır, Karpınar, Kayalar, Kemaliye, Kirazlık, Koçlu, Kuruçam, Maden, Meşeli, Meydankaya, Ortaalan, Ortaköy, Özakdamar, Özdemirci, Sarıca, Sertkaya, Şinik, Tatlısu, Tütüncüler, Yaylacık, Yeniköy, Yeşiltepe, Yeşilyurt, Zaferli mahallerinde AADTA bulunmamaktadır.

Tablo 3: Trabzon Akçaabat ilçesi AADTA mahalle bazında kapasite yeterlilik düzeyleri

Mahalle adı	Nüfus (2023)	Toplanma alanı	Toplam alan (m^2)	Nüfus*1.5 m^2	Fark	Kapasite
Akçakale Mah.	2188	T24	636.52	3282	-2645.48	Yetersiz
Akçaköy Mah.	1861	T27	820.68	2791.5	-1970.82	Yetersiz
Akpınar Mah.	1109	T03	671.88	1663.5	-991.62	Yetersiz
Çolaklı Mah.	2361	T11	4378.38	3541.5	836.88	Yeterli
Darıca Mah.	3349	T05	910.66	5023.5	-4112.84	Yetersiz
Derecik Mah.	1510	T21	824.93	2265	-1440.07	Yetersiz
Doğanköy Mah.	1752	T26	628.06	2628	-1999.94	Yetersiz
Dürbinar Mah.	6952	T01, T07, T08	32179.12	10428	21751.12	Yeterli
Işıklar Mah.	2019	T25	420.29	3028.5	-2608.21	Yetersiz
Kavaklı Mah.	3861	T10	5745.86	5791.5	-45.64	Yetersiz
Mersin Mah.	2618	T20	653.48	3927	-3273.52	Yetersiz
Nefsipulathane Mah.	3206	T19	1301.00	4809	-3508.00	Yetersiz
Orta Mah.	4240	T09	1793.66	6360	-4566.34	Yetersiz
Osmanbaba Mah.	987	T18	166.15	1480.5	-1314.35	Yetersiz
Salacık Mah.	944	T17	355.37	1416	-1060.63	Yetersiz
Sarıtaş Mah.	2399	T23	1389.34	3598.5	-2209.16	Yetersiz
Söğütlü Mah.	23842	T02, T15	29700.16	35763	-6062.84	Yetersiz
Yaylacık Mah.	18382	T04, T16, T28	78456.9	27573	50883.9	Yeterli
Yeni Mah.	3769	T21	824.93	5653.5	-4828.57	Yetersiz
Yıldızlı Mah.	13146	T12, T13, T14	4533.08	19719	-15185.92	Yetersiz

- Trabzon Akçaabat ilçesi AADTA toplam yüzölçümü 166390.45 m^2 dir. Yüzölçümleri 166.15 - 78456.9 m^2 arasında değişmektedir. AADTA yüzölçümleri açısından değerlendirildiğinde, 0-1000 m^2 arasında 11, 1000-10000 m^2 arasında 6, 10000-100000 m^2 arasında 3 AADTA bulunmaktadır. Kapasite açısından değerlendirildiğinde; AADTA bulunan mahallelerde bu alanların büyük bir çoğunluğunun kişi başına 1m^2 belirlense bile kapasitenin altında olduğu saptanmıştır. Kişi kapasitesinin hesaplanması için kişi başına 1.5 m^2 olacak şekilde hesaplandığında Tablo 3 ile gösterildiği gibi mevcut AADTA büyük ölçüde kapasite açısından standartlara uygun değildir. Deprem sırası ve sonrasında toplanma alanlarının kritik öneme sahip olması, bu alanların yer seçim ölçütlerini sağlamasını ve bu alanların güvenliğini tehdit edecek unsurların belirlenmesini gerektirir. Bu bağlamda bu alanların kullanılabilirliklerinin ve kapasitelerinin sürdürülebilirliğinin sağlanması, önemli öncelikler arasında yer alır. Tablo 3 incelendiğinde ise Çolaklı, Dürbınar ve Söğütlü mahallelerinde AADTA kapasite açısından yeterliyken Akçakale, Akçaköy, Akpınar, Darıca, Derecik, Doğanköy, Işıklar, Kavaklı, Mersin, Nefsipulathane, Orta, Osmanbaba, Salacık, Sarıtaş, Söğütlü, Yeni, Yıldızlı mahallerinde AADTA kapasite açısından yetersiz olduğu tespit edilmiştir. AADTA Akçaabat ilçesinde homojen dağılım göstermediği ve mahalle bazında nüfus verilerine göre Çolaklı, Dürbinar, Yaylacık mahalleleri dışında kalan mahallelerde olası bir afet durumunda mahalle sakinlerinin ihtiyaçlarını karşılayamayacağı belirlenmiştir.
- Kat yüksekliği bakımından değerlendirildiğinde; AADTA'nın Tablo 4 ile verildiği gibi büyük bir çoğunluğunun etrafındaki bina yüksekliklerinin yüksek katlı olduğu dikkati çekmektedir. Herhangi bir doğal afet durumunda yıkılan bina enkazlarından kapanan yollar ulaşım ağındaki faaliyetlerin yavaşlamasına hatta durmasına neden olabilir.
- AADTA için çevresindeki binalar ile arasındaki mesafe ile ilgili olarak toplanma alanlarının yapı yüksekliğinin iki katı kadar uzağında olmasına dikkat edilir. AADTA'ndan T02, T04, T06, T07, T08, T09, T12, T13, T14, T15, T16, T19, T22 mesafe koşullarını sağlamamaktadır.

Tablo 4: Trabzon Akçaabat ilçesi AADTA bina, deniz ve dere yataklarına mesafe

No	Çevresindeki binaların kat yüksekliği	Çevresindeki binalar arasındaki mesafe (m)	Deniz mesafe (m)	Dere yataklarına mesafe (m)
T01	3,4,5,6,7,9	70	25	-
T02	6,7,8,9,10	50	210	-
T03	-	-	12300	1280
T04	5,6,7,10,11	15	120	-
T05	-	-	270	450
T06	5,6,7,9	10	200	-
T07	5,6,7,9	10	130	-
T08	5,7,10	15	120	-
T09	5,6,7,9,10	10	120	-
T10	-	-	60	-
T11	2	10	60	-
T12	4,5,6,8,10,11	20	230	-
T13	8,10,11	5	2870	-
T14	8,10,11,13	20	400	-
T15	4,5,6,7,9,10,11,13	20	350	-
T16	6,8	15	410	-
T17	-	-	80	-
T18	-	-	1720	-
T19	5,6,9	10	370	30
T20	-	-	60	-
T21	-	-	5800	50
T22	4,5,6	20	380	300
T23	-	-	1470	250
T24	-	-	150	
T25	-	-	18600	100
T26	-	-	15000	70
T27	-	-	8600	-
T28	4,5,6,7	50	20	

** Binalara olan mesafe en yüksek katlı binadan yatay mesafe olarak ölçülmüştür. Denize olan mesafe yatay mesafe olarak ölçülmüştür.*

- Deniz ve dere yataklarına olan mesafe incelendiğinde ise, T01, T10, T11, T17, T19, T20, T21, T26, T28 numaralı AADTA deniz ve dere yataklarına yakınlıkları ile risk teşkil etmektedir.

2.4. Potansiyel Alanların Önerilmesi

Türkiye'de yaşanan birçok afet sonrasında AADTA'nın önemi ortaya çıkmıştır ve bu alanların belirlenmesinde kentsel açık ve yeşil alanların önemli bir potansiyeli barındırdığı açıktır. Hayati işlevleri olduğu düşünüldüğünde, kentsel alanlarda olası bir afet durumunda toplanma alanlarının konumlarının stratejik olarak planlanması ve kentlerde bu amaçla kullanılabilecek potansiyel alanların belirlenmesi gerektiği açıktır.

Çalışma kapsamında yapılan değerlendirme sonucunda AADTA'nın büyük bir kısmının olası bir afet durumunda insanların ihtiyaçlarını karşılayamayacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle potansiyel AADTA belirlenmiştir.

Trabzon ili Akçaabat ilçesinde potansiyel AADTA olarak; Akçaabat Belediyesi Futbol Sahası, Cumhuriyet Parkı, Akçaabat Belediye Mezarlığı, Trabzon Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Akçaabat Belediyesi Futbol Sahası, Akçaabat Haçkalı Baba Devlet Hastanesi, Akçaabat Sebatspor Tesisleri ve Söğütlü Atletizm Stadı, Trabzon Akçaabat Mesleki Eğitim Merkezi, Trabzon Güzel Sanatlar Lisesi, Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, Söğütlü Halı Saha ve Kilise Kıranı belirlenmiştir.

Akçaabat ilçesindeki birçok mahallede mevcut AADTA, nüfusun ihtiyaçlarını karşılayacak kapasitede değildir. Özellikle Akçakale, Akçaköy, Akpınar, Darıca, Derecik, Doğanköy, Işıklar, Kavaklı, Mersin, Nefsipulathane, Orta, Osmanbaba, Salacık, Sarıtaş, Yeni ve Yıldızlı mahallelerinde kapasite yetersizliği belirlenmiştir. Kişi başına düşen alan miktarı 1.5 m² olarak hesaplandığında, bu mahallelerdeki AADTA'nın büyük ölçüde yetersiz olduğu görülmektedir. Bu durum, afet anında ve sonrasında insanların güvenli bir şekilde toplanabileceği alanların sınırlı olduğunu göstermektedir. AADTA'lar mahalleler arasında homojen bir dağılım göstermemektedir. Bu durum, bazı mahallelerde afet durumunda toplanma alanlarının yetersiz kalmasına yol açabilir. Özellikle Çolaklı, Dürbinar ve Yaylacık mahalleleri dışında kalan mahallelerde kapasite yetersizliği belirgin bir sorundur. Kapasite yetersizliği tespit edilen mahallelerde, mevcut AADTA'nın genişletilmesi veya yeni toplanma alanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu alanların kişi başına düşen alan miktarını artıracak şekilde planlanması önemlidir. Özellikle nüfus yoğunluğu yüksek mahallelerde, yeni toplanma alanlarının belirlenmesi ve bu alanların afet durumunda kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda potansiyel AADTA önerilmiştir. Akçaabat Belediyesi Futbol Sahası, Cumhuriyet Parkı, Akçaabat Belediye Mezarlığı, Trabzon Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Akçaabat Haçkalı Baba Devlet Hastanesi, Akçaabat Sebatspor Tesisleri, Söğütlü Atletizm Stadı, Trabzon Akçaabat Mesleki Eğitim Merkezi, Trabzon Güzel Sanatlar Lisesi, Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü, Söğütlü Halı Saha ve Kilise Kıranı gibi potansiyel AADTA'lar değerlendirilerek, bu alanların afet durumunda kullanılabilir hale getirilmesi sağlanmalıdır.

3. Sonuç ve Öneriler

Türkiye'de geçmişten günümüze yaşanan depremlerin ardından can ve mal kayıplarına rağmen AADTA için çalışmaların yeterli ölçüde yapılmadığı hatta mevcut toplanma alanlarının planlama esnasında planlanmadığı mevcut yeşil alan ve parkların toplanma alanı olarak seçildiği bir anlayışın hâkim olduğu görülmektedir. Ayrıca deprem sonrası geçici barınma alanı olarak kullanılan alanların sonrasında imara açılarak çoğunlukla yüksek katlı yapılar veya alışveriş merkezleri (Torun Center, Anthill, Starcity Outlet, Forum İstanbul, Marmara Forum, Meydan AVM, Onaltı Dokuz, Zaman Gazetesi Binası ve Sahilpark Veliefendi Konutları, Ataköy Konakları) yapıldığı mevcut literatür çalışmalarında tespit edilmiştir. Bu durum, AADTA'nın kapasitesinin daha da azalmasına ve mevcut nüfus kapasitesinin altına düşmesine sebep olarak geri dönüşü olmayan sonuçlara yol açmaktadır.

Türkiye'de AADTA için literatürde farklı değerlendirme ölçütlerinin kullanılması, ulusal düzeyde bu alanların toplanma alanı olarak belirlenmesinde kullanılan standart bir yöntemin ve mevcut ölçütlerin yeterli olmayışı çalışmanın temel çıkış noktasıdır. Bu çalışma, Trabzon Akçaabat ilçesindeki AADTA'nın mevcut durumunu ve kapasite yeterlilik düzeylerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yapılan analizler sonucunda, birçok mahallede mevcut AADTA'nın nüfusun ihtiyaçlarını karşılayacak kapasitede olmadığı ve güvenlik açısından çeşitli riskler taşıdığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, AADTA'nın kapasite artırımı, güvenlik önlemlerinin alınması ve potansiyel yeni alanların belirlenmesi gibi öneriler sunulmuştur. Çalışmanın bulguları, afet sonrası süreçlerin daha etkin yönetilmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca AFAD tarafından yayınlanan ölçütlerin ülke genelinde uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi ve yerel ölçütlerin belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Çalışma alanındaki AADTA'nın çevresindeki binaların yüksek katlı olması, afet durumunda yolların kapanmasına ve ulaşımın zorlaşmasına neden olabilir. Bu, acil durum hizmetlerinin etkin bir şekilde sağlanmasını engelleyebilir. AADTA'nın çevresindeki binaların yüksekliği ve deniz/dere yataklarına olan mesafeleri dikkate alınarak, güvenlik risklerini azaltacak önlemler alınmalıdır. Bu alanların yapı yüksekliğinin iki katı kadar uzağında olması sağlanmalıdır.

AADTA'ndan T01, T10, T11, T17, T19, T20, T21, T26, T28 numaralı AADTA deniz ve dere yataklarına yakınlıkları nedeniyle risk teşkil etmektedir. Bu alanlar, su taşkını veya tsunami gibi ikincil tehlikelere maruz kalabilir. Deniz ve dere yataklarına yakın AADTA için, su taşkını veya tsunami gibi ikincil tehlikelere karşı koruyucu önlemler alınmalıdır.

Sonuç olarak, Trabzon ili Akçaabat ilçesindeki AADTA'nın mevcut durumu, kapasite yetersizlikleri ve güvenlik riskleri göz önüne alındığında, bu alanların iyileştirilmesi ve yeni potansiyel alanların belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Çalışmada sunulan öneriler, AADTA'nın kapasite ve güvenlik açısından daha etkin hale getirilmesine yönelik somut adımlar içermektedir. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin ve ilgili kurumların iş birliği içinde çalışarak, afet sonrası süreçlerin daha etkin yönetilmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması için gerekli önlemleri alması gerekir. Toplumun bilinçlendirilmesi ve afet hazırlık süreçlerine aktif katılımının sağlanması, bu alanların sürdürülebilirliğini artıracak ve olası afet durumlarında daha güvenli bir ortam oluşturacaktır.

Teşekkür

Verilerin temin edilmesinde yardımlarından dolayı Trabzon Akçaabat Belediyesi İmar Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Adıgüzel, F. H. (2023). *Afet sonrası hazırlık alanlarının incelenmesi ve deprem parkı tasarımı: Sancaktepe örneği* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2024a). *Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü*. 10 Temmuz 2024'de https://www.afad.gov.tr/aciklamali-afet-yonetimi-terimleri-sozlugu adresinden alındı.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2024b). *Afet ve Acil Durum Toplanma Alanları*. 12 Eylül 2024'de https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/39521/xfiles/toplanma_alanlari.pdf adresinden alındı.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2025). *Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması*. 14 Ocak 2025'de https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml adresinden alındı.

Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 13*(11), 2707–2716.

Aman, D. D. (2019). *Olası Marmara depreminde toplanma alanları yer seçim kriterlerinin belirlenmesi: İstanbul Bağcılar örneği* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Baluyot, C. P., Santos, F. D., Santos, C. D., Pili, H. S., & Alzona, A. R. (2023, March 17–20). *Determination of the most suitable location of evacuation center for a flood-prone community using multi-criteria decision analysis: the case of Barangay Sapang Bayan, Bulacan, Philippines* [Conference presentation]. In International Civil Engineering and Architecture Conference, Kyoto, Japan.

Çınar, A. K., Akgün, Y., & Maral, H. (2018). Afet sonrası acil toplanma ve geçici barınma alanlarının planlanmasındaki faktörlerin incelenmesi: İzmir-Karşıyaka örneği. *Planlama, 28*(2), 179–200. https://doi.org/10.14744/planlama.2018.07088

Dabiri, M., Oghabi, M., Sarvari, H., Sabeti, M. S., & Kashefi, H. R. (2020). A combination risk-based approach to post-earthquake temporary accommodation site selection: A case study in Iran. *Iranian Journal of Fuzzy Systems, 17*(6), 54–74. https://doi.org/10.22111/ijfs.2020.5601

Demirkurt, H. (2019). *Parklarda iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları, toplanma alanı ve deprem parkı entegrasyonu* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Deniz, E. (2023). *Açık yeşil alanların afet sonrası toplanma alanı olabilirlik kriterlerinin belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Deniz, E., Yalçınalp, E., & Meral, A. (2024). Afet sonrası bir kriz yönetimi bileşeni olarak kent parkları; Malatya örneği. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 20*(1), 326–347. https://doi.org/10.58816/duzceod.1441688

Doğan, G. (2023). *Bütünleşik afet yönetim sistemi çerçevesinde acil toplanma alanları planlama kriterlerinin incelenmesi: Malatya-Battalgazi örneği* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Dursun, B. (2021). *Afet toplanma alanlarının türlerine ve yer seçim kriterlerine göre uygunluğunun değerlendirilmesi: İstanbul, Esenler örneği* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Ekin, E., & Sarıkaya, Z. (2021). AHP tabanlı Topsis Yöntemi ile afet sonrası acil toplanma alanlarının belirlenmesine yönelik bir uygulama. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, *10*(3), 696–713.

Erdin, H. E., Çelik, H. Z., Aydın, M. B. S., & Partigöç, N. S. (2023). Afet ve acil durumlarda sosyal altyapı alanlarının toplanma alanı olarak belirlenme kriterleri ve yöntemi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi, 5*(1), 1–21. https://doi.org/10.46464/tdad.1251998

Gerdan, S., & Şen, A. (2019). Afet ve acil durumlar için belirlenmiş toplanma alanlarının yeterliklerinin değerlendirilmesi: İzmit örneği. *İdealkent, 10*(28), 962–983. https://doi.org/10.31198/idealkent.514077

Gerdan, S., & Şen, A. (2020). Kocaeli/Başiskele ilçesi afet ve acil durum toplanma alanlarının yeterliklerinin değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *8*(2), 489–500. https://doi.org/10.21923/jesd.683679

Gökgöz, B. İ., İlerisoy, Z. Y., & Soyluk, A. (2020). Acil durum toplanma alanlarının AHP yöntemi ile değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 19*, 935–945. https://doi.org/10.31590/ejosat.739544

Hosseini, K. A., Tarebari, S. A., & Mirhakimi, S. A. (2022). A new index-based model for site selection of emergency shelters after an earthquake for Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 77*, Article 103110. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103110

Jahangiri, K., Borgheipour, H., Gendeshmin, S. B., Matin, A., & Monazami Tehrani, G. (2020). Site selection criteria for temporary sheltering in urban environment. *International journal of disaster resilience in the built environment, 11*(1), 58–70. https://doi.org/10.1108/IJDRBE-06-2018-0025

Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı. (2002). Türkiye Cumhuriyeti İstanbul ili sismik mikro-bölgeleme dahil afet önleme/azaltma temel planı çalışması, Son Rapor Cilt V, İstanbul: Japon Uluslararası İş birliği Ajansı (JICA) ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), İstanbul, Türkiye. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11707866_01.pdf

Kalkan, M. (2022). Uşak kentinde belirlenen afet ve acil durum toplanma alanlarının yeterliklerinin değerlendirilmesi. *Resilience, 6*(2), 269–285. https://doi.org/10.32569/resilience.1195076

Karaçuhalılar, E. (2023). *Deprem sonrası toplanma alanı olarak kentsel açık ve yeşil alanların önemi: Erzurum İli Haydar Aliyev Parkı örneği* [Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kart, B., Yağcı, C., Gözgörer, B., Avcı, E., & İşcan, F. (2023). Afet yönetimi için mobil uygulama tasarımı ve CBS ile acil durum toplanma alanlarının uygunluğunun irdelenmesi: Konya ili örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *9*(1), 1–15. https://doi.org/10.21324/dacd.950721

Kaynar, S. P. (2023). *Afet ve risk yönetimi kapsamında çankırı kent merkezindeki acil toplanma alanlarının uygunluk ve yeterliliklerinin analizi* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kılcı, F. (2012). *A decision support system for shelter site selection with gis ıntegration: case for Turkey* [Yüksek lisans tezi, Bilkent Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Köse, B. (2023). *Afet durumlarında toplanma alanlarının incelenmesi ve Bodrum- Yeniköy örneği* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Okan Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Maral, H. (2016). *Afet sonrası geçici yerleşim yerlerinin planlanmasındaki faktörlerin incelenmesi: Karşıyaka örneği* [Yüksek lisans tezi, Gediz Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Mengi, O., & Erdin, H. E. (2018, May *04-06*). *Afet ve acil durumlarda toplanma alanlarının yönetimi tasarım ve sistematik yaklaşımlar* [Bildiri Sunumu]. 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya, Türkiye.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). *Resmi iklim istatistikleri.* 14 Ocak 2025'de https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=TRABZON, adresinden alındı.

Öcal, T., & Yıldız, A. (2023). 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri öncesi toplanma alanlarının coğrafi analizi: Antakya ve çevresi. *Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *20*(52), 132–157.

Öz, K. C. (2022). *Tekirdağ ili Süleymanpaşa ilçesinde yer alan toplanma alanlarının yeterliliklerinin belirlenmesi ve toplanma alanları ile ilgili görüşlerin değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Özel, S. (2019). *Afet sonrası toplanma alanlarının kentsel açık ve yeşil alan sistemlerindeki yeri: Kastamonu Kenti örneği* [Yüksek lisans tezi, Kastamonu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Özkılıç, E. N. (2020). *İstanbul'da deprem sonrası toplanma alanlarının kapasitelerinin ve erişilebilirliklerinin CBS yardımıyla analizi ve değerlendirilmesi* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Öztürk, F., & Kaya, G. K. (2020). Afet sonrası toplanma alanlarının Promethee Metodu ile değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *25*(3), 1239–1252. https://doi.org/10.17482/uumfd.697097

Palazca, A. (2020). *Afet sonrası toplanma alanlarının analizi: Denizli örneği* [Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Partigöç, N. S. (2023). Afet sonrası toplanma alanlarına yönelik kapasite yeterliliğinin değerlendirilmesi: Merkezefendi ilçesi (Denizli) örneği. *Afet ve Risk Dergisi*, *6*(1), 128–147. https://doi.org/10.35341/afet.1171055

Saygılı, H. B., & Akpınar, A. (2022). Aydın/Efeler kentsel yeşil alanlarının afet ve acil durum toplanma alanları açısından yeterliliğinin incelenmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *19*(2), 305–311. https://doi.org/10.25308/aduziraat.1177091

Soltani, A., Ardalan, A., Boloorani, A. D., Haghdoost, A., & Hosseinzadeh-Attar, M. J. (2014). Site selection criteria for sheltering after earthquakes: A systematic review. *PLOS Currents Disasters. 6*. https://doi.org/10.1371/currents.dis.17ad1f98fb85be80785d0a81ced6a7a6.

Soltani, A., Ardalan, A., Boloorani, A. D., Haghdoost, A., & Hosseinzadeh-Attar, M. J. (2015). Criteria for site selection of temporary shelters after earthquakes: a delphi panel. *PLOS Currents Disasters. 7*. https://doi.org/10.1371/currents.dis.07ae4415115b4b3d71f99ba8b304b807.

Şekkeli, Z. H. (2020). Afet ve acil durum lojistiği kapsamında acil durum toplanma merkezi seçiminde AHP yöntemi: Kahramanmaraş Onikişubat Belediyesi'nde bir uygulama. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, *9*(2), 903–930.

Şirin, M., & Ocak, F. (2020). Gümüşhane Şehri'nde afet ve acil durum toplanma alanlarının coğrafi bilgi sistemleri ortamında değerlendirilmesi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, *25*(44), 85–106. https://doi.org/10.17295/ataunidcd.790893

Taş, D. (2023). *Sakınım planlamasının bir bileşeni olarak acil toplanma alanlarının incelenmesi: Konyaaltı (Antalya) örneği* [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Tufan, T. (2019). *Olası İstanbul depremi ile yapılan kentsel dönüşüm planlamaları ve alınan önlemlerin irdelenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Upadhyay, A., & Sa-ngiamwibool, A. (2021). A systematic literature review of community disaster resilience: main and related research areas and agendas. *Continuity & Resilience Review*, *3*(2), 192–205. https://doi.org/10.1108/CRR-03-2021-0011

Uyar, H. E. (2021). *Deprem sonrası toplanma alanlarının İstanbul örneğinde incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Üstündağ, G. (2023). *Creating a model for emergency assembly areas using geographical information systems* [Master's thesis, Middle East Technical University]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Yiğit, T. (2021). *Acil toplanma noktalarının önceliklendirilmesine yönelik aralıklı tip-2 bulanık küme tabanlı bir yaklaşım: Muş ili uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Munzur Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Zengin Çelik, H., Özcan, N. S., & Erdin, H. E. (2017 Ekim 11-13). *Afet ve acil durumlarda halkın toplanma alanlarının kullanılabilirliğini belirleyen kriterler* [Bildiri Sunumu] 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, Türkiye.

Artvin Çoruh Üniversitesi
Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi
Doğal Afetler ve Çevre Dergisi

Artvin Çoruh University
Natural Hazards Application and Research Center
Journal of Natural Hazards and Environment

Derleme / Review, Doğ Afet Çev Derg, 2025; 11(1): 354–365, DOI: 10.21324/dacd.1517221

Dirençli Kentler: Mekânsal Planlama ve Ulaşım

Arzu Maltaş Erol[1,*]

[1]*Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi, 70200, Karaman.*

Özet

Günümüzde kentler, artan nüfus ve yapılaşma yoğunlukları gibi nedenlerle pek çok krizle karşı karşıya kalmakta ve bu nedenle savunmasız hale gelmektedir. Özellikle afetler, kentler için büyük tehdit oluşturmakta ve kentsel sistemlerin kesintiye uğramasına sebep olarak ciddi zarar ve kayıplara yol açmaktadır. Bu savunmasızlıkların çözüm yollarından biri, son zamanlarda oldukça dikkat çekmeye başlayan dirençlilik kavramıdır. Dirençlilik, en genel anlamda, bir sistemin olumsuz etkilerden hızlı bir şekilde toparlanabilme kapasitesini ifade etmektedir. Dirençli kent ise kentsel sistemlerin krizler karşısında dayanabilme gücüne sahip olması ve sistemini hızlı bir şekilde eski haline getirerek sürdürülebilirliğini sağlayabilmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, afete dirençli kentler afet öncesinde, sırasında ve sonrasında etkin müdahalelerde bulunabilecek kapasiteye sahiptir. 1990'lı yıllardan itibaren kent literatürüne kazandırılan bu kavram, afetlerin etkilerini en aza indirme amacıyla afete dirençli mekânsal planlamayı ön plana çıkarmıştır. Bu süreçte, afetlerin kentler üzerindeki yıkıcı etkilerini azaltmada ulaşım sistemlerinin büyük bir öneme sahip olduğu anlaşılmıştır. Afetlerin ulaşım ağları, sistemleri ve hizmetleri üzerindeki etkileri düşünüldüğünde, afete dirençli kent planlaması ve ulaşım planlaması sadece afet anını değil, olası bir afet öncesi hazırlık süreçlerini de kapsamaktadır. Aynı zamanda, afet sonrası toparlanma sürecini de içeren bu planlamalar, insanların güvenli tahliyesini ve malzeme teminini destekleyerek, kentlerin daha az hasar görmesi, mobilitenin ve erişilebilirliğin devamlılığı açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, kentlerin bu tür krizlere karşı nasıl daha dirençli hale getirilebileceğini incelemekte ve özellikle afet yönetimi ile ulaşım planlamasının kentsel dirençliliğin artırılmasındaki rolünü değerlendirmektedir. Çalışma kapsamında, öncelikle dirençli kent kavramı, kentleri dirençli kılan özellikler ve afetlerin mekânsal planlama üzerindeki etkileri ele alınmış; afete dirençli mekânsal planlamanın kavramsal çerçevesi genel hatlarıyla açıklanmıştır. Ardından, ulaşım planlaması ve önemi tartışılarak, kentsel alanlarda afetlere karşı dirençli bir ulaşım sistemi oluşturmak için kullanılabilecek stratejiler değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda ise dirençli kentlerde ulaşım planlamasının afetlere karşı dayanıklılığı artırmak ve toplum güvenliğini sağlamak için önemli bir faktör olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler
Dirençli Kent, Afete Dirençli Mekânsal Planlama, Ulaşım Planlaması, Afet Yönetimi

Resilient Cities: Spatial Planning and Transportation

Abstract

Today, cities face multiple crises due to increasing population and construction densities, making them vulnerable. Disasters, pose significant threats to urban areas by disrupting systems and causing serious damage and losses. The concept of resilience has recently gained considerable attention as a solution to these vulnerabilities. In its most general sense, resilience refers to the capacity of a system to quickly recover from adverse effects. A resilient city means that its urban systems have the strength to withstand crises and can rapidly restore themselves to ensure sustainability. Therefore, disaster-resilient cities have the capacity to effectively intervene before, during, and after disasters. Introduced into urban literature since the 1990s, this concept has highlighted disaster-resilient spatial planning to minimize the impacts of disasters. During this process, it has been understood that transportation systems play a significant role in mitigating the destructive effects of disasters on cities. Considering the impacts of disasters on transportation networks, systems, and services, disaster-resilient urban and transportation planning encompass not only the moments during disasters but also the preparation processes before potential disasters. Additionally, these plans, which include the recovery process after disasters, are critical in ensuring the safe evacuation of people and the supply of materials, supporting the continuity of mobility and accessibility, and while reducing damage to cities. This study examines how cities can become more resilient to crises and evaluates the role of disaster management and transportation planning in enhancing urban resilience. Within the scope of the study, the concept of resilient, its features, and the impacts of disasters on spatial planning are first addressed. The conceptual framework for disaster-resilient spatial planning is broadly explained. Subsequently, the importance of transportation planning is discussed, and strategies to create a disaster-resilient transportation system in urban areas are evaluated. In conclusion, the study finds that transportation planning in resilient cities is crucial for increasing resilience to disasters and ensuring public safety.

Keywords
Resilient Cities, Disaster-Resistant Spatial Planning, Transportation Planning, Disaster Management

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (338) 2262000 Faks: +90 (338) 2262023
E-posta: arzumaltas@kmu.edu.tr (Maltaş Erol A.)

Gönderim Tarihi / Received : 16/07/2024
Kabul Tarihi / Accepted : 28/12/2024

1. Giriş

Kentler, sürekli artan nüfus, yoğun yapılaşma ve karmaşık altyapı sistemleri nedeniyle çeşitli doğal ve insan kaynaklı afetlere karşı savunmasız hale gelmiştir. Bu savunmasızlık, kentlerin güvenliğini ve sürdürülebilirliğini tehdit eden büyük riskler doğurmaktadır. Afetlerin kentlerde yarattığı fiziksel yıkım, sosyal ve ekonomik etkilerle birleştiğinde, toplulukların uzun vadeli refahı da ciddi şekilde tehlikeye girmektedir. Bu nedenle, kentlerin afetlere karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla geliştirilen yeni planlama ve yönetim stratejileri, modern şehircilik anlayışının merkezinde yer almaktadır. Bu bağlamda, 1990'lı yıllardan itibaren kent literatürüne giren dirençli kentler kavramı, afetlere karşı hazırlıklı, afet anında etkin müdahale edebilen ve afet sonrası hızla toparlanabilen kentleri ifade etmektedir. Dirençli kentler, sadece fiziksel altyapı ve binaların dayanıklılığını değil, aynı zamanda toplumsal yapının, ekonomik sistemlerin ve çevresel sürdürülebilirliğin de güvence altına alınmasını gerektirmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, kentsel dayanıklılığın sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Afetlerin kentlerde yarattığı tahribatın en belirgin alanlarından biri ulaşım sistemleri olduğundan, ulaşım planlamasının kentsel direnç oluşturmadaki rolünün oldukça hayati olduğu ifade edilebilir. Nitekim, ulaşım ağları hem acil müdahale ekiplerinin afet bölgelerine hızla ulaşabilmesi hem de halkın güvenli bir şekilde tahliye edilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu anlamda, olası bir afet durumunda etkin bir şekilde işleyen ulaşım sistemleri can kaybını en aza indirecek, hasarları azaltacak ve kentsel topluluğun hızlı bir şekilde toparlanmasını sağlayacaktır. Ayrıca, ulaşımın afet öncesi hazırlık süreçleri için de büyük bir öneme sahip olduğu unutulmamalıdır. Afet öncesi hazırlık süreçlerinde, ulaşım sistemlerinin dayanıklılığı ve esnekliği, acil durum planlarının etkin bir şekilde uygulanabilmesinde önemli rol oynamakta dır. Bu süreçte, ulaşım ağlarının güçlendirilmesi, alternatif yolların belirlenmesi ve lojistik planlamaların yapılması, afet anında ve sonrasında karşılaşılacak zorlukları minimize etmektedir. Dolayısıyla, afete dirençli kent planlaması kapsamına ulaşım sistemlerinin dahil edilmesi önemli bir gereklilik olarak görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, ulaşım planlamasının kentsel direnç oluşturmadaki önemini vurgulamak ve bu bağlamda ulaşım planlamasının afet yönetimi süreçlerindeki rolünü ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda dirençli kentler kavramı ile afete dirençli ulaşım planlaması arasındaki ilişki ele alınmıştır. Bu kapsamda dirençlilik, dirençli kentler, afete dirençli kent planlaması ve afete dirençli ulaşım planlaması konuları incelenmiş; ulaşım planlamasının afet öncesi hazırlık, afet anında müdahale ve afet sonrası toparlanma süreçlerinde büyük bir role sahip olduğu, bu nedenle de kentsel direnç oluşturmanın ayrılmaz bir parçası olduğu ileri sürülmüştür. Çalışmada, literatür taraması ile dirençli kent ve ulaşım planlamasının farklı boyutları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. İlk bölümde, dirençlilik ve dirençli kent kavramının teorik temelleri ve tarihsel gelişimi, ikinci bölümde afete dirençli kent planlamasının temel ilkeleri incelenmiştir. Ardından afete dirençli ulaşım planlamasının önemi ve dirençli kentlerle ilişkisi ele alınarak çalışma sonuçlandırılmıştır.

2. Dirençlilik ve Dirençli Kentler

Dirençlilik, günlük kullanımda genellikle bir şeye karşı koyma, dayanma veya mukavemet gösterme kavramlarına karşılık gelmektedir. Kavramın kökeni Latince “resilire, resilio” terimlerine dayanmakta ve sıçrama, atlama veya geriye sıçrama anlamlarına gelmektedir. Bilimsel anlamda dirençlilik terimi ilk kez 16. yüzyılda Francis Bacon tarafından modern bilimsel yöntemi oluşturmak için kullanılmıştır (Alexander, 2013). 18. yüzyıldan itibaren yaygınlaşan dirençlilik kavramı, başlangıçta ekoloji alanında kullanılmış, ardından sosyal bilimler ve kent planlaması gibi pek çok disiplinin başvurduğu bir terim haline gelmiştir. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren, kentlerin krizlerle başa çıkma kapasitelerinin artırılması gerekliliği, bu kavramın kentsel literatürde önemli bir yer edinmesini sağlamıştır (Porebska vd., 2019). Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında afetler açısından ele alınan dirençlilik kavramı, son 20-30 yıllık bir gelişimin ürünüdür. Ancak, kavramın uzun bir geçmişe sahip olması ve farklı alanlarda kullanılması, literatürde terimin anlamı konusunda görüş birliğine varılmasını zorlaştırmıştır. Anlam birliğinin sağlanamaması, kavramın isimlendirilmesinde de farklılıklar yaratmış; bazı kaynaklarda esneklik, bazı kaynaklarda dayanıklılık, bazılarında ise kırılganlığın zıddı olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, pek çok raporda genellikle dirençlilik teriminin tercih edildiği görülmektedir.

Bugün birçok alanda yaygın olarak kullanılan dirençlilik kavramının temelleri, Holling'in araştırmalarına dayanmaktadır. Holling (2001)’e göre dirençlilik, bir sistemin beklenmedik veya tahmin edilemeyen şoklara karşı savunmasızlığının bir ölçüsüdür. Diğer bir ifadeyle, dirençlilik, bir zayıflık durumundan veya gerilemeden kurtulma yeteneği (Tainter & Taylor, 2014) olarak tanımlanabilir. En genel anlamıyla dirençlilik, değişen ve belirsiz bir geleceğe yapıcı bir yanıt olarak ele alınmaktadır. Bu yanıt, iklim değişikliğinden yolsuzluğa, iç karışıklıktan hastalık salgınlarına veya ekonomik düşüşlere kadar oldukça geniş bir yelpazeyi kapsamakta ve bu potansiyel risk alanlarına yönelik riski azaltmak için proaktif stratejiler ve çözümlerin geliştirilmesini öngörmektedir (ARUP & Siemens, 2015). Bu bağlamda, dirençliliğin sürdürülebilirlikle olan ilişkisi gündeme gelmekte ve bu ilişkinin sorgulanmasına neden olmaktadır. Bu anlamda, direncin sürdürülebilirliği kapsayan bir kavram mı yoksa sürdürülebilirliğin bir bileşeni mi olduğu ya da ikisinin birbirinden tamamen bağımsız kavramlar mı olduğu tartışmaları, bu sorgulamanın temelini oluşturmaktadır (Kundak, 2017). Bazı yazarlar sürdürülebilirlikle dirençlilik arasında net ayrımlar yapsa da esasında bu iki kavram birbirinden tamamen bağımsız, birbirini dışlayan ya da birbiriyle tutarsız kavramlar değildir. Nitekim, dirençlilik iyileşme kapasitesini içerdiğinden aslında sürdürülebilirlik hedefine ulaşmanın bir yolu olarak kabul edilebilmektedir (Tainter & Taylor, 2014). Dolayısıyla, iki kavramın birbirini beslediğini ifade etmek mümkündür. Ayrıca, sürdürülebilirliği

sağlamak için gösterilen çabaların dirençliliğe ulaşma yolunda olumlu sonuçlar doğurduğu da bilinmektedir (Ercoşkun, 2012).

Dirençlilik, sürdürülebilirlik dışında afet literatürü ile de ilişkilendirilmekte, bilhassa hasar görebilirlik ya da kırılganlık boyutu bu ilişkilendirmede dikkat çekmektedir. Kırılganlık veya hasar görebilirlik, sosyal sistemlerin kendi içsel özelliklerinden kaynaklanan ve risk altındakilerin ne kadar zarar görebileceğini belirleyen bir kavram olarak tanımlanmaktadır. Bu içsel özellikler, sistemdeki zayıflıklar veya eksikliklerden kaynaklanarak ortaya çıkabilmekte ve olası bir afet durumunda ne kadar zarar görüleceğini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Öte yandan, dirençlilik ise daha çok sistemin dışından kaynaklanan faktörlerin etkilerine bağlı dinamik bir süreci ifade etmektedir (Cutter vd., 2008). Dolayısıyla dirençlilik, çevresel değişimlere ya da şoklara karşı ne kadar esnek olunduğunu ve bunlara ne derece adapte olunabileceğini belirlemektedir. Bu açıklamalar, kırılganlık/hasar görebilirlik ile dirençlilik arasındaki farkı netleştirirken, her iki kavramın da afet risk yönetimi ve hazırlığı açısından önemli olduğunu göstermektedir. UNISDR (2009) dirençliliği, "tehlikeye maruz kalan bir sistemin, toplumun veya toplumun tehlikenin etkilerine karşı direnç gösterme, emme, uyum sağlama, zamanında ve verimli bir şekilde toparlanma yeteneği" olarak, bahsi geçen tüm kavramları içine alacak biçimde tanımlamaktadır. Bu tanım, afetlerin dinamik bir süreç olduğunu vurgularken, afetlere karşı koyma kapasitesine ve toparlanma yeteneğine odaklanmaktadır. Ayrıca, tanımda belirtilen verimli ve zamanında toparlanma yeteneği, afet durumlarında ulaşımın ve koordinasyonun önemine işaret etmektedir (Kundak, 2017).

Günümüzde kentler, artan nüfusları, altyapı yetersizlikleri, çevresel faktörler, doğal afetler, sosyal ve ekonomik sorunlar, kentleşme ve planlama sorunları ve sağlık sorunları gibi nedenlerle risklerin en yüksek olduğu yerler olarak kabul edilmektedir. Bu risklerin etkili bir şekilde yönetilememesi, kentsel alanların sürdürülebilirliği ve güvenliği üzerinde ciddi endişelere yol açmaktadır. Dirençlilik kavramı, bugün riskleri yönetmek ve kentsel belirsizlikleri ortadan kaldırmak için sıkça başvurulan bir kavram olmanın yanı sıra, kentlerin sahip olması gereken bir özellik ya da ulaşılması hedeflenen bir ölçek olarak da görülmektedir (Gerçek, 2021). Dolayısıyla bu hedef doğrultusunda kentler, kentlileri desteklemeye ve sistemlerini korumaya yönelik baskı altında kalmaktadır. Bu anlamda günümüz ve geleceğin kentlerinin, günlük stresleri ve ani şokları yönetmede daha güçlü ve koordineli olması beklenmektedir (ARUP & Siemens, 2015). Kentlerin dışarıdan gelen risklere karşı mücadele gücünü ve kentsel sistemlerini korurken esneklik gösterebilme yeteneklerini içeren kentsel dirençlilik, krizleri aşmak ve kentlerin gelişme potansiyellerini açığa çıkarmak açısından büyük önem taşımaktadır. Kentsel dirençlilik, kentin hem fiziksel hem de toplumsal bileşenlerinin dikkate alınmasıyla ilişkilendirilmekte (Coaffee & Bosher, 2008) ve artan afet riskleri, iklim değişiklikleri, nüfus artışı, sağlıksız barınma koşulları ve mekânsal yer seçimi gibi unsurlar bağlamında, kentlerin sürdürülebilirliği açısından, doğal ve insan kaynaklı acil durumlar karşısında etkili bir tepki verme yeteneğini ifade etmektedir. Kentsel Dirençlilik ve Uyum Küresel Forumu'nda üretilen bir raporda (ICLEI, 2015) dirençli kent, "temel işlevlerini, yapılarını ve kimliğini korurken, aynı zamanda sürekli değişime uyum sağlayan ve gelişen; herhangi bir şok veya stresle başa çıkmaya ve bunlardan kurtulmaya hazır olan kent" olarak tanımlanmıştır. Bu açıdan dirençli kent, "fiziksel, çevresel, sosyal ve ekonomik açılardan kentlerin karşılaşabileceği her türlü tehlike, tehdit ve olumsuz durumlarla (doğal afetler, yüksek enflasyon gibi) kenti oluşturan çeşitli dinamiklerin, paydaşların koordineli ve kapsamlı bir şekilde mücadele etmesinin sağlanması" olarak tanımlanabilir (Çiriş, 2017). Başka bir ifadeyle kentsel dirençlilik, kentlerin sadece değişimlere yanıt verebilme yeteneği değil, aynı zamanda beklenmedik ve öngörülemeyen durumlara karşı esnek ve güçlü bir durumda bulunmasını ifade etmektedir (Alberti, 2013; Berkes, vd., 1998; Holling, 2001). Özetle, kentsel dirençlilik, ideal bir kentsel mekânın oluşumunu veya tasarlanmasını içermekle kalmamakta, aynı zamanda güvenli, yaşanabilir, açık, erişilebilir, sağlıklı ve insan ölçeğinde tasarlanmış kentsel alanlara olan ihtiyacı vurgulamaktadır (Abastante vd., 2020).

Dirençlilik ve kentsel dirençlilik, birçok bileşeni barındırdığı ve doğrudan ölçülemediği için analizler ancak dolaylı gözlemlerle gerçekleştirilmektedir (Carpenter vd., 2005). Bu nedenle, kentsel dirençlilik genellikle dirençliliği temsil eden veya ona yakın özellikler aracılığıyla ölçülebilir bir niteliğe kavuşmaktadır (Gerçek, 2021). Kentsel dirençliliğin ölçümünde 'sosyal', 'ekonomik', 'kurumsal', 'altyapısal', 'ekolojik' ve 'topluluk' unsurları öne çıkmaktadır (Bruneau vd., 2003; Cutter vd., 2008). Başka bir sınıflandırmaya göre kentsel dirençlilik, 'ekoloji ve sürdürülebilirlik', 'riskler ve afetler', 'ekonomi' ve 'iklim değişikliği' başlıkları altında değerlendirilmektedir (Galderisi, 2014). Bu başlıklar genellikle daha kapsayıcı kategorilere ayrılmakta; temel bileşenler olarak 'toplum', 'ekonomi' ve 'çevre' öne çıkmakta; bu başlıkların altında ise farklı boyutlar ele alınmaktadır (Soofi-Siavash, 2016). 2012'de ARUP tarafından geliştirilen "Kentsel Dirençlilik Endeksi" (City Resilience Index), kentsel dirençliliği ölçmeye yönelik yapılan ilk kapsamlı endeks çalışması olup, bu alanda genel bir çerçeve oluşturma çabası olarak değerlendirilmektedir (ARUP, 2012). Endeks, zaman içinde güncellenmiş ve bir kentin dirençli olabilmesi için dört boyut, on iki hedef, elli iki gösterge ve yedi nitelik tanımlanmıştır. Belirlenen boyutlar "sağlık ve refah", "ekonomi ve toplum", "altyapı ve çevre", "liderlik ve strateji" olarak sıralanmıştır (ARUP, 2014; ARUP, 2015). Bu çerçeve, kentlerin çeşitli zorluklarla başa çıkma kapasitesini anlamak ve onu geliştirmek adına önemli bir kapsam sunmaktadır. Kentsel dirençlilik, gelecekte ortaya çıkabilecek ekonomik, çevresel, sosyal ve kurumsal etkileri yöneterek kentlerin yapısını, işlevini, sistemlerini ve kimliğini koruma yeteneğini ifade etmektedir (Özer, 2018). Dolayısıyla, dirençlilik kavramı, kentlerin gelişme potansiyellerini sürdürülebilir şekilde korumayı hedefleyen vazgeçilmez bir stratejik araçtır.

3. Afete Dirençli Kent ve Mekânsal Planlama

Türkiye, uzun süredir plansız kentleşmenin yol açtığı sorunlarla mücadele etmekte ve bu bağlamda çeşitli politikalar geliştirmektedir. Kentsel planlama, dönemin ekonomik, siyasi, sosyal ve çevresel koşullarına göre zaman içinde değişiklik göstermiştir. Bu değişimlerin temelinde, kentlerin ve kent sakinlerinin ani değişikliklere, tehditlere ve tehlikelere karşı verdiği yanıtlar yer almaktadır (Çiriş, 2017). Ancak, kentsel planlama uygulamaları bu değişimlere etkili bir şekilde yanıt verememiştir. Dirençlilik kavramının planlama literatürüne dahil edilmesiyle, bu sorunların çözülebileceği umulmaktadır. Son yıllarda, kentlerin ekonomik yapılarındaki dönüşümle birlikte kentsel alanlar daha savunmasız hale gelmiştir. Ayrıca, kentsel sorunların yaygınlaşması ve sürekli hale gelmesi, sosyo-ekonomik ve mekânsal politikaların sürdürülemez olduğunu ortaya koymaktadır. Kontrolsüz piyasa odaklı üretim ve tüketim modelleri, kaynakların aşırı kullanımına ve çevresel bozulmalara yol açarak kentleri felaketlere daha yatkın hale getirmektedir (Eraydın & Taşan Kok, 2013). Bunlar kentlerin geleceğinin belirsizliğini artırmakta ve bu belirsizlikle başa çıkabilmek için planlama yapmanın önemini ortaya koymaktadır.

Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Jeoloji Mühendisleri Odası (TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2020) tarafından hazırlanan "Deprem Zararlarının Azaltılması Raporu" depremler, taşkınlar, heyelanlar ve çığlar gibi afetlerin Türkiye'yi bir 'afet ülkesi'ne dönüştürdüğüne dikkat çekmektedir. Bu afetlerin başlıca nedenleri arasında niteliksiz yapı stoku, yanlış yer seçimi, imar afları ve olumsuz sosyo-ekonomik koşullar, afet kültürünün ve farkındalığının gelişmemesi yer almaktadır. Deprem Danışma Kurulu, bu kırılganlıkları gidermek için içinden diri fay geçen kentlerden - Kahramanmaraş, Osmaniye ve Hatay- başlamak üzere çeşitli raporlar hazırlamış ve afet olasılıkları doğrultusunda Deprem Master Planı'nın hazırlanması; Deprem Master Planı dikkate alınarak kentin gelişim ve yerleşim stratejilerinin yeniden belirlenmesi gerekliliğini ifade etmiştir (TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2021). Ancak, tüm bilimsel öngörülere karşın 06 Şubat 2023 tarihinde Pazarcık ve Elbistan'da meydana gelen depremler, bölgede büyük can ve mal kayıplarına neden olmuş ve gerekli önlemlerin alınmaması neticesinde büyük bir afete dönüşmüştür. Bu durum, afetlerin tamamen önlenemese de etkilerinin alınabilecek önlemlerle azaltılabileceği gerçeğini göstermektedir. Dolayısıyla afetlere hazırlık, çok yönlü, disiplinler arası bir yaklaşım ve iyi koordinasyon gerektiren uzun vadeli bir süreçtir (Çılgın vd., 2023). Bu sürecin temelinde ise afete dirençli kentlerin planlanması yer almaktadır. Kentlerin afetlere karşı savunmasızlığı ve yaşanan kayıplarla dikkat çekmeye başlayan dirençlilik kavramı, hızla iyileşebilen, sürdürülebilir kentlerin oluşumunda önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu çerçevede, altyapı sistemleri, toplumsal ve fiziksel yapıya ilişkin unsurlar ile çevresel faktörler mekânsal planlamaya dahil edilerek dirençliliğe uygun şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır.

Dirençliliğin bütüncül yapısı, bir kentin gerçek anlamda dirençli olabilmesi için enerji tedarikinden ulaşıma, su dağıtımından atık bertarafına kadar alt yapı sistemlerini kapsamakta ve bu sistemlerin yanı sıra onları çevreleyen sosyal ve ekonomik ağları da içine almaktadır. Bu nedenle kentlerde bir alt sistemin güçlü ve zayıf yönleri diğer alt sistemlere etki edebilmektedir. Dolayısıyla dirençlilik, kentin her yönünde planlama, tasarım, yönetim ve işletmenin temel hedefi olarak düşünülmelidir (ARUP & Siemens, 2015). Afete dirençli kentlerin planlama sürecine entegrasyonu ve bu kentlerin direncini artırmak için gerekli temel unsurlar, günümüzde hızla değişen ve büyüyen kentsel sorunların karmaşıklığı ve aciliyeti dikkate alındığında büyük önem taşımaktadır. Mevcut kentsel planlama süreçlerindeki belirsizlikler ve karmaşalar, kentlerin karşılaştığı sorunların etkin bir şekilde çözülmesini engelleyerek, kentsel altyapının yetersiz kalmasına, çevresel tahribatın artmasına, afet risklerinin yükselmesine ve kentlerin sürdürülebilirliğinin tehlikeye girmesine neden olmaktadır.

Dirençliliğin kentsel planlama ile ilişkilendirilmesinde kesin bir yöntem olmamakla birlikte, dirençliliğin "beklenmedik değişimlere hazır bir sistem" olarak kentlerin karşılaştığı sorunların çözümünde sunduğu potansiyel, bu iki alanın kesişim noktasını oluşturmaktadır (Yaman Galantini, 2020). Yaman Galantini (2018) tarafından geliştirilen "Beş Bileşen Süreci", dirençlilik ile planlama arasındaki ilişkiyi açıklamak için önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bu süreç şeması, kentsel dirençlilikten beklentileri ve dirençli bir kentin sahip olması gereken özellikleri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Buna göre öncelikle "ne için dirençlilik" sorusu sorulmalı, en önemli kırılganlıkların ve sorunların belirlenmesi ve acilen ele alınması gerekenlerin tespit edilmesi gerekmektedir. Daha sonra, "nerede dirençlilik" sorusuyla dirençliliğin hangi ölçekte sağlanacağı ve hangi bölgelerde uygulanacağı belirlenmelidir. Son olarak ise "nasıl dirençlilik" sorusuyla kentsel dirençlilik planlamasının ana bileşenleri ve uygulanması gereken stratejilerin belirlenmesi aşamasına geçilmesi gerekmektedir. Bu süreç, paydaşların, ölçeklerin, karşılıklı bağımlılıkların, dayanıklılık özelliklerinin (göstergeler), planlama araçlarının ve politikaların dikkate alınması gerektirmekte ve kentlerin zamanla değişen zayıflıklarına uygun yanıt seçeneklerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Yaman Galantini, 2018). Bu bağlamda bu çalışmada "ne" sorusu afetlerle sınırlı tutulmuş, "nerede" sorusu her kentin ve afetin kendine özgü taşıdığı nitelikler ve dinamikler dikkate alınarak belirlenmiş ve son olarak "nasıl" sorusu ise kentsel dirençlilik planlamasının afetler bağlamında taşıması gereken özellikler ulaşım planlaması çerçevesinden değerlendirilmiştir.

Genel olarak "mekânın gelecekteki kullanımının yönetilmesi" (ISMEP, 2014) şeklinde tanımlanan kentsel planlama, aslında kentsel dirençliliğe işaret etmektedir. Bu tanım, kentsel risklerin her zaman var olduğunu ve bu risklerle başa çıkabilmek için önceden önlemler alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Afetler çerçevesinde değerlendirildiğinde bu önlemlerin afetler gerçekleşmeden önce alınması gerektiği ve böylece afetlere maruz kalma riskinin azaltılabileceği düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle, kentsel risklerin azaltımını hedefleyen politikaların afet yönetiminin temel prensibi olarak görülmesi, mekânsal planlama ve kentleşme ile ilgili kararların biçimlenmesinde bağlayıcı olabilmektedir (Orhan,

2022). Bu bağlamda, afete dirençli kent planlaması, doğal ve insan kaynaklı afetlere dayanabilen, bunlara karşı direnebilen ve afet sonrasında toparlanabilen kentlerin tasarımı ve yönetimine odaklanmaktadır. Afete dirençli kent planlaması sosyal, ekonomik ve çevresel faktörleri dikkate alan, yerel toplulukları, merkezi hükümeti ve özel sektörü içeren bütüncül bir yaklaşımı savunmaktadır. Bu yaklaşımın temel hareket noktası, afetlerin mekânsal planlama üzerindeki etkileridir. Bu nedenle, afetlerin neden olduğu zararlar, mekânsal planlamada alınacak önlemlerin önemini belirlemektedir.

Türkiye gibi sıkça afetlerle karşılaşan bir ülkede, kayıpların en aza indirilebilmesi için kentlerin afet risklerine karşı hazırlıklı olması beklenmektedir. Bu amaçla, zemin özelliklerine uygun güvenli binaların inşa edilmesi, afetlerle ilgili yasal ve kurumsal düzenlemelerin yapılması ve konut alanlarının riskli bölgelere yapılandırılmaması gerekmektedir. Ayrıca, konutların kat yüksekliklerinin zemin yapısına ve bölgeye uygun olarak seçilmesi, plan ve projelere sadık kalınarak tasarlanması da konuyla ilgili alınabilecek en temel tedbirlerdendir (Boso Hanyalı, 2023). Kentsel risk değerlendirme çalışmalarını içeren bir mekânsal planlama yaklaşımı, gelecekte oluşabilecek afetlerin sosyal ve ekonomik etkilerini azaltmak için risklerin önceden tanımlanması ve zarar görebilirlik düzeyinin belirlenmesine odaklanmaktadır. Bu strateji, potansiyel tehlikelerin ve risklerin sistematik bir şekilde değerlendirilmesini sağlamakta, böylece kentsel altyapının, yapı stoğunun ve nüfusun afetlerle karşılaşma olasılığı ve bunlara maruz kalma riski minimize edilmektedir (ISMEP, 2014). Kentsel planlamanın, kentlerin kırılganlıklarının ve afet risklerinin azaltılmasında düzenleyici bir rol oynadığı bilinmekle birlikte, bunun tek başına kentleri dirençli hale getirmeye yetmeyeceği unutulmamalıdır. Planların etkin bir şekilde hayata geçirilmesi için ilgili mevzuatın, afet risk yönetimini benimseyen bir bakış açısıyla hazırlanması ve dirençliliği teşvik eden paradigmalar doğrultusunda şekillendirilmesi beklenmektedir (Orhan, 2022). Ayrıca, yerel halkın bilinçlendirilmesi ve afet eğitim programlarının yaygınlaştırılması, toplumsal direnci güçlendirerek kentsel dirençliliğin artırılmasında önem taşımaktadır. Toplumun tüm kesimlerinin afetlere karşı bilinçli ve hazırlıklı olması, afet anında ve sonrasında toparlanma sürecini hızlandıracaktır. Bu anlamda, kentsel planlama ve afet yönetimi, kentlerin sürdürülebilir ve yaşanabilir olmasını sağlamak için birbirini tamamlayan disiplinler olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla kentsel dirençliliğin artırılması, yalnızca teknik ve yapısal önlemlerle sınırlı kalmamalı; aynı zamanda toplumsal farkındalığın artırılması ve yasal düzenlemelerin güçlendirilmesiyle desteklenmelidir.

Afete dirençli kentlerin planlaması sürecinde ülkelerin, kentlerin ve afetlerin özellikleri yapılacak planlamayı doğrudan etkilemektedir. Ülkelerin ulusal ve politik ekonomik yapıları, ekonomik gelişmişlik düzeyleri, gelir dağılımı, demografik yapı, toplumsal özellikler, sosyal ve kültürel politikalar, yasal haklar ve çevre koruma düzeyi, sahip olunan kaynak miktarı, kentlerin büyüklükleri, teknolojik düzeyleri ve dışa bağımlılıkları gibi faktörler, kentsel sistemde görülen kırılganlıkları etkilemektedir. Dolayısıyla bu faktörlerin kentsel dirençlilik planlaması sürecinde dikkate alınması, uygun stratejilerin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda Hyogo Çerçeve Programı (2005-2015) gibi uluslararası belgeler de afet risklerinin azaltılması için önemli bir çerçeve sunmaktadır. Programda kabul edilen beş öncelikli eylem stratejisi aşağıdaki gibidir (UNISDR, 2005):

1. Hükümetlerin afet risklerini azaltmayı öncelikli bir eylem planı olarak kabul etmesi,
2. Risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve izlenmesi ile erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi,
3. Direnç kültürünün oluşturulması ve farkındalığın artırılması için mümkün olan her türlü bilginin kullanılması,
4. Temel risk faktörlerinin azaltılması,
5. Etkin bir müdahale için hazırlıklı olunması.

Bu ilkeler, afetlere karşı dirençli kentlerin oluşturulması için genel bir çerçeve sunmaktadır. Hükümetlerin afet risklerini azaltmayı öncelikli bir eylem planı haline getirmesi, bu konuda ulusal ve yerel düzeyde kararlılık göstermesini gerektirmektedir. Risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve izlenmesi, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi gibi adımlar ise proaktif bir yaklaşımı temsil etmektedir. Ayrıca mümkün olan her türlü bilgiyi kullanarak direnç kültürünün oluşturulması ve farkındalığın artırılmasına yönelik strateji yalnız kentsel dirençliliğe değil toplumsal olarak dirençliliğin artırılmasına vurgu yapmaktadır. Uygun ve etkin risk yönetimi teknikleri ile risklerin azaltılması ve etkin bir müdahale için hazırlıklı olunması ise afet sonrası hızlı ve etkili bir toparlanma sürecini desteklemeye yönelik bir strateji olarak kabul edilmektedir.

BM Afetlerin Azaltılması Sekretaryası (United Nations International Strategy for Disaster Reduction-UNISDR) ise 2010 yılında "Dirençli Şehirler Yaratma: Şehrim Hazırlanıyor" (Making Cities Resilient: My City is Getting Ready) kampanyası başlatarak, bir kentin dirençli olması için 10 temel unsur belirlemiştir (UNISDR, 2010):

- Vatandaşlar ve sivil toplum örgütlerinin katılımıyla afet risklerini anlamak ve azaltmak için organizasyonlar düzenlenmeli ve işbirliği sağlanmalıdır.
- Afet risklerinin azaltılması için bütçe ayrılmalı ve ev sahipleri, düşük gelirli aileler, topluluklar, iş yerleri ve kamu sektörü, riskleri azaltmak için teşvik edilmelidir.
- Tehlikeler ve afetlere karşı hassas olan noktalara yönelik güncel veriler toplanmalı, risk değerlendirmesi yapılmalı ve bu değerlendirmeler şehir kalkınma planları ve kararları için temel olmalıdır.
- Sel gibi riskleri azaltan kritik altyapıya yatırım yapılmalı ve iklim değişikliğiyle uyumlu hale getirilmelidir.
- Tüm okulların ve sağlık tesislerinin güvenliği değerlendirilmeli ve gerektiğinde güçlendirilmelidir.
- Gerçekçi ve riskle uyumlu inşaat yönetmelikleri ve arazi kullanım ilkeleri uygulanmalı, düşük gelirli gruplar için güvenli araziler belirlenmeli ve kaçak yapılaşmalar düzeltilmelidir.
- Öğrencilere ve yerel halka afet risklerinin azaltılmasına yönelik eğitim ve öğretim hizmetleri verilmelidir.

- Şehrin hassas olabileceği sel, fırtına dalgası ve diğer tehlikelerin hafifletilmesi için ekosistemler ve doğal tamponlar korunmalı, iyi risk azaltma uygulamaları geliştirilerek iklim değişikliğine uyum sağlanmalıdır.
- Şehre erken uyarı sistemleri kurulmalı ve acil durum yönetim kapasiteleri geliştirilmeli ve düzenli şekilde kamu hazırlık tatbikatları yapılmalıdır.
- Afet sonrası hayatta kalan vatandaşların ihtiyaçları, yeniden yapılanma faaliyetlerinin merkezine yerleştirilmeli ve evler ile geçim kaynakları yeniden inşa edilmelidir.

Hyogo Çerçeve Programı ve UNISDR'in başlatmış olduğu kampanya, kentsel dirençliliği sadece teknik ve yapısal önlemlerle değil, aynı zamanda toplumsal farkındalık ve eğitim çalışmalarına da vurgu yaparak ele almaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, kentsel dirençliliği artırmanın yalnızca fiziksel altyapının iyileştirilmesiyle değil, aynı zamanda toplumun her kesiminin bilinçlendirilmesi ve hazırlanması ile mümkün olduğunu göstermektedir. Buna yönelik olarak eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarının, afetlere karşı bireysel ve toplumsal direnci güçlendireceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin ve sivil toplum kuruluşlarının iş birliği içinde çalışması, kentsel dirençliliği artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla kentsel dirençliliği teşvik eden politikaların benimsenmesinin, gelecekteki afetlere karşı daha dayanıklı ve hazırlıklı kentlerin oluşturulmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Hyogo Çerçeve Eylem Planı'nın 2015 yılında tamamlanmasıyla birlikte, aynı yıl Sendai Bildirgesi (2015-2030) yayınlanmıştır. Bu bildirge, afet risklerinin azaltılmasında Hyogo Çerçeve Eylem Planı'na göre daha kapsamlı ve entegre bir yaklaşım benimsemektedir. Sendai Bildirgesi, 187 BM üyesi ülke tarafından imzalanarak afet risklerinin azaltılması için birtakım eylemler belirlemiştir. Bildirgeye göre, ülkelerin ulusal ve yerel düzeyde kanunlar, yönetmelikler ve kamu politikalarının oluşturulmasıyla birlikte kamu ve özel sektörün afet riski azaltma eylemlerini yönlendirecek ve teşvik edecek rolleri ve sorumlulukları tanımlaması beklenmektedir. Bu çerçevede, afet risklerinin azaltılması için etkin stratejilerin belirlenmesi ve uygulanması amacıyla kamu ve özel sektörün iş birliği yapması önerilmiş ve afet risklerini azaltma konusunda kararlılıkla hareket etmeyi ve toplumsal dayanışmayı artırmayı amaçladığı vurgulanmıştır (UNISDR, 2015). Bu durum, afet risklerini azaltma çabalarının toplumun tüm kesimlerini kapsayacak şekilde genişletilmesi anlamına gelmektedir. Bu gelişmeler, afet risklerinin azaltılması ve bu risklere dayanıklı kentlerin planlanmasıyla ilgili olarak ülkelerin ulusal ve yerel düzeyde eyleme geçmesini teşvik etmektedir. Türkiye'nin 2011 yılında Türkiye Afet Risklerinin Azaltılması Ulusal Platformu'nu oluşturması, ülkenin bu çerçevede atılacak adımları destekleyen ve koordine eden bir mekanizma geliştirdiğini göstermektedir. Bu platform, kamu ve özel sektör arasında iş birliğini teşvik ederek etkin stratejilerin belirlenmesi ve uygulanması için bir zemin sağlamaktadır. Ancak, Türkiye'nin mekânsal planlama pratiğinde afetlerle ilgili eylem planları ya da stratejik belgeler genellikle birbirinden bağımsız olarak ve planlama sürecinden kopuk bir şekilde oluşturulmaktadır (Peker & Orhan, 2021). Bu durum afet risklerinin azaltılması ve kentsel dirençliliğin artırılması hedeflerinden uzaklaşmaya neden olmaktadır. Bu belgelerin mekânsal planlama sürecine entegre edilememesi, afetlerin mekânsal planlama kararları üzerindeki doğrudan etkisini sınırlandırmakta ve stratejik hedeflerin etkin bir şekilde uygulanmasını engellemektedir.

Kentlerde yapılaşma ve kentsel gelişmeyi düzenleyen mekanizmalar, afet zararlarının en aza indirilmesi için afet yönetim süreçleriyle kent planlama süreçlerinin koordineli bir şekilde yürütülmesini gerektirmektedir. Afet risklerinin kabul edilebilir seviyelerde tutulması ve olası hasarların önceden tahmin edilebilmesi için fiziki planlar, afet önceliklerini dikkate almak ve yer seçimini bu doğrultuda hayata geçirmek durumundadır. Ayrıca planlama sürecinde, dinamik ve esnek bir yaklaşım benimsenerek risk azaltıcı önlemlerin planlamaya dahil edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda önemli noktalardan bir diğeri de afet zararlarını azaltmaya yönelik kent planlamasının, toplumsal ve ekonomik sürdürülebilirlik için hayati olan yerleşim öğelerini dikkate almasıdır (ISMEP, 2014). Dolayısıyla ulaşım konusu, kentsel altyapıyı oluşturan önemli bir unsur olmakla birlikte afetlerle mücadelede kritik bir rol üstlenmektedir. Ulaşım altyapısının sağlam ve dayanıklı olması, afet anında ve sonrasında hızlı ve etkin müdahale edebilme kapasitesini artıracaktır. Bu nedenle dirençli kentlerin planlanması sürecinde ulaşım planlamasının stratejik bir öneme sahip olduğunu belirtmek gerekmektedir. Nitekim ulaşım ağlarının afetlere karşı dirençli hale getirilmesi, afetlerin etkilerini azaltmak ve toplumun afetlere karşı daha iyi hazırlanmasını sağlamak için önemli bir adım olarak görülmektedir.

4. Kentsel Direncin Oluşturulmasında Ulaşım Planlaması

Afetler, günlük yaşamı ciddi biçimde etkileyen ve can kayıplarına yol açarak, doğal ve teknolojik risklerin yanı sıra kentlerdeki dirençsizlikle birleştiğinde yıkıcı sonuçlar doğuran olaylardır (Varol & Buluş Kırıkkaya, 2017). Bu nedenle afete dirençli kentlerin oluşturulması sürecinde kentsel arazi kullanımı, altyapı/ulaşım, yapı ve toplumsal faktörlerin risklerle birlikte ele alınarak mekânsal planlamaya dahil edilmesi gerekmektedir (ISMEP, 2014). Kentsel dirençliliğin inşa edilmesi, tüm bu unsurların ve sistemlerin birbirine bağlı olduğu kavramsal bir anlayış gerektirmektedir. Dolayısıyla kentlerin, mümkün olduğunca istenmeyen sonuçları azaltmak için tüm bu farklı unsurları hesaba katarak çözümler yaratması beklenmektedir (Resilient Cities Network, 2020). Son dönemlerde yaşanan afetler, afet yönetiminin sadece yara sarma politikalarına değil, aynı zamanda yaraların oluşmasını engelleyici önlemlere de odaklanması gerektiğini göstermiştir. Bu kabulleniş, afet öncesi süreçlerde ulaşım planlamasının önemini vurgulamaktadır. Ulaşım planlamasının yapılaşmadan önce tasarlanması ve bu doğrultuda yapılaşmanın gerçekleşmesi, kentsel formun uzun süre değiştirilemeyeceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla afetler ortaya çıktığında ulaşım ağlarının ve altyapısının bu ihtiyaçlara uygun şekilde revize edilmesi oldukça önemlidir. Nitekim afetler, mekânsal planlamayı, ulaşım ağlarını ve

altyapıyı ciddi biçimde etkileyebilmekte ve kentsel ulaşım sistemlerinde ciddi sorunlar yaratabilmektedir. Bu da mobiliteyi kısıtlayarak seyahat sürelerini artırmakta ve ekonomik ve sosyal faaliyetler üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Dirençli kentlerin planlanması sürecinde yer alan veya olması beklenen ulaşım planlaması, özellikle afet öncesi süreçte kentsel sistemlerin direncini artırmak, iyileştirmek ve afetlerin etkilerini en aza indirerek toplumun afetlere karşı hazırlıklı olmasını sağlamak adına önemli bir role sahiptir. Örneğin, acil tahliye yollarının planlanması ve ulaşım altyapısının güçlendirilmesi gibi önlemler, afet öncesi süreçte ulaşım planlamasının önemini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, afet sonrası için de ulaşım planlamasının önemi tartışılmazdır. Çünkü afet sonrası yaşanan ulaşım sorunlarının çözümü ve ortaya çıkan ulaşım taleplerinin yönetimi konusunda bir rehbere ihtiyaç vardır. Bu da afetlerin mekânsal planlama ve ulaşım sistemlerine etkilerinin araştırılmasını gerektirmektedir.

Afet yönetimi azaltım, hazırlık, müdahale ve yeniden inşa aşamalarını içeren döngüsel bir süreçten oluşmaktadır. Bu süreç afetin öncesi, sırası ve sonrasını kapsamakta; her aşamada yapılan işler birbiriyle iç içe ve ilişkili olarak yürütülmektedir. Ayrıca her aşama, bir sonraki aşamanın hazırlayıcısı konumundadır (Genç, 2021). İlk aşama olan azaltım ve hazırlık faaliyetleri, farkındalık kampanyaları düzenlemek ve zayıf hazırlık yapılarını güçlendirerek muhtemel bir afet ve acil durum öncesinde can ve mal kayıplarını azaltmayı amaçlamaktadır. İkinci aşama, afet ve acil durum sırasındaki faaliyetleri içermektedir. Bu aşama afetten en fazla etkilenenlerin ihtiyaçlarını ve sorunlarını azaltmaya yönelik acil müdahale faaliyetlerinden oluşmaktadır. Son aşama ise afet sonrası süreçleri kapsamaktadır. Bu süreç, erken kurtarma ve rehabilitasyon çalışmalarıyla müdahale ve iyileştirme eylemlerini içermektedir. Ulaşım, bu süreçlerin her aşamasında büyük bir rol oynamaktadır. Ulaşım sisteminin çökmesi felaketlere yol açabilirken, doğal afetler de ulaşım sistemlerinin çökmesine neden olabilmektedir (Güney vd., 2014). Bu durum, ulaşımın afetlerle doğrudan ilişkisini ve planlama sürecinde bu ikisinin birbirinden ayrı düşünülemeyeceğini göstermektedir. Dolayısıyla, dirençli kentlerin sadece bina yapıları değil, aynı zamanda dirençli ulaşım sistemlerine de ihtiyaç duyduğu kabul edilmelidir.

Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle pek çok doğal afete maruz kalmaktadır. Özellikle yüksek deprem riski, kentsel alanlarda yaşayan nüfus üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu doğal afetler sadece insanlara ve mülklere değil, aynı zamanda ulaşım ağlarına da büyük zararlar vermektedir. Ana arterlerde ve kritik ulaşım noktalarında meydana gelen hasarlar, kurtarma ve yardım faaliyetlerinin zamanında ve etkin bir şekilde yürütülmesini engelleyebilmektedir. Bu durum, afet öncesi planlama ve afet sonrası müdahale süreçlerinin ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Nitekim, bu yıkımların en yakın örneği 6 Şubat Pazarcık ve Elbistan merkezli depremler ile 20 Şubat Hatay Yayladağı merkezli depremlerde yaşanmıştır. Bu depremler, 11 ilde büyük yıkımlara yol açmış; 48 binden fazla insanın hayatını kaybetmesine, yarım milyondan fazla binanın hasar görmesine, iletişim ve enerji alt yapısının zarar görmesine neden olmuş ve büyük maddi kayıplar yaratmıştır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023). Ayrıca ulaşım kaynaklı sorunlar, arama kurtarma ve acil yardım ile müdahaleleri aksatmış ve bu yıkımın şiddetini derinleştirmiştir. Büyük bir alanı etkileyen bu depremler sonucunda kara yolu ve demir yolu gibi ulaşım sistemleri de hasar görmüş; deprem sonrası zemin sıvılaşmasıyla yol kaplamasının bazı yerlerde blok halinde zemine battığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kaya düşmeleri ve şev kaymalarından kaynaklanan yapısal hasarların da bulunduğu, önlem alınmadığı takdirde sıvılaşan zemine oturan bina ve yapıların taşıma gücünün kaybolduğu ifade edilmiştir (https://www.dha.com.tr/). Dönemin Karayolları Genel Müdürü Abdulkadir Uraloğlu, deprem bölgesindeki yol ağlarının 9.176 km olduğunu ve bunun 184 km'sinin; 66 km tünelin 17,3 km'sinin etkilendiğini belirtmiş ve ulaşım aksamalarının günlerce çözülemediğini, 6 Şubat'ta kapanan yolların ancak 4 gün sonra açılabildiğini ifade etmiştir (https://www.birgun.net/). Bu 4 günlük gecikme, afet sonrası sürecin seyrini değiştirmiş ve bu felaket, ulaşımın kentsel sistemin devamlılığındaki kritik önemini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu depremleri böylesi büyük bir afete dönüştüren en temel sorun, afet öncesi hazırlık süreçlerinin bütüncül yapılmaması ve bu süreçlere ulaşımın dahil edilmeyerek konuyla ilgili bir planın oluşturulmamasıdır. Afet sırası ve sonrasında, afet bölgesinin diğer bölgelerle erişimini sağlayan kritik yapılar ve bağlantıların kesintiye uğramaması için ulaşıma yönelik planlamanın da bütüncül bir şekilde tasarlanması ve kapsamlı bir afet planının yapılması gerekmektedir. Planlamanın ülkenin genel hedefleri, bölgesel ve yerel düzeylerle bağlantılı olma özelliği, onun dönemin koşullarına uyumlu olmasını ve dönüştürülebilir olmasını gerektirmektedir. Bu nitelikler, aynı zamanda dirençli kentlerin planlamasının temel felsefesiyle örtüşmektedir. Dolayısıyla mekânsal planlamanın arazi kullanımını mevcut risklere göre belirlemesi, ekonomik büyüme politikalarını uygulaması ve sosyo-kültürel gelişimi desteklemesi gerekmektedir. Ayrıca yerel düzeyde, özellikle doğal tehlikelere yatkın bölgelerde ve dayanıklılık gerektiren alanlarda mahallelerin mekânsal zayıflıkları ayrıntılı planlarla ele alınmalıdır (Yaman Galantini, 2020). Bu bağlamda, dirençli ulaşımın geliştirilmesi, hem genel entegrasyon ve sürdürülebilir politikaların uygulanması hem de yerel düzeyde kaçış yolları ve toplanma noktaları gibi detayların planlanmasıyla mümkündür. Dolayısıyla, afet sırasında ve sonrasında erişimin güvenli ve sorunsuz sağlanması, mevcut ulaşım ağlarının ve toplanma alanına hizmet eden yoların güvenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki güvenlik, yol genişliği ve bina yüksekliği arasındaki oran üzerinden değerlendirilmektedir. Bina yüksekliğinin yol genişliğine oranının 1'in altında olması yolun güvenli; 1'in üzerinde olması ise yolun güvensiz olduğu anlamına gelmektedir. Bu oranın artması, afet durumunda yığılma ve erişim sorunlarının yaşanma olasılığını artırmaktadır. Örneğin bu formülasyon kullanılarak İzmir ilinden seçilen örnek alanlarda, kent içi yolların toplanma alanlarına erişilebilirliği incelenmiştir. Buna göre, Karşıyaka ilçesinde bir toplanma alanının ana yol kademesindeki yol genişliği 27 metre, bina yüksekliği ise 21 metredir. Dolayısıyla oran, 1'den küçük (0,77) olduğu için afet anında ve sonrasında mevcut yol işlevini büyük oranda yerine getirecek ve trafiğe kapanmayacağından erişimde sorun yaşanmayacaktır. Aynı çalışmada, aynı ilçede yer alan iki toplanma alanı daha değerlendirilmiş ve birinde oran 1'e eşit, diğerinde ise 1'den büyük (2,10) olarak

tespit edilmiştir. Oranın 1'e eşit olduğu durumda, toplanma alanına erişimde kısmen sorun yaşanabileceği ve yolun trafiğe kısmen kapanabileceği; oranın 1'den büyük olduğu durumda ise erişimin güvensiz ve oldukça riskli olabileceği belirtilmiştir (Erdin, vd., 2021). Ardıçoğlu (2024) da kentsel dirençliliğin bir ölçütü olarak bina yüksekliği ile yol genişliği arasındaki ilişkiyi ele almış ve bu doğrultuda Elazığ ilinde yaptığı analizleri mevcut durum ve 2023 İmar Planı kararları çerçevesinde değerlendirmiştir. Bu çalışmada, yol genişliği 7 metre olan akslarda, mevcut durumda bina yüksekliği yönetmelikte belirtilen değerin iki katı iken, 2023 İmar Planı'na göre bu oranın dört katına çıktığı belirlenmiştir. 10 metre genişliğindeki yol akslarında, mevcut yönetmelikte bina yüksekliği 1,5 kat fazla iken, imar planına göre bu fark üç kata çıkmaktadır. Yol genişliği 12 ve 15 metre olan akslarda, mevcut yapı dokusu kısmen yönetmeliklere uygun olmakla birlikte, yeni plan kararlarında bina yüksekliklerinin yönetmelikteki değerlerin 1.5 ila 2 katı olması öngörülmektedir. Yol genişliğinin 20 metre olduğu ana yollarda ise mevcut yapı dokusu yönetmeliklere uygun olmasına karşın, yeni plan kararlarına göre bina yüksekliklerinin yönetmelikteki değerin %25 üzerine çıkacağı ifade edilmektedir. Bulgular, afet durumlarında güvenli erişim sağlanması açısından yol genişliği ile bina yüksekliği arasındaki dengenin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, afet öncesi hazırlık aşamasında plan ve yönetmeliklerin bu dengeyi gözetmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle, yakın geçmişte önemli depremler yaşayan Elazığ'da yapılan çalışma, yalnızca iki mahalleyi kapsamasına rağmen plan, yönetmelik ve uygulama arasındaki uyumsuzlukların, riskli yapıların tehlikesini artırdığını ve kentin afetlere karşı savunmasızlığını derinleştirdiğini ortaya koymaktadır.

Ulaşım sistemleri, kentlerin en karmaşık ve kritik unsurları arasında yer almakta olup, yalnızca günlük işleyiş için değil, aynı zamanda uzun vadeli büyüme ve refah için de hayati bir öneme sahiptir (ARUP & Siemens, 2015). Ancak normal koşullara göre tasarlanan ulaşım sistemleri, ani değişiklikler, olumsuz hava koşulları ve afetler gibi tehlikeler karşısında sınırlı bir direnç gösterebilmektedir (Ahmed vd., 2019). Kentsel dirençliliği doğrudan etkileyen ulaşım, insanların ve malların farklı taşıma araçlarıyla bir noktadan diğerine taşınmasını sağlamakla birlikte, ekonomik faaliyetlerin işleyişine ve toplumsal gelişime de önemli katkılar sunmaktadır. Dolayısıyla ulaşım, tüm yaşamsal ihtiyaçların karşılanmasında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Ulaşım, kentsel alan kullanımının önemli bir bölümünü oluşturmakta ve bu yönüyle kent formu ile kentsel yayılımı şekillendirmektedir (Tuğaç, 2022). Dünya nüfusunun kentlerde yoğunlaşması ve buna bağlı olarak kentsel hareketliliğin artması, ulaşım planlamasının giderek daha fazla önem kazanmasına yol açmıştır. Ancak trafik sıkışıklığı, uygun yer seçiminin yapılmaması, doğru planlama eksikliği, toplu taşıma ya da alternatif ulaşım sistemlerinin yeterince benimsenmemesi gibi sorunlar, gündelik yaşamda aksaklıklar yaratsa da, çoğu zaman tolere edilebilmektedir. Bununla birlikte, afet gibi olağanüstü durumlarda bu sorunların tolere edilebilme düzeyi önemli ölçüde düşmekte ve yaşanan aksaklıklar ciddi zararlara yol açabilmektedir.

Yetersiz planlanmış bir ulaşım sistemi, beklenmedik afetler karşısında zayıflık göstererek tüm kentsel sistemin işleyişini durma noktasına getirebilmektedir. Bu nedenle ulaşım politikaları ve planlaması, beklenmedik afet senaryolarını göz önünde bulunduracak şekilde oluşturulmalı ve bu senaryolar yalnızca planlama aşamasında kalmayıp, pratikte de uygulanmalıdır. Örneğin, İstanbul gibi geçmişte büyük depremler yaşamış ve gelecekte büyük bir deprem olasılığı yüksek olan bir kentte, afetle ilgili plan, proje ve uygulamaların detaylıca ele alınması ve hayata geçirilmesi beklenmektedir. Nitekim -gecikmeli de olsa- 1999 depremlerinden sonra afet yönetimine ilişkin birçok adım atılmış, yönetim anlayışı değişmeye başlamış ve kurumsal yapılar güçlendirilmiştir. Toplanma alanları, tahliye yolları ve acil ulaşım yolları belirlenmiş; deprem master planlarıyla bu adımlar detaylandırılmıştır. Bu adımlar kağıt üzerinde başarılı olsa da uygulamalarda aynı başarı yakalanamamıştır. Örneğin, 2000 yılı itibariyle olası afet durumları için acil ulaşım yolları tespit edilmiş ve bu yollarda 1. derece acil ulaşım yolu levhaları ile parklanma yasağı getirilmiştir. Ancak 622.000 km uzunluğundaki acil ulaşım yollarının yaklaşık %12'sinin İSPARK tarafından kullanıldığı tespit edilmiştir (Buldurur & Kurucu, 2015).

Genel itibariyle, bir ulaşım sisteminin ortaya çıkan sorunlara direnç gösterme ve iyileşme yeteneği olarak tanımlanan dirençli ulaşım, kent planlamasında yaşanan paradigma değişimiyle birlikte önem kazanan bir kavramdır. Buna göre geleneksel planlama anlayışından uzaklaşılarak fiziksel öğeleri merkeze alan yaklaşımdan daha esnek, entegre ve risk odaklı planlama anlayışı, ulaşım planlamasına da yansımıştır. Dirençli ulaşım, olası her türlü olumsuz duruma karşı kentlerin savunma mekanizmasını oluşturulabilmesi ve esneklik gösterebilmesi amacıyla ulaşım planlaması çerçevesinde kapsamlı mekânsal, fiziksel, ekonomik ve sosyal çalışmaları kapsamaktadır (Çiriş, 2017). Daniels ve MacArthur (2022)'a göre, dirençli bir ulaşım sistemi, beklenmedik koşullara hızlı yanıt verebilme, değişen koşullara uyum sağlayabilme ve olağan sisteme dönebilme yeteneğine sahip olmalıdır. Bu sistemin güvenli, adil ve kapsayıcı erişilebilirlik sağlaması, dirençli ulaşımın temel performans hedefleri olarak kabul edilmektedir. Bu hedefler ise insanların ve malların bir yolculuğu planlayabilme ve hedeflerine güvenli, uygun maliyetli ve ihtiyaca uygun bir şekilde en uygun ulaşım modunu kullanarak ulaşabilmesini sağlamaktır. Ayrıca ulaşım altyapısının sürdürülebilir, entegre, esnek ve güçlü olması da dirençli ulaşım planlamasından beklenen temel niteliklerdendir (Resilient Cities Network, 2020). Bilhassa güvenli olma durumu çoğu planda normal zamanlarda ya da hava koşullarının iyi olduğu zamanlarda güvenli seyahat süreleri ve erişilebilirliği kapsamaktadır. Dolayısıyla planlar genellikle afetlerden sonra ulaşım sisteminin güvenilirliği olarak anlaşılmamaktadır. Oysa dirençli ulaşım sistemlerine sahip olabilmek için güvenlik, felaketler sırasında ve sonrasında da güvenliği içerecek şeklide genişletilmelidir. Ayrıca güvenli olma durumu sadece altyapıya değil aynı zamanda acil durum müdahale ve iyileştirme faaliyetlerine de uygulanmalıdır (Daniels & MacArthur, 2022). Sonuç olarak dirençli ulaşım sistemleri, veri akışlarını etkin bir şekilde kullanarak sistemin verimliliğini artırmakta ve afet risklerini yönetmeye yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (ARUP & Siemens, 2015). Ancak afetlere bağlı olarak ortaya çıkabilecek

etkilerin ulaşım ağlarındaki kritik noktaları (havaalanları, limanlar, otoyollar veya iç limanlar) nasıl ve ne ölçüde etkileyeceği tam olarak önceden tahmin edilememektedir. Bu nedenle, her ülkenin veya bölgenin afet risklerini belirleyerek ulaşım altyapısındaki hassas noktaları tespit etmesi, etkilenebilirlik analizleri yapması ve bu risklere uyum sağlama amacıyla yatırımlar yapması (Tuğaç, 2022) dirençli ulaşımın temel mantığını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, dirençli ulaşım sistemlerinin beklenmedik koşullara hızlı yanıt verme ve dayanma gücüne sahip olması, olağan sisteme dönebilme ve toparlanma yeteneğinin olması beklenmektedir (Weilant, vd., 2019).

Bir ulaşım sisteminin tasarımı ve performansı sadece güvenlik, konfor ve rahatlık gibi konuları değil, aynı zamanda verimlilik, tepki verme yeteneği, bağlantı ve güvenilirlik gibi daha tipik altyapı performans göstergeleriyle birlikte esneklik gibi faktörleri de kapsamalıdır. Karayolları ve demiryolu hatları temel altyapıyı oluşturmakla birlikte, ulaşım sistemleri sokak levhaları ve trafik ışıklarından başlayarak, karmaşık trafik akış sensörleri, GPS tabanlı yazılımlar ve entegre ulaşım kontrol merkezlerine kadar uzanan izleme, yönetim ve iletişim katmanları üzerine inşa edilmiştir (ARUP & Siemens, 2015). Mevcut ulaşım ağlarının iyi planlanmış olması, acil durumlarda etkili ve hızlı müdahaleyi desteklemekte, tüm kaynakların hızlı bir şekilde hareket etmesini sağlamakta ve afet bölgelerindeki kurtarma, yardım ve iyileştirme süreçlerini iyileştirmektedir. Ancak elbette, ulaşım ağının tüm yol bağlantıları trafik akımında eşit düzeyde önemli değildir ve bazı ana arterler bir bölgeden diğerine daha hızlı erişim sağlayabilmektedir. Bu ana arterler ise herhangi bir afet bölgesine erişimde daha etkin ve kilit bir öneme sahip olabilmektedir. Dolayısıyla, herhangi bir afet veya olağanüstü durum söz konusu olduğunda, bir ulaşım ağında kullanılacak zarar görmemiş ana arterleri, eğer zarar görmüşse de alternatif yolları tanımlamak ve afet acil eylem planlarına dahil etmek için önceden planlanmalıdır (https://sisad.org.tr/).

Kentsel işlevlerin desteklenmesi, bağlantı ve erişilebilirlik sağlanması açısından otoyollar hayati bir öneme sahiptir. Özelikle afet sırası ve sonrasında kurtarma, tahliye, tıbbi yardım ve bilgi toplama gibi kritik eylemler için otoyolların erişilebilir olması gerekmektedir. Bu çerçevede otoyolların mevcut durumu temel alınarak, olası bir afette meydana gelebilecek hasarın boyutları hesaplanmalı ve restorasyon planları hazırlanarak, afet sonrası müdahalelerin etkinliği artırılmalıdır (Buldurur & Kurucu, 2015). Bu kapsamda Japon Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) (2002), İstanbul için deprem risk yönetimi konulu bir rapor hazırlamış ve ilgili raporda acil ulaşım yollarının önemine vurgu yapılmıştır. Acil ulaşım yolları, olası bir afet durumunda ortaya çıkan önceliklere göre belirlenmiştir. Bu önceliklerden birinci müdahale alanı afete ilişkin hasar bilgisinin toplanması ve bunların paylaştırılması, ikinci müdahale alanı uygun acil durum müdahale operasyonu ve üçüncü müdahale alanı ise afet sonrası acil ihtiyaçların giderilmesi operasyonudur. Dirençli ulaşım planlamasında en kritik ve zayıf yapılar olarak kabul edilen köprüler ve viyadükler bu niteliğiyle ulaşım ağının en önemli elemanları olarak görülmektedir. Çünkü bu yapılar, stratejik noktaları birbirine bağlayan ana eksenler üzerinde bulunmaktadır. Bu ana eksenler, afet anında ve sonrasında insanların afet bölgesinden tahliye edilmesini, acil kurtarma araçlarının akışını ve her türlü kentsel faaliyetin devamlılığını sağlamaktadır (Çiriş, 2017). Bu nedenle, bu yapıların yıkılmaması veya hasar görmemesi için düzenli bakım ve onarım çalışmalarının yapılması gerekmektedir (Buldurur & Kurucu, 2015). Dirençli ulaşım planlamasında ve tasarımında sadece otoyollara yönelik düzenlemeler, olası afet durumlarında yeterli olmamaktadır. Bu kapsamda alternatif ulaşım ağları ve sistemlerine yönelik eylemler de gerekmektedir. Bu nedenle kentsel planlama ve tasarımda kentin kompakt gelişimine olanak sağlayan veya bunu teşvik eden sistemlerin kurgulanması afetlere yönelik dirençliliği artırmada özellikle önemlidir. Bu doğrultuda, yaya ve bisikletle ulaşımı ile toplu taşıma gibi yeşil ulaşım modlarının geliştirilmesi gerekmektedir (Tuğaç, 2022). Olası afet durumlarında kentin toplu ulaşım sisteminin ayakta kalması özellikle önem taşımaktadır. Nitekim hem afet ve acil durumlar anında hem de afet sonrasında toplu taşıma sisteminin hasar almaması, ulaşıma devam edilerek kurtarma faaliyetlerinin yürütülebilmesi kentsel sistemin devamlılığı açısından vazgeçilmezdir. Bu nedenle, afetlere hazırlık aşamasında ve dirençli bir ulaşım planlaması yapılabilmesinde toplu taşıma ağlarının eksikliklerinin tespit edilmesi ve bunlara yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir (Güney vd., 2014). Özetle, doğal ve insan kaynaklı afetlerin ulaşım sistemlerinde yarattığı yıkıcılığı minimum seviyeye indirmek için bölge planlama ölçeğinde kentler arası erişilebilirliğin sağlanması noktasında alternatif ulaşım bağlantıları sunan, çevre ve iklim dostu ulaşım türlerinin tercih edilmesi önemlidir. Olası bir afet durumunda erişilebilirliğin kesintisiz olması için kentleri bağlayan ulaşım türlerinin planlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, tek tür ulaşım sistemine sahip kentlerde olası kriz durumlarında ulaşımın kesintiye uğraması olası riskleri de artıracaktır (Peker & Orhan, 2021).

Bir kentteki ulaşım sisteminin dirençliliği, kentten kente farklılık göstermektedir. Ancak dirençliliği sağlamak adına iki temel yol bulunmaktadır: Birincisi, ulaşım sisteminin içinde dirençliliği sağlamak; ikincisi ise ulaşım sisteminin kentte çoklu fayda sağlamak için kullanım yollarını tespit etmektir. Her iki yaklaşım da çeşitli paydaşları içeren kapsayıcı bir sürece dahil olmayı, planlama çabalarını entegre etmeyi, risk ve belirsizliği yönetmeyi, sürekli öğrenmeyi ve geri bildirime uyum sağlamayı gerektirmektedir (Resilient Cities Network, 2020). Dolayısıyla dirençli bir ulaşım sistemi kurmak için öncelikle felaket risklerinin ve ulaşım ağlarına etkilerinin araştırılması gerekmektedir (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011). Özellikle olası bir afet sonrasında ulaşımın büyük bir role sahip olduğu dikkate alınırsa, afetlere hazırlık aşamasında ulaşımı ön plana çıkaran önlemlerin alınması gerektiğini ifade etmek gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle ulaşım ana planının hedeflerinin belirlenmesi gerekmektedir. Esasında bu hedefler, olası bir afet durumunda sistemin işlemeye devam edebilmesi için afet öncesinde alınması gereken önlemleri kapsamaktadır. Bu kapsamda İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011), İstanbul Metropoliten Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı'nda ulaşım planlamasının hedeflerini belirlemiştir. Buna göre ulaşım planının genel hedefi "gelecekte motorlu araç

trafiğinin azaltılması, toplu taşıma altyapısının iyileştirilmesi ve trafik talebinin özel araçlardan toplu taşıma araçlarına teşvik edilmesiyle kent içinde hareketlilik ve erişilebilirliğin artırılması sonucunda daha yaşanabilir bir kentsel çevrenin oluşturulması" olmalıdır. Sonuç olarak, bir kentin ulaşım sisteminin dirençliliği, hem afetlere karşı hazırlıklı olmayı hem de günlük yaşamın sürdürülebilirliğini sağlamayı gerektirmektedir. Dirençli bir ulaşım sistemi oluşturmak, sadece fiziksel altyapının sağlamlığıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda planlama süreçlerinin bütüncül ve katılımcı bir yaklaşımla yürütülmesini de içermektedir. Bunları sağlamak, kentlerin sadece günlük yaşamda değil, aynı zamanda olası afet durumlarında da daha dirençli ve yaşanabilir hale gelmesini sağlayacaktır. Böylece, ulaşım sistemlerinin dirençliliği, kentsel çevrenin sürdürülebilirliği ve toplumsal refahın sağlanması adına önemli bir adım olacaktır.

5. Sonuç ve Öneriler

Kentler, sürekli artan nüfuslarıyla, değişen ve belirsiz gelecekleriyle hem doğal hem de insan kaynaklı afetlere karşı savunmasız durumdadır. Bu risk ve tehlikelerden tamamen kaçmak mümkün olmadığından bu riskleri minimize ederek kentsel sistemin devamlılığı için hareket etmek durumundadır. Bu hareket yöntemlerinden biri olarak görülen ve risklerle hayatta kalma çabalarından biri dirençli kentler, kentlerin karşılaştığı sorunların çözümü ve ani değişiklikleri sisteme uyarlayarak kentlerin devamlılığını sağlama arayışı olarak görülmektedir. Dirençli kentler afetler bağlamında değerlendirildiğinde ise afetlere hazırlıklı, afet anında etkin müdahale edebilen ve afet sonrasında hızla toparlanabilen kentleri ifade etmektedir. Kentlerin kırılganlıklarının ve afet risklerinin azaltılmasında, mekânsal planlama ve afet yönetimi birbirini tamamlayan disiplinler olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle, afete dirençli kent planlaması, doğal ve insan kaynaklı afetlere dayanabilen kentlerin tasarımına odaklanmaktadır. Afete dirençli kentlerin planlama sürecinde altyapı sistemleri, toplumsal ve fiziksel yapı unsurları ile çevresel faktörler mekânsal planlamaya dahil edilmelidir. Bu kapsamda Hyogo Çerçeve Programı (2005-2015) ve Sendai Bildirgesi (2015-2030), afet risklerinin azaltılması konusunda hükümetlere rehberlik etmektedir. Bu programlar, afet risklerini azaltmayı öncelikli bir eylem planı haline getirmeyi, riskleri değerlendirmeyi, direnç kültürünü oluşturmayı ve etkin risk yönetimi teknikleri ile riskleri azaltmayı vurgulamaktadır. Türkiye'de ise afet risklerinin azaltılması konusunda stratejik belgeler ve planlar oluşturulmuş, ancak bu belgeler mekânsal planlama sürecine entegre edilememiştir. Bu nedenle afete dirençli kentlerin planlamasında, ülkelerin ve kentlerin özelliklerine uygun stratejiler belirlenmelidir. Bu stratejiler, afet risklerini kabul edilebilir seviyelerde tutmayı ve olası hasarları önceden tahmin edebilmeyi hedeflemelidir. Ayrıca ulaşım altyapısının sağlam ve dayanıklı olması, afet anında ve sonrasında hızlı ve etkin müdahale edebilme kapasitesini artıracaktır. Bu nedenle, ulaşım planlamasının stratejik önemi vurgulanmalıdır.

Ulaşım planlaması, kentsel direnç oluşturmadaki hayati rolü nedeniyle, kentlerin afetlere karşı hazırlıklı olmasında büyük bir öneme sahiptir. Çünkü afetlerin kentlerde yarattığı tahribatın en belirgin alanlarından biri ulaşım sistemleridir. Ulaşım ağları, acil müdahale ekiplerinin afet bölgelerine hızla ulaşabilmesi ve halkın güvenli bir şekilde tahliye edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Nitekim etkin bir şekilde işleyen ulaşım sistemleri, olası bir afet durumunda can kaybını en aza indirebilir, hasarları azaltabilir ve kentsel topluluğun hızlı bir şekilde toparlanmasını sağlayabilir. Ayrıca afet öncesi hazırlık sürecinde de ulaşım sistemlerinin dirençliliği ve esnekliği, acil durum planlarının etkin bir şekilde uygulanabilmesi için önem taşımaktadır. Bu anlamda Ulaşım ağlarının güçlendirilmesi, alternatif yolların belirlenmesi ve lojistik planlamaların yapılması, afet anında ve sonrasında karşılaşılacak zorlukları azaltabilmektedir. Bu nedenle, afete dirençli kent planlaması kapsamında ulaşım sistemlerinin dahil edilmesi önemli bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Afet öncesi hazırlık süreçlerinde yapılan kapsamlı ulaşım planlamaları, afetlerin etkilerini minimize etmede ve kentlerin hızlı bir şekilde normal yaşama dönmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, acil tahliye yollarının belirlenmesi, toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi ve alternatif ulaşım rotalarının planlanması, afet durumlarında insanların güvenli bir şekilde hareket etmelerini sağlamaktadır. Afet sırasında ulaşımın kesintiye uğraması, kurtarma operasyonlarının gecikmesine ve yardım faaliyetlerinin etkin bir şekilde yürütülememesine neden olabilmektedir. Afet sonrası yeniden yapılanma süreçlerinde ise ulaşım planlaması ve alt yapıların hızlı bir şekilde restore edilmesi, kentlerin normale dönüş sürecini hızlandırmakta ve toplumun yaşam kalitesini iyileştirmektir. Bu nedenle, ulaşım altyapısının dirençliliği, kentsel alanların afetlere karşı dirençliliğini artırmak için vazgeçilemez bir adım olarak değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, yerel yönetimlerin ve planlamacıların afetlerle başa çıkabilme kapasitelerini artırmak üzere, kapsamlı ve katılımcı bir planlama süreci yürütmeleri gerekmektedir.

Türkiye gibi doğal afetlere maruz kalan ülkelerde, özellikle deprem gibi yüksek riskli olaylar, ulaşım sistemlerine ciddi zararlar verebilmekte ve acil müdahaleleri engelleyebilmektedir. Bu durum, afet öncesi planlamanın ve dirençli ulaşım stratejilerinin önemini göstermektedir. Nitekim geçmiş deneyimler de ulaşım altyapısının güçlendirilmesi ve güçsüzlük durumunun yarattığı olumsuzlukların büyük kayıplara neden olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla dirençli ulaşım sistemlerinin sadece normal koşullarda etkin ve verimli çalışmasının yeterli olmadığını, aynı zamanda beklenmedik afet senaryolarına da hızlı ve etkin yanıt verebilme kapasitesine sahip olması gerektiğine işaret etmektedir. Bu da güvenlik, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik ve esneklik gibi temel özelliklerin yanı sıra, afet durumlarında da işlevselliğini koruması gerektiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak kentsel dirençlilik, ulaşım planlaması açısından multidisipliner bir yaklaşım gerektirmektedir. Ulaşım sistemlerinin fiziksel dirençliliğinin yanı sıra, toplumun ulaşım ihtiyaçlarını karşılayacak esneklikte ve dirençte olması, kentlerin sürdürülebilir gelişimi ve toplumsal refahı için oldukça önemlidir.

Kentlerin ulaşım sistemlerinde dirençliliği artırmak için öncelikle ne ile karşı karşıya olunduğunun anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle kentlerin kapsamlı risk analizleri ve envanter çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Böylece ulaşım ağlarındaki kritik noktalar belirlenebilir ve bu alanlar güçlendirilebilir. Ayrıca ulaşım planlaması sürecinin tüm paydaşları içine alacak şekilde genişletilmesi ve bütüncül bir yaklaşımın benimsenmesi önemlidir. Tüm paydaşların dahil olduğu bütünleşik bir süreç, uygulamanın daha başaralı ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlayacaktır. Dirençli ulaşımın geliştirilmesi geniş kapsamlı bir süreçtir ve farklı ulaşım modlarının geliştirilmesini ve teşvik edilmesini gerektirmektedir. Özellikle toplu taşıma sistemleri afetler sırasında pek çok kişinin bölgeden tahliye edilmesine olanak vereceğinden bu sistemin yaygınlaştırılması önem taşımaktadır. Bisiklet yolları ya da yaya dostu alanların artırılması gibi adımlar da hem günlük yaşamda hem de afet durumlarında çevresel ve sosyal faydalar sağlayacaktır. Ulaşım altyapısının dirençliliğini artırmak için köprüler ve viyadükler gibi kritik bağlantı noktaları ile otoyollar gibi stratejik yapıların düzenli bakım ve onarımları yapılmalıdır. Bu stratejik noktaları gerekli yatırımların çekilmesi de afet süreçlerimde ulaşımın kesintisiz devam etmesini ve yardım faaliyetlerinin yürütülmesini sağlayacaktır. Bu adımlar, altyapının afet anında ve sonrasında işlevselliğini korumasını sağlayacaktır. Kentsel dirençliliğin inşa edilmesinde kentlerin fiziksel anlamda dayanaklılığı tek başına yeterli değildir. Bu nedenle toplumun da afetlere karşı bilinçlendirilmesi ve buna yönelik eğitim ve farkındalık kampanyalarının düzenlenmesi önemlidir. Önemli noktalardan biri de ulaşım sistemleri için veri tabanlı planlama ve yönetim sistemlerinin kullanılması gerektiğidir. Bu sistemler, afet durumlarında hızlı ve etkili müdahaleyi mümkün kılacaktır. Son olarak bu önerilerin bir plana bağlanması ve her kentin kendine özgü risk profiline uygun şekilde afet acil eylem planlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu öneriler, kentsel dirençliliğin sağlanması için en önemli adımlardan biri olan ulaşım sistemlerinin dirençliliğini artırmaya yönelik adımlar ve rehber olarak değerlendirilmelidir. Böylelikle, kentlerin gerek gündelik yaşamda gerekse olağanüstü afet durumlarında daha güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde faaliyet göstermesinin önü açılabilecektir.

Teşekkür

Bu makale, Uluslararası Kamu Yönetimi Forumu'nda (KAYFOR Bişkek) sunulan özet bildiriden türetilmiştir.

Kaynaklar

Abastante, F., Lami, L. M., Luigi, R. L., & Gaballo, M. (2020). Supporting resilient urban planning through walkability assessment. *Sustainability*, *12*(19), Article 8131. https://doi.org/10.3390/su12198131

Ahmed, S., Dey, K., & Fries, R. (2019). Evaluation of transportation system resilience in the presence of connected and automated vehicles. *Transportation Research Record*, *2673*(9), 562–574. https://doi.org/10.1177/0361198119848702

Alberti, M. (2013). *Planning under uncertainty: Regime shifts, resilience, and innovation in urban ecosystems*. 18 Şubat 2024'de http://www.thenatureofcities.com/2013/01/22/planning-under-uncertainty-regime-shifts-resilience-and-innovation-in-urban-ecosystems/ adresinden alındı.

Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: An etymological journey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*, 2707–2716. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2707-2013

Ardıçoğlu, R. (2024). Evaluating of street and building ratio as a criterion of urban resilience. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, *6*(1), 145–160. https://doi.org/10.46464/tdad.1420893

ARUP & Siemens. (2015). *Resilient urban mobility: A case study of integrated transport in Ho Chi Minh City*. 29 Mart 2023'de https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/resilient-urban-mobility--a-case-study-of-integrated-transport-in-ho-chi-minh-city adresinden alındı.

ARUP. (2012). *City resilience framework*. The Rockefeller Foundation.

ARUP. (2014). *City resilience framework*. The Rockefeller Foundation. https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/UR/City-Resilience-Framework.pdf

ARUP. (2015). *City resilience framework*. The Rockefeller Foundation. https://www.rockefellerfoundation.org/wp-content/uploads/100RC-City-Resilience-Framework.pdf

Berkes, F., Folke, C., & Colding, J. (Eds.). (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press.

Boso Hanyalı, Ö. (2023). Merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan Kahramanmaraş depremleri üzerine. *Spektrum*, *9*(4), 1–6.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., & von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, *19*(4), 733–752.

Buldurur, M. A., & Kurucu, H. (2015). İstanbul'da afet yönetimi ve acil ulaşım yollarının değerlendirmesi. *Planlama Dergisi*, *25*(1), 21–31. https://doi.org/10.5505/planlama.2015.47965

Carpenter, S. R., Westley, F., & Turner, M. G. (2005). Surrogates for resilience of social–ecological systems. *Ecosystems*, *8*, 941–944.

Çılgın, K., Dinç, S., & Olgun, İ. (2023). Sunuş: Tüm kırılganlıklarımıza rağmen dirençliliğimizi artıracak yolları birlikte bulmak için harekete geçmenin tam zamanı! *Spektrum*, *9*(4), 9–11.

Çiriş, S. (2017, 24–26 Mayıs). *Kentsel planlamada paradigma değişiminin bir ürünü: "Dirençli ulaştırma" ve İstanbul kenti üzerine inceleme* [Bildiri Sunumu]. 12. Ulaştırma Kongresi (Ulaştırma Politikaları), Adana, Türkiye.

Coaffee, J., & Bosher, L. (2008). Integrating counter-terrorist resilience into sustainability. *Urban Design and Planning*, *161*(DP2), 75–83.

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, *18*(4), 598–606.

Daniels, J., & MacArthur, J. (2022, January 9–13). *Transportation system resiliency and disaster response and recovery: A review on U.S. metropolitan long-range transportation plans (TRBAM-22-00866)* [Paper presentation]. 101st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

Eraydın, A., & Taşan-Kok, T. (2013). Introduction. In A. Eraydın & T. Taşan-Kok (Eds.), *Resilience thinking in urban planning* (pp. 1–16). Springer Netherlands.

Ercoşkun, Ö. Y. (2012). A paradigm shift towards urban resilience. In Ö. Y. Ercoşkun (Ed.), *Green and ecological technologies for urban planning: Creating smart cities* (pp. 1–16). Information Science Publishing.

Erdin, H. E., Sılaydın Aydın, M. B., Partigöç, N. S., Zengin Çelik, H., Palazca, A., & Horoz, Ç. (2021). Kent içi yol kademelenmesinin afet durumunda toplanma alanlarının erişilebilirliğine etkisi açısından irdelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, *9*(1), 103–111. https://doi.org/10.21541/apjes.478601

Galderisi, A. (2014). Urban resilience: A framework for empowering cities in face of heterogeneous risk factors. *A|Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, *11*(1), 36–58.

Genç, F. N. (2021). *Afet yönetimi*. Nobel Yayıncılık.

Gerçek, D. (2021). 21. yüzyıl ve dirençli kentler. *Mimarlık Dergisi*, *417*, 39–42.

Güney, D., Kuruşcu, A. O., & Özata, Ş. (2014, 19–21 Aralık*). İstanbul toplu taşıma sisteminin afet ve acil durumlara hazırlık seviyesi* [Bildiri Sunumu]. TRANSIST-Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.

Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, *4*, 390–405.

ICLEI. (2015). *Resilient cities report 2015: Global developments in urban adaptation and resilience*. 8 Nisan 2024'te https://www.cakex.org/sites/default/files/documents/RC2015__Congress_Report__Final.pdf adresinden alındı.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2011). *İstanbul metropoliten alanı kentsel ulaşım ana planı (İUAP)*. 10 Haziran 2024'te https://www.ibb.gov.tr/tr-TR/kurumsal/Birimler/ulasimPlanlama/Documents/İUAP_Ana_Raporu.pdf adresinden alındı.

ISMEP. (2014). *İstanbul sismik riskin azaltılması ve acil durum hazırlık projesi: Afete dirençli şehir planlama ve yapılaşma*. ISMEP Rehber Kitaplar, İstanbul.

JICA & İBB. (2002). *Türkiye Cumhuriyeti, İstanbul ili sismik mikro-bölgeleme dahil afet önleme/azaltma temel planı çalışması*. Pacific Consultants International. https://depremzemin.ibb.istanbul/uploads/prefix-jica-turkce-raporu-66a39c6e9b70d.pdf

Kundak, S. (2017). Dirençliliğin temelleri. *Resilience*, *1*(1), 55–69. https://doi.org/10.32569/resilience.358081

Orhan, E. (2022). 1999 depremlerinin ardından planlama mevzuatı üzerine bir değerlendirme. *Planlama*, *32*(1), 47–56.

Özer, Y. E. (2018). *Risk azaltma yaklaşımı çerçevesinde dirençli kentler*. Ekin Yayınevi.

Peker, E., & Orhan, E. (2021). Mekânsal planlamada deprem riski ve iklim krizini birlikte ele almak. *Planlama*, *31*(2), 288–301.

Porebska, A., Rizzi, P., Otsuki, S., & Shirotsuki, M. (2019). Walkability and resilience: A qualitative approach to design for risk reduction. *Sustainability*, *11*(10), Article 2878. https://doi.org/10.3390/su11102878

Resilient Cities Network. (2020). *100 Resilient Cities, Resilience point of view series—Transport*. 10 Haziran 2024'te https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/UR/Resilience-Point-of-View-Transport.pdf adresinden alındı.

Soofi-Siavash, Y. (2016). *Achieving urban resilience: Through urban design and planning principles* [Postgraduate thesis]. Department of Planning, Oxford Brookes University.

Tainter, J. A., & Taylor, T. G. (2014). Complexity, problem-solving, sustainability, and resilience. *Building Research & Information*, *42*(2), 168–181. https://doi.org/10.1080/09613218.2014.850599

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *SBB Deprem Sonrası Değerlendirme Raporu*. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası. (2020). *Raporlar*. 23 Şubat 2023'de https://www.jmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=14023&tipi=58&sube=&ozel= adresinden alındı.

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası. (2021). *Raporlar*. 23 Şubat 2023'de https://www.jmo.org.tr/genel/bizden_listele.php?&bizden_kod=58&1=1&sr=16 adresinden alındı.

Tuğaç, Ç. (2022). İklim değişikliği ve kentsel dirençlilik bağlamında yeşil ulaşım. *İdealkent*, *36*(13), 545–575.

UNISDR. (2005). *Hyogo framework for action 2005–2015: Building the resilience of nations and communities to disasters*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. https://www.unisdr.org/2005/wcdr/intergover/official-doc/L-docs/Hyogo-framework-for-action-english.pdf

UNISDR. (2009). *2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf

UNISDR. (2010). *Making Cities Resilient: My City is Getting Ready*. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3221-10306.pdf

UNISDR. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*. 25 Mart 2023'de http://www.wcdrr.org/uploads/Sendai_Framework_for_Disaster_Risk_Reduction_2015-2030.pdf adresinden alındı.

Varol, N., & Buluş Kırıkkaya, E. (2017). Afetler karşısında toplum dirençliliği. *Resilience*, *1*(1), 1–9.

Weilant, S., Strong, A., & Miller, B. M. (2019, October 16). *Incorporating resilience into transportation planning and assessment*. RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3038.html

Yaman Galantini, Z. D. (2018). *Urban resilience as a policy paradigm for sustainable urban planning and urban development: The case of Istanbul* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Yaman Galantini, Z. D. (2020). Kentsel dayanıklılık odaklı planlama yaklaşımının Türk kent planlama sistemine uyarlanması. *Resilience*, *4*(2), 347–371. https://doi.org/10.32569/resilience.797095