2020
Turkish Journal of
Remote Sensing and GIS

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS

Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi



Volume/Cilt: 6 Issue/Sayı: 2 Year/Yıl: 2025 E-ISSN:2717-7165

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi
Turk J Remote Sens GIS
Journal homepage: http://www.dergipark.gov.tr/en/pub/rsgis

Turk J Remote Sens GIS, (2025), Cilt/Volume:6 Sayı/Issue:2 Eylül/September 2025

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Halil AKINCI, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Doç. Dr. Mustafa ZEYBEK, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Doç. Dr. Volkan YILMAZ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

Yabancı Dil Editörü / Language Editor

Doç. Dr. Volkan YILMAZ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Prof. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.

Yayın Kurulu / Publishing Board

Prof. Dr. Mehmet Devrim AKÇA, Işık Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Prof. Dr. Mustafa TÜRKER, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR, Ankara Üniversitesi, Ankara. Türkiye.
Prof. Dr. Sedat DOĞAN, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun. Türkiye.
Doç. Dr. Nusret DEMİR, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Ahmet Özgür DOĞRU, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Ali Melih BAŞARANER, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Arzu ERENER, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
Prof. Dr. Bülent BAYRAM, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Derya ÖZTÜRK, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
Prof. Dr. Fevzi KARSLI, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Prof. Dr. Füsun Balık ŞANLI, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Prof. Dr. İsmail Rakıp KARAŞ, Karabük Üniversitesi, Türkiye.
Prof. Dr. Mehmet Ali YÜCEL, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.
Prof. Dr. Mehmet ALKAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Mehmet Devrim AKÇA, Işık Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Mustafa TÜRKER, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Özlem AKAR, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye.
Prof. Dr. Saygın ABDİKAN, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Tarık TÜRK, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli, Türkiye.
Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli, Türkiye.
Doç. Dr. Caner GÜNEY, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Doç. Dr. Ekrem SARALIOĞLU, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.
Doç. Dr. Esra TUNÇ GÖRMÜŞ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Doç. Dr. İsmail Ercüment AYAZLI, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
Doç. Dr. Nusret DEMİR, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.
Doç. Dr. Uğur ALGANCI, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi
Turk J Remote Sens GIS
Journal homepage: http://www.dergipark.gov.tr/en/pub/rsgis

Turk J Remote Sens GIS, (2025), Cilt/Volume:6 Sayı/Issue:2 Eylül/September 2025

Editör Kurulu / Editorial Board

Dr. Öğr. Üyesi Deniztan ULUTAŞ KARAKOL, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Gülten KARA, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÜSTÜNER, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Resul ÇÖMERT, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Ziya USTA, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.
Dr. Emre HAVAZLI, NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), Amerika.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi
Turk J Remote Sens GIS
Journal homepage: http://www.dergipark.gov.tr/en/pub/rsgis

Turk J Remote Sens GIS, (2025), Cilt/Volume:6 Sayı/Issue:2 Eylül/September 2025

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ
RESEARCH ARTICLES

Sürdürülebilir Kampüs Perspektifinde Bisiklet Parklarına Erişilebilirliğin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Analizi: Erciyes Üniversitesi Kampüsü
Geographic Information Systems-Based Bicycle Parking Accessibility in Sustainable Campus Planning: Erciyes University Campus
Ömer Buğra Karakoç, Barış Ergen ..... ***131 - 143***

Uzaktan Algılama Görüntülerinden Bina Çıkarımında FPN-ResNeXt50 ve VGG16-UNet Modellerinin Karşılaştırılması
Comparison of FPN-ResNeXt50 and VGG16-UNet Models for Building Extraction from Remote Sensing Images
Serhat Şenses, Emine Tanır Kayıkçı ..... ***144 - 167***

Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Orman Yangınlarının Etkilerinin Analizi: Taşköprü 2020 Orman Yangını Örneği
Analysis of the Effects of Forest Fires Using Remote Sensing and GIS: The Case of the 2020 Taşköprü Forest Fire
Tolga Kaynak ..... ***168 - 180***

Açık Erişimli Kıyı Sayısal Yükseklik Modellerinin Kullanımı ile Deniz Seviyesi Yükselmesine Bağlı Taşkın Risklerinin İncelenmesi: Gediz Deltası Örneği
Investigation of Flood Risks Associated with Sea Level Rise Using Open-Access Coastal Digital Elevation Models: The Case of Gediz Delta
Osman Sami Kırtıloğlu, Nevin Betül Avşar, Elif Akyel ..... ***181 - 195***

Arkeolojik Alanların İHA ile Modellenmesi: Andoz Kalesi (Espiye-Giresun) Örneği
UAV-Based Modeling of Archaeological Sites: The Case of Andoz Castle (Espiye-Giresun)
Oğulcan Avcı, Cüneyt Aktaş ..... ***196 - 212***

Yusufeli Barajı Su Tutma Sonrası Arazi Örtüsü Değişimlerinin Google Earth Engine ile Analizi
Analysis of Land Cover Changes after the Water Retention of Yusufeli Dam by Google Earth Engine
Ekrem Saralıoğlu, Baker Alahmed ..... ***213 - 229***

RUSLE Yöntemi Kullanılarak Porsuk Çayı Havzası'nda Erozyon Duyarlılığının ve Toprak Kayıplarının Belirlenmesi
Determination of Erosion Susceptibility and Soil Loss in the Porsuk Stream Basin Using the RUSLE Method
Ali Ünver, Ebubekir Karakoca ..... ***230 - 251***

Bayes Olasılık Modeli ve Frekans Oranı (FO) Yöntemi ile Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce) Heyelan Duyarlık Analizi
Landslide Susceptibility Analysis of Esmahanım Stream Basin (Düzce) by Using Bayesian Probability Model and Frequency ratio (Fr) Method
Vedat Avcı ..... ***252 - 276***

Datça Yarımadasının Geleceğini Şekillendirmek: Uygun Yerleşim Alanları ve Arazi Kullanım Senaryolarını Keşfetmek
Shaping the Future of Datça Peninsula: Exploring Suitable Settlement Areas and Land-Use Scenarios
Zekeriya Konurhan, Mehmet Akif Ceylan ..... ***277 - 299***

Sentinel-2 Görüntüleri Kullanılarak Yanmış Alan ve Yangın Şiddetinin Değerlendirilmesi: Türkiye 2025 Yazı Orman Yangınlarından Örnekler
Assessment of Burned Area and Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery: Case Studies from Türkiye's Summer 2025 Wildfires
Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz ..... ***300 - 314***

Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi İçin Rize Kıta Sahanlığında CBS Destekli Hibrit Çok Kriterli Saha Seçimi
Hybrid Multi-Criteria GIS-based Site Selection for Offshore Wind Energy in the Continental Shelf of Rize
Murat Başeğmez ..... ***315 - 342***

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi
Turk J Remote Sens GIS
Journal homepage: http://www.dergipark.gov.tr/en/pub/rsgis

Turk J Remote Sens GIS, (2025), Cilt/Volume:6 Sayı/Issue:2 Eylül/September 2025

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Komşu Mahallelerdeki Konut Fiyat Farklılıklarının Mekansal Analizlerle İncelenmesi: Ankara Çankaya İlçesi Örneği
Investigating Housing Price Differences in Adjacent Neighborhoods Using Spatial Analysis: The Case of Ankara's Çankaya District
Ayşe Giz Gülnerman Gengeç, Tuğba Memişoğlu Baykal ..... ***343 - 359***

Afet Acil Durum Toplanma Alanlarının Yer Seçim Kriterleri ve Tsunami Riskine Yönelik Bir Değerlendirme: Trabzon Akçaabat Örneği
Evaluation of Site Selection Criteria for Disaster Emergency Assembly Areas and Tsunami Risk Assessment: The Case of Akçaabat, Trabzon
Gülten Kara, Aslı Sümeyye Özhan ..... ***360 - 383***

DERLEME MAKALELER
REVIEW ARTICLES

Fotogrametri ve Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Peyzaj Mimarlığına Entegrasyonu
Integration of Photogrammetry and Virtual Reality Applications in Landscape Architecture
Talha Aksoy, Şevval Özlü ..... ***384 - 401***

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, September 2025, 6(2): 131–143
Journal homepage: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Geographic Information Systems-Based Bicycle Parking Accessibility in Sustainable Campus Planning: Erciyes University Campus

Sürdürülebilir Kampüs Perspektifinde Bisiklet Parklarına Erişilebilirliğin Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Analizi: Erciyes Üniversitesi Kampüsü

Ömer Buğra Karakoç[1], Barış Ergen[2]*

[1]*Erciyes University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of City and Regional Planning, Kayseri/Türkiye.*
[2]*Erciyes University, Faculty of Architecture, Department of City and Regional Planning, Kayseri/Türkiye.*

ORIGINAL PAPER

***Corresponding author:**
Barış Ergen
ergen@erciyes.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1604590

Article history
Received: 20.12.2024
Accepted: 19.05.2025
Published: 27.09.2025

Abstract

Campus areas follow the model of a city, with a unique population, transportation system, and urban and environmental services. They also serve important functions within cities, offering various beneficial services. Consequently, the sustainability of university campuses contributes to the overall urban sustainability. Furthermore, the consideration of campus sustainability involves multiple factors, and transportation is one of the most important. This study examined the areas served by the bicycle parking points located on the Erciyes University campus, particularly the areas within a walking distance of 500 m. The study used geographic information systems (GIS) and network analysis and found that some buildings within the campus were not located within 500 m of the bicycle parking points by walking. Notably, it is not sufficient to determine the service areas by simply considering a circle with a diameter of 500 m centered on the bicycle parking point. This study underscores the influence of bicycle parking locations on campus sustainability and the benefit of using GIS in the planning of transportation infrastructure.

Keywords: *Bicycle parks, GIS, Network analysis, Sustainable transportation, Erciyes University campus*

Özet

Kampüs alanları nüfus, kentsel hizmetler, ulaşım, çevresel hizmetleri ile küçük kent modeli oluşturmaktadır. Kampüs alanları sunduğu hizmetler ile kentlerin önemli parçalarıdır. Üniversite kampüslerinde sürdürülebilirlik kentsel sürdürülebilirliğe de önemli katkılar sunmaktadır. Sürdürebilir kampüs çok yönlü bir yaklaşımı içermektedir. Ulaşım ise sürdürülebilir kampüsün en önemli başlıklarından birisidir. Bu çalışmada Erciyes Üniversitesi Kampüs Alanı içinde yer alan bisiklet park noktalarının 500 metre yürüme mesafesi içinde hizmet ettiği alanlar araştırılmıştır. Çalışmada coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve network analizi metodu kullanılmıştır. Çalışmada Erciyes Üniversitesi içinde yer alan bazı binaların bisiklet park noktalarından 500 metre yürüme mesafesi içinde yer almadığı tespit edilmiştir. Çalışmada 500 metre yarıçap ya da çap ile hizmet alanı belirlemenin doğru sonuç vermediği varılan diğer önemli bulgudur. Kampüs alanlarının sürdürülebilirliği açısından bisiklet ulaşımının önemli oluğu ve ulaşım altyapı alanlarının belirlenmesinde GIS önem arz ettiği çalışmanın sonuçları arasındadır.

Anahtar kelimeler: *Bisiklet parkları, CBS, Network analizi, Sürdürülebilir ulaşım, Erciyes Üniversitesi kampüsü*

1. Introduction: Transportation and Sustainability

The transportation sector is one of the sectors that contributes most to air pollution and greenhouse gas emissions (Yedla, 2015). It affects every component of the natural environment, such as water, vegetation, geomorphology, soil, animal life, and atmosphere, potentially contributing to problems such as urban air quality, ozone depletion, acid rain,

and global warming (Black, 1997). Cycling represents an environmentally friendly and healthy alternative to motorized transport in urban areas (Li et al., 2020). In addition, it supports positive environmental impacts by reducing greenhouse gas emissions, minimizing noise pollution, and increasing social interaction (Mora et al., 2021). Integrating cycling and public transportation by providing bicycle parking areas is beneficial to the economy, the environment, and public health (Arbis et al., 2016).

Sustainability is an integrated concept encompassing relationships between human and natural systems (Cabezas et al., 2004), comprising three major dimensions: economic, ecological (environmental), and social (Purvis et al., 2019). Another approach claims that there are four intrinsic aspects of sustainability: economic, ecological, social, and political (Holling, 2001). Sustainable transportation, defined as "meeting current transportation and mobility needs without compromising the ability of future generations to meet those needs" (Black, 1996), has recently become an important goal in transportation planning and related studies (Rybarczyk & Wu, 2010). To develop a sustainable transportation system that provides economic, ecological, and social benefits, the transition from personal vehicles to bicycles and public transportation has gained significant attention (Arbis et al., 2016). Moreover, Capodici et al. (2021) emphasized that geographic information systems (GIS) can be a valuable tool for supporting policy-makers in the development of transportation sustainability and policies.

Walking, followed by cycling, has been recognized as the most sustainable mode of transportation within university campuses (Alhajaj, 2023). Studies have shown that reducing journey times, which includes more sustainable forms of transport than the car, such as bicycles, will ensure sustainable mobility (Dell'Olio et al., 2019). Universities often decide on land use by infrastructure and facilities that can encourage walking or cycling (Kaplan, 2015).

Sustainable transportation planning on the campus can be ensured by promoting sustainable modes of transportation for university campuses (Dehghanmongabadi & Hoşkara, 2018), such as walking, cycling, using public transportation, car sharing, discouraging single-occupancy cars (Dell'Olio et al., 2019; Balsas, 2003) using together with higher parking charges (Dell'Olio et al., 2019), thus, university campuses can provide a laboratory for testing and implementing various alternative transportation strategies, reducing infrastructure costs and minimizing their impact on surrounding areas (Balsas, 2003). There are many immediate, social, and economic benefits to promoting sustainable modes of transportation for university campuses. Besides, universities provide an educational milieu for sustainability (Dehghanmongabadi & Hoşkara, 2018).

Accessibility involves the distribution of destinations and access points surrounding a given location, the ease of arriving at them using various means, and the amount and features available for various needs and activities (Handy, 2020). In another approach, accessibility is a fundamental concept for transportation planning that includes the ease and comfort of people reaching a desired destination and generally refers to physical access to services or an intended destination (Öztaşkın & Levend, 2023). Accessibility using bicycles has recently gained attention (Li et al., 2020); however, it varies according to the purpose of the journey (Miller, 2018). A review indicated that the majority of the studies on bicycle accessibility focus on specific issues (lacono et al., 2010; Saghapour et al., 2017), and most studies adopt a survey-based approach (Li et al., 2020). However, it is also necessary to evaluate accessibility using quantifiable measures (Murphy & Owen, 2019). While many factors are thought to positively influence the levels of bicycling in urban areas, high-quality, well-connected bicycle infrastructure is widely considered a precondition (Pritchard et al., 2019).

1.1 Transportation and Bicycles

The presence of bicycle parking at destinations increases the convenience of using bicycles as a means of transportation (Mora et al., 2021; Hunt & Abraham, 2007) and the opportunities to use them for business travel (Mora et al., 2021; Noland & Kunreuther, 1995). The availability and quality of cycling facilities have a significant impact, especially on increasing network connectivity (Cohen et al., 2008; Koohsari et al., 2014; Lowry & Loh, 2017). As a healthy and low-carbon form of non-motorized mobility, cycling plays an essential role in supporting the sustainable development of urban transport (Zhuang et al., 2025).

Various metrics are involved, particularly the proximity of facilities or infrastructure to a specific area or a person's location, and the walking distance covering a certain area is often considered in urban planning (Mora et al., 2021). Lee et al. (2020) examined walkability using GIS. Clarence Perry proposed an ideal neighborhood unit based on a walking distance of 0.25 miles in 1929 (approximately 400 m) (McNeil, 2011). Moudon et al. (2006) stated that walking distance had a positive correlation with the environmental qualities of housing and daily shopping (McNeil, 2011). The observations indicate that access to bicycle parking within walking distance is an important factor for sustainable transportation. Studies appear to suggest relatively similar distances, for example, 250–500 m (Eskind, 2024), 300–500 m (Daniella & Wangsa, 2019), and 500 m (Wang et al., 2018; Cinkiş & Erdin, 2022), and Hosford and Winters (2018) accepted a distance of 500 m for bike share points in their study. Therefore, 500 m is generally accepted for the service area of bicycle parking, and accordingly, we used 500 m in the present study.

1.2 Bicycles and GIS

GIS has emerged as an important tool in recent years, which is based on imaging technologies (Ahmed et al., 2017). GIS is used to display, analyze, and manage spatial data and is increasingly used in transportation (Miller, 1999; Nyerges, 1995). GIS service area analysis is often conducted to calculate coverage distances around bus stops or train stations (Gutiérrez & García-Palomares, 2008). The service area used in network analysis is the region that covers all accessible streets (Balasubramani et al., 2016).

GIS analyses help us better comprehend where cycling infrastructure should be located and how it should be given priority (McNally et al., 2023). Veillette et al. (2018) reported that GIS-based approaches could be used for the selection of bicycle parking site locations. However, the determination of bicycle parking locations has received relatively less attention (Veillette et al. 2018). Öztaşkın and Levend (2023) examined access to bicycle parking points with the help of GIS. Overall, GIS-based spatial analysis and indicators provide important inputs for the location of bicycle stations (Bahadori et al., 2021). New bicycle parking locations can be determined by GIS, and it can help find suitable bike paths where decisions are consistent (Guler & Yomralioglu, 2021). Davidson (2023) noted the use of GIS in cycling infrastructure, especially in visualization. Güldü et al. (2024) indicate that there are many methods for bicycle facility planning, and GIS is important in determining bicycle infrastructure and routes. Bicycle planning is an important part of local transportation, and GIS offers a variety of tasks, including advanced analyses, mapping locations, and understanding the connectivity of bicycle networks (McNally et al., 2023). University campuses could be considered as small cities (Nagowah et al., 2019). Therefore, sustainable transportation and integration of different transportation modes are becoming increasingly important. In the literature, there are studies on the integration of different transportation modes in campus areas using Transportation Demand Management (TDM) (Dehghanmongabadi & Hoşkara, 2018; Balsas, 2003), investigating pedestrian behavior (Kaplan, 2015; Alhajaj, 2023), using observational Parking Walking Infrastructure Checklist (PWIC) and Pedestrian and Driver Behaviors Record (PDBR) methods (Alhajaj, 2023), using the Revealed Preferences (RP) and Stated Preferences (SP) surveys approach and qualitative and quantitative research methods (Dell'Olio et al., 2019). In this study, unlike other approaches, bicycle parking area location selections were evaluated for the integration of bicycle parking areas with other transportation modes using GIS and network analysis/convex hull.

GIS and network analysis have been used for a long time and continue to be used, especially in transportation. This study aims to contribute to the existing literature in terms of integrating the data obtained by network analysis with different transportation modes, as well as to investigate the adequacy of bicycle parks located in campus areas within walking distance. In this study, the accessibility of bicycle parking stations at Erciyes University in terms of walking distance was investigated and convex hull method is the originality of the study. The study aimed to identify the service areas of the bicycle parks, the buildings within Erciyes University, and, if any, the areas without service. Are the service areas of the bicycle parks in Erciyes University sufficient for pedestrian walking distance? It constitutes the problem subject of the study. The other problem of the study is whether different modes of transportation can be integrated with bicycle parks. The study hypothesizes that bicycle parks do not adequately serve all buildings on campus in terms of 500 meters of walking distance.

2. Material

This study investigated pedestrian access to the bicycle parking areas on the Erciyes University campus. The study aimed to identify the service areas of the bicycle parks, the buildings within Erciyes University, and if any, the areas without service. Given that measurements determined by radius or diameter are misleading and do not accurately indicate pedestrian movement, 500 m traveled on foot was accepted as the metric. Bicycle parking areas were determined by identifying the parking areas in the CitySurf-KayBis application. Then, the roads obtained from the Geofabrik website (Geofabrik, 2024), which is compatible with the OpenStreetMap app, were updated. In addition to the Geofabrik data (Geofabrik, 2024), the available pedestrian roads within the campus were identified, and the map was updated. The dirt roads that were not designated for pedestrian access were excluded from the calculation. The base map with a satellite image was obtained by adding the Google Earth map from the XYZ Tiles command in the QGIS software.

3. Method

A QGIS network analysis was performed in this study. Network analysis is used in many fields (Büke & Erturaç, 2016), and in GIS applications, it is related to the mathematical subdisciplines of graph theory and topology (Curtin, 2007). Ultimately, network analysis is used to calculate distances between points or nodes on a network, such as roads, paths, and so forth (Comber et al., 2008).

Zhang et al. (2019) created bicycle islands in Shanghai City by network analysis and determined the serviced area by convex hull method. Convex hull has also been used in different studies for bicycle networks (Liu et al., 2024; Putta & Furth, 2019).

Unlike studies that include GIS and network analysis approaches for bicycle parking areas, the use of buildings served by convex hulls in especially campus areas constitutes the original aspect of the study.

Herein, the center points of the bicycle parking stations were identified and marked as centroids. Then, the roads and services within a walking distance of 500 m of the center points were determined using the service area method in the network analysis. The network service area can be defined as the area that covers all accessible streets (Balasubramani et al., 2016), involving the calculation of coverage distances and thresholds on a straight line (Gutiérrez & García-Palomares, 2008). The areas covered by the roads in the service area were then determined using the Convex Hull tool in QGIS. Finally, the service area and buildings located within 500 m of the bicycle parking points were highlighted.

4. Results

First, bicycle parking points were determined based on their geographical center (centroid). In determining the centroids, the Centroids option was selected under the Geometry Tool tab in the Vector menu in the QGIS program interface. The interface to the program is shown in Figure 1.

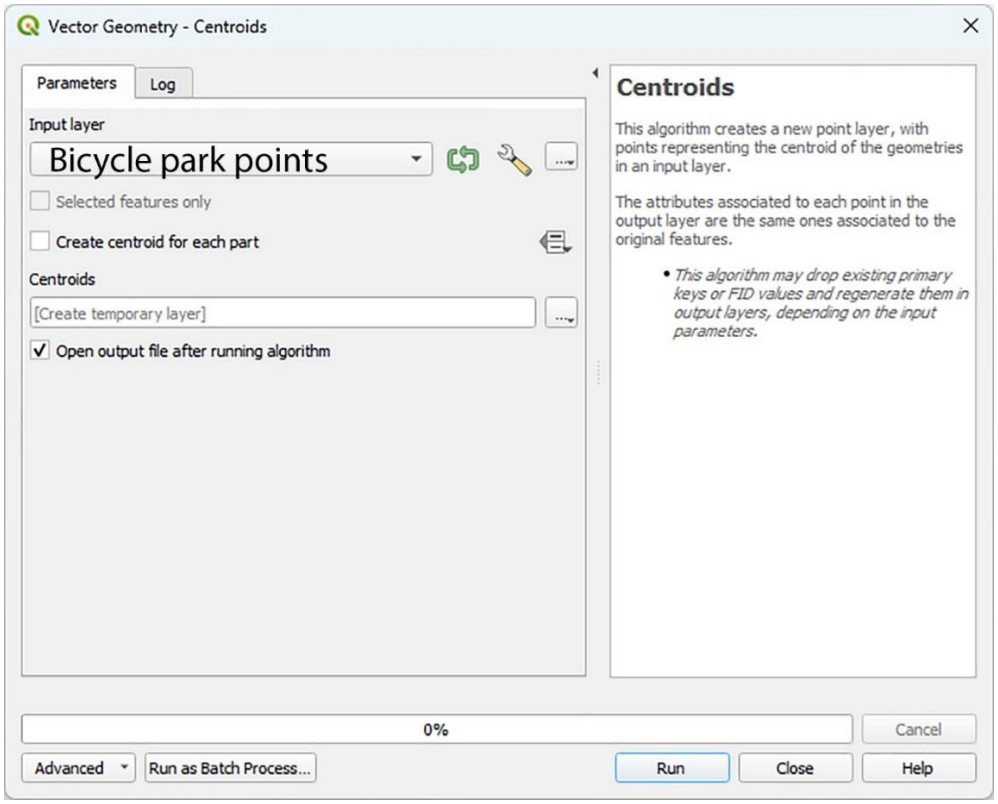


Figure 1. Determining the centroids

When bicycle parking points were selected as centroids in the program interface, four parking areas and centroids appeared. Figure 2 shows the bicycle parking points on the Erciyes University campus, represented as centroids.

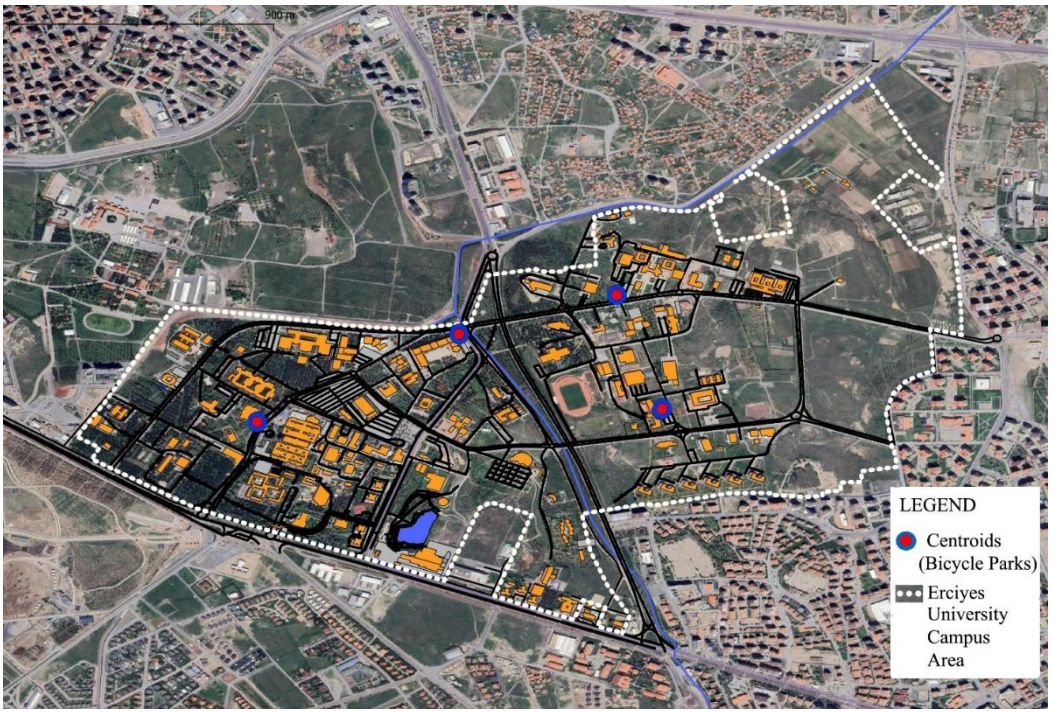


Figure 2. Bicycle parking points (centroids)

Network analysis was used to determine the areas that the bicycle parking points serve. The "service area" command was used in the Network Analysis menu of the QGIS program. After selecting the roads in the service area (from layer), we chose to calculate the shortest path, and the centroids with bicycle parks were selected in the vector layer as the starting points. Then, 500 m was selected as the travel cost because it was considered the maximum convenient walking distance after parking the bicycle. The program interface is shown in Figure 3.

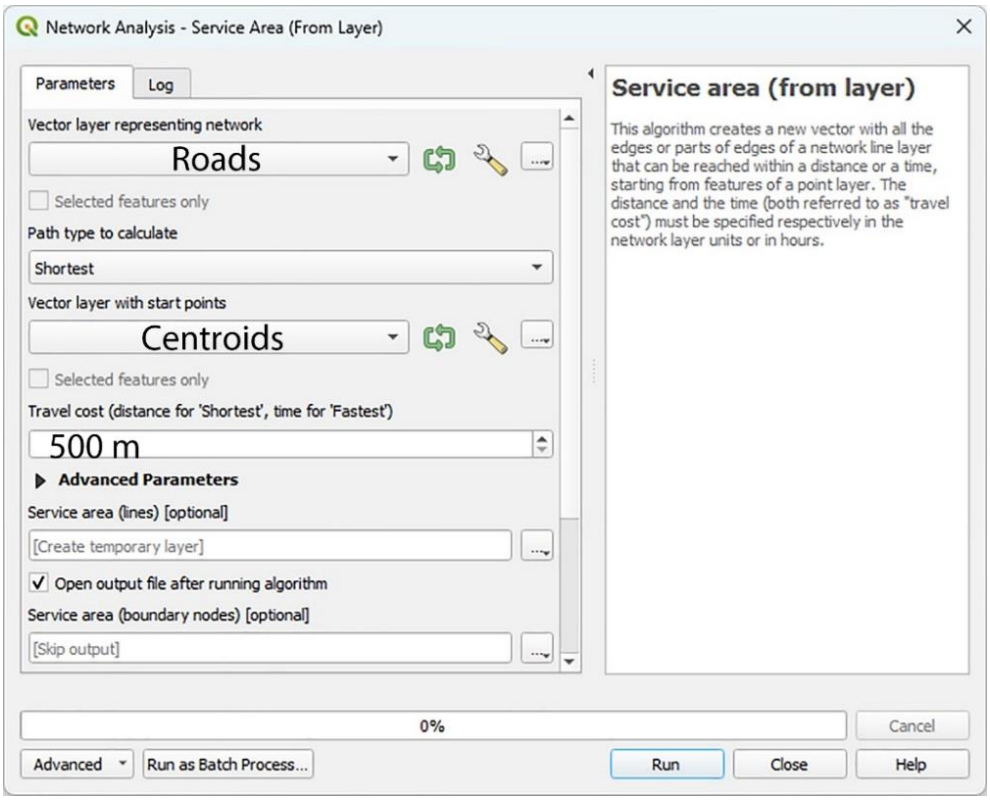


Figure 3. Service areas (from layer)

The results of the network analysis based on the data above are shown in Figure 4. Using the bicycle parks as centroids, the roads they serve within 500 m of walking are shown in red. The roads shown in black are the roads that are not within 500 m of walking from the bicycle parking points, indicating areas where bicycle parking does not serve.

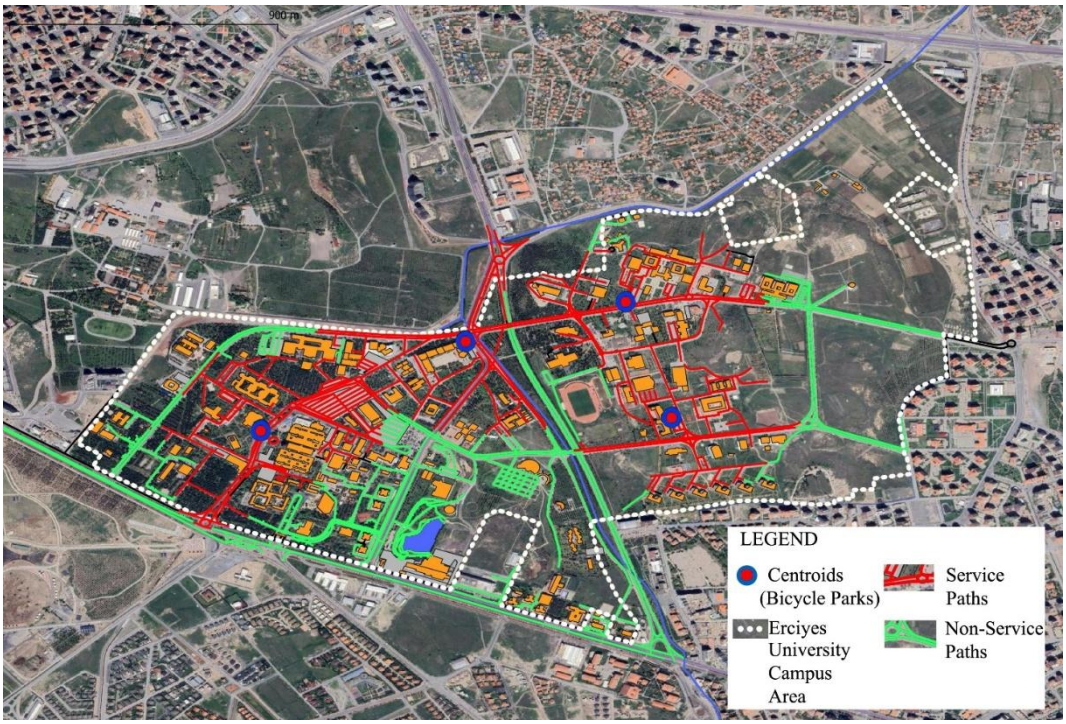


Figure 4. Roads that bicycle parking points serve (within 500 m)

The Convex Hull tool was used in the geoprocessing tools in the vector menu to show the service areas covered by the bicycle parking, as shown in Figure 5. Notably, some areas are not located within a walking distance of 500 m when bicycle parks are considered as the center.

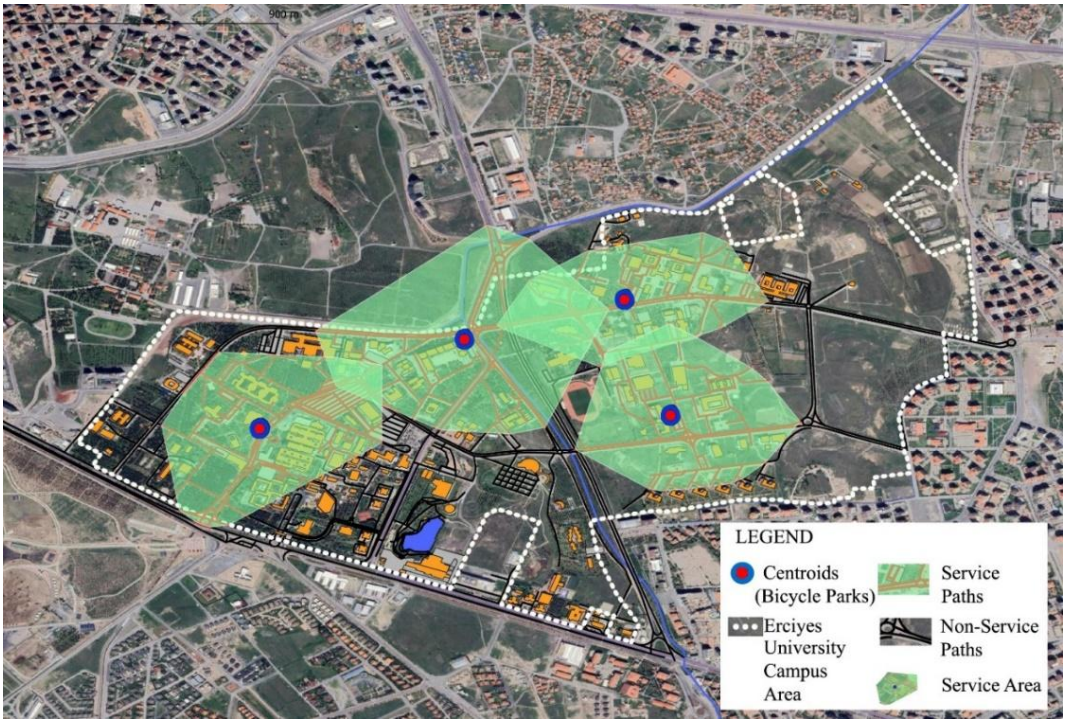


Figure 5. Service areas of the bicycle parking

The “select by attribute” command was used to select the buildings located within the 500 m of walking to bicycle parks. Figure 6 shows the steps required to select the buildings using the Convex Hull tool.

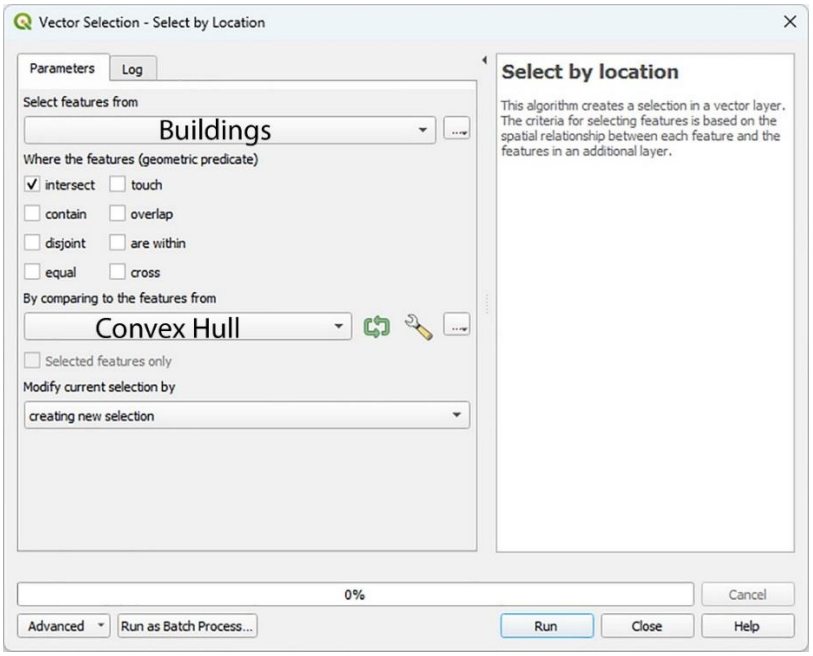


Figure 6. Selecting buildings in the campus area based on location

In the “select by attributes” command interface, in the “select features from” section, all structures on the campus were selected. In the next step, intersection points were selected as geometric predicates. In the “by comparing the features from the section”, the areas obtained using the Convex Hull tool were selected. Thus, the intersection areas of the structures and the service areas were determined. In Figure 7, the buildings located within 500 m of walking to the bicycle parks are shown in yellow. The buildings shown in orange are not accessible within 500 m of the bicycle parking areas.

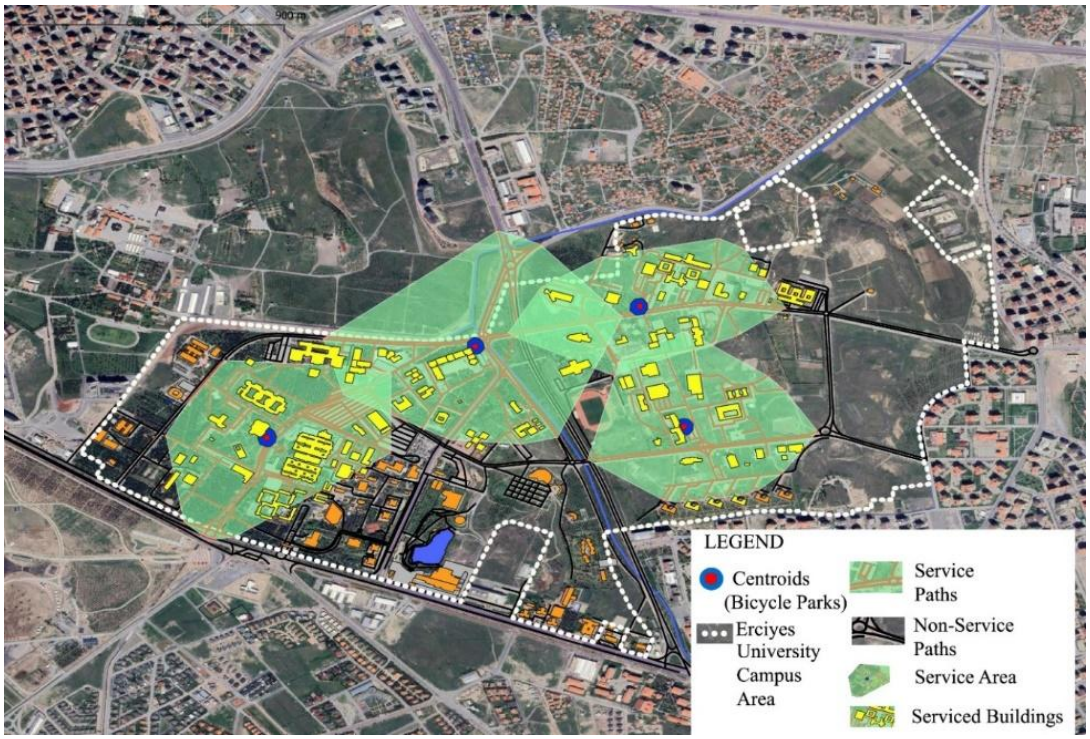


Figure 7. Service areas of the bicycle parking and the included buildings

The walkability study showed that there was no bicycle parking within 500 m of walking to the Faculty of Space and Aviation Sciences, Department of Information Technologies, Sabancı Cultural Center, Faculty of Medicine Classrooms, Old Lodgings, Erciyes University Congress and Cultural Center, Erciyes University Children's Hospital, Hasçelik Training and Research Center, swimming pool, the à la carte restaurant, and Erciyes University Hızıroğlu Training Hotel in the campus area.

5. Discussion and Conclusion

Previous studies have predominantly measured access and walking distance to bicycle parks by radius. In the case of Erciyes University campus, considering the access distance based on the radius or diameter does not accurately reflect the pedestrian movement, including buildings that are not actually accessible.

Figure 8 shows the service areas that can be obtained by determining the accessibility of bicycle parking points based on the radius. If the service areas are determined using the radius, all buildings on the campus may be considered accessible by bicycle parking, except for the Congress and Culture Center, the swimming pool, the à la carte restaurant, Erciyes University Hızıroğlu Training Hotel. However, we found that several more buildings within the campus cannot be accessed within a walking distance of 500 m from the bicycle parking points, as shown in Figure 7.

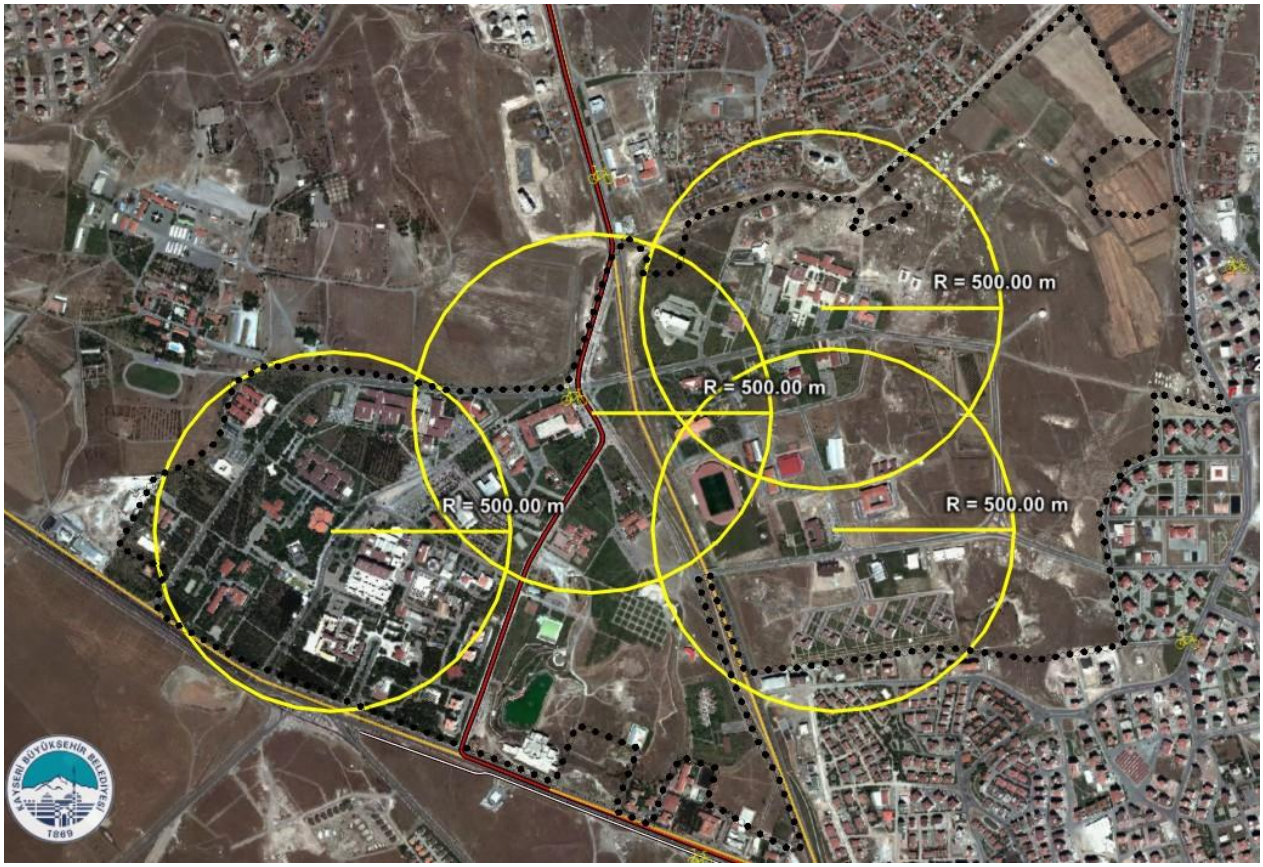


Figure 8. Determination of service areas by radius (Source: Prepared using the Kayseri Metropolitan Municipality CitySurf application)

The comparison of Figures 7 and 8 shows that network analysis provides more accurate results regarding the actual distances that pedestrians will be expected to travel from the bicycle parking.

Based on the results, one of the existing bicycle stations has been suggested to move to a different location, and three additional bicycle parks were proposed to cover the areas that do not receive service. Figure 9 shows the proposed bicycle parking points, the first of which is located at the Faculty of Aviation (west), and the second is integrated with the Erciyes University Hospitals tram stop (in the middle). The third is located near the Erciyes University Hızıroğlu Training Hotel and student dormitory (east).

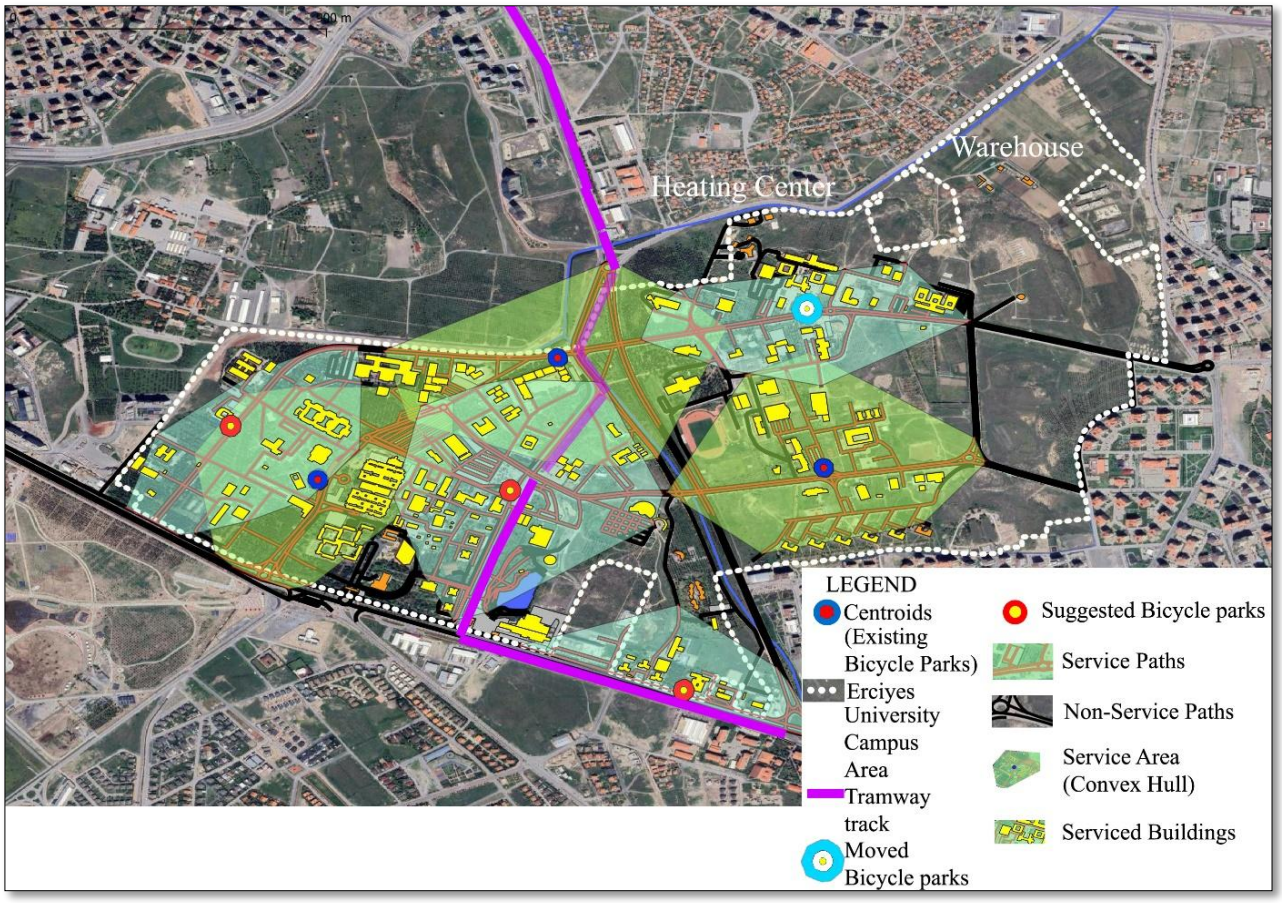


Figure 9. Proposed bicycle parking points and their service area

Figure 9 shows that the proposed bicycle parking points provide access to the entire campus within 500 meters of walking distance. These service areas are represented by the convex hull. Network analysis enables the determination of pedestrian access to encompass all the buildings on the campus, and it is seen that it provides more accurate results in pedestrian access than the radius shown in Figure 8.

The hypothesis that the accessibility of bicycle parks to all buildings is not sufficient is confirmed by this study. The bicycle parks, which constitute the research problem, were tested for providing sufficient access within walking distance of 500 meters, and it was concluded that they do not provide sufficient service to the entire campus within a pedestrian walking distance of 500 meters.

Arbis et al. (2016) have emphasized the importance of integrating bicycle parking points with different types of transportation points and public services in sustainable transportation planning. Ensuring sustainable campus space and greater flexibility among travelers is aimed especially by combining public transportation and bicycle parking station with the proposed bicycle park at the Erciyes University Hospitals tram stop. A bicycle park was proposed on the east side providing better access to the hotel visitors, and considering that the study is ultimately based on the campus area as a whole.

These proposed bicycle parking points aim to integrate bicycle parking with the main bus stops, tramway stops, and parking areas within the campus. Thus, people coming to the campus by different modes of transportation will be able to access the buildings within the campus by bicycle, and people coming to the campus by bicycle from outside the campus will have access facility to different modes of transportation. With the newly proposed bicycle parks, a more environmentally friendly campus environment will be offered as bicycle use will increase on campus, and increased bicycle use will also lead to a decrease in vehicle emissions. In addition, the increased use of bicycles will provide a campus area where people will interact socially compared to individual car use. Figure 10 shows the integration of existing and proposed bicycle parks with different modes of transportation. When Figure 10 is compared to Figure 4, it can be seen that the newly proposed bicycle parks provide access to all campus buildings except the warehouse and heating center within a 500-meter pedestrian walking distance.

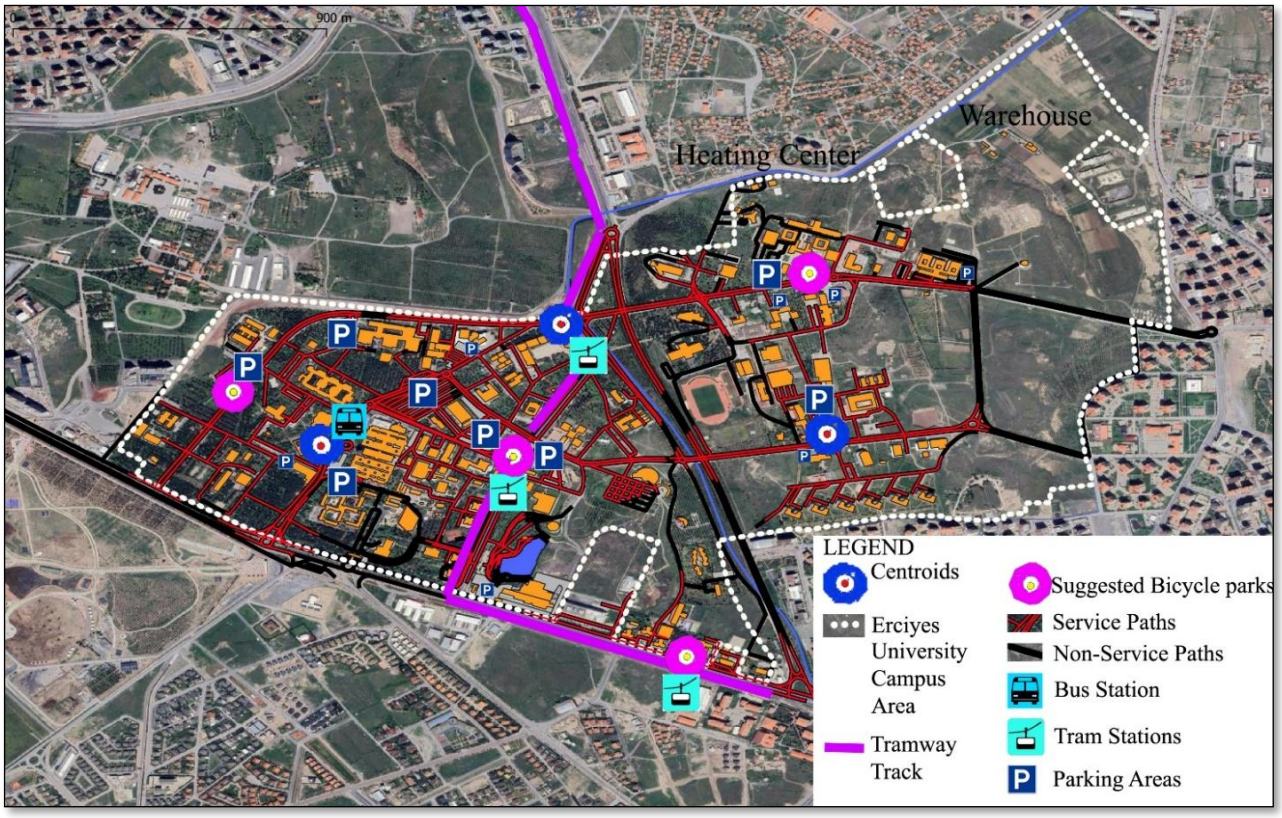


Figure 10. Roads that bicycle parking points serve and relations between the other transportation modes

Furthermore, bicycle parking that integrates with different modes of transportation may positively affect people's decision to choose cycling over the alternatives, considering the convenience and safety of local parking. In addition, if bicycle parking areas serve all buildings on the campus, this may increase bicycle use, which is one of the important points for a sustainable campus. Non-motorized access, specifically pedestrian and bicycle access, not only brings environmental benefits such as less greenhouse gas emission production and reduced acid rain but also less fossil fuel consumption and economic benefits. Moreover, bicycle use may promote more social interaction than individual car use. Ultimately, besides contributing to a sustainable campus, enhanced bicycle use may significantly contribute to the overall urban sustainability.

References

Ahmed, S., Ibrahim, R. F., & Hefny, H. A. (2017, June 22–23). *GIS-based network analysis for the roads network of the Greater Cairo area* [Conference presentation]. *International Conference on Applied Research in Computer Science and Engineering (ICAR'17)*, Baabda, Lebanon.

Alhajaj, N. (2023). Assessment of walkability of large parking lots on university campuses using walking infrastructure and user behavior as an assessment method for promoting sustainability. *Sustainability, 15*(9), Article 7203. https://doi.org/10.3390/su15097203

Arbis, D., Rashidi, T. H., Dixit, V. V., & Vandebona, U. (2016). Analysis and planning of bicycle parking for public transport stations. *International Journal of Sustainable Transportation, 10*(6), 495–504.

Bahadori, M. S., Gonçalves, A. B., & Moura, F. (2021). A systematic review of station location techniques for bicycle-sharing systems planning and operation. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(8), Article 554. https://doi.org/10.3390/ijgi10080554

Balasubramani, K., Gomathi, M., & Prasad, S. (2016). GIS-based service area analysis for optimal planning strategies: A case study of fire service stations in Madurai city. *Geographic Analysis of Union Geographic Information Technologists, 5*(2), 11–18.

Balsas, C. J. L. (2003). Sustainable transportation planning on college campuses. *Transport Policy, 10*(1), 35–49. https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00028-8

Black, W. R. (1996). Sustainable transportation: A U.S. perspective. *Journal of Transport Geography, 4*(3), 151–159. https://doi.org/10.1016/0966-6923(96)00020-8

Black, W. R. (1997). North American transportation: Perspectives on research needs and sustainable transportation. *Journal of Transport Geography, 5*(1), 12–19. https://doi.org/10.1016/S0966-6923(96)00042-7

Büke, C. O., & Erturaç, M. K. (2016). Ağ analiz yöntemiyle Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsünün incelenmesi ve web tabanlı sunumu. *Nature Sciences, 11*(4), 14–25.

Cabezas, H., Pawlowski, C. W., Mayer, A. L., & Hoagland, N. T. (2004). Sustainability: Ecological, social, economic, technological, and systems perspectives. In S. K. Sikdar, P. Glavič, & R. Jain (Eds.), *Technological choices for sustainability* (pp. 37–64). https://doi.org/10.1007/978-3-662-10270-1_3

Capodici, A. E., D'Orso, G., & Migliore, M. (2021). A GIS-based methodology for evaluating the increase in multimodal transport between bicycle and rail transport systems: A case study in Palermo. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(5), Article 321. https://doi.org/10.3390/ijgi10050321

Cinkiş, D., & Erdin, H. E. (2022). Kent merkezlerinde otopark talebinin belirlenmesine ve yönetilmesine ilişkin bir değerlendirme yöntemi: İzmir Alsancak. *Planlama, 32*(3), 408–423. https://doi.org/10.14744/planlama.2022.67984

Cohen, D., Sehgal, A., Williamson, S., Golinelli, D., McKenzie, T. L., Capone-Newton, P., & Lurie, N. (2008). Impact of a new bicycle path on physical activity. *Preventive Medicine, 46*(1), 80–81.

Comber, A., Brunsdon, C., & Green, E. (2008). Using a GIS-based network analysis to determine urban greenspace accessibility for different ethnic and religious groups. *Landscape and Urban Planning, 86*(1), 103–114.

Curtin, K. M. (2007). Network analysis in geographic information science: Review, assessment, and projections. *Cartography and Geographic Information Science, 34*(2), 103–111. https://doi.org/10.1559/152304007781002163

Daniella, D., & Dharma Wangsa, A. A. (2019). Leveraging integrated bike-sharing with existing Bus Rapid Transit (BRT) to reduce motor vehicle in Central Jakarta municipal. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning, 6*(1), 13–20.

Davidson, J. H. (2023). A socio-spatial approach to define priority areas for bicycle infrastructure using Covid-19 data. *Sustainable Cities and Society, 99*, Article 104883. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104883

Dehghanmongabadi, A., & Hoşkara, Ş. (2018). Challenges of promoting sustainable mobility on university campuses: The case of Eastern Mediterranean University. *Sustainability, 10*(12), Article 4842. https://doi.org/10.3390/su10124842

Dell'Olio, L., Cordera, R., Ibeas, A., Barreda, R., Alonso, B., & Moura, J. L. (2019). A methodology based on parking policy to promote sustainable mobility in college campuses. *Transport Policy, 80*, 148–156.

Eskind, A. (2024). *Finding suitable locations for bicycle and scooter parking facilities in San Francisco* [Master's thesis, The University of North Carolina at Chapel Hill]. https://doi.org/10.17615/yg03-6m32

Geofabrik. (2024). *OpenStreetMap data: Turkey* [Veri seti]. https://download.geofabrik.de/europe/turkey.html

Guler, D., & Yomralioglu, T. (2021). Bicycle station and lane location selection using open source GIS technology. In A. Mobasheri (Ed.), *Open source geospatial science for urban studies* (pp. 9–36). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58232-6_2

Gutiérrez, J., & García-Palomares, J. C. (2008). Distance-measure impacts on the calculation of transport service areas using GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design, 35*(3), 480–503. https://doi.org/10.1068/b33043

Güldü, E., Kuşçu-Şimşek, Ç., & Selim, S. (2024). A study on the improvement of bicycle transportation in Sivas city using hybrid multi-criteria model based network analysis. *Environment, Development and Sustainability*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04891-0

Handy, S. (2020). Is accessibility an idea whose time has finally come? *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 83*, Article 102319. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102319

Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems, 4*(5), 390–405. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5

Hosford, K., & Winters, M. (2018). Who are public bicycle share programs serving? An evaluation of the equity of spatial access to bicycle share service areas in Canadian cities. *Transportation Research Record, 2672*(36), 42–50. https://doi.org/10.1177/0361198118783107

Hunt, J. D., & Abraham, J. E. (2007). Influences on bicycle use. *Transportation, 34*(4), 453–470.

Iacono, M., Krizek, K. J., & El-Geneidy, A. (2010). Measuring non-motorized accessibility: Issues, alternatives, and execution. *Journal of Transport Geography, 18*(1), 133–140. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.02.002

Kaplan, D. H. (2015). Transportation sustainability on a university campus. *International Journal of Sustainability in Higher Education, 16*(2), 173–186. https://doi.org/10.1108/IJSHE-03-2013-0023

Koohsari, M. J., Sugiyama, T., Lamb, K. E., Villanueva, K., & Owen, N. (2014). Street connectivity and walking for transport: Role of neighborhood destinations. *Preventive Medicine, 66*, 118–122.

Lee, S., Lee, C., Nam, J. W., Abbey-Lambertz, M., & Mendoza, J. A. (2020). School walkability index: Application of environmental audit tool and GIS. *Journal of Transport & Health, 18*, Article 100880. https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100880

Li, A., Huang, Y., & Axhausen, K. W. (2020). An approach to imputing destination activities for inclusion in measures of bicycle accessibility. *Journal of Transport Geography, 82*, Article 102566. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102566

Liu, S. F., Jiang, M., Bai, S., & Liu, H. (2024). Research on automatic generation of park road network based on skeleton algorithm. *Applied Sciences, 14*(18), Article 8475. https://doi.org/10.3390/app14188475

Lowry, M., & Loh, T. H. (2017). Quantifying bicycle network connectivity. *Preventive Medicine, 95*, 134–140. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.12.007

McNally, D., Tillinghast, R., & Iseki, H. (2023). Bicycle accessibility GIS analysis for bike master planning with a consideration of level of traffic stress (LTS) and energy consumption. *Sustainability, 15*(1), Article 42. https://doi.org/10.3390/su15010042

McNeil, N. (2011). Bikeability and the 20-min neighborhood: How infrastructure and destinations influence bicycle accessibility. *Transportation Research Record, 2247*(1), 53–63. https://doi.org/10.3141/2247-07

Miller, E. J. (2018). Accessibility: Measurement and application in transportation planning. *Transport Reviews, 38*(5), 551–555. https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1492778

Miller, H. J. (1999). Potential contributions of spatial analysis to geographic information systems for transportation (GIS-T). *Geographical Analysis, 31*(4), 373–399. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1999.tb00991.x

Mora, R., Truffello, R., & Oyarzún, G. (2021). Equity and accessibility of cycling infrastructure: An analysis of Santiago de Chile. *Journal of Transport Geography, 91*, Article 102964. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.102964

Moudon, A. V., Lee, C., Cheadle, A. D., Garvin, C., Johnson, D., Schmid, T. L., Weathers, R. D., & Lin, L. (2006). Operational definitions of walkable neighborhood: Theoretical and empirical insights. *Journal of Physical Activity and Health, 3*(S1), S99–S117. https://doi.org/10.1123/jpah.3.s1.s99

Murphy, B., & Owen, A. (2019). Implementing low-stress bicycle routing in national accessibility evaluation. *Transportation Research Record, 2673*(5), 240–249. https://doi.org/10.1177/0361198119837179

Nagowah, S. D., Ben-Sta, H., & Gobin-Rahimbux, B. A. (2019, October 14–17). *An ontology for an IoT-enabled smart parking in a university campus* [Conference presentation]. 2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Casablanca, Morocco.

Noland, R. B., & Kunreuther, H. (1995). Short-run and long-run policies for increasing bicycle transportation for daily commuter trips. *Transport Policy, 2*(1), 67–79. https://doi.org/10.1016/0967-070X(95)93248-W

Nyerges, T. L. (1995). Cognitive issues in the evolution of GIS user knowledge. In T. L. Nyerges, D. M. Mark, R. Laurini, & M. J. Egenhofer (Eds.), *Cognitive aspects of human-computer interaction for geographic information systems* (pp. 61–74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0103-5_6

Öztaşkın, D., & Levend, S. (2023). The accessibility of public transportation stops: Istanbul case. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS, 4*(2), 301–318. https://doi.org/10.48123/rsgis.1299707

Pritchard, R., Frøyen, Y., & Snizek, B. (2019). Bicycle level of service for route choice—A GIS evaluation of four existing indicators with empirical data. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 8*(5), Article 214. https://doi.org/10.3390/ijgi8050214

Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science, 14*(3), 681–695. https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5

Putta, T., & Furth, P. G. (2019). Method to identify and visualize barriers in a low-stress bike network. *Transportation Research Record, 2673*(9), 452–460. https://doi.org/10.1177/0361198119847617

Rybarczyk, G., & Wu, C. (2010). Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. *Applied Geography, 30*(2), 282–293. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.08.005

Saghapour, T., Moridpour, S., & Thompson, R. G. (2017). Measuring cycling accessibility in metropolitan areas. *International Journal of Sustainable Transportation, 11*(5), 381–394.

Veillette, M. P., Grisé, E., & El-Geneidy, A. (2018). Park 'n' roll: Identifying and prioritizing locations for new bicycle parking in Québec City, Canada. *Transportation Research Record, 2672*(36), 73–82.

Wang, K., Akar, G., & Chen, Y. J. (2018). Bike sharing differences among Millennials, Gen Xers, and Baby Boomers: Lessons learnt from New York City's bike share. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 116*, 1–14.

Yedla, S. (2015). *Urban transportation and the environment*. Springer.

Zhang, Y., Lin, D., & Liu, X. C. (2019). Biking islands in cities: An analysis combining bike trajectory and percolation theory. *Journal of Transport Geography, 80*, Article 102497. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102497

Zhuang, C., Li, S., & Liu, X. (2025). Unveiling disparities in bicycling mobility patterns across socioeconomic statuses: A framework for identifying user profiles in dockless bike-sharing systems. *Annals of the American Association of Geographers, 115*(4), 876–898. https://doi.org/10.1080/24694452.2025.2463508

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 144–167
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Uzaktan Algılama Görüntülerinden Bina Çıkarımında FPN-ResNeXt50 ve VGG16-UNet Modellerinin Karşılaştırılması

Comparison of FPN-ResNeXt50 and VGG16-UNet Models for Building Extraction from Remote Sensing Images

Serhat Şenses[1]*, Emine Tanır Kayıkçı[2]

[1]*Amasya Üniversitesi, Amasya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 05000, Amasya/Türkiye.*
[2]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Serhat Şenses
serhat.senses@amasya.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1622130

Yayın süreci
Geliş tarihi: 17.01.2025
Kabul tarihi: 11.09.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Uzaktan algılama görüntülerinden binaların çıkarılması, arazi kullanımı, iklim ve çevre araştırmaları, afet izleme ve önlemesi imar uygulamaları, gibi çok çeşitli alanlar için gerekli olan bir bilgilerin elde edilmesinde önemli bir veri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, kentsel yerleşim alanları ve kırsal yerleşim alanlarını içeren farklı şehir planlama modellerine sahip Şikago, Austin, Tirol, Viyana ve Kitsap şehirlerine ait 5 farklı kent dokusu için görüntü bölütleme ve sınıflandırma uygulaması yapılmıştır. Görüntülerden binaların çıkarılması için farklı yapay sinir ağları ile bölütleme algoritmaları kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Inria veri seti üzerinde eğitilmiş iki farklı modelin binaların çıkarımında elde ettikleri başarı oranları incelenmiştir. Omurga olarak ResNeXt50 ve FPN mimarisi birlikte kullanılarak bina çıkarımı yapılmış ve sonuçları U net omurgası ile VGG16 mimarisi kullanılarak elde edilen çıkarım sonuçları ile karşılaştırılmıştır. ResNeXt50 ve FPN modeli test verileri üzerinde %96,74 doğrulukla en iyi çıkarım sonucunu vermiştir.

Anahtar kelimeler: *Derin öğrenme, Yapay sinir ağları, Bölütleme, Sınıflandırma*

Abstract

Extraction of buildings from remote sensing images is an important data in obtaining information required for a wide range of fields such as land use, climate and environmental research, disaster monitoring and prevention, and zoning applications. In this study, image segmentation and classification applications were performed for 5 different urban textures belonging to the cities of Chicago, Austin, Tirol, Vienna and Kitsap, which have different urban planning models including urban and rural settlements. The results obtained by using different artificial neural networks and segmentation algorithms to extract buildings from images were compared. The success rates of two different models trained on the Inria dataset in extracting buildings were examined. Building extraction was performed by using ResNeXt50 and FPN architecture together as the backbone and the results were compared with the extraction results obtained by using the U net backbone and VGG16 architecture. The ResNeXt50 and FPN models gave the best extraction result with 96.74% accuracy on the test data.

Keywords: *Deep learning, Artificial neural networks, Segmentation, Classification*

1. Giriş

Uzaktan algılama görüntülerinden özellik ve/veya nesne çıkarımı; çevre ve iklim modelleme, topografik haritalama, afet izleme ve değerlendirme, kentsel tasarım, coğrafi bilgi sistemleri, tarım uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda uygulamaları olan bir işlemdir. Bu işlem; görüntünün içeriği, arka planı, dokusu, verilerin kalitesi gibi faktörlere bağlıdır. Binalar da yerleşim planı, arazi kullanımı, kentsel doku özelliklerini etkileyen temel görüntü elemanlarındandır. Literatürde görüntülerden binaların belirlenmesi için, geçmişten günümüze kadar manuel, yarı otomatik ve otomatik

olmak üzere birçok yöntem önerilmiştir. Görüntülerden manuel bina çıkarımı, zaman alan ve yorumlama hatalarına açık olan bir yöntemdir. Otomatik bina çıkarımı yöntemleri son yıllarda çok ilgi çekmiş ve yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak uzaktan algılama görüntülerindeki nesne ve arka plan kontrastı, bitişik bina sınırlarındaki ayrım zorlukları ve görüntüdeki gürültü karmaşıklığı gibi sorunlar nedeniyle hala çözümlenmesi zor olan bir problemdir.

Uzaktan algılama görüntülerinden binaların çıkarımı için birçok yöntem önerilmiştir. Fradkin vd. (2001), farklı bakış açılarından çekilmiş hava fotoğrafı kullanarak bina cephelerinin yeniden oluşturulmasını sağlayan bir yöntem önermişlerdir. Shackelford ve Davis (2003), yüksek çözünürlüklü multispektral görüntülerden kentsel arazilerin sınıflandırılması için, bulanık piksel tabanlı yöntemlerle nesne tabanlı yöntemlerin kullanıldığı hibrit bir yöntem önermiştir. Jin ve Davis (2005), yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden otomatik bina çıkarımı için spektral, yapısal ve bağlamsal bilgiyi kullanan bütünleştirilmiş bir çözüm önermişlerdir.

Lari ve Ebadi (2007), uzaktan algılama görüntülerinden otomatik bina çıkarımı için sinir ağı tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada önce görüntü bölgelere ayrılmış, daha sonra her bölge için öncül özellikler çıkarılmış ve binaların belirlenmesi için üç katmanlı bir perception (algılama) ağı eğitilmiştir. Türker ve San(2010), tarafından yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden dikdörtgen ve dairesel şekilli binaları çıkarılması için Hough dönüşümü kullanan bir çalışma yapılmıştır. Benali vd. (2014), yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden kentsel alanların çıkarımı için, yarı otomatik bir yöntem sunmuşlardır. Zheng ve Wang (2014), çalışmalarında uzaktan algılama görüntülerinden anlamsal bölütleme yapmak amacıyla, nesne tabanlı bir Markov rastgele alan modeli (OMRF) kullanmışlardır.

Yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin elde edilmesi ve nesne tabanlı yaklaşımların piksel tabanlı yaklaşımlara göre üstünlüğü nedeniyle, nesne tabanlı yöntemler özellik çıkarımı için sıklıkla kullanılmaya başlamışlardır (Whiteside vd., 2011; Attarzadeh & Momeni, 2012), yüksek çözünürlüklü görüntülerden binaları tanıma ve belirleme işlemini otomatik olarak yapan nesne tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Yöntemlerini Quickbird uydu görüntüleri üzerinde test etmişlerdir. Khatriker ve Kumar (2018), yüksek çözünürlüklü WorldView-2 görüntülerinden çoklu çözünürlüklü bölütleme ve kural tabanlı özellik çıkarımını kullanan yarı otomatik bir yöntem kullanmışlardır. Prathiba vd. (2020), çalışmalarında binaların belirlenmesi için nesne tabanlı bir yöntem kullanmışlar ve görüntüyü, piksellerin mekânsal ve spektral benzerliğine göre birçok bileşene ayırmışlardır. Daha sonra nesneleri en yakın komşuluk sınıflandırıcısı kullanılarak sınıflandırılmıştır.

Bina çıkarımı için, piksel tabanlı yöntemler, nesne tabanlı yöntemler, makine öğrenmesi yöntemleri ve derin öğrenme yöntemleri önerilmiştir. Piksel tabanlı yöntemler, spektral değerleri kullanarak görüntüdeki nesneleri ayırt eder. Nesne tabanlı yöntemler, tüm görüntünün farklı boyutlardaki nesnelere ve yamalara (patch) bölünmesini sağlar. Bu nesneler daha sonra spektral, dokusal ve bağlamsal özellikleri göz önüne alınarak sınıflandırılırlar. Makine öğrenmesi yöntemleri, özelik çıkarıcılar ve sınıflandırma algoritmalarını kullanarak görüntüden bilgilerin çıkarılmasını sağlar. Derin öğrenme yöntemlerinden olan evrişimsel sinir ağları (CNN) ise, birden fazla özelliğin çıkarımında ve sınıflandırılmasında evrişim katmanlarının kombinasyonunu kullanır.

Derin öğrenme ağları, çok katmanlı bir ağ yapısı oluşturmak için bazı eğitim işlemleri ve örneklem verileri kullanan bir makine öğrenim sürecidir (Bengio, 2009). Bir tür derin öğrenme tekniği olan evrişimli sinir ağları (CNN), sınıflandırma için gerekli özellikleri otomatik olarak öğrenebilir ve hassas özellik eşleştirmesi yapabilirler. CNN'lerin uzaktan algılamanın görüntü işleme uygulamalarında kullanımıyla; sınıflandırma, özellik çıkarma ve nesne belirleme alanlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Guo vd., 2017; Yao vd., 2017; Tejeswari vd., 2022).

CNN'lerin yanı sıra, üretken çekişmeli ağlar (GANs), görüntü transformatörleri (ViT), Grafik evrişim ağları (GCNs), YOLO ağları vb. de bu amaçla kullanılmışlardır. Zhong vd. (2016), yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verilerinden binaları çıkarmak için, tamamen evrişimli ağları (FCN) kullanarak, model performansının; girdi verilerinin boyutlarından, filtre adım sayısından, öğrenme oranından, eğitim süresinden ve ince ayardan nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Li vd. (2019), çok yüksek çözünürlüklü görüntülerden binaların çıkarımı için derin öğrenme temelli semantik bölütleme yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarında Paris, Şangay, Las Vegas ve Hartum şehirlerindeki binaların çıkarımı için U-Net modeli kullanılmışlardır. Ps ve Aithal (2023) tarafından, uzaktan algılama görüntülerinden binaları çıkarmak için, evrişimli sinir ağlarını kullanan bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Modeli, metropol alanında bulunan farklı bölgelerden görüntüler üzerinde eğiterek, az yapılaşmanın olduğu alanlarla, yoğun yapılaşma alanlarındaki farklı binaların belirlenmesini amaçlamışlardır. Nurkarim vd. (2023), derin öğrenme yöntemleri kullanarak binaların çıkarımı ve çıkarılan binaların sayımı ile ilgili bir yöntem önermişlerdir. Yöntemleri ile bölütlemeyi, evrişimli sinir ağları ile birleştirerek WorldView-3 uydu görüntülerinden nesne algılama modeli geliştirmişlerdir. Srivastava vd. (2024), hem geleneksel yöntemleri hem de derin öğrenme yöntemlerini kullanarak bina çıkarımı için kullanılan farklı modelleri tartışmışlardır. Bu çıkarım yöntemlerinin karşılaştığı bazı zorlukları da incelemişlerdir. Li vd. (2024), erken dönem bina çıkarımı uygulamaları ile günümüzde kullanılan optik görüntülerden ve SAR görüntülerinden elde edilen bina çıkarımlarını inceleyerek ayrıntılı bir analiz sunmuşlardır. Çalışmalarında binaların çıkarımı için bina özelliklerini altı ana gruba ayırmışlardır. Binaların arazideki izlerinin belirlenmesi, bina cephelerinin bölütlere (segment) ayrılması, çatı segmentlerinin tanımlanması, bina yüksekliklerinin tahmini, bina türlerinin sınıflandırılması ve binaların zamana göre değişiminin belirlenmesi, üzerinde durdukları özelliklerdir.

FPN-ResNeXt50 modeli, çok ölçekli öznitelik haritalarının birleşimini destekleyen mimarisiyle nesne sınırlarının hassas çıkarımı açısından avantaj sağlamaktadır. VGG16-UNet ise, tıbbi ve coğrafi bölütleme problemlerinde yaygın kullanılan temel bir yapı olup literatürde sıklıkla referans alınan klasik modellerdendir (Ismail vd., 2024; Kaur & Gandhi, 2019; Bansal & Singh, 2023; Sewada & Goyal, 2025). Bu çalışmada, biri daha güncel ve derin (FPN-ResNeXt50), diğeri daha sade ve geleneksel (VGG16-UNet) iki mimari seçilerek karşılaştırma yapılmıştır. FPN-ResNeXt50 ve VGG16-UNet modelleri, Inria veri seti (https://github.com/qubvel/segmentation_models) kullanılarak eğitilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Veri Seti

Çalışmada, Maggiori vd. (2017) tarafından etiketlenmiş Inria Hava Görüntü veri seti kullanılmıştır. Veri seti 405 km^2 eğitim, 405 km^2 test verisi olmak üzere toplam 810 km^2 kapsama alına sahiptir. Eğitim veri seti (1) bina sınıfı ve (2) bina olmayan sınıf olmak üzere belirlenmiş iki semantik sınıf için gerçek yer görüntü verileriyle, piksel başına 30 cm'lik bir uzamsal çözünürlüğe sahip orto-foto renkli görüntülerden oluşur. Görüntüler, (1) yoğun yerleşim planına sahip bölgelerle, (2) daha az yoğun yerleşime sahip kırsal bölgelerden oluşmuştur. Veri seti, Austin, Şikago, Kitsap, Batı Tirol ve Viyana bölgelerinin her biri için 5000x5000 piksel boyutlu her biri 25000000 piksel içeren 36 renkli görüntü içermektedir. Bu şekilde görüntüler 405 km$^{2'}$ lik bir alanı kapsamakta ve toplam 180 görüntüden oluşmaktadır. Gerçek yeryüzü görüntüleri, 225 (bina sınıfı) ila 0 (bina olmayan sınıf) değerlerine karşılık gelen 180 adet, tek bant görüntüsüdür. Eğitim veri seti yazar tarafından geliştirilen Python programı ile modellerin eğitilmesinde kullanılmıştır. Çalışma dönemi itibariyle GPU erişimi mümkün olmadığından eğitim yalnızca çok çekirdekli CPU altyapısı (paralel 4 CPU 96 çekirdekli, 128 GB RAM) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durum eğitim süresini artırmış olsa da modelin doğruluk açısından başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Modellerin eğitimi sunucu bilgisayarda 27 gün sürmüştür.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan eğitim ve test veri setleri

Eğitim Seti	Yama Sayısı	Alan	Test Seti	Yama Sayısı	Alan
Austin	36	81 km^2	Bellingham	36	81 km^2
Şikago	36	81 km^2	San Francisco	36	81 km^2
Kitsap County	36	81 km^2	Bloomington	36	81 km^2
Viyana	36	81 km^2	Insbruck	36	81 km^2
Batı Tirol	36	81 km^2	Doğu Tirol	36	81 km^2
Toplam	180	405 km^2	**Toplam**	180	405 km^2

Test seti olarak da, aynı sayıda olmak üzere, Bellingham, Bloomington, Innsbruck, San Francisco ve Doğu Tirol bölgelerini içeren görüntü bölgeleri kullanılmıştır. Model performansı, birleşim üzerinde kesişim (Intersection over Union, IoU) ve Doğruluk (Accuracy) ölçütleriyle değerlendirilmiştir. Eğitim bölgeleri ve bölgelerin özelliklerine ait bilgilerEk1'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

IoU (Intersection over Union), modelin tahmin ettiği bölgenin gerçek bölgeyle ne kadar örtüştüğünü ölçen bir metriktir ve bölütleme (segmentation) modellerinin başarımını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. IoU kavramı genellikle nesne tespiti (object detection) alanında çift tespit (duplicate detection) riskini azaltmak için kullanılır. Ancak bölütleme (segmentation) bağlamında, IoU farklı bir şekilde yorumlanır ve modelin tahmin ettiği maskenin gerçek maske ile örtüşme oranını verir. IoU, şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$IoU = \frac{GT \cap PM}{GT \cup PM} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \tag{1}$$

Burada, GT, gerçek arazi değeri; PM, tahmin edilen değer; TP, gerçek pozitif (Bina olarak sınıflanan gerçekte de bina olan piksel sayısı); FP, yanlış pozitif (Bina olarak sınıflanan gerçekte bina sınıfına ait olmayan piksel sayısı); FN, yanlış negatif (Bina olarak sınıflanmayan ancak gerçekte bina sınıfına ait olan piksel sayısı) olarak alınmıştır. Doğruluk ise doğru sınıflandırılmış piksellerin yüzdesini temsil eder ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{2}$$

Daha sonra, eğitim sırasında en iyi performans gösteren modeli seçebilmek için bir 'birleşik' ölçüt kullanılmıştır. Bu ölçüt IoU ve Doğruluk değerlerinin ortalaması alınarak (3) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$Birleşik\ \text{Ölçüt} = \frac{(IoU + Doğruluk)}{2} \tag{3}$$

Birleşik ölçütte doğruluk değeri ile IoU değeri eşit ağırlıktadır. Ancak IoU değeri sonuç metriklerinde daha belirgin bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, (2) nolu eşitlikte yer alan TN (True Negatif) teriminin ölçütlerin hesaplanmasında, sonuçlara etki ağırlığının, diğer terimlere göre daha fazla olmasıdır. Bu durum, IoU değerinin görüntü bölütleme işlemlerinde tercih edilmesi nedeniyle, birleşik ölçütün değerlendirme kriteri olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır (Milosavljević, 2020).

Inria veri setinin işlenmesi için uygulanan yöntem, görüntü hazırlama, anlamsal bölümleme için derin Evrişimli Sinir Ağları (CNN) topluluğunun uygulanması ve eğitimi ve son olarak da test veri seti görüntü bölgeleri için bina alanlarını tahmin etmektir.

2.2.Görüntü Hazırlama

Derin anlamsal (semantik) bölütleme yöntemi kullanılarak uzaktan algılama görüntülerinin işlenmesi için ilk adımda, orijinal veriler ve orto-foto gerçek yer görüntülerinden (Şekil 1-Şekil 5), belirlenen boyutlarda bir dizi görüntü yaması (patch) çıkarılmıştır. Burada "yama" terimi, belirli bir boyutta kesilmiş, analiz edilmek üzere oluşturulmuş küçük görüntü parçalarını ifade etmektedir.

Görüntülerin farklı bölümlerinin (örneğin, Tirol 1-6) yamalar içinde çeşitli konumlarda yer almasını sağlamak amacıyla, yamalar belirli bir bindirme oranında üst üste gelecek şekilde ayarlanmıştır.

Bu kapsamda, 5000x5000 piksel boyutundaki veri seti görüntülerinden 512x512 piksel boyutunda yamalar (patches) oluşturulmuş ve minimum %30 örtüşme oranı sağlanmıştır. Bu yöntemle, 19x19 piksel boyutunda toplam 361 adet görüntü yaması ve aynı sayıda orto-foto görüntü yaması elde edilmiştir. Yığın (Batch)/ bölme uyumunu sağlamak ve düzgün kümelenme oluşturmak amacıyla, yamalardan 1 tanesi çıkarılmış ve değerlendirmeye alınmamıştır. Bu çıkarma işleminde, 19x19 boyutlu ızgaranın görüntü sınırında ürettiği dolgulu yamalardan (padded patch) en fazla dolguya sahip olan yama (4488, 0) seçilerek değerlendirme dışı bırakılmıştır. Böylece uzamsal dağılım da korunmuştur. Bu işlem sonucunda 360 adet yama ile işleme devam edilmiştir.

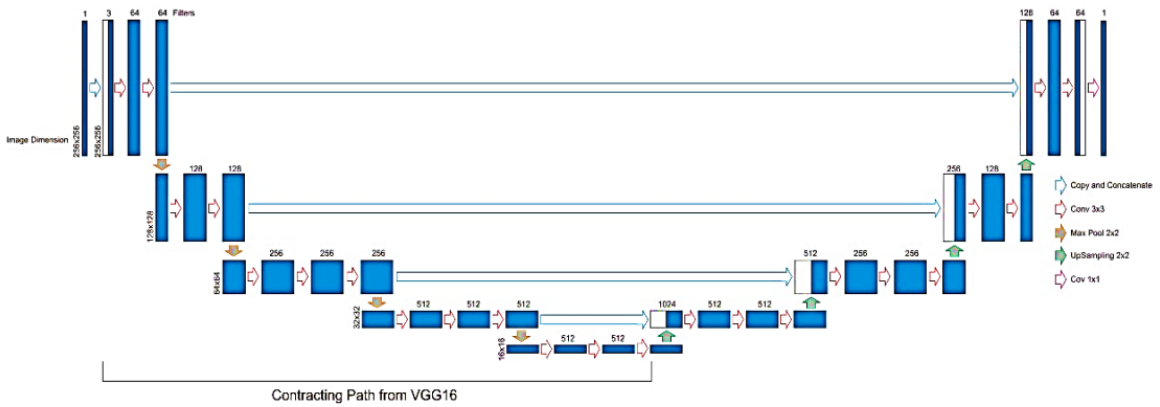
Örtüşme işleminin yanı sıra, eğitim veri kümesinin çeşitliliğini artırmak amacıyla veri büyütme (data augmentation) tekniği uygulanmıştır. Bu amaçla, her bir yama görüntüsü yatay ve dikey olarak çevrilmiş, ayrıca sırasıyla 90, 180 ve 270 derece döndürülerek her orijinal görüntünün beş farklı varyasyonu oluşturulmuştur. Ancak, model ölçek ve dönme değişmezliğine (scale-rotation invariance) sahipse, bu tür dönüşümlerin modelin performansına etkisi sınırlı olabileceği bilindiğinden, model analiz edilmiştir. Analiz sonucunda modelin ölçek ve dönme değişimine duyarlı olduğu görülmüştür.

2.3 Modelin Uygulanması ve Eğitimi

Çalışmada Python programlama dili ve Keras Kütüphanesi kullanılmıştır. Derin anlamsal bölütleme modellerinin uygulanması için Pavel Yakubovskiy'nin Github kitaplığı (https://github.com/qubvel/segmentation_models), bölütleme mimarisi için Keras tabanlı bir Pyhton kitaplığı ve ImageNet omurgası kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan başlıca hiperparametreler ve bunlara ait değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan başlıca hiperparametreler ve bunlara ait değerler

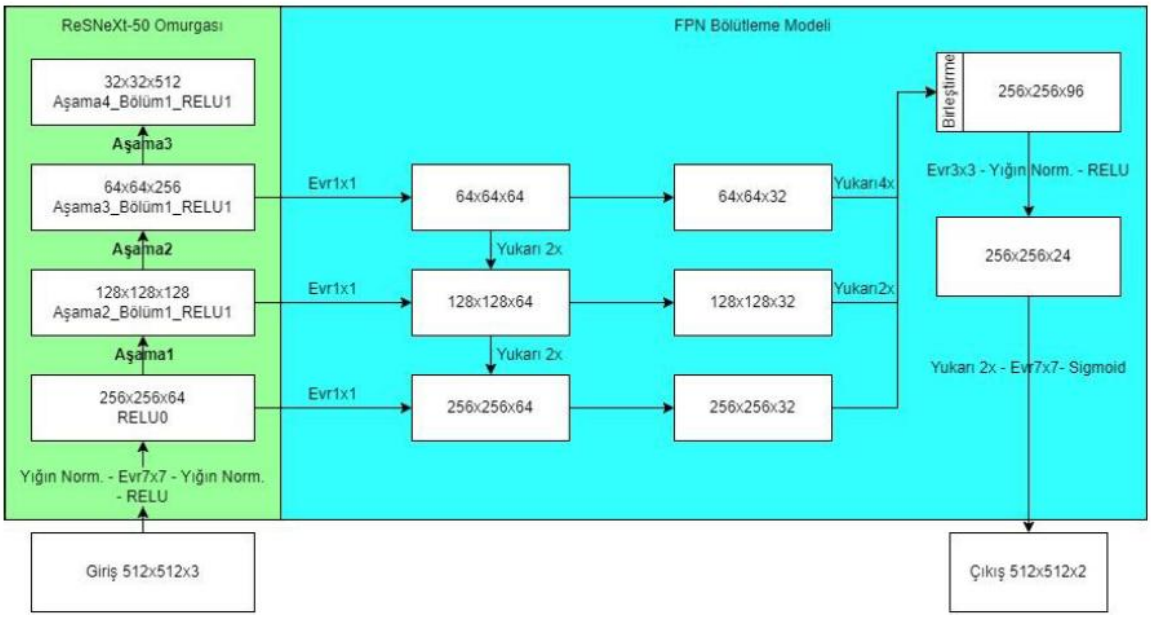
Hiperparametre	**Değer**
Yığın Boyutu	16
Başlangıç Öğrenme Oranı	0.0001
Öğrenme Oranı Ölçeği	0.01
Öğrenme Oranı Sönümlenme Değeri	0.6
Epok (öğrenme tur sayısı)	5
Önyargı(bias)	0.45
Örtüşme(overlap)	%30
Aktivasyon Fonksiyonu	ReLU
Kayıp Fonksiyonu	Crossentropi+Dice loss
Sınıflandırıcı	Softmax



Şekil 1. U-Net-VGG16 mimarisi (Pravitasari vd., 2020)

Bu mimari, VGG16 tabanlı bir U-Net modelinin görüntü bölütleme (segmentation) görevine uyarlanmış yapısını temsil etmektedir. Model, simetrik bir encoder-decoder (daralan ve genişleyen yol) yapısına sahiptir. Giriş görüntüsü 512×512 boyutunda olup, modelin daralan yolu (contracting path) klasik VGG16 mimarisi ile uyumlu olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu bölümde, 3×3 evrişimsel katmanlar ve 2×2 maksimum havuzlama (max pooling) işlemleri aracılığıyla öznitelikler çıkarılırken boyutsal küçültme gerçekleştirilir. Her evrişim bloğunda filtre sayısı artmakta ve 512x512 boyutunda öznitelik haritalarına ulaşılmaktadır. Bu işlem, modelin daha soyut ve anlamlı öznitelikler öğrenmesini sağlar.

Genişleyen yol (expanding path) ise yukarı örnekleme (upsampling) ve evrişimsel işlemlerle karakterizedir. Bu aşamada, encoder katmanlarında elde edilen öznitelik haritaları, decoder tarafında uygun seviyelerde tekrar kullanılarak (skip connections – kopyala ve birleştir) hem konumsal hem de anlamsal bilgi korunur. Bu strateji, modelin bölütleme sınırlarını daha hassas bir şekilde öğrenmesini sağlar. Her bir yukarı örnekleme adımında 2×2 ölçekli büyütme yapılır ve ardından 3×3 evrişim uygulanarak detayların yeniden yapılandırılması sağlanır. Son katmanda 1×1 evrişim uygulanarak, çıktı istenilen sınıf sayısına (örnekte 1 kanal) indirgenir. Bu yapı, özellikle görüntü analizi gibi detaylı bölütleme gerektiren uygulamalarda yüksek doğrulukla sonuç üretmek üzere tasarlanmıştır.



Şekil 2. ResNeXt50-FPN mimarisi (Milosavljević, 2020)

Sunulan mimari şeması, görüntü bölütleme amacıyla tasarlanmış ve ResNeXt-50 omurgası ile yapılandırılmış bir Feature Pyramid Network (FPN) modelinin detaylı yapısını göstermektedir. Modelin girdi boyutu 512×512×3 olup, bu giriş görüntüsü ilk olarak ResNeXt-50 mimarisi temel alınarak oluşturulan bir omurga yapısından geçirilir. Bu omurga, derin evrişimsel katmanlardan oluşmakta ve çok ölçekli özelliklerin çıkarımına olanak sağlamaktadır. Aşamalı olarak sırasıyla 256×256×64, 128×128×128, 64×64×256 ve 32×32×512 boyutlarında öznitelik haritaları üretilmektedir.

Bu çok ölçekli öznitelikler, FPN bölümleme modülüne aktarılmakta ve her seviyede 1×1 evrişim uygulanarak kanal sayıları azaltılmaktadır. Ardından, bu öznitelikler belirli oranlarda yukarı örneklenerek (2× ve 4×), boyutsal olarak hizalanmakta ve birleşim aşamasında 256×256 boyutunda birleştirilmiş bir öznitelik haritası elde edilmektedir. Bu birleşik özellik haritası, sırasıyla 3×3 evrişim, yığın normlaştırma ve ReLU aktivasyonu ile işlenerek 256×256×24 boyutuna indirgenir. Son aşamada ise, yukarı örnekleme ve 7×7 evrişimsel katmanlarla birlikte sigmoid aktivasyon fonksiyonu uygulanarak, 512×512×2 boyutunda nihai bölütleme çıktısı üretilir. Bu yapı hem düşük hem de yüksek seviyeli öznitelikleri etkin bir biçimde birleştirerek detaylı ve doğruluk oranı yüksek bölütleme çıktıları elde etmeyi amaçlamaktadır.

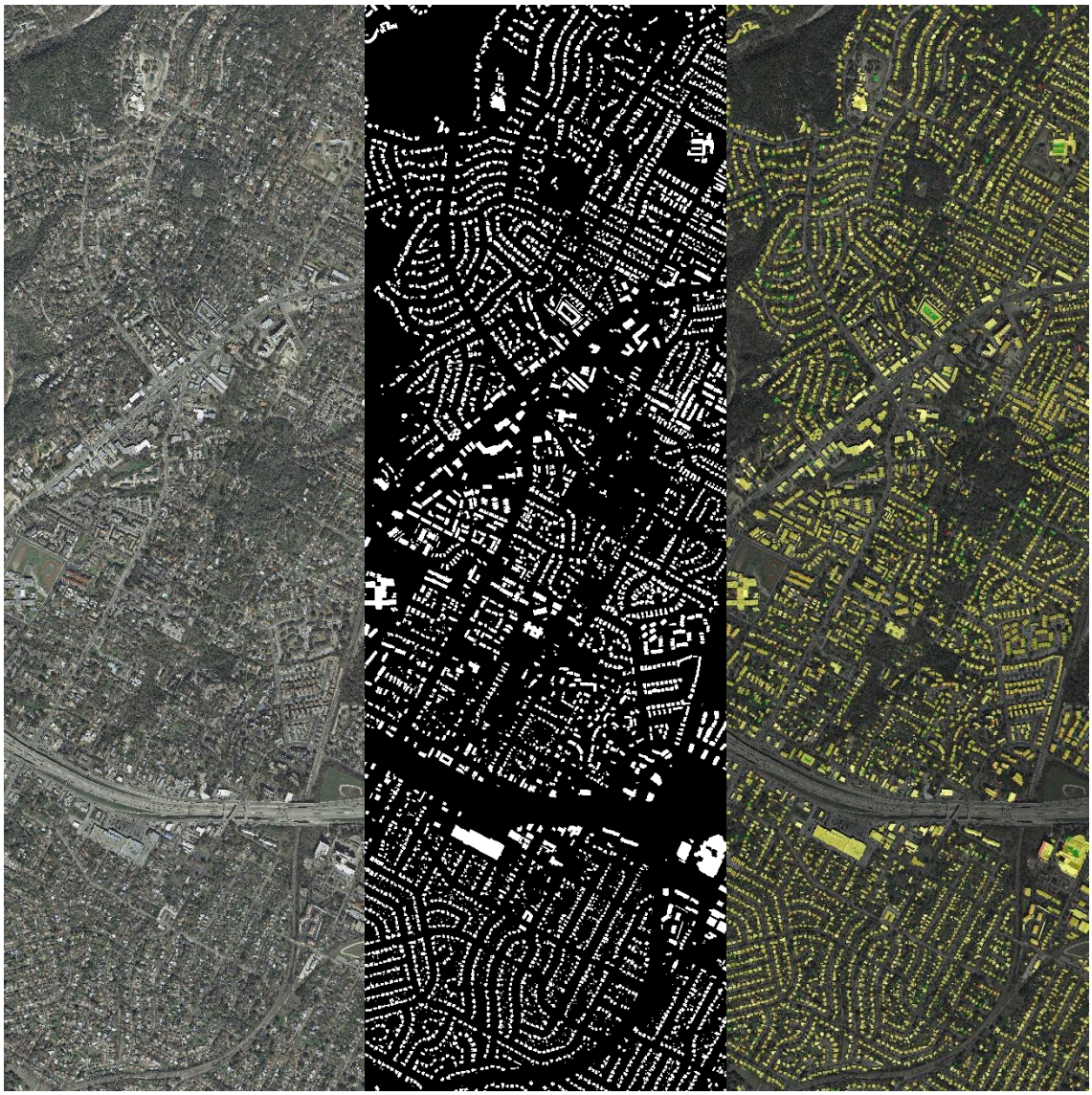
3. Bulgular

Bu çalışmada FPN-ResNeXt50 ve VGG16-UNet modelleri, derin öğrenme tabanlı bölütleme (segmentation) mimarileri olarak kullanılmıştır. ResNeXt50 ve VGG16 backbone ağları görüntüden anlamlı özellikler çıkarmaktadır. Elde edilen özellik haritaları, FPN ya da UNet gibi üst yapılar aracılığıyla işlenerek bölütleme gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modellerde, ResNeXt50 ve VGG16 omurga ağları görüntülerden yüksek seviyeli ve anlamlı özellikler çıkarmaktadır. Elde edilen özellik haritaları, ilgili üst yapılar (FPN veya UNet) aracılığıyla çok ölçekli biçimde işlenmekte ve böylece bölütleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım, omurga ağlarının güçlü temsil yetenekleri ile üst yapıların ayrıntı koruma ve çok ölçekli bilgi işleme kabiliyetlerini bir araya getirerek, segmentasyon performansını artırmayı hedeflemektedir.

Her bir bölgeye ait eğitim verileri için doğruluk, IoU ve birleşik ölçüt değerleri hesaplanmış ve Tablo 4-8'de sunulmuştur. Bu tablolarda, ölçütlerin hesaplanmasında kullanılan her bölgeye ait TP, TN, FP ve FN değerleri de gösterilmiştir. Ayrıca, tüm bölgeler için ilgili ölçüt değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

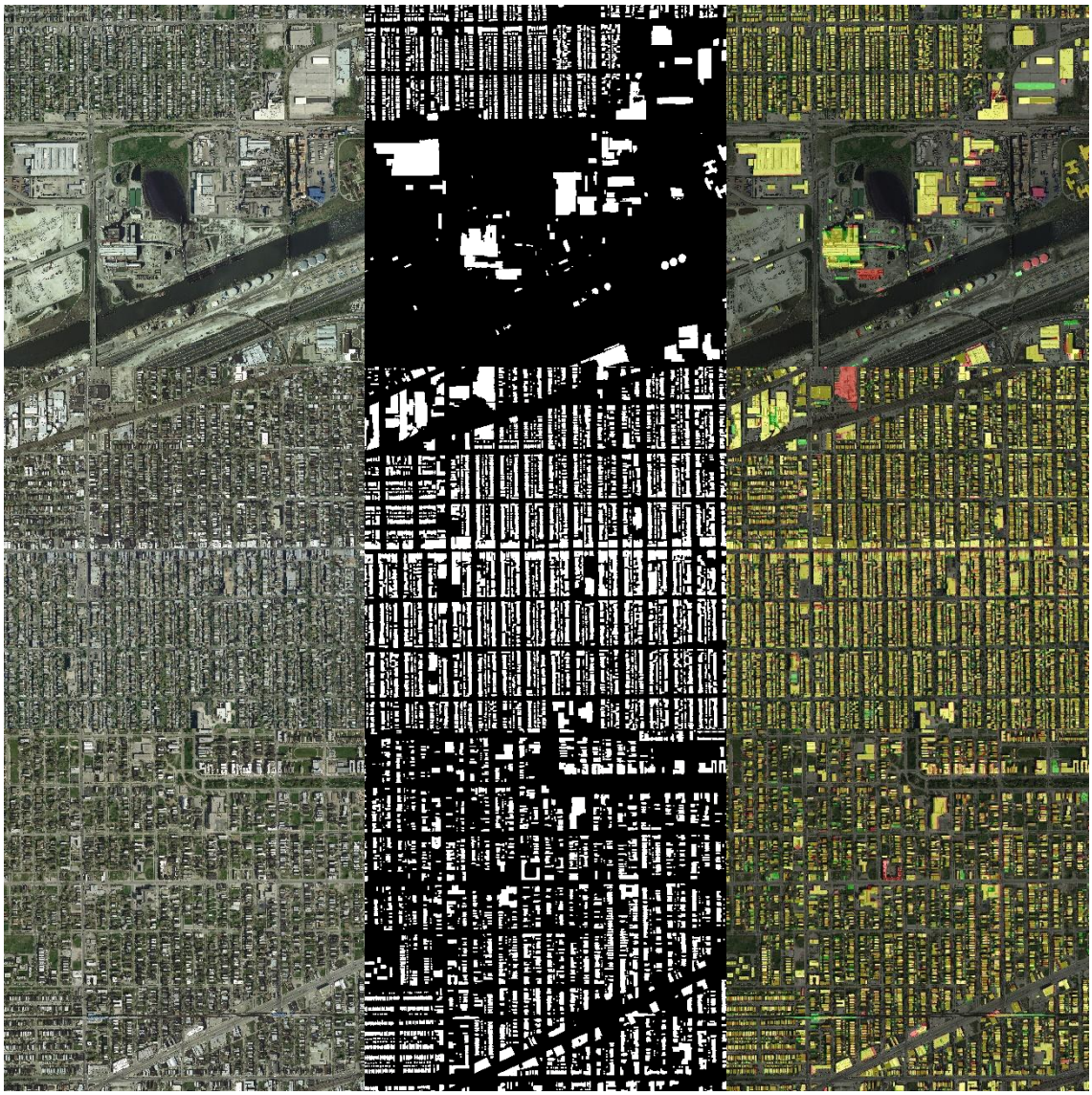
Bu çalışma, sınıflandırma (classification) veya nesne tespiti (object detection) değil, bölütleme (segmentation) üzerine odaklanmaktadır. Bölütleme işlemi, giriş görüntüsündeki piksellerin belirli sınıflara atanması ile gerçekleştirilmiştir. Mimari, omurga ağları tarafından çıkarılan derin özellikleri kullanarak, her pikselin ait olduğu bölgeyi belirlemektedir.

Şekil (3-7)'de girdi görüntüsü, bölütlenmiş görüntü ve bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsünün çakıştırılması ile elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekillerdeki (c) sütununda verilen çakıştırılmış görüntüde yeşil olarak gösterilen alanlar gerçekte bina olan ancak model tarafından belirlenemeyen binaları, kırmızı olan alanlar ise, bina olmadığı halde model tarafından bina olarak etiketlenen alanları göstermektedir.



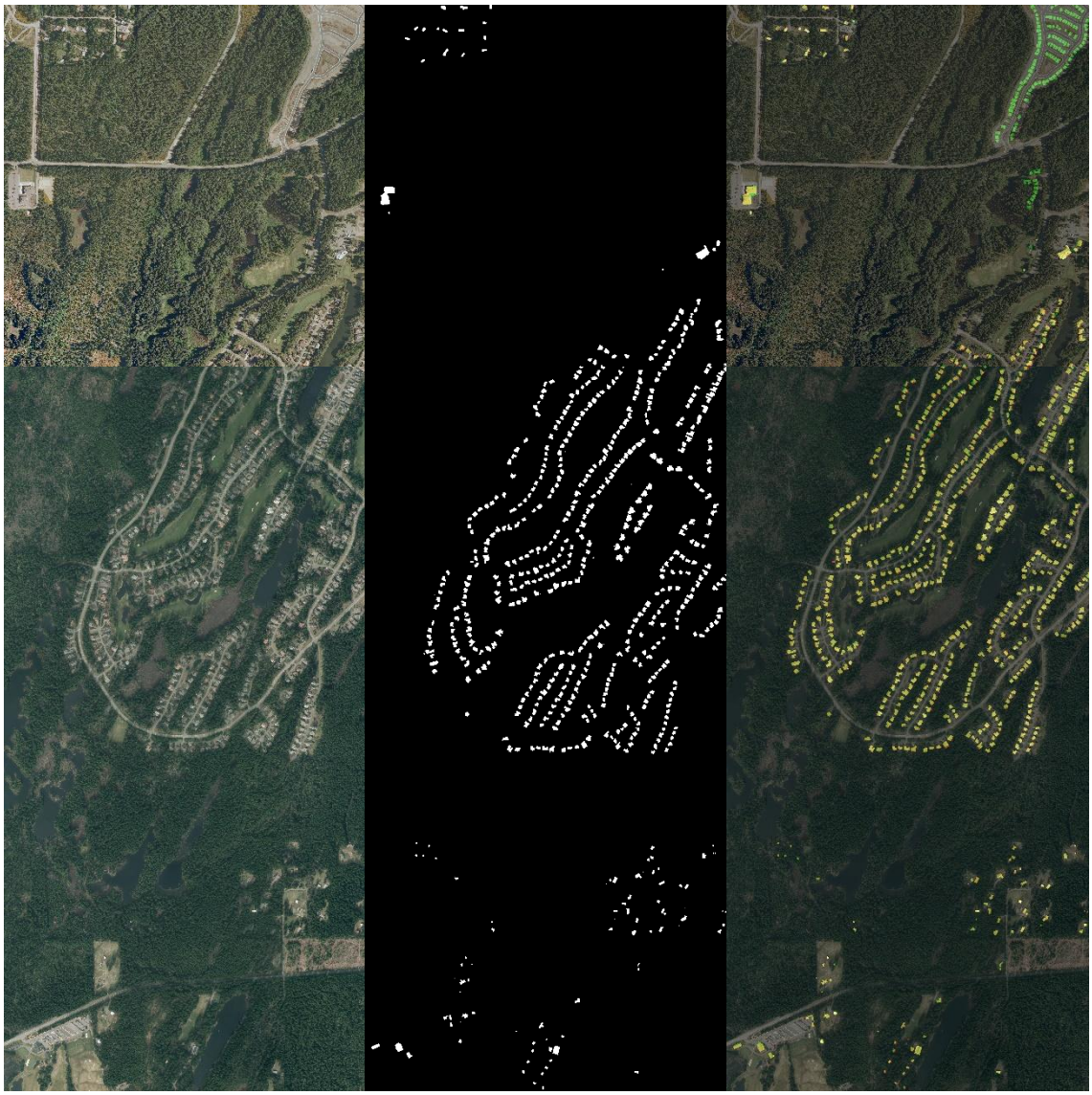
(a) (b) (c)

Şekil 3. Austin için binaların belirlenmesi uygulamasında: a) girdi görüntüsü, b) bölütlenmiş görüntü ve c) bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsünün çakıştırılmasıyla elde edilmiş görüntü



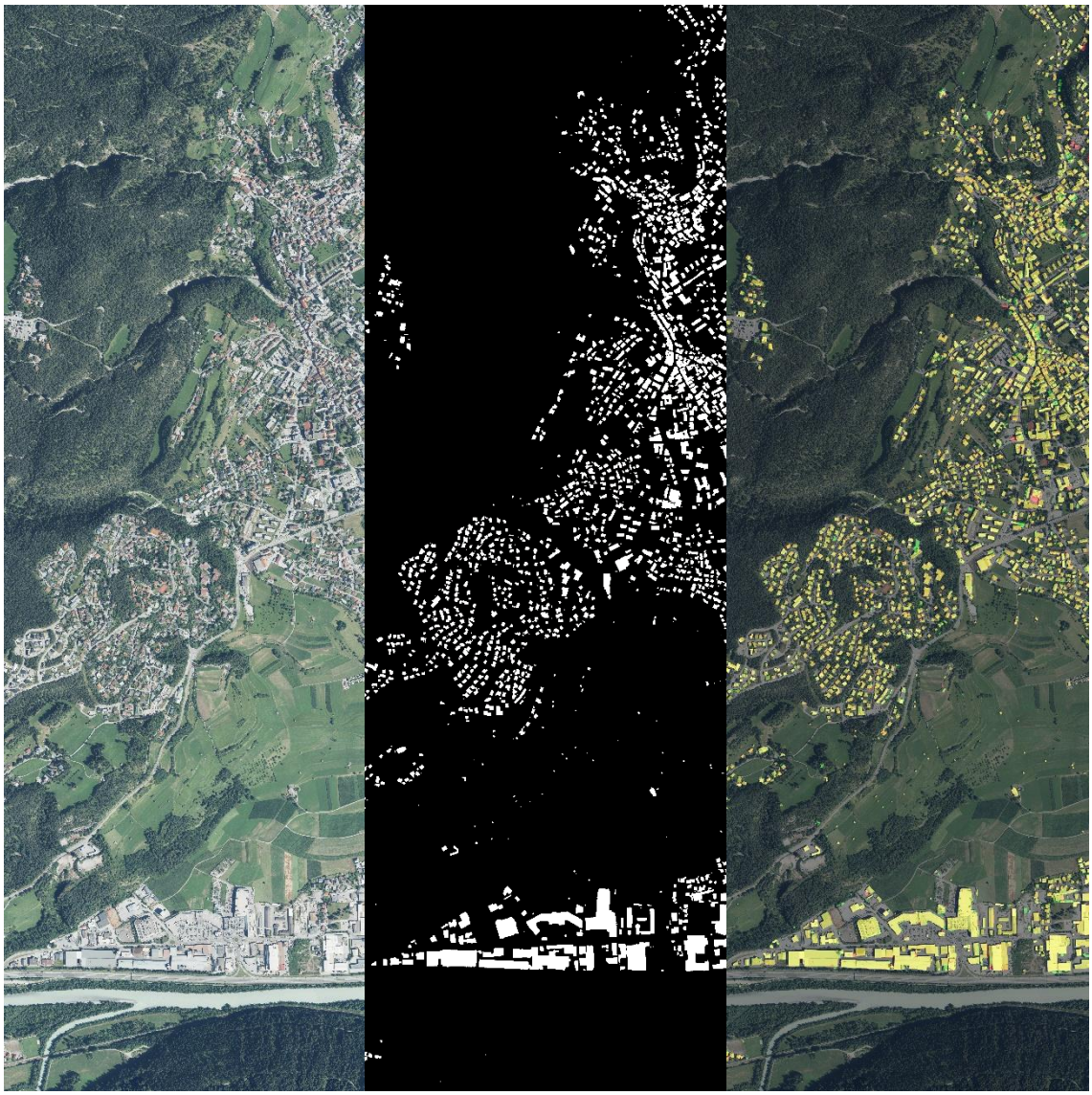
(a) (b) (c)

Şekil 4. Şikago için binaların belirlenmesi uygulamasında: a) girdi görüntüsü, b) bölütlenmiş görüntü ve c) bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsün çakıştırılmasıyla elde edilmiş görüntü



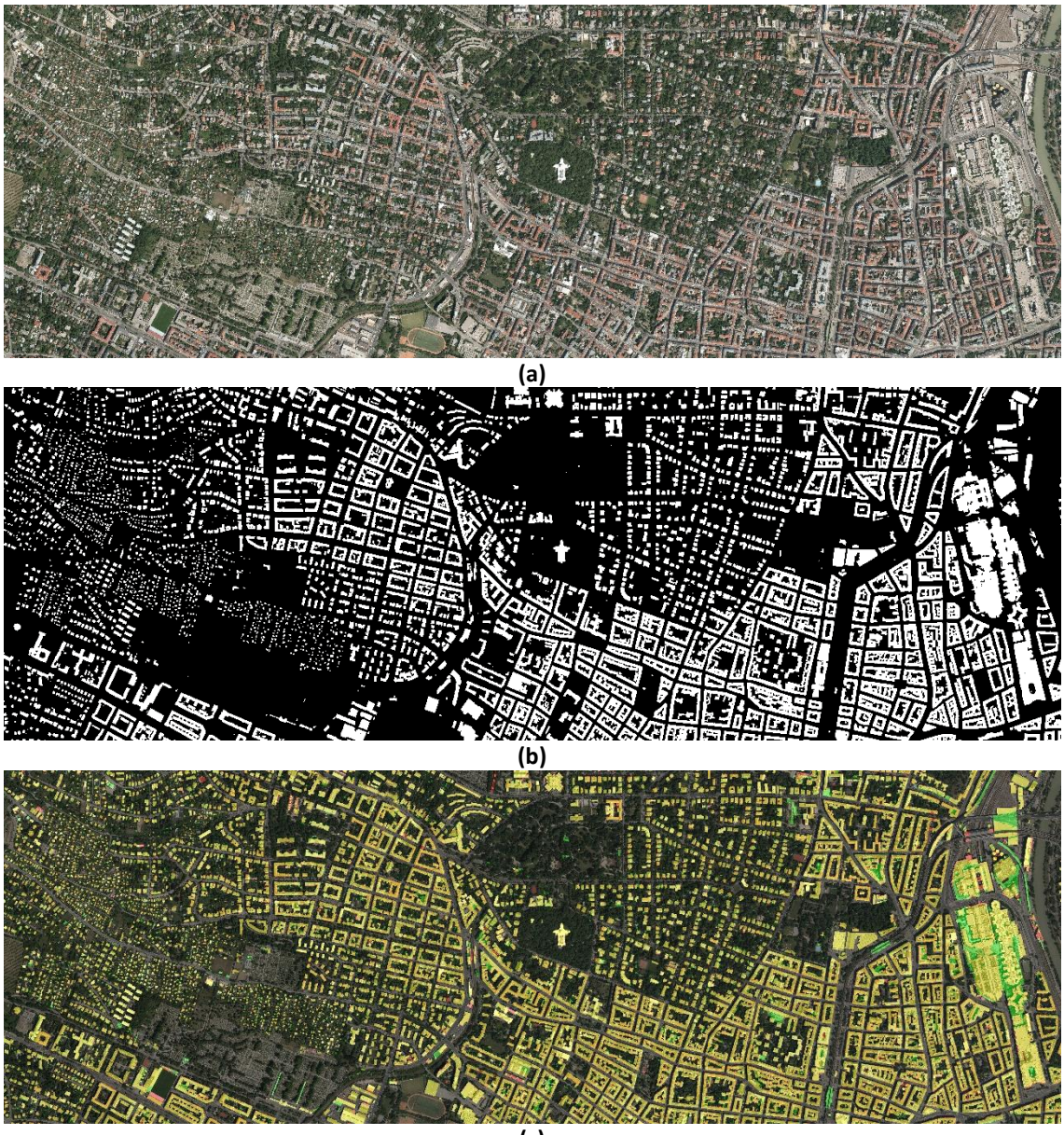
(a) (b) (c)

Şekil 5. Kitsap için binaların belirlenmesi uygulamasında: a) girdi görüntüsü, b) bölütlenmiş görüntü ve c) bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsün çakıştırılmasıyla elde edilmiş görüntü



(a) (b) (c)

Şekil 6. Tirol için binaların belirlenmesi uygulamasında: a) girdi görüntüsü, b) bölütlenmiş görüntü ve c) bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsün çakıştırılmasıyla elde edilmiş görüntü



Şekil 7. Viyana için binaların belirlenmesi uygulamasında: a) girdi görüntüsü, b) bölütlenmiş görüntü ve c) bölütlenmiş görüntü ile orto-foto gerçek yeryüzü görüntüsün çakıştırılmasıyla elde edilmiş görüntü

Austin, Şikago, Kitsap, Batı Tirol ve Viyana şehirlerinin eğitim verilerine ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir. Her şehrin alt bölgelerine ait eğitim veri sonuçlarının detaylı gösterimleri Ekler bölümünde verilmiştir.

Tablo 3. Şehirlerin modellere göre eğitim verileri ölçütleri

Şehirler	Model-Bölütleme	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt
Austin	FPN-ResNeXt50	0,9741	0,8040	0,8890
	VGG16-UNet	0,9459	0,5964	0,7695
Şikago	FPN-ResNeXt50	0,9300	0,7297	0,8298
	VGG16-UNet	0,9222	0,7011	0,8116
Kitsap	FPN-ResNeXt50	0,9938	0,6609	0,8274
	VGG16-UNet	0,9928	0,6243	0,8086
Batı Tirol	FPN-ResNeXt50	0,9867	0,8257	0,9062
	VGG16-UNet	0,9831	0,7861	0,8846
Viyana	FPN-ResNeXt50	0,9512	0,7992	0,8752
	VGG16-UNet	0,9421	0,7724	0,8572

Veriler incelendiğinde, tüm ölçütlerde FPN-ResNeXt50 modelinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tablo 4. Tüm bölgelere ait toplam eğitim verileri

Model-Bölütleme	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN-ResNeXt50	0.9672	0.7814	0.8743	88040457	112677229	750000000	88040457	637322771	13105024	11531748
VGG16- UNET	0.9572	0.7204	0.8388	82681763	114766562	750000000	82681763	635233438	15194357	16890442

Sunulan karşılaştırmalı değerlendirme, FPN-ResNeXt50 ve VGG16-UNET modellerinin görüntü bölütleme (segmentation) görevindeki performanslarını çeşitli metrikler üzerinden incelemektedir. Analiz sonuçları, FPN-ResNeXt50 modelinin tüm temel ölçütlerde VGG16-UNET modeline kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle doğruluk (accuracy) oranı %96,72 olan FPN-ResNeXt50, %95,72 doğruluk elde eden VGG16-UNET modelini geride bırakmıştır. Benzer şekilde, FPN-ResNeXt50 modelinin Intersection over Union (IoU) değeri 0.7814 olup, VGG16-UNET'in 0.7204'lük değerinden anlamlı ölçüde yüksektir. Bu durum, FPN-ResNeXt50 modelinin nesne sınırlama başarımının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, FPN-ResNeXt50 modelinin 0.8743'lük değeri, VGG16-UNET'in 0.8388'lik değerine kıyasla daha iyi bir genel performansa işaret etmektedir. Gerçek pozitif (TP) ve gerçek negatif (TN) piksel sayılarında FPN-ResNeXt50 daha yüksek değerler üretmiş, buna karşın yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN) sayılarında daha düşük değerler kaydetmiştir. Bu bulgular, FPN-ResNeXt50 modelinin hem hedef sınıf tespiti hem de arka plan ayrımı açısından daha isabetli ve dengeli bir bölütleme gerçekleştirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, FPN-ResNeXt50 modeli, görüntü bölütleme uygulamalarında daha yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunarak tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

Her kent ve kentlerin alt bölgeleri için ayrı ayrı elde edilen değerlerin ortalaması alınarak bulunan sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Eğitim verileri üzerindeki genel başarım sonuçlarının gösterildiği bu tablo irdelendiğinde en iyi sonuçların ResNeXt50-FPN modeli tarafından üretildiği belirlenmiştir. Bu model tüm eğitim verileri kullanılarak uygulanmış ve görüntüdeki binaların çıkarımı için bölütleme ve sınıflandırma yapılmıştır. Modelde kullanılan hiper parametreler tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Modelde kullanılan hiperparametreler

Hiperparametre	Değer
Giriş ve çıkış veri boyutu	512x512
Yığın Boyutu	16
Başlangıç Öğrenme Oranı (eğitim aşaması)	0.0001
Başlangıç Öğrenme Oranı (ince ayar aşaması)	0.00001
Öğrenme Oranı Ölçeği	0.01
Öğrenme Oran Sönümlenme Değeri	0.6
Epok (öğrenme tur sayısı)	5
Önyargı (bias)	0.45
Örtüşme (overlap)	%30

Tablo 5'te sunulan hiperparametreler, modelin hem eğitim hem de ince ayar (fine-tuning) aşamalarındaki davranışını doğrudan etkileyen temel ayarlardır. Giriş ve çıkış boyutu olarak 512×512 piksel seçilmiş; bu, yüksek çözünürlüklü detayların korunmasını ve modelin daha isabetli sınırlama yapabilmesini sağlamıştır. Yığın boyutu (batch size) 16 olarak belirlenmiş, bu değer bellek kullanımını ve eğitim stabilitesini dengelemiştir. Başlangıç öğrenme oranı eğitim aşamasında 0.0001, ince ayar aşamasında ise daha hassas ağırlık güncellemeleri için 0.00001 olarak seçilmiştir. Öğrenme oranı ölçeği 0.01 ve sönümlenme katsayısı 0,6 olarak belirlenerek, modelin öğrenme sürecinde aşırı sıçramadan kaçınması hedeflenmiştir. Epok sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Önyargı (bias) değeri 0,45 olarak belirlenmiş, bu değer farklı sınıflar arasındaki dengesizliği düzenlemek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, görüntü yama üretim sürecinde minimum %30 örtüşme uygulanarak hem örnek sayısı artırılmış hem de modelin mekânsal genelleme yeteneği güçlendirilmiştir. Bu parametreler, literatürde önerilen değerlere ve yapılan ön test sonuçlarına göre belirlenmiş olup, modelin kararlı ve yüksek doğrulukta öğrenmesini sağlamak üzere optimize edilmiştir. Model 5 öğrenim dönemi (epok) için Tablo 5'te belirtilen parametreler kullanılarak çalıştırılmış ve Tablo 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6. En iyi sonuca sahip FPN-ResNeXt50 modelinin 5 epok çalışma sonuçları

Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
Austin1	0.9727	0.8316	0.9021	3366413	4048249	25000000	3366413	20951751	359491	322345
Austin2	0.9676	0.8244	0.8960	3802265	4612323	25000000	3802265	20387677	388573	421485
Austin3	0.9664	0.8047	0.8856	3457844	4296820	25000000	3457844	20703180	374285	464691
Austin4	0.9785	0.8166	0.8976	2395924	2933853	25000000	2395924	22066147	254248	283681
Austin5	0.9787	0.7795	0.8791	1880705	2412598	25000000	1880705	22587402	251602	280291
Austin6	0.9770	0.7507	0.8638	1728538	2302700	25000000	1728538	22697300	285922	288240
Şikago1	0.9609	0.7652	0.8630	3187468	4165799	25000000	3187468	20834201	574869	403462
Şikago2	0.8958	0.7213	0.8085	6743956	9350044	25000000	6743956	15649956	1586000	1020088
Şikago3	0.9213	0.6921	0.8067	4422871	6390454	25000000	4422871	18609546	1168138	799445
Şikago4	0.9367	0.7145	0.8256	3962950	5546611	25000000	3962950	19453389	913902	669759
Şikago5	0.9535	0.7548	0.8541	3577702	4740123	25000000	3577702	20259877	625359	537062
Şikago6	0.9183	0.7386	0.8284	5768699	7810788	25000000	5768699	17189212	1164456	877633
Kitsap1	0.9993	0.6971	0.8482	39558	56746	25000000	39558	24943254	7222	9966
Kitsap2	0.9981	0.8109	0.9045	203302	250713	25000000	203302	24749287	26871	20540
Kitsap3	0.9906	0.8525	0.9215	1352964	1587145	25000000	1352964	23412855	134094	100087
Kitsap4	0.9866	0.3239	0.6553	160114	494279	25000000	160114	24505721	46265	287900
Kitsap5	0.9916	0.4677	0.7297	183750	392905	25000000	183750	24607095	59386	149769
Kitsap6	0.9952	0.7561	0.8756	374853	495757	25000000	374853	24504243	61413	59491
Tirol-W1	0.9831	0.7815	0.8823	1510284	1932588	25000000	1510284	23067412	188121	234183
Tirol-W2	0.9901	0.7908	0.8904	938565	1186828	25000000	938565	23813172	126195	122068
Tirol-W3	0.9774	0.8041	0.8908	2323814	2889802	25000000	2323814	22110198	292910	273078
Tirol-W4	0.9860	0.8298	0.9079	1704781	2054447	25000000	1704781	22945553	149692	199974
Tirol-W5	0.9925	0.8979	0.9452	1647928	1835241	25000000	1647928	23164759	82798	104515
Tirol-W6	0.9895	0.8356	0.9125	1336668	1599681	25000000	1336668	23400319	129817	133196
Viyana1	0.9600	0.7970	0.8785	3927592	4927813	25000000	3927592	20072187	416975	583246
Viyana2	0.9561	0.8507	0.9034	6259261	7357908	25000000	6259261	17642092	550456	548191
Viyana3	0.9290	0.8209	0.8749	8141615	9917570	25000000	8141615	15082430	695892	1080063
Viyana4	0.9566	0.8614	0.9090	6751836	7837905	25000000	6751836	17162095	679556	406513
Viyana5	0.9623	0.8270	0.8946	4503708	5446160	25000000	4503708	19553840	511714	430738
Viyana6	0.9515	0.6619	0.8067	2373613	3586038	25000000	2373613	21413962	781461	430964
TOPLAM	**0.9674**	**0.7828**	**0.8751**	**88029541**	**112459888**	**750000000**	**88029541**	**637540112**	**12887683**	**11542664**

Tablo 6, FPN-ResNeXt50 modelinin eğitim süreci sonrasında test veri seti üzerinde elde ettiği performans değerlendirmelerini sunmaktadır. Eğitim veri seti üzerinde elde edilen %96,72 doğruluk değeriyle diğer modelden daha yüksek performans gösteren FPN-ResNeXt50 modeli ile test veri seti üzerinde %96,74 oranında doğruluk değeri elde edilmiştir. Model, her bölge için 5 epokluk eğitimden geçirilmiş ve ardından test bölgelerine uygulanarak doğruluk (Accuracy), kesişim birlik (IoU) ve birleşik ölçüt değerleri hesaplanmıştır. Test bölgeleri, Austin, Şikago, Kitsap, Batı Tirol ve Viyana şehirlerinin daha önce eğitim verisinde yer almayan farklı bölümlerinden seçilmiştir. Tablo, ayrıca her test örneği için gerçek pozitif (TP), yanlış pozitif (FP), yanlış negatif (FN) ve gerçek negatif (TN) piksel sayılarıyla birlikte toplam piksel sayısı, kesişim ve birleşim değerlerini de içermektedir. Bu sayede modelin sınıflandırma doğruluğu, bina tespitindeki hassasiyeti ve genel başarım seviyesi detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen %96,74 doğruluk ve %78,28 IoU ortalama değerleri, modelin yüksek genelleme kabiliyetine ve farklı kentsel dokulara başarılı bir şekilde uyum sağladığına işaret etmektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

Çalışma sonuçlarından elde edilen bulgularla;

- Yerleşim düzenlerindeki farklılıkların sınıflandırma sonuçlarına etki ettiği görülmüştür. Düzenli yapılaşmanın olduğu, binaların şekil ve büyüklüklerinin yaklaşık olarak benzer olduğu alanlarda başarım sonuçları yüksek çıkmıştır.
- Yerleşim alanlarında binaların diğer objelerle yansıtım özelliklerinin farklı olduğu yüksek kontrasta sahip alanlarda bina çıkarımı sonuçlarının daha iyi olduğu görülmüştür.
- Binaların bulunduğu alanlardaki bitki örtüsünün özellikle ağaç kanopisinin tamamen ya da kısmen örttüğü binalar tespit edilememiştir. Bu gibi alanlarda geometriler kısmen ya da tamamen belirsizleştiğinden çıkarım sonuçlarını etkilemiştir.
- Binalara birleşik olan ve aynı yansıtım değerlerine sahip olan bahçe otopark gibi alanlar bina geometrileri içerisinde gösterilmiştir. Bu gibi yerlerin çıkarım doğruluklarını arttırmak için yeni özniteliklerin tanımlanması ve bölütleme aşamasında bu öznitelikleri de belirli ağırlıklandırma ile dikkate alacak algoritmaların kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.
- Farklı bölgeler için elde edilen sonuçların farklı özellikteki alanlar için kullanımı anlamındaki genelleme doğruluklarının arttırılması için daha fazla eğitim verisi ile modelin eğitilmesi sonuç doğruluklarını arttıracaktır.
- Kullanılacak eğitim verisinin, bitişik nizamda olan ve belirgin sınırlarla ayrılmamış ve/veya ağaç kanopisi ile örtülen binaların bulunduğu bölgeleri içeren veriler olması, bu nedenlerden dolayı yanlış negatif sınıflandırmanın oranını azaltılacağı düşünülmektedir.
- Modelin doğruluğu yanında, işlem hızı da önemlidir. İstatistiksel olarak anlamlı farkların olduğu sonuçların elde edilmesi daha az zaman maliyeti ile yapılabilmelidir. Bu amaçla derin öğrenme modellerinin tasarlanmasında kullanılacak hiperparametreler de önemlidir. Bunların seçimi zaman/donanım maliyetlerini doğrudan etkilemektedir.
- Karşılaştırılan modellerde örneğin 10 eğitim dönemi için harcanan zaman ile 3 eğitim dönemi için harcanan zaman karşılaştırıldığında yaklaşık 3 kata varan bir maliyet söz konusudur. Hiperparametre seçimi model seçimi kadar önemlidir.
- Kullanılan donanım da zaman maliyeti açısından önemlidir.

Elde edilen sonuçlar literatürde aynı veri seti üzerinde ve aynı değerlendirme ölçütlerinin kullanıldığı çalışmalar ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7. Literatürde farklı modellerle elde edilen IoU değerleri

Çalışma	Model	IoU
Xu vd. (2022)	CVNet	%77,61
Wang vd. (2022)	BuildFormer	%75,74-%91,44
Li, Z. vd. (2022)	HCRB-MSAN	%79,92-%91,79
Li, Q. vd. (2022)	Kodlayıcı-Kod Çözücü Mimari	%72.03
de Souza vd. (2022)	FLIM-U	%55,29
Milosavljević (2020)	ResNeXt50-FPN (10 Epok)	%82,23
Wang vd. (2025)	CANet	%81,42-%77,84-%62,55-%57,97
Bu Çalışmada	ResNeXt50-FPN (5 Epok)	%78,28

Tablo 7'deki sonuçlar değerlendirildiğinde;

- Xu vd. (2022), CVNet modeli ile aktif kontur yaklaşımı kullanarak kenar belirlemeye dayalı bina çıkarımı ile IoU değerini %77,61 olarak elde etmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ise, Xu. vd. (2022)'de elde edilenden 0,67 puan daha iyi olarak bulunmuştur.
- Wang vd. (2022), kayıp fonksiyon olarak entropi kayıp fonksiyonu (cross-entropyloss), aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU6, özellik birleştirme fonksiyonu olarak özellik piramid ağı (FPN) kullanarak yapılandırılan bir çeşit görüntü transformatörü olan Build Former modeli ile IoU değerini, Inria veri seti için uygulamıştır. Çalışmada Massachusetts ve WHU veri setleri için IoU sırasıyla %75,74 ve %91,44 olarak bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlardan Massachusetts veri seti için bulunan değer bu çalışmada bulunan değerden 2,54 puan daha düşüktür. WHU veri setinde bulunan değer ise 13,16 puan daha yüksektir. Aynı modelin farklı veri setleri için çok farklı başarım sonuçları elde ettiği görülmektedir.
- Li, Z. vd. (2022), Inria veri seti için %79,92 IoU değeri, WHU veri seti için ise %91,79 IoU değeri elde etmiştir. Model kullanılan eğitim setlerinin içerdiği bina yapı düzenleri ve arka plan özelliklerine göre farklı başarımlar elde

etmiştir. Model 120 öğrenme dönemi sonunda bu sonuçları elde etmiştir. Model, Inria veri seti için, 5 öğrenme dönemi ile bu çalışmada elde edilenden 1,64 puan daha iyidir. Çalışmada 5 öğrenme dönemi için elde ettiğimiz sonuçla karşılaştırıldığında zaman maliyeti ve elde edilen başarım sonuçları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı değerlendirilmelidir.

- Bu çalışmada önerilen model %78,28 IoU değeri ile (Li, Q. vd., 2022)'de önerilen modelle elde edilenden 6,25 puan daha iyidir. Li, Q. vd. (2022), 31 adet eğitim seti kullanmıştır. Bu çalışmada kullanılan eğitim veri seti sayısından az olması başarım sonuçlarındaki farkın oluşmasında etken olduğu düşünülmektedir. Eğitim veri setinin az olmasının yetersiz öğrenmeye neden olarak başarım sonuçlarını etkilediği değerlendirilmektedir. Bunun yanında az eğitim verisi zaman maliyetini azaltmaktadır. Ancak başarım sonucu nispeten anlamlı bir şekilde düşük olarak elde edilmiştir. Bu sonuç zaman maliyetine belirli bir düzeyde katlanmak gerekliliğini ortaya koymaktadır. Katlanılması gereken zaman maliyeti için optimum düzey daha sonraki çalışmalarda araştırılması gereken bir problem olacaktır.
- de Souza vd. (2022), FLIM-U mimarisi ile kullanarak eğitilen verilerle HRNet-48 modelinden %55,29 IoU değeri elde etmiştir. Bu değer çalışmada elde edilen %78,28 değerinden oldukça kötü bir değerdir. Bunun nedeninin, bölütleme algoritması olarak geliştirilmiş U-Net mimarisinin (FLIM-U) kullanılması olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada modelin seçimi için yapılan değerlendirmede de en az doğruluk U-Net bölütleme mimarisi ile elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada eğitim veri seti olarak belirli bölgeler seçilmiştir. Bu seçimin de modelin genelleme becerisini etkilediği düşünülmektedir.
- Milosavljević (2020)'den elde edilen sonuçlarda da IoU değeri %82,23 ile bu çalışmada elde edilenden 3,95 puan daha yüksek olarak bulunmuştur. Milosavljević (2020), çalışmasında 384x384 boyutlu veriler kullanılmış ve 10 eğitim dönemi için öğrenme yapılmıştır. Bu çalışmada ise 512x512 boyutlu veriler 5 öğrenme dönemi için eğitilmişlerdir. Zaman ve donanım maliyeti, çalışmamızdan yaklaşık 2,5 kat daha fazladır.
- Wang vd. (2025), önerdikleri CANet modelini dört farklı veri seti üzerinde uygulamışlar ve farklı IoU değerleri elde etmişlerdir. Bu da veri setlerine göre modelin farklı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Her kent için ayrı ayrı değerlendirme yapıldığında elde edilen değerlerle, topluca değerlendirme yapılması durumda elde edilen değerler karşılaştırıldığında oluşan farklılıklar görülmektedir. Hatta her kentin farklı bölgeleri için bile farklı başarım sonuçları ortaya çıkmıştır. Bunlar;

- Yerleşim alanlarının farklı coğrafi bölgelerde olması,
- Bölgelerin tarihsel, kültürel ve sosyal farklılıklardan dolayı ortaya çıkan şehircilik politikaları ve imar planı anlayışları ve uygulamaları olması ve bunun da bir sonucu olarak binaların geometrilerindeki ve yerleşim düzenlerindeki çeşitlilik,
- Görüntüdeki farklı yansıma, ışıma koşulları ve topoğrafya dolayısıyla ortaya çıkan gölgelenme problemlerinin etkileri ile spektral farklılıklardan dolayı ortaya çıkan kontrast problemi,
- Özellikle yeşil alanları fazla olan yerleşim bölgelerinde, yeşil bitki örtüsü kanopisinin kısmen ya da tamamen binaların görünürlüğünü etkilemesi gibi nedenler, sonuçlardaki bu farklılıkların sebebi olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca değerlendirme için seçilen ölçütlerin belirlenmesi aşamasında, test ve eğitim veri seti seçiminde her ne kadar örneklem büyütme yöntemleriyle, algoritmanın çok çeşitli mekânsal, uzamsal ve spektral özellikler çıkarması sağlanmaya çalışılsa da öğrenmenin genelleştirilmesi ve küresel ölçekte uygulanabilir olmasının sağlanabilmesi için, bu ölçütlerin daha yerel özellikler üzerinden belirlenip genele yayılması yaklaşımlarının da değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Mevcut çalışmalarda daha genel yaklaşımlar çerçevesinde bu ölçütler belirlenip, kent ölçeğinde hatta daha küçük ölçeklerde alanlar için birer kriter olarak kullanıldıkları bilinmektedir.

Derin öğrenme algoritmalarının ve bir derin sinir ağının eğitilmesi aşamasında kullanılan fonksiyonların da işlevselliğinin daha da iyileştirilmesinin bölütleme sonuçlarının doğruluğunu arttıracağı öngörülmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Uzaktan algılama görüntülerinden nesnelerin çıkarılması işlemi oldukça karmaşık ve yoğun hesaplama gerektiren işlemlerdir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi standart bir ölçüte göre yapılamamakta ve dolayısıyla karşılaştırmalar göreceli olmaktadır. En iyi sonucun elde edilip edilemediği yalnızca insan görü sistemleri temel alınarak söylenebilmektedir. Gelişen sensörlerle birlikte çok fazla veri ve istenmeyen ölçüde detay elde edildiğinden bu durum hesaplama ve değerlendirmelerin yapıldığı bilgisayar sistemlerine ek yük getirmektedir. Bunun önlenebilmesi için;

- Öncelikle verilerin standartlaştırılmasını sağlayacak ve verileri istenen uygulamalar açısından süzebilecek bir yöntemin geliştirilmesi, sonrasında uygulanan yöntemlerin hantallığını azaltabilecektir.
- Yüksek çözünürlüklü görüntülerden nesnelerin çıkarılmasında, nesne özelliklerinin iyi belirlenmesi, modellenmesi ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

- Var olan nesne özelliklerine ek, yeni ve modellendirilebilir özelliklerin tanımlanması, uygulamaların başarısını arttıracaktır. Bu nedenle insan yapımı nesnelerin sınıflandırılmasında yeni geometrik ve semantik özellik bilgilerinin ortaya konması gelecekte yapılacak çalışmalar için hedefler arasında düşünülmelidir. Özellikle yerleşim alanlarında planlama ve uygulamaların bir düzen içerisinde ve belirli planlamalarla yapılması verilerin standartlaşmasını sağlayacak ve böylece, farklı bölgeler için farklı özellik ve yöntem kullanılması gereğini ortadan kaldıracaktır.
- Mevcut uygulamaların etkinliklerinin arttırılması ve karmaşık uygulamaları basitleştirici yeni yazılımlar geliştirilmesi de üzerinde çalışılabilecek konulardandır.

Sonuç olarak, birçok yöntemin birleştirilmesi ile çok fazla girdiye sahip yöntemlerin uygulaması sonuçları iyiye götürüyor gibi olsa da var olan yöntemler ile uygulanacak bileşik yöntemlerin doğruluğa etkileri bir noktadan sonra anlamlı bir şekilde farklılaşmayacak, sadece çözüm aşamasında ek yükler getirecektir. Derin öğrenme modellerinin eğitilmesi sırasında hem omurganın hem de bölütleme mimarisinin seçimi de önemlidir. Ayrıca modelin farklı katmanlarında kullanılan filtreler, aktivasyon fonksiyonları, kayıp fonksiyonları için çok çeşitli alternatifler vardır. Bu alternatifler arasında en uygun olan kombinasyonun belirlenmesi, çok fazla deneme gerektirmektedir. Buna ek olarak belirli bir eğitim veri seti için en optimum algoritmanın başka veri setleri için de en uygun olacağı ileri sürülememektedir. Bu nedenle derin öğrenme modellerinin genelleme yeteneğinin tüm coğrafyalar ve yerleşim yerleri için tekil bir sonuca ulaşamayacağı değerlendirilmektedir. En uygun modelin, çalışılan bölgeyi en iyi temsil eden eğitim veri seti ile eğitilmiş ve bazı hiperparametre değişiklikleri ile iyileştirilmiş model olacağı sonucuna varılmıştır.

Ayrıca derin öğrenme modelleri kullanılarak görüntü işleme yüksek maliyetli bilgisayar donanımı da gerektirmektedir. Kullanılan fonksiyonların hesaplama süreleri ve geri besleme algoritmalarının mantığı gereği bellek ihtiyacı da artmaktadır. Görüntülerin işlenmesi ayrıca yüksek oranda GPU belleği de gerektirmektedir. Bu maliyetlerin azaltılması ve kişisel bilgisayarlar kullanılarak uygun sürelerde çözümler üretebilmek için hesaplama süresi ve bellek ihtiyacını nispeten azaltacak yeni matematiksel ve istatistiksel yaklaşımların geliştirilmesi uygun olacaktır. Gelecekte önerilecek yaklaşımların bu konular üzerinde de yoğunlaşmasının derin öğrenme konusundaki gelişmelerden olacağı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu makale birinci yazarın doktora tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

Attarzadeh, R., & Momeni, M. (2012). Object-based building extraction from high resolution satellite imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *39*, 57–60.

Bansal, K., & Singh, A. (2023). Development of VGG-16 transfer learning framework for geographical landmark recognition. *Intelligent Decision Technologies, 17*(3), 799–810.

Benali, A., Dermeche, H., Belhadj, S., Adnane, A., & Amar, R. H. E. (2014, April 14–16). *Buildings extraction of very high spatial resolution satellite images* [Conference presentation]. 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Marrakesh, Morocco.

Bengio, Y. (2009). *Learning deep architectures for AI*. Now Foundations and Trends.

de Souza, I. E., Cazarin, C. L., Veronez, M. R., Gonzaga, L., & Falcao, A. X. (2022). User-guided data expansion modeling to train deep neural networks with little supervision. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19*, Article 6515505. https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3201437

Fradkin, M., Maitre, H., & Roux, M. (2001). Building detection from multiple aerial images in dense urban areas. *Computer Vision and Image Understanding, 82*(3), 181–207.

Ghiasi, G., Lin, T. Y., & Le, Q. V. (2019, June 15–20). *Nas-fpn: Learning scalable feature pyramid architecture for object detection* [Conference presentation]. 2019 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, Long Beach, CA, USA.

Guo, J., Pan, Z., Lei, B., & Ding, C. (2017). Automatic color correction for multi-source remote sensing images with Wasserstein CNN. *Remote Sensing, 9*(5), Article 483. https://doi.org/10.3390/rs9050483

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016, June 26–July 1). *Deep residual learning for image recognition* [Conference presentation]. IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Las Vegas, Nevada.

Ismail, A. R., Nisa, S. Q., Shaharuddin, S. A., Masni, S. I., & Amin, S. A. S. (2024). Utilising VGG-16 of convolutional neural network for medical image classification. *International Journal on Perceptive and Cognitive Computing, 10*(1), 113–118.

Jin, X., & Davis, C. H. (2005). Automated building extraction from high-resolution satellite imagery in urban areas using structural, contextual, and spectral information. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2005*, Article 745309. https://doi.org/10.1155/ASP.2005.2196

Kaur, T., & Gandhi, T. K. (2019, December 19–21). *Automated brain image classification based on VGG-16 and transfer learning* [Conference presentation]. 2019 International Conference on Information Technology (ICIT), Bhubaneswar, India.

Khatriker, S., & Kumar, M. (2018). Building footprint extraction from high resolution satellite imagery using segmentation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42*, 123–128.

Lari, Z., & Ebadi, H. (2007, May 29–June 1). *Automated building extraction from high-resolution satellite imagery using spectral and structural information based on artificial neural networks* [Workshop presentation]. ISPRS Hannover Workshop, Hannover, Germany.

Li, Q., Shi, Y., & Zhu, X. X. (2022, July 17–22). *Feature and output consistency training for semi-supervised building footprint generation* [Symposium presentation]. IGARSS 2022 – IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Kuala Lumpur, Malaysia.

Li, Q., Mou, L., Sun, Y., Hua, Y., Shi, Y., & Zhu, X. X. (2024). A review of building extraction from remote sensing imagery: Geometrical structures and semantic attributes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62*, Article 4702315. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3369723

Li, W., He, C., Fang, J., Zheng, J., Fu, H., & Yu, L. (2019). Semantic segmentation-based building footprint extraction using very high-resolution satellite images and multi-source GIS data. *Remote Sensing, 11*(4), Article 403. https://doi.org/10.3390/rs11040403

Li, Z., Zhang, Z., Chen, D., Zhang, L., Zhu, L., Wang, Q., ... & Peng, X. (2022). HCRB-MSAN: Horizontally connected residual blocks-based multi-scale attention network for semantic segmentation of buildings in HSR remote sensing images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15*, 5534–5544.

Liu, S., Bai, X., Fang, M., Li, L., & Hung, C. C. (2022). Mixed graph convolution and residual transformation network for skeleton-based action recognition. *Applied Intelligence*, *52*(2), 1544–1555.

Maggiori, E., Tarabalka, Y., Charpiat, G., & Alliez, P. (2017, July 23–28). *Can semantic labeling methods generalize to any city? The INRIA aerial image labeling benchmark* [Symposium presentation]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA.

Milosavljević, A. (2020). Automated processing of remote sensing imagery using deep semantic segmentation: A building footprint extraction case. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(8), Article 486. https://doi.org/10.3390/ijgi9080486

Nurkarim, W., & Wijayanto, A. W. (2023). Building footprint extraction and counting on very high-resolution satellite imagery using object detection deep learning framework. *Earth Science Informatics, 16*(1), 515–532.

Prathiba, A. P., Rastogi, K., Jain, G. V., & Govind Kumar, V. V. (2019). Building footprint extraction from very-high-resolution satellite image using object-based image analysis (OBIA) technique. In J. Ghosh & I. da Silva (Eds.), *Applications of Geomatics in Civil Engineering* (pp. 517–529). Springer Singapore.

Pravitasari, A. A., Iriawan, N., Almuhayar, M., Azmi, T., Irhamah, I., Fithriasari, K., ... & Ferriastuti, W. (2020). UNet-VGG16 with transfer learning for MRI-based brain tumor segmentation. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 18*(3), 1310–1318.

Ps, P., & Aithal, B. H. (2023). Building footprint extraction from very high-resolution satellite images using deep learning. *Journal of Spatial Science, 68*(3), 487–503.

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015, October 5–9). *U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation* [Conference presentation]. 18th International Conference on medical image computing and computer-assisted intervention (MICCAI 2015), Munich, Germany.

Shackelford, A. K., & Davis, C. H. (2003). A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41*(10), 2354–2363.

Srivastava, V., Avudaiammal, R., & V George, S. (2024). Investigations on extraction of buildings from RS imagery using deep learning models. *International Journal of Remote Sensing, 45*(1), 68–100.

Sewada, R., & Goyal, H. (2025). A novel VGG-16 adaptation for multi-band satellite image classification: Optimized preprocessing and class-specific augmentation. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*. Advance online publication. https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE5202480

Tahir, M. Z., Lyu, X., Nasir, M., & Zhang, S. (2025). Advanced image enhancement and a lightweight feature pyramid network for detecting microaneurysms in diabetic retinopathy screening. *International Journal of Imaging Systems and Technology, 35*(1), Article e70004. https://doi.org/10.1002/ima.70004

Tejeswari, B., Sharma, S. K., Kumar, M., & Gupta, K. (2022). Building footprint extraction from space-borne imagery using deep neural networks. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43*, 641–647.

Turker M., San D. (2010) Building detection from pan-sharpened IKONOS imagery through support vector machines classification. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, *38*(Part 8), 841–846.

Wang, L., Fang, S., Meng, X., & Li, R. (2022). Building extraction with Vision Transformer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60*, Article 5625711. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3186634

Wang, S., Shao, Z., Hou, D., Wang, Y., Wang, J., & Cai, B. (2025). CANet: A spatial structure constraint and local semantic awareness based network for weakly supervised building extraction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *63*, Article 4501919. https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3537099

Whiteside, T. G., Boggs, G. S., & Maier, S. W. (2011). Comparing object-based and pixel-based classifications for mapping savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13*(6), 884–893.

Yao, Y., Jiang, Z., Zhang, H., Cai, B., Meng, G., & Zuo, D. (2017, July 23–28). *Chimney and condensing tower detection based on Faster R-CNN in high-resolution remote sensing images* [Symposium presentation]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA.

Zheng, C., & Wang, L. (2014). Semantic segmentation of remote sensing imagery using object-based Markov random field model with regional penalties. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8*(5), 1924–1935.

Zhong, Z., Li, J., Cui, W., & Jiang, H. (2016, July 10–15). *Fully convolutional networks for building and road extraction: Preliminary results* [Symposium presentation]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China.

Zhou, X., & Zhang, L. (2022). SA-FPN: An effective feature pyramid network for crowded human detection. *Applied Intelligence*, *52*(11), 12556–12568.

Xu, Z., Xu, C., Cui, Z., Zheng, X., & Yang, J. (2022, June 18–24). *CVNet: Contour vibration network for building extraction* [Conference presentation]. 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, LA, USA.

EKLER:

Ek Tablo 1. Eğitim bölgeleri ve özellikleri

Bölgeler	Şekil	Özellikleri
Austin1	Şekil 1	Yoğun yerleşim alanlarının olduğu, ağaç örtüsü etkisi bulunan, az sayıda büyük ve farklı biçimli binaların bulunduğu bina çatılarının farklı spektral yansıtımı olan (açık-koyu görünümlü) bölge
Austin2		Konut alanları ve farklı spektral yansıtımı olan çatılara sahip büyük boyutlu binaların olduğu, yeşil alan görünümü yoğunluklu bölge
Austin3		Austin2bölgesiilebenzerözelliklibölge
Austin4		Bir ana ulaşım arterinin her iki yanında topoğrafik olarak farklı düzeyde yerleşimlerin bulunduğu bölge
Austin5		Bir nehir etrafında yerleşmiş spektral yansıtım özelliği açısından koyu görüntü veren farklı büyüklük ve dokuya sahip binaların bulunduğu bölge
Austin6		Nehir ve bir iç suyolu bulunan, nehir üzerinde benzer özellikli yapılaşmış binalar olan, yeşil alan için ayrılmış büyükçe bir bölge kenarına yapılanmış spektral yansıtımı benzer ve nispeten belirsiz olan binaların bulunduğu bölge
Şikago1	Şekil 2	Fabrikalar gibi büyük boyutlu ve farklı biçim özellikli binalarla, konut amaçlı kullanılan binaların birlikte bulunduğu bölge
Şikago 2		Konut amaçlı kullanılan binaların daha yoğun olduğu, binaların doku özelliklerinin belirgin olduğu bölge
Şikago 3		Sadece yerleşin amaçlı yapılan binaların bulunduğu, binaların büyüklük ve biçimlerinin homojen olduğu çok sık yerleşim düzenine sahip bölge
Şikago 4		Aynı biçim ve büyüklükteki binaların nispeten seyrek yapılaşma düzeninde yapılaştığı bölge
Şikago 5		Farklı biçim ve boyutlarda binaların 2. Bölgeye gör nispeten az yoğunluklu yerleşim bölgesi
Şikago 6		Konut ve diğer amaçlı olarak yapılmış büyük binaların bulunduğu bölge
Kitsap1	Şekil 3	Topoğrafik olarak engebeli, yoğun orman alanları içerisinde seyrek olarak binaların bulunduğu, yayla yerleşimi özellikli bölge
Kitsap2		Yoğun orman alanı ile birlikte az sayıda konut dışı alanın ve konut alanlarının bulunduğu bölge
Kitsap3		Orman alanı ile bütünleşik olarak yerleşmiş planlı yapılaşma bölgesi
Kitsap4		Orman alanı içerisinde farklı bölgelerde yerleşmiş az sayıda farklı biçim ve büyüklükte binaların olduğu bölge
Kitsap5		Yoğun orman alanı içerisinde çoğu ağaç kanopisi örtüsünden etkilenmiş az sayıda bina bulunan bölge
Kitsap6		Orman alanı içerisinde ağaç kanopisinin etkisi altında kalmış ve tek tek bölgeye yayılmış binaların bulunduğu bölge
Viyana1	Şekil 4	Kent içi peyzaj düzenlemelerinin olduğu, farklı biçim ve büyüklükte ve farklı spektral yansıtım değerine sahip binaları içeren ve imar adalarının boyutlarının benzer olduğu bölge
Viyana2		Genel olarak bakıldığında iki farklı imar düzeni ile yapılaşmış, benzer spektral yansıtım yapan bina çatılarına sahip, farklı doku özellikli binaların ağaçlarla iç içe bulunduğu bölge
Viyana3		Viyana2 Bölgesi ile benzer özellikli nispeten daha az sayıda ağaç bulunduran, dolayısıyla ikinci bölgeye nazaran ağaç örtüsü altında kalabilecek bina sayısının az olduğu, benzer spektral yansıtıma sahip çatılı binaların bulunduğu bölge
Viyana4		Aynı imar planı yerleşim düzeniyle yapılaşmış, iki ve üçüncü bölgedeki farklı iki yapılaşmanın tek başına aynı özellikli olanının bulunduğu bölge
Viyana5		Nehir kenarı yerleşiminin olduğu, farklı biçim, büyüklük ve doku özellikli binaların bulunduğu, yeşil alanların çok fazla olmadığı bölge
Viyana6		Nehir kenarına yerleşmiş konut binaları ile konut dışı büyük boyutlu binaların olduğu bölge
Tirol1	Şekil 5	Orman alanları ile bina alanlarının sınır olduğu, topoğrafik olarak engebeli olan bölge
Tirol2		Kıyı-kenar çizgisi bulunan, bu çizginin kara tarafında tarım arazilerinin olduğu, düzenli yapılaşmış binaların bulunduğu bölge
Tirol3		Dağlık bir orman alanı, orman ağaçları ile çevrilmiş bir yerleşim bölgesi ve tarım arazisine komşu yerleşim alanının birlikte bulunduğu bölge
Tirol4		Dağlık bir ormanlık alanla bütünleşik konut dışı büyük biçimli binalarında bulunduğu yerleşim bölgesi
Tirol5		Tarım alanları ile sınırlanmış yoğun olarak konut dışı binaların Fabrika, sosyal tesis… vb.) bulunduğu bölge
Tirol6		Tarım anları ile bütünleşik, konut ve konut dışı binaların orman bölgeleri ile sınırlanmış binalarla birlikte bulunduğu bölge

Ek Tablo 2. Austin bölgesi eğitim verileri

Model - Bölütleme	Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN - ResNeXt50	Austin 1	0.9737	0.8354	0.9046	3344201	4002877	25000000	3344201	20997123	314119	344557
VGG16 - UNET	Austin 1	0.9427	0.6385	0.7906	2528040	3959440	25000000	2528040	21040560	270682	1160718
FPN - ResNeXt50	Austin 2	0.9681	0.8267	0.8971	3782139	4578676	25000000	3782139	20421324	354926	441611
VGG16 - UNET	Austin 2	0.9385	0.6648	0.8013	3037299	4574101	25000000	3037299	20425899	350351	1186451
FPN - ResNeXt50	Austin 3	0.9672	0.8078	0.8875	3441328	4260277	25000000	3441328	20739723	337742	481207
VGG16 - UNET	Austin 3	0.9254	0.5524	0.7389	2302433	4167928	25000000	2302433	20832072	245393	1620102
FPN - ResNeXt50	Austin 4	0.9789	0.8197	0.8993	2393403	2919872	25000000	2393403	22080128	240267	286202
VGG16 - UNET	Austin 4	0.9568	0.6278	0.7923	1822746	2903307	25000000	1822746	22096693	223702	856859
FPN - ResNeXt50	Austin 5	0.9791	0.7817	0.8804	1868595	2390512	25000000	1868595	22609488	229516	292401
VGG16 - UNET	Austin 5	0.9613	0.5864	0.7739	1372384	2340227	25000000	1372384	22659773	179231	788612

Ek Tablo 3. Şikago bölgesi eğitim verileri

Model-Bölütleme	Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN-ResNeXt50	Şikago1	0.9614	0.7670	0.8642	3180334	4146236	25000000	3180334	20853764	555306	410596
VGG16- UNET	Şikago1	0.9512	0.7220	0.8366	3170964	4391687	25000000	3170964	20608313	800757	419966
FPN-ResNeXt50	Şikago2	0.8925	0.7178	0.8051	6835028	9522838	25000000	6835028	15477162	1758794	929016
VGG16- UNET	Şikago2	0.8854	0.7007	0.7931	6709042	9574282	25000000	6709042	15425718	1810238	1055002
FPN-ResNeXt50	Şikago3	0.9202	0.6904	0.8053	4449823	6444834	25000000	4449823	18555166	1222518	772493
VGG16- UNET	Şikago3	0.9121	0.6635	0.7878	4331934	6529056	25000000	4331934	18470944	1306740	890382
FPN-ResNeXt50	Şikago4	0.9366	0.7164	0.8265	4001478	5585380	25000000	4001478	19414620	952671	631231
VGG16- UNET	Şikago4	0.9285	0.6848	0.8066	3884710	5672889	25000000	3884710	19327111	1040180	747999
FPN-ResNeXt50	Şikago5	0.9528	0.7522	0.8525	3584109	4764544	25000000	3584109	20235456	649780	530655
VGG16- UNET	Şikago5	0.9475	0.7268	0.8371	3490737	4803042	25000000	3490737	20196958	688278	624027
FPN-ResNeXt50	Şikago6	0.9163	0.7343	0.8253	5779207	7870670	25000000	5779207	17129330	1224338	867125
VGG16- UNET	Şikago6	0.9082	0.7089	0.8086	5589100	7884037	25000000	5589100	17115963	1237705	1057232

Ek Tablo 4. Kitsap bölgesi eğitim verileri

Model - Bölütleme	Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN - ResNeXt50	Kitsap1	0.9993	0.7085	0.8539	39928	56359	25000000	39928	24943641	6835	9596
VGG16 - UNET	Kitsap1	0.9993	0.6841	0.8417	39753	58112	25000000	39753	24941888	8588	9771
FPN - ResNeXt50	Kitsap2	0.9982	0.8143	0.9062	202731	248949	25000000	202731	24751051	25107	21111
VGG16 - UNET	Kitsap2	0.9976	0.7722	0.8849	201387	260804	25000000	201387	24739196	36962	22455
FPN - ResNeXt50	Kitsap3	0.9907	0.8525	0.9216	1349056	1582438	25000000	1349056	23417562	129387	103995
VGG16 - UNET	Kitsap3	0.9877	0.8137	0.9007	1340515	1647441	25000000	1340515	23352559	194390	112536
FPN - ResNeXt50	Kitsap4	0.9873	0.3367	0.6625	160645	477176	25000000	160645	24522824	29162	287369
VGG16 - UNET	Kitsap4	0.9866	0.3121	0.6494	151990	486927	25000000	151990	24513073	38913	296024
FPN-ResNeXt50	Kitsap5	0.9918	0,4870	0.7394	193731	397812	25000000	193731	24602188	64293	139788
VGG16- UNET	Kitsap5	0.9913	0,4420	0.7166	173185	391848	25000000	173185	24608152	58329	160334
FPN-ResNeXt50	Kitsap6	0.9954	0,7665	0.8810	374698	488838	25000000	374698	24511162	54494	59646
VGG16- UNET	Kitsap6	0.9944	0,7215	0.8580	363457	503725	25000000	363457	24496275	69381	70887

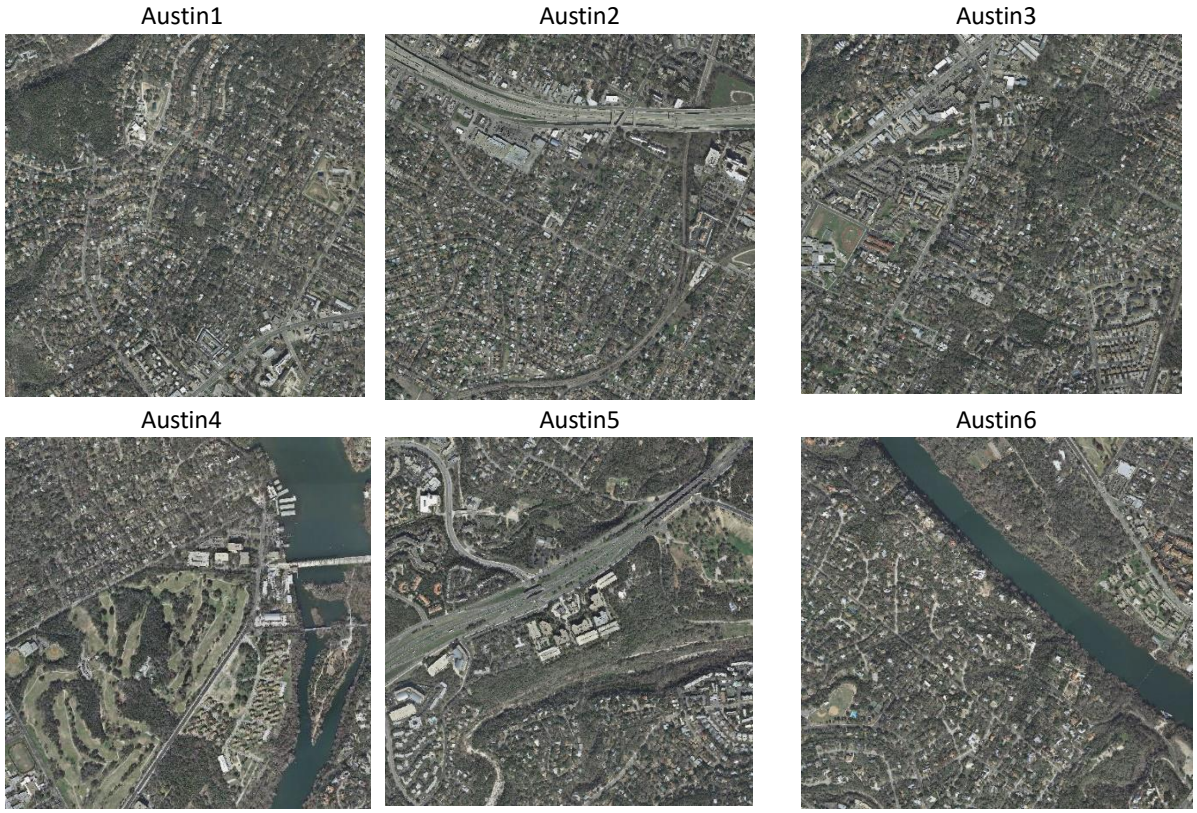
Ek Tablo 5. Batı Tirol bölgesi eğitim verileri

Model-Bölütleme	Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN-ResNeXt50	BatıTirol1	0.9830	0.7804	0.8817	1511420	1936761	25000000	1511420	23063239	192294	233047
VGG16- UNET	BatıTirol1	0.9806	0.7591	0.8699	1527447	2012183	25000000	1527447	22987817	267716	217020
FPN-ResNeXt50	BatıTirol2	0.9905	0.7968	0.8936	932761	1170648	25000000	932761	23829352	110015	127872
VGG16- UNET	BatıTirol2	0.9874	0.7462	0.8668	928729	1244603	25000000	928729	23755397	183970	131904
FPN-ResNeXt50	BatıTirol3	0.9789	0.8161	0.8975	2339869	2867114	25000000	2339869	22132886	270222	257023
VGG16- UNET	BatıTirol3	0.9734	0.7796	0.8765	2353141	3018553	25000000	2353141	21981447	421661	243751
FPN-ResNeXt50	BatıTirol4	0.9859	0.8274	0.9066	1693554	2046781	25000000	1693554	22953219	142026	211201
VGG16- UNET	BatıTirol4	0.9818	0.7856	0.8837	1669573	2125236	25000000	1669573	22874764	220481	235182
FPN-ResNeXt50	BatıTirol5	0.9925	0.8970	0.9447	1642251	1830834	25000000	1642251	23169166	78391	110192
VGG16- UNET	BatıTirol5	0.9891	0.8539	0.9215	1596295	1869441	25000000	1596295	23130559	116998	156148
FPN-ResNeXt50	BatıTirol6	0.9895	0.8362	0.9128	1340828	1603534	25000000	1340828	23396466	133670	129036
VGG16- UNET	BatıTirol6	0.9862	0.7920	0.8891	1317465	1663379	25000000	1317465	23336621	193515	152399

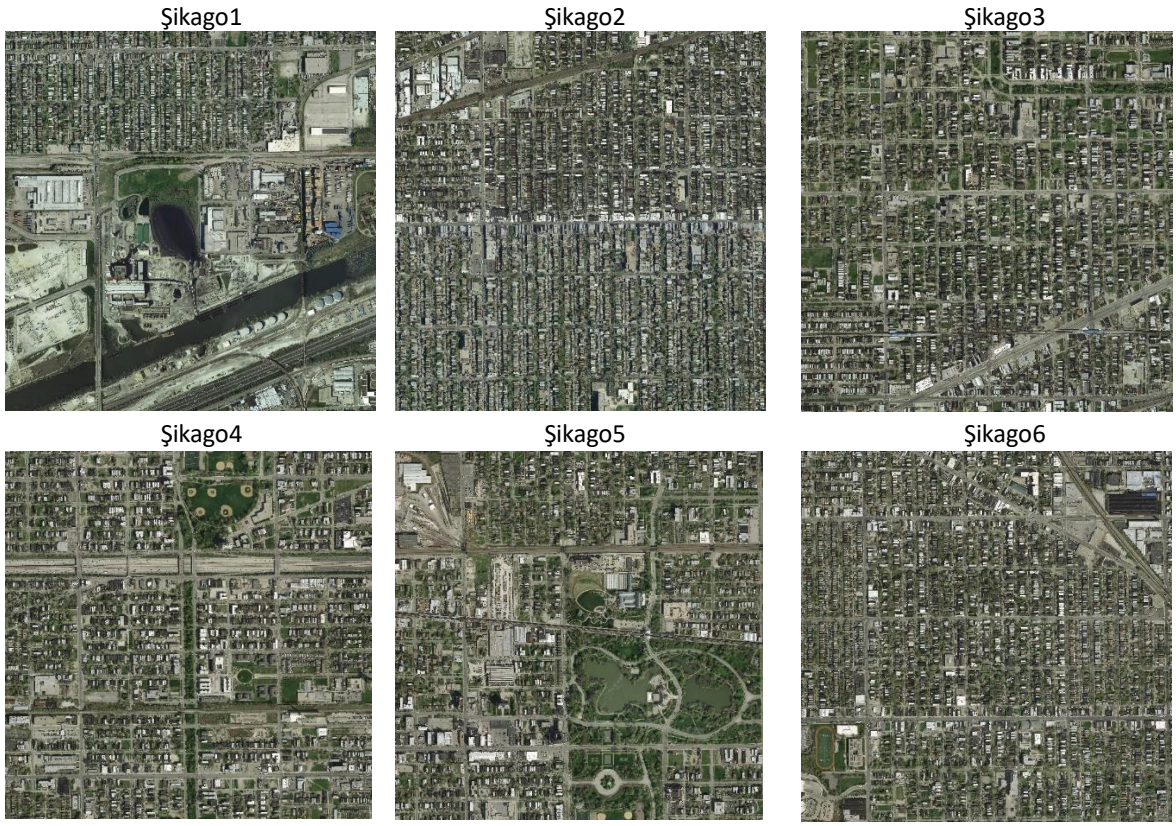
Ek Tablo 6. Viyana bölgesi eğitim verileri

Model-Bölütleme	Dosya	Doğruluk	IoU	Birleşik Ölçüt	Kesişim	Birleşim	Toplam Piksel	Gerçek Pozitif	Gerçek Negatif	Yanlış Pozitif	Yanlış Negatif
FPN-ResNeXt50	Viyana1	0.9601	0.7974	0.8788	3922067	4918545	25000000	3922067	20081455	407707	588771
VGG16- UNET	Viyana1	0.9551	0.7801	0.8676	3980795	5102873	25000000	3980795	19897127	592035	530043
FPN-ResNeXt50	Viyana2	0.9555	0.8492	0.9024	6259540	7370965	25000000	6259540	17629035	563513	547912
VGG16- UNET	Viyana2	0.9491	0.8311	0.8901	6266110	7539243	25000000	6266110	17460757	731791	541342
FPN-ResNeXt50	Viyana3	0.9265	0.8152	0.8708	8107155	9945019	25000000	8107155	15054981	723341	1114523
VGG16- UNET	Viyana3	0.9104	0.7824	0.8464	8050359	10289126	25000000	8050359	14710874	1067448	1171319
FPN-ResNeXt50	Viyana4	0.9547	0.8560	0.9053	6739276	7872733	25000000	6739276	17127267	714384	419073
VGG16- UNET	Viyana4	0.9388	0.8125	0.8756	6629786	8159896	25000000	6629786	16840104	1001547	528563
FPN-ResNeXt50	Viyana5	0.9582	0.8100	0.8841	4453111	5497713	25000000	4453111	19502287	563267	481335
VGG16- UNET	Viyana5	0.9487	0.7707	0.8597	4312309	5595596	25000000	4312309	19404404	661150	622137
FPN-ResNeXt50	Viyana6	0.9522	0.6672	0.8097	2393893	3587826	25000000	2393893	21412174	783249	410684
VGG16- UNET	Viyana6	0.9505	0.6574	0.8039	2376015	3614229	25000000	2376015	21385771	809652	428562

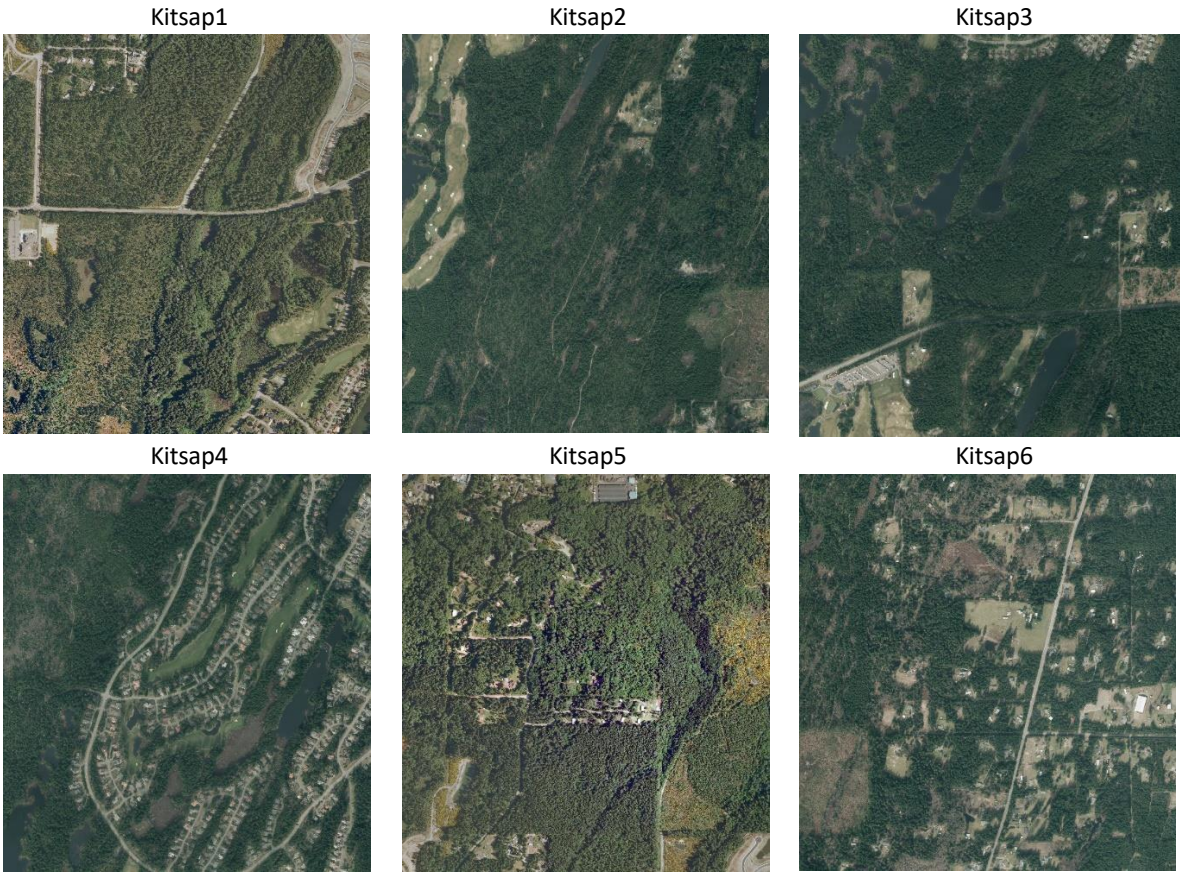
Her biri 6 bölgeye ayrılmış eğitim bölgelerinin görüntüleri Ek Şekil 1 – Ek Şekil 5'te verilmektedir.



Ek Şekil 1. Austin Kenti 6 bölgeye ayrılmış eğitim veri seti görüntüsü



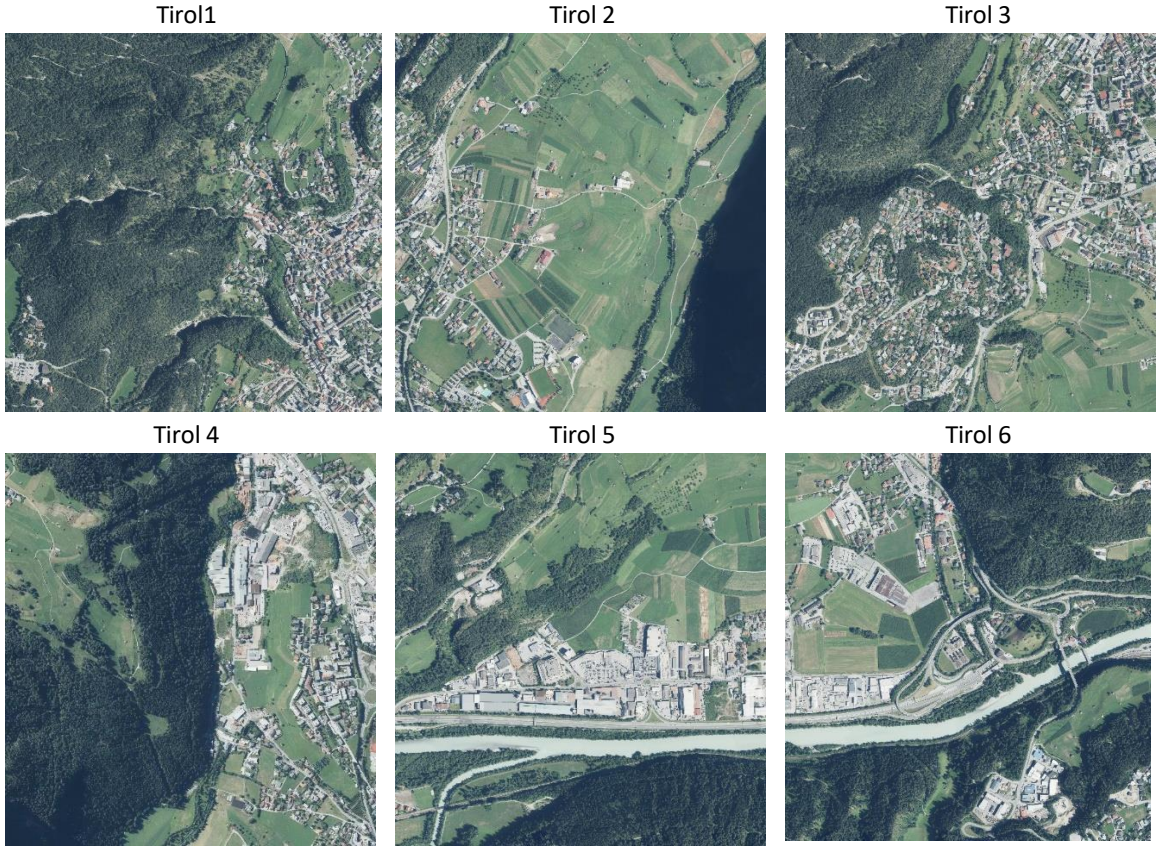
Ek Şekil 2. Şikago Kenti 6 bölgeye ayrılmış eğitim veri seti görüntüsü



Ek Şekil 3. Kitsap Kenti 6 bölgeye ayrılmış eğitim veri seti görüntüsü



Ek Şekil 4. Viyana Kenti 6 bölgeye ayrılmış eğitim veri seti görüntüsü



Ek Şekil 5. Tirol Kenti 6 bölgeye ayrılmış eğitim veri seti görüntüsü

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 168–180
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Orman Yangınlarının Etkilerinin Analizi: Taşköprü 2020 Orman Yangını Örneği

Analysis of the Effects of Forest Fires Using Remote Sensing and GIS: The Case of the 2020 Taşköprü Forest Fire

Tolga Kaynak[1]*

[1]*Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Tolga Kaynak
tolgakaynak@ohu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1643526

Yayın süreci
Geliş tarihi: 20.02.2025
Kabul tarihi: 05.06.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Orman yangınları, ekosistem üzerinde önemli çevresel etkiler yaratan ve doğal kaynakların sürdürülebilirliğini tehdit eden afetler arasında yer almaktadır. 2020 yılında Kastamonu ilinin Taşköprü ilçesinde meydana gelen orman yangınının yangın öncesi ve sonrası ekolojik değişimleri belirlemek için Sentinel-2 ve Landsat 8 uydu görüntülerinden elde edilen Fark Normalize Edilmiş Yanma Oranı (dNBR), Fark Normalize Edilmiş Bitki örtüsü İndeksi (dNDVI) ve Fark Arazi Yüzey Sıcaklığı (dLST) haritaları kullanılmıştır. Bu haritalar Avrupa Orman Yangın Bilgi Sistemi (EFFIS) verileriyle karşılaştırılarak doğruluk analizi yapılmıştır. dNBR sonuçları Sentinel-2 için %84,44, Landsat 8 için %81,53 doğruluk oranı ile yangın alanlarını yüksek doğrulukla belirlemiştir. dNDVI analizleri ise Sentinel-2 ve Landsat 8 için sırasıyla %77,84 ve %74,81 doğruluk sağlamıştır. Ayrıca, dLST haritası %77,26 doğruluk oranına ulaşmıştır. Sonuçlar, Sentinel-2 görüntülerinin daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle yangın alanlarını belirlemede daha doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, uydu verilerinin spektral bant genişlikleri, görüntüleme zamanlamaları ve atmosferik etkiler gibi faktörler de doğruluk üzerinde önemli etkiye sahip olmuştur. Bu çalışma, orman yangınlarının tespitinde Uzaktan Algılama (UA) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tekniklerinin etkinliğini vurgulamakta; ayrıca yangın yönetim ve ekosistem restorasyon stratejilerinin geliştirilmesine yönelik bir bilimsel katkı sunmaktadır.

***Anahtar kelimeler:** Orman yangını, CBS, Uzaktan algılama*

Abstract

Forest fires are among the disasters that create significant environmental impacts on ecosystems and threaten the sustainability of natural resources. Difference Normalized Burn Ratio (dNBR), Difference Normalized Difference Vegetation Index (dNDVI), and Difference Land Surface Temperature (dLST) maps derived from Sentinel-2 and Landsat 8 satellite imagery were used to determine ecological changes before and after the forest fire that occurred in Taşköprü district, Kastamonu province, in 2020. Accuracy analysis was performed by comparing these maps with data from the European Forest Fire Information System (EFFIS). dNBR results identified fire areas with high accuracy, with an accuracy rate of 84.44% for Sentinel-2 and 81.53% for Landsat 8. dNDVI analysis provided accuracy rates of 77.84% and 74.81% for Sentinel-2 and Landsat 8, respectively. In addition, dLST map achieved an accuracy rate of 77.26%. The results showed that Sentinel-2 imagery produced more accurate results in determining fire areas due to their higher spatial resolution. However, factors such as spectral bandwidths of satellite data, imaging timings and atmospheric effects have also had a significant impact on accuracy. This study highlights the effectiveness of Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) techniques in detecting forest fires; it also presents a scientific contribution to the development of fire management and ecosystem restoration strategies.

***Keywords:** Forest fire, GIS, Remote sensing*

1. Giriş

Afetler, toplumların kendi kaynaklarıyla başa çıkamayacağı düzeyde, insan hayatını, ekonomik yapıyı ve doğal çevreyi olumsuz etkileyen olaylar olarak tanımlanmaktadır (Smith vd., 2023). Afetler genel olarak doğal ve insan kaynaklı afetler olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılmaktadır. Doğal afetler, jeolojik, meteorolojik ve biyolojik faktörlerden kaynaklanırken, insan kaynaklı afetler ise insan faaliyetlerinin bir sonucudur. Doğal afetler arasında deprem, sel, heyelan, kasırga ve orman yangınları gibi olaylar yer almaktadır. Buna karşın, insan kaynaklı afetlere ise endüstriyel kazalar, nükleer felaketler ve kimyasal sızıntılar örnek gösterilmektedir (Alexander, 2002). Orman yangınları, hem doğal hem de insan kaynaklı nedenlerle meydana gelebilen karmaşık afet türlerinden biridir. Doğal nedenler arasında özellikle yıldırım düşmesi ve uzun süreli kurak hava koşulları öne çıkarken; insan kaynaklı nedenler, tarım arazilerinin açılması, anız yakma uygulamaları ve ormanlık alanlarda ihmalkâr davranışlar gibi etkenleri içermektedir.

Orman yangınları, doğal ekosistemlerin yapısını, biyolojik çeşitliliği ve karbon döngüsünü olumsuz etkileyen, çoğu zaman geri dönüşü zor zararların meydana geldiği karmaşık olaylardır (Bowman vd., 2009). Bu yangınlar, uzun vadede toprağın verimliliğini düşürebilir. Yangın sonrası artan erozyon ve çölleşme riski, ekosistemin kendini toparlama sürecini zorlaştırabilir. Orman yangınları, özellikle Akdeniz iklim kuşağında bulunan ülkelerde yoğun olarak görülmekte ve yaz aylarında daha tehlikeli hale gelmektedir. Bu dönemde İspanya, Yunanistan, İtalya ve Portekiz gibi Güney Avrupa ülkelerinde kaydedilen yüksek sıcaklıklar ve düşük nem oranı, yangınların çıkış ve yayılım riskini artıran başlıca iklimsel etkenler arasında yer almaktadır (San-Miguel-Ayanz vd., 2013). Kaliforniya ve Avustralya'da da benzer şekilde yüksek sıcaklıklar, kuraklık ve kuvvetli rüzgârlar yangın sezonunun şiddetini artırmaktadır (Bowman vd., 2009). Türkiye ise coğrafi konumu ve iklim özellikleri nedeniyle Akdeniz iklimine sahip bölgelerinde yoğun olarak orman yangınlarına maruz kalmaktadır. Orman Genel Müdürlüğü (OGM) verilerine göre, Türkiye'de 2021 yılında gerçekleşen yangınlarda yaklaşık 142 bin hektar ormanlık alan zarar görmüştür (Orman Genel Müdürlüğü, 2021).

UA teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte uydu verileri orman yangınlarının izlenmesinde, kontrol altına alınmasında ve etkilerinin analiz edilmesinde yangın yönetimi stratejilerinin başarılı olması açısından önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Yüzey sıcaklığı, orman yangınlarının tespiti ve izlenmesinde önemli bir parametredir. Yangın sırasında ve sonrasında yüzey sıcaklığındaki değişimler, yangının şiddeti ve yayılımı hakkında bilgi sağlar. Spektral yanma indeksleri ise, farklı dalga boylarındaki yansıma değerleri kullanılarak yanan alanların belirlenmesi ve yangın etkilerinin haritalanmasında kullanılmaktadır (Lentile vd., 2006). Normalize Edilmiş Yanma Oranı (NBR) ve Yanan Alan İndeksi (BAI), bu analizlerde yaygın olarak kullanılan temel indekslerdir (Key & Benson, 2006). Bununla birlikte, son yıllarda Arazi Yüzey Sıcaklığı (LST) ve bu veriden türetilen dLST göstergesi, yangın sonrası ısısal aykırılıkların belirlenmesinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Özellikle MODIS ve Landsat gibi platformlardan elde edilen LST verileri kullanılarak, yangın sonrası yüzey sıcaklığında meydana gelen değişimlerin mekânsal desenleri detaylı biçimde ortaya konabilmektedir (Maffei vd., 2018; Mohammed vd., 2025). dLST, sadece yanmış alanların belirlenmesiyle kalmayıp aynı zamanda yangının şiddetini yansıtan dolaylı bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Mehmood vd., 2024). Bu indeksler kullanılarak dünyanın farklı bölgelerindeki ve Türkiye'deki orman yangınları incelenmiştir.

Vlassova vd. (2014), farklı dönemlerde alınmış Landsat görüntülerini kullanarak LST ile orman yangını şiddeti arasındaki ilişkiyi incelemiş ve dLST ile dNDVI arasındaki korelasyonun, yanmış alanların belirlenmesinde güçlü bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, dLST'nin yalnız başına değil, dNBR ve dNDVI gibi spektral indekslerle birlikte kullanıldığında yangının ısıl ve biyofiziksel etkilerini daha doğru yansıttığını göstermiştir. Fernández-García vd. (2018), yangına eğilimli üç farklı iklim bölgesinde yangın şiddetini değerlendirmek amacıyla dNBR, dNDVI ve dLST gibi metrikleri kullanarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, farklı iklim bölgelerinde meydana gelen yangınların, Landsat görüntüleri ile incelenmiş; özellikle dNBR'nin yangın şiddetinin mekânsal dağılımını belirlemede yüksek doğruluk sağladığı raporlanmıştır. Ayrıca, dNDVI'nin yangın sonrası vejetasyon toparlanmasını hassas bir şekilde yansıttığı, dLST'nin ise yüzey sıcaklıklarındaki değişimlerle birlikte yanmış alanların tespiti ve yangın sonrası ısıl anomalilerin belirlenmesinde tamamlayıcı bir gösterge olduğu vurgulanmıştır. García-Llamas vd. (2019), Akdeniz'e özgü yangına eğilimli orman ekosistemlerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Landsat 8, Sentinel-2 ve Deimos-1 uydu verilerinden türetilen dNBR, dLST ve dNDVI indekslerini karşılaştırmalı olarak analiz etmiş ve farklı sensörlerin yanmışlık şiddeti belirlemedeki performanslarını değerlendirmiştir. Çalışmada, Sentinel-2 verilerinin daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle küçük ölçekli yangın etkilerinin belirlenmesinde daha doğru sonuçlar verdiği, buna karşın Landsat 8'in zamansal kapsam avantajı sunduğu raporlanmıştır. Ayrıca, dNBR indeksinin özellikle yüksek şiddetli yanmış alanlarda daha güçlü ayrımlar sağladığı, dNDVI'nin ise vejetasyon kaybının incelenmesinde tamamlayıcı bir rol üstlendiği ifade edilmiştir. Bu bulgular, dNBR ve dNDVI'nın uygun sensör seçimiyle birlikte kullanıldığında yangın sonrası etkilerin daha hassas şekilde izlenmesine katkı sunduğunu göstermiştir. Fernández-Manso ve Quintano (2022), Landsat uydu verilerinden türetilen yüzey enerji dengesi değişkenlerinin analiz edilmesiyle, yangın alanlarında dNBR ile uyumlu sonuçlar verebildiği tespit edilmiştir. Bu kapsamda, enerji dengesi parametrelerinin dSLT yerine dNBR ve dNDVI ile birlikte değerlendirilmesinin, yangın şiddeti haritalarının yorumlanmasında çok boyutlu bir analiz çerçevesi sunduğu vurgulanmıştır. Srivastava vd. (2021), Avustralya'nın güneydoğu Queensland bölgesinde, yangın öncesi planlama ve

yönetim süreçlerinde mekânsal veri tabanlarının etkin kullanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar, uydu verileri, topografik analizler ve bitki örtüsü sınıflamaları gibi çok katmanlı coğrafi verileri bir araya getirerek kontrollü yakma uygulamaları için karar destek sistemleri geliştirmiştir. Çalışma, dNBR, dNDVI ve dLST gibi UA göstergelerinin, mekânsal karar destek sistemleriyle entegrasyonunun, yangın sonrası analizlerin ötesinde proaktif yangın yönetiminde de değer taşıdığını tespit etmişlerdir. Guo vd. (2022), Çin'in güneyindeki ormanlarda yürüttükleri çalışmada, yangın şiddetinin belirlenmesinde optimum spektral indeksi seçmek için 12 farklı spektral indeksi karşılaştırdılar. Çalışma kapsamında dNBR, RdNBR ve RBR'nin diğerlerinden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Zheng vd. (2022), çalışma alanının yanma şiddetinin tespitinde dNBR ve dNDVI oldukça düşük performans göstermiştir. dLST ise bunlara kıyasla %34.80 ile daha yüksek genel doğruluğa sahip olmuştur. Bu sonuçlar nedeniyle çalışma kapsamında yanma şiddeti seviyelerinin bulunmasında dLST, dNBR ve dNDVI yerine SSTCA-SVR modelinin kullanılmasının yararlı olacağı belirtilmiştir. Barnadi vd. (2023), Endonezya'daki Gililawa Darat adasında meydana gelen büyük çaplı bir orman yangınının yanma şiddeti potansiyelini değerlendirmek için dNBR, MIRBI, dMIRBI, CSI, dCSI, NDVI, dNDVI, EVI ve dEVI gibi Sentinel-2 ile üretilen ve LST, dLST, LST/EVI ve d(LST/EVI) gibi Landsat 8 ile üretilen göstergeler kullanılmıştır. Doğruluk değerlendirme aşamasında Sentinel-2 uydusundan üretilen dNBR en iyi performansı göstermiştir. Buna karşın Landsat uydusu kullanılarak oluşturulan göstergelerden dLST en yüksek genel doğruluk ve kappa değerlerine sahip olmasına rağmen zayıf performans göstermiştir. Mohammed vd. (2025), Bangladeş'teki Rema-Kalenga Yaban Hayatı Koruma Alanı'nda, dNBR ile insan kaynaklı orman yangınlarının mekânsal analizini gerçekleştirmiştir. Ayrıca bu indeksin farklı spektral indeksler (dNDVI, dLST ve dEVI), toprak özellikleri (kum, silt ve kil gibi) ve bitki özellikleri (çıplak zemin, ağaç örtüsü ve çalı örtüsü gibi) arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu işlemi yangının verdiği hasarı ve orman ekosisteminin yeniden büyüme potansiyelini tespit etmek için gerçekleştirmişlerdir. dNBR ile karşılaştırılanlar arasındaki ilişki orman yangınlarının etkisini anlamada anlamlı bulunmuştur. Sobrino vd. (2019) arazi üzerindeki ölçümler ile dNBR ve dNDVI indekslerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, bu indeksler ile arazi gözlemleri arasında anlamlı ilişkiler bulunduğu belirtilmiştir. Ancak, indekslerin doğruluğu, bitki örtüsü tipi, yangının şiddeti ve bölgesel değişkenlik gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebileceğini söylemişlerdir. Avetisyan vd. (2023) farklı orman ekosistemlerinde yangın sonrası değişimlerin izlenmesi için kullanılan spektral indekslerin etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışmada, dNDVI, dNBR ve dDI gibi indekslerin, yanmış alanların tespitinde farklı performans gösterdiği ve özellikle orman yapısı ile topografik değişkenlerin indeks performansını doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Qarallah vd. (2022) çalışmalarında, yarı-kurak bir bölgedeki küçük ölçekli orman yangınlarının tespiti için Sentinel-2 ve Landsat 8 uydu verileri kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek mekansal çözünürlüğe sahip Sentinel-2 verilerinin, Landsat 8 verilerine kıyasla yangın sonrası değişimlerin daha ayrıntılı bir şekilde belirlenmesine olanak sağladığı ifade edilmiştir. Ancak, küçük ölçekli yangınların tespitinde her iki uydu sisteminin de bazı kısıtlamalara sahip olduğu vurgulanmıştır.

Türkiye'de yapılan çalışmalarda ise Çolak ve Sunar (2018) yangın öncesi ve sonrası yüzey sıcaklığı değişimlerinin mekansal analizi yapılmıştır. Çalışma, yüzey sıcaklığı verilerinin yangın öncesinde yüksek yangın riski taşıyan alanların belirlenmesinde ve yangın sonrası ekosistem değişimlerinin izlenmesinde önemli bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, Arazi Yüzey Sıcaklığı (LST) verilerinin doğruluğunun atmosferik koşullar ve yüzey özellikleri gibi değişkenlerden etkilendiği belirtilmiştir. Erener ve Sarp (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada uydu görüntülerinin orman yangınlarının izlenmesinde ve analizinde etkin bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışma, yangın alanlarının belirlenmesi sürecinde uydu görüntülerinin ve CBS destekli analizlerin önemini vurgulamıştır. Sarp vd. (2018) Mersin-Anamur orman yangınının UA teknikleri ile analiz edilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş ve mekansal analizlerin yangın alanlarının belirlenmesinde etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Sabuncu ve Özener (2019), İzmir-Seferihisar orman yangını örneğinde yanmış alanların tespiti için UA tekniklerini kullanarak farklı indekslerin etkinliğini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, yangın alanlarının belirlenmesinde NBR gibi indislerin öne çıktığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, yangın sonrası alanların geri kazanım sürecinin izlenmesi açısından da UA yöntemlerinin önemine dikkat çekilmiştir. Çolak ve Sunar (2020), İzmir'in Menderes ilçesinde meydana gelen orman yangınını incelemiştir. Çalışmada dLST ile dNBR arasında yüksek korelasyon tespit edilmiştir. Ayrıca kapalılık oranının %71'den büyük ve eğimin ise %35'ten büyük olduğu alanlarda yanma olayının en fazla olduğu tespit edilmiştir. Yüksel (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışma, farklı UA indislerinin yanmış alanların tespitindeki etkinliğini incelemiş ve 2022 yılında Mersin'in Gülnar bölgesinde gerçekleşen orman yangını örnek olay olarak ele almıştır. Bu çalışmada, yangın alanlarını belirlemede kullanılan farklı spektral indislerin karşılaştırmalı analizleri yapılmış ve en uygun yöntemlerin belirlenmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Abdikan vd. (2022) Akdeniz ekosistemindeki Türk kızılçamı ormanındaki yanmış alanların tespitinde Sentinel-2 bantları, Landsat 8 bantları, Sentinel-1 C-bant ve ALOS-2 L-bant SAR görüntülerinin geri saçılımı kullanılmıştır. Ayrıca bu verilerinden üretilen NBR, dNBR, dLST ve geri saçılım farkları da kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm özelliklerin yanmış alan haritasının üzerindeki katkıları analiz edilmiştir. analizler sonucunda ALOS-2 verilerinin Sentinel-1 verilerinden daha iyi katkı sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca doğruluğu değerlendiren istatistiksel metriklere göre Landsat 8 bantları, dNBR, dLST, ve L-bant kombinasyonunun iyi sonucu verdiği bulunmuştur. Çolak ve Sunar (2023) Arazi Yüzey Sıcaklığı (LST) verilerinin, yangın öncesi ve sonrası mekânsal analizlerdeki etkinliğini değerlendirmişlerdir.

Çalışmanın ilk aşamasında yangın öncesi LST haritalarının tüm meteorolojik parametrelerle ciddi oranda ilişkili olduğu tespit edildi. Daha sonra yangın sonrası bozulmaları izlemek için yangın sonrası üretilen LST, dLST, NDMI, DI, dNBR ve TVDI arasında korelasyon analizi gerçekleştirildi. Bu işlem sonucunda en yüksek korelasyon dLST ile dNBR arasında bulunmuştur.

Türkiye'deki en şiddetli orman yangınları genellikle Akdeniz ve Ege Bölgelerinde meydana gelmiştir. Bu durum bölgelerdeki orman yangınları probleminin çok yönlü incelenmesi gerekliliğini gözler önüne sermiştir. Bu bağlamda, çalışma alanı olarak Türkiye'deki orman yangınları ile ilgili çalışmalar Akdeniz ve Ege bölgelerinde gerçekleşmiştir. Buna karşın, Karadeniz Bölgesi'nde meydana gelen büyük çaplı orman yangınlarına ilişkin UA temelli çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Özellikle 2020 yılında Kastamonu ilinin Taşköprü ilçesinde gerçekleşen büyük yangın, bu bölge için önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bu bağlamda çalışma, Karadeniz Bölgesi'ndeki orman yangını dinamiklerinin anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Nitekim 2020 yılında Karadeniz Bölgesindeki Kastamonu ilindeki Taşköprü ilçesinde meydana gelen orman yangınında önemli derecede orman kaybı söz konusu olmuştur. Bu nedenle çalışma, hem literatürdeki bölgesel boşluğu doldurmayı hem de Taşköprü orman yangını özelinde yüzey sıcaklığı ve spektral yanma indekslerinin kullanım potansiyelini ortaya koymayı hedeflemiştir.

Çalışmada kapsamında, yangın öncesi ve sonrası koşullar karşılaştırılarak zarar tespiti yapılmasına yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı UA göstergelerinin (dNBR, dNDVI ve dLST) birlikte değerlendirilmesi yoluyla Karadeniz Bölgesi'nde gerçekleşen nadir bir yangın olayına çok boyutlu bir yaklaşım sunarak bölgesel literatüre özgün bir katkı sağlamayı hedeflemiştir. Bununla birlikte, çalışma sonuçları, orman yangınlarına ilişkin önleme, müdahale ve iyileştirme süreçlerinde karar vericilere bilimsel veriler sunarak büyük bir fayda sağlamaya yönelik stratejik bir yaklaşım sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

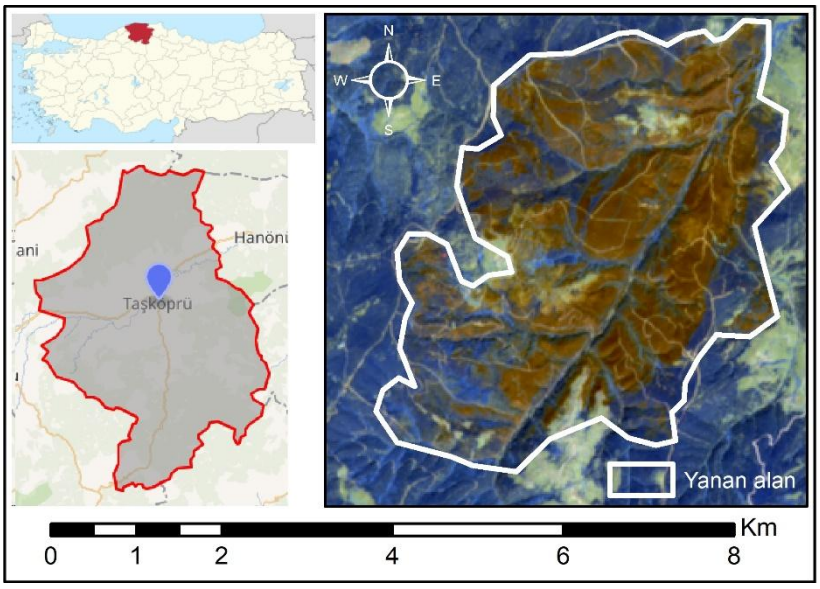
Bu çalışma kapsamında, 2 Eylül 2020 tarihinde Kastamonu ili Taşköprü ilçesine bağlı Derekaraağaç Köyü'nde meydana gelen orman yangınının etkilerini analiz etmek amacıyla, Sentinel-2 ve Landsat 8 görüntüleri kullanılmıştır. Uydulardan elde edilen çok bantlı görüntüler, yangın öncesi ve sonrası dönemleri kapsayacak şekilde seçilmiştir. Yangının etkilerini değerlendirmek amacıyla dNBR, dNDVI ve dLST göstergeleri üretilmiş; ayrıca model çıktılarının referans verilerle uyumu değerlendirilmiştir.

2.1 Çalışma Alanı

Kastamonu ili, coğrafi yapısı, iklimsel özellikleri ve zengin orman varlığı ile Karadeniz Bölgesi'nde önemli bir yere sahiptir (İbret, 2018). Kastamonu il merkezinin 42 km kuzeydoğusunda yer alan Taşköprü ilçesinde, Karadeniz iklimi ile iç kesimlerin karasal iklimi arasında geçiş özellikleri gözlemlenmektedir. Yıl boyunca genellikle bol yağış alan ilçede, yaz mevsimi kurak ve sıcak, kış mevsimi ise soğuk ve kar yağışlı geçmektedir. Ortalama yıllık sıcaklık 10-12 °C arasında olup, yıllık yağış miktarı 800-1.200 mm arasında değişmektedir. Yüzölçümü yaklaşık 1.971 km² olan ilçe, Tosya, Kastamonu merkez, Hanönü ve Cide ilçeleriyle komşudur. Deniz seviyesinden ortalama yüksekliği 500 metre civarında olup, batıdan doğuya doğru alçalan bir topoğrafik yapıya sahiptir.

Bölge halkının temel geçim kaynaklarının başlarında tarım, hayvancılık ve orman ürünleri gelmektedir. Ayrıca orman varlığı açısından zengin ve biyolojik çeşitliliği yüksek bir bölgedir. Bölgedeki bu zenginlikler, hem tarım hem de orman faaliyetlerine dayalı olarak çeşitli ekonomik olanaklar sunmaktadır. Bu durum, bölgedeki sanayi yatırımlarının gelişmesine de katkı sağlamaktadır. MOPAK gibi hâlen faaliyet gösteren kâğıt fabrikasının yanı sıra, son yıllarda bazı küçük sanayi işletmeleri (ağaç işleri, konfeksiyon, sarımsak işleme gibi) de faaliyete geçmiştir. Taşköprülü girişimcilerle kurulan EKOL Ağaç Sanayi, ilçenin ihracat yapan örnek kuruluşlarından biri olarak dikkat çekmektedir (Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı, 2012). Ancak, bölgenin doğal kaynaklarına dayalı bu ekonomik faaliyetler, çevresel risklerle de karşı karşıyadır.

Taşköprü, sahip olduğu geniş orman alanları, yaz aylarında artan sıcaklıklar ve düşük nem oranları gibi iklimsel koşullar nedeniyle orman yangınlarına karşı hassas bir bölge konumundadır. Orman yangınları, tarım alanlarının ve köylünün geçim kaynaklarını tehdit eden büyük bir sorun oluşturmaktadır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, yangınlar sonucu ortaya çıkan tahribat, bölgedeki bitki ve hayvan popülasyonlarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ekonomik açıdan ise can veya mal kayıplarına neden olabilmektedir. Bu çalışmada ele alınan vaka kapsamında, Taşköprü ilçesine bağlı Derekaraağaç Köyü'nde 2 Eylül 2020 tarihinde saat 15.00'te başlayan orman yangını, 700 hektardan fazla orman alanını yok etmiştir. Bu yangın sırasında Tekeoğlu Mahallesi'nde bulunan 4 ev ve 4 samanlık zarar görmüş, ancak can kaybı yaşanmamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı lokasyon haritası

2.2. Kullanılan Veri Kaynakları

Çalışma kapsamındaki girdi verileri Sentinel-2 ve Landsat 8 uydularından elde edilmiştir. Bu uydular kullanılarak üretilen girdi verilerinin doğruluk analizinde ise, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC) tarafından işletilen ve orman yangınlarının UA teknikleriyle izlendiği kapsamlı bir bilgi sistemi olan EFFIS veri tabanından 2 Eylül 2020 tarihine ait, çalışma alanında meydana gelen orman yangınının yerini gösteren vektör formatındaki harita temin edilmiştir (European Forest Fire Information System, 2023). EFFIS tarafından elde edilen yangınları gösteren poligonlar, hem ulusal hem de uluslararası orman yangını ile ilgili çalışmalarda referans veri kaynağı olarak kullanılmıştır (Lasaponara vd., 2019; Llorens vd., 2021; Çelik vd., 2024). Bu bağlamda, çalışmada da EFFIS yangın sınırları, model çıktılarının doğruluğunun değerlendirilmesinde güvenilir bir referans olarak ele alınmıştır. Sentinel-2 uydu görüntüleri Avrupa Birliği Uzay Ajansı (ESA)'nın web sitesinden (European Space Agency, 2021) ve Landsat 8 uydu görüntüleri ise Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmaları Kurumu (USGS)'in web sitesinden (U.S. Geological Survey, 2021) elde edilmiştir. Sentinel-2 görüntüleri L1-C seviyesinde, Landsat 8 görüntüleri ise L1 seviyesinde olup, her iki veri seti de radyometrik ve geometrik düzeltmelerden geçirilerek analizlere uygun hale getirilmektedir (Çelik vd., 2024). Bu iki uydu, farklı spektral ve mekansal özelliklere sahip olup, yangın etkilerinin daha ayrıntılı analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

Yangın öncesine (29 Ağustos 2020) ve yangın sonrasına (13 Eylül 2020) ait Sentinel-2 görüntüleri 10 m, 20 m ve 60 m mekansal çözünürlüğe sahip olup, toplam 13 spektral bant içermektedir (European Space Agency, 2021). Yangın öncesi (29 Ağustos 2020) ve yangın sonrası (16 Ekim 2020) tarihlerine ait Landsat 8 görüntüleri ise toplam 11 spektral banda sahip olan 15 m ile 100 m arasında değişen mekansal çözünürlükte veriler içermektedir.

2.3. dNBR, dNDVI ve dLST Değerlerinin Hesaplanması

Bu çalışma, 2020 yılında Taşköprü bölgesinde meydana gelen orman yangınının ekosistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. UA ve CBS teknolojileri, yangın öncesi ve yangın sonrası durumu gözlemlemek için bölgenin Landsat 8 uydu görüntülerinden elde edilen NBR, Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), ve LST haritalarını üretmek için kullanılmıştır.

NDVI, fotosentez yapan bitkilerin yoğunluğunu ve sağlığını belirlemek amacıyla kullanılan birimsiz bir UA göstergesidir. Bu endeks, kırmızı (Red) ve yakın kızılötesi (NIR) bantlarının yansıma değerleri arasındaki birtakım matematiksel işleme dayanarak hesaplanmaktadır (Denklem 1). NDVI değeri 1'e yakın olan bölgeler sağlıklı bitki örtüsüne sahipken, 0 veya negatif değerlere yakın bölgeler vejetasyonsuz alanlar olarak sınıflandırılmaktadır (Tucker, 1979).

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (1)$$

Ormanların yangın öncesinde NDVI değerleri genellikle yüksek olmaktadır. Bu durum, bitki örtüsü yoğunluğu yüksek olan alanlarda, yangının yayılmasına katkıda bulunabilecek yanıcı madde miktarının fazla olduğu anlamına gelmektedir.

Yangın sonrası NDVI değerleri ise genellikle inanılmaz bir şekilde düşer, çünkü yangın bitkilerin klorofil içeriğini yok eder ve toprağı açığa çıkarır. Bu değişim, yanmış alanların tespit edilmesi ve yangın sonrası ekosistem restorasyonu için önemli bir veri kaynağı sunmaktadır.

Yangın öncesi ve sonrası NDVI değerleri arasındaki fark, dNDVI (Differential NDVI) olarak adlandırılmaktadır ve Denklem 2 ile hesaplanmaktadır:

$$dNDVI = NDVIöncesi - NDVIsonrası \quad (2)$$

$dNDVI$ yangın sonrası bitki örtüsündeki değişiklikleri ve hasar düzeyini belirlemeye yardımcı olmaktadır. dNDVI değeri ne kadar büyükse, yangının ekosistem üzerindeki etkisi o kadar şiddetli olmaktadır.

NBR, yangın sonrası tahribatı belirlemek için kullanılan birimsiz bir UA indeksidir. NBR, yangın sonrası ekosistem değişimlerinin detaylı olarak değerlendirilmesine olanak tanır. Yanmış alanların belirlenmesi, yangının şiddetinin anlaşılması ve rehabilitasyon sürecinin planlanmasında önemli bir rol oynar (Parks vd., 2015). Bu endeks, yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) bantlarının kullanılmasıyla hesaplanmaktadır:

$$NBR = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR) \quad (3)$$

Sağlıklı vejetasyon, NIR bandında yüksek yansıtma gösterirken, SWIR bandında düşük yansıtma sergiler. Ancak yangın sonrası, bitki örtüsü tahrip olduğu için NIR yansıması azalırken, SWIR yansıması artmaktadır (Key & Benson, 2006).
Yangın öncesi ve sonrası NBR değerleri arasındaki farkı temsil eden dNBR yanmış alanların şiddetine ilişkin kategorik değerlendirmeler yapılmasını sağlar.

LST, bir bölgenin yüzey sıcaklığını ifade eden ve termal kızılötesi bant kullanılarak hesaplanan bir UA parametresidir. Bu çalışmada, LST hesaplamaları Landsat 8 TIRS sensörüne ait termal kızılötesi Band 10 (10.60–11.19 µm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bant, yüzey sıcaklığı analizlerinde yaygın olarak tercih edilen ve atmosferik etkileri minimize eden bir spektral aralık sunmaktadır. LST hesaplama sürecinde sırasıyla radyans dönüşümü, parlaklık sıcaklığı hesaplaması, yüzey yayınırlığı (emissivity) tahmini ve nihai LST değerinin belirlenmesi adımları izlenmiştir. Tüm bu işlemler, Landsat uydu verilerine özgü parametrelerle hesaplanan ve literatürde yaygın kabul görmüş standart yöntemlere dayanmaktadır (Junaidi vd., 2021; Ezzaher vd., 2023; Lv vd., 2024; Moharir vd., 2024).

Yangın sırasında ve sonrasında yüzey sıcaklıklarında önemli değişimler meydana gelmektedir. Yangın sonrası dönemde, yanmış alanlar güneş ışığını daha fazla emer ve bu durum LST değerlerinde artışa neden olur (García & Caselles, 1991).

Yangın öncesi ve sonrası LST değerleri arasındaki fark, dLST olarak adlandırılmaktadır ve şu denklem ile hesaplanmaktadır:

$$dLST = LST_{sonrası} - LST_{öncesi} \quad (4)$$

dLST, yangın sonrası yüzey sıcaklığındaki değişimleri belirlemek için kullanılır. dLST'nin yüksek olduğu bölgeler, yangının şiddetinin yüksek olduğu ve yüzey özelliklerinin değiştiği alanları temsil etmektedir. LST ve dLST analizleri, yanmış alanların belirlenmesi ve yangın sonrası toprak sıcaklığı değişimlerinin izlenmesi açısından büyük öneme sahiptir.

2.4 Doğruluk Değerlendirmesi

Türkçeye Alan Çakışma Oranı olarak çevrilen Area of Overlap Coefficient (AoC), UA veya CBS verilerinden elde edilen model çıktılarının, referans verilerle olan uyumunu nicel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılan temel doğruluk ölçütlerinden biridir. AoC, model tarafından tespit edilen ve referans veri ile örtüşen alanların yüzdesini ifade eder. Bu ölçütün matematiksel tanımı:

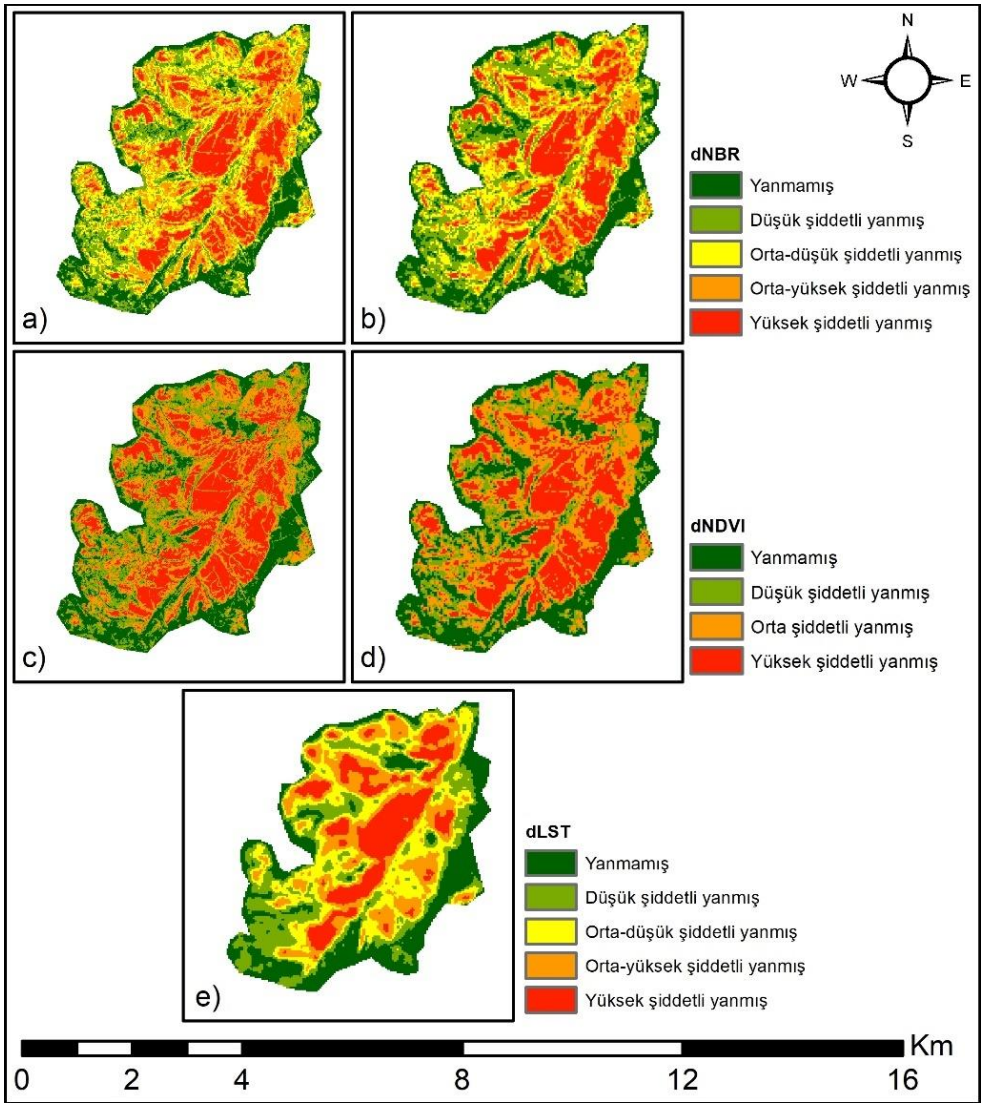
$$AoC(\%) = \frac{Gerçek\ pozitif\ alan\ (TP)}{Referans\ veri\ tarafından\ belirlenen\ toplam\ alan\ (TP + FN)} * 100 \quad (5)$$

EFFIS verileri doğrultusunda yapılan doğruluk değerlendirmesinde, her bir sınıflandırma sonucunun EFFIS poligonlarıyla çakışma düzeyi analiz edilmiştir. TP, hem model tarafından yanmış olarak sınıflandırılan hem de EFFIS verisinde yangın sınırı içinde kalan alanları ve FN ise model tarafından yanmamış olarak sınıflandırılan ancak EFFIS poligonları içinde kalan bölgeleri temsil etmektedir. AoC değeri %100'e ne kadar yakınsa, model o kadar yüksek doğrulukta tahmin yapmaktadır. Düşük AoC değerleri ise modelin tahmin yeteneğinin yetersiz olduğunu gösterir.

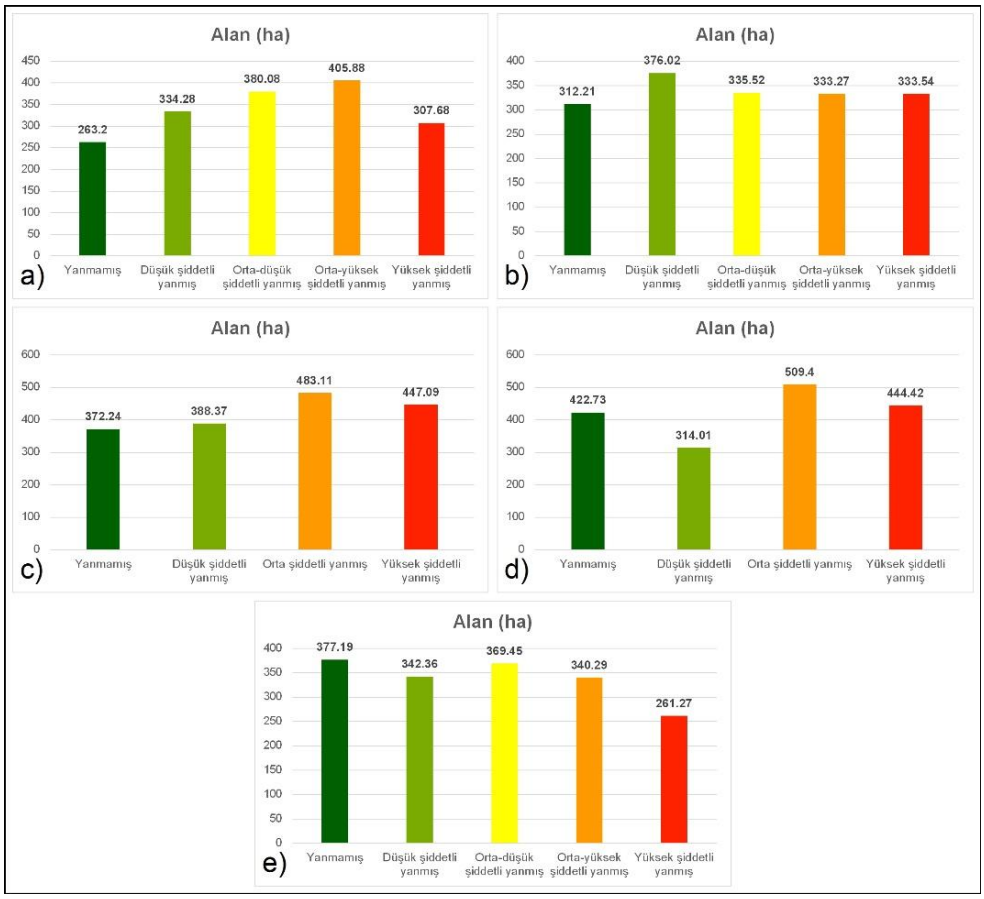
3. Bulgular

Çalışma alanında meydana gelen orman yangının şiddetini değerlendirmek için yangın öncesi ve yangın sonrası durumu gösteren Sentinel-2 ve Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Yangından etkilenen bölgeleri belirlemek için öncelikle her iki uydunun yangın öncesi ve sonrası tarihlerde çekilmiş görüntülerin NBR haritaları üretilmiştir. Daha sonra bu görüntülerden önceki görüntü sonraki görüntüden çıkarılarak Sentinel-2 ve Landsat 8 için dNBR haritaları elde edilmiştir. dNBR haritalarında uluslararası kabul görmüş eşik değer olan 0.1'den küçük alanlar yanmamış alan sınıflandırılmıştır (Şekil 2a ve Şekil 2b). Yine aynı kabul çerçevesinde 0.1-0.27 arası düşük şiddette yanmış, 0.27-0.44 arası orta-düşük şiddetli yanmış, 0.44-0.66 arası orta-yüksek şiddetli yanmış ve 0.66 üzeri ise yüksek şiddetli yanmış olarak sınıflandırılmıştır (U.S. Geological Survey, 2016; Çolak & Sunar, 2018; Çelik vd., 2024). Ayrıca bu sınıfların yangın alanı içindeki histogram dağılımı Şekil 3a ve Şekil 3b'de verilmiştir.

Sentinel-2 ve Landsat 8 tarafından oluşturulan dNBR haritalarının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, çalışma alanında rastgele bir biçimde 350 kontrol noktası seçilmiştir. Bu haritalar EFFIS tarafından sağlanan yangın poligonu verisi ile karşılaştırılmıştır. Her bir kontrol noktası, hem model çıktılarında (dNBR haritalarında) hem de referans veride (EFFIS poligonlarında) yanmış ya da yanmamış olarak tanımlanmıştır. Bu işlem sonucunda model tarafından yanmış olarak sınıflandırılan ve EFFIS poligonları içinde kalan noktaların toplamı TP ve model tarafından yanmamış olarak sınıflandırılan ancak EFFIS poligonları içerisinde yer alan noktaların toplamı FN de hesaplanmıştır. Bulunan nokta sayıları kullanılarak dNBR haritalarının doğrulukları sırasıyla Sentinel-2 için %84.44 ve Landsat 8 için %81.53 olarak bulunmuştur.



Şekil 2. Farklı veri kaynakları kullanılarak oluşturulan yanmış alan şiddeti haritaları: a) Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR indeksi, b) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dNBR indeksi, c) Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNDVI indeksi, d) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dNDVI indeksi, e) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dLST



Şekil 3. Farklı sınıflar için yanmış orman alanlarının alansal dağılımı: a) Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNBR indeksi, b) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dNBR indeksi, c) Sentinel-2 görüntülerinden türetilen dNDVI indeksi, d) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dNDVI indeksi, e) Landsat 8 görüntülerinden türetilen dLST

Yangın öncesine ve yangın sonrasına ait Sentinel-2 ve Landsat 8 uydu görüntülerinden toplam 4 adet NDVI haritaları üretilmiştir. Daha sonra her bir uydu görüntüsünün NDVI haritaları kendi içerisinde çıkarma işlemi yapılarak Sentinel-2 ve Landsat 8'in dNDVI haritaları oluşturulmuştur (Şekil 2c ve Şekil 2d). dNDVI haritaları yangın sonrası bitki örtüsü kaybı ve iyileşmesini değerlendirmek için elde edilmiştir. Bu haritalarda 0.1'den küçük alanlar yanmamış, 0.1-0.25 arası düşük şiddette yanmış, 0.25-0.45 arası orta şiddetli yanmış ve 0.45 üzeri ise yüksek şiddetli yanmış olarak kategorize edilmiştir (Sobrino vd., 2019; Qarallah vd., 2022). Ayrıca bu sınıfların yangın alanı içerisindeki alansal dağılımını gösteren histogram Şekil 3c ve Şekil 3d'de verilmiştir.

dNDVI haritalarının doğruluk değerlendirmesi, EFFIS veri tabanından elde edilen yangın poligonları ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma kapsamında Sentinel-2 ve Landsat 8 dNDVI haritalarından rastgele seçilen toplam 350 kontrol noktasında, her pikselin yanmış ya da yanmamış olup olmadığı hem model çıktısına (dNDVI) hem de referans veriye (EFFIS) göre değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda modelde yanmış olup, EFFIS poligonları içinde yer alan TP ve modelde yanmamış olarak sınıflandırılmış, ancak EFFIS yangın sınırları içinde kalan alan FN istatistiksel parametreleri hesaplanmıştır. Bu değerler AoC denkleminde kullanıldığında Sentinel-2 dNDVI haritası için doğruluk %77.84 ve Landsat 8 dNDVI haritası için ise doğruluk %74.81 elde edilmiştir.

Yangın öncesi ve sonrasına ait Landsat 8 uydusunun termal bantları hem LST'yi üretmek hem de LST'nin orman yangını üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Yangın öncesi ve yangın sonrası için oluşturulan LST haritaları birbirinden çıkarılarak dLST çalışma bölgesinin haritası elde edilmiştir (Şekil 2e). dLST haritası -2 °C'den küçük, -2-0.5 °C, 0.5-3 °C, 3-6 °C ve 6 °C'den büyük olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu eşik değerleri, literatürde orman yangınları sonrasında yüzey sıcaklığında meydana gelen değişimlerin sınıflandırılmasına ilişkin yapılan çalışmalar temel alınarak belirlenmiştir (Çolak & Sunar, 2023). Bu sınıfların yangın alanı içindeki kapsadığı alanı gösteren histogram dağılımı Şekil 3e'de verilmiştir.

dLST haritasının doğruluğu, EFFIS yangın poligonları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu analiz kapsamında, raster formatında üretilen dLST haritası ile vektör formatındaki EFFIS yangın sınırları mekânsal çakıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sırasında rastgele seçilen toplam 350 kontrol noktaları kullanılarak TP ve FN hesaplanmıştır.

Burada TP dLST haritasında yanmış olarak sınıflandırılan ve EFFIS poligonları içinde yer alan alan toplam nokta sayısını ifade ederken, FN ise dLST haritasında yanmamış olarak sınıflandırılan ancak EFFIS yangın sınırları içinde kalan toplam nokta sayısını ifade etmektedir. Bu hesaplamalar kullanılarak dLST için doğruluk değeri %77.26 olarak bulunmuştur.

4. Tartışma

Sentinel-2 ve Landsat 8 görüntülerinden elde edilen dNBR haritalarının sınıf bazındaki histogram dağılımı, orman yangınına maruz kalan alanların sırasıyla yaklaşık %84 ve %81'inin doğru şekilde tespit edildiğini ortaya koymuştur. Bu sonuç, yangının önemli etkilerini doğrulamıştır. EFFIS yangın çevreleri ile yapılan bu doğrulama, belirlenen yanmış alanlarının büyük ölçüde resmi yangın kayıtlarıyla örtüştüğünü ve dNBR indeksinin güvenilirliğini desteklediğini göstermiştir.

Sentinel-2 ve Landsat 8 ile elde edilen dNDVI haritaları EFFIS verileriyle karşılaştırıldığında doğruluk oranları sırasıyla %77.84 ve %74.81 olarak bulunmuş ve bu değerler, önemli bir vejetasyon değişimini göstermiştir. Bu sonuçlar, vejetasyon indekslerinin yangın sonrası koşullara oldukça duyarlı olduğunu belirten önceki çalışmalarla uyumlu bulunmuştur (Chuvieco vd., 2002; Veraverbeke vd., 2011; Mallinis vd., 2018; Smith vd., 2021).

Zaman serisi analizi, NDVI düşüşünün yangın sonrası dönemde en belirgin olduğunu ve yanmış alanlarda kısmi iyileşme gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, NDVI'nin zaman içinde yangın sonrası vejetasyonun izlenmesi için etkili bir şekilde kullanılabileceğini belirten önceki çalışmalarla tutarlılık sağlamıştır (Van Leeuwen, 2008; Pérez-Cabello vd., 2021).

Yanmış alanları belirlemede dLST'nin doğruluğu %77.26 olarak bulunmuş ve bu, yangın etkisi değerlendirmelerinde termal ölçümlerin potansiyel faydasını ortaya koymuştur. Yangın sonrası sıcaklık artışı en çok yüksek şiddetli yanmış alanlarda gözlemlenmiş ve bazı bölgelerde sıcaklık anormalliklerinde ciddi artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, yangın olaylarının bitki örtüsü kaybı ve toprak yüzeyinin açığa çıkması nedeniyle yüzey sıcaklığında önemli bir artışa neden olduğunu belirten önceki araştırmalarla uyumludur (Angelino vd., 2020; Yao vd., 2024).

AoC değerlerinin karşılaştırmalı analizi, Sentinel-2 verilerinin Landsat 8'e kıyasla yangınları daha hassas bir şekilde tanımladığını ortaya koymuştur. Bu farkın, Sentinel-2'nin 20 m mekansal çözünürlüğe sahip olmasına karşın, Landsat 8'in 30 m çözünürlüğe sahip olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ancak bu farklılık yalnızca mekânsal çözünürlükle açıklanamaz. Literatürde belirtildiği üzere, Sentinel-2 ve Landsat 8 verileri arasında spektral bant genişlikleri ve merkezi dalga boyları açısından da farklılıklar bulunmaktadır (Mallinis vd., 2018). Sentinel-2, özellikle NIR ve SWIR bantlarında daha dar bant genişliklerine sahip olduğundan, yangın sonrası spektral değişimlerin daha hassas yakalanmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca, Sentinel-2 verilerinin yangın sonrası dönemde daha kısa sürede alınması, bitki örtüsü toparlanmasının etkilerini minimize ederek daha gerçek zamanlı tespit yapılmasını sağlamıştır (Qarallah vd., 2022). Atmosferik koşullardan kaynaklanan yansıma ve saçılma farklılıkları da tespit performansında etkili olmuştur. Dolayısıyla, Sentinel-2'nin üstün performansı mekânsal çözünürlük avantajı kadar bu ek faktörlerden de etkilenmektedir. Öte yandan, Landsat 8'in termal görüntüleme yetenekleri, yangın sonrası sıcaklık değişiklikleri hakkında ek bilgiler sunarak bölgesel yangın izleme için önemli bir veri kaynağı olmaya devam etmektedir. Orman yangının sonrasını gösteren Landsat 8 uydusundan, bulutluluğun olmadığı ilk görüntü tarihinin yangın söndürüldükten yaklaşık bir ay sonra alınabilmiştir. Bu durum, bölgede bitki örtüsünün gelişiminin hızlı olmasından dolayı görüntüde yanmamış alanların miktarı fazla çıkmasına sebep olabilmektedir. Buna karşın Sentinel-2 uydu görüntüsünden yangın söndürüldükten hemen sonra çekilen görüntü alınabilmiştir.

EFFIS yangın verileri ile yapılan karşılaştırmalar, dLST'nin yanmış alanları belirlemede etkili olduğunu doğrulamakla birlikte, Sentinel-2 tarafından üretilen dNBR ve dNDVI gibi spektral indekslerden biraz daha düşük doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir. dLST ile bu haritalar karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, çalışma alanının önemli bir kısmında örtüşmeler sağlanırken, özellikle yangın sınırına yakın alanlarda farklılıklar göstermiştir. Bu durumun temel nedenlerinden biri, dLST'nin yalnızca termal değişimlere duyarlı olmasıdır. Yüzey sıcaklığında gözlenen artış, her zaman bitki örtüsü kaybı ile birebir örtüşmemekte; toprak nemi, yüzey rengi, eğim yönelimi ve güneşlenme süresi gibi faktörler de sıcaklık farklarını etkileyebilmektedir. Örneğin, yangın sonrası düşük şiddetli etkilenmiş bazı bölgelerde dNDVI ve dNBR düşük değer gösterse de, toprak yüzeyinin açığa çıkması nedeniyle dLST değerleri yüksek kalabilmektedir. Bu da FN değerinin yüksek çıkmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte, dLST, yangın sonrası termal anormalliklerin değerlendirilmesi ve arazi yüzey değişikliklerinin anlaşılması açısından değerli bir parametre olarak öne çıkmıştır.

Bulgular, dNBR'nin yangın şiddeti değerlendirmesi için birincil metrik olarak kullanılmasını desteklerken, dNDVI'nin bitki örtüsü kaybı ve iyileşmesi için güvenilir bir gösterge olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca, dLST, yangın sonrası termal anormallikler hakkında tamamlayıcı bilgiler sağlayarak yangının genel etkisinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Bu çalışmanın bir diğer önemli katkısı, Karadeniz Bölgesi gibi büyük çaplı orman yangınlarının nadiren incelendiği bir alanda kapsamlı bir UA tabanlı analiz gerçekleştirilmiş olmasıdır. Taşköprü 2020 orman yangınına odaklanan bu analiz, Sentinel-2 ve Landsat 8 verilerinin spektral ve termal özelliklerini çok boyutlu bir yaklaşımla değerlendirmiştir.

Bu kapsamda, yangın sonrası bitki örtüsü kaybı, sıcaklık anomalileri ve alan değişimleri farklı veri kaynakları kullanılarak bütüncül bir şekilde ele alınmış ve bölgesel yangın dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlanmıştır. Çalışmanın bulguları, Karadeniz Bölgesi'ndeki yangın izleme çalışmalarına yönelik literatürdeki sınırlı boşluğu doldurmakta ve gelecekteki araştırmalara önemli bir temel teşkil etmektedir.

5. Sonuçlar

Orman yangınları, doğal ve beşeri faktörlerin etkisiyle meydana gelen, ekosistem üzerinde yıkıcı sonuçlara yol açan afet türlerinden biridir. Orman yangınlarının en önemli nedenlerinden biri artan sıcaklık ve kuraklıktır. Küresel iklim değişikliği, sıcak hava dalgalarının sıklığını ve süresini artırarak yangın riskini yükseltmektedir. Özellikle düşük nem oranları ve azalan yağış miktarı, yanıcı madde birikimini artırarak yangınların yayılmasını kolaylaştırmaktadır. Yangınlar sırasında açığa çıkan karbon monoksit, partikül maddeler ve diğer zararlı gazlar, hava kirliliğini artırarak insan sağlığını tehdit etmektedir. Orman yangınları, su havzalarını olumsuz etkileyerek su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Özellikle yangın sonrası meydana gelen kül, su kaynaklarına taşınarak ekosistem üzerinde zararlı etkiler oluşturabilmektedir. Orman yangınları, flora ve fauna üzerinde geri dönüşü zor etkiler yaratmaktadır. Yangınların sık yaşandığı bölgelerde habitat kaybı nedeniyle birçok tür tehdit altına girmektedir. Bu durum, biyoçeşitliliğin azalmasına ve ekosistemlerin doğal dengesinin bozulmasına yol açmaktadır.

Türkiye'de orman yangınlarının en yoğun olarak gözlendiği bölgeler Akdeniz, Ege ve Marmara olup, bu alanlar uzun yıllardır çeşitli bilimsel çalışmalara konu olmuştur. Ancak Karadeniz Bölgesi'nde de zaman zaman büyük çaplı yangınlar meydana gelmekte ve bu durum, bölgedeki yangın riskinin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 2 Eylül 2020 tarihinde Kastamonu'nun Taşköprü ilçesinde gerçekleşen yangın, bölge tarihinin en geniş alanlı ve etkili orman yangınlarından biri olarak kayıtlara geçmiştir. Bu olay, yalnızca yerel değil, bölgesel ölçekte de yangın dinamiklerinin araştırılması gerektiğine işaret etmektedir. Bu nedenle, çalışmada söz konusu yangın alanı örnek vaka olarak seçilmiştir.

UA ve CBS tekniklerinin entegre kullanımı, orman yangınlarının çevresel etkilerinin çok boyutlu değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışmada, 2 Eylül 2020 tarihinde Kastamonu ili Taşköprü ilçesinde meydana gelen orman yangınının ekosistem üzerindeki biyofiziksel ve termal etkilerini tespit etmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda dNBR, dNDVI ve dLST olarak adlandırılan farklı UA göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirmeler yapılmıştır. dNBR göstergesi, yanma şiddetinin mekânsal dağılımını yüksek doğrulukla tanımlayarak yangının doğrudan etkilediği alanların belirlenmesinde birincil veri kaynağı olarak öne çıkmıştır. Göstergenin, Sentinel-2 verisiyle %84,44 ve Landsat 8 verisiyle %81,53 doğruluk düzeyine ulaşması, farklı sensörlerle dahi istikrarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu başarı, özellikle NIR ve SWIR bantlarının yangın sonrası spektral yansımaları yakalamadaki duyarlılığıyla ilişkilidir.

Bitki örtüsündeki değişimi yansıtan dNDVI göstergesi, yangın sonrası vejetasyon kaybının değerlendirilmesinde tamamlayıcı bir rol üstlenmiştir. Sentinel-2 görüntüsüne dayalı analiz %77,84 doğruluk sağlarken, Landsat 8 temelli sonuçlar %74,81 doğruluk değeri ile bu bulguları desteklemiştir. dNDVI'nin zaman serisi analizinde ortaya çıkan ani düşüş, yangının klorofil yapısına verdiği zararı yansıtmaktadır. Aynı zamanda, belirli alanlarda tespit edilen kademeli artış, vejetatif toparlanma süreçlerinin mekânsal olarak izlenebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, vejetasyon indekslerinin yangın sonrası değişimlere karşı yüksek hassasiyet gösterdiğini belirten önceki çalışmalarla tutarlılık sağlamıştır.

Landsat 8'in termal bantlarından elde edilen dLST göstergesi ise yangının yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, termal anomalilerin belirlenmesinde önemli katkı sunmuştur. Elde edilen %77,26 doğruluk oranı, dLST'nin yangın sonrası sıcaklık değişimlerine duyarlılığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, dLST çıktılarının dNBR ve dNDVI haritalarıyla karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucunda, birçok bölgede uyum gözlenmiş ancak bazı alanlarda farklılıklar tespit edilmiştir. Bu farklar özellikle yangın sınırına yakın geçiş bölgelerinde ve topografik çeşitliliğin fazla olduğu alanlarda ortaya çıkmış; yüzey sıcaklığındaki değişimlerin yalnızca yanma düzeyine değil, yüzey nemi, güneşlenme süresi ve toprak tipi gibi ekosistem bileşenlerine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bu yönüyle dLST, dNBR ve dNDVI'ya kıyasla yangının etkilerini farklı bir boyutta ele almakta ve tamamlayıcı bilgi sağlamaktadır.

Sentinel-2 ve Landsat 8 verilerinin karşılaştırmalı analizi, Sentinel-2'nin daha yüksek mekansal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle yangın alanlarını belirlemede daha hassas sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, Sentinel-2 ve Landsat 8 arasındaki doğruluk farklılıklarının yalnızca mekânsal çözünürlükten kaynaklandığı sonucuna varmak eksik bir yaklaşım olur. Spektral bant karakteristikleri, atmosferik etkilerin farklı şekillerde yansıması ve görüntüleme zamanlamasındaki farklılıklar da tespit edilen yangın alanlarının hassasiyetini doğrudan etkilemiştir. Sentinel-2'nin daha dar bant genişlikleri ve yangın sonrası daha erken veri sağlayabilmesi, yangın etkilerinin daha detaylı izlenmesine olanak sunmuştur. Bu bulgu, yangın sonrası analizlerde veri kaynaklarının tüm teknik özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Avetisyan vd., 2023; Qarallah vd., 2022). Buna karşın, Landsat 8'in termal bantları, yangın sonrası sıcaklık değişimlerini anlamada önemli katkılar sunmuştur.

Landsat 8 uydu görüntülerinin yangın sonrası alınmasında zaman farkı olması, bölgedeki hızlı bitki örtüsü yenilenmesi nedeniyle yanmamış alanların belirlenmesini etkileyebilmiştir. Buna karşın, Sentinel-2'nin daha erken elde edilen görüntüleri yangın etkilerini daha doğru bir şekilde yansıtabilmiştir. Bu bağlamda, UA teknolojileri ve CBS'nin entegre kullanımı, yangın sonrası alanların izlenmesi ve ekosistem restorasyon süreçlerinin yönetilmesi açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle Karadeniz Bölgesi'nde meydana gelen ve büyük orman kayıplarına neden olan Taşköprü 2020 yangını özelinde gerçekleştirilen bu çalışma, bölgesel düzeyde UA ve CBS tekniklerinin entegrasyonu ile orman yangını etkilerinin değerlendirilmesine yönelik literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmuştur. Gelişmiş analiz yöntemleri ile yangının çevresel etkileri daha doğru bir şekilde değerlendirilebilir ve gelecekteki yangın risklerini en aza indirmek için proaktif stratejiler geliştirilebilir. Ayrıca, bu tür çalışmaların ulusal yangın yönetim politikalarına entegre edilmesi, yangın önleme, müdahale ve iyileştirme süreçlerini optimize edebilir. Bu nedenle, bilimsel araştırmaların ve teknolojik ilerlemelerin bir araya getirilmesi, ekosistem temelli yangın yönetim sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir orman yönetimi hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olacaktır.

Kaynaklar

Abdikan, S., Bayik, C., Sekertekin, A., Bektas Balcik, F., Karimzadeh, S., Matsuoka, M., & Balik Sanli, F. (2022). Burned area detection using multi-sensor SAR, optical, and thermal data in Mediterranean pine forest. *Forests, 13*(2), Article 347. https://doi.org/10.3390/f13020347

Alexander, D. E. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Terra Publishing.

Angelino, C. V., Cicala, L., Parrilli, S., Fiscante, N., & Ullo, S. L. (2020, September 26–October 2). *Post-fire assessment of burned areas with Landsat-8 and Sentinel-2 imagery together with MODIS and VIIRS active fire Products* [Symposium presentation]. IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), Waikoloa, HI, USA.

Avetisyan, D., Stankova, N., & Dimitrov, Z. (2023). Assessment of spectral vegetation indices performance for post-fire monitoring of different forest environments. *Fire, 6*(8), Article 290. https://doi.org/10.3390/fire6080290

Barnadi, I., Osawa, T., & Nuarsa, I. W. (2023). The accuracy of Gililawa Darat wildfire spread estımation using burn severity and WRF-SFIRE MODEL. *Ecotrophic, 17*(1), 119–136.

Bowman, D. M., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., ... & Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science, 324*(5926), 481–484. https://doi.org/10.1126/science.1163886

Chuvieco, E., Martin, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing, 23*(23), 5103–5110. https://doi.org/10.1080/01431160210153129

Çelik, M. Ö., Fidan, D., Ulvi, A., & Yakar, M. (2024). Akdeniz bölgesi'ndeki orman yangınlarının uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak değerlendirilmesi: Mersin ili Silifke ilçesi örneği. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 9*(2), 116–125. https://doi.org/10.53516/ajfr.1302553

Çolak, E., & Sunar, F. (2018, 18–21 Eylül). *Yüzey sıcaklığı ve spektral yanma indekslerinin orman yangını analizinde kullanımı* [Bildiri sunumu]. VII. Uzaktan Algılama–CBS Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye.

Çolak, E., & Sunar, F. (2020). Spatial pattern analysis of post-fire damages in the Menderes District of Turkey. *Frontiers of Earth Science, 14*(2), 446–461.

Çolak, E., & Sunar, F. (2023). Investigating the usefulness of satellite-retrieved land surface temperature (LST) in pre- and post-fire spatial analysis. *Earth Science Informatics, 16*(1), 945–963. https://doi.org/10.1007/s12145-022-00883-8

European Forest Fire Information System. (2023). *Data and services*. Copernicus Europe's Eyes on Earth. 27 Kasım 2024'te https://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-and-services adresinden alındı.

Erener, A., & Sarp, G. (2017, 18–20 October). *Forest fire monitoring by using satellite images and information Technology* [Symposium presentation]. ISFOR 2017 International Symposium on New Horizons in Forestry, Isparta, Turkey.

European Space Agency. (2021). *Sentinel-2 downloads*. 27 Kasım 2024'te https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Sentinel-2_downloads adresinden alındı.

Ezzaher, F. E., Ben Achhab, N., Raissouni, N., Naciri, H., & Chahboun, A. (2023). Normalized Burn Ratio and land surface temperature pre-and post-Mediterranean forest fires. *Environmental Sciences Proceedings, 29*(1), Article 3. https://doi.org/10.3390/ecrs2023-15829

Fernández-García, V., Santamarta, M., Fernández-Manso, A., Quintano, C., Marcos, E., & Calvo, L. (2018). Burn severity metrics in fire-prone pine ecosystems along a climatic gradient using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment, 206*, 205–217. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.029

Fernández-Manso, A., & Quintano, C. (2022, June 27–July 1). *Nuevas metodologías basadas en teledetección para estimar la severidad de afección de un incendio* [Conference presentation]. 8° Congreso Forestal Español, Catalunya, Spain.

García-Llamas, P., Suárez-Seoane, S., Fernández-Guisuraga, J. M., Fernández-García, V., Fernández-Manso, A., Quintano, C., ... & Calvo, L. (2019). Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 80*, 137–144. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006

García, M. J., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International, 6*(1), 31–37. https://doi.org/10.1080/10106049109354290

Guo, L., Li, S., Wu, Z., Parsons, R. A., Lin, S., Wu, B., & Sun, L. (2022). Assessing spatial patterns and drivers of burn severity in subtropical forests in southern China based on Landsat 8. *Forest Ecology and Management, 524*, Article 120515. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120515

İbret, Ü. B. (2018). Kastamonu İlinin Coğrafi Özellikleri. In M. Eriş (Ed.), *81 İlde Kültür ve Şehir–KASTAMONU* (pp. 16–25). T.C. Kastamonu Valiliği.

Junaidi, S. N., Khalid, N., Othman, A. N., Hamid, J. R. A., & Saad, N. M. (2021). Analysis of the relationship between forest fire and land surface temperature using Landsat 8 OLI/TIRS imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *767*(1), Article 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/767/1/012005

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. In D. C. Lutes (Ed.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (pp. 219–269). United States Department of Agriculture.

Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı. (2012). *2012 Yılı Faaliyet Raporu*. 2 Ocak 2025'te https://www.kuzka.gov.tr/dosya/2012_yillik_faaliyet_raporu.pdf adresinden alındı.

Lasaponara, R., Proto, A. M., Aromando, A., Cardettini, G., Varela, V., & Danese, M. (2019). On the mapping of burned areas and burn severity using self-organizing map and Sentinel-2 data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17*(5), 854–858.

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire, 15*(3), 319–345. https://doi.org/10.1071/WF05097

Llorens, R., Sobrino, J. A., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., & Vega, J. A. (2021). A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data: Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 95*, Article 102243. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102243

Lv, Q., Liu, Z., Li, K., Guo, W., Zhou, S., Guan, R., & Wang, W. (2024). Influence of forest cover loss on land surface temperature differs by drivers in China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 129*(11), Article e2024JG008103. https://doi.org/10.1029/2024JG008103

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), Article 1777. https://doi.org/10.3390/rs10111777

Mallinis, G., Mitsopoulos, I., & Chrysafi, I. (2018). Evaluating and comparing Sentinel-2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing, 55*(1), 1–18. https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803

Mehmood, K., Anees, S. A., Luo, M., Akram, M., Zubair, M., Khan, K. A., & Khan, W. R. (2024). Assessing Chilgoza Pine (Pinus gerardiana) forest fire severity: Remote sensing analysis, correlations, and predictive modeling for enhanced management strategies. *Trees, Forests and People, 16*, Article 100521. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100521

Mohammed, Khan, A., Kuri, A., Ahammed, S., Al Muqtadir Abir, K., & Arfin-Khan, M. A. (2025). A Google Earth Engine approach for anthropogenic forest fire assessment with remote sensing data in Rema-Kalenga Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Geology, Ecology, and Landscapes, 9*(1), 45–66. https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2165297

Moharir, K., Singh, M., Pande, C., Singh, S. K., & Gelete, G. (2024). Mapping forest fire-affected areas using advanced machine learning techniques in Damoh District of Central India. *Knowledge-Based Engineering and Sciences, 5*(1), 62–80. https://doi.org/10.51526/kbes.2024.5.1.62-80

Orman Genel Müdürlüğü. (2021). *Ormancılık istatistikleri*. 27 Kasım 2024'te https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/resmi-istatistikler adresinden alındı.

Parks, S. A., Holsinger, L. M., Miller, C., & Nelson, C. R. (2015). Wildland fire as a self-regulating mechanism: The role of previous burns and weather in limiting fire progression. *Ecological Applications, 25*(6), 1478–1492. https://doi.org/10.1890/14-1430.1

Pérez-Cabello, F., Montorio, R., & Alves, D. B. (2021). Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 21*, Article 100251. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100251

Qarallah, B., Othman, Y. A., Al-Ajlouni, M., Alheyari, H. A., & Qoqazeh, B. A. A. (2022). Assessment of small-extent forest fires in semi-arid environment in Jordan using Sentinel-2 and Landsat sensors data. *Forests, 14*(1), Article 41. https://doi.org/10.3390/f14010041

Sabuncu, A., & Özener, H. (2019). Uzaktan algılama teknikleri ile yanmış alanların tespiti: İzmir Seferihisar orman yangını örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 5*(2), 317–326. https://doi.org/10.21324/dacd.511688

San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M., & Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management, 294*, 11–22. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050

Sarp, G., Temurçin, K., Aldırmaz, Y., & Baydoğan, E. (2018, November 22–24). *Spatial analysis of forest fires using remote sensing technologies; a case of 2017 Mersin–Anamur forest fire* [Conference presentation]. Innovation and Global Issues Congress IV, Antalya, Türkiye.

Smith, C. W., Panda, S. K., Bhatt, U. S., Meyer, F. J., Badola, A., & Hrobak, J. L. (2021). Assessing wildfire burn severity and its relationship with environmental factors: A case study in interior Alaska boreal forest. *Remote Sensing, 13*(10), Article 1966. https://doi.org/10.3390/rs13101966

Smith, K., Fearnley, C. J., Dixon, D., Bird, D. K., & Kelman, I. (2023). *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster*. Routledge.

Sobrino, J. A., Llorens, R., Fernández, C., Fernández-Alonso, J. M., & Vega, J. A. (2019). Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. *Forests, 10*(5), Article 457. https://doi.org/10.3390/f10050457

Srivastava, S. K., Lewis, T., Behrendorff, L., & Phinn, S. (2021). Spatial databases and techniques to assist with prescribed fire management in the south-east Queensland bioregion. *International Journal of Wildland Fire, 30*(2), 90–111. https://doi.org/10.1071/WF19105

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

U.S. Geological Survey. (2016). *Landsat 8 Data Users Handbook*. United States Geological Survey – Science for a Changing World. 13 Aralık 2024'te https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook adresinden alındı.

U.S. Geological Survey. (2021). *Earth Explorer*. United States Geological Survey – Science for a Changing World. 5 Aralık 2024'te https://earthexplorer.usgs.gov/ adresinden alındı.

Van Leeuwen, W. J. (2008). Monitoring the effects of forest restoration treatments on post-fire vegetation recovery with MODIS multitemporal data. *Sensors, 8*(3), 2017–2042. https://doi.org/10.3390/s8032017

Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W. W., & Goossens, R. (2011). Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing, 32*(12), 3521–3537. https://doi.org/10.1080/01431161003752430

Vlassova, L., Pérez-Cabello, F., Mimbrero, M. R., Llovería, R. M., & García-Martín, A. (2014). Analysis of the relationship between land surface temperature and wildfire severity in a series of Landsat images. *Remote Sensing, 6*(7), 6136–6162.

Yao, H., Yang, Z., Zhang, G., & Liu, F. (2024). Forest fire detection based on spatial characteristics of surface temperature. *Remote Sensing, 16*(16), Article 2945. https://doi.org/10.3390/rs16162945

Yüksel, K. (2022). Yanan orman alanı tespitinde farklı uzaktan algılama indislerinin değerlendirilmesi: 2022 yılı Mersin (Gülnar) orman yangını örneği. *ArtGRID – Journal of Architecture Engineering and Fine Arts, 4*(2), 160–171. https://doi.org/10.57165/artgrid.1179074

Zheng, Z., Wang, J., Zou, B., Gao, Y., Yang, S., & Wang, Y. (2022). Initial assessment of burn severity using the transfer learning model. *National Remote Sensing Bulletin, 26*(10), 2001–2013.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 181–195
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Açık Erişimli Kıyı Sayısal Yükseklik Modellerinin Kullanımı ile Deniz Seviyesi Yükselmesine Bağlı Taşkın Risklerinin İncelenmesi: Gediz Deltası Örneği

Investigation of Flood Risks Associated with Sea Level Rise Using Open-Access Coastal Digital Elevation Models: The Case of Gediz Delta

Osman Sami Kırtıloğlu[1]*, Nevin Betül Avşar[1], Elif Akyel[1]

[1]*İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 35620, İzmir/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Osman Sami Kırtıloğlu
osmansami.kirtiloglu@ikc.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1652686

Yayın süreci
Geliş tarihi: 06.03.2025
Kabul tarihi: 24.04.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin etkilerini değerlendiren bir analiz sunmaktadır. Çalışma alanında kıyı yükseklik modeli olarak, farklı yöntemlerle küresel açık sayısal yükseklik modellerinin doğrulukları arttırılarak oluşturulan Diluvium ve Delta modelleri kullanılmıştır. Su altında kalacak alanların belirlenmesi için 0,5 m, 1 m ve 2 m olmak üzere 3 farklı senaryo çalışılmıştır. En kötü senaryo sonuçlarına göre, delta alanının yaklaşık %88'inin su altında kalacağı tespit edilmiştir. Modellerin doğruluğu, HGM SYM5-L0 modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Delta ve Diluvium modelleri ile SYM5-L0 arasındaki farkların %89-%90 oranında ±3 m aralığında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, her iki modelin de deniz seviyesi yükselmesi senaryolarında SYM5-L0 yerine kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, daha yüksek doğruluklu modellerin bu çalışmada neden kullanılmadığı ve kullanılmasının sonuçları nasıl etkileyeceği de tartışılmıştır. Diluvium ve Delta modelleri için karesel ortalama hata (RMSE) değerleri sırasıyla 2,45 m ve 3,46 m, ortalama mutlak hata (MAE) değerleri 1,67 m ve 1,99 m, standart sapma (SD) değerleri de 2,03 m ve 2,89 m olarak hesaplanmıştır. RMSE değerine göre modellerin yüksek doğruluk sağladığı, MAE ve SD değerlerine göre de model farklarının asgari düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Diluvium ve Delta modelleri, kıyı alanlarında deniz seviyesi artışı ve taşkın risklerinin değerlendirilmesinde, bu çalışma örneğinde, doğruluğu ±3 m olan modeller yerine kullanıma uygun ve doğruluğu yüksek modeller olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Deniz seviyesi yükselmesi, Gediz Deltası, Risk analizi, Açık veri*

Abstract

This study evaluates the effects of sea level rise in the Gediz Delta using the Diluvium and Delta models, which enhance the accuracy of global open digital elevation models through different methods. These models served as coastal elevation models for the study area. Three scenarios (0.5 m, 1 m, and 2 m) were analyzed to identify areas at risk of inundation. Under the worst-case scenario, approximately 88% of the delta's total area is projected to be inundated. Model accuracy was assessed by comparing the results with the SYM5-L0 model from the General Directorate of Mapping. The differences between SYM5-L0 and the Diluvium and Delta models remained within ±3 m for 89%–90% of the data, suggesting that these models can be used for sea level rise assessments instead of SYM5-L0. The study also discusses why higher-accuracy models were not employed and how their inclusion would influence the results. The root mean square error (RMSE) values for the Diluvium and Delta models were 2.45 m and 3.46 m, respectively. Their mean absolute error (MAE) values were 1.67 m and 1.99 m, while standard deviation (SD) values were 2.03 m and 2.89 m. These findings confirm that the models offer high accuracy, making them reliable for coastal flood risk assessments. Diluvium and Delta models have been identified as suitable and highly accurate models for assessing sea level rise and flood risks in coastal areas, as demonstrated in this study, rather than models with an accuracy of ±3 m.

Keywords: *Sea level rise, Gediz Delta, Risk analysis, Open data*

1. Giriş

Küresel ısınma ve beraberindeki iklim değişikliği, deniz seviyesi değişimlerine yol açarak özellikle kıyı bölgelerinde ciddi çevresel ve ekonomik riskler yaratmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), deniz seviyesinin 2100 yılına kadar ortalama 0,5 ile 2,0 m arasında yükseleceğini öngörmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Deniz suyu sıcaklıklarının artması da yoğun fırtına etkinliğini ve aşırı yağışları tetikleyerek kıyısal alanlarda sel ve taşkın risklerini artırmaktadır (Kaya, 2022). Bu durum, kıyı alanlarının kentsel planlanmasında ve bu alanlardaki mühendislik projelerinde deniz seviyesi yükselmesinin bir risk faktörü olarak dikkate alınmasını zorunlu hale getirmektedir. Yerleşim alanları, tarım arazileri ve ekosistemler üzerinde büyük etkilere sahip bu riskler, kıyı alanlarının yönetimi ve korunması için etkili planlama ve afet yönetimi süreçlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Delta bölgeleri, ekolojik çeşitliliği ve tarımsal önemi nedeniyle, iklim değişikliğinden en çok etkilenen alanlar arasında yer almaktadır (Bozduman, 2019). Yapılan çalışmalar, Türkiye'nin kıyı bölgelerinin özellikle delta alanları gibi hassas bölgelerde deniz seviyesi değişimlerine karşı daha kırılgan olduğunu ortaya koymaktadır (Demirkesen vd., 2008; Simav & Şeker, 2013). Deniz seviyesi yükselmesi, delta alanlarında yer altı su kaynaklarının tuzlanması, ekosistem bozulması, verimli tarım alanlarının kaybı ve kıyısal erozyon gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Bu durum, kıyı yönetim politikalarının gözden geçirilmesini ve yerel yönetimlerin somut adımlar atmasını gerektirmektedir (Gazioğlu vd., 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Diluvium DEM ve Delta DTM, deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini modellemek için kullanılan sayısal yükseklik modelleri (SYM) arasında yer almaktadır. Diluvium DEM, özellikle kıyı bölgelerinin ve delta alanlarının topografyasını hassas bir şekilde temsil etmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir (Dusseau vd., 2023). Bu model, yüksek çözünürlükte veri sunarak, alçak bölgelerde kıyı erozyonunun ve deniz seviyesindeki değişikliklerin etkilerini simüle etmek için kullanılmakta ve global düzeydeki modellerden farklı olarak, yerel ölçümlerle desteklenerek daha hassas veri sağlamaktadır. Delta DTM ise, delta ekosistemlerinin topografik özelliklerini ve kıyı hatlarını daha doğru bir şekilde modellemek için kullanılan başka bir sayısal arazi modelidir (Pronk vd., 2024). Bu model, delta alanlarındaki su baskınları ve deniz seviyesindeki değişimlerin etkilerini tespit etme açısından önemli bir araçtır. Özellikle deniz seviyesi değişimlerinin delta ekosistemleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, 30 cm çözünürlüklü stereo hava fotoğraflarından otomatik eşlemeyle üretilen SYM5-L0 modeli, Türkiye'deki yerel topografyayı doğru bir şekilde temsil etmek için geliştirilmiş önemli bir sayısal yüzey modelidir. Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından sağlanan bu model ±3 m düşey doğruluğa sahip olup, kıyı bölgelerindeki deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini simüle etmek için kritik bir referans noktası olarak değerlendirebilir (Çam vd., 2013; Ozsahin vd., 2023, Özdemir & Akbaş, 2023). Referans noktası olarak kullanılan bir diğer veri seti ise Coordination of Information on the Environment (CORINE)'dir (Arslan & Örücü, 2019; Bayar & Karabacak, 2017; Gülçin, 2018). Arazi kullanımı ve toprak örtüsü haritalarının yapımı için oluşturulmuş geniş kapsamlı bir veri tabanı olan CORINE ile risk altındaki arazi örtüsü sınıfları belirlenebilmekte ve arazi örtüsü ile ilgili tüm analizlerde bu veri seti altlık olarak kullanılabilmektedir (Arslan & Örücü, 2019). Deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi ve analizi amacıyla ülkemizde kurulan Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES), deniz seviyesindeki değişimlerin hem mekânsal hem de zamansal eğilimlerini belirlemeye yönelik güvenilir veriler sağlamaktadır (Harita Genel Müdürlüğü, 2024).

IPCC iklim değişikliği, etkileri ve gelecekteki potansiyel riskleri hakkında düzenli bilimsel değerlendirmeler yapmak için oluşturulmuş, Birleşmiş Milletler bünyesinde çalışan bir kuruluştur. IPCC'nin, 2021'de yayınlanan Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6), iklim değişikliği için beş olası gelecek senaryosu sunmaktadır. Her senaryo, farklı sera gazı emisyon seviyeleri ve bunlara karşılık gelen sosyoekonomik bir çerçeve ile (Shared Socioeconomic Pathway: SSP) tanımlanmaktadır (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). IPCC senaryoları en iyimserden en kötümsere şu şekilde sıralanabilir: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP-8.5. İlgili senaryolar kapsamında, gelecekteki deniz seviyesi yükselmesine ilişkin projeksiyonlar da yapılmaktadır (Fox-Kemper vd., 2021). SSP senaryolarına göre, en düşük emisyon öngörüleri olan SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryolarında, küresel ısınmanın 1,5 °C ile sınırlandırılması hedeflenmektedir ve bu senaryolar altında 2100 yılına kadar deniz seviyesindeki yükselmenin sınırlı kalacağı, maksimum 0,5 m olacağı öngörülmektedir. Orta düzey emisyon senaryosu olan SSP2-4.5, daha ılımlı bir artış öngörmekte ve 2100 yılında deniz seviyesinin 0,5 ila 1 m arasında yükseleceğini tahmin etmektedir. SSP3-7.0 senaryosu, daha yüksek emisyon seviyeleri ve sınırlı iklim politikaları öngören bir senaryo olup, 2100 yılında deniz seviyesinin 1,5 m'yi aşabileceğini göstermektedir. En olumsuz senaryolar olan SSP5-8.5 ve SSP5-8.5 Düşük Güvenilirlik projeksiyonlarına göre ise, sera gazı emisyonlarının hızla arttığı durumda deniz seviyesindeki yükselmenin 2 m'ye kadar ulaşabileceği ve bu artışın özellikle 2080-2100 yılları arasında gerçekleşebileceği belirtilmektedir.

Türkiye'nin Batı Anadolu kıyısında yer alan Gediz Deltası, zengin ekosistemi ve insan faaliyetleriyle şekillenen yapısı ile, deniz seviyesi yükselmesinin etkilerinin modellenmesi ve analiz edilmesi için ideal bir çalışma alanı sunmaktadır (Yılmaz & Erdem, 2011). Bu kapsamda, bu çalışmada deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak Gediz Deltası kıyılarında meydana gelebilecek değişimler, Diluvium ve Delta sayısal yükseklik modelleri kullanılarak incelenmiştir.

Bölgenin, bu riske karşı hassasiyetinin belirlenebilmesi amacıyla modellerin doğrulukları karşılaştırmalı testler ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yapılan modeller yükseklik modeli, arazi modeli ve yüzey modeli gibi farklı kapsamlara sahip olduğundan, doğruluk araştırması yapılacak noktalar bina ve bitki örtüsü etkilerinden arındırılmış alanlar üzerinde seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan yükseklik modellerinin ve deniz seviyesi projeksiyonlarının ayrıntılı açıklamaları, çalışma alanının tanıtımı Materyal ve Metot bölümünde yer almaktadır. Seçilen yükseklik modelleri ve doğruluk araştırmasında kullanılan istatistiksel yöntemler, deniz seviyesi yükselmesi senaryolarında kullanılan değerler ve seçim aşamaları, belirlenen deniz seviyelerine göre Gediz Deltasının nasıl etkileneceği ayrıntılı analizlerle Veri Analizi bölümünde açıklanmaktadır. Ayrıca yükseklik modellerinin doğruluklarının bu gibi çalışmalar için yeterliği de Bulgular ve Tartışma bölümünde değerlendirilmiştir. Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak yapılan bu modelleme çalışması, bölgedeki kıyı değişimlerini anlamak adına önemli bulgular sunacaktır.

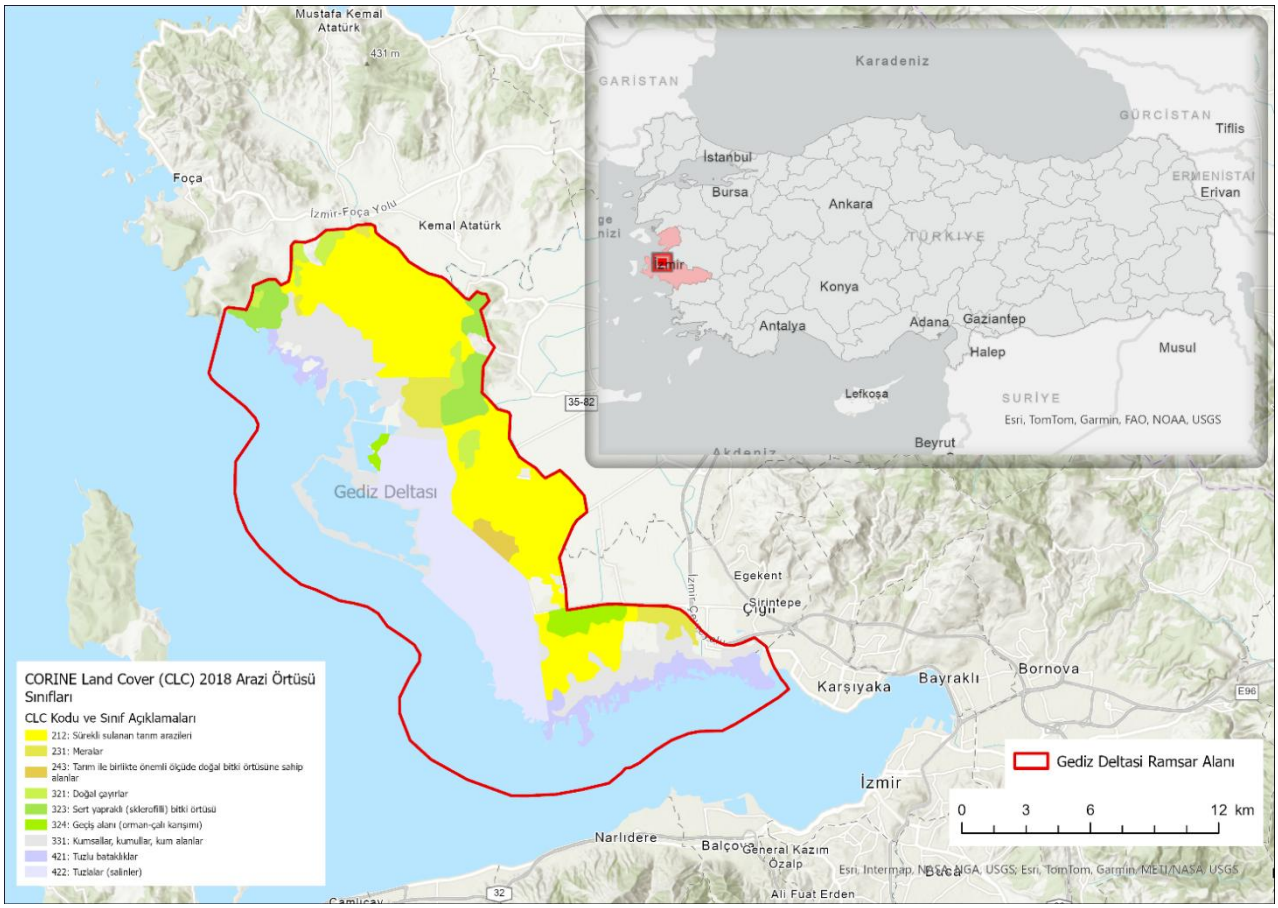
2. Materyal ve Metot

Deniz seviyesi yükselmesi senaryoları üzerine yapılan çalışmalar, doğru ve güvenilir yükseklik modellerine dayanmakta olup, bu modellerin doğruluğu ve çözünürlüğü, taşkın modellemeleri ve kıyı alanlarındaki değişimlerin doğru bir şekilde simülasyonu için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, deniz seviyesindeki değişimlerin modellemesi için kabul edilebilir doğruluk sınırları, kullanılan veri setleri, analiz türü ve hedeflenen uygulamaya göre değişkenlik gösterebilir. Ancak genel bir kılavuz olarak, deniz seviyesi değişimleri sonucu oluşabilecek su baskını modellemesinde kullanılan yükseklik modellerinin düşey doğruluğu genellikle ±1 ile ±3 m arasında kabul edilmektedir. Bu doğruluk seviyesi, suyun yayılma yönü ve seviyesinin doğru bir şekilde simüle edilmesi için yeterli kabul edilir. Daha hassas deniz seviyesi değişim modellerinin yönetimi ve yüksek riskli bölgelerde ise, ±1 m veya daha yüksek doğruluk gereksinimleri söz konusu olabilir. Mekânsal çözünürlük de analizlerin doğruluğunu doğrudan etkileyen bir parametredir. Su akışının ve yayılmasının doğru şekilde modellenebilmesi için, çözünürlük seviyesinin yeterli olması gerekmektedir. Su seviyesi yükselmesi analizi için genellikle 10 m çözünürlük yeterli kabul edilse de yerel modellemeler veya küçük alanlarda daha yüksek çözünürlük (örneğin 1 m veya daha küçük) tercih edilebilir. Bu, özellikle yerel su seviyesi artışı risklerinin değerlendirildiği analizlerde büyük bir öneme sahiptir.

Gediz Deltası'ndaki kıyı alanlarındaki değişimlerin incelendiği bu çalışma, deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak çeşitli sayısal yükseklik modellerinin doğruluğunu analiz etmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda, kullanılan veri setleri arasında Diluvium DEM, Delta DTM, SYM5-L0 modeli yer almaktadır. Gediz Deltası'nda meydana gelebilecek kıyı değişimlerinin güvenilir bir şekilde simülasyonu için bu modellerin doğruluğunun titizlikle incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla SYM5-L0 modeline ek olarak CORINE 2018 veri tabanı kullanılmıştır. CORINE 2018 yardımıyla bina ve bitki örtüsü bulunmayan bölgeler maskeleme işlemi ile belirlenmiş ve bu alanlarda rastgele noktalar oluşturulmuştur. Rastgele seçilen bu noktalarda SYM ve DTM yükseklik verileri karşılaştırılarak doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. 100 m mekânsal çözünürlüğe sahip olan CORINE 2018 verisi, çevresel detayların ayrıştırılmasında temel bir veri kaynağı olarak kullanılmıştır.

2.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada, İzmir Körfezi'nin kuzeydoğusunda yer alan ve yaklaşık 400 km^{2}'lik alanı ile Türkiye'nin en büyük kıyı deltalarından biri olan Gediz Deltası (Doğa Derneği, 2023) çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). İzmir ili sınırlarında kalan delta alanı Karşıyaka, Çiğli, Menemen ve Foça ilçeleriyle çevrilidir (Demirlenk, 2022). Gediz Deltası; tatlı, tuzlu ve acı su ekosistemlerinin iç içe geçtiği, Homa, Çilazmak ve Kırdeniz Dalyanları ile Çamaltı Tuzlası gibi mikro-habitatları barındıran karmaşık bir sulak alan sistemidir. Ramsar Sözleşmesi kapsamında koruma altındaki bu alan, başta flamingolar olmak üzere 300'ü aşkın kuş türü için kritik öneme sahiptir (Uluturhan Suzer vd., 2015; Tırıl, 2005). Şekil 1'de Gediz Deltası'nın, CORINE 2018 arazi örtüsü verileri ve Ramsar sınırları kullanılarak oluşturulmuş doğal ve tarımsal sınıfları da gösterilmektedir. Son otuz yılda yürütülen CBS tabanlı analizlerde, delta kıyı şeridinde erozyon ve kara yönlü çekilmeler gözlemlenmiştir (Tağıl vd., 2023). Aynı süreçte kentleşme ve sanayi alanlarının artışı, sulak alanlar ve tarım arazilerinin daralması ile eşzamanlıdır (Alevkayalı & Tağıl, 2018).

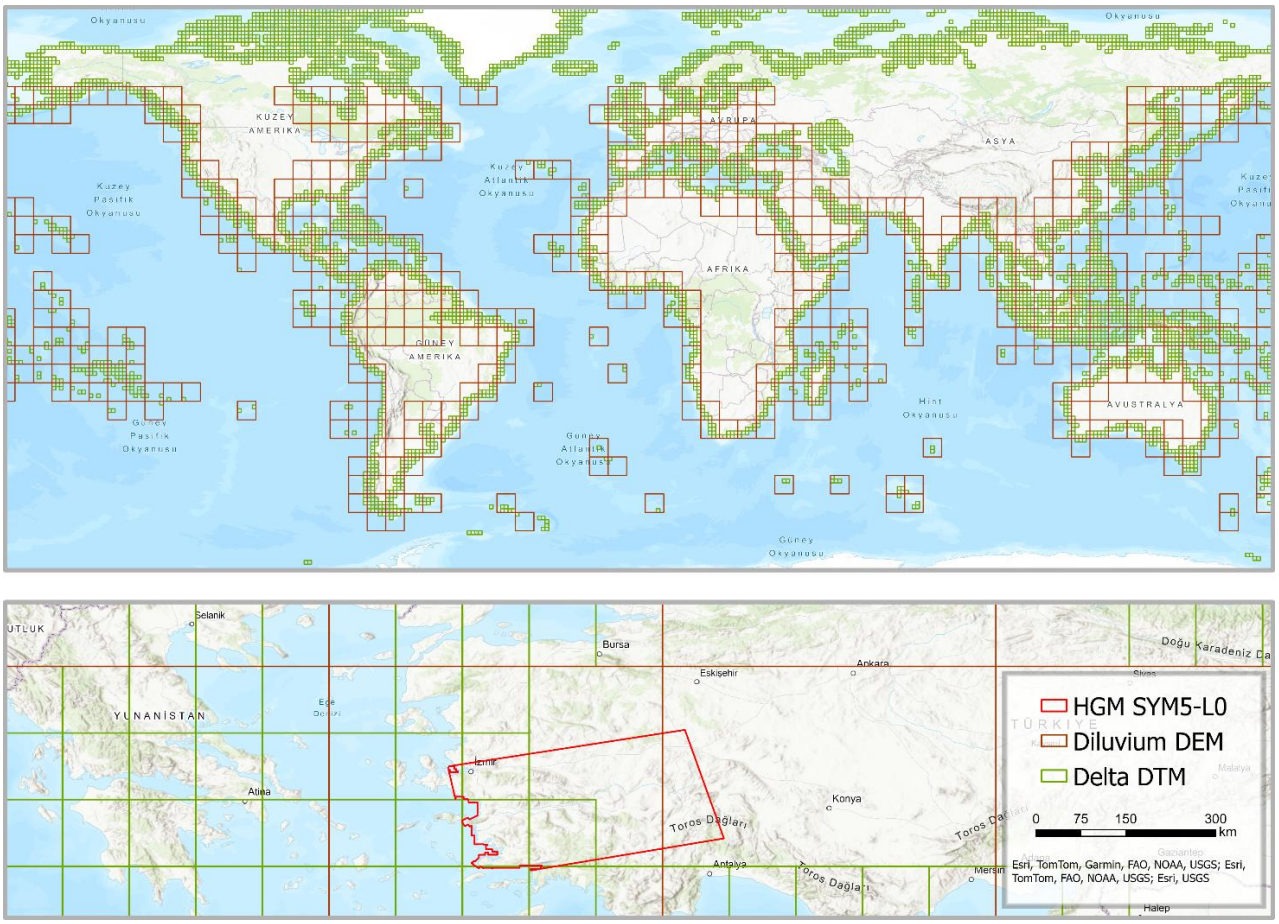


Şekil 1. Çalışma alanı genel görünümü, Gediz Deltası arazi örtüsü (CORINE18) ve Ramsar sınırı (Doğa Derneği, 2023)

Jeoarkeolojik bulgular, Holosen dönemine ait deniz seviyesi değişimlerinin deltaya yakın alanlarda insan yerleşimlerini etkilediğini ortaya koymuştur (Öner & Vardar, 2018). Sediman analizleri de, özellikle dalyan bölgelerinde antropojenik ağır metal kirliliğine işaret etmektedir (Uluturhan Suzer vd., 2015). Tüm bu veriler ışığında Gediz Deltası, çevresel izleme ve sürdürülebilir planlama açısından önemli bir model alan konumundadır.

2.2. Veri Setleri

Bu çalışmada kullanılan modellerin mekânsal çözünürlükleri ve düşey doğrulukları, doğruluk analizinin temelini oluşturan unsurlardır. SYM5-L0 modeli, en yüksek çözünürlüğe sahip model olup ±3 m düşey doğruluğu ve 5 m mekânsal çözünürlüğü vardır (Harita Genel Müdürlüğü, 2025). HGM tarafından Türkiye'nin topografik detaylarını yüksek çözünürlükle temsil etmek için geliştirilmiş bir sayısal yüzey modelidir. Bu veri seti, 30 cm çözünürlüklü stereo hava fotoğraflarından otomatik eşleme yöntemiyle elde edilmiştir. Arazi üzerindeki doğal ve insan yapımı unsurları içeren model, su yüzeyleri ve kaba hatalar düzeltilmemiş şekilde sunulmaktadır. Modelin düşey doğruluğu, GeoTIFF formatında 32-bit floating veri türüyle sağlanmaktadır. Bu özellikler, doğal afet risklerinin modellenmesi ve analizleri, arazi kullanımı planlaması ve şehircilik projelerinde kullanımı mümkün kılmaktadır. Veri seti, güncel hava fotoğrafı çekilen tüm bölgeler için geçerli olup, yalnızca kamu kurumları, belediyeler ve üniversiteler ile ücretsiz olarak paylaşılmaktadır. Özel sektör veya bireyler için satışı bulunmamaktadır. Bu model, Türkiye karalarının tamamını kapsayan, araştırmalar ve akademik çalışmalarda kullanılmak üzere erişilebilir en yüksek doğruluğa sahip model olması açısından tercih edilmiştir. Diğer yandan, Delta DTM ve Diluvium DEM modellerinin mekânsal çözünürlükleri sırasıyla 10 m ve 20 m olup, bu modellerin çözünürlüğü SYM5-L0 ile kıyaslandığında daha düşüktür. Bu fark, doğruluk analizinin doğruluğunu etkileyebilecek bir faktördür. Bu nedenle, SYM5-L0 modelinin yüksek çözünürlüğü ile Delta DTM ve Diluvium DEM modellerinin çözünürlük farkları arasındaki etki dikkatle göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan veri seti çerçeveleri Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. Global kıyı yükseklik modelleri kapsamı ve çalışmada kullanılan HGM SYM5-L0 veri seti çerçevesi (altta)

Diluvium DEM, kıyı bölgeleri için özel olarak geliştirilmiş, küresel bir SYM'dir. Bu model, Copernicus DEM'deki dikey hataları düzeltmek için LightGBM algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Mekânsal çözünürlüğü 30 m olan Diluvium DEM, kıyı bölgelerinde, özellikle 2 m altındaki yüksekliklerde 1,13 m RMSE değeri ile dikkat çekmektedir. Bu doğruluk, deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyı taşkın modellemeleri gibi uygulamalarda mevcut DEM'lere kıyasla iki kat daha yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Düşey doğruluğu, IPCC'nin SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarında öngörülen deniz seviyesi yükselmelerine ilişkin harita yapımı için uygundur. Diluvium DEM hem küresel hem yerel ölçekte afet risk yönetimi ve kıyı planlaması için yenilikçi bir araçtır (Dusseau vd., 2023).

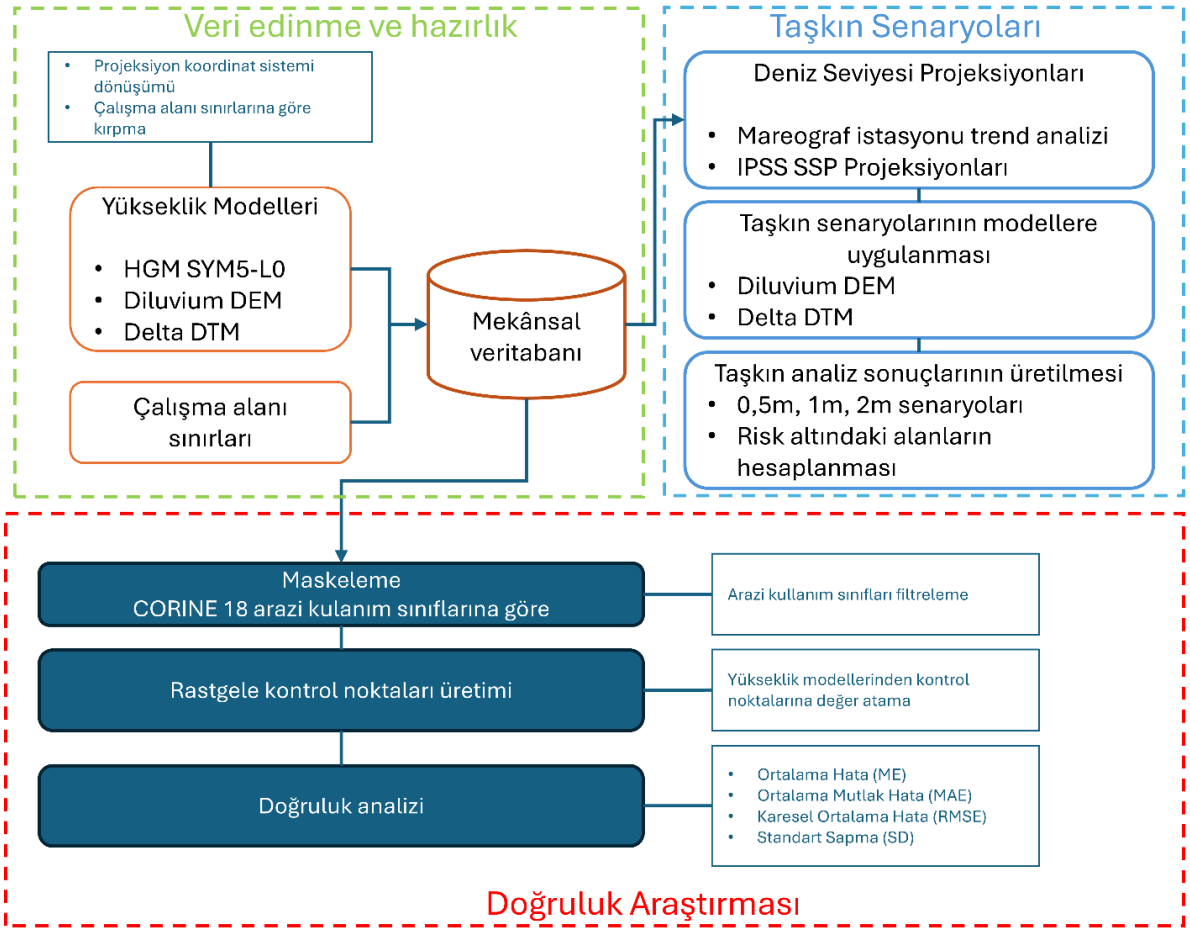
Delta DTM, kıyı bölgeleri için tasarlanmış yüksek doğruluklu bir sayısal arazi modeli (SAM) olup, mekânsal çözünürlüğü 30 m olarak sunulmaktadır. Model, Copernicus DEM'in yanı sıra ICESat-2 ve GEDI lazer verilerini birleştirerek oluşturulmuş ve Copernicus DEM'deki yüzeysel hatalar (örneğin ağaç ve bina etkileri) düzeltilmiştir. Delta DTM'nin düşey doğruluğu 0,45 m MAE olarak hesaplanmıştır ve doğruluk oranı küresel kıyı bölgelerinde %91'i aşmaktadır. Bu yüksek doğruluk, kıyı sel risklerinin değerlendirilmesi, deniz seviyesindeki yükselmelerin etkilerinin analizi ve kıyı yönetim planlarının geliştirilmesi gibi alanlarda geniş çapta kullanılabilir. Delta DTM, açık erişimli bir model olmasıyla kullanıcıların bilimsel çalışmalarında ve pratik uygulamalarında şeffaf ve kolay erişilebilir bir kaynak sağlamaktadır (Pronk vd., 2024).

CORINE Land Cover 2018 (CLC2018), Avrupa'nın arazi örtüsü ve kullanımının farklı semantik düzeylerde temsil edildiği, uydu görüntülerine dayalı bir veri setidir. Copernicus Land Monitoring Service tarafından geliştirilen bu ürün, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) koordinasyonunda sunulmaktadır. 100 m mekânsal çözünürlük ile üretilen CLC2018, arazi örtüsü sınıflandırmasını standartlaştırılmış bir sistemle 44 tematik sınıfta yapmaktadır. Veri setinin tematik doğruluğu %85'in üzerindedir ve bu özellik, çevresel izleme, şehir planlama, tarımsal değerlendirme ve iklim değişikliği analizi gibi geniş bir uygulama alanında kullanımını mümkün kılar. Model, özellikle arazi örtüsü analizleri için geliştirilmiş olup, minimum harita yapım birimi (MMU), alansal nesneler için 25 hektar ve çizgisel nesneler için 100 m'dir. Sentinel-2 ve Landsat-8 gibi modern uydu sistemleriyle desteklenen veri seti, Avrupa'nın 2017-2018 yıllarındaki arazi kullanımını yansıtan en güncel sürümünü sunmaktadır. Ayrıca, her altı yılda bir yenilenen CLC, arazi değişimlerini analiz etmek için 5 hektar minimum birim çözünürlükle değişim katmanları da sağlar.

CLC2018, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, şehirleşme etkilerini anlamak ve ekosistem yönetimini geliştirmek için önemli bir referans kaynağıdır. Copernicus Çevre Programı altında açık ve ücretsiz olarak sunulmaktadır (Gülçin, 2018).

2.3 Veri Analizi

Çalışmada kullanılan analizlere ait akış diyagramı şeklinde Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışmada yürütülen süreçlerin akış diyagramı

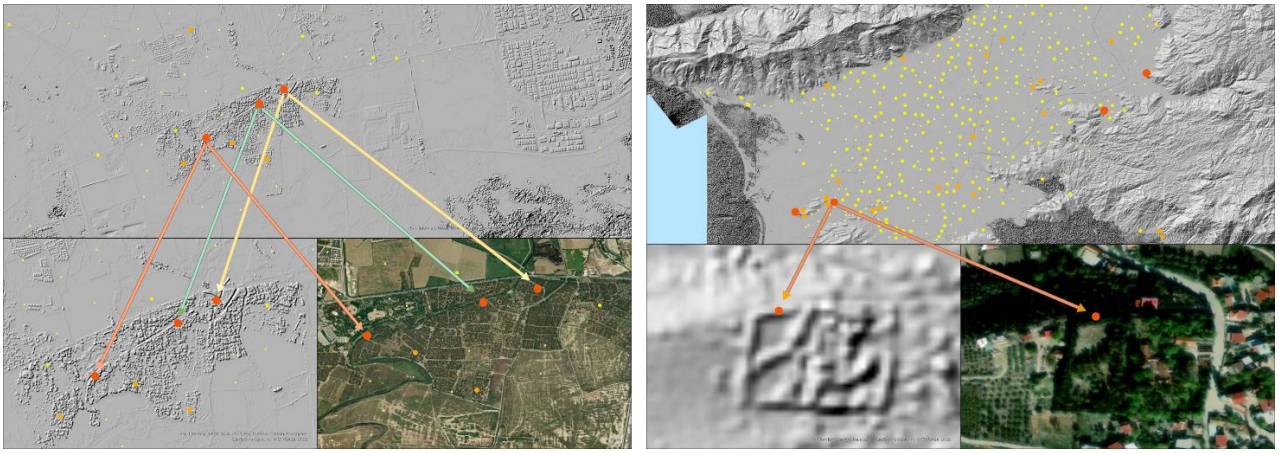
Model doğruluğu testlerinde, veri setlerinin doğru şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla yalnızca çıplak arazi üzerinde yapılan testlere odaklanılmıştır. HGM SYM5-L0 yüzey modelinde binalar ve bitki örtüsü gibi çevresel unsurlar, doğruluk testlerinin sonuçlarını etkileyebileceğinden, bu unsurların etkisi minimize edilmeye çalışılmıştır. Maskeleme işlemi ile sadece doğal arazi özelliklerine odaklanılmış ve bazı sınıflar veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem, CORINE 2018 veri tabanının sağladığı sınıflandırmalara dayanarak gerçekleştirilmiştir. CORINE 2018 veri seti 100 m mekânsal çözünürlüğe sahip olup, bazı küçük nesneler ve nesne detaylarını sınırlasa da geniş alanlardaki arazi örtüsü sınıflarını belirlemek için yeterli olmuştur.

Maskeleme işlemi, uydu görüntüleri ve DEM verileri gibi mekânsal veri analizlerinde belirli bölgelerin seçilmesi veya dışlanması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin kıyı alanlarına etkilerini doğru şekilde analiz edebilmek için bina ve bitki örtüsü etkilerinden arındırılmış alanlar seçilmiştir.

Bu alanlarda rastgele noktalar oluşturulmuş ve SYM5-L0 modeli ile Diluvium ve Delta modelleri yükseklik değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, yükseklik modellerinin (DTM) ve yüzey modellerinin (SYM) gerçek arazi koşullarını ne kadar doğru yansıttığını test etmek için önemlidir. Maskeleme işlemi, doğru analiz yapılabilecek alanlara odaklanmayı sağlayarak, çevresel etkilerin hata kaynaklarını minimize etmiştir. Böylelikle, Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin kıyı alanlarına etkileri daha güvenilir ve doğru bir şekilde değerlendirilebilmiştir.

Çalışma alanında oluşturulan rastgele noktalara karşılık gelen yükseklik değerleri SYM5-L0, Diluvium ve Delta modellerinde belirlenmiştir. Ardından, yükseklik farkları değerlendirilmiş ve farkların ±3 m sınırı içerisinde kalan oranı belirlenmiştir.

Yükseklik farklarının karesel ortalama hatası (RMSE) ve standart sapma değerleri hesaplanarak modellerin genel doğruluğu analiz edilmiştir. Rastgele seçilen noktalardaki yükseklik farkları görselleştirilmiş (Şekil 4), böylece model farklarının mekânsal dağılımı ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Bu yöntem, modellenen bölgedeki yükseklik verilerinin güvenilirliğini değerlendirirken çıplak arazi üzerindeki yükseklik farklarının daha gerçekçi bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır.



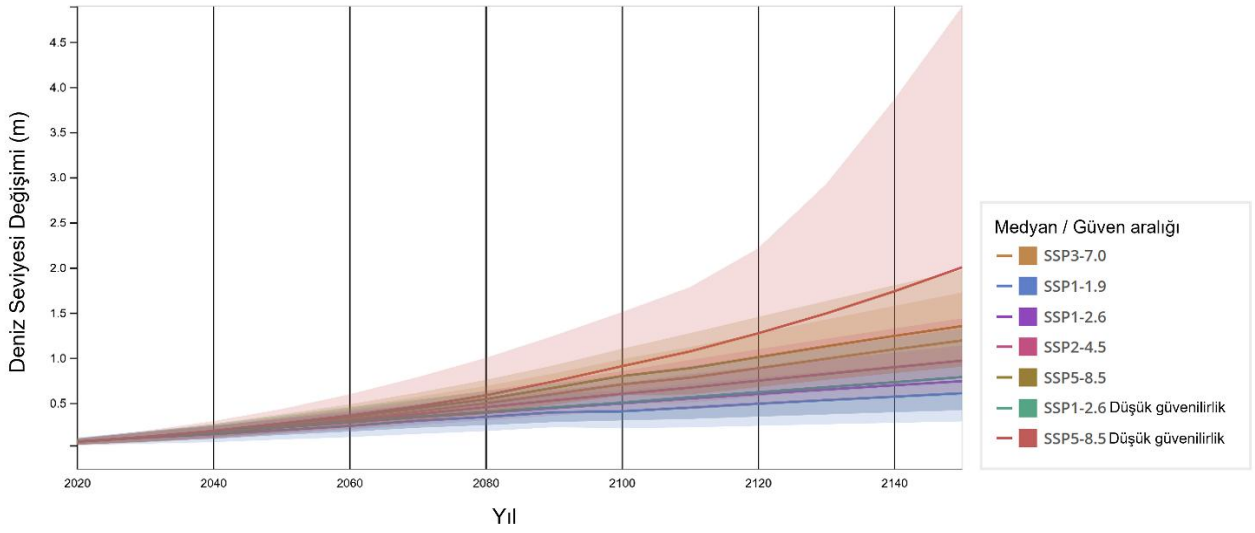
Şekil 4. Rastgele seçilen noktalardaki yükseklik farklarının yüksek olduğu alanlar Delta DTM (sol), Diluvium DEM (sağ) (Modellerde aşırı yükseklik farklarının yüzey modelindeki nesneler olduğu görülmektedir)

Bununla birlikte, CORINE 2018 veri setinin 100 m çözünürlüğü bazı ayrıntıların kaçırılmasına neden olabilse de bu yaklaşım doğruluk analizlerinde bina ve bitki örtüsü etkilerini minimize etmek açısından yeterli bir çözüm sunmuştur. SYM5-L0 modelinin yüzey modeli olması, maskeleme ve rastgele nokta seçimlerini daha da önemli hale getirmiştir. Bina ve bitki örtüsünden arındırılmış bir arazi modeli olsaydı, bu süreç üç modelin çözünürlüğü eşitlenerek doğrudan fark alınmasıyla sonuçlandırılabilirdi. Ancak mevcut koşullarda, diğer modellerin kıyı bölgelerinde sınırlı kalması, fark analizi yapılacak bölgeyi de sınırlandırmıştır. Delta modelinin kıyı çizgisinden itibaren 10 m, Diluvium modelinin ise 20 m yüksekliğe kadar veri sunması, analizlerin kapsamını daraltan faktörlerden biri olmuştur. Bu hususlar, çalışma boyunca doğruluk analizlerinde dikkatle göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak, rastgele nokta seçimi ve bu noktalar üzerindeki analizler, farklı yükseklik modellerinin deniz seviyesi yükselmesine karşı duyarlılığını değerlendirmek ve modellerin genel doğruluğunu yorumlamak için kritik bir rol oynamıştır.

Deniz seviyesi projeksiyonlarına ilişkin veri analizleri kapsamında ise TUDES verileri ve IPCC senaryolarından yararlanılmıştır. Ülkemizde deniz seviyesi gözlemleri, TUDES kapsamında HGM tarafından yapılmaktadır. TUDES, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti kıyılarında kurulmuş 20 adet radar sensörlü mareograf istasyonundan oluşur. Bu istasyonlarda gözlenen deniz seviyesi değerleri, 15'er dakikalık veriler şeklinde yayınlanır. Veri kalite kontrolü, yönetimi, analizi ve dağılımı Ankara'daki veri merkezi tarafından sağlanır. Her bir istasyonda, deniz seviyesini etkileyen meteorolojik parametreler (hava basıncı, hava sıcaklığı, nem ve rüzgâr) de ayrıca ölçülür. Mareograf istasyonları kuruldukları karaya göre bağıl deniz seviyesini ölçtüğü için, karanın düşey yöndeki kara hareketinin de belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, istasyonlara GNSS alıcıları da entegre edilmiştir (Harita Genel Müdürlüğü, 2024).

Çalışmada, Ege Denizi kıyısında bulunan TUDES istasyonlarından Menteş (MNTS) mareograf istasyonunun Nisan 1999 – Aralık 2023 dönemine ait deniz seviyesi verileri kullanılmıştır. Aylık ortalamalar alınarak oluşturulan aylık deniz seviyesi zaman serilerinden yıllık ve yarı-yıllık mevsimsel sinyaller kaldırılarak doğrusal bir trend elde edilmiştir. Menteş mareograf istasyonunda bağıl deniz seviyesi trendi 3,7 ± 0,5 mm/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplanan trendin anlamlılığı Mann-Kendall analizi ile test edilmiş, Sen's slope testi ile de yükselme trendi doğrulanmıştır. Yıldız vd. (2013), Mart 1993 – Aralık 2019 döneminde aynı bölgede Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ölçüleri ile belirlenen -1,2 ± 0,5 mm/yıl büyüklüğünde lokal bir çökme hareketinden söz etmektedir. İlgili dönemde, deniz seviyesi için ise 3,8 ± 0,9 mm/yıllık yükselme trendi belirlenmiştir.

Diğer yandan, deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini daha iyi anlamak ve bu etkileri kıyı planlamasında dikkate almak için IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) iklim değişikliği senaryoları (SSP) kapsamında oluşturulmuş deniz seviyesi projeksiyonlarına da bu çalışmada yer verilmiştir. Şekil 5'te, farklı senaryolar altında 2150 yılına kadar global deniz seviyesinin nasıl değişeceği görülmektedir.



Şekil 5. 2020 yılına göre global ortalama deniz seviyesi değişimi (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi Deniz Seviyesi Projeksiyon Aracı (NASA Sea Level Projection Tool) ile IPCC AR6'daki deniz seviyesi projeksiyonlarının görselleştirilmesi ve verilerin indirilmesi mümkün olmuştur. Kullanıcılar, bu araç ile 2150 yılına kadar hem küresel hem de bölgesel deniz seviyesi projeksiyonlarını ve bu projeksiyonların senaryolara bağlı olarak nasıl farklılık gösterdiğini görüntüleyebilmektedir. IPCC AR56 Sea Level Projection Tool ile ilgili ayrıntılı bilgiye *https://sealevel.nasa.gov/data_tools/17* web sayfasından ulaşılabilir.

Bu çalışmada, Menteş mareograf istasyondaki deniz seviyesi projeksiyonları her bir IPCC senaryosuna göre dikkate alınmıştır. 5 projeksiyon orta güvenirlikteki senaryolara dayanırken, 2 tane de -yüksek etkili dünya buz örtüsündeki değişim süreçlerinin potansiyel etkilerini gösteren- düşük güvenirlikli senaryo kullanılmıştır. Projeksiyon değerleri, 1995-2014 ortalamasına göre bağıl olarak belirlenmiştir (Tablo 2).

Modellerin doğruluğunu ölçmek için dört temel istatistiksel metrik kullanılmıştır. Bunlar, ME (Mean Error - Ortalama Hata), MAE (Mean Absolute Error - Ortalama Mutlak Hata), RMSE (Root Mean Square Error – Karesel Ortalama Hata) ve SD (Standard Deviation - Standart Sapma) metrikleridir.

Ortalama Hata (ME - Mean Error): ME, her bir modelin tahmin ettiği yükseklik ile gerçek yükseklik arasındaki farkların aritmetik ortalamasıdır. Eşitlik (1) ile verilen formül kullanılarak hesaplanan ME, modelin genelde pozitif ya da negatif yönde sistematik bir hata yapıp yapmadığını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(h_i{}^{model} - h_i{}^{SYM5-L0}\right) \quad (1)$$

burada $h_i{}^{model}$ Diluvium DEM veya Delta DTM verisindeki i. noktanın yüksekliği, $h_i{}^{SYM5-L0}$ SYM5-L0 verisindeki i. noktanın yüksekliği ve n toplam nokta sayısını ifade etmektedir. ME değeri pozitif ise model genelde SYM5-L0'dan daha yüksek değerler üretmektedir; negatif ise daha düşük değerler üretmektedir. ME değeri sıfıra yakınsa, modelin sistematik hatasının düşük olduğu kabul edilmektedir.

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE): Ortalama mutlak hata, yükseklik farklarının mutlak değerlerinin ortalamasıdır. Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanan bu metrik, pozitif veya negatif yönde sapmalara bakmaksızın modelin genel hata büyüklüğünü ölçmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|h_i{}^{model} - h_i{}^{SYM5-L0}\right| \quad (2)$$

Ortalama mutlak hata farkların mutlak değerlerini kullandığından, her nokta için pozitif veya negatif sapmalar birbirini nötrlemez ve genel hatanın büyüklüğü doğrudan gösterilmiş olur.

Karesel Ortalama Hata (Root Mean Square Error - RMSE): Bu hata, farkların karelerinin ortalamasının karekökünü alarak hesaplanır. Eşitlik (3)'te yer alan formülle hesaplanan RMSE, büyük sapmaların daha fazla ağırlık kazanmasını sağlar ve daha büyük hataların analiz edilmesinde faydalıdır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(h_i{}^{model} - h_i{}^{SYM5-L0}\right)^2} \quad (3)$$

RMSE, MAE'ye kıyasla büyük hataların etkisini daha fazla gösterir; bu nedenle büyük hata değerleri analiz edilmek istendiğinde özellikle tercih edilmektedir.

Standart Sapma (Standard Deviation - SD): SD, tahmin hatalarının yayılımını ve modelin doğruluğundaki tutarlılığı ölçmek için kullanılır. Eşitlik (4) yardımıyla hesaplanan SD, hataların standart sapması, modelin farklı alanlardaki performans değişimlerini değerlendirmek için önemlidir.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\left(h_i{}^{model} - h_i{}^{SYM5-L0}\right) - ME\right)^2} \quad (4)$$

SYM5-L0'a göre farklılıkların dağılım genişliğini ölçmektedir. Bu metrikler kullanılarak noktalarda gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda doğruluk sınırları analizi gerçekleştirilmiştir.

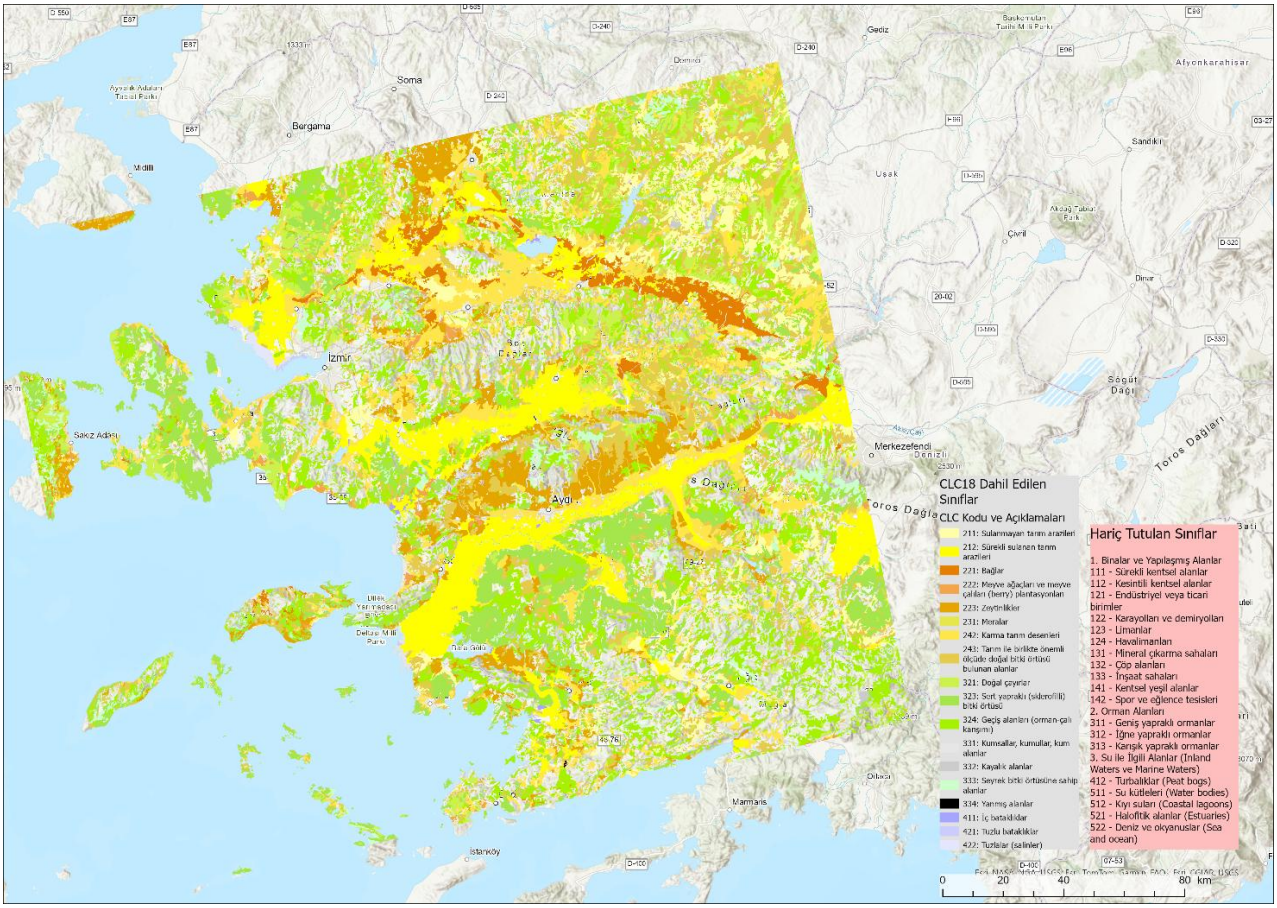
Delta ve Diluvium modelleri, SYM5-L0 ile hesaplanan yükseklik değerleri arasındaki farklar üzerinden değerlendirilmiş ve farkların SYM5-L0 ±3 m doğruluk sınırını geçip geçmediği Eşitlik (5)'te yer alan formül kullanılarak kontrol edilmiştir.

$$\left|h_i{}^{model} - h_i{}^{SYM5-L0}\right| \leq 3\ m \quad (5)$$

Farkların 3 m'nin altında kalması durumunda, modellerin doğruluğu yeterli kabul edilmiş ve bu şartı sağlayan nokta sayısının toplam nokta sayısına oranlamasıyla modellerin doğruluk oranı belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bulgularında maskeleme işlemi, rastgele nokta üretimi ve doğruluk analizleri gibi farklı aşamalar, her bir aşamanın rolü ve katkıları açısından kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analizler, model performanslarını karşılaştırarak, her bir modelin deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına karşı duyarlılığını ve doğruluk seviyelerini değerlendirmek için kritik bir temel sağlamaktadır. Bulgular kısmında her bir analiz aşamasına dair elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların çalışmanın genel bulgularına katkıları sırasıyla sunulmuştur. Maskeleme işlemi: Bina ve bitki örtüsünden etkilenmeyen alanların seçilebilmesi için yapılmıştır. CLC2018 veri seti, bina ve bitki örtüsü bulunan bölgelerin belirlenmesi ve çalışma kapsamından çıkarılmasında temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu işlem, özellikle SYM5-L0 modelinin bir yüzey modeli olması nedeniyle önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir. Maskeleme işlemi ile bazı sınıflar veri setinden çıkarılmıştır. CLC2018 sınıfları ve hariç tutulan sınıflar Şekil 6'da sunulmuştur. Rastgele nokta üretimi: Maskeleme işleminin ardından, çalışma alanında her bir sınıf alanına 1000 nokta ve noktalar arası 500 m kriterleriyle rastgele noktalar üretilmiş ve bu noktalar analizlerde kullanılmıştır. Noktalarda her bir modele ait yüksekliklerin farklarının değerlendirilmesiyle, doğruluk seviyeleri belirlenmiştir.



Şekil 6. CLC2018 Arazi sınıfları, çıplak arazi sınıfı olarak seçilen ve hariç tutulan sınıflar

Doğruluk analizleri: İstatistiksel değerlendirmeler sonucu elde edilen parametreler Tablo 1'de sunulmuştur. Yapılan doğruluk analizi sonucunda, global açık erişimli modellerin %90 ve %89 doğrulukla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1. Yükseklik modellerinin SYM5-L0 ile karşılaştırılmasından elde edilen doğruluk analizi sonuçları

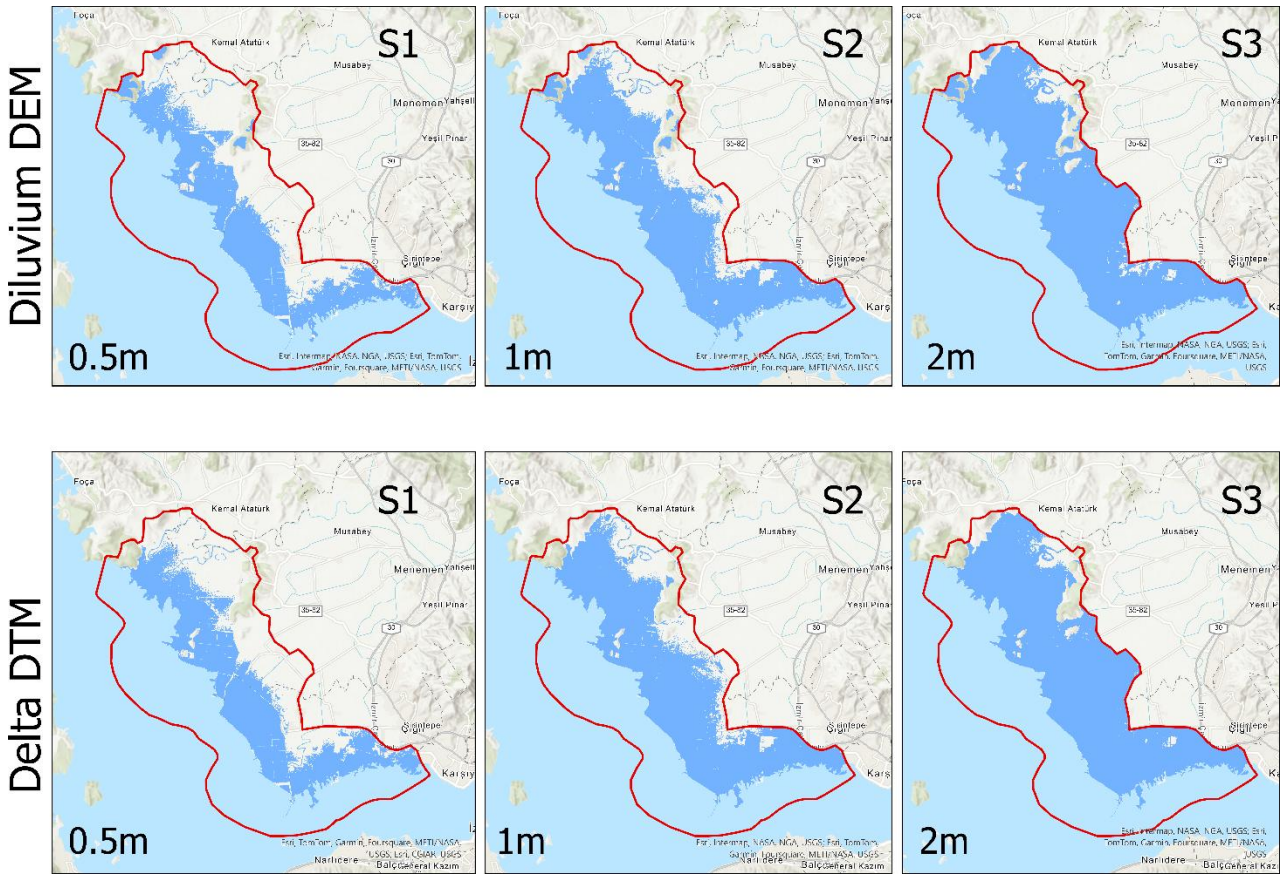
Model	Ortalama Hata (ME)	Ortalama Mutlak Hata (MAE)	Karesel Ortalama Hata (RMSE)	Standart Sapma (SD)	Doğruluk Oranı (%)
Diluvium DEM	-1,37 m	1,67 m	2,45 m	2,032 m	%90
Delta DTM	-1,89 m	1,99 m	3,46 m	2,893 m	%89

Menteş mareograf istasyonu deniz seviyesi projeksiyonları: Doğruluk analizlerinden elde edilen modellerin güvenilirliği, deniz seviyesi projeksiyonlarının karşılaştırılmasında temel teşkil etmiştir. SYM5-L0 modeliyle yapılan doğruluk değerlendirmesi sonucunda elde edilen güvenilirlik seviyeleri hem IPCC senaryolarından hem de TUDES verilerinden hesaplanan trendlerin karşılaştırılması için sağlam bir temel oluşturmuştur. Gerçekte zaman içindeki deniz seviyesi değişimi nadiren doğrusal olsa da Menteş mareograf istasyonundaki deniz seviyesi değişiminin son 25 yıldaki doğrusal eğilimin hesaplanması, istasyon genelinde yükselme ya da düşme oranına dair bir gösterge sağlamaktadır. Bu doğrultuda; TUDES verileri ile 3,7 mm/yıl olarak hesaplanan doğrusal bir artış hızıyla bu yüzyılının sonunda Menteş mareograf istasyonunda yaklaşık 28 cm'lik bir deniz seviyesi yükselmesi beklenebilir. Tablo 2'de, Menteş mareograf istasyonu için SSP senaryolarına göre NASA Sea Level Projection Tool'dan sağlanan deniz seviyesi artış projeksiyonları ile TUDES verileri kullanılarak hesaplanan yerel deniz seviyesi artış projeksiyonları yer almaktadır.

Tablo 2. Menteş mareograf istasyonunda deniz seviyesinin yıllara göre projeksiyon değerleri

Yıl	SSP5-8.5 Düşük Güvenilirlik	SSP5-8.5	SSP3-7.0	SSP2-4.5	SSP1-2.6	SSP1-2.6 Düşük Güvenilirlik	SSP1-1.9	TUDES verisi
2030	0,13 m	0,12 m	0,12 m	0,12 m	0,12 m	0,12	0,12 m	0,02 m
2050	0,28 m	0,27 m	0,25 m	0,24 m	0,23 m	0,23	0,20 m	0,1 m
2100	0,91 m	0,80 m	0,71 m	0,60 m	0,50 m	0,50	0,41 m	0,3 m
2150	2,00 m	1,35 m	1,19 m	0,97 m	0,79 m	0,74	0,61 m	0,5 m

Senaryo 1: 0,5 m, Senaryo 2: 1 m ve Senaryo 3: 2 m için deniz seviyesi altında kalacak alanlar analiz edilmiştir. Bu projeksiyonlar; 2030, 2050, 2100 ve 2150 yılları için senaryolara dayalı olarak analiz edilmiştir. 2030 yılı itibarıyla, SSP senaryoları altında öngörülen artışlar 0,12 m civarında değişirken, TUDES verilerinden hesaplanan değer 0,02 m olarak daha düşük bir artış göstermektedir. 2050 yılına gelindiğinde, IPCC projeksiyonları 0,20 m ila 0,28 m arasında değişirken, TUDES verileri ile bu değer 0,1 m olarak öngörülmektedir. 2100 yılında, SSP senaryolarındaki artışlar 0,41 m ile 0,91 m arasında değişirken, TUDES verilerinden hesaplanan artış 0,3 m olarak daha düşük kalmaktadır. 2150 yılı itibarıyla ise SSP senaryoları altında en yüksek artış 2,00 m olarak öngörülürken, TUDES verileri bu artışı 0,5 m olarak projekte etmektedir. Bu değerlerden hareketle düşük, orta ve yüksek risk senaryoları olarak, Gediz Deltası'nda 0,5 m, 1 m ve 2 m deniz seviyesi yükselmesi analiz edilmiştir. Bu değerlerle yapılacak bir analiz, TUDES verilerinden 2150 projeksiyonunu ve SSP düşük ve yüksek güvenirlilik senaryolarını test etmek için uygun bulunmuştur. Bu doğrultuda deniz seviyesi altında kalacak alanlar belirlenmiş ve Şekil 7'de verilmiştir. Diluvium DEM ve Delta DTM, 3 farklı senaryo kapsamında değerlendirilmiştir.



Şekil 7. 0,5 m, 1 m ve 2 m deniz seviyesi yükselme senaryolarına göre gerçekleşen deniz seviyesi artışları ve su altında kalacak alanlar

Bu alanların toplam alan üzerindeki etkisini gösteren değerleri içeren Tablo 3 incelendiğinde delta alanının en iyi senaryoya göre yaklaşık %50'sinin, en kötü senaryoya göre de yaklaşık %88'inin delta alanının sular altında kalacağı görülmektedir.

Tablo 3. Deniz seviyesi artış projeksiyonları sonucu sular altında kalacak alanlar

Model	Deniz Seviyesi (su) altında kalacak alanlar					
	Senaryo 1 (0,5 m)		Senaryo 2 (1 m)		Senaryo 3 (2 m)	
	Alan (m^2)	%	Alan (m^2)	%	Alan (m^2)	%
Diluvium DEM	92.056.700,87	48,49	133.135.283,31	70,12	166.271.135,78	87,57
Delta DTM	95.585.511,66	50,34	137.092.667,39	72,21	166.379.668,35	87,63
Toplam Delta Alanı	189.865.809,00					

0,5 m deniz seviyesi yükselmesi durumunda, su altında kalan alanlar her iki modelde de toplam alanın yaklaşık yarısını kapsamaktadır; bu durum Diluvium DEM için 92 milyon m²'nin üzerinde, Delta DTM için ise yaklaşık 95,5 milyon m²'ye denk gelmektedir. Deniz seviyesinin 1 m'ye yükselmesiyle birlikte etkilenen alanların belirgin şekilde arttığı gözlemlenmekte; Diluvium modelinde 133 milyon m²'yi, Delta modelinde ise 137 milyon m²'yi aşmaktadır. En yüksek senaryo olan 2 m yükselmede, her iki modelde de etkilenen alanların 166 milyon m² seviyelerine ulaşarak toplam alanın yaklaşık %87'sine denk geldiği görülmektedir. Bu değerler, deniz seviyesindeki her 1 m artışın kıyı bölgelerinde büyük etkiler yarattığını ve su altında kalacak alanların dramatik şekilde büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca, farklı senaryolar ve modeller arasında gözlemlenen alan büyüklükleri, Gediz Deltası'nın deniz seviyesindeki değişimlere karşı oldukça hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4'te, CORINE 2018 verisine dayalı arazi örtüsü sınıflarının, Delta DTM ve Diluvium DEM modellerine göre oluşturulan üç deniz seviyesi yükselme senaryosunda (S1: +0,5 m, S2: +1 m, S3: +2 m) sular altında kalma potansiyeli analiz edilmiştir.

Tablo 4. Deniz seviyesi artış projeksiyonları sonucu sular altında kalacak alanların arazi kullanımıyla ilişkisi

		Delta DTM S1 - 0,5m		Delta DTM S2 - 1m		Delta DTM S3 - 2m		Diluvium DEM S1 - 0.5m		Diluvium DEM S2 - 1m		Diluvium DEM S3 - 2m	
	T.Alan (ha)	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %
212: Sürekli sulanan tarım arazileri	7114	998	14	4038	57	6382	90	591	8	3449	48	6221	87
231: Meralar	752	405	54	665	88	695	92	315	42	642	85	682	91
243: Tarımla birlikte önemli ölçüde doğal bitki örtüsüne sahip alanlar	202	167	83	201	99	201	100	136	68	201	99	201	99
321: Doğal çayırlar	481	0	0	28	6	112	23	88	18	98	20	164	34
323: Sert yapraklı (sklerofilli) bitki örtüsü	967	9	1	21	2	57	6	291	30	300	31	337	35
324: Geçiş alanı (orman-çalı karışımı)	436	14	3	136	31	382	88	12	3	72	17	233	53
331: Kumsallar, kumullar, kum alanlar	2662	2379	89	2624	99	2646	99	2202	83	2605	98	2625	99
421: Tuzlu bataklıklar	963	955	99	962	100	962	100	941	98	960	100	960	100
422: Tuzlalar (salinler)	3883	3736	96	3867	100	3882	100	3724	96	3839	99	3874	100

Hem model hem senaryo düzeyinde, farklı arazi sınıflarının maruz kalma düzeylerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Sürekli sulanan tarım arazileri (212), özellikle S3 senaryosunda her iki modelde de yüksek düzeyde etkilenmektedir (%90 ve %87). Bu, delta tarım arazilerinin büyük ölçüde deniz seviyesi artışına maruz kalacağını göstermektedir. Meralar (231) ise her iki modelde de orta seviyeden yüksek seviyeye doğru artan bir etkilenme eğilimi göstermekte; S3 senaryosunda %91'e varan bir su altında kalma oranına ulaşmaktadır. Doğal çayırlar (321) ve sert yapraklı (sklerofilli) bitki örtüsü (323) sınıfları, özellikle Delta DTM ile yapılan analizde düşük etkilenme oranlarına sahiptir (S3 senaryosunda sırasıyla %23 ve %6). Ancak Diluvium DEM modeline göre bu sınıflarda daha yüksek bir maruz kalma eğilimi gözlenmiştir (%34 ve %35). Bu durum, model kaynaklı yükseklik farklılıklarının habitat maruziyet analizlerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Geçiş alanları (324) hem Delta DTM hem de Diluvium DEM senaryolarında S3 için sırasıyla %88 ve %53 oranında su altında kalma potansiyeli göstermektedir. Bu sonuç, düşük kotlara yayılmış orman-çalı karışımı alanların özellikle kritik eşiklerde hızla risk altına girdiğini ortaya koymaktadır. Kumsallar, kumullar ve kum alanlar (331) için tüm senaryolarda yüksek düzeyde etkilenme gözlenmiştir (her iki modelde de S3 senaryosunda %99).

Benzer şekilde tuzlu bataklıklar (421) ve tuzlalar (422) sınıfları da hem DTM hem de DEM temelli analizlerde en yüksek duyarlılığı sergileyen gruplar arasında yer almakta; bu alanların neredeyse tamamı (>%98) tüm senaryolarda sular altında kalmaktadır. Tarım ile birlikte doğal bitki örtüsüne sahip alanlar (243) ise tüm senaryolarda oldukça yüksek etkilenme oranları ile öne çıkmaktadır. Özellikle S2 ve S3 senaryolarında %99 ve %100 oranları ile tümüyle su altında kalması beklenmektedir.

Bu sonuçlar, delta düzeyindeki düşük kotlara yayılmış hassas arazi sınıflarının, deniz seviyesi artışına karşı yüksek düzeyde duyarlılık taşıdığını göstermektedir. Ayrıca, yükseklik modelinin (DTM vs. DEM) seçimi analiz çıktıları üzerinde önemli etkiler doğurmakta olup, özellikle habitat koruma ve kıyı yönetimi çalışmalarında model kaynaklı belirsizliklerin dikkate alınması gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan her iki modelde de düşey doğrulukların birbirine yakın olması ve doğruluk değerlendirmesinin SYM5-L0 gibi ±3 m doğruluğa sahip bir modelle yapılması sonucu yakın değerler elde edilmektedir. Aslında kıyı su baskını ya da taşkın analizlerinde düşey doğrulukların ±1 m ve daha yüksek tercih edildiği önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı global anlamda açık veri sunan ve doğruluklarının iklim değişikliği senaryolarındaki deniz seviyesi projeksiyonlarına uygulanabilirliğini açıklayan Diluvium ve Delta gibi modellerin, Türkiye kıyılarında uygulanabilirliğini, ulusal kapsamlı ve erişilebilir bir yükseklik verisi ile test etmektir. Bu amaçla elde edilebilen en yüksek doğruluklu SYM5-L0 modeli kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar, global kıyı modellerinin ulusal model yerine kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır. Deniz seviyesi yükselmelerindeki küçük değerler ve bu yükseklik modellerinin doğrulukları karşılaştırıldığında uygulanamaz gibi gözükse de bu modellerin global kök karesel ortalama hataları 1,7 m ve 0,7 m olarak hesaplanmıştır ve bu değerler kötü senaryoların analizinde yeterli görülmektedir.

Elde edilen bulgular, Türkiye'de deniz seviyesi yükselmesi, kıyı riski, yükseklik modeli doğruluk analizi ve arazi kullanım değişimlerine odaklanan çalışmalarla hem yöntemsel hem de niceliksel açıdan paralellik göstermektedir. Doğruluk analizlerinde Diluvium DEM ve Delta DTM modellerinin SYM5-L0 referansına göre sırasıyla %90 ve %89 oranlarında ±3 m doğruluk sınırında kalması, Özdemir ve Akbaş (2023) ile Akdeniz (2022) gibi çalışmalardaki yüksek doğruluk bulgularıyla örtüşmektedir. Gediz Deltası özelindeki kıyı değişimi ve taşkın senaryoları ise Tağıl vd. (2023) ve Tulger vd. (2015) tarafından önerilen mekânsal risk alanlarıyla benzerlik göstermekte, deltaik alanların duyarlılığına dikkat çeken Simav ve Şeker (2013) ile Geymen ve Dirican (2016) çalışmalarını desteklemektedir. TUDES ve SSP senaryoları ile yapılan deniz seviyesi projeksiyonları da, Ercanlı ve Savaşır (2022) tarafından vurgulanan yerel veri temelli adaptasyon ihtiyacını doğrular niteliktedir. Ayrıca, CORINE 2018 verisiyle yapılan sınıflandırmaların Aydın (2022) çalışmasıyla benzer şekilde güvenilir sonuçlar sunması, kullanılan yöntemin akademik geçerliliğini pekiştirmektedir. Sediment kirliliği (Uluturhan Suzer vd., 2015) ve tarihsel kıyı değişimleri (Öner & Vardar, 2018) gibi çevresel göstergelerle de desteklenen bulgular, delta sisteminin hem geçmişte hem de günümüzde hassasiyetini koruduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, ulusal literatürdeki mekânsal risk analizleri (Erdem, 2013; Simav vd., 2015) ile kavramsal düzeyde de örtüşmektedir.

Sonuç olarak, bu araştırma Gediz Deltası özelinde gerçekleştirilmiş çalışmalarla tutarlı bulgular üretmekte; önerdiği yöntemsel çerçeveyle Türkiye kıyılarına yönelik benzer analizler için uygulanabilir ve karşılaştırılabilir bir örnek sunmaktadır. Gelecekte, LIDAR vb. yöntemlerle elde edilebilecek kıyı veri setleriyle bu analizlerin yapılması sonucu daha sağlıklı veriler elde edilebilecektir. Bu çalışmadaki amaç, kıyı modellerinde global açık kaynak veri kaynaklarının kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu veri setleriyle gerçekleştirilen analizlerde ortaya çıkabilecek sonuçlardır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak kıyı alanında meydana gelebilecek değişimlerin sayısal yükseklik modelleriyle incelenmesini hedeflemiş ve yapılan analizler önemli bulgular ortaya koymuştur. Çalışmada kullanılan Diluvium DEM, Delta DTM ve SYM5-L0 modelleri, farklı çözünürlük ve doğruluk düzeylerine sahip olmasına karşın, Gediz Deltası'nın kıyı alanlarında deniz seviyesi artışı ve kıyı taşkınlarının etkilerinin doğru bir şekilde simüle edilebilmesi adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Model doğruluklarının değerlendirilmesinde, CORINE 2018 veri seti ile yapılan maskeleme işlemi, bina ve bitki örtüsü gibi yüzey üzerindeki nesnelerden kaynaklanan hata etkilerini ortadan kaldırarak, yalnızca doğal arazi koşullarına dayalı analizlerin yapılmasına olanak sağlamıştır.

Çalışma süresince yapılan RMSE ve MAE gibi istatistiksel metrikler kullanılarak yapılan analiz, modellerin doğruluğunu ölçerken, kıyı taşkınları gibi kritik uygulamalarda hangi modelin daha güvenilir sonuçlar vereceğine dair önemli veriler sunmuştur. Ayrıca, doğruluk sınırları analiziyle, her bir modelin yükseklik farklarının SYM5-L0 referans modelinin ±3 m düşey doğruluğuyla uyumlu olup olmadığı değerlendirilmiş ve bu sınırın aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Çalışma, bu doğruluk sınırları doğrultusunda, Diluvium ve Delta modellerinin taşkın yönetimi ve kıyı planlaması gibi kritik uygulamalarda bu model yerine kullanım için yeterli doğruluğa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, özellikle IPCC'nin 2021 tarihli Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) doğrultusunda yapılan deniz seviyesi artış projeksiyonları ile desteklenmiştir.

Bu projeksiyonlar, küresel ve yerel düzeyde deniz seviyesi yükselmesinin gelecekteki etkilerini analiz etmek için güçlü bir temel sunmaktadır. Çalışma, IPCC'nin sera gazı emisyon senaryoları ve TUDES verileri kapsamında Gediz Deltası'ndaki deniz seviyesi artışını modelleyerek, bölgedeki kıyı taşkınlarının ve ekosistem değişimlerinin gelecekteki olası etkilerini tahmin etmiştir.

Sonuç olarak, Gediz Deltası'ndaki deniz seviyesi artışının ve olası sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için bu çalışma, sayısal yükseklik modellerinin doğruluğunun değerlendirilmesinin yanı sıra, iklim değişikliğinin potansiyel etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır. Çalışma, özellikle düşük ve yüksek çözünürlükteki modellerin karşılaştırılması, doğruluk sınırlarının belirlenmesi ve deniz seviyesi projeksiyonlarının analiz edilmesi gibi adımlar ile kıyı bölgelerindeki risklerin yönetilmesi için önemli bir temel sunmaktadır. Bu tür çalışmalar, gelecekteki kıyı taşkınları ve deniz seviyesi artışı gibi iklim değişikliği kaynaklı risklerin yönetimi ve önlenmesi için bilimsel temelli stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Kıyı yönetimi ve afet risk azaltma politikalarının güçlendirilmesi için, daha yüksek doğrulukta modellerin kullanılması, yerel veri setleriyle entegre çözümlerin geliştirilmesi ve deniz seviyesi değişimlerinin etkilerinin daha ayrıntılı şekilde modellemesi büyük bir öneme sahiptir.

Teşekkür

Menteş mareograf istasyonu verilerini, *https://tudes.harita.gov.tr/* web sayfasından sağlayan Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz. Bu çalışmanın sonuçları TMMOB 8. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi'nde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

Akdeniz, M. (2022). *Göktürk-1 uydu görüntülerinden üretilen sayısal yükseklik modelinin doğruluğunun araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Alevkayalı, Ç., & Tağıl, Ş. (2018). Ortak malların trajedisi üzerine teoriler: Gediz Deltası'nda arazi kullanımı–arazi örtüsü değişimi. *SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi, 43*, 120–142.

Arslan, E. S., & Örücü, Ö. K. (2019). Bodrum ilçesinin 1990–2018 yılları arasındaki arazi örtüsü değişimi. In E. E. Akyüz Levi, Y. Dönmez, B. Şimşek İlhan (Eds.), *Mimarlık, planlama ve tasarım alanında araştırma makaleleri* (pp. 181–198). Gece Kitaplığı.

Aydın, T. K. (2022). *İklim değişikliğinin Konya Ereğli–Bor Alt Havzasındaki arazi kullanımı/örtüsü ve kentsel gelişime etkilerinin belirlenmesi* [Doktora tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Bayar, R., & Karabacak, K. (2017). Ankara ili arazi örtüsü değişimi (2000–2012). *Coğrafi Bilimler Dergisi, 15*(1), 59–76. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000181

Bozduman, Ş. (2019). Sınıflandırma yöntemiyle sulak alanların değişimi analizi: Dipsiz Lagün örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi, 1*(1), 16–20.

Çam, A., Fırat, O., & Yılmaz, A. (2013, 11–13 Kasım). Harita Genel Komutanlığında ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi faaliyetleri [Bildiri sunumu]. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara, Türkiye.

Demirkesen, A. C., Evrendilek, F., & Berberoğlu, S. (2008). Quantifying coastal inundation vulnerability of Turkey to sea-level rise. *Environmental Monitoring and Assessment, 138*(1–3), 101–106. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9746-7

Demirlenk, G. G. (2022). *Gediz Deltası ekoturizm potansiyelinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Doğa Derneği. (2023). *Dünya Mirası Gediz Deltası tanıtım kitapçığı*. Doğa Derneği Yayınları.

Dusseau, D., Zobel, Z., & Schwalm, C. R. (2023). DiluviumDEM: Enhanced accuracy in global coastal digital elevation models. *Remote Sensing of Environment, 298*, Article 113812. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113812

Ercanlı, Ç., & Savaşır, G. (2022). Deniz seviyesinin yükselmesi ve taşkınlara karşı kentsel kıyı alanlarının analizi ve adaptasyon stratejileri için bir yaklaşım: İzmir örneği. *Planlama, 32*(3), 361–382.

Erdem, U. (2013). Yerleşimlerin taşıdığı deniz taşkını, sel ve deprem afet tehlikelerinin CBS kullanılarak yorumlanması: Balıkesir örneği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15*(2), 40–57.

Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A., & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of*

Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ss. 1211–1362). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011

Gazioğlu, C., Burak, S., Alpar, B., Türker, A., & Barut, İ. F. (2010). Foreseeable impacts of sea level rise on the southern coast of the Marmara Sea (Turkey). *Water Policy, 12*(6), 932–943. https://doi.org/10.2166/wp.2010.050

Geymen, A., & Dirican, A. Y. (2016). İklim değişikliğine bağlı deniz seviyesi değişiminin Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak analiz edilmesi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8*(1), 65–74. https://doi.org/10.15659/hartek.16.04.308

Gülçin, D. (2018). Arazi kullanımlarının sınıflandırılmasında piksel ve obje tabanlı sınıflandırmanın karşılaştırılması. *Journal of Adnan Menderes University, Agricultural Faculty, 15*(2), 43–49.

Harita Genel Müdürlüğü. (2024). *Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi*. 13 Kasım 2024'te https://tudes.harita.gov.tr/ adresinden alındı.

Harita Genel Müdürlüğü. (2025). *Sayısal Yükseklik Modeli 5m Seviye-0*. 18 Nisan 2025'de https://www.harita.gov.tr/urun/sayisal-yuzey-modeli-5-m-seviye-0-sym5-l0-/1 adresinden alındı.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Summary for policymakers*. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Kaya, Ç. M. (2022). Taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan yöntemler. *Türkiye Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 3*(2), 191–209. https://doi.org/10.48123/rsgis.1129606

Ozsahin, E., Ozdes, M., Ozturk, M., & Yang, D. (2023). Coastal vulnerability assessment of Thrace Peninsula: Implications for climate change and sea level rise. *Remote Sensing, 15*(23), Article 5592. https://doi.org/10.3390/rs15235592

Öner, E., & Vardar, S. (2018). Gediz Deltası paleocoğrafyasında Panaztepe'nin limanını bulma umudu. *Journal of Awareness, 3*(Özel Sayı), 1–18. https://doi.org/10.26809/joa.2018145260

Özdemir, H., & Akbaş, A. (2023). Sayısal yükseklik modellerindeki mekânsal çözünürlük değişkenliğinin taşkın tehlike analizine etkileri. *Coğrafya Dergisi, 46*, 137–156. https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1177718

Pronk, M., Hooijer, A., Eilander, D., Haag, A., de Jong, T., Vousdoukas, M., Vernimmen, R., Ledoux, H., & Eleveld, M. (2024). DeltaDTM: A global coastal digital terrain model. *Scientific Data, 11*, Article 273. https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9

Simav, Ö., & Şeker, D. Z. (2013, 11–13 Kasım). Kıyı etkilenebilirlik göstergesi ile Türkiye kıyıları risk alanlarının tespiti [Bildiri sunumu]. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara, Türkiye.

Simav, Ö., Şeker, D. Z., Tanık, A., & Gazioğlu, C. (2015). Kıyı etkilenebilirlik göstergesi ile Türkiye kıyıları risk alanlarının tespiti. *Harita Dergisi, 153*, 1–12.

Tağıl, Ş., Alevkayalı, Ç., & Aytan, B. (2023). Gediz Deltası sulak alanı boyunca kıyı şeridi evrimi ve erozyon hassasiyetinin değerlendirilmesi. *Ege Coğrafya Dergisi, 32* (Cumhuriyet'in 100. Yılı Özel Sayısı), 127–142. https://doi.org/10.51800/ecd.1322803

Tırıl, A. (2005, 8–10 Eylül). Bir koruma öyküsü – Gediz Deltası [Sempozyum bildirisi]. *Korunan Doğal Alanlar Sempozyumu*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

Tulger, G., Bilgiç, E., & Gündüz, O. (2015, 8–10 Ekim). Olası deniz seviyesi yükselmesi şartlarında Gediz Deltası için bir su altında kalma analizi [Bildiri sunumu]. *VIII. Ulusal Hidroloji Kongresi*, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye.

Uluturhan Suzer, E., Kontaş, A., & Can-Yılmaz, E. (2015). Assessment of heavy metal pollution of surface sediments from lagoon areas of Gediz Delta (Izmir Bay). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 32*(2), 79–87. https://doi.org/10.12714/egejfas.2015.32.2.04

Yıldız, H., Andersen, O. B., Simav, M., Aktuğ, B., & Özdemir, S. (2013). Estimates of vertical land motion along the southwestern coasts of Turkey from coastal altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research, 51*(9), 1572–1580. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.011

Yılmaz, O., & Erdem, Ü. (2011). Gediz Deltası'nın uzaktan algılama teknikleri uygulanarak alan kullanım kararları üzerine araştırmalar. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 8*(1), 53–64.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 196–212
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Arkeolojik Alanların İHA ile Modellenmesi: Andoz Kalesi (Espiye-Giresun) Örneği

UAV-Based Modeling of Archaeological Sites: The Case of Andoz Castle (Espiye-Giresun)

Oğulcan Avcı[1]*, Cüneyt Aktaş[2]

[1]*Giresun Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Kültür Varlıklarını Koruma ve Onarım Bölümü, 28800, Giresun/Türkiye.*
[2]*Giresun Üniversitesi, Güre Yerleşkesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 28200, Giresun/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Oğulcan Avcı
ogulcan.avci@giresun.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1655969

Yayın süreci
Geliş tarihi: 11.03.2025
Kabul tarihi: 05.07.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Giresun ili Espiye ilçesinde yer alan Andoz Kalesi'nin insansız hava aracı (İHA) destekli fotogrametri yöntemiyle üç boyutlu (3B) olarak modellenmesini konu almaktadır. Araştırma, sarp topoğrafyaya sahip bu tarihi yapının güncel durumunu yüksek doğrulukla belgeleyerek dijital arşivlemeye katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda DJI Mini 3 Pro İHA ile toplam 2242 adet fotoğraf toplanmış ve Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak Structure from Motion (SfM) ve Multi-View Stereo (MVS) algoritmaları aracılığıyla 3B modelleme gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik doğruluğu artırmak amacıyla, 8 adet yer kontrol noktası (4'ü referans - GCP, 4'ü kontrol - check point olarak) GNSS cihazıyla ölçülerek yazılıma tanımlanmış ve ilgili görüntüler üzerinde manuel işaretlemesi yapılmıştır. Yapılan işlemler sonucunda, araştırma sahasına ait modelin sayısal yükseklik modeli (DEM) için GSD değeri 5.46 cm/piksel, ortofoto için ise nominal GSD değeri 2.00 cm/piksel olarak hesaplanmıştır. Kontrol noktaları üzerinden yapılan doğruluk analizinde, referans (GCP) noktalarında toplam RMS hata 2.06 cm, kontrol (check) noktalarında ise 7.67 cm olarak belirlenmiştir. Üretilen yüksek çözünürlüklü 3B model; restorasyon, sanal tur, kültürel miras yönetimi ve mekânsal analizler gibi çeşitli disiplinlerde bilimsel referans olarak değerlendirilebilecek niteliktedir. Ayrıca, Andoz Kalesi'nin coğrafi bağlamı ve stratejik konumu da çalışmada analiz edilerek, dijital kültürel miras belgelenmesine önemli bir katkı sunulması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: *Uzaktan algılama, İHA destekli 3B modelleme, Fotogrametri, Arkeolojik belgeleme, Andoz kalesi*

Abstract

This study presents the UAV-assisted photogrammetric 3D modeling of Andoz Castle, located in the Espiye district of Giresun Province, Türkiye. The primary aim is to digitally document the current state of the structure, situated in steep terrain, with high spatial accuracy. A total of 2,242 images were captured using a DJI Mini 3 Pro UAV. 3D reconstruction was conducted using Structure from Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) algorithms via Agisoft Metashape Professional. To improve accuracy, eight ground control points (GCPs)-four reference and four check points-were measured with a GNSS device and manually marked in the software. The Ground Sampling Distance (GSD) was calculated as 5.46 cm/pixel for the Digital Elevation Model (DEM) and 2.00 cm/pixel for the orthophoto. The Root Mean Square (RMS) error was determined as 2.06 cm for GCPs and 7.67 cm for check points. The resulting high-resolution 3D model provides a reliable basis for restoration, virtual tours, heritage management, and spatial analysis. Additionally, the study analyzes the geographical and strategic context of the castle, aiming to support digital cultural heritage documentation efforts.

Keywords*: Remote sensing, UAV-assisted 3D modeling, Photogrammetry, Archaeological documentation, Andoz castle*

1. Giriş

Genel olarak nesnelerin ve çevrenin fotoğraflar aracılığıyla ölçülmesi ve modellenmesi tekniği olarak tanımlanan fotogrametri özellikle son yıllarda gelişen İHA teknolojileri ve yüksek çözünürlüklü kameralar sayesinde arkeoloji başta olmak üzere birçok disiplinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu teknik günümüzde, video oyun ve film sektöründe gerçekçi mekanların tasarımından (Ceylani & Yavuz, 2023) sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamalarına (Çipiloğlu Yıldız vd., 2021; Uslu & Uysal, 2020; Yiğit & Uysal, 2021; Yiğiy & Uysal, 2023), anıt ağaç gibi doğal miras unsurlarının belgelenmesinden (Uslu, 2022; Uslu & Uysal, 2022) endüstriyel mühendislik çözümlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Ancak özellikle arkeolojik ve kültürel mirasın korunması çalışmalarında sağladığı katkılar dikkat çekicidir (Aydın vd., 2023; Çelik vd., 2020; Erbaş vd., 2025; Karakaya & Ulvi, 2024; Özsoy & Aksoy, 2021; Pulat vd., 2022; Şenol vd., 2021; Ulvi & Yiğit, 2020).

Fotogrametrinin bu denli yaygın kabul görmesinin temel nedeni, yüksek doğrulukta üç boyutlu veri elde etme, zamandan tasarruf sağlama ve zorlu arazi koşullarında bile etkili çözümler sunma gibi avantajlarıdır. Arkeolojik alanlarda tarihi yapıların dijital belgelenmesinden mekansal analizlere kadar geniş bir uygulama alanı bulunması, bu yöntemi kültürel miras çalışmalarının vazgeçilmezi haline getirmiştir. Nitekim geleneksel belgeleme tekniklerinin zaman alıcı ve sınırlı doğruluğa sahip olması, fotogrametrik yöntemlerin kültürel mirasın korunması ve gelecek nesillere aktarılması sürecindeki kritik rolünü daha da belirginleştirmektedir.

Arkeolojik çalışmalarda klasik yöntemlerin yanı sıra son dönemde uzaktan algılama yöntemlerinin sunduğu olanaklardan da faydalanılmaktadır. Bunun temel nedeni bahsedilen yöntemlerin arkeolojik sitleri oluşturan tarihi yapıların kurulu oldukları bölgeyle ilişkisi, birbirleriyle olan bağlantısı, mekânsal kurgusu ve kuruluş yerine etki eden faktörler gibi olguların anlaşılabilmesini kolaylaştırmasıdır. Uzaktan algılama yöntemleri, sahip olduğu donanımlar (veri toplama, depolama ve veriye ulaşma) aracılığıyla araştırmacılara daha anlaşılır görsel materyal sunmaktadır. Bu yöntemler daha önceki yöntemlere kıyasla arkeolojik sit çalışmalarında farklı veri türlerini sentezleyerek yeni bilgiler üretme noktasında da zaman kazandırması açısından oldukça önemlidir. Söz konusu yöntemlerin sunmuş olduğu olanaklardan bazıları bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Arkeolojik alanlar, insanlık tarihinin derin izlerini barındırması ve bulundukları bölgenin kültür tarihinin aydınlatılması açısından oldukça önemli olan alanlardır. Fakat bu alanlar doğal afetler, iklim değişikliği, savaşlar gibi insan kaynaklı tahribat ve zamana bağlı aşınma gibi tehditlerle karşı karşıyadır. Bu nedenle tarihi öneme sahip olan arkeolojik mirasın belgelenmesi, dijital olarak arşivlenmesi ve gelecek nesillere aktarılması, koruma çalışmalarının temelini oluşturmaktadır (Aydın vd., 2023; Özsoy & Aksoy, 2021). Geleneksel belgeleme yöntemleri genellikle manuel ölçümlere, haritalamaya ve fotoğraf çekimine dayanmakta ve zaman alıcı, maliyetli ve engebeli arazilerde sınırlı doğruluk sağlamaktadır. Bu noktada arkeolojik çalışmalarda kullanılan geleneksel yöntemlerden de bahsetmek yerinde olacaktır.

Geleneksek belgeleme yöntemlerinden biri yazılı belgelemedir. Rapor olarak da adlandırılan bu belgeleme türü, çalışma durum/ön inceleme raporu, çalışma ara raporu ve çalışma raporu gibi arkeolojik kazı ve yüzey araştırması boyunca farklı süreçler için hazırlanan üç farklı belgeleme türünü kapsamaktadır. Başka bir belgeleme türü fotografik belgelemedir. Kazı çalışmaları sırasında ele geçen eserlerin ilk durumları ve konservasyon sonrası durumlarının görsel olarak belgelemesinin yapılmasıdır. Ayrıca mimari bakiyeler için konsolidasyon ve restorasyon süreçlerinde de sıkça kullanılan temel bir yöntemdir. Çoğunlukla çizim olarak adlandırılan diğer bir yöntem de grafik belgeleme yöntemidir. Bu yöntemde temel amaç çalışılan alan ve malzemeye göre farklı ölçeklerde yapılan çizimlerle malzemenin ya da bakiyenin kayıt altına alınmasıdır. Geleneksel belgeme yöntemlerinden bir diğeri bilgi fişleridir. Tespit edilen arkeolojik eserin yapım ve teknik özellikleri ile mevcut korunma durumlarının açıklanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca buluntunun hangi alanda ve hangi kotta tespit edildiğini kayıt altına alması açısından önemlidir. Bilgi fişi kullanımı, bilgilerin düzenli şekilde kayda geçirilmesine olanak tanımasının yanında diğer belgeleme yöntemleri için de planlamayı kolaylaştırmaktadır (Kaya vd., 2021; Şener, 2012) .

İlk kez 20. yüzyılın ilk yarısında İngiliz arkeolog Sir Mortimer Wheeler tarafından uygulanan, plankare, grid ya da karolaj sistemi olarak adlandırılan kazı tekniği, arkeolojik kazılarda alanın planlanması ve bölüntülenmesi mantığına dayanmaktadır. Bu sistemde arkeolojik kazı yapılacak alan, 10 X 10 m. veya 5 X 5 m'lik karelere ayrılmakta ve kazı çalışmaları bu sınırlı alanların içinde sürdürülmektedir. Plankare sistemi, arkeolojik alanlarda kesitlerin daha kolay biçimde incelenmesiyle kültür katmanlarının tespiti, buluntu durumunun saptanması ve kaydında da denetim kolaylığı sağlamaktadır. Plankare sisteminin yetersiz kaldığı noktalar için 1970'li yıllarda açık alan sistemi geliştirilmiştir. Bu yöntem özellikle yatay düzlemde oluşturulacak kesite önem vermekte ve araştırmacılara tüm yatay planın kesintisiz olarak incelenebilmesi olanağını sunmaktadır. İngiliz arkeolog David French tarafından ortaya koyulan diğer bir arazi bölüntüleme yöntemi çapraz açma ya da satranç tahtası olarak adlandırılan sistemdir. Bu sistemde, istenildiği kadar geniş bir alandaki pek çok plankarede arkeolojik çalışmalar sürdürülebilir (Sevin, 1995). Tüm bu arazi bölüntüleme yöntemleri geleneksel şekilde el ölçümleriyle yapılmakta ve bu işlem uzun bir süre gerektirmektedir.

İHA kullanımıyla birlikte daha doğru ölçümlerle oldukça kısa zamanda bu yöntemler uygulamaya alınabilir. Ayrıca bahsedilen bu belgeleme türleriyle manuel bir şekilde oluşturulan veriler İHA fotogrametrisiyle daha kısa sürede desimetre altı hata payıyla ve dünya üzerindeki gerçek koordinatlarıyla elde edilebilmekte ve tasniflenebilmektedir.

Son yıllarda dijital teknolojilerin gelişimi, kültür varlıkları koruma ve onarım, restorasyon, arkeoloji ve sanat tarihi gibi disiplinlerde kayda değer yenilikleri beraberinde getirmiştir. Fotogrametri, nesnelerin üç boyutlu (3B) modellerini oluşturmada kullanılan matematiksel ve geometrik analizlere dayanan bir tekniktir. Özellikle 3B modelleme arkeolojik ve tarihi öneme sahip alanların detaylı bir şekilde belgelenmesi, analiz edilmesi ve sanal ortamda yeniden yapılandırılabilmesi için vazgeçilmez bir teknik haline gelmiştir. Bundan dolayı hem yersel hem de havadan fotogrametri yöntemleri arazi çalışmalarını tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

Literatürde 3B modelleme üzerine fotogrametri, yersel lazer tarama, yapılandırılmış ışık taraması, LiDAR, 3B rölöve çizimleri gibi farklı yöntemler yer almaktadır (Hamal & Ulvi, 2022). Her yöntemin avantaj ve dezavantajları olsa da özellikle fotogrametrik yöntemlerde geniş alanların modellenmesi düşük maliyetlerle gerçekleştirilebildiğinden en fazla tercih edilen yöntemdir.

Yersel fotogrametri, sabit tripodlar ya da taşınabilir sistemlerle yüksek çözünürlüklü fotoğrafların elde edilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem özellikle mimari detayların ve küçük ölçekli buluntuların belgelenmesinde etkili bir yöntem olsa da geniş alanların modellenmesinde yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca arazi engelleri nedeniyle veri toplama sürecini zorlaştırabilmektedir (Ulvi & Yiğit, 2020). Buna karşılık insansız hava araçları (İHA) ile gerçekleştirilen fotogrametri, geniş ve erişimi zor alanların hızlı, yüksek doğrulukta ve düşük maliyetle modellenmesini sağlamaktadır. Bu kısmı biraz daha detaylandırmak gerekirse; geleneksel yöntemlere kıyasla geniş alanları kısa sürede tarayarak desimetre altı doğrulukta veri elde edebilmekte ayrıca engebeli sarp arazilerde insan erişiminin sınırlı ve riskli olduğu durumlardan etkilenmemekte ve zamansal verilerin izlenmesi için tekrarlanabilir veri setleri sunmaktadır (Kabadayı, 2024; Ulvi & Yiğit, 2020).

Son yıllarda, insansız hava araçları (İHA) ile alınan fotoğraflar ve fotogrametri teknikleri kullanılarak arkeolojik ya da tarihi alanların 3B modellemesi yaygın olarak yapılmaktadır. Özellikle tarihi yapılar, kültürel miras alanları ve arazi analizleri gibi detaylı çalışmalarda, İHA destekli fotogrametri yöntemi, geleneksel ölçüm tekniklerine kıyasla düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta hızlı veri üretmede önemli kolaylık sunmaktadır (Esposito vd., 2014; Hamal & Ulvi, 2022; İzci vd., 2024; Şenol vd., 2021; Yılmaz vd., 2018). Bu yöntem, hava fotoğraflarından alınan görüntülerin fotogrametrik işleme tabi tutulmasıyla, ilgili alanın geometrik ve dokusal özelliklerini içeren, ölçülebilir 3B modeller oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmanın konusunu Trabzon Rum İmparatorluğu'nun savunma sisteminin bir parçasını oluşturan, Giresun kıyı kaleleri arasında yer alan Andoz Kalesi'nin söz konusu savunma sistemine bölgesel çapta sağladığı katkıyı uzaktan algılamayla somut şekilde ortaya koymaktır. Orta Çağ boyunca Giresun toprakları; Bizans, Abbâsîler, Büyük Selçuklular, Mengücekliler, Danişmendliler, Saltuklular, Trabzon Rum Devleti, Türkiye Selçukluları, Moğollar, Eretnalılar, Şebinkarahisar Emirliği, Akkoyunlular, Karakoyunlular ve Hacıemiroğulları gibi pek çok devlet, beylik ve emirliğin idaresi altında bulunmuştur (Sarıyıldız, 2025). Giresun kentinde tarihi süreçte inşa edilen kalelerin çokluğu dikkat çekmektedir. Ancak tarihi kaynakların bölgenin söz konusu savunma yapıları ve sistemleri hakkında oldukça sığ bilgiler sunması bu dönem savunma sistemleri ve yapılarına dair açıklanması gereken pek çok sorunu ortaya çıkarmaktadır.

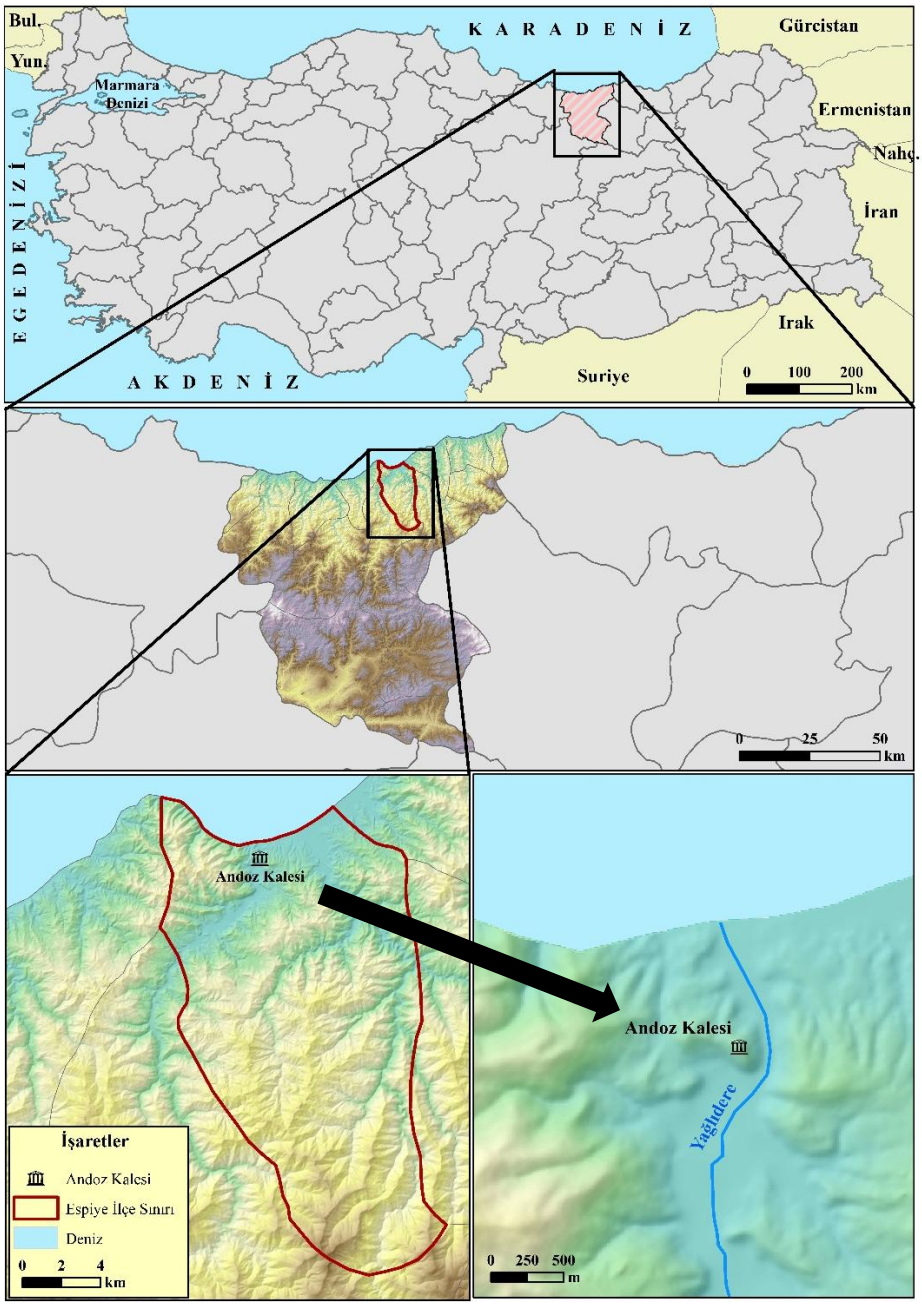
Giresun kenti, Trabzon Rum İmparatorluğu'nun batıdaki son savunma hattı olması nedeniyle oldukça önemlidir (Bryer & Winfield, 1985; Zachariadou & Keçiş, 2007). Giresun'da yer alan kıyı kalelerinden biri olan Andoz Kalesi de lokasyonu itibariyle bu savunma ağı içerisinde dikkat çekmektedir. Bu çalışma için Karadeniz Bölgesi'nin dik yamaçlarında konumlanan Andoz Kalesi'nin seçilme nedeni, İHA fotogrametrisinin sarp ve kayalık alanlarda yapılacak olan arkeolojik belgeleme çalışmalarını ne derece kolaylaştırdığını net şekilde ortaya koymasıdır. Çünkü kalenin dağlık bir alanda konumlandırılması ve bitki örtüsüyle çevrelenmiş olması geleneksel yöntemlerle yapılacak modellemeyi zorlaştırmaktadır.

1.1 Andoz Kalesi'nin Konumu

Giresun kenti, kurulduğu bölgenin coğrafi yapısı sayesinde stratejik bir öneme sahiptir. Kıyıya paralel uzanan ve oldukça yüksek olan Doğu Karadeniz Dağları, tarihi süreçte olduğu gibi günümüzde de yol güzergahlarının oluşmasında ve ulaşımda problemler ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla söz konusu bölgenin iç kesimlerine uzun boylu akarsuların meydana getirdiği vadiler sayesinde ulaşılabilmektedir (Bekdemir & Elmacı, 2008; Darkot, 1972; Tozlu, 1985).

Bu çalışmanın konusunu oluşturan Andoz Kalesi küçük bir alana sahip gözlem noktası olarak nitelendirilebilir. Söz konusu kale, Espiye ilçesinin 15 km batısında, Yağlıdere Vadisi'nin girişine hâkim ve denize oldukça yakın konumlu, yaklaşık olarak 152 m yüksekliğinde bir tepe üzerine kurulmuştur (Şekil 1). Osmanlı Dönemi'nde nehir kenarlarına ve yol güzergâhlarına savunma amaçlı kurulan küçük askerî garnizonlara palanka adı verilmektedir. Espiye kenti ve Andoz Kalesi de özellikleri bakımından Osmanlı Dönemi'nde bir palanka statüsündedir (Fatsa, 2010).

Giresun kıyılarının yüksek kıyı profili göstermesi, sahilden iç kesimlere olan karayolu oluşturma alternatiflerini sınırlandırmaktadır. Bu durum, bölgedeki akarsu vadilerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yağlıdere Vadisi, her dönem Andoz Kalesi'nin doğusundan Espiye sahiline ulaşan alternatif bir güzergah olarak öne çıkmaktadır (Texier, 2002).



Şekil 1. Çalışma sahasının lokasyon haritası

Kalenin inşa tarihini belirten bir kitabesi bulunmamakla birlikte bu konu hakkında kaynaklarda da herhangi bir bilgiye rastlanılmamıştır. Bu noktada Ksenophon'un verdiği bilgiler oldukça kıymetlidir. Müellif, Doğu Karadeniz'den bahsederken sahil ve dağlık kesimlerde yaşayan toplumların bölgenin stratejik noktalarına kale ve gözetleme kuleleri inşa ettiklerini yazmaktadır (Ksenophon, 2014). Andoz Kalesi'nin günümüzdeki veriler ışığında dönemi ve hangi uygarlık tarafından inşa edildiği bilinememektedir. Triantaphyllides'e göre yapı, adını 13.-14. yüzyıllardaki Türk akınlarına karşı burayı savunan son muhafız Antonios'tan almıştır (Yuka, 2023). Osmanlı İmparatorluğu döneminde Anadolu'yu ziyaret eden, gezi güzergahları arasında Giresun ve civarı da bulunan seyyahların Andoz Kalesi hakkında bilgi vermemeleri oldukça ilginçtir. Öte yandan Emecen (2020) ve Gökbilgin (1962) Osmanlı dönemi tahrir defterlerinde kaleden bahsedilmediğini yazmaktadır. Bu bilgiler özellikle Osmanlı hâkimiyetiyle birlikte bölgenin güvenlik sorunun büyük ölçüde ortadan kalktığına ve kalenin bu dönemde önemini yitirdiğine işaret etmektedir.

Özetle Trabzon'un Komnenoslar döneminde tahkim edilerek güçlü bir hale getirildiği ve bu kalenin Antonios Kalesi olarak anıldığı, bu adlandırmanın da Türk hakimiyeti döneminde Anduz/Andoz şekline dönüştüğü anlaşılmaktadır (Yuka, 2024).

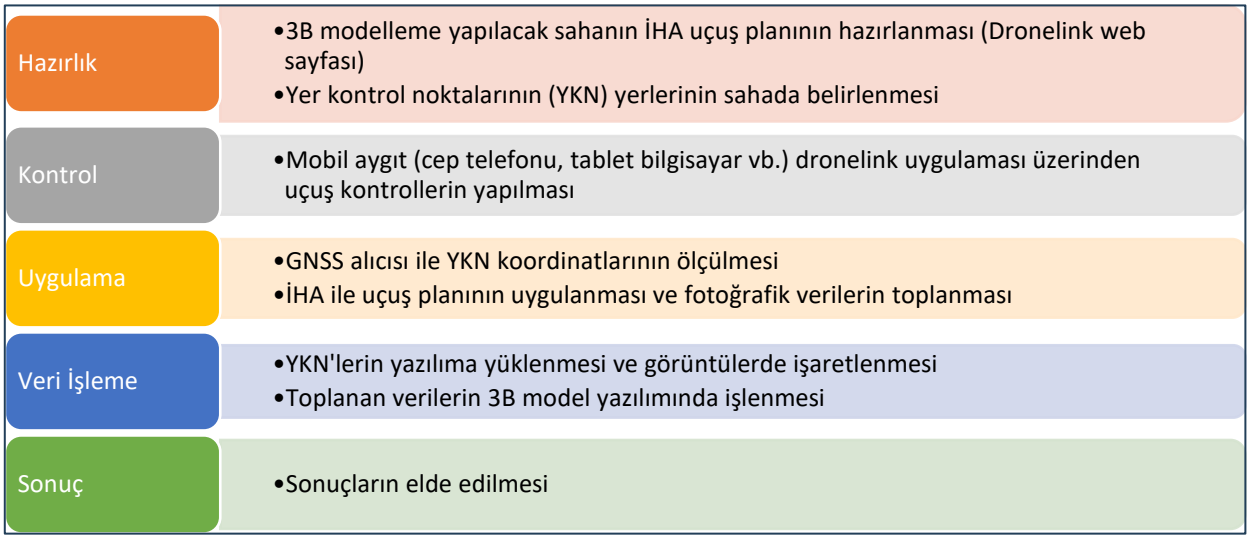
Andoz Kalesi, Kelkit Havzası'ndan Yağlıdere Vadisi yoluyla kıyıya ulaşılan tali bir güzergâhın sahil kesimiyle buluştuğu alanda yer almaktadır. Bu durum söz konusu kalenin stratejik açıdan oldukça önemli bir noktada olduğunu göstermektedir. Kıyı kesimi yaklaşık olarak 3 km'lik bir düzlük oluşturan Espiye kenti iki vadinin ortasına konumlandırılmıştır. Bunlardan doğuda kalanı Özlüce, batıda kalanı ise Yağlıdere'dir. Andoz Kalesi, Espiye'den güneye inen Yağlıdere Vadisi'nin sahile ulaştığı noktanın yaklaşık olarak 1 km kadar güneybatısındaki bir tepe üstünde bulunmaktadır. Bu noktanın Harşit Vadisi'ne, Espiye kentine ve Zefre limanına da oldukça yakın olması kalenin önemini artırmaktadır (Fatsa, 2010). Ayrıca bu bölgeden güney istikametinde oluşturulan yol, sahil kesimiyle Alucra ve tarihi süreçte önemli yerleşmelerden biri olan Şebinkarahisar'ı birbirine bağlamaktadır. Bu özellikleri bakımından Andoz Kalesi, hem Giresun'un tarihi süreçte oluşturulan kıyı savunma hattının önemli bir parçası hem de kent tarihi açısından önemli bir savunma yapısı olarak belirmektedir.

Bu çalışmada yukarıda tarihi ve stratejik önemi vurgulanan Andoz Kalesi'nin İHA destekli fotogrametri kullanılarak 3B modellenmesi gerçekleştirilmiş, bölgenin arkeolojik envanterinin oluşturulması ve koruma stratejilerine katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Andoz Kalesinin ilerleyen süreçte doğal afetlerle (heyelan, deprem vs.) ortadan kalkacak seviyede yıkılması ya da beşeri tahribata uğraması halinde yapının günümüzdeki durumu hakkında detaylı görsel materyal sunması açısından bu çalışmanın gelecek dönemde hazırlanabilecek olan restorasyon projeleri ve sanal rekonstrüksiyon çalışmalarına katkı sağlanma potansiyeli de bulunmaktadır.

2. Veri ve Yöntem

Araştırmada Andoz Kalesi'nin 3B olarak modellenmesinde uygulanan adımlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Çalışmada, halihazırda envanterde bulunan DJI Mini 3 Pro marka/model insansız hava aracı kullanılmıştır (Tablo 1). DJI Mini 3 Pro insansız hava aracının (İHA) hafif ve kompakt yapısı, özellikle dar veya engebeli arazi koşullarında kolay kullanım imkânı sağlamaktadır. Ayrıca 249 gram ağırlığında olması, birçok ülkede İHA kullanımına yönelik yasal düzenlemelere tabi olmadan uçuş yapılmasına olanak tanımaktadır. Gelişmiş engel algılama sistemi sayesinde güvenli uçuş sağlayarak arkeolojik alanlarda riskleri minimize etmektedir. Üzerinde yer alan 1/1.3 inç CMOS sensörü ve 48 MP çözünürlüklü kamerası, yüksek doğrulukta ve detaylı görüntü elde edilmesine katkıda bulunmaktadır. 3 eksenli mekanik gimbal sistemi, çekim sırasında stabiliteyi artırarak fotogrametrik modelleme için gerekli net ve keskin görüntülerin alınmasını sağlamaktadır. GPS, Galileo ve BeiDou uydu sistemleriyle hassas konum belirleme özelliğiyle veri doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca uzun uçuş süresi (standart batarya ile 34 dakika, plus batarya ile 47 dakika), geniş alanların verimli bir şekilde taranmasına olanak tanımaktadır. Bu özellikler, Andoz Kalesi gibi erişimi zor alanların düşük maliyetle ve yüksek doğrulukla modellenmesini sağladığından, bu İHA'nın kullanımı tercih edilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın uygulama adımları

Uçuş planı sonrasında elde edilen fotoğraflarla Agisoft Metashape Professional yazılımında fotogrametrik yöntemler kullanılarak sahanın 3B modeli oluşturulmuştur. Agisoft Metashape Professional İHA fotogrametrisinde sıklıkla kullanılan

bir yazılımdır. Bu yazılım sayesinde İHA'lar ile elde edilen görüntüler kullanılarak yüksek çözünürlüklü 3B modeller, ortomozaik haritalar ve sayısal yükseklik modelleri oluşturulabilmektedir. Fotogrametrik işlemli yazılımlar, yeterli donanım kapasitesine sahip bilgisayarlarda daha kısa sürede daha doğru sonuç vermektedir. Bundan dolayı yapılan analizler halihazırda elimizde bulanan Intel Core i7 11700K (3.6 GHz 16 mb) işlemciye, 64 GB RAM ve 500 GB SSD kapasiteye ve Gigabyte GeForce RTX 3060 12 GB ekran kartına sahip, masaüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. DJI Mini 3 Pro insansız hava aracının teknik özellikleri

Parametreler	Teknik Özellikleri
Engel Algılama	3 yönlü
Gimbal	3 eksenli mekanik gimbal
Ağırlık	249 gram
Ebatlar	145x90x62 mm (katlanmış), 251x362x 70 mm (açık halde)
Maks. Hız	16 m/s (Spor Mod), 10 m/s (Normal Mod), 6 m/s (Sinematik Mod)
Batarya	2453 mAh (standart batarya)-3850 mAh (plus batarya)
Lens	FOV 82.1°, f1/7, 24 mm
Kamera Sensörü	1.3 inç CMOS, 48 MP
Uçuş Süresi	34 dk. (standart batarya)-47 dk (plus batarya)
Maks. İletim Mesafesi	DJI O3, 12 km'ye kadar
Rüzgar Direnci	5. Seviye
Uydu Sistemi	GPS + Galileo + BeiDou
Konum hassasiyeti	Dikey ±1,5 Yatay ±1,5 m

2.1 Uçuş Planının Hazırlanması

İnsansız hava araçlarının, belirli bir rota üzerinde sabit uçuş gerçekleştirirken bir yandan da belirlenen noktalarda fotoğraf çekebilmesi için bir uçuş planına ihtiyaçları vardır. İleri seviye İHA kullanıcıları herhangi bir yazılıma bağlı kalmaksızın bu işlemi rahatça yapabilirler. Fakat yine de birtakım sorunların yaşanması kaçınılmaz olabilmektedir. Bunun yerine uçuş planı 3. parti yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Bu yazılımlar hem başlangıç aşamasındaki İHA kullanıcılarının işini kolaylaştırmakta hem de yapılacak işlemlerdeki hata payını minimize etmektedir. Günümüzde Pix4D Capture, DroneDeploy, Litchi, UgCS vb. farklı yazılımlarla uçuş planları hazırlanabilmektedir. Bu çalışmada uçuş planı hazırlamak için Dronelink yazılımı kullanılmıştır. Mobil ve masaüstü sürümlerinin olması, geniş özellik yelpazesi ve çalışmada kullanılan İHA da dahil olmak üzere birçok İHA modelini desteklemesinden dolayı bu yazılım tercih edilmiştir. Dronelink yazılımını kullanabilmek için öncelikle bir üyelik oluşturulmalıdır (Şekil 3a). Dronelink üyelik planlarında, profesyonel (professional) ve amatör (hobbyist) plan olmak üzere iki kategori sunmaktadır (Şekil 3b). Bunlardan profesyonel plan daha çok ticari-kurumsal kullanıcılar tarafından, amatör plan ise eğlence, eğitim ve kâr amacı gütmeyen kuruluşlar için tercih edilmektedir. Her plan kademesinde farklı seçenekler olmakta birlikte bu çalışma kapsamında amatör plan kategorisinde elit üyelik planı seçilerek, ücretli üyelik oluşturulmuştur.

Hazırlık aşamasında, 3B modellemenin yapılacağı güzergâh Dronelink yazılımının arayüzünde bulunan uydu görüntüsü üzerinden belirlenmiştir. Bu aşamada uçuş bilgileriyle ilgili bir takım parametrik veriler sistem arayüzündeki modüle girilmiştir. Bunlar; uçuş yüksekliği, uçuş hızı, rota tasarımı, yatay ve dikey örtüşme oranı, kamera gimbal açısı gibi bilgilerden oluşmaktadır (Şekil 3c).

Uçuş yüksekliği, veri kalitesini ve modelin doğruluğunu etkileyen en önemli 3B modelleme parametresidir. Uçuş yüksekliği, İHA kameralarının yerden hangi mesafede fotoğraf çekeceğini belirlemekte ve bu, fotoğrafların çözünürlüğü üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha düşük bir uçuş yüksekliği, fotoğrafların daha yüksek çözünürlükte olmasını sağlayarak modeldeki yüzey detaylarının daha iyi görünmesine olanak tanımaktadır. Fakat düşük uçuş yüksekliği daha fazla fotoğraf çekilmesini gerektirdiğinden veri işleme sürecinin uzamasına yol açmakta aynı zamanda sahadaki ani yükseklik değişimlerinden kaynaklı bozulmalara da neden olmaktadır. Araştırmada uçuş yüksekliği, kalkış noktasından 50 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu yükseklik hem Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan İHA Sistemleri Talimatı (SHT-İHA)'nın 19. maddesinin c bendi uyarınca belirlenen maksimum uçuş yüksekliğinin altında kalmakta hem de hem de yüksek çözünürlüklü görüntülerle topografik detayların (bitki örtüsü, yapılar, yüzey dokusu) kaydedilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca yasal sınırlara uygunluğu da garanti altına almaktadır. Çalışmada 50 metrelik rota haricinde sırasıyla 10 m, 20 m ve 30 m yüksekliğinde ve sırasıyla 70 m, 50 m ve 70 m yarıçapta 3 farklı dairesel yörüngede uçuş gerçekleştirilmiştir.

Uçuş hızı, 3B modelleme projelerinde İHA'nın hareket ettiği hızı ifade etmektedir. İHA'nın uçuş hızı, çekilen fotoğraflar arasındaki örtüşme oranını ve fotoğrafların netliğini etkileyen önemli bir faktördür. Yavaş bir uçuş, daha detaylı ve daha sık fotoğrafların çekilmesini sağlayarak modelin doğruluğunu artırmaktadır. Ancak, bu durum uçuş süresini uzatmakta ve pil tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Hızlı bir uçuş ise daha geniş bir alanı daha kısa sürede taramaya olanak tanırken, fotoğraf kalitesinin düşmesine ve örtüşme oranının yeterli seviyede gerçekleşmemesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada uçuş hızı 12 km/saat olarak belirlenmiştir.

Rota tasarımı, 3B modelleme projelerinde İHA uçuşunun etkinliğini ve fotoğraf çekim başarısını belirleyen kritik bir aşamadır. Doğru bir rota tasarımı, modelleme yapılacak alanın tümüyle kapsanmasını ve gerekli fotoğrafların uygun örtüşme oranlarıyla çekilmesini, farklı noktaların farklı açılardan algılanabilmesini sağlamaktadır. Genellikle rota, paralel çizgiler halinde oluşturulmaktadır. Bu çizgiler arasındaki mesafe, fotoğrafların yatay ve dikey örtüşme oranlarının en uygun olacağı şekilde, yazılım üzerinden otomatik olarak ayarlamaktadır. Daha karmaşık yapılar, örneğin tarihi bir kale gibi detaylı yüzeylere sahip bölgelerde, çapraz veya eğimli rotalar eklenerek verilerin daha kapsamlı bir şekilde toplanması sağlanabilmektedir. Çalışmada modelleme için iki farklı tip uçuş rotası oluşturulmuştur. Bunlardan ilki enine ve boyuna paralel çizgilerden oluşan ızgara (grid) tipi uçuş rotasıdır (Şekil 3c). Modellemede oluşturulan ikinci tip uçuş rotası ise dairesel (orbit) uçuş rotasıdır (Şekil 3d, 3e ve 3f). Dairesel rota ile 3B modellemenin yapılacağı sahanın çevresinde daire çizerek uçuş gerçekleştirilmiştir. Böylece yapının yan yüzeylerinin fotoğrafları çekilerek model kalitesi arttırılmıştır. İHA, uçuş planını toplamda 1 saat 50 dakikada tamamlayarak 2242 adet fotoğraf elde etmiştir.

Fotogrametrik görüntülerin elde edilmesindeki önemli noktalardan biri de örtüşme oranıdır. Yüksek örtüşme oranının birtakım avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek örtüşme oranı model kalitesini ve detayı arttırmakta ve hata payını azaltmaktadır. Özellikle arkeolojik alan modellemelerinde, yapı ve bina haritalamalarında hata payını minimize etmek için yüksek örtüşme oranı kullanılmalıdır. Yine eğimli, bitki örtüsü ve binaların yoğunluk gösterdiği alanlarda yüksek örtüşme oranı tercih edilmektedir. Bunların yanında yüksek örtüşme oranı daha fazla görüntü alımına neden olmakta ve daha fazla depolama alanı ihtiyacı oluşturmaktadır. Ayrıca uçuş ve görüntü işleme süresinin uzamasına, yüksek kapasiteli bilgisayar ihtiyacına, bunların yanında pil tüketiminin artmasına da sebebiyet vermektedir. Literatürde uçuş yüksekliklerine ve 3B modelleme türlerine göre farklı örtüşme oranları tercih edilmektedir (Aylar vd., 2024; Karakaya & Ulvi, 2024; Orkan, 2017; Şenol vd., 2021; Tercan, 2017). Bu çalışmada örtüşme oranı boyuna %85 enine ise %80 olarak belirlenmiştir.

Kamera gimbal açısı, 3B modelleme projelerinde doğru perspektifte fotoğraf çekimi yaparak modelin detaylarını ve geometrik doğruluğunu belirleyen önemli bir parametredir. Kamera açısının doğru ayarlanması hem yatay hem de dikey yüzeylerde doku ve detay kaybının önüne geçmektedir. Genellikle ortofoto üretimi ve düz yüzeylerin modellenmesi için kamera, yere tamamen dik (nadirde) 90° olacak şekilde ayarlanmalıdır. Ancak, karmaşık yapılar veya çok yüzeyli nesneler (örneğin, tarihi bir kale veya heykel) üzerinde çalışırken kamera açısının belirli bir eğimle, örneğin, 45° açıyla ayarlanması, farklı perspektiflerden veri toplanmasını sağlayabilmektedir. Bu çalışmada kamera gimbal açısı ızgara tipi uçuş rotasında 90°, dairesel uçuş rotasında ise 45° olarak belirlenmiştir.

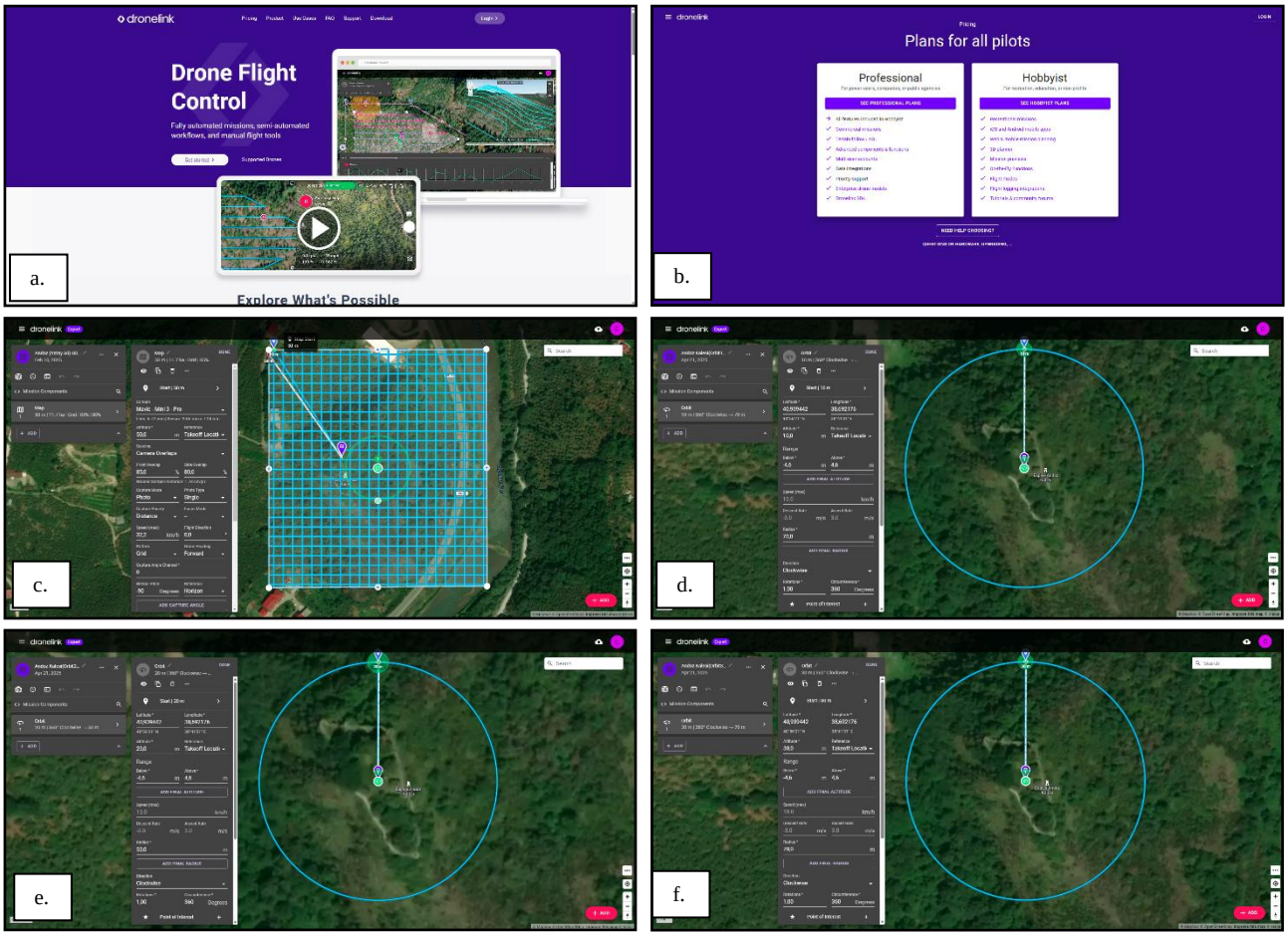
2.2 Yer Kontrol Noktalarının (YKN) Yerlerinin Sahada Belirlenmesi

Fotogrametrik modellemede yüksek mekânsal doğruluk elde edilebilmesi için yer kontrol noktalarının (YKN) hassasiyetle belirlenmesi kritik bir adımdır. Bu noktaların koordinatları, genellikle GNSS alıcıları kullanılarak yüksek doğrulukla ölçülmektedir. Ancak yalnızca ölçüm doğruluğu değil, YKN'lerin çalışma sahasındaki uygun konumlara yerleştirilmesi de modelin genel geometrik güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, çalışma alanının topografyası, yapısal çeşitliliği ve görüş açıklığı dikkate alınarak hem yatay hem de düşey doğruluk açısından optimum bir dağılım hedeflenmiştir (Topan vd., 2007). Noktaların hem merkezi hem de kenar bölgeleri temsil edecek şekilde homojen olarak sahaya yerleştirilmesine özen gösterilmiş; ayrıca fiziksel erişilebilirlik, düz zemin tercihi ve uzun süreli görünürlük gibi kriterler de göz önünde bulundurulmuştur. Böylece elde edilen 3B modeller hem görsel hem de ölçümsel açıdan güvenilir hâle getirilmiştir. Araştırma sahasında GNSS ile ölçümü yapılacak YKN'lerin konumları uçuş öncesinde belirlenmiş, ilgili alanlar zemin ile kontrast oluşturacak şekilde sprey boya ile boyanmıştır (Şekil 4).

2.3 Mobil Aygıt Dronelink DJI Uygulaması Üzerinden Uçuş Kontrollerin Yapılması

Uçuş öncesinde yapılan kontroller hem operasyonel güvenliği sağlamak hem de modelleme için gerekli olan yüksek doğrulukta fotoğraf verisini elde etmek açısından önem arz etmektedir. Uçuş öncesinde İHA'lar için standart kalibrasyon uygulamaları olan GPS, IMU, pusula ve kamera kalibrasyonları yapılarak fotografik verilerin toplanmasında cihazdan kaynaklanabilecek olası hatalar azaltılmıştır. Ayrıca İHA ve ekipman kontrolleri kapsamında pillerin şarj durumları, pervanelerin sağlam ve takılı olduğu, yeterli depolama alanı durumu ve sinyal gücü gibi önemli kontroller de gerçekleştirilmiştir. Tüm bunların yanında çevresel koşullar da uçuş güvenliği açısından önem arz etmektedir. Ayrıca elde edilen görüntülerde topografik gölgelerden kaçınmak için uçuş günü ve saati de önemlidir (Hamal & Ulvi, 2022).

Bu çalışma için yapılan uçuş, 21 Nisan 2025 tarihinde güneş ışınlarının topografyayı en iyi aydınlattığı 12:00-14:00 saatleri arasında, 12°C hava sıcaklığında ve 1 knot (1.85 km/sa) rüzgar hızında gerçekleştirilmiştir. Uçuş sırasında GPS sinyal kalitesi (30-32 uydu), batarya sıcaklığı ve anlık rüzgâr hızı da takip edilmiştir.



Şekil 3. Uçuş planı hazırlık aşamaları: a) Dronelink web sayfasına giriş ve üyelik için ilk adım, b) Üyelik planının seçimi, c) Izgara tipi uçuş rotası, d) 10 m yükseklik ve 70 m yarıçap dairesel rota, e) 20 m yükseklik ve 50 m yarıçap dairesel rota, f) 30 m yükseklik ve 70 m yarıçap dairesel rota



Şekil 4. Çalışma alanında yer kontrol noktalarının (YKN) sahaya yerleştirilmesi süreci. Farklı zemin türlerinde şablon ve sprey boya kullanılarak oluşturulan işaretlemeler GNSS ölçümleri öncesinde belirlenmiştir

2.4 GNSS Alıcısı ile YKN Koordinatlarının Ölçülmesi

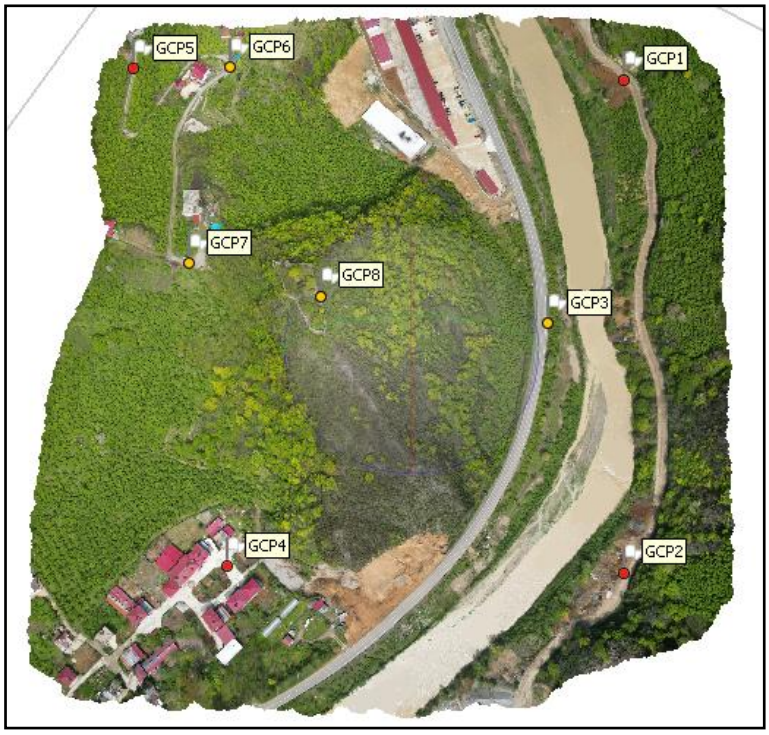
Fotogrametrik modellemede yüksek doğruluk elde etmek amacıyla YKN'lerin hassas koordinatlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, sahaya önceden yerleştirilen 8 adet YKN'nin konumu, FOIF marka A60 Pro model GNSS alıcısı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5). Ölçümler, TUSAGA-Aktif CORS-TR ağı üzerinden, ortalama 90 epok gözlem ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen koordinatlar, GRS80 elipsoidi ve UTM projeksiyonuna dayalı TUREF / TM39 (EPSG:5254) koordinat referans sistemine göre hesaplanmış ve Agisoft Metashape Professional yazılımına referans olarak tanımlanarak fotogrametrik modelleme sürecinde kullanılmıştır. Bu noktaların 4'ü modelin konumsal optimizasyonunda referans (kontrol noktası) olarak kullanılırken, diğer 4'ü doğrulama amacıyla kontrol noktası (check point) olarak atanmıştır (Şekil 6). Bu uygulama, modelin hem iç hem de dış doğruluğunun değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu adımlar sayesinde oluşturulan 3B modelin mekânsal güvenilirliği artırılmış, arkeolojik belgeleme açısından bilimsel geçerliliği güvence altına alınmıştır. Ölçülen YKN'lere ait bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Yer kontrol noktalarına (YKN) ait ölçülen koordinatlar

YKN No	X	Y	Z
1-Kontrol	4534133.940	474346.064	14.467
2-Kontrol	4533700.343	474330.523	11.673
3-Referans	4533911.445	474274.353	9.065
4-Kontrol	4533706.218	474009.754	8.222
5-Kontrol	4534121.558	473923.348	61.882
6- Referans	4534120.017	474006.192	67.868
7-Referans	4533933.338	473982.884	100.616
8-Referans	4533889.212	474090.562	152.534



Şekil 5. Yer kontrol noktalarının GNSS alıcısı (FOIF A60 Pro) ile epoklu gözlem yöntemi kullanılarak ölçülmesi



Şekil 6. YKN'lerin araştırma sahasındaki dağılımı (kırmızı noktalar: doğruluk değerlendirmesi için ayrılan kontrol noktalar, sarı noktalar: referanslama noktaları)

2.5 İHA ile Uçuş Planının Uygulanması ve Fotogrametrik Veri Toplama

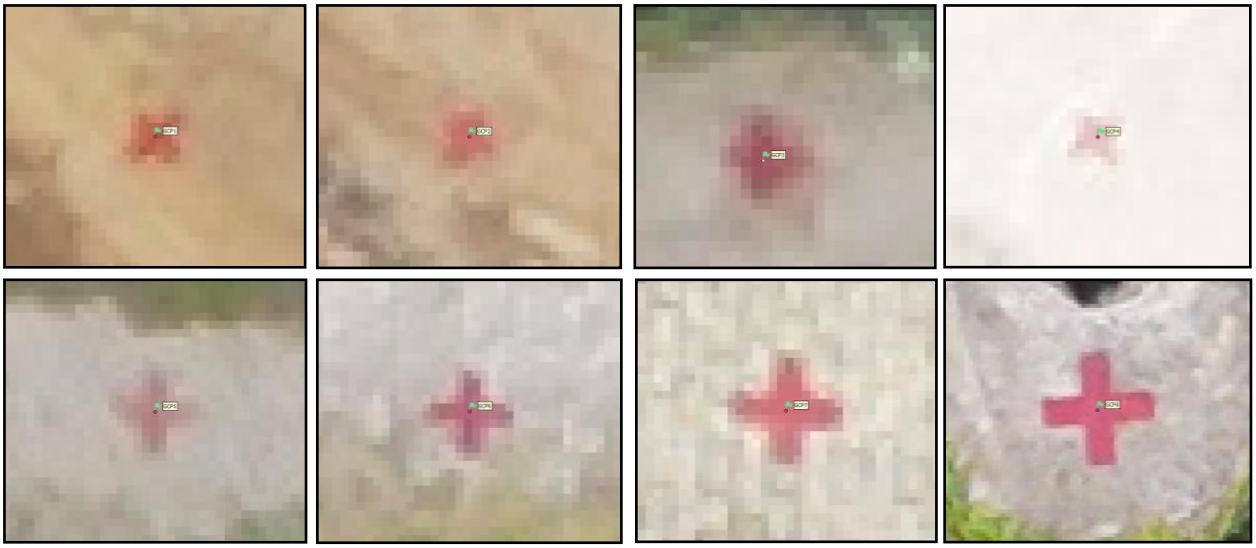
Dronelink DJI uygulaması, İHA uçuşlarının planlanması, yönetilmesi ve gerçek zamanlı olarak kontrollerin sağlanması için kullanılan mobil bir yazılımdır. Uçuş kontrolleri, genellikle mobil bir aygıt (cep telefonu ya da tablet bilgisayar) üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada, mobil cihaz, İHA ile sürekli iletişim kurarak uçuş sırasında hız, yükseklik, kamera açısı gibi parametreleri gerçek zamanlı olarak izlemekte ve gerektiğinde ayarlamalar yapılmasına olanak tanımaktadır. Dronelink web arayüzü üzerinden uçuş alanıyla ilgili gerekli parametreler ayarlandıktan sonra uçuş planının İHA'ya iletilmesi için internet bağlantısı olan mobil bir cihaz kullanılması gerekmektedir. Çalışmada Android 14 tabanlı işletim sistemine, MediaTek Helio G99 Octa-core işlemciye, 8+8 GB RAM'e, 6.43 inç ekrana sahip Realme 10 marka/model cep telefonu kullanılmıştır. Cep telefonuna Dronelink DJI uygulamasının kurulumu yapıldıktan sonra ilgili kullanıcı adı ve şifre ile uygulama hesabına giriş yapılmıştır. Cep telefonunun Type-C bağlantı noktasıyla İHA kumandasına bağlanarak Dronelink DJI uygulamasındaki uçuş planı İHA kumandasına aktarılmıştır. Bu andan sonra İHA, uçuş planına uygun olarak belirtilen rotada uçarak, ilgili noktalarda belirlenen örtüşme oranına göre fotoğraf çekim işlemini tamamlamış ve kalkış yaptığı noktaya (home point) otomatik iniş gerçekleştirmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, 3B olarak modellenecek alanın büyüklüğü ve İHA pilinin bu alan üzerindeki uçuş süresini tamamlayabilecek yeterli kapasiteye sahip olmasıdır. Batarya uçuş kapasitesinin uçuş planını tamamlamaya yetmediği durumlarda İHA, uçuş planını sonlandırarak kalkış yaptığı noktaya dönecektir. Bu durumda yedek batarya kullanılarak uçuş planında kalınan yerden devam etmek mümkündür.

2.6 Verilerin İşlenmesi

Uçuş planına uygun olarak toplanan görsel veriler Agisoft Metashape Professional (v.2.1.1) yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Agisoft Metashape Professional yazılımı Structure from Motion (SfM)-Multi-View Stereo (MVS) algoritmalarını kullanarak fotogrametrik ürünlerin üretimi gerçekleştirmektedir (Hamal & Ulvi, 2022; İzci vd., 2024). SfM, örtüşen çoklu iki boyutlu görüntülerden nesne ya da sahnenin 3B modelini, ortak görüntü noktalarını tespit edip bu noktaların konumlarını üçgenleme yöntemiyle hesaplayarak oluşturan bir algoritmalar bütünüdür (Çelik vd., 2020; Dellaert vd., 2000; Peterson vd., 2015; Yakar & Doğan, 2017). MVS, farklı açılardan çekilmiş çoklu görüntüler kullanılarak sahneye ait yüzey noktalarının yoğun derinlik bilgilerini tahmin eden ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu yeniden yapılandırma sağlayan bir tekniktir (Erbaş vd., 2025; Furukawa & Hernández, 2015; Öcalan vd., 2024; Romanoni &

Matteucci, 2019). SfM sonucunda elde edilen seyrek nokta bulutu, MVS yöntemiyle yoğunlaştırılarak detaylı 3B yapıya dönüştürülmektedir.

Sahada GNSS alıcısı ile konumlandırılan ve koordinatları milimetre düzeyinde hassasiyetle belirlenen YKN'ler, yazılıma aktarılan görüntüler üzerinde manuel olarak işaretlenmiştir (Şekil 7). Bu işlem sırasında her bir YKN, farklı açılardan çekilmiş en az 8–10 fotoğraf üzerinde tanımlanmıştır. YKN'lerin görüntüler üzerindeki doğru konumlarının işaretlenmesi, modelin dünya koordinat sistemine doğru oturtulması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sayede oluşturulan fotogrametrik modelin mekânsal doğruluğu artırılmıştır. Manuel işaretleme süreci tamamlandıktan sonra Tools > Optimize Cameras komutu ile kamera yönelim parametreleri yeniden hesaplanmış ve modelin geometrik tutarlılığı iyileştirilmiştir. Görsel veriler aşağıdaki adımlar takip edilerek 3B model haline getirilmiştir.



Şekil 7. Görüntülerde yer alan YKN'lerin manuel olarak işaretlenmesi

Sırasıyla Workflow>Add Photos adımları takip edilerek toplam 2242 adet fotoğraf yazılıma aktarılmıştır. Bu fotoğraflardan 2022 tanesi İHA'nın çekül doğrultusunda, yer yüzeyine 90° açıyla çekmiş olduğu fotoğraflardan oluşmaktadır (Şekil 8a). 220 adet fotoğraf ise 3 farklı dairesel yörüngeden farklı yüksekliklerde ve farklı açılarla çekilen fotoğraflardan oluşmaktadır (Şekil 8b). Dairesel fotoğraflar, tarihi kale gibi yapılarda modelin yan yüzeylerinin daha doğru algılanmasını ve texture (dokulama) işleminde yüzeyin daha doğru algılanmasını sağlamaktadır. Fotoğraflar, düzlemsel görüntüler olduğu için derinlik bilgisi içermemektedir.

Workflow>Align Photos adımı uygulanmış, çekim açıları ve ortak noktalarına dayanarak, fotoğraflar hizalanmıştır. Bu adımda yüksek doğruluk ve hassasiyet için Accuracy parametresi Highest olarak seçilmiştir. Bu parametre en yüksek oranda hassasiyet sağlarken, işlemin daha uzun sürede gerçekleşmesine neden olmuştur. Bu işlem ile sahanın basit nokta bulutu oluşturulmuştur. Özellikle yapı modellemelerinde boyut, form ve detayların çıkarılması için bu adım oldukça önem arz etmektedir. Fotoğrafların hizalanmasının ardından 8 adet YKN projeye dahil edilmiştir. Bu noktaların konum bilgileri, TUREF/TM39 projeksiyon sistemine uygun olarak, GRS80 elipsoidi temel alınarak ve EPSG:5254 kodlu koordinat referans sistemine göre tanımlanmıştır. Böylece modelin küresel koordinat sistemine oturması sağlanmıştır. Her bir YKN, en az 8–10 farklı fotoğraf üzerinde manuel olarak işaretlenmiş, ardından Tools>Optimize Cameras komutu kullanılarak kamera iç parametreleri ve konumları, bu noktalar referans alınarak optimize edilmiştir. Bu işlem sayesinde fotogrametrik modelin geometrik doğruluğu artırılmış, YKN'ler ile modelin eşleşmesi güçlendirilmiştir.

Workflow>Build Point Cloud adımıyla sahasın yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu aşamada modellenecek sahanın geometri detayı arttırılmış, mesh (ağ yapısı) ve texture (doku) için temel oluşturulmuş, analizdeki hassasiyet ve doğruluk arttırılmıştır (Şekil 8c).

Workflow>Build Model adımıyla, modelin yüzeyini temsil eden bir ağ yapısı (mesh) oluşturularak modelin genel geometrisi ortaya çıkarılmıştır. Bu işlem sırasında yazılım, MVS algoritmasını kullanarak nokta bulutundaki komşu noktaları birleştirmekte ve bu noktaları üçgen yüzeylerle ilişkilendirmektedir. Elde edilen yüzey ağı, modelin detaylı geometrik yapısını temsil etmektedir. Ayrıca sonraki aşamalar (örneğin doku kaplama) için temel oluşturmaktadır. Yüksek kaliteli bir mesh, hem görsel hem de doğruluk için başarılı bir 3B modelin temelini ortaya çıkarmaktadır (Şekil 8d).

Workflow>Build Texture adımıyla 3B modelin yüzeyine renk, desen ve malzeme özellikleri ile görsel detaylar eklenmiştir. Mesh işlemi modelin geometrik formunu temsil ederken, Build Texture işlemi modelin daha gerçekçi görünmesini sağlamaktadır (Şekil 8e).

Workflow > Build Orthomosaic adımıyla, hizalanmış fotoğraflar ve oluşturulan yüzey modeli kullanılarak yüksek doğrulukta ortofoto (ortorektifiye edilmiş fotoğraf) elde edilmiştir. Ortofoto üretim sürecinde, dijital yüzey modeli (DSM) kullanılarak her pikselin gerçek dünya koordinatlarıyla eşleştirilmesi sağlanmış, böylece topografik bozulmalar ortadan kaldırılmıştır. Bu yöntemle oluşturulan ortofoto, ölçümsel doğruluk taşıyan metrik bir veri çıktısı olarak kullanıma sunulmuştur. Özellikle arkeolojik alanların mekânsal analizinde, yapıların konumsal ilişkilerinin hassas bir biçimde belirlenebilmesi açısından ortofoto görüntüler büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada elde edilen ortofoto, 44.781 × 51.062 piksel çözünürlükte olup, 2,00 cm/piksel mekânsal çözünürlüğe sahiptir. Bu yüksek çözünürlük değeri sayesinde, detaylı yüzey özelliklerinin ayırt edilebilirliği artırılmış ve görsel analizlerin güvenilirliği sağlanmıştır (Şekil 8f).

Workflow>Build DEM adımı uygulanarak araştırma sahasının DEM (digital elevation model-sayısal yükseklik modeli) verisi oluşturulmuştur. DEM, sahanın yükseklik bilgilerini temsil eden sayısal bir model ve saha ile ilgili detaylı analizler yapmak için kullanılan önemli parametrelerden biridir. Bu adımla birlikte 5,46 cm çözünürlüğünde DEM verisi elde edilmiştir (Şekil 8g).

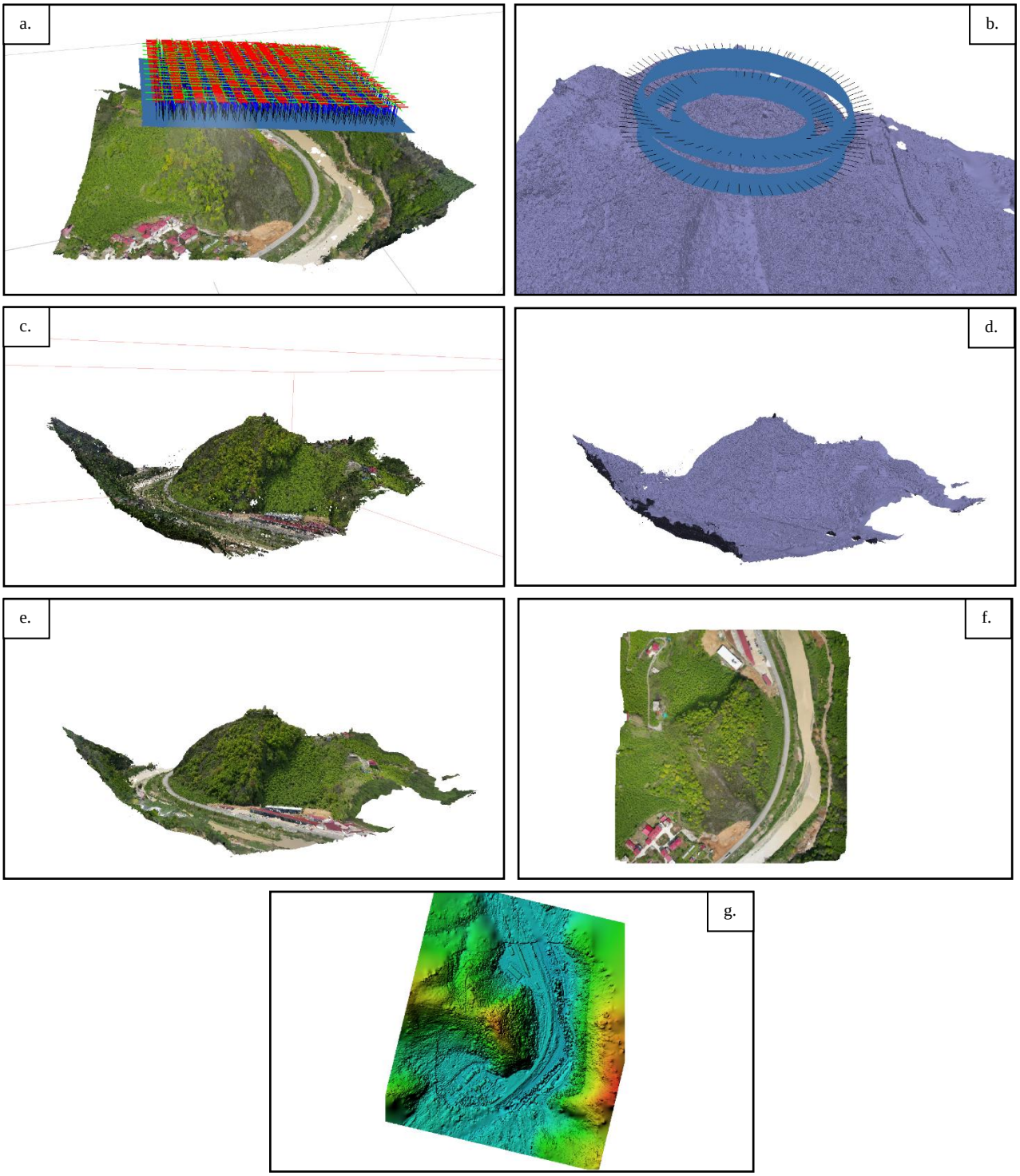
2.5 Sonuçların Elde Edilmesi

Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen fotogrametrik işlemler sonucunda, araştırma sahası olan Andoz Kalesi'nin 3B dijital modeli başarıyla oluşturulmuştur (Şekil 9). Model, yaklaşık 353.971.465 poligon detayına ve 5.46 cm/piksel dijital yükseklik modeli (DEM) yer çözünürlüğüne sahiptir. Ayrıca ortofoto çıktısından elde edilen nominal GSD değeri 2.00 cm/piksel olarak belirlenmiştir. Bu değerler, modelin yüzey detaylarını yüksek çözünürlükte temsil ettiğini göstermektedir. Andoz Kalesi'nin bulunduğu engebeli topoğrafik yapı nedeniyle, lokal GSD değerlerinde piksel bazında değişkenlik gözlenebilmekle birlikte, yazılımın uyguladığı ortorektifikasyon süreci bu sapmaları minimize ederek modelin geometrik bütünlüğünü ve doğruluğunu korumaktadır. Fotogrametrik doğruluk, sahada GNSS alıcısı kullanılarak ölçülen toplam 8 adet yer kontrol noktası yardımıyla artırılmıştır. Bu noktalardan 4'ü referanslama amacıyla, diğer 4'ü ise kontrol amacıyla kullanılmıştır. GCP'ler, görüntüler üzerinde manuel olarak işaretlenmiş; ardından kamera kalibrasyon parametreleri optimize edilerek modelin konumsal güvenilirliği sağlanmıştır. Yapılan doğruluk analizine göre, GCP'lerde ortalama konumsal hata X: 1.44 cm, Y: 1.31 cm, Z: 0.66 cm olup, toplam hata 2.06 cm olarak hesaplanmıştır. Kontrol amaçlı kullanılan noktalarda ise bu değerler X: 3.98 cm, Y: 3.79 cm, Z: 5.35 cm, XY: 5.49 olmak üzere, toplam hata 7.67 cm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, modelin kontrol noktalarının bulunduğu alanlarda yüksek doğruluğa sahip olduğunu; buna karşılık kontrol dışı bölgelerde ise topografyanın kısa mesafelerde değişen yükseklik ve eğim değerleri ile bazı yer kontrol noktalarının (özellikle GCP1 ve GCP5) modelin kenar bölgelerinde konumlanmasının neden olduğu perspektif bozulmalarına bağlı olarak hata payının arttığını göstermektedir. Elde edilen 3B model, kalenin mevcut durumunu yüksek doğrulukla belgelemekte; restorasyon planlaması, yapısal analiz, izleme çalışmaları, dijital arşivleme ve kültürel mirasın tanıtımı gibi çeşitli alanlarda değerlendirilebilecek niteliktedir. Model, 360° sanal tur uygulamalarına entegre edilebilecek formatlarda dışa aktarılabilmekte, aynı zamanda çatlak analizi, yüzey deformasyon takibi ve tarihi yapıların dijital rekonstrüksiyonu gibi ileri düzey çalışmalara da olanak sunmaktadır.

Bununla birlikte, modelleme yapılan bölgenin dik topografyası ve ilkbahar mevsiminde yoğun bitki örtüsüyle kaplı olması, bazı alanlarda görüntü kalitesini ve veri bütünlüğünü olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle, özellikle sık bitki örtüsüne sahip bölgelerde İHA fotogrametrisinin; yersel fotogrametri, yersel lazer tarama ve LiDAR sistemleri gibi tamamlayıcı yöntemlerle desteklenmesi, modelin genel olarak kalitesini artıracaktır.

Oluşturulan model, çeşitli formatlarda dışa aktarılabilir ve dijital platformlara entegre edilebilir durumdadır. Ancak yüksek detay seviyesi nedeniyle ortaya çıkan büyük dosya boyutu, çevrimiçi platformlara yükleme açısından teknik sınırlamalara yol açmıştır. Çalışma kapsamında, model farklı çevrimiçi platformlara yüklenmek istenmiş; ancak elde edilen yaklaşık 40 GB boyutundaki dosya, 250–500 MB arası yükleme sınırları bulunan bu platformlar tarafından kabul edilmemiştir. Buna rağmen model hem görsel hem de mekânsal doğruluğu ile çeşitli uygulamalar için değerlendirilebilir niteliktedir.

Çalışma kapsamında üretilen sayısal yükseklik modeli (DEM), Andoz Kalesi'nin bulunduğu alanın eğim, yükseklik ve genel arazi yapısını detaylı biçimde ortaya koymakta; topografik analizler için önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır. DEM verisi, aynı zamanda kalenin doğal savunma avantajlarının belirlenmesi, ulaşım ağlarıyla olan ilişkilerinin analiz edilmesi ve heyelan ya da erozyon gibi çevresel risklere karşı duyarlılık değerlendirmeleri için temel bir kaynak sağlamaktadır. Ayrıca DEM verisi, 3B modelin topografik doğruluğunu güçlendirerek, yapının içinde bulunduğu coğrafi bağlamın daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Bu yönüyle, restorasyon ve koruma çalışmalarının gelecekteki planlamalarında, yapının çevresel değişimlerden nasıl etkilendiğini izlemek açısından kritik bir referans veri seti olarak değerlendirilebilir.



Şekil 8. 3B model oluşturma adımları: a) Fotoğraf hizalanması, b) Dairesel uçuş rotasından alınan fotoğraflar ve bu fotoğrafların hizalanması, c) Nokta bulutu (point cloud) oluşturulması, d) Mesh (ağ yüzeyi) oluşturularak modelin yüzey detaylarının belirlenmesi, e) Sahanın oluşturulan 3B modeli, f) Sahanın ortofoto görüntüsü, g) Sahanın sayısal yükseklik modeli (DEM)



Şekil 9. Andoz kalesinin 3B modeli

3. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, Giresun ili Espiye ilçesinde yer alan Andoz Kalesi'nin üç boyutlu (3B) fotogrametrik modeli üretilmiş ve arkeolojik belgeleme süreçlerine dijital tabanlı bir katkı sağlanmıştır. GNSS destekli yer kontrol noktaları ve yüksek çözünürlüklü İHA görüntüleri kullanılarak oluşturulan model hem mekânsal doğruluk hem de görsel detay açısından tatmin edici sonuçlar vermiştir. Sahadan elde edilen 2242 adet fotoğraf, Agisoft Metashape Professional yazılımında işlenmiş; bu işlem sonucunda 2.00 cm/piksel ortofoto ve 5.46 cm/piksel çözünürlüklü DEM elde edilmiştir. Ayrıca, toplam 8 yer kontrol noktasının 4'ü referans (GCP), 4'ü doğrulama (check point) amacıyla kullanılmış ve bu noktalar temel alınarak hesaplanan ortalama RMS hatası 4.87 cm düzeyinde bulunmuştur. Bu değer, modelin yüksek konumsal doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

Andoz Kalesi'nin farklı açılardan modellenebilmesi amacıyla orbit ve grid tipi uçuşlar bir arada gerçekleştirilmiş ve bu sayede yapının yan yüzeylerine ait detaylar da başarıyla modellenmiştir. Elde edilen model, restorasyon, sanal tur ve kültürel miras yönetimi gibi çeşitli alanlara katkı sağlayabilecek niteliktedir. Bununla birlikte, çalışma alanının yoğun bitki örtüsü ve topografik farklılıklar içermesi nedeniyle, İHA fotogrametrisinin yersel lazer tarama veya LiDAR sistemleri gibi tamamlayıcı teknolojilerle desteklenmesi önerilmektedir. Elde edilen yüksek doğruluklu 3B model, Andoz Kalesi'nin mevcut durumunun belgelenmesi, arkeolojik envanterlerin dijital ortama aktarılması ve ileride yapılacak restorasyon uygulamaları için temel bir referans veri seti niteliği taşımaktadır.

Bu çalışma, Andoz Kalesi'nin inşa edildiği mevkinin mevcut durumunun el verdiği imkanlarla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kalenin tarihi sürecini aydınlatmak adına referans edilebilecek yoğunlukta değildir. Fakat arkeolojik alanlarda kullanılan klasik tekniklerin yanı sıra İHA fotogrametrisi, uzaktan algılama yöntemleri ya da coğrafi bilgi sistemleri gibi yeni teknolojik gelişmelerin de kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özetle bu çalışmanın sağladığı teknik veriler, Andoz Kalesi'nin Giresun kentinde yer alan tarihi savunma yapılarıyla olan ilişkisi, bu alana sağladığı katkı ve kendi döneminde hâkim olabildiği saha hakkında çıkarımlar yapmaya olanak tanımaktadır. Kalenin tarihi sürecine dair daha kapsamlı bilgiler elde edilebilmesi için arkeolojik bir kazı gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Yapının içinin dolgu toprak ve bitki örtüsüyle kaplı olması kalenin bünyesinde bulunan yapıların/mimari öğelerin tespit edilerek değerlendirilmesini imkânsız hale getirmektedir. Dolayısıyla Andoz Kalesi gibi, hakkında literatürün oldukça sığ bilgiler sunduğu ve yetersiz kaldığı sit alanlarının tarihi sürecinin aydınlatılmasında arkeolojik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle arkeolojik kazı çalışmaları ve fotogrametrik yöntemlerin multidisipliner çerçevede yürütülmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu şekilde multidisipliner bir çalışma yöntemiyle yürütülen arkeolojik çalışmalarda uzaktan algılama yöntemleri ve coğrafi bilgi sistemlerinin sağladığı teknik detaylar alanların daha net bir şekilde algılanmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yer kontrol noktalarının koordinatlarının ölçümünde sağladıkları teknik destek ve katkılarından dolayı 2809-909 Nolu Lisanslı Harita Kadastro Mühendislik Bürosu'na teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Aydın, İ., Oso, C., Yaşar, M., & Polat, N. (2023). Tarihi Kızılkoyun Nekropol alanında M54 no.lu kaya mezarının fotogrametri ile 3B modellemesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 5*(1), 36–42.

Aylar, F., Gürgöze, S., Zeybek, H. İ., Uzun, A., & Şen, H. (2024). Diş Kayalıkları'nın (İmranlı, Sivas) insansız hava aracı (İHA) kullanılarak 3 boyutlu modelinin oluşturulması. *Geomatik, 9*(1), 69–85. https://doi.org/10.29128/geomatik.1341633

Bekdemir, Ü., & Elmacı, S. (2008, 9–11 Ekim). *Giresun kentinin gelişimini etkileyen faktörler* [Bildiri sunumu]. Uluslararası Giresun ve Doğu Karadeniz Sosyal Bilimler Sempozyumu, Giresun, Türkiye.

Bryer, A., & Winfield, D. (1985). *The Byzantine monuments and topography of the Pontos*. Dumbarton Oaks Research Library and Collection.

Ceylani, M. U., & Yavuz, U. G. (2023). Fotoğrafik modelleme: Fotogrametri tekniği ile video oyunlarında nesne-sahne tasarımı. *EKEV Akademi Dergisi, 93*, 342–358. https://doi.org/10.17753/sosekev.1214540

Çelik, M. Ö., Yakar, İ., Hamal, S., Oğuz, G. M., & Kanun, E. (2020). Sfm tekniği ile oluşturulan 3B modellerin kültürel mirasın belgelenmesi çalışmalarında kullanılması: Gözne Kalesi örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi, 2*(1), 22–27.

Çipiloğlu Yıldız, Z., Türker, M., & Ak, R. (2021). Mimari miras eğitiminde artırılmış gerçeklik ve fotogrametri desteği. *Bilişim Teknolojileri Dergisi, 14*(2), 137–149. https://doi.org/10.17671/gazibtd.792539

Darkot, B. (1972). *Türkiye iktisadî coğrafyası*. İstanbul Matbaası.

Dellaert, F., Seitz, S. M., Thorpe, C. E., & Thrun, S. (2000, June 13–15). *Structure from motion without correspondence* [Conference presentation]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2000), Hilton Head, South Carolina. https://doi.org/10.1109/CVPR.2000.854916

Emecen, F. (2020). *Karadeniz kıyı kentleri tarihi*. Turkuaz Kitap.

Erbaş, N. F., Kabadayı, A., & Varlık, A. (2025). Tarihi eserlerin İHA fotogrametrisi yöntemi kullanılarak 3 boyutlu modellenmesi: Yozgat Garipler Köyü Kilisesi örneği. *Kültürel Miras Araştırmaları, 6*(1), 15–24.

Esposito, S., Fallavollita, P., Wahbeh, W., Nardinocchi, C., & Balsia, M. (2014, July 13–18). *Performance evaluation of UAV photogrammetric 3D reconstruction* [Symposium presentation]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, QC, Canada.

Fatsa, M. (2010). *XV ve XVI yüzyıllarda Giresun sosyal ve ekonomik hayat*. Bilge Ajans Matbaa.

Furukawa, Y., & Hernández, C. (2015). Multi-view stereo: A tutorial. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 9*(1–2), 1–148.

Gökbilgin, M. T. (1962). XVI. yüzyıl başlarında Trabzon Livası ve Doğu Karadeniz Bölgesi. *Belleten, 26*(102), 293–338.

Hamal, S. N. G., & Ulvi, A. (2022). 3B kent modelleri oluşturma sürecinde İHA fotogrametrisi ve CBS entegrasyonu: Mersin Üniversitesi Çiftlikköy Kampüsü örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 4*(2), 97–105.

İzci, V., Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2024). Yer kontrol nokta (YKN) sayısı ve dağılımının harita üretim hassasiyetine etkisinin araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 40*(2), 167–180.

Kabadayı, A. (2024). Mobil cihazların fotogrametri tabanlı 3B modellemedeki potansiyeli üzerine bir araştırma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 6*(2), 71–77. https://doi.org/10.53030/tufod.1593632

Karakaya, E. H., & Ulvi, A. (2024). İHA fotogrametrisi kullanarak tarihi alanların üç boyutlu belgelenmesi: Soli Pompeiopolis Antik Kenti örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 6*(2), 39–47.

Kaya, Y., Yiğit, A. Y., Ulvi, A., & Yakar, M. (2021). Arkeolojik alanların dokümantasyonunun yersel lazer tarama ve İHA teknikleri ile elde edilmesi: Konya Yunuslar örneği. *Harita Dergisi*, (165), 57–72.

Ksenophon. (2014). *Anabasis: Onbinlerin dönüşü* (S. Ceviz, Çev.). Parola Yayınları.

Orkan, Ö. (2017). İnsansız hava aracı (İHA) ile farklı yüksekliklerden üretilen sayısal yüzey modellerinin (SYM) doğruluk analizi. *Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi, 2*(1), 1–7.

Öcalan, T., Arıcan, D., Araei, R. M., Gül, C., & Tunalıoğlu, N. (2024). Accuracy analysis of 3D point clouds obtained from camera and LiDAR sensors of smartphones and tablets. *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39*(3), 1771–1781. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1138633

Özsoy, E. E., & Aksoy, T. (2021). Risk altındaki arkeolojik alanların belgelendirilmesinde fotogrametri ile uzaktan algılama entegrasyonu: İstanbul Kara Surları örneklemi. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies, 4*(2), 80–101. https://dergipark.org.tr/tr/pub/aist/issue/63581/1020153

Peterson, E., Klein, M., & Stewart, R. (2015). *Whitepaper on structure from motion (SfM) photogrammetry: Constructing three dimensional models from photography* (Rapor No. ST-2015-3835-1). U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Research and Development Office.

Pulat, F., Yakar, M., & Ulvi, A. (2022). Yersel fotogrametrik yöntem kullanılarak fotogrametrik yazılımların karşılaştırılması: Hüsrev Paşa Camii örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 4*(1), 30–40.

Romanoni, A., & Matteucci, M. (2019, October 27 – November 2). *TAPA-MVS: Textureless-aware PatchMatch multi-view stereo* [Conference presentation]. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, South Korea.

Sarıyıldız, B. (2025). *Orta Çağda Giresun*. Serander Yayınları.

Sevin, V. (1995). *Arkeolojik kazı sistemi el kitabı*. Arkeoloji ve Sanat Yayınları.

Şener, Y. S. (2012). Arkeolojik alanda *in situ* (yerinde) mozaik koruma yöntemleri. *Journal of Mosaic Research, 5*, 201–220.

Şenol, H. İ., Polat, N., Çokoğullu, S., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M., Oral, M., Karaçizmeli, M., & Marangoz, Ö. (2021). İHA fotogrametrisinin arkeolojik yüzey araştırmalarına katkılarının incelenmesi. *TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi, 28*, 175–186. https://doi.org/10.22520/tubaar.2021.28.009

Tercan, E. (2017). Karayolu projelerinde insansız hava aracı ile üretilen sayısal arazi modelinin değerlendirilmesi: Bucak–Kocaaliler yolu örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8*(2), 172–183.

Texier, C. (2002). *Küçük Asya: Coğrafyası, tarihi ve arkeolojisi III* (A. Suat, K. Y. Kopraman, & M. Yıldız, Çev.). Enformasyon ve Dokümantasyon Hizmetleri Vakfı.

Topan, H., Oruç, M., & Koçak, M. G. (2007, 2–6 Nisan). *Ortogörüntü üretiminde yer kontrol noktası seçimi ve sonuçlara etkisi* [Bildiri sunumu]. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.

Tozlu, S. (1985). Giresun şehrinin kara ve deniz ulaşımı. In A. Çelik (Ed.), *Yeşil Giresun Gazetesine Göre Cumhuriyetin İlk Yıllarında Giresun, Hasan Öğütçü Armağanı* (pp. 173–194). Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.

Ulvi, A., & Yiğit, A. Y. (2020). İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 2*(2), 46–54.

Uslu, A. (2022). Fotogrametri tekniği kullanılarak anıt ağaçların dijital belgelenmesi: Mızık Çamı Tabiat Anıtı örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 24*(1), 1–12. https://doi.org/10.24011/barofd.1002203

Uslu, A., & Uysal, M. (2020). Kültürel mirasın etkileşimli keşfi için mobil artırılmış gerçeklik ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerinin kullanılması: Sfenks Heykeli örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20*(6), 1024–1031. https://doi.org/10.35414/akufemubid.819267

Uslu, A., & Uysal, M. (2022). Kitle kaynaklı veriler kullanılarak anıt ağaçların 3 boyutlu modellenmesi: Boab hapishane ağacı örneği. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 8*(2), 98–103. https://doi.org/10.53516/ajfr.1204041

Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Silifke Aşağı Dünya Obruğunun İHA kullanılarak üç boyutlu modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17*(4), 94–101.

Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik, 3*(2), 129–136. https://doi.org/10.29128/geomatik.369553

Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi eserlerin 3B modellenmesi ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8*(2), 1032–1043. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1011064

Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12*(4), 1372–1384. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1313019

Yuka, A. (2023). *Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesi Sahil Kaleleri* [Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Yuka, A. (2024). Giresun Espiye'de bir Orta Çağ savunma yapısı; Andoz Kalesi. *Milli Kültür Araştırmaları Dergisi, 8*(2), 158–177.

Zachariadou, E. A., & Çev. Keçiş, M. (2007). Trabzon ve Türkler (1352-1402). *OTAM Ankara Üniversitesi Osmanlı Tarihi Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, *22*, 221-241. https://doi.org/10.1501/OTAM_0000000185

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 213–229
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Yusufeli Barajı Su Tutma Sonrası Arazi Örtüsü Değişimlerinin Google Earth Engine ile Analizi

Analysis of Land Cover Changes after the Water Retention of Yusufeli Dam by Google Earth Engine

Ekrem Saralıoğlu[1]*, Baker Alahmed[1]

[1]*Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 08100, Artvin/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Ekrem Saralıoğlu
ekremsaralioglu@artvin.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1660237

Yayın süreci
Geliş tarihi: 18.03.2025
Kabul tarihi: 18.05.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin en yüksek barajı olan Yusufeli Barajı'nın tamamlanması ve su tutulmaya başlanması sonrasında meydana gelen arazi örtüsü değişimlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, uzaktan algılama teknikleri ve Google Earth Engine (GEE) platformu kullanılarak gerçekleştirmiştir. GEE, büyük ölçekli uydu görüntülerinin işlenmesi ve analiz edilmesi için güçlü bir araç olup, bu çalışmada arazi örtüsü değişimlerini hızlı ve etkili bir şekilde tespit etmek için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, en fazla %1 bulutluluğa sahip 2020 ve 2024 yılına ait Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Çalışmada Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi (Normalized Difference Water Index (NDWI)) ile değişim analizi, her iki görüntünün Destek Vektör Makineleri (DVM) ile sınıflandırılması, arazi kullanım sınıfları üzerinden analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 2020 ve 2024 yıllarına ait Sentinel-2 görüntülerinin DVM ile sınıflandırılması sırasıyla %93.74 ve %92.36 genel doğruluk ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan değişim analizleri sonucunda 2020-2024 yılları arasında Çoruh Nehri'nin yüzey alanında 2632.11 ha'lık artış ve su altında kalan en büyük alanları orman toprağı, kayalık ve taşlık alanlar ile iskân alanlarının oluşturduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Uzaktan algılama, Değişim analizi, Google Earth Engine, Yusufeli*

Abstract

This study aims to investigate the land cover changes in Yusufeli district of Artvin province, which is one of the richest regions in terms of biodiversity in Turkey and also contains Turkey's only biosphere reserve area, after the completion of the Yusufeli Dam and the start of water retention. The research was carried out using remote sensing techniques and Google Earth Engine (GEE) platform. GEE is a powerful tool for processing and analyzing large-scale satellite imagery and was used in this study to quickly and effectively detect land cover changes. Within the scope of the study, Sentinel-2 images of 2020 and 2024 with maximum 1% cloudiness were used. In the study, change analysis with Normalized Difference Water Index (NDWI), classification of both images with Support Vector Machines (SVM), and analysis studies on land use classes were carried out. Classification of Sentinel-2 images of 2020 and 2024 with SVM was performed with an overall accuracy of 93.74% and 92.36%, respectively. As a result of the change analyses, it was determined that the surface area of the Çoruh River increased by 2632.11 ha between 2020 and 2024, and the largest inundated areas were forest land, rocky and stony areas and settlement areas.

Keywords: *Remote sensing, Change detection, Google Earth Engine, Yusufeli*

1. Giriş

Artvin, biyolojik çeşitlilik açısından zengin bir bölgedir. Türkiye'nin en yüksek, çift eğrilikli beton kemer baraj tipinde ise dünyanın üçüncü yüksek barajı olma özelliğini sağlayan Yusufeli Barajı, baraj inşaatının tamamlanması ve su tutmaya başlaması sonucunda Çoruh Vadisi'nde belirli alanlar su altında kalmıştır (Turan & Bayrakdar, 2020). Bu durum arazi örtüsü değişimine sebep olmuştur. Arazi örtüsü değişimlerinin tespiti, bölge ile ilgili iklim, orman, çevre, sosyal donatılar gibi çok çeşitli alanlarda meydana gelebilecek değişikliklerin takibinde önemli bir veri kaynağı olmaktadır.

Arazi kullanımı ve arazi örtüsü (AK/AÖ), yeryüzündeki doğal kaynakların ve insan faaliyetlerinin mekânsal dağılımını ifade eder ve çevresel değişimlerin anlaşılması, sürdürülebilir kaynak yönetimi ve bölgesel planlama için temel bir altlık oluşturur. Zaman içindeki AK/AÖ değişimlerinin izlenmesi, özellikle büyük ölçekli mühendislik projeleri gibi insan kaynaklı etkilerin çevresel sonuçlarını değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu değişimlerin tespiti ve analizi için uzaktan algılama (UA) teknolojileri, sunduğu geniş alan kapsama, tekrarlı veri toplama yeteneği ve maliyet etkinliği sayesinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Özellikle uydu platformları aracılığıyla elde edilen UA verileri, AK/AÖ haritalarının üretilmesi ve zamansal değişimlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uydu tabanlı UA'da, Landsat, Sentinel ve MODIS gibi çeşitli platformlardan elde edilen multispektral görüntüler, AK/AÖ çalışmalarında sıklıkla başvurulan veri kaynaklarıdır (Phiri vd., 2020). Bu görüntülerden anlamlı bilgiler çıkarmak için çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Görüntü sınıflandırma, bu yöntemlerin başında gelmektedir. Sınıflandırma yaklaşımları temel olarak kontrollü (supervised) ve kontrolsüz (unsupervised) olmak üzere ikiye ayrılır. Kontrollü sınıflandırmada, eğitim verileri kullanılarak algoritmalar eğitilirken, kontrolsüz sınıflandırma eğitim işlemi olmadan gerçekleştirilir. Sınıflandırma sürecinde literatürde; Maksimum Olabilirlik sınıflandırıcısı, k-ortalamalar, spektral açı eşleştirici ve Mahalanobis Mesafe sınıflandırması gibi geleneksel yöntemler mevcuttur. Bunun yanında DVM, Rastgele Orman ve K-en yakın komşu gibi daha yeni olan makine öğrenme yöntemlerinin genel olarak diğer sınıflandırıcılardan daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur (Khatami vd., 2016). Son yıllarda bu yöntemlerin yanında, makine öğrenimi tekniklerinin bir alt kümesi olan derin öğrenme algoritmaları sağladıkları yüksek doğruluk ve genelleştirme yetenekleri ile pek çok alanda olduğu gibi AÖ sınıflandırmada da önemli bir popülerlik kazanmıştır (Akar vd., 2024; Saralioglu & Gungor, 2020; Zhao vd., 2023; Vali vd., 2020; Sefrin vd., 2020).

DL yöntemleri, uzaktan algılanmış verilerin sınıflandırmasında önemli potansiyel sunmakla birlikte genellikle çok fazla miktarda etiketli eğitim verisi ihtiyacı ve yüksek hesaplama kaynakları gerektirir. Bu nedenle bu çalışmada AÖ sınıflandırma aşamasında veri seti boyutu ve hesaplama verimliliği göz önünde bulundurularak, sınırlı eğitim verisiyle dahi etkin genelleme yapabilen ve göreceli olarak daha az hesaplama yükü getiren DVM algoritması tercih edilmiştir. DVM, uzaktan algılamada en çok tercih edilen sınıflandırma yöntemlerinden biridir (Maulik & Chakraborty, 2017). DVM, özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde ve sınıflar arasında karmaşık ilişkilerin olduğu durumlarda başarılı sonuçlar veren güçlü bir kontrollü sınıflandırma algoritmasıdır (Kavzoglu & Colkesen, 2009; Mountrakis vd., 2011; Melgani & Bruzzone, 2004). Literatürde DVM'nin AK/AÖ sınıflandırmasındaki etkinliğini gösteren çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Saralioglu & Vatandaslar, 2022; Yousefi vd., 2022; Srivastava vd., 2012; Loukika vd., 2021; Kadavi & Lee, 2018).

Arazi örtüsü sınıflarının belirlenmesinde sınıflandırma algoritmalarının yanı sıra, belirli yüzey tiplerini vurgulamak veya ayırt etmek amacıyla spektral indekslerden de yaygın olarak faydalanılmaktadır. Bu indeksler, uydu görüntülerinin farklı spektral bantları arasındaki matematiksel oranlara dayanır ve belirli bir özelliğin (örneğin su, bitki örtüsü, toprak) varlığını ve yoğunluğunu ortaya çıkarmada etkilidir. Bu bağlamda, özellikle su alanlarının tespiti için geliştirilen NDWI indeksi önemli bir araçtır (McFeeters, 1996). NDWI, genellikle yeşil (Green) ve yakın kızılötesi (Near-Infrared- NIR) bantlardaki yansıma değerlerini kullanarak hesaplanır. Su kütlelerinin NIR bandında güçlü soğurma, yeşil bantta ise nispeten daha yüksek yansıtma göstermesi prensibine dayanır. Bu özellik, NDWI değerlerinin su alanlarında yüksek pozitif değerler almasını sağlarken, bitki örtüsü ve toprak gibi diğer yüzeylerde daha düşük veya negatif değerler almasına neden olur. Bu sayede NDWI, su yüzeylerinin diğer arazi örtüsü tiplerinden, özellikle de bitki örtüsünden net bir şekilde ayırt edilmesini kolaylaştırır. Hesaplama basitliği ve etkinliği nedeniyle, nehirler, göller gibi su kütlelerinin alansal değişimlerinin izlenmesi, kıyı çizgisi tespiti ve su kalitesi ile ilgili çalışmalarda sıklıkla başvurulan bir yöntemdir (Özelkan, 2020; Guha vd., 2020; Eid vd., 2020). Bu çalışmada da özellikle Yusufeli Barajı'nın su tutması sonrası Çoruh Nehri'nin yüzey alanındaki değişimi kantitatif olarak belirlemek amacıyla NDWI analizinden yararlanılmıştır.

Çevresel sorunların küresel ölçekte analiz edilmesi amacıyla GEE kullanımı günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. Google tarafından 2010 yılında kullanıma sunulan GEE bir bulut bilişim platformudur (Amani vd., 2020). GEE, bulut tabanlı hesaplamaya olanak tanır ve küresel ölçekteki büyük coğrafi verilerin analiz edilmesi amacıyla kullanılan etkili bir araçtır. Coğrafi büyük verilerin işlenmesi için kullanılabilecek diğer bulut platformları arasında Amazon Web Services (AWS), ve Microsoft Azure bulunmaktadır (Tamiminia vd., 2020). Diğer bulut platformlarıyla karşılaştırıldığında GEE, daha fazla türde coğrafi veriyi desteklemekte ve tüm kullanıcılara yönelik ücretsiz plan desteği sunması gibi çeşitli avantajlara sahiptir. GEE; Landsat, Sentinel ve MODIS uydularından elde edilen verilerin yanı sıra iklim modelleri, sıcaklık ve jeofiziksel özelliklere ilişkin verileri de içermektedir (Liang vd., 2018). Uzun zaman serilerine sahip Dünya gözlem kayıtlarını barındırması sayesinde çevresel izleme faaliyetlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Zhao vd., 2021).

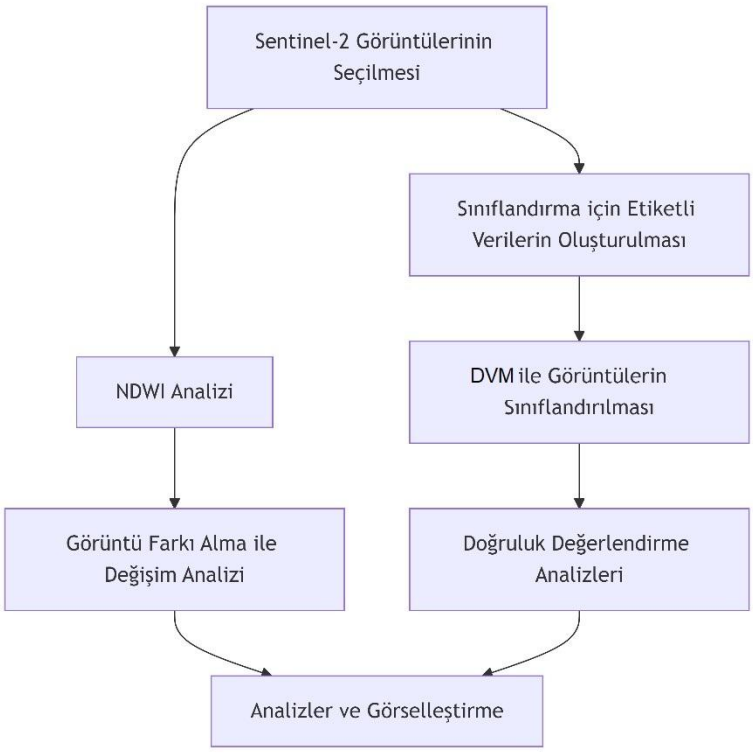
Uzaktan algılama alanında GEE, tarımsal üretkenlik (He vd., 2018), bitki örtüsü izleme (Tsai vd., 2018), otlak alanların izlenmesi (Parente vd., 2018), arazi kullanımı ve arazi örtüsü (Aghlmand vd., 2021; Danacıoğlu & Öngül, 2023; Zhao vd., 2024; Pande vd., 2024), risk ve afet yönetimi (Halder & Bose, 2024), ısı adaları (Khalil & Kumar, 2025), orman yangınları (Yilgan vd., 2024), batimetri (Guan vd., 2025), madencilik (Zhang vd., 2025) gibi birçok alanda uzaktan algılama için güçlü bir araç haline gelmiştir. Bu çok yönlü uygulamalar, GEE platformunun büyük veri kümelerini yönetme ve bilimsel araştırmaların gelişimine katkıda bulunma potansiyelini göstermektedir (Mutanga vd., 2019).

Son yıllarda birçok araştırmacı, GEE'nin potansiyel uygulamaları üzerinde çalışmalar yapıştır. Velastegui-Montoya vd., (2023), platformun başlangıcından itibaren yayınlanan literatürü inceleyerek platformun kullanım alanlarını, eğilimlerini ve potansiyelini ortaya koymuştur. Tamiminia vd. (2020), coğrafi büyük veri uygulamalarında GEE kullanımına ilişkin sistematik bir inceleme gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde Zhao vd. (2021), Web of Science (WoS) Science Citation Index Expanded (SCIE) ve Social Citation Index (SSCI) veri tabanlarından elde edilen makaleleri kullanarak Google Earth ve GEE platformlarının bilimsel üretim gelişimini incelemiştir.

Artvin ili, zengin biyolojik çeşitliliği ve Türkiye'nin tek biyosfer rezerv alanını barındırmasıyla ekolojik açıdan önemli bir bölgedir. Bölgede inşa edilen Yusufeli Barajı, Türkiye'nin en yüksek, dünyanın ise kendi sınıfında üçüncü yüksek barajı olmasıyla dikkat çekerken, su tutmaya başlamasıyla birlikte Çoruh Vadisi'nde geniş alanların sular altında kalmasına ve dolayısıyla önemli AK/AÖ değişimlerine neden olmuştur (Turan & Bayrakdar, 2020). Bu değişimler, bölgenin ekolojisi, iklimi, tarımsal faaliyetleri ve sosyo-ekonomik yapısı üzerinde derin etkiler oluşturma potansiyeline sahiptir. Yusufeli ve çevresinde daha önce farklı disiplinlerde çalışmalar yapılmış olsa da (Koday & Erhan, 2010; Özalp vd., 2012; Tüfekçioğlu & Yavuz, 2016; Torun, 2021; Polat, 2023), güncel durumda barajın su tutması sonrasında meydana gelen güncel AK/AÖ değişimlerini UA teknikleri ve bulut bilişim platformları kullanarak detaylı bir şekilde analiz eden bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışma bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Çalışmanın temel amacı, Yusufeli Barajı'nın su tutması sonrası Yusufeli ilçesinde meydana gelen AK/AÖ değişimlerini, Sentinel-2 uydu görüntülerini ve GEE platformunu kullanarak DVM sınıflandırma algoritması ve NDWI indeksi ile analiz etmektir. Bu çalışmanın önemi, Türkiye'nin en büyük baraj projelerinden birinin neden olduğu çevresel değişimi güncel veriler ve ileri analiz teknikleriyle belgeleyerek bölgesel planlama ve çevresel yönetim için kritik bilgiler sunmasında yatmaktadır. Çalışmanın yenilikçi yönü ise, bu büyük ölçekli değişimin analizinde GEE platformu üzerinden oluşturulan metodoloji ile hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmesidir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Sentinel-2 uydu görüntülerinin GEE platformunda işlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla Yusufeli barajı inşaatı ile su tutma sonrası sular altında kalan alanların tespiti ve arazi örtüsü değişimlerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, çalışma alanını kapsayan ve bulut oranı %1 i geçmeyecek şekilde 2020 ve 2024 yıllarında 2 adet Sentinel-2 görüntüleri seçilmiştir. Ardından, su değişiminin tespiti için NDWI analizi yapılmıştır. Arazi örtüsü değişimlerini incelemek amacıyla ilk olarak sınıflandırma işlemi için etiketli veri setleri hazırlanmış ve DVM algoritması kullanılarak görüntüler sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonuçlarının doğruluğu, hata matrisleri ve diğer performans metrikleri (doğruluk, kesinlik, hatırlama ve F1 skoru) ile değerlendirilmiştir. Son olarak değişim analizi yapılmış ve NDWI sonuçları ile sınıflandırma verileri kullanılarak su alanlarındaki ve arazi örtüsündeki değişimler tespit edilmiştir. Toprak verisindeki Arazi Kullanım Kabiliyet (AKK) katmanı su altında kalan alanlar ile çakıştırılarak su altında kalan alanların özellikleri tespit edilmiştir. Son olarak, yapılan analizler haritalar ve tablolar ile görselleştirilmiş, mekânsal ve zamansal değişimlerin etkileri detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Bu metodoloji, Sentinel-2 görüntülerinin GEE platformu ile etkin bir şekilde işlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla arazi örtüsü değişimlerinin tespiti ve sınıflandırılması için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Metodoloji

2.1 Çalışma Bölgesi ve Veri Ön İşlemleri

Yusufeli, coğrafi konumu itibarıyla Doğu Karadeniz Bölümü ile Doğu Anadolu Bölgesi arasında bir geçiş sahası niteliği taşımakta olup, bu özelliği nedeniyle her iki bölgenin fiziki coğrafya, iklim, bitki örtüsü ve kültürel yapı gibi çeşitli karakteristik unsurlarını bünyesinde barındırmaktadır. Bu bağlamda Yusufeli, farklı coğrafi bölgelerin kesişim noktasında yer almasının sağladığı avantajla, doğal çevre özellikleri açısından özgün ve karmaşık bir yapı sergilemekte; söz konusu durum, bölgenin ekolojik çeşitliliği, peyzaj özellikleri ve sosyo-kültürel dokusu üzerinde belirgin etkiler oluşturmaktadır. Çalışma alanı Şekil 2'de gösterilmektedir.

Bu çalışma Sentinel-2 görüntüleri işlenerek gerçekleştirilmiştir. Avrupa Uzay Ajansı'na (ESA) bağlı olarak yürütülen Copernicus Programı kapsamında, ilk Sentinel uydusu olan Sentinel-1A, 2014 yılında yörüngeye yerleştirilmiştir. Günümüze kadar Copernicus Programı çerçevesinde Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 ve Sentinel-5 gibi çeşitli uydu görevleri gerçekleştirilmiştir. Bu görevler arasında özellikle Sentinel-2 uydularının fırlatılması, programın önemli mihenk taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Sentinel-2 misyonu, Sentinel-2A ve Sentinel-2B isimli iki eş uydudan oluşan bir takımyıldız şeklinde yapılandırılmıştır. Sentinel-2A uydusu 23 Haziran 2015 tarihinde fırlatılmış olup, ilk görüntü verileri fırlatmadan birkaç gün sonra elde edilmiştir (Immitzer vd., 2016). Sentinel-2B ise 7 Mart 2017 tarihinde yörüngeye yerleştirilmiştir. Sentinel-2 uyduları, 13 farklı spektral bantta veri toplama kapasitesine sahip Çok Bantlı Görüntüleme Cihazları (Multispectral Instrument - MSI) taşımaktadır (Phiri vd., 2020). Verilerine ücretsiz olarak erişilebilen Sentinel-2 uyduları, yeryüzü gözlemleri ve çevresel izleme çalışmalarında önemli katkılar sağlamaktadır.

Sentinel-2 uydularının sunduğu çok bantlı spektral veriler ve yüksek zamansal çözünürlük, arazi örtüsü değişimlerinin tespiti ve analizi için ideal bir altyapı sağlamaktadır. Bu kapsamda bu çalışmada Sentinel-2 verileri kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanı: Yusufeli İlçesi

Çalışma alanı olarak belirlenen Artvin ili Yusufeli ilçesine ait idari sınırların poligon verisi GEE platformuna aktarılmıştır. GEE platformu üzerinden 2020-06-01 ile 2020-10-01 ve 2024-06-01 ile 2024-10-01 tarih aralıklarında bulutluluk oranı en fazla %1 olacak şekilde iki adet Sentinel-2 görüntüsü filtrelenmiş ve çalışma alanı sınırlarına göre kesilmiştir. Kullanılan Sentinel-2 görüntüleri, COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED (Sentinel-2 Surface Reflectance) veri setine ait olup, bu veriler Sen2Cor algoritması ile atmosferik düzeltme işleminden geçirilmiş yüzey yansıma değerlerini içermektedir.

2.2 Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi

2020 ve 2024 Sentinel-2 görüntülerine ayrı arı NDWI analizi yapılmıştır. Su alanlarının tespiti ve değişim analizinde, özellikle kayıp su alanlarının hesaplanmasında NDWI değerleri kritik bir rol oynamaktadır. NDWI, su alanlarının belirlenmesi amacıyla kullanılan spektral bir indeks olup, bu indeks için üç farklı sınır değer tanımlanmıştır. Sıfırdan küçük değerler, su içermeyen alanları temsil ederken, 0 ile 0,2 arasındaki değerler sığ su alanlarını, 0,2'den büyük değerler ise su içeren alanları karakterize etmektedir (Akçın & Köse, 2023). Bu sınıflandırma, su kaynaklarının izlenmesi ve yönetimi açısından önemli bir veri sağlamaktadır. Normalleştirilmiş fark su indeksi oranı aşağıda Eşitlik 1'de verilmiştir (McFeeters, 1996).

$$NDWI = (YEŞİL- NIR) / (YEŞİL+ NIR) \quad (1)$$

2.3 Değişim Analizi

Bu çalışmada, görüntü farkı alma tekniği kullanılarak değişim analizi yapılmıştır. İlk olarak 2020 ve 2024 yılı Sentinel-2 görüntülerine ayrı ayrı NDWI analizi uygulanmıştır. Görüntü farkı alma, iki farklı zaman periyodundan görüntü verilerinin karşılıklı piksellerinin çıkarılması ile gerçekleştirilmektedir. Özellikle, her iki görüntüdeki (x, y) koordinatlarındaki karşılık gelen pikseller için, daha önceki görüntünün (I1) dijital değerleri daha sonraki görüntüden (I2) çıkarılır. Bu süreç matematiksel olarak aşağıdaki denklemle gösterilir:

$$\mathrm{Id}(x, y) = \mathrm{I2}(x, y) - \mathrm{I1}(x, y) \quad (2)$$

Burada:

I1, t1 (2020) zamanında NDWI analizine sahip Sentinel-2 görüntüsünü temsil eder.
I2, t2 (2024) zamanında NDWI analizine sahip Sentinel-2 görüntüsünü temsil eder.
(x, y) bir pikselin mekânsal koordinatlarını belirtir.
Id, iki zaman periyodu arasındaki değişiklikleri vurgulayan ortaya çıkan fark görüntüsünü temsil eder.

2.4 Destek Vektör Makineleri ile Sınıflandırma

Görüntü sınıflandırma işlemlerinde DVM yöntemi kullanılmıştır. DVM, uzaktan algılama alanında sıklıkla tercih edilen sınıflandırma algoritmalarından biridir (Saralioglu & Vatandaslar, 2022; Yousefi vd., 2022; Fragou vd., 2020). Başlangıçta iki sınıflı veri kümelerinin sınıflandırılması amacıyla geliştirilen bu yöntem, daha sonra çok sınıflı ve doğrusal olmayan veri kümelerinin sınıflandırılmasına yönelik olarak genişletilmiştir. DVM algoritmasının temel prensibi, sınıfları birbirinden en iyi şekilde ayıran optimal hiperdüzlemin belirlenmesine dayanmaktadır. Algoritma, eğitim verileri üzerinde gerçekleştirilen çok sayıda iterasyon aracılığıyla, sınıflar arasındaki ayrımı en üst düzeye çıkaran hiperdüzlem sınırlarını belirlemeye çalışmaktadır. Oluşturulan modeller, daha sonra bağımsız değerlendirme verileri kullanılarak test edilmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olarak ayrılamayan sınıfların etkin biçimde sınıflandırılabilmesi ve model karmaşıklığını kontrol eden parametre sayısının az olması nedeniyle, çekirdek fonksiyonu olarak Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function - RBF) tercih edilmiştir. Bu kapsamda, Sentinel-2 uydusuna ait 2020 ve 2024 yıllarına ilişkin görüntüler, GEE platformu üzerinde DVM yöntemi kullanılarak sınıflandırılmıştır.

Sınıflandırma için GEE platformunda sınıflandırmada kullanılacak arazi örtüsü sınıfları için (Su, Orman, Yeşil Alan, Toprak, Kentsel Alan, Gölge, Kar, Toprak_2, Toprak_3, Kentsel Alan_2) eğitim ve doğruluk değerlendirmede kullanılmak üzere 46623 piksel etiketli veri hazırlanmıştır. Verilerin dağılımı Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Sınıflandırma için etiketli veri seti

Sınıf Rengi	Sınıf Adı	Piksel Sayısı
	Su	7854
	Orman	5017
	Yeşil Alan	7455
	Toprak	4676
	Kentsel Alan	252
	Gölge	444
	Kar	2313
	Toprak_2	13590
	Toprak_3	4763
	Kentsel Alan_2	259

2.5. Doğruluk Değerlendirme

Üretilen arazi örtüsü sınıflandırma haritalarının doğruluğunu ve güvenilirliğini kantitatif olarak değerlendirmek amacıyla, uzaktan algılama literatüründe yaygın olarak kabul gören çeşitli performans metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, sınıflandırma sonuçlarının referans (doğrulama) verileriyle karşılaştırılması sonucu oluşturulan hata matrisine (confusion matrix) dayanmaktadır. Hata matrisi, her bir sınıf için Doğru Pozitif (DP) (True Positive: doğru olarak sınıflandırılan pikseller), Doğru Negatif (DN) (True Negative: İlgili sınıfa ait olmayan ve doğru olarak sınıflandırılmayan pikseller), Yanlış Pozitif (False Positive: İlgili sınıfa ait olmadığı halde o sınıfa atanmış pikseller) ve Yanlış Negatif (YN) (False Negative: İlgili sınıfa ait olduğu halde başka bir sınıfa atanmış pikseller) değerlerini içerir. Bu çalışmada kullanılan temel doğruluk metrikleri şunlardır:

Genel Doğruluk (Overall Accuracy): Tüm sınıflar için doğru sınıflandırılan toplam piksel sayısının (hata matrisinin köşegenindeki değerler toplamı) toplam piksel sayısına oranıdır. Sınıflandırmanın genel performansını özetler.

$$Genel\ Doğruluk = (DP + DN)/(DP + DN + FP + FN) \quad (3)$$

Kesinlik (Precision): Belirli bir sınıfa atanan piksellerden kaçının gerçekten o sınıfa ait olduğunu gösterir. Yüksek kesinlik, modelin o sınıfı tahmin ettiğinde ne kadar isabetli olduğunu belirtir.

$$Kesinlik = DP/(DP + FP) \tag{4}$$

Duyarlılık (Recall): Belirli bir sınıfa ait olan piksellerden kaçının model tarafından doğru bir şekilde o sınıfa atandığını gösterir. Yüksek duyarlılık, modelin ilgili sınıfı ne kadar iyi tespit edebildiğini belirtir.

$$Duyarlılık = DP/(DP + FN) \tag{5}$$

F1 Skoru: Kesinlik ve Duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasıdır. Bu iki metrik arasında bir denge kurar ve özellikle sınıf dağılımlarının dengesiz olduğu durumlarda kullanışlıdır.

$$F1\ Skoru: 2 \times (Kesinlik \times Duyarlılık)/(Kesinlik + Duyarlılık) \tag{6}$$

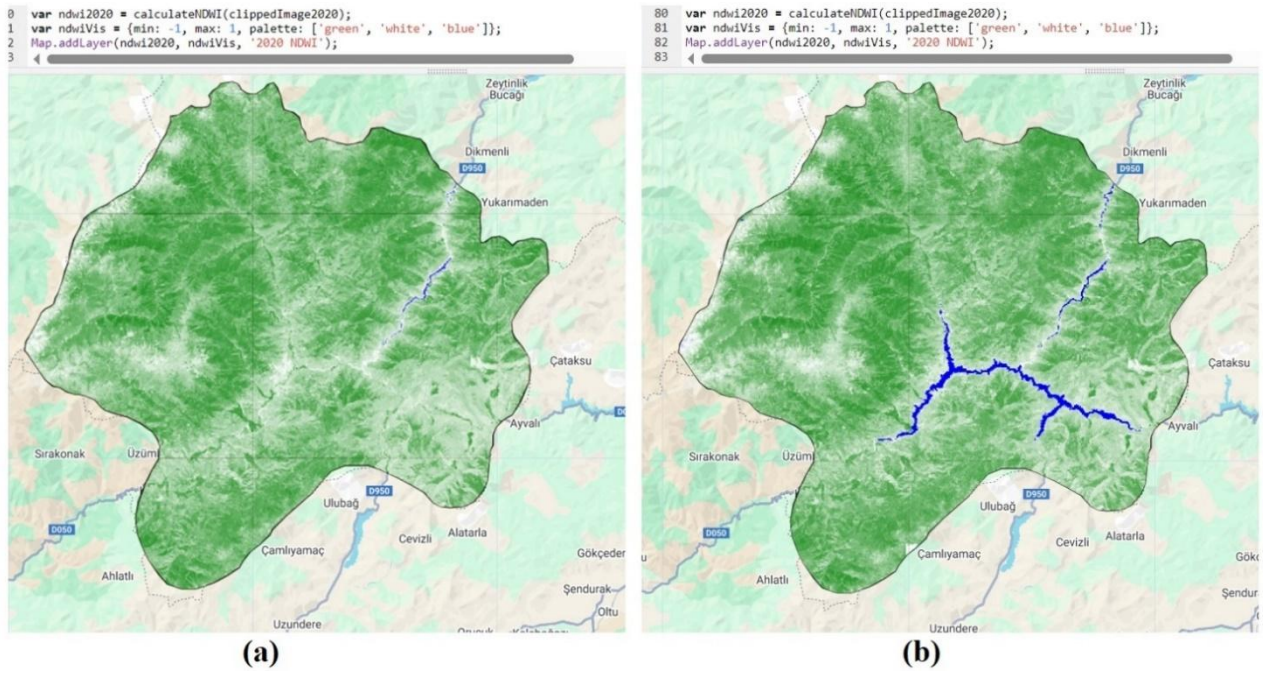
Kappa Katsayısı (κ): Sınıflandırma doğruluğunun, rastgele sınıflandırma ile elde edilecek doğruluğa göre ne kadar daha iyi olduğunu ölçer.

$$\kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \tag{7}$$

Burada Po gözlenen doğruluğu (Genel Doğruluk) ve Pe ise beklenen doğruluğu temsil eder. Bu değerler hata matrisinden hesaplanır.

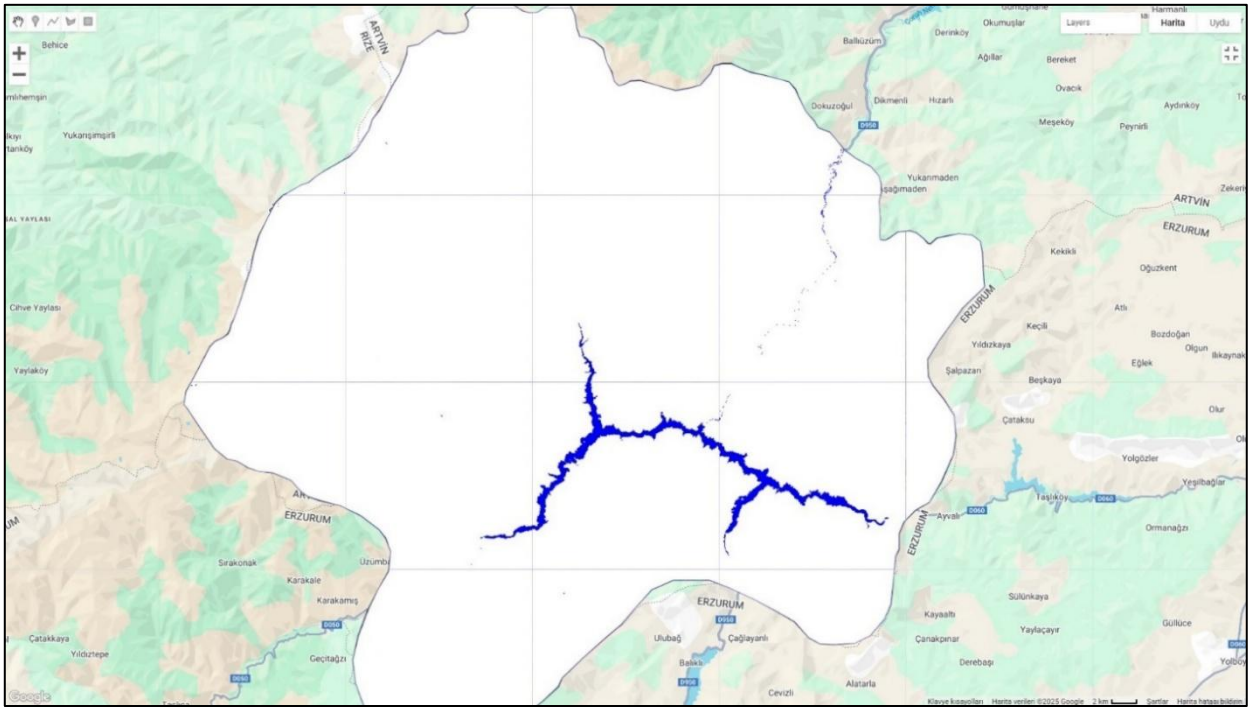
3. Bulgular ve İrdeleme

NDWI analizi sonrası Şekil 3'de görüldüğü gibi bu projede kullanılan renk paleti, farklı yüzey tiplerini temsil etmektedir. Mavi renk, yüksek NDWI değerlerine sahip bölgeleri gösterir ve genellikle su kütlelerini (göller, nehirler, barajlar) ifade eder. NDWI değeri 1'e yakın olan alanlar mavi renkte görülmektedir. Beyaz renk, NDWI değeri yaklaşık 0 civarında olan geçiş bölgelerini temsil eder. Yeşil renk ise düşük NDWI değerlerine sahip kara alanlarını ifade eder. NDWI değeri -1'e yakın olan bölgeler yeşil renkte gösterilir ve genellikle bitki örtüsü alanlarını, tarım arazilerini veya kurak zeminleri temsil eder. Özetle, mavi renk su alanlarını (0.5 - 1 aralığı), beyaz renk geçiş bölgelerini (yaklaşık 0 civarı) ve yeşil renk ise kara alanlarını (-1 ile 0 arası) göstermektedir. Şekil 3'de 2024 yılı Çoruh nehrinde meydana gelen yüzey alanı artışı belli olmaktadır.



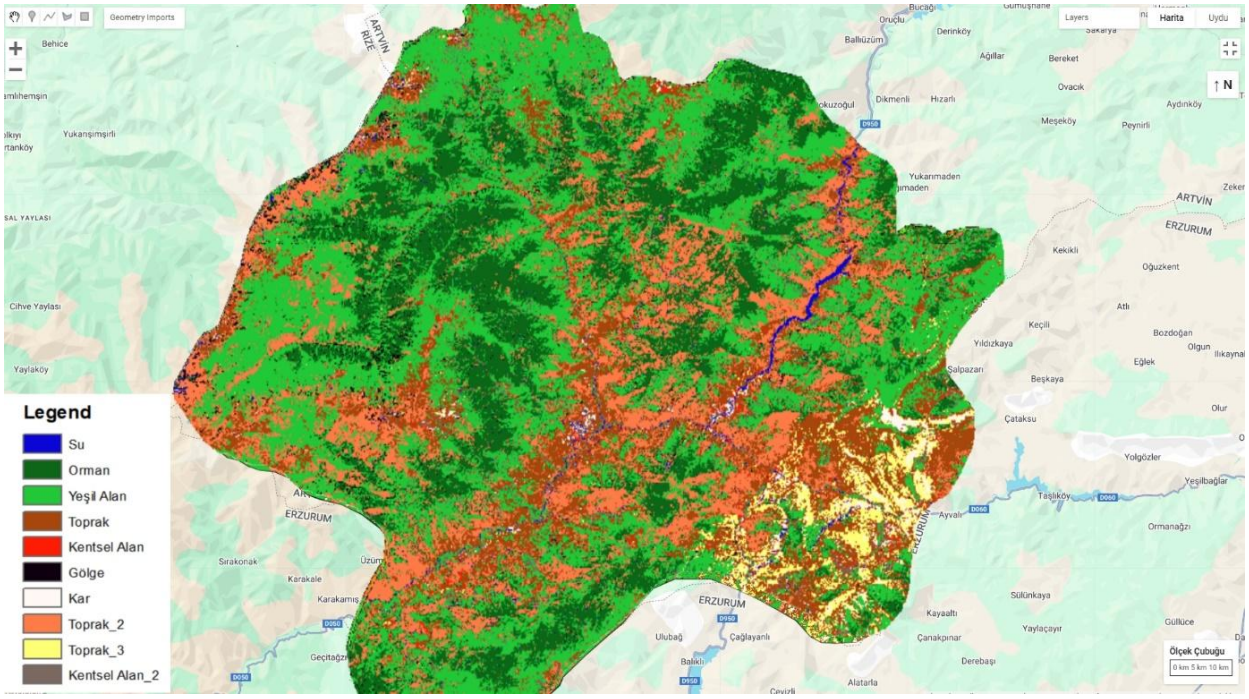
Şekil 3. a) 2020 Sentinel-2 görüntüsü NDWI analizi, b) 2024 Sentinel-2 görüntüsü NDWI analizi

Çoruh Nehri değişimini tespit edebilmek amacıyla NDWI görüntülerine 0.3 eşik değer uygulanmıştır. Çoruh Nehri değişimi Şekil 4'deki gibidir.

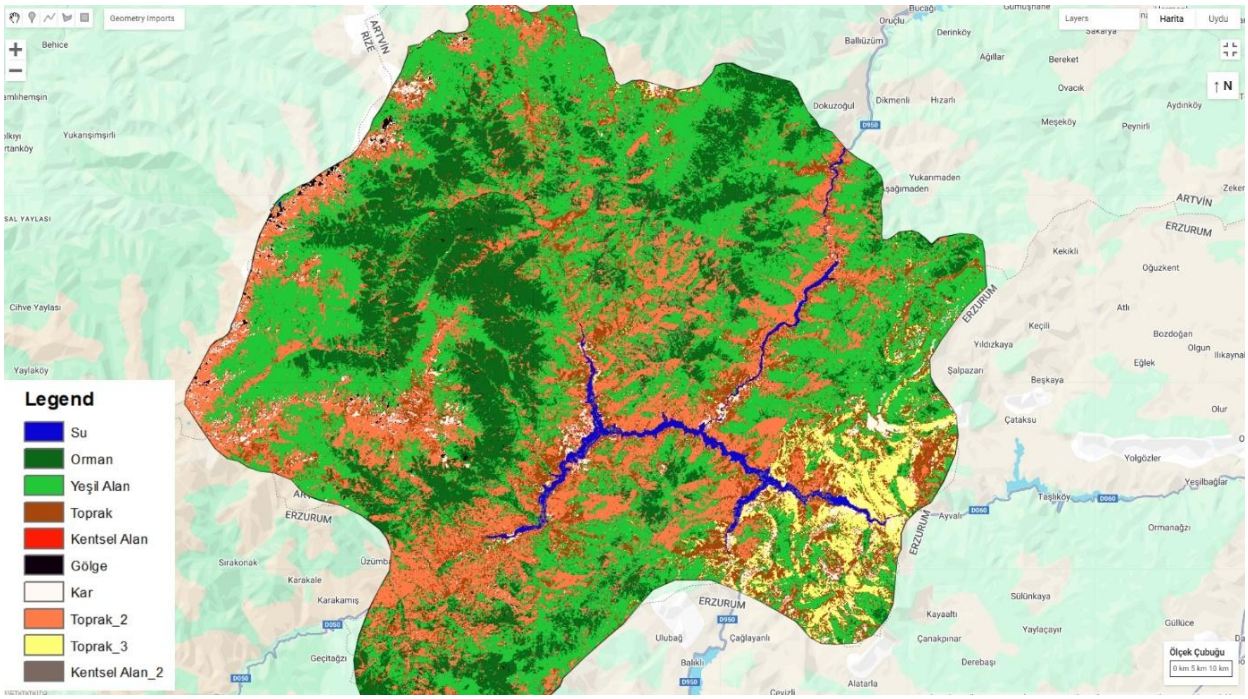


Şekil 4. NDWI değişim analizi (2024-2020)

Sınıflandırma aşamasında etiketli eğitim verisi %80'i eğitim aşamasında ve %20'si doğruluk değerlendirme aşamasında kullanılmak üzere bölünmüştür. Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla 2020 ve 2024 yılı Sentinel-2 görüntülerine ait sınıflandırma sonrası üretilen görüntüler gösterilmektedir.



Şekil 5. DVM ile Sentinel-2 2020 yılı görüntüsünün sınıflandırılması



Şekil 6. DVM ile Sentinel-2 2024 yılı görüntüsünün sınıflandırılması

Her iki yıla ait görüntüler üzerinde yapılan sınıflandırma doğrulukları Tablo 2 ve Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 2. 2024 Yılı Sentinel-2 görüntüsü DVM ile sınıflandırma doğruluk değerlendirmeleri

Sınıf	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Score
Su	0.98	0.97	0.98
Orman	0.84	0.98	0.90
Yeşil Alan	0.93	0.84	0.88
Toprak	0.77	0.89	0.83
Kentsel Alan	1	0.54	0.70
Gölge	1	0.96	0.98
Kar	0.93	0.90	0.92
Toprak_2	0.97	0.96	0.97
Toprak_3	0.95	0.89	0.92
Kentsel Alan_2	1	0.62	0.76

Ayrıca 2024 yılı görüntüsüne ait sınıflandırma genel doğruluğu %92.36 ve kappa katsayısı 0.91 olarak hesaplanmıştır. 2024 yılına ait sınıflandırma sonucunda, arazi örtüsü sınıfları için genel doğruluk (accuracy) %92,36 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Cohen's Kappa katsayısı 0,91 olarak bulunmuş ve sınıflandırma modelinin başarılı bir performans sergilediği ortaya konmuştur. Her bir sınıf için hesaplanan metrikler, modelin farklı arazi örtüsü türlerini ayırt etme yeteneğini göstermektedir. Özellikle, Su, Gölge ve Toprak_2 sınıflarında yüksek Kesinlik ve Duyarlılık değerleri elde edilmiştir. Bu durum, modelin bu sınıfları doğru bir şekilde tanımlayabildiğini ve yanlış sınıflandırma oranının düşük olduğunu göstermektedir. Örneğin, Su sınıfı için F1-Score değeri 0,98 olarak hesaplanmış ve bu sınıfın sınıflandırma performansının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Gölge sınıfında F1-Score 0,98 olarak bulunmuş ve bu sınıfın da yüksek doğrulukta sınıflandırıldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, bazı sınıflarda modelin performansında görece düşüşler gözlemlenmiştir. Özellikle, Kentsel Alan ve Kentsel Alan_2 sınıflarında Duyarlılık değerlerinin diğer sınıflara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, bu sınıfların diğer arazi örtüsü türleriyle karışma eğiliminde olduğunu ve modelin bu sınıfları ayırt etmekte zorlandığını göstermektedir. Ancak, bu sınıflar için Kesinlik değerlerinin yüksek olması, modelin bu sınıfları tahmin ederken genellikle doğru tahminlerde bulunduğunu ortaya koymaktadır.

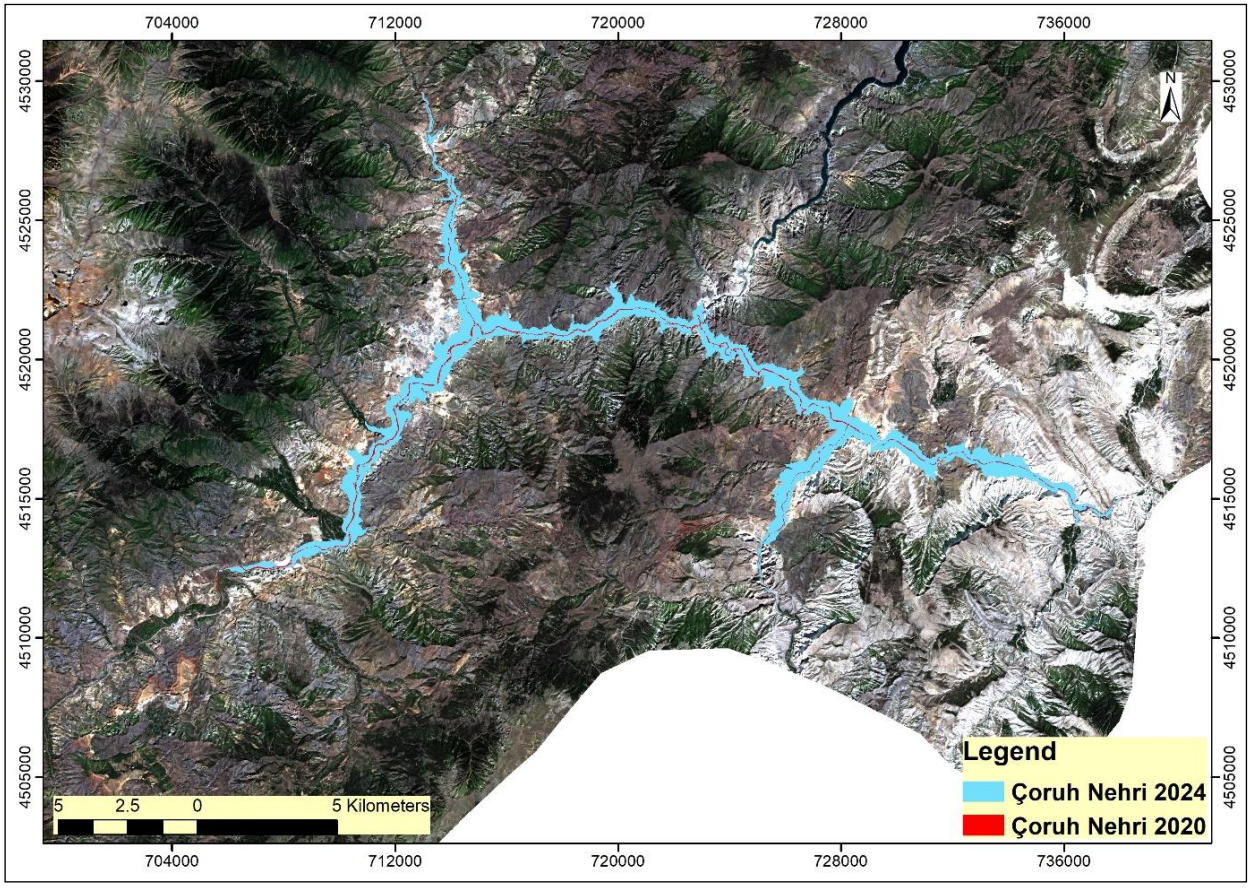
Genel olarak, DVM yöntemi ile yapılan sınıflandırma, Sentinel-2 görüntüsünden elde edilen arazi örtüsü türlerini ayırt etmede başarılı bir performans sergilemiştir. Yüksek doğruluk ve Kappa değerleri, modelin güvenilirliğini ve doğruluğunu desteklemektedir. 2020 yılına ait Sentinel-2 görüntüsün DVM ile sınıflandırma doğrulukları Tablo 3'deki gibidir.

Tablo 3. 2020 Yılı Sentinel-2 görüntüsü DVM ile sınıflandırma doğruluk değerlendirmeleri

Sınıf	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Score
Su	0.99	0.97	0.98
Orman	0.86	0.96	0.91
Yeşil Alan	0.98	0.91	0.94
Toprak	0.86	0.89	0.88
Kentsel Alan	0.95	0.72	0.82
Gölge	0.99	0.76	0.86
Kar	0.85	0.92	0.88
Toprak_2	0.95	0.96	0.96
Toprak_3	0.96	0.91	0.94
Kentsel Alan_2	0.78	0.77	0.78

Sentinel-2 2020 yılı görüntüsüne ait sınıflandırma genel doğruluğu %93.73 ve kappa katsayısı 0.92 olarak hesaplanmıştır. 2020 yılına ait DVM ile sınıflandırma sonucunda, arazi örtüsü sınıfları için genel doğruluk (accuracy) %93,74 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Cohen's Kappa katsayısı 0,92 olarak bulunmuştur. Her bir sınıf için hesaplanan metrikler, modelin farklı arazi örtüsü türlerini ayırt etme yeteneğini göstermektedir. Su, Yeşil Alan, Toprak_2 ve Toprak_3 sınıflarında yüksek Kesinlik ve Duyarlılık değerleri elde edilmiştir. Örneğin, Su sınıfı için F1-Score değeri 0,98 olarak hesaplanmış ve bu sınıfın sınıflandırma performansının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Genel olarak, DVM yöntemi ile yapılan sınıflandırma, Sentinel-2 görüntüsünden elde edilen arazi örtüsü türlerini ayırt etmede başarılı bir performans sergilemiştir.

Yapılan değişim analizleri sonucunda, çalışma bölgesi içerisinde kalan Çoruh Nehri'nin yüzey alanında, 2020-2024 yılları arasında 2632,11 ha'lık artış tespit edilmiştir (Şekil 7) Su altında kalan en büyük alanı orman toprağı, kayalık ve taşlık alanlar ile iskân alanlarının oluşturduğu görülmektedir (Tablo 4).



Şekil 7. Çoruh Nehri yüzey alanı değişimi (2020-2024)

Yusufeli Barajı'nın inşası ve su tutma işlemi sonrasında Çoruh Nehri havzasında su altında kalan alanların Artvin Orman Bölge Müdürlüğü'nden alınan meşcere veri katmanındaki arazi kullanım sınıflarına göre dağılımı analiz edilmiştir. Bu analiz, bölgedeki arazi kullanım türlerinin ve doğal kaynakların etkilenme düzeyini ortaya koymaktadır. Tablo 4'de, su altında kalan alanların dağılımı hektar (ha) cinsinden verilmiştir.

Tablo 4. Su altında kalan alanların meşcere veri katmanındaki arazi kullanım sınıfları ile çakıştırılması

Sınıf	Alan (ha)
Orman	68.12
Kum	11.53
Orman Toprağı	873.65
Sulak Alan	136.22
Kayalık, Taşlık	685.18
Ziraat	567.78
Ziraat ve İskan Alanları	233.43
İskan	56.21

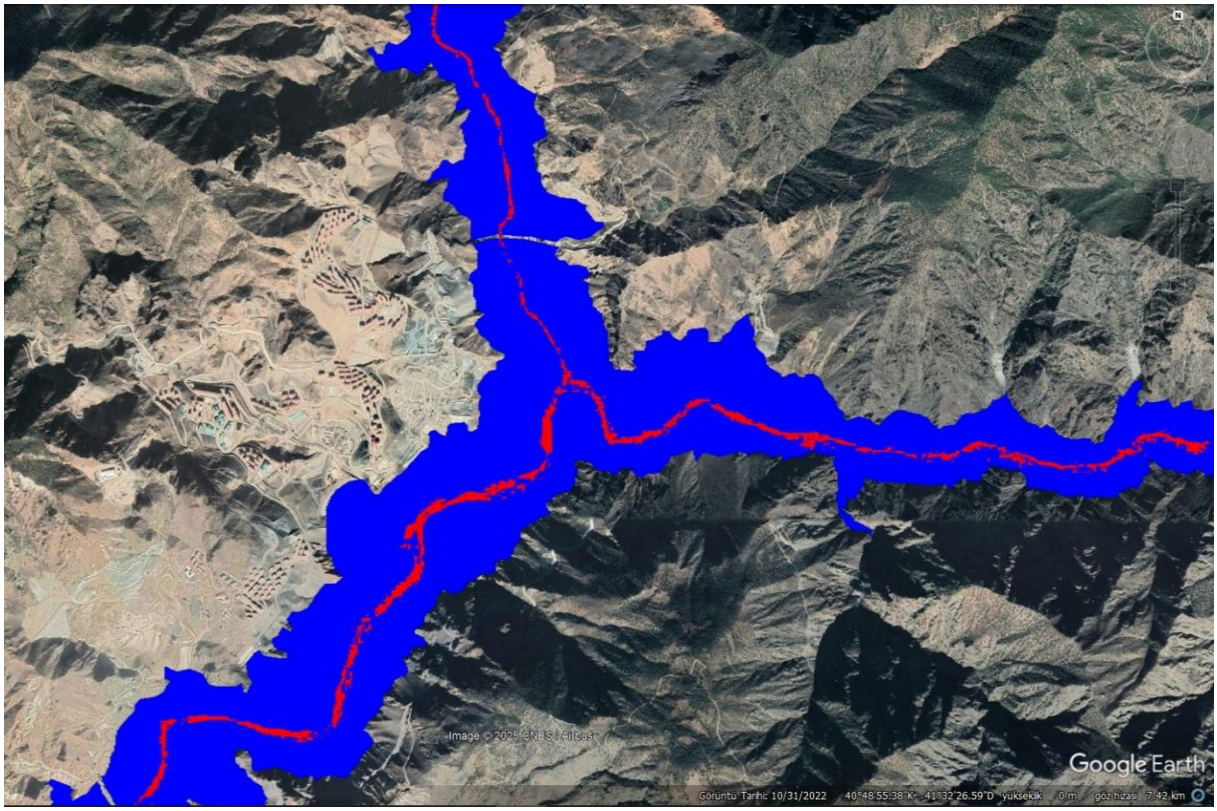
Tablo 4'de görüldüğü üzere, su altında kalan alanların en büyük kısmını orman toprağı (873.65 ha) oluşturmaktadır. Bu durum, barajın inşası sırasında orman ekosistemlerinin önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Orman toprağını, kayalık ve taşlık alanlar (685.18 ha) takip etmektedir. Bu alanlar, genellikle bitki örtüsünün sınırlı olduğu ve ekolojik olarak daha az üretken bölgeler olarak değerlendirilebilir.

Ziraat alanları (567.78 ha), ziraat ve iskan alanları (233.43 ha) da su altında kalan önemli arazi türleri arasında yer almaktadır. Bu durum, barajın tarımsal üretim ve yerleşim alanları üzerinde de kayda değer bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle tarımsal alanların su altında kalması, bölgedeki ekonomik faaliyetlerin yeniden düzenlenmesini gerektirmiştir.

İskan alanları (56.21 ha) ve kum alanları (11.53 ha) ise su altında kalan en küçük alanları oluşturmaktadır. İskan alanlarının su altında kalması, yerel halkın yer değiştirmesi ve yeniden yerleşim süreçlerini zorunlu kılmıştır. Genel olarak, Yusufeli Barajı'nın inşası, bölgedeki arazi kullanım türlerini ve doğal kaynakları etkilemiştir. Yusufeli merkezinde 2020 ve 2024 yılı Çoruh Nehri yüzey değişimi sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir.

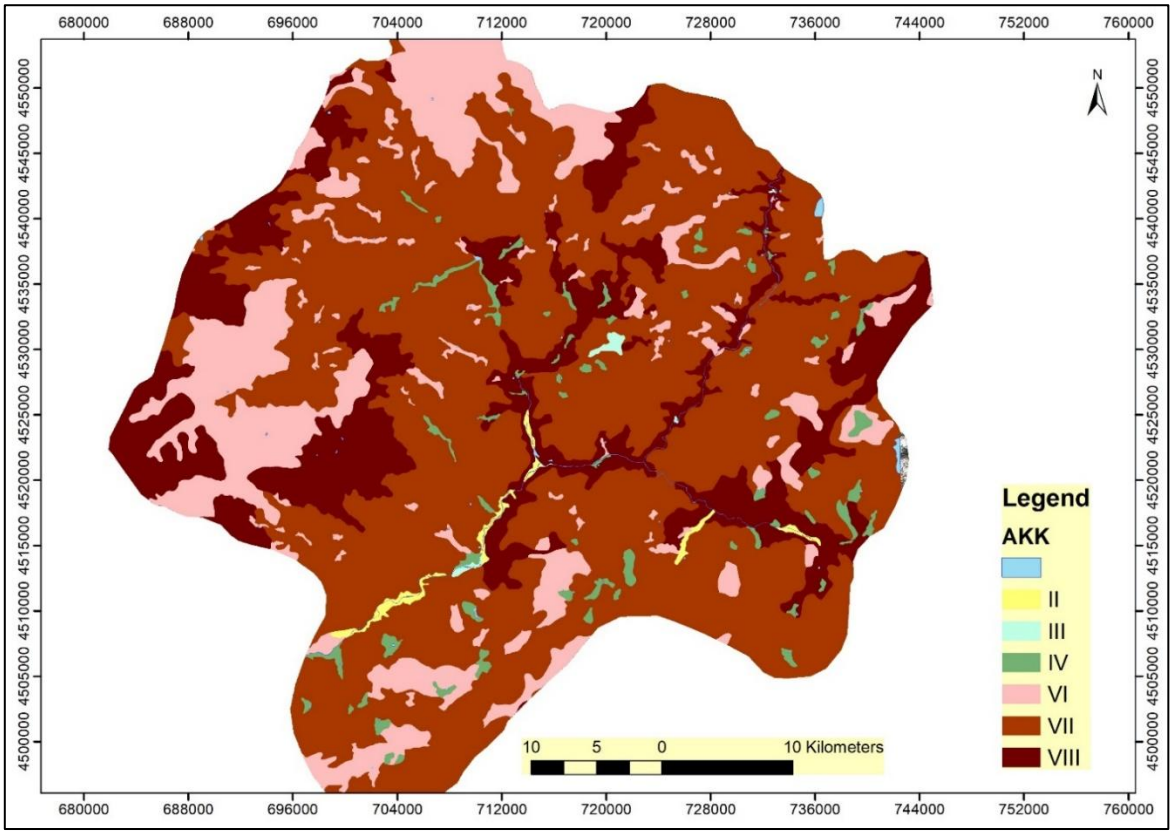


Şekil 8. Yusufeli merkezi 2020 yılı Çoruh Nehri



Şekil 9. Yusufeli merkezi 2024 yılı Çoruh Nehri

Şekil 10'da Artvin Orman Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen toprak verisi özniteliklerinden elde edilen AKK sınıfları renklendirilerek gösterilmektedir. AKK verisinde, erozyona yol açmaksızın en verimli, en kolay ve en ekonomik şekilde tarımsal üretime olanak sağlayan araziler birinci sınıfta yer alırken; hiçbir tarımsal faaliyete uygun olmayan, çayır veya orman olarak dahi değerlendirilemeyen, yalnızca doğal yaşam alanı olarak işlev görebilen ya da insanlar tarafından dinlenme alanı ve milli park olarak kullanılabilen araziler son sınıf olan sekizinci sınıfta yer almaktadır. Birinci sınıftan sekizinci sınıfa doğru arazinin tarımsal verimliliği azalan skalada devam edecek şekildedir. I, II, III, IV sınıfları toprak işlemeli tarıma elverişli arazileri oluştururken; V, VI ve VII. sınıflar toprak işlemeli tarıma elverişsiz arazileri oluşturmaktadır. Son olarak VIII. sınıf araziler tarıma elverişsiz arazilerdir.

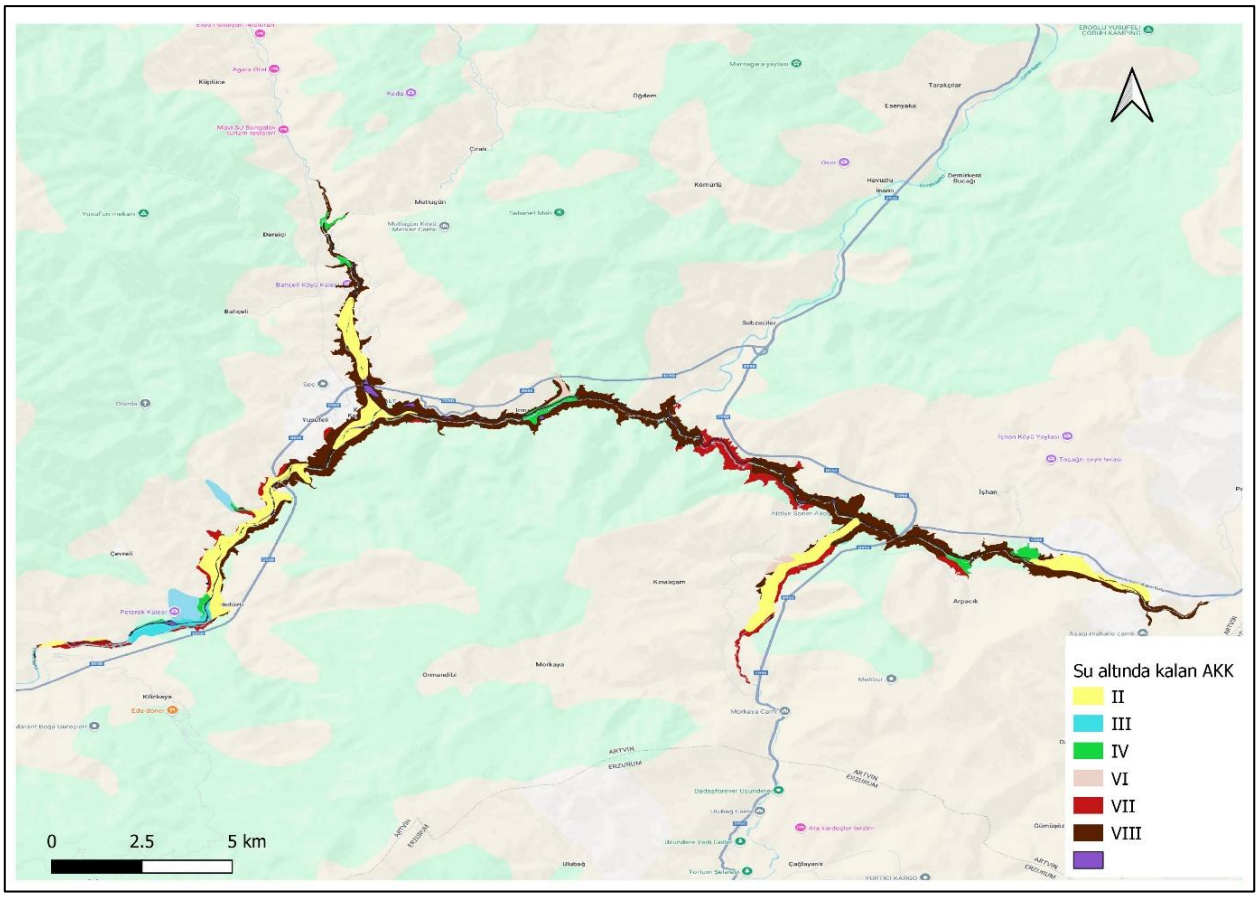


Şekil 10. Yusufeli AKK sınıfları

Tablo 5. Yusufeli Bölgesi AKK Sınıfları

AKK	Alan (ha)
II	1182.48
III	349.92
IV	4508.37
VI	37666.21
VII	144628.06
VIII	42385.23

Su altında kalan alanlar ile AKK sınırları çakıştırılarak su altında kalan alanların arazi kullanım sınıfları incelenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Su altında kalan alanların AKK sınıfları

Tablo 6. Su altında kalan yerlerin AKK alanları

AKK	Alan (ha)
II	614.14
III	67.27
IV	104.05
VI	38.89
VII	302.15
VIII	1322.46

Yusufeli ilçesinin arazi kullanım sınıflarına ilişkin genel dağılımı ve Yusufeli Barajı'nın inşası sonrası su altında kalan alanların arazi kullanım sınıflarına etkisi Tablo 5 ve Tablo 6'da özetlenmiştir. Tablo 5'e göre, Yusufeli ilçesinin toplam arazi kullanım sınıfları içinde en büyük alanı VII. sınıf (144628,06 ha) kaplamaktadır. Bu sınıfı, VIII. sınıf (42.385,23 ha) ve VI. sınıf (37666,21 ha) takip etmektedir. Daha düşük alanlara sahip olan sınıflar ise IV. sınıf (4508,37 ha), II. sınıf (1182,48 ha) ve III. sınıf (349,92 ha) olarak sıralanmaktadır. Bu veriler, Yusufeli ilçesinin büyük bir kısmının tarımsal üretim açısından düşük potansiyele sahip, eğimli ve erozyona duyarlı alanlardan oluştuğunu göstermektedir. Tablo 6'da ise Yusufeli Barajı'nın inşası sonrası su altında kalan alanların arazi kullanım sınıflarına göre dağılımı verilmiştir. Buna göre, su altında kalan alanlar içinde en büyük pay VIII. sınıfa (1322,46 ha) aittir. Bunu sırasıyla II. sınıf (614,14 ha), VII. sınıf (302,15 ha), IV. sınıf (104,05 ha), III. sınıf (67,27 ha) ve VI. sınıf (38,89 ha) izlemektedir. Bu durum, barajın inşasıyla birlikte özellikle VIII. sınıf arazilerin önemli bir kısmının su altında kaldığını göstermektedir. Ayrıca, II. sınıf gibi tarımsal üretim açısından daha yüksek potansiyele sahip alanların da su altında kaldığı görülmektedir. AKK II sınıfı arazilerin %51,94'ünün su altında kalması, bölgedeki tarımsal üretim potansiyeli açısından önemli bir kaybı işaret etmektedir. AKK II sınıfı, tarımsal faaliyetler için en uygun alanlardan biri olarak değerlendirildiğinden, bu alanların yarısından fazlasının baraj inşasıyla su altında kalması, bölgedeki tarımsal üretim kapasitesini etkileyebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Türkiye'nin en yüksek barajı olan Yusufeli Barajı'nın su tutma süreci sonrası meydana gelen arazi örtüsü değişimlerini uzaktan algılama teknikleri ve GEE platformu kullanarak analiz etmiştir. Çalışmada, 2020 ve 2024 yıllarına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak NDWI, DVM algoritması ile arazi örtüsü sınıflandırması, değişim analizi ve çakıştırma analizleri gerçekleştirilmiştir. Arazi sınıflandırma işlemleri, sırasıyla %93.74 ve %92.36 genel doğruluk oranları ile tamamlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, Çoruh Nehri'nin yüzey alanında 2020-2024 yılları arasında 2632.11 hektarlık bir artış olduğunu göstermiştir. Su altında kalan alanların büyük bir kısmını ormanlık alanlar, kayalık ve taşlık bölgeler ile yerleşim alanları oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, tarımsal üretim açısından yüksek potansiyele sahip II. sınıf arazilerin %51.94'ünün su altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, bölgedeki tarımsal üretim kapasitesinde önemli bir kayba işaret etmektedir.

GEE'nin sunduğu en önemli avantajlardan biri, büyük miktarda uydu verisine hızlı ve kolay erişim sağlamasıdır. Bu çalışmada, Sentinel uydu görüntüleri kullanılarak, Yusufeli Barajı'nın çevresel etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. GEE'nin bulut tabanlı yapısı sayesinde, büyük veri setlerinin işlenmesi ve analiz edilmesi için güçlü bir donanım altyapısına ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca, GEE'nin sunduğu geniş veri arşivi, farklı zaman dilimlerine ait görüntülerin kolayca karşılaştırılmasına olanak tanımıştır. Bu sayede, barajın su tutması öncesi ve sonrası arazi örtüsü değişiklikleri detaylı bir şekilde incelenebilmiştir. GEE'nin zaman serisi analizleri yapabilme yeteneği, bu tür çevresel değişimlerin dinamik bir şekilde izlenmesini mümkün kılmıştır. GEE'nin bir diğer önemli avantajı, kullanıcı dostu arayüzü ve güçlü programlama altyapısıdır. JavaScript tabanlı kodlama ortamı, araştırmacıların karmaşık analizleri kolayca gerçekleştirmesine olanak tanımıştır. Bu çalışmada, arazi örtüsü değişim analizi, sınıflandırma ve doğruluk değerlendirme gibi işlemler hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, GEE'nin sunduğu görselleştirme araçları, analiz sonuçlarının kolayca yorumlanmasını ve paylaşılmasını sağlamıştır. Doğruluk değerlendirme çalışmaları için Google Earth platformundaki yüksek çözünürlüklü görüntülerin kullanılması, GEE'nin diğer veri kaynaklarıyla entegrasyon yeteneğini göstermiştir. Bu entegrasyon, analizlerin doğruluğunu artırmış ve sonuçların güvenilirliğini sağlamıştır.

Sonuç olarak, GEE'nin sağladığı bu avantajlar, Yusufeli Barajı'nın çevresel etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesini mümkün kılmıştır. Bu çalışma, GEE'nin çevresel değişim analizlerinde ne kadar etkili bir araç olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. GEE'nin sunduğu hızlı, maliyet etkin ve kullanıcı dostu analiz ortamı, benzer çalışmalar için bir model oluşturmakta ve uzaktan algılama tekniklerinin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında TBTK-0031-1091 nolu Proje ile desteklenmektedir. Bu kapsamda TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Aghlmand, M., Kalkan, K., Onur, M. İ., Öztürk, G., & Ulutak, E. (2021). Google Earth Engine ile arazi kullanımı haritalarının üretimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *10*(1), 38–47.

Akar, Ö., Saralıoğlu, E., Güngör, O., & Bayata, H. F. (2024). Semantic segmentation of very-high spatial resolution satellite images: A comparative analysis of 3D-CNN and traditional machine learning algorithms for automatic vineyard detection. *International Journal of Engineering and Geosciences*, *9*(1), 12–24. https://doi.org/10.26833/ijeg.1252298

Akçın, H., & Tercan Köse, R. (2023). Tarım arazilerinde değişime neden olan parametrelerin Google Earth Engine veri madenciliği ve WebCBS aplikasyonu ile değerlendirilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *13*(2), 1363–1376. https://doi.org/10.21597/jist.1192622

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *13*, 5326–5350. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052

Danacıoğlu, Ş., & Öngül, H. C. (2023). Güzelhisar Havzasında Endüstriyel Gelişmenin Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Bulut Tabanlı Makine Öğrenme Teknikleri ile Değerlendirilmesi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 32(1), 135-150.

Eid, A. N. M., Olatubara, C. O., Ewemoje, T. A., El-Hennawy, M. T., & Farouk, H. (2020). Inland wetland time-series digital change detection based on SAVI and NDWI indices: Wadi El-Rayan lakes, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *19*, Article 100347. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100347

Fragou, S., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Louka, P., Srivastava, P. K., Karpouzas, S., Kalivas, D. P., & Petropoulos, G. P. (2020). Quantifying land cover changes in a Mediterranean environment using Landsat TM and support vector machines. *Forests*, *11*(7), Article 750. https://doi.org/10.3390/f11070750

Guan, J., Zhang, H., Han, T., Cao, W., Wang, J., & Li, D. (2025). High-resolution mapping of shallow water bathymetry based on the scale-invariant effect using Sentinel-2 and GF-1 satellite remote sensing data. *Remote Sensing*, *17*(4), Article 640. https://doi.org/10.3390/rs17040640

Guha, S., Govil, H., & Besoya, M. (2020). An investigation on seasonal variability between LST and NDWI in an urban environment using Landsat satellite data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *11*(1), 1319–1345. https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1789762

Halder, S., & Bose, S. (2024). Sustainable flood hazard mapping with GLOF: A Google Earth Engine approach. *Natural Hazards Research*, *4*(4), 573–578. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.002

He, M., Kimball, J., Maneta, M., Maxwell, B., Moreno, A., Beguería, S., & Wu, X. (2018). Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused Landsat–MODIS data. *Remote Sensing*, *10*, Article 372. https://doi.org/10.3390/rs10030372

Kadavi, P. R., & Lee, C. W. (2018). Land cover classification analysis of volcanic island in Aleutian Arc using an artificial neural network (ANN) and a support vector machine (SVM) from Landsat imagery. *Geosciences Journal*, *22*, 653–665. https://doi.org/10.1007/s12303-018-0023-2

Kavzoğlu, T., & Çölkesen, İ. (2009). A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *11*(5), 352–359. https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.06.002

Khalil, M., & Kumar, J. S. (2025). Assessing Urban Heat Island Intensity in Damascus City Using Google Earth Engine and Landsat 8 and 9: a Comparative Analysis. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, *8*, 576–592.

Koday, Z., & Erhan, K. (2010). Yusufeli ilçesinin idari coğrafya analizi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *14*(2), 231–241.

Liang, J., Gong, J., & Li, W. (2018). Applications and impacts of Google Earth: A decadal review (2006–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *146*, 91–107. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.019

Maulik, U., & Chakraborty, D. (2017). Remote sensing image classification: A survey of support-vector-machine-based advanced techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, *5*(1), 33–52.

Melgani, F., & Bruzzone, L. (2004). Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(8), 1778–1790.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine applications. *Remote Sensing*, *11*(5), Article 591. https://doi.org/10.3390/rs11050591

Özalp, M., Erdoğan Yüksel, E., & Yıldırımer, S. (2012, 16–19 Ekim). *CBS yardımı ile Çoruh Nehri üzerinde planlanan baraj ve yol projelerinin neden olacağı arazi kullanım değişiminin ve arazi tahribatının belirlenmesi* [Bildiri sunumu]. IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS), Zonguldak, Türkiye.

Özelkan, E. (2020). Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(2), 1759–1769. https://doi.org/10.15244/pjoes/110447

Pande, C. B., Srivastava, A., Moharir, K. N., Radwan, N., Mohd Sidek, L., Alshehri, F., … Zhran, M. (2024). Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: A Google Earth Engine implementation. *Environmental Sciences Europe*, *36*(1), Article 84. https://doi.org/10.1186/s12302-024-00901-0

Parente, L., & Ferreira, L. (2018). Assessing the spatial and occupation dynamics of the Brazilian pasturelands based on the automated classification of MODIS images from 2000 to 2016. *Remote Sensing*, *10*(4), Article 606. https://doi.org/10.3390/rs10040606

Polat, P. (2023). Yusufeli'nde (Artvin) baraj öncesi doğal çevre özelliklerinin CBS yöntemleri ile belirlenmesi ve ekolojik hassasiyet, NDVI, NDMI analizleri. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, *12*(1), 1–24.

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote sensing,* 12(14), Article 2291. https://doi.org/10.3390/rs12142291

Saralioglu, E., & Gungor, O. (2022). Semantic segmentation of land cover from high-resolution multispectral satellite images by spectral-spatial convolutional neural network. *Geocarto International*, *37*(2), 657–677. https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1734871

Saralioglu, E., & Vatandaslar, C. (2022). Land use/land cover classification with Landsat-8 and Landsat-9 satellite images: A comparative analysis between forest- and agriculture-dominated landscapes using different machine learning methods. *Acta Geodaetica et Geophysica*, *57*(4), 695–716. https://doi.org/10.1007/s40328-022-00400-9

Srivastava, P. K., Han, D., Rico-Ramirez, M. A., Bray, M., & Islam, T. (2012). Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Advances in Space Research*, *50*(9), 1250–1265. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.032

Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *164*, 152–170. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001

Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, *8*(3), Article 166. https://doi.org/10.3390/rs8030166

Loukika, K. N., Keesara, V. R., & Sridhar, V. (2021). Analysis of land use and land cover using machine learning algorithms on Google Earth Engine for Munneru River Basin, India. *Sustainability*, *13*(24), Article 13758. https://doi.org/10.3390/su132413758

Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(3), 247–259. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001

Sefrin, O., Riese, F. M., & Keller, S. (2021). Deep learning for land cover change detection. *Remote Sensing*, *13*(1), Article 78. https://doi.org/10.3390/rs13010078

Torun, A. (2021). Batık kentin hatırası: Yusufeli kent kimliğindeki değişimler. *Kent ve Çevre Araştırmaları Dergisi*, *3*(2), 56–80. https://doi.org/10.48118/yykentcevre.1021841

Turan, E., & Bayrakdar, E. (2020). Türkiye'nin su yönetim politikaları: Ulusal güvenlik açısından bir değerlendirme. *Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi*, *6*(2), 1–19. https://doi.org/10.25272/j.2149-8539.2020.6.2.01

Tüfekçioğlu, M., & Yavuz, M. (2016). Yusufeli mikro havzasında (Artvin) yüzey erozyonu toprak kaybının tahmin edilmesi ve erozyon risk haritasının oluşturulması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *17*(2), 188–199. https://doi.org/10.17474/acuofd.47342

Tsai, Y. H., Stow, D., Chen, H. L., Lewison, R., An, L., & Shi, L. (2018). Mapping vegetation and land use types in Fanjingshan National Nature Reserve using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *10*(6), Article 927. https://doi.org/10.3390/rs10060927

Vali, A., Comai, S., & Matteucci, M. (2020). Deep learning for land use and land cover classification based on hyperspectral and multispectral earth observation data: A review. *Remote Sensing*, *12*(15), Article 2495. https://doi.org/10.3390/rs12152495

Yilgan, F., Miháliková, M., Kara, R. S., & Ustuner, M. (2025). Analysis of the forest fire in the 'Bohemian Switzerland' National Park using Landsat-8 and Sentinel-5P in Google Earth Engine. *Natural Hazards*, *121*(5), 6133–6154. https://doi.org/10.1007/s11069-024-07052-8

Yousefi, S., Mirzaee, S., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., Gomez, C., Siamian, N., Alrasheedi, M., & Abdo, H. G. (2022). Image classification and land cover mapping using Sentinel-2 imagery: Optimization of SVM parameters. *Land*, *11*(7), Article 993. https://doi.org/10.3390/land11070993

Zhao, S., Tu, K., Ye, S., Tang, H., Hu, Y., & Xie, C. (2023). Land use and land cover classification meets deep learning: A review. *Sensors*, *23*(21), Article 8966. https://doi.org/10.3390/s23218966

Zhang, C., Zeren, Z., Li, J., Zheng, H., Raval, S., Ding, Y., & Ma, Y. (2025). An index-based approach to evaluate ecological environment in various surface coal mines using Google Earth Engine. *Journal of Cleaner Production*, *490*, Article 144746. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144746

Zhao, Z., Islam, F., Waseem, L. A., Tariq, A., Nawaz, M., Islam, I. U., Bibi, T., Rehman, N. U., Ahmad, W., Aslam, R. W., Raza, D., & Hatamleh, W. A. (2024). Comparison of three machine learning algorithms using Google Earth Engine for land use land cover classification. *Rangeland Ecology & Management*, *92*(1), 129–137. https://doi.org/10.1016/j.rama.2023.10.007.

Zhao, S., Tu, K., Ye, S., Tang, H., Hu, Y., & Xie, C. (2023). Land use and land cover classification meets deep learning: A review. *Sensors*, *23*(21), Article 8966. https://doi.org/10.3390/s23218966

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 230–251
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

RUSLE Yöntemi Kullanılarak Porsuk Çayı Havzası'nda Erozyon Duyarlılığının ve Toprak Kayıplarının Belirlenmesi

Determination of Erosion Susceptibility and Soil Loss in the Porsuk Stream Basin Using the RUSLE Method

Ali Ünver[1]*, Ebubekir Karakoca[2]

[1]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Coğrafya Programı, Bilecik/Türkiye.
[2]Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Bilecik/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Ali Ünver
aliunver3216@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1687713

Yayın süreci
Geliş tarihi: 30.04.2025
Kabul tarihi: 12.07.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

*Bu çalışma, Kuzeybatı Anadolu'daki Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kayıpları ve erozyon duyarlılığı riskinin mekânsal dağılımını RUSLE açılımı modeliyle nicel olarak değerlendirmektedir. Araştırma alanı, Eskişehir ve Kütahya'nın büyük bölümü ile Ankara, Uşak ve Afyonkarahisar'ın bazı kesimlerini kapsamaktadır. RUSLE modelinin yağış erozivitesi (R), toprak erodibilite (K), eğim uzunluğu ve eğim (LS), bitki örtüsü (C) ve koruma önlemleri (P) faktörleri; Google Earth Engine platformunda ALOS PALSAR DEM, CHIRPS yağış verileri, 1/100.000 ölçekli toprak haritaları, Sentinel-2 NDVI ve MODIS arazi kullanım verileriyle 30*30 m çözünürlükte Üretilmiştir. Analizler, özellikle Sündiken ve Karlık Dağları gibi yüksek eğimli alanlarda erozyon riskinin arttığını göstermektedir. Çok hafif riskli alanlar havzanın %41,01'ini oluştururken, toplam toprak kaybının %15,47'sine neden olmaktadır. Yüksek ve çok yüksek riskli alanlar ise havzanın %34,57'sini kapsamakta ve toplam kaybın %62,90'ına sebep olmaktadır. Ortalama yıllık toprak kaybı 2,35 ton $ha^{-1} y^{-1}$, toplam kayıp ise yıllık 2,538,269.32 tondur. Sonuçlar, sürdürülebilir arazi yönetimi için ağaçlandırma, teraslama ve koruyucu tarım uygulamalarının gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, coğrafi teknolojilerin RUSLE parametrelerinin türetilmesinde sağladığı avantajlar örneklenmiştir.*

Anahtar kelimeler: *Erozyon, Uzaktan algılama, CBS, RUSLE, Porsuk çayı*

Abstract

This study quantitatively evaluates the spatial distribution of soil loss and erosion susceptibility risk in the Porsuk Stream Basin in Northwestern Anatolia using the RUSLE expansion model. The research area covers most of Eskişehir and Kütahya, as well as parts of Ankara, Uşak, and Afyonkarahisar. The rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover (C), and conservation practices (P) factors of the RUSLE model were produced at a 30×30 m resolution on the Google Earth Engine platform using ALOS PALSAR DEM, CHIRPS precipitation data, 1:100,000 scale soil maps, Sentinel-2 NDVI, and MODIS land use data. The analyses show that erosion risk increases especially in steeply sloped areas such as the Sündiken and Karlık Mountains. Very low-risk areas constitute 41.01% of the basin and cause 15.47% of the total soil loss. High and very high-risk areas cover 34.57% of the basin and account for 62.90% of the total loss. The average annual soil loss is 2.35 t $ha^{-1} y^{-1}$, and the total annual loss is 2,538,269.32 tons. The results emphasize the necessity of afforestation, terracing, and conservation agriculture practices for sustainable land management. In addition, the advantages provided by geographic technologies in deriving RUSLE parameters are exemplified.

Keywords: *Erosion, Remote sensing, GIS, RUSLE, Porsuk river*

1. Giriş

Erozyon, yeryüzü şekillenmesinde rol oynayan doğal süreçlerden biridir. Ana kayaçların dış etkenlerle (fiziksel ve kimyasal/ biyolojik) ayrışması sonucu oluşan toprakların; su, rüzgâr ve yerçekimi gibi kuvvetlerin etkisiyle taşınması, jeolojik zamanlardan bu yana topografyanın biçimlenmesinde belirleyici olmuştur (Erinç, 1973). Ancak bu süreç, yalnızca doğal dinamiklerle sınırlı kalmamakta; özellikle yanlış arazi kullanımı gibi insan faaliyetleri erozyon hızını artırarak, günümüzde önemli bir çevresel sorun haline gelmesine neden olmaktadır. Sanayi Devrimi ile birlikte artan ormansızlaştırma ve madencilik faaliyetleri, doğal bitki örtüsünün tahribine ve dolayısıyla erozyonun hızlanmasına neden olmuştur. 20. yüzyılda modern tarım tekniklerinin yaygınlaşması ve hızla artan nüfus, küresel ölçekte erozyonun boyutlarını daha da genişletmiş; bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde toprak bozulmasını ciddi bir çevresel tehdit haline getirmiştir (Clark & Jacks, 2007). Türkiye'de, su erozyonuna bağlı yıllık ortalama toprak kaybı 642 milyon tona ulaşmakta ve hektar başına ortalama 8,24 ton ha^{-1} y^{-1} toprak kaybı yaşanmaktadır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2021). Toprak kaybının dağılımında %60,28 oranında çok hafif, %19,13 hafif, %7,93 orta, %5,97 şiddetli ve %6,70 çok şiddetli erozyon gözlemlenmektedir. Bu süreçte topografya %47,55 oranında belirleyici bir etken olurken; bitki örtüsü (%34,82), yağış (%14,26) ve toprak özellikleri (%3,36) diğer faktörler arasında yer almaktadır (Demirtaş, 2024).

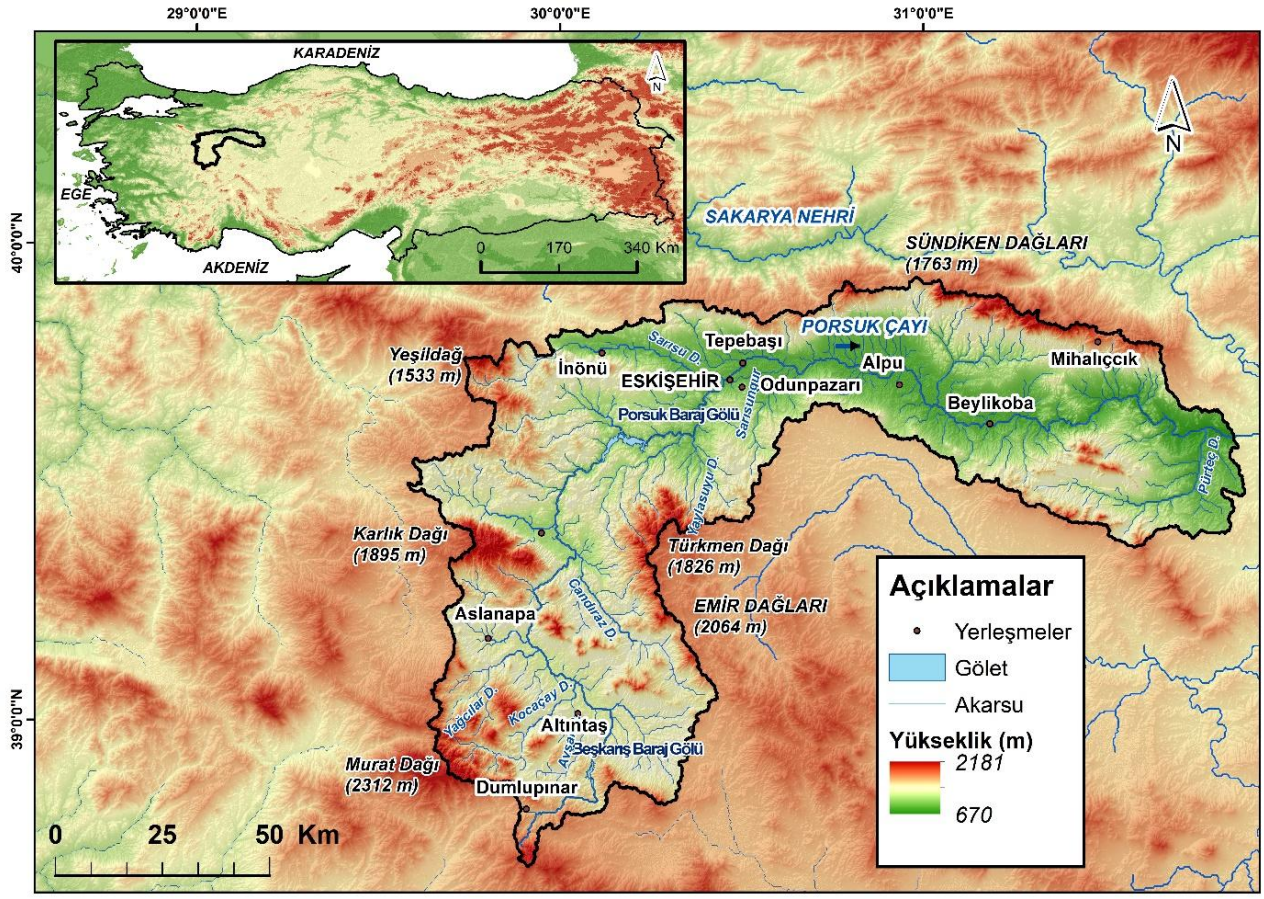
Türkiye'de erozyon araştırmaları, 1950'li yıllardan itibaren sistematik bir şekilde başlamış olup, bu alandaki öncü çalışmalardan biri İlgüz (1955)'ün Mustafa Kemal Paşa Çayı havzasında yaptığı araştırmadır. İlgüz, havzadaki erozyon şiddetini ve Ulubat Gölü ile ilişkisini inceleyerek, Türkiye'deki erozyonun boyutlarını bilimsel olarak ortaya koymuştur). 1980'li yıllarda USLE (Universal Soil Loss Equation) modelinin özellikle tarım alanlarında uygulanmaya başlanması, erozyon hesaplamalarının nicel ve bilimsel temellere dayanmasını mümkün kılmıştır. Bunu takip eden 1990'lı yıllarda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) modelinin kullanıma girmesi, özellikle büyük akarsu havzalarında erozyonun mekânsal dağılımının daha sağlıklı ve detaylı bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu gelişmeleri takiben, Türkiye'nin özgün topografik ve iklimsel koşullarına uyarlanarak geliştirilen Türkiye Toprak Erozyon Tahmin Modeli (TURTEM), ulusal düzeyde erozyon risk analizlerinin gerçekleştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır (Özden & Özden, 1997). Günümüzde, Türkiye'nin farklı havza ve bölgelerinde gerçekleştirilen çok sayıda erozyon çalışması bulunmaktadır. Özellikle Dicle, Fırat, Kızılırmak, Sakarya ve Batı Akdeniz havzaları, erozyonun en yoğun gözlendiği alanlar arasında öne çıkmaktadır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2024). Marmara Bölgesi'nde (Okçu vd., 2006; Fıçıcı, 2016; Atalay Dutucu & Mutlu, 2022), Ege Bölgesi'nde (Danacıoğlu & Tağıl, 2017), İç Anadolu Bölgesi'nde (Bozyiğit & Kaya, 2017; Karakoca, 2025), Batı Karadeniz'de (Eraslan vd., 2016), Doğu Karadeniz'de (Hatipoğlu & Hatipoğlu, 2020), Batı Akdeniz'de (Çilek vd., 2014; Avcıoğlu vd., 2020), Doğu Akdeniz'de (Değerliyurt, 2013) yürütülen çalışmalar, ülke genelinde erozyon risklerinin mekânsal farklılıklarını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Ayrıca, Meriç-Ergene (Özşahin, 2016a, Özşahin, 2016b; Uludağ & Fıçıcı, 2018), Susurluk (Mutlu vd., 2021), Gediz (Tağıl vd., 2023), Sakarya (Karaş vd., 2009; Ustaoğlu & Koç, 2018), Küçük ve Büyük Menderes (Özdemir & Dönmez, 2016; Gündüzoğlu, 2019), Akarçay ve Burdur Havzaları (Erkal & Yıldırım, 2012; Dursun & Babalık, 2023), Yeşilırmak (İmamoğlu, 2020), Kızılırmak (Ataol & Köle, 2016), Seyhan ve Ceyhan (Erol, 2003; Çilek & Berberoğlu, 2013), Dicle-Fırat (Sunkar & Avcı, 2015; Avcı vd., 2017; Karakoyun & Kaya, 2022; Yalçınkaya vd., 2022), Çoruh (Zengin vd., 2009) ve Aras (Aykır & Fıçıcı, 2022) havzalarında yürütülen araştırmalar da, havza ölçeğinde erozyon dinamiklerinin ayrıntılı bir şekilde incelendiğini göstermektedir. Bu araştırmalar, Türkiye'nin farklı iklimsel, jeomorfolojik ve hidrolojik karakteristiklere sahip bölgelerinde erozyon süreçlerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır. Ayrıca bölgesel ölçekli arazi yönetimi ve koruma stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel zemin oluşturmuştur.

Sakarya Nehri havzası özelinde ise su kaynaklarının durumu ve havza yönetimi konularında çeşitli araştırmalar öne çıkmaktadır. Sakarya Nehri'nin su kalitesinin tarımsal sulamaya uygunluğunun incelenmesi (Dorak & Aşık, 2018) ve faktör analizleri ile su kalitesinin değerlendirilmesi (Şengörür & İsa, 2001), taşkın yayılım haritalarının oluşturulması (Sönmez, 2013), Göksu Çayı Havzası'nda risk temelli havza yöntemi (Uzun & Garipağaoğlu, 2022) ve Sakarya Havzası'ndaki sıcaklık ve yağış değişimlerinin analizi (Rümeysa & Atalay Dutucu, 2020) bu temalar arasında yer almaktadır. Ayrıca, Yuvacık Barajı'nda iklim değişikliğinin akım ve sediman rejimine etkileri (Özdemir, 2021), Porsuk Çayı'nda debi analizleri (Tekkanat, 2016) ve su kalitesi değerlendirmeleri (Köse vd., 2016) ile Kirmir Çayı'ndaki biyolojik çeşitliliğe ilişkin çalışmalar (Gül vd., 2008) önemli bilgiler sunmaktadır. Sakarya Nehri Vadisi özelinde ise İnhisar-Osmaneli arasındaki seki sistemlerinin morfometrik, sedimantolojik ve kronolojik özelliklerine yönelik araştırmalar ise bölgedeki flüvyal süreçlerin tarihsel gelişimini ortaya koyarak vadinin jeomorfolojik evrimine ışık tutmaktadır (Karakoca & Uncu, 2020; Karakoca vd., 2025).

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmanın yapıldığı Porsuk Çayı Havzası, Sakarya Havzası'nın önemli alt havzalarından birini oluşturmaktadır. Kuzeybatı Anadolu'da yer alan havza, 29°38' 00''–31°59' 00'' doğu boylamları ile 38°44' 00''–39°99' 00'' kuzey enlemleri arasında yer almaktadır (Şekil 1). Havza morfometrik olarak doğu-batı yönünde yaklaşık 202 km, kuzey-güney doğrultusunda ise 135 km uzunluğa sahiptir. Havzanın toplam yüzölçümü 1.079.744,67 hektar (10.797,45 km²) olarak hesaplanmıştır. İdari olarak, Eskişehir ve Kütahya illerine bağlı yedi ilçe merkezi ile birlikte Ankara, Uşak ve Afyonkarahisar illerinin bazı kesimleri çalışma alanı içerisinde yer almaktadır. Porsuk Çayı, Murat Dağı'nın eteklerinde doğarak Tokul Köyü yakınlarında kuzeye yöneldikten sonra, Kütahya kent merkezinden geçerek doğuya doğru akışını sürdürmekte; Eskişehir il merkezini geçtikten sonra Sazlılar mevkiinde (660 m yükselti) Sakarya Nehri'ne katılmaktadır. Yaklaşık 436 km uzunluğundaki Porsuk Çayı, bölgedeki hidrolojik sistemin temel bileşenlerinden bir olup, su rejimi ve sediment taşınımı açısından belirleyici bir role sahiptir. Kokar Çayı, Çat Deresi, Felent Çayı, Kargın Deresi ve Sarısu Deresi gibi önemli yan kollar, Porsuk Havzası'nın hidrolojik yapısını destekleyen diğer su unsurları arasında yer almaktadır (Çetin, 2011).



Şekil 1. Çalışma sahasının lokasyon haritası

2.2. Kullanılan Veri ve Yöntem

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, RUSLE modelinin tüm bileşenleri Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinde entegre edilerek kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. GEE, bulut tabanlı büyük veri işleme kapasitesi ve gelişmiş mekânsal analiz araçları ile geniş alanlarda yüksek çözünürlüklü ve hızlı coğrafi veri analizleri yapılmasını mümkün kılan güçlü bir platformdur (Gorelick vd., 2017). GEE'nin en önemli avantajları; farklı kaynaklardan elde edilen büyük hacimli verilerin hızlı ve bütüncül şekilde işlenebilmesi, çok çeşitli uydu ve iklim veri setlerine erişim imkânı ve analizlerin tekrarlanabilirliğinin yüksek olmasıdır (Amani vd., 2020; Tamiminia vd., 2020). Ancak, GEE'de veri çözünürlüğü ve güncelliği, platformda sunulan veri setleriyle sınırlı olabilmektedir.

RUSLE modeline yönelik analizlerde, temel altlık veri olarak ALOS PALSAR platformundan elde edilen 12.5 m çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanılmıştır. Yağış erozyon faktörü (R faktörü) hesaplamasında, 2023 yılına ait yağış verileri, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüğe sahip CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) veri setinden temin edilmiştir. Toprak erodibilite faktörü (K faktörü), T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritalarına dayalı olarak işlenmiş ve belirlenmiştir. LS faktörü, DEM verisinden türetilen eğim ve akış birikimi parametreleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Bitki örtüsü faktörü (C faktörü), 2023 yılına ait Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) değerleri ile belirlenmiştir. Sentinel-2'nin B8 (NIR, 833 nm) ve B4 (Red, 665 nm) bantları kullanılarak NDVI hesaplanmıştır. Bu bantlar 10*10 m mekânsal çözünürlüğe ve 5 günlük tekrar ziyaret süresine sahip olup, bitki örtüsü analizlerinde yüksek doğruluk sağlamaktadır (Drusch vd., 2012). Koruma önlemleri faktörü (P faktörü) ise, MODIS MCD12Q1 (2020) arazi kullanım verileri temel alınarak hesaplanmıştır.

Tüm bu faktörler, GEE platformunda işlenerek RUSLE modeli uygulanmıştır. Farklı çözünürlükteki veri setlerinin birlikte kullanılması durumunda, analizlerde en düşük çözünürlüğe sahip olan MODIS verisi (500 m) kullanılmıştır. MODIS verisi, P faktörünün mekânsal dağılımını belirlemek amacıyla kullanılmış ve analizlerin gerçekleştirildiği 30*30 m çözünürlüğe indirgenmiştir. Literatürde, P faktörünün erozyon üzerindeki etkisinin diğer faktörlere göre genellikle daha sınırlı olduğu ve birçok çalışmada bu faktörün 1 olarak kabul edildiği bilinmektedir (Renard vd., 1997). Bu çalışmada havzadaki arazi yönetimi uygulamalarının erozyon üzerindeki potansiyel etkilerini daha iyi değerlendirebilmek ve daha detaylı bir risk analizi yapabilmek amacıyla, arazi kullanımına dayalı P faktörü değerleri kullanılmıştır. P faktörü değerleri, Panagos vd. (2015) tarafından Avrupa ölçeğinde yapılan çalışmada önerilen değerler temel alınarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, havzadaki farklı arazi kullanım tiplerinin erozyon üzerindeki etkilerini daha hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Elde edilen toprak kaybı verilerinin arazi kullanım sınıflarındaki alansal dağılımını göstermek için, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından sağlanan ve Türkiye için en kapsamlı ve güncel arazi kullanım verisi olduğu düşünülen CORINE 2018 veri seti kullanılmıştır. CORINE 2018, RUSLE analizine doğrudan dahil edilmemiş, sadece toprak kaybı sonuçlarının farklı arazi kullanım sınıfları içindeki dağılımını görselleştirmek ve yorumlamak amacıyla kullanılmıştır. Sonuçlar, toprak kaybı değerlerinin doğal dağılımı dikkate alınarak oluşturulan histogram analizi yöntemiyle beş farklı risk sınıfında (çok hafif, hafif, orta, yüksek ve çok yüksek) değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan veriler ve kaynaklar Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri özellikleri ve kaynakları

Veri	Veri Özellikleri	Veri Kaynakları
Topografya	Çözünürlük: 12,5 m	ALOS PALSAR (2023)
Yağış	Yıllık Yağış Verisi (1981-2024), ~5 km	CHIRPS/PENTAD
Toprak	Ölçek: 1/100.000	T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı
Bitki Örtüsü	Sentinel-2 NDVI (B8, B4 bantları, 2023), 10 m	COPERNICUS/S2
Koruma Önlemleri	Arazi kullanım sınıfları (2020), 500 m (30 m'ye indirgenmiş)	MODIS/006/MCD12Q1
Arazi Kullanımı*	CORINE 2018, 100 m	EEA (European Environment Agency)
Veri İşleme Platformu	Çözünürlük: 30 m (analiz)	Google Earth Engine (GEE)

**CORINE 2018 arazi kullanım verileri, RUSLE analizine dahil edilmemiştir. Bu veriler, toprak kaybı verilerinin arazi kullanım sınıflarındaki alansal dağılımını göstermek amacıyla kullanılmıştır.*

2.3. RUSLE Modeli ve Uygulama Yaklaşımı

Toprak erozyon riskinin mekânsal dağılımını ortaya koymak ve bu sürece etki eden faktörleri belirlemek amacıyla RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) modeli tercih edilmiştir. RUSLE, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan, veri gereksinimi nispeten az olan ve farklı ölçeklerde uygulanabilen bir ampirik modeldir (Renard vd., 1997). RUSLE modeli, beş temel bileşenin bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır: Yağış erozyon faktörü (R), toprak erodibilite katsayısı (K), topoğrafya faktörü (LS), bitki örtüsü ve arazi kullanım faktörü (C) ve koruma uygulamaları faktörü (P) (Şekil 2).

Bu çalışmada, toplam yıllık toprak kaybı (A, t ha^{-1} y^{-1}), RUSLE modeline dayalı olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır (Renard vd., 1991):

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

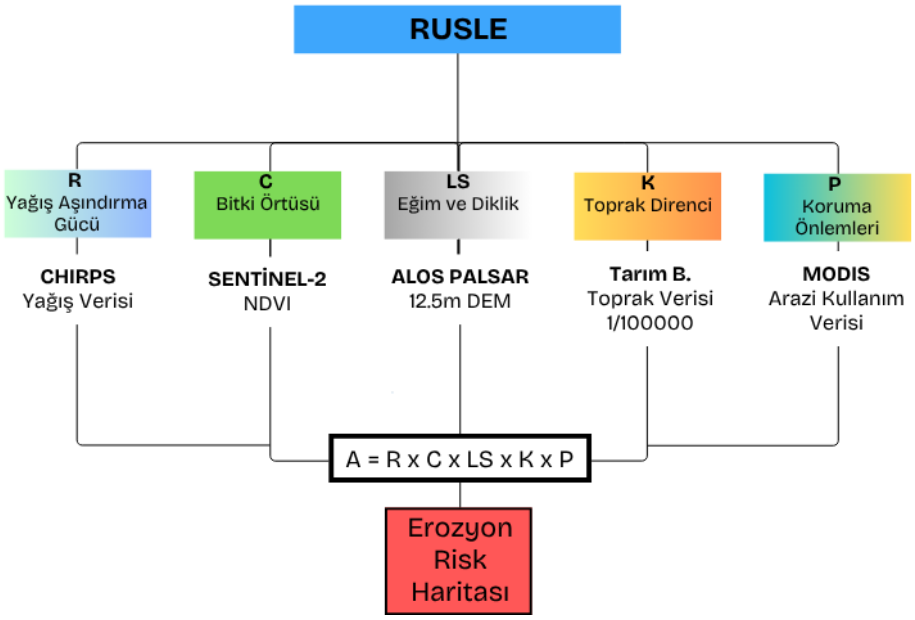
Burada:

- A: Yıllık ortalama toprak kaybı (t ha^{-1} y^{-1}),
- R: Yağış erozyon faktörü (MJ mm ha^{-1} y^{-1}),
- K: Toprak erodibilite faktörü (t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}),
- LS: Eğim uzunluğu ve eğim derecesi faktörü,
- C: Bitki örtüsü ve arazi kullanımı faktörü,
- P: Koruma uygulamaları faktörü.

Bu faktörler, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamında raster katmanlar olarak oluşturulduktan sonra, RUSLE modelinin denklemi (A = R · K · LS · C · P) her bir piksel için uygulanmıştır. Her bir piksel, belirli bir alanı (örneğin, 30 m x 30 m) temsil etmekte olup, bu pikseldeki toprak kaybı miktarı, modelin beş bileşeninin çarpımıyla hesaplanmıştır. Her bir faktörün mekânsal dağılımı, çalışma alanının tamamını kapsayacak şekilde raster formatında birleştirilmiştir.

RUSLE modeli, her pikseldeki yıllık toprak kaybını t ha^{-1} y^{-1} cinsinden hesaplar. Bu hesaplama, her pikselin alanına göre normalize edilerek gerçekleştirilir. Örneğin, bir pikselin boyutu 30 m x 30 m (0.09 ha) olduğunda, bu pikseldeki toplam toprak kaybı miktarı, hektar başına düşen yıllık kayıp miktarına dönüştürülür. Bu dönüşüm, modelin çıktılarının doğrudan t ha^{-1} y^{-1} biriminde ifade edilmesini sağlar (Nearing vd., 1989). Böylece, her bir piksel için yıllık toprak kaybı miktarı belirlenir ve bu değerler, çalışma alanının tamamı için birleştirilerek toplam toprak kaybı haritası oluşturulur.

RUSLE modelinin sağladığı en önemli avantajlardan biri, yalnızca sınıfsal erozyon riskini değil, aynı zamanda nicel bir sonuç olan t ha^{-1} y^{-1} cinsinden toprak kaybı miktarını da sunmasıdır. Bu özellik, diğer erozyon modellerinden farklı olarak hem mekânsal hem de sayısal analizlere olanak tanır (Nearing, 2013). Elde edilen sonuçlar, histogram analizi ile sınıflandırılarak erozyon risk sınıfları oluşturulmuş; aynı zamanda her bir piksel için kesin toprak kaybı miktarı da hesaplanmıştır.



Şekil 2. RUSLE model bileşenlerinin hesaplanma akışı

2.3.1. LS Faktörünün Hesaplanması

LS faktörü, topografyanın erozyon üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılan önemli bir parametredir (Renard vd., 1997). Bu çalışmada, LS faktörü, arazi eğimi ve akış birikimi haritaları temel alınarak hesaplanmıştır. Eğim sınıflandırmasında, literatürde yaygın olarak kabul edilen yaklaşım doğrultusunda, arazi eğimi %9'un altındaki düz alanlar ve %9'un üzerindeki dağlık alanlar olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmıştır (Moore & Burch, 1986).

Eğim değerlerinin radyan cinsine dönüştürülmesinde aşağıdaki formül kullanılmıştır:

$$Sloperad = sin\,(Slopedeg.\pi\ /\ 180) \qquad (2)$$

Bu dönüşüm, eğim verilerinin modellemeye uygun hâle getirilmesini sağlamış ve LS faktörünün daha doğru hesaplanmasına olanak tanımıştır. LS faktörü, GEE platformunda aşağıda belirtilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır:

Dağlık Alanlar (Eğim> %9):

$$L = Sloperad1.5 \,.\, FlowAccum0.6 \quad (3)$$

Düzlük Alanlar (Eğim ≤ %9):

$$LS = Sloperad1.3 \,.\, FlowAccum0.5 \quad (4)$$

Akış birikimi haritaları, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verilerinden türetilmiş ve yönlendirme algoritmaları yardımıyla oluşturulmuştur (Desmet & Govers, 1996). Elde edilen LS faktörü, modelin diğer bileşenleriyle entegre edilerek erozyon analizlerinde kullanılmıştır.

2.3.2. R Faktörünün Hesaplanması:

R faktörü, yağışın miktar ve şiddetini temsil ederek erozyon potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Bu çalışmada, R faktörü hesaplamalarında CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) veri seti kullanılmıştır. CHIRPS, 1981 yılından itibaren küresel ölçekte 0.05° çözünürlüklü yağış verisi sunmakta ve özellikle iklim analizlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Funk vd., 2015).

1981–2024 yıllarına ait uzun dönem günlük yağış verileri, dinamik ve güncel yapısı, yüksek mekânsal (0.05°) ve zamansal (günlük) çözünürlüğü ile geniş alanlarda yağışın mekânsal dağılımını hassas şekilde yansıtabilen CHIRPS veri setinden (UCSB-CHG/CHIRPS/PENTAD veri koleksiyonu aracılığıyla) elde edilerek yıllık ortalama yağış rasteri (hücresel veri) oluşturulmuştur. Meteoroloji istasyonlarının seyrek veya eksik olduğu bölgelerde güvenilir sonuçlar sunması ve GEE platformunda kolayca erişilebilir olması da bu tercihte etkili olmuştur. Bu veriler, Renard vd., (1997) tarafından önerilen aşağıdaki denklem kullanılarak R faktörüne dönüştürülmüştür:

$$R = 0.363 \,.\, Pyıllık + 79 \quad (5)$$

Burada, $P_{yıllık,}$ CHIRPS veri setinden elde edilen yıllık toplam yağış miktarını ifade etmektedir. Bu formül, bölgesel iklim koşullarına uyum sağlayacak biçimde literatürde sıkça kullanılmaktadır.

2.3.3. K Faktörünün Hesaplanması:

K faktörü, bir toprağın su erozyonuna karşı direnç düzeyini ifade eden ve toprakların fiziksel-kimyasal özelliklerine dayanan önemli bir parametredir. Bu çalışmada, K faktörünün hesaplanmasında, Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritaları kullanılmıştır.

Toprak haritaları, önce ArcMap 10.8 yazılımında sayısallaştırılarak sınıflandırılmış; ardından raster formata dönüştürülerek GEE ortamına aktarılmıştır. Bu aşamada, çalışma alanındaki topraklar belirli sınıflara ayrılmış ve her bir toprak türü için, literatürde yaygın olarak kabul gören ve çalışma alanımızı da kapsayan "Türkiye Büyük Toprak Gruplarının Erozyona Duyarlılık "K" Faktörleri" (Cebel vd., 2013) çalışmasında raporlanan K katsayıları arasından, bölgeye karşılık gelen değerler seçilerek modellemeye dâhil edilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Çalışmada belirlenen toprak sınıfları ve bunlara ait K faktörü değerleri

Toprak Türü	K Faktörü
Çıplak Kaya ve Molozlar	0.025
Alüvyal Topraklar	0.06
Kahverengi Topraklar	0.035
Kestane Renkli Topraklar	0.035
Kırmızımsı Kestane Renkli Topraklar	0.045
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	0.05
Hidromorfik Topraklar	0.04
Kolüvyal Topraklar	0.065
Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	0.045
Yüksek Dağ Çayır Toprakları	0.025
Kahverengi Orman Toprakları	0.03

K faktörü, bir toprağın su erozyonuna karşı ne derece dirençli olduğunu gösteren ve toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine dayanan kritik bir parametredir. Düşük K değerleri, toprağın erozyona karşı daha dayanıklı olduğunu, yüksek K değerleri ise erozyon riskinin arttığını göstermektedir (Renard vd., 1991).

Bu çalışmada, K faktörünün hesaplanmasında, sayısallaştırılan ve raster formata dönüştürülen toprak haritaları Google Earth Engine (GEE) platformuna aktarılmıştır. GEE ortamında, her bir toprak birimi, fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre ayrılarak K faktörü değerleri ilgili piksellere atanmıştır.

GEE ortamında yapılan sınıflandırmaya göre, çalışma alanında yaygın olarak bulunan alüvyal ve kolüvyal toprak türleri için literatürde önerilen K faktörü değerleri şu şekildedir: Alüvyal topraklar için K = 0.06, kolüvyal topraklar için ise K = 0.065.

Bu işlemler sonucunda, 0 ile 0.065 arasında değişen bir renk paletiyle K faktörü haritası oluşturulmuş ve erozyona karşı duyarlılığı yüksek ve düşük olan toprak alanları görsel olarak detaylandırılmıştır. Bu harita, modelin diğer bileşenleriyle entegre edilerek erozyon risk analizine dâhil edilmiştir.

2.3.4. C Faktörünün Hesaplanması

Bu çalışmada, C faktörünün hesaplanmasında Sentinel-2 uydu verilerinden türetilen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değerleri kullanılmıştır. NDVI, bitki örtüsünün yoğunluğu ve sağlığını belirlemede yaygın olarak kullanılan bir indeks olup, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır (Rouse vd., 1974):

$$NDVI = (B8 - B4)/(B8 + B4) \quad (6)$$

Burada, B8 bandı yakın kızılötesi (NIR) yansımayı, B4 bandı ise kırmızı ışık yansımayı temsil etmektedir. NDVI değerleri -1 ile +1 arasında değişmekte olup, pozitif değerler sağlıklı ve yoğun bitki örtüsünü, negatif değerler ise su yüzeyleri ve çıplak arazileri göstermektedir. 2023–2024 yıllarına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri, GEE platformunda işlenerek ortalama NDVI haritası oluşturulmuştur. Elde edilen NDVI değerleri, Van der Knijff vd. (2000) tarafından önerilen aşağıdaki denklem ile C faktörüne dönüştürülmüştür:

$$C = e\text{^}(-2.NDVI) \quad (7)$$

Bu denklem sayesinde bitki örtüsünün erozyonu önleme kapasitesi sayısal olarak ifade edilmiştir. Yoğun ve sağlıklı bitki örtüsüne sahip alanlarda C değeri düşük, çıplak veya zayıf bitki örtüsüne sahip alanlarda ise C değeri yüksek çıkmaktadır. Çalışmada elde edilen C faktörü haritaları, 0 ile 1 arasında bir renk paleti ile görselleştirilmiş ve bu sayede erozyon riski açısından bitki örtüsünün etkisi mekânsal olarak detaylı biçimde ortaya konmuştur. Literatürde yoğun bitki örtüsünün erozyonun şiddetini önemli ölçüde azalttığı vurgulanmakta olup (Renard vd., 1997), bu çalışmanın C faktörü dağılımı da bu bulgularla uyumludur.

2.3.5. P Faktörü Hesaplaması

P (koruma uygulamaları) faktörü, RUSLE modeli içerisinde, arazi kullanım biçimi ve uygulanan koruma tedbirlerinin erozyon üzerindeki etkisini yansıtan bir bileşendir. Düşük P faktörü değerleri, etkin koruma önlemlerini; yüksek değerler ise yetersiz veya hiç uygulanmayan koruma önlemlerini ifade etmektedir (Renard vd., 1997).

Bu çalışmada P faktörü, MODIS MCD12Q1 arazi kullanım verileri ile eğim sınıflarının entegrasyonu yoluyla hesaplanmıştır. GEE ortamında elde edilen veriler doğrultusunda, arazi kullanım türlerine göre P faktörü değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Ormanlık alanlar ve doğal bölgeler: P = 0.6–0.7
- Tarım alanları: P = 0.8–0.9
- Şehirleşmiş alanlar: P = 1.0

Ayrıca, eğim verileri ile arazi kullanım türleri birleştirilerek daha ayrıntılı bir mekânsal analiz gerçekleştirilmiştir:

- Eğim <%5: Yüksek koruma kapasitesi → düşük P değerleri
- Eğim> %20: Düşük koruma kapasitesi → yüksek P değerleri
- GEE platformunda yapılan analizler sonucunda, örneğin;
- Ormanlık alanlarda: P = 0.6
- Yüksek eğimli tarım alanlarında: P = 0.9
- Şehirleşmiş alanlarda: P = 1,0 olarak tanımlanmıştır.

Sonuçta elde edilen P faktörü haritaları, literatürde bildirilen erozyon riskinin arazi kullanım türlerine göre farklılık gösterdiğini net bir biçimde ortaya koymuş ve modelin mekânsal doğruluğunu artırmıştır

2.4. Erozyon Risk Haritalarının Oluşturulması ve Riskli Alanların Belirlenmesi

Modelin tüm bileşenleri, GEE platformunda elde edilen mekânsal veriler ve literatür tabanlı katsayılar kullanılarak raster formatında hesaplanmıştır. Elde edilen her bir faktör katmanı, çarpan ilişkisine dayalı olarak birleştirilmiş ve çalışma alanının tamamı için toplam toprak kaybı haritası üretilmiştir.

Oluşturulan toprak kaybı raster verisi üzerinde yapılan histogram analizi temel alınarak erozyon şiddeti, Nearing (2013) sınıflandırmasına göre beş ana sınıfa ayrılmıştır:

- Çok Hafif Erozyon: <10 t ha^{-1} y^{-1} (yeşil)
- Hafif Erozyon: 10–20 t ha^{-1} y^{-1} (sarı)
- Orta Erozyon: 20–30 t ha^{-1} y^{-1} (turuncu)
- Yüksek Erozyon: 30–40 t ha^{-1} y^{-1} (kırmızı)
- Çok Yüksek Erozyon: >40 t ha^{-1} y^{-1} (koyu kırmızı)

Bu sınıflandırma, doğal dağılıma dayalı histogram analizine göre yapılmış ve mekânsal yorumlamanın güvenilirliğini artırmıştır (Çeliknalça vd., 2014). Model çıktıları doğrultusunda, erozyon riski taşıyan bölgeler detaylı şekilde tanımlanmış ve aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- Çok Hafif ve Hafif Erozyon Bölgeleri: Genellikle düşük eğimli ve yoğun bitki örtüsüyle kaplı alanlardır. Ormanlık alanlar ve iyi yönetilen tarım arazileri bu kategoriye girmekte olup, erozyon riski oldukça düşüktür.
- Orta Seviyede Erozyon Bölgeleri: Orta eğimli tarım alanları ile parçalı bitki örtüsüne sahip açık araziler bu sınıfa dahildir. Erozyon riski orta düzeyde olup, uygun arazi yönetimi ve koruma önlemleri gerekmektedir.
- Riskli ve Yüksek Riskli Erozyon Bölgeleri: Bu alanlar, genellikle çıplak yüzeyler, yüksek eğimli yamaçlar ve koruma önlemlerinin yetersiz olduğu bölgelerden oluşmaktadır. Erozyon şiddeti yüksektir ve bu bölgelerde acil erozyon kontrol önlemleri uygulanması gerekmektedir.

Bu bulgular, çalışmanın odaklandığı havzada erozyon dinamiklerinin mekânsal dağılımını ortaya koymuş ve sürdürülebilir arazi yönetimi için kritik veriler sunmuştur. Çalışma, erozyon riski yüksek bölgelerin belirlenmesiyle, bölgedeki arazi kullanımı ve koruma stratejilerinin geliştirilmesinde rehberlik sağlamaktadır.

3. Bulgular

3.1. Çalışma Sahasında Erozyona Etki Eden Faktörler

3.1.1. Eğim

Eğim, erozyon süreçlerini doğrudan etkileyen en önemli morfometrik parametrelerden biridir. Arazi eğimi, yüzeysel akışın hem hızını hem de yönünü belirleyerek toprak kaybının şiddetini doğrudan etkilerken, yükselti ise iklim koşulları ve bitki örtüsü üzerinde dolaylı bir etkiye sahip olarak erozyon süreçlerini etkilemektedir (Şekil 3a). Porsuk Çayı Havzası'nda eğim dağılımı, genel olarak düz ve düze yakın, az eğimli, dik ve çok dik alanlar içermektedir. Havzanın yaklaşık %60'ı eğimli, dik ve çok dik yamaçlardan oluşurken, geri kalan %40'lık kısmı düz ve düze yakın alanları kapsamaktadır. Eğim ve yükselti haritaları, ALOS PALSAR DEM verileri kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3a, 3b).

Eğim değerinin yüksek olduğu bölgelerde yüzeysel akış hızlanmakta, bu durum toprak kaybını artırarak erozyon riskini önemli ölçüde yükseltmektedir Özellikle Sündiken Dağları ve Murat Dağı çevresindeki dik yamaçlarda, erozyonun daha şiddetli ve yaygın olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2. Bakı

Bakı, erozyon süreçlerini etkileyen temel morfometrik faktörlerden biridir. Yamaçların yönelimi, yağışın toplanma ve akış biçimlerini doğrudan etkileyerek, toprak kaybı ve erozyon riskinin belirlenmesinde önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Porsuk Çayı Havzası'nda kuzeye bakan yamaçlar, güneye bakan yamaçlara göre daha fazla yağış almakta ve bu durum, bu alanlarda bitki örtüsünün daha yoğun gelişmesini sağlamaktadır. Buna bağlı olarak, kuzeye bakan yamaçlarda erozyon riski daha düşüktür.

Öte yandan, güneye bakan yamaçlarda kuraklık etkisi daha belirgindir ve yağışların yüzeysel akışa dönüşme oranı daha yüksektir. Bu durum, söz konusu alanlarda toprak kaybının artmasına ve erozyon riskinin yükselmesine neden olmaktadır (Kaymak, 2020). Bakı yönündeki bu farklılıklar, havzanın mikroklimatik özellikleriyle birleşerek erozyonun

mekânsal dağılımını önemli ölçüde şekillendirmektedir. Bakı haritası, ALOS PALSAR DEM verilerinden türetilen yüzey modelleri kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3c).

3.1.3. Jeolojik Özellikler

Porsuk Çayı Havzası'nın jeolojik yapısı, erozyon süreçlerini doğrudan etkileyen önemli etmenlerden biridir. Havza, Paleozoik, Mesozoyik ve Senozoyik dönemlere ait kayaç birimlerini içermektedir (Şengör & Yılmaz, 1983).

Paleozoik döneme ait kayaçlar, özellikle mignatit ve gnays türlerinden oluşmakta olup, düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle yüzeysel akışı artırmakta ve buna bağlı olarak erozyon riskini yükseltmektedir (Bakış vd., 2008). Bu kayaçlar, havzanın kuzey ve güney kesimlerinde geniş alanlar kaplamaktadır. Mesozoyik döneme ait kayaçlar arasında Orta-Üst Jura-Alt Kretase (kireçtaşı) ve Üst Kretase (kumtaşı-çamurtaşı-riyolit) birimleri bulunmaktadır. Karbonatlı kayaçlar, yüksek geçirgenlik özellikleri sayesinde yağış sularının yer altına sızmasını kolaylaştırmakta ve yüzeysel akışı azaltarak erozyon potansiyelini düşürmektedir (Yurteri, 2024). Bu kayaçlar, havzanın doğu ve batı kesimlerinde yaygın olarak görülmektedir. Senozoyik döneme ait birimler arasında Üst Eosen-Alt Miyosen (çakıltaşı-kumtaşı-çamurtaşı) ve Kuvaterner (alüvyon, yamaç molozu, birikinti konisi) yer almaktadır. Bu birimler, düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle suyun yüzeyde kalmasına neden olmakta ve bu durum yüzeysel akış miktarını artırarak erozyon riskinin artmasına yol açmaktadır (Ocakoğlu & Akkiraz, 2019). Özellikle havzanın alüvyal düzlüklerinde bu birimler belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Topografik ve jeolojik çeşitlilik, havza genelinde erozyon riskinin mekânsal farklılıklar göstermesine yol açmaktadır. Bu çalışmada kullanılan jeoloji haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından sunulan 1/100.000 ölçekli veri setine dayanmaktadır (Şekil 3d).

3.1.4. Toprak Özellikleri

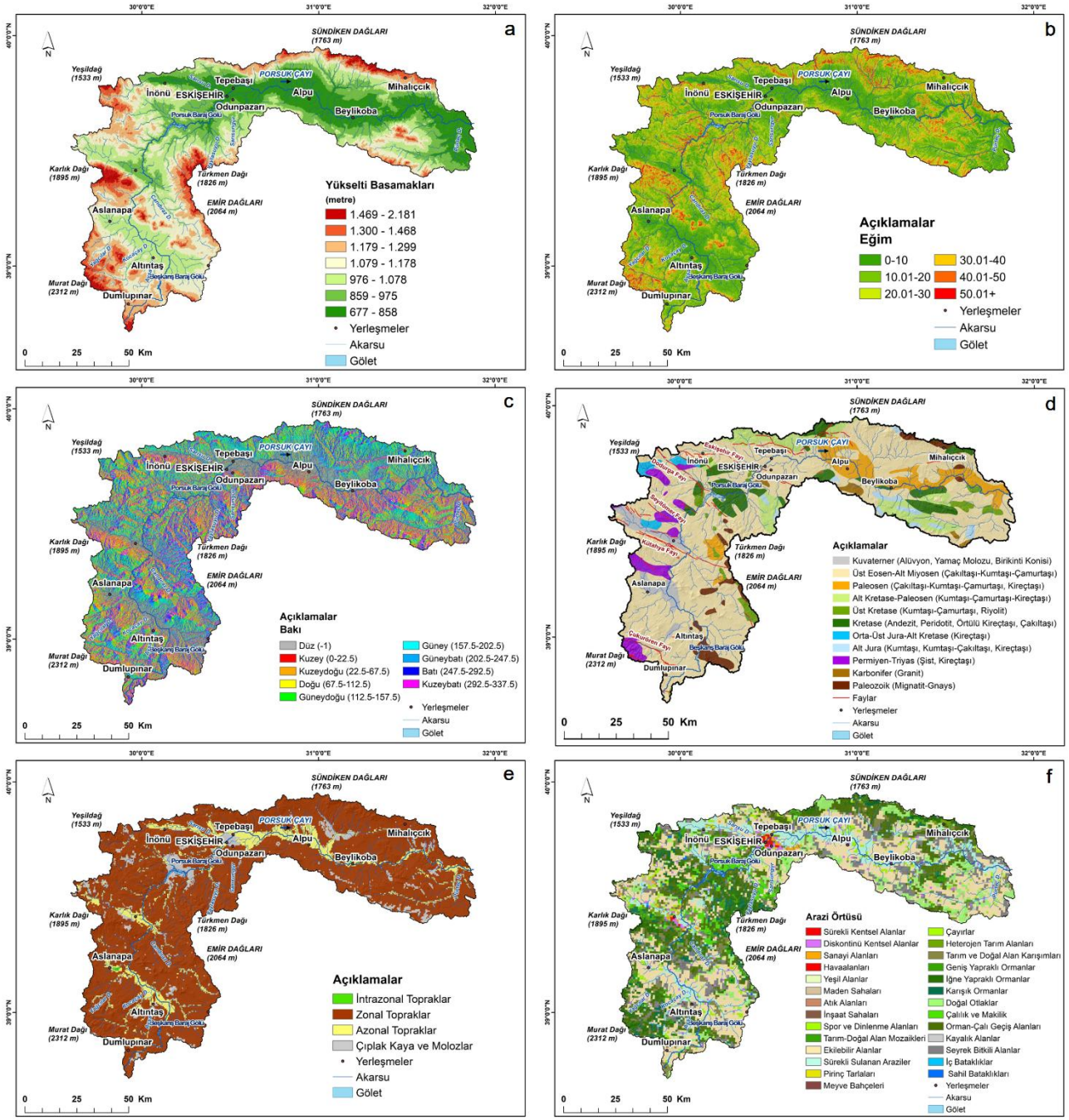
Toprak özellikleri, erozyon süreçlerinin belirlenmesinde kritik rol oynayan diğer önemli faktörlerden biridir. Porsuk Çayı Havzası'nda kahverengi orman toprakları, kahverengi topraklar, alüvyal topraklar ve kireçsiz kahverengi orman toprakları gibi çeşitli toprak türleri bulunmaktadır (Bakış vd., 2008).

Havza genelinde en yaygın toprak tipi, %45,16 oranıyla kahverengi orman topraklarıdır. Bu topraklar genellikle eğimli alanlarda yaygın olup, gevşek ve geçirgen yapıları nedeniyle yağış sularının hızla yüzeye ulaşmasına neden olmaktadır. Bu durum da erozyon riskini artırmaktadır (Güngör, 2011). Alüvyal topraklar ise daha çok havzanın düşük seviyelerinde ve akarsu vadilerinde yer almaktadır. Her ne kadar bu topraklar suyun birikmesine olanak tanısa da düşük geçirgenlik özellikleri nedeniyle yüzeysel akış miktarını artırmakta ve buna bağlı olarak erozyon riskinin yükselmesine sebep olmaktadır (Ocak vd., 2012). Çalışmada kullanılan toprak verisi, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin edilen 1/100.000 ölçekli toprak haritasına dayanmaktadır (Şekil 3e).

3.1.5. Arazi Kullanımı

Arazi kullanımı, erozyon riskini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir. Porsuk Çayı Havzası'nda tarım alanları, orman örtüsü, mera arazileri ve kentsel yerleşimler gibi farklı arazi kullanım türleri bulunmaktadır. Havza genelinde en yaygın kullanım türü, %31,85 oranıyla tarım alanlarıdır. Ancak tarımsal faaliyetler, toprağın çıplak kalma süresini uzatarak yüzeysel akışın artmasına ve dolayısıyla erozyon riskinin yükselmesine neden olmaktadır (Montgomery, 2007). Ormanlık alanlar ise özellikle eğimli yamaçlarda yüzeysel akışı sınırlayarak erozyonun önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Karaçam ve sarıçam gibi iğne yapraklı türlerin oluşturduğu orman örtüsü, bu işlevi etkin biçimde yerine getirmektedir (Anderson & Richards, 1981).

Bununla birlikte, aşırı otlatma, orman tahribatı ve yanlış arazi kullanım uygulamaları gibi insan kaynaklı müdahaleler, havzada erozyon riskini artıran başlıca etkenler arasında yer almaktadır (Öztürk & Altan, 2008). Arazi kullanım haritası, Copernicus Land Monitoring Service (2018) tarafından sunulan CORINE verisi temel alınarak oluşturulmuştur (Şekil 3f).



Şekil 3. Çalışma sahasında erozyona etki eden faktörler: a) yükselti, b) eğim, c) bakı, d) jeoloji, e) toprak ve f) arazi kullanımı

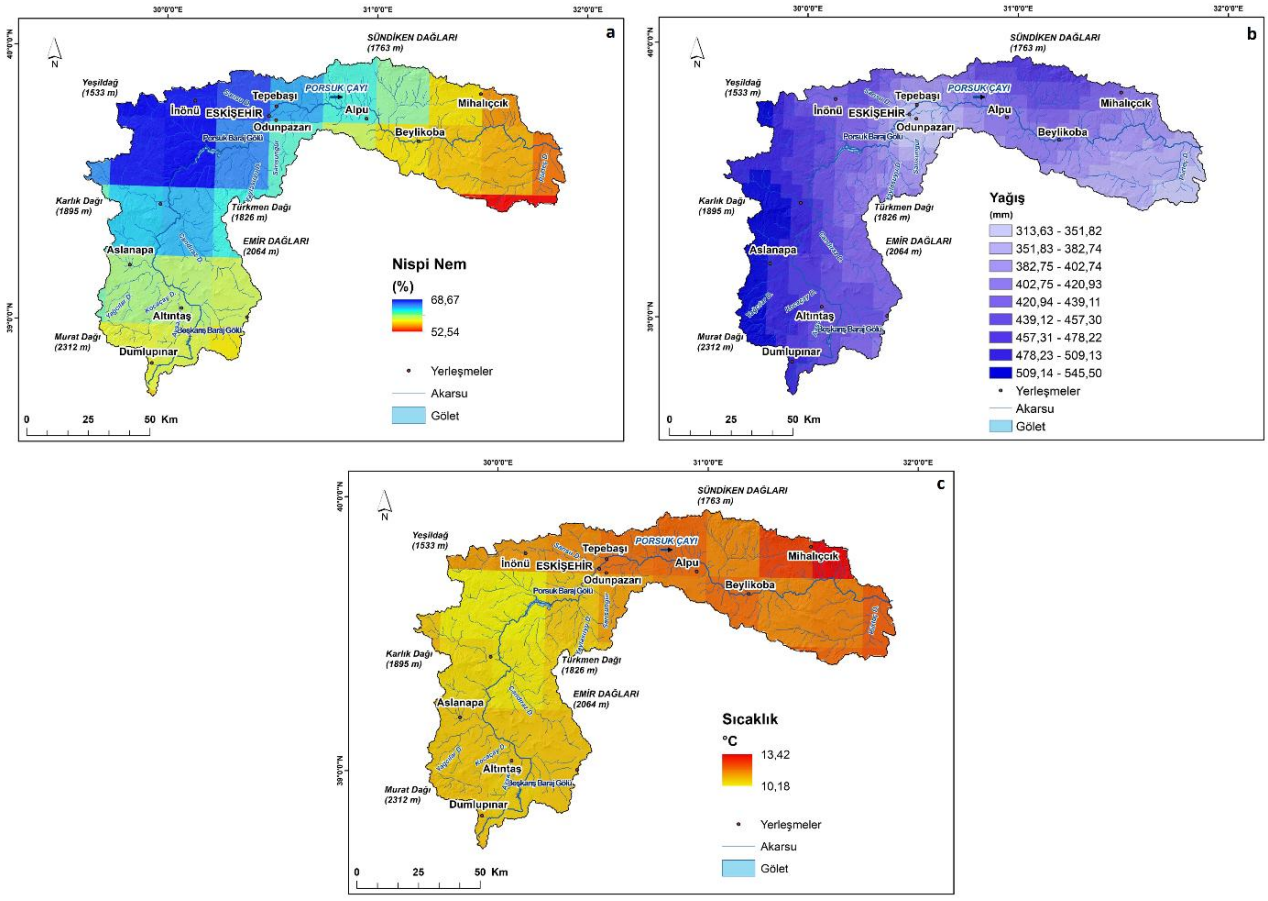
3.1.6. İklim Özellikleri

Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon süreçleri üzerinde doğrudan etkili olan temel faktörlerden biri, havzanın iklimsel özellikleridir. Havza, İç Batı Anadolu'nun coğrafi olarak geçiş bölgesinde yer almakta olup, Ege ve Marmara bölgelerinin ılıman iklimi ile İç Anadolu'nun karasal iklimi arasında bir sınır teşkil etmektedir. Bu geçiş bölgesel yapısı, havzada çeşitli mikroklimatik koşulların gelişmesine ve iklimsel çeşitliliğin belirginleşmesine neden olmaktadır. Genel olarak, kış aylarında uzun, soğuk ve yağışlı bir iklim hüküm sürerken; yaz aylarında ise sıcak ve kurak bir dönem yaşanmaktadır. Batıdan doğuya doğru ilerledikçe karasal iklim etkisi giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu iklimsel farklılıklar, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği, bitki örtüsünün dağılımı ve toprak erozyon süreçleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Öztürk & Altan, 2008).

1991–2023 dönemine ait yağış verileri incelendiğinde, havzanın yıllık ortalama yağış miktarının 494 mm olduğu belirlenmiştir. Yağışların yaklaşık %34'ü kış, %31'i ise ilkbahar mevsimlerinde gerçekleşmektedir (Şekil 4b). Ancak son yıllarda, yağış miktarları ve mevsimsel dağılımlarında gözlemlenen düzensizlikler, dikkat çekici bir trend göstermektedir. Özellikle kış aylarında meydana gelen yoğun yağışlar, eğimli alanlarda yüzey akışını artırarak erozyon riskini yükseltirken; yaz aylarındaki kuraklık, toprak neminin azalmasına ve kuraklık etkisinin artmasına yol açmaktadır (Duvan vd., 2021).

Havzanın yıllık ortalama sıcaklık değeri 11,51°C olarak belirlenmiştir. Ocak ayında en düşük sıcaklık ortalaması 0,69°C, temmuz ayında ise en yüksek sıcaklık ortalaması 22,24°C olarak kaydedilmiştir. Bu sıcaklık verileri, ERA5-Land uydu tabanlı veri setinden elde edilmiştir ve küresel düzeydeki meteorolojik değişkenlerin yüksek çözünürlükle analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Muñoz-Sabater vd., 2021). Uzun dönem sıcaklık verileri, küresel iklim değişikliği ile paralel olarak sıcaklık ortalamalarında 0,5–1,0°C arasında bir artış olduğunu göstermektedir. Bu artış, toprak neminin azalmasına yol açarak, özellikle yaz aylarında erozyon riskini artıran önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır (Şekil 4c).

Nispi nem oranı, havzanın bir diğer kritik iklimsel parametresidir. Yıllık ortalama nem oranı %61,81 olarak belirlenmiştir; Ocak ayında bu oran %68,67 ile zirveye ulaşırken, temmuz ayında %52,54 ile en düşük seviyeye inmektedir (Şekil 4a). Mevsimsel nem değişimleri, bitki örtüsünün gelişimi ve tarımsal üretkenlik üzerinde doğrudan etkili olmakta; özellikle yaz döneminde buharlaşmanın artması, su kaynakları üzerindeki baskıyı artırarak erozyon potansiyelini yükseltmektedir (Tekkanat & Sarış, 2015). Rüzgarlar genellikle "hafif rüzgâr" sınıfına girse de, çıplak ve eğimli arazilerde toprak yüzeyinin korunmasız kalması durumunda rüzgâr erozyonuna yol açabilmektedir. Özellikle kuzeybatı yönünden esen rüzgarlar, bitki örtüsünden yoksun alanlarda toprak partiküllerinin taşınmasını hızlandırarak yüzeysel toprak kaybını artırmaktadır (İnce, 2019).



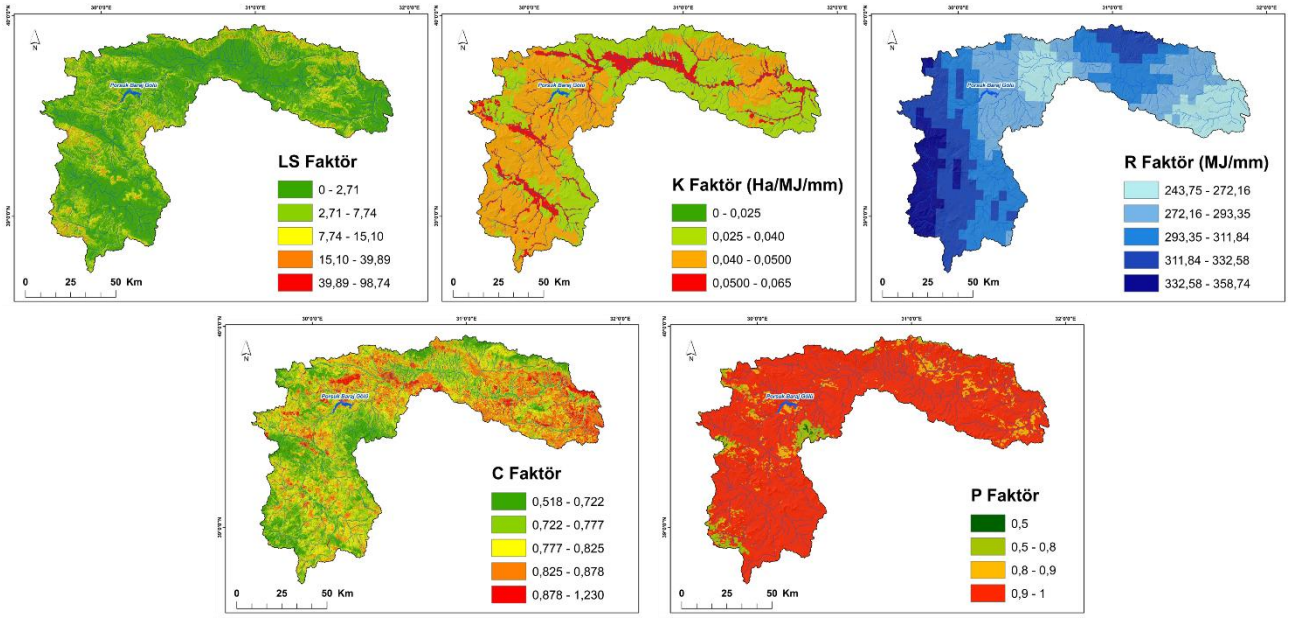
Şekil 4. Çalışma sahasının 1991-2023 yılları arası: a) ortalama nispi nem, b) yağış ve c) sıcaklık haritaları

3.2. RUSLE Faktörlerinin Mekânsal Dağılımı

Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybını etkileyen faktörlerin mekânsal dağılımları, RUSLE modelinin temel bileşenleri olan R, K, LS, C ve P parametreleri üzerinden analiz edilmiştir (Şekil 5). Bu analizler, her bir faktörün havza genelindeki etkilerini inceleyerek erozyon riskine olan katkılarını daha iyi anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

- R Faktörü (Yağış Erozovite Faktörü): Kuzeydoğu ve güneybatı bölgelerinde yüksek değerlere sahip olan bu faktör, yağış yoğunluğunun erozyon üzerindeki etkisinin bu bölgelerde belirgin olduğunu göstermektedir. Yağışın şiddeti, yüzey akışını artırarak toprak kaybını tetiklemektedir.
- K Faktörü (Toprak Erozovite Faktörü): Kolüvyal toprakların yoğun olarak bulunduğu alanlarda daha yüksek değerlere sahip olan bu faktör, toprak türlerinin erozyona karşı duyarlılığını doğrudan etkilemektedir. Özellikle gevşek ve pürüzsüz yapıya sahip topraklar, erozyon riskini artırmaktadır.
- LS Faktörü (Eğim ve Akış Birikimi Faktörü): Sündiken Dağları, Karlık Dağı ve Emir Dağları gibi eğimin yüksek olduğu dağlık alanlarda belirgin bir artış göstermektedir. Yüksek eğimli alanlarda, akış birikimi ve eğimin etkisiyle erozyon süreci hızlanmakta, bu da toprak kaybının arttığı bölgeleri ortaya koymaktadır.
- C Faktörü (Bitki Örtüsü ve Arazi Kullanımı Faktörü): Yoğun bitki örtüsüne sahip olan bölgelerde düşük, seyrek bitki örtüsüne sahip alanlarda ise daha yüksek değerlere sahiptir. Bitki örtüsünün erozyonun önlenmesindeki rolü büyük olup, yoğun örtü, toprakları koruyarak erozyonu engellemektedir.
- P Faktörü (Koruma Önlemleri Faktörü): Koruma tedbirlerinin etkin olduğu bölgelerde düşük, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlarda ise daha yüksek değerlere sahip olan bu faktör, tarımsal faaliyetlerin erozyon riskini artırma potansiyelini göstermektedir. Özellikle ormanlaştırma ve toprağın korunduğu alanlarda erozyon riski düşerken, tarım yapılan alanlarda bu risk artmaktadır.

Bu faktörlerin mekânsal dağılımı, Porsuk Çayı Havzası'nın farklı bölgelerinde etkili olan erozyon duyarlılığını ortaya koyarak, bölgedeki erozyon riskini anlamada önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 5. RUSLE faktörlerinin Porsuk Çayı Havzası'ndaki mekânsal dağılımı: a) LS faktörü, b) K faktörü, c) R faktörü, d) C faktörü ve e) P faktörü

3.3. Erozyon Risk Sınıflarının Dağılımı

RUSLE faktörlerinin birleşik değerlendirilmesi sonucunda, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon risk sınıflarının mekânsal dağılımı belirlenmiştir. Havzanın toplam yüzölçümü 1.079.744,67 hektar olup, hektar başına hesaplanan ortalama yıllık toprak kaybı 2,35 ton ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Çalışma alanındaki toplam yıllık toprak kaybı ise 2,538,269.32 ton olarak hesaplanmıştır. Erozyon risk sınıflarının ilgili alanları ve toprak kayıplarına ilişkin oranlar, Tablo 3'te sunulmuştur. Bu veriler, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon riskinin mekânsal dağılımını ve bölgesel farklılıklarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele (ÇEM) Genel Müdürlüğü'nün 2022-2025 dönemi Türkiye havza istatistiklerine göre, Sakarya Havzası'nda ortalama toprak kaybı 5.48 ton ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak tespit edilmiştir (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2022). Porsuk Çayı Havzası, Sakarya Havzası'nın bir alt havzası olmasına rağmen, bu çalışmada elde edilen 2,35 ton ha^{-1} $yıl^{-1}$ değeri, bölgesel farklılıkların ve havza özelindeki koşulların erozyon oranları üzerindeki etkisini göstermektedir.

Havzanın büyük bir kısmı, çok hafif risk sınıfı altında olup, toplam yüzölçümünün %41,01'ini kapsar ve toprak kaybının sadece %15,47'sine neden olmaktadır. Hafif ve orta risk sınıfları ise havzanın %24,43'ünü kaplamakta olup, toplam toprak kaybının %22,05'ine yol açmaktadır. Buna karşın, yüksek ve çok yüksek risk sınıfları, havzanın %34,57'lik kısmını oluşturmasına rağmen toplam toprak kaybının %62,49'ını meydana getirmektedir. Bu durum, özellikle eğim ve bitki örtüsü gibi faktörlerin erozyon riskinin arttırıcı etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Sündiken Dağları, yüksek eğim oranları ve seyrek bitki örtüsü nedeniyle erozyon riskinin en yoğun olduğu bölgelerden biridir. Mihalıççık, Altıntaş ve Aslanapa çevresinde, tarımsal faaliyetlerin yoğun olması ve ağaçlandırma eksikliklerinin yaşanması erozyon riskini arttıran önemli faktörlerdir. Karlık ve Emir Dağları ise eğim faktörünün etkisiyle yüksek risk sınıfına girmektedir. Ayrıca, özellikle Eskişehir çevresi gibi yerleşim alanları, kentsel genişleme ve tarımsal faaliyetlerin birleşimiyle yüksek risk altındaki bölgeler arasında yer almaktadır.

Bu analiz, bölgedeki erozyon riskinin yerel farklılıklarını ve bu riskin belirli alanlarda ne kadar yoğunlaştığını vurgulamaktadır. Erozyonun daha da artmaması için bu risk sınıflarına yönelik özel önlemler ve müdahaleler önerilmelidir.

Tablo 3. Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybı risk sınıfları ve dağılımları

Sınıf	Kapladığı Alan (ha)	Kapladığı Oran (%)	Kaybedilen Toprak (ton)	Kayıp Oranı (%)	Hektar Başına Kayıp (ton ha^{-1} y^{-1})
Çok Hafif (<10)	442775.07	41.01	392,653.94	15.47	0.58
Hafif (10-20)	160090.65	14.83	283,921.36	11.19	1.46
Orta (20-30)	103610.07	9.60	275,642.29	10.86	2.35
Yüksek (30-40)	77829.30	7.21	276,072.11	10.88	3.24
Çok Yüksek (>40)	295439.58	27.36	1,309,979.62	51.61	4.12
Toplam	**1,079,744.67**	**100.00**	**2,538,269.32**	**100.00**	**2.35**

3.4. Arazi Kullanım Sınıflarına Göre Toprak Kaybı

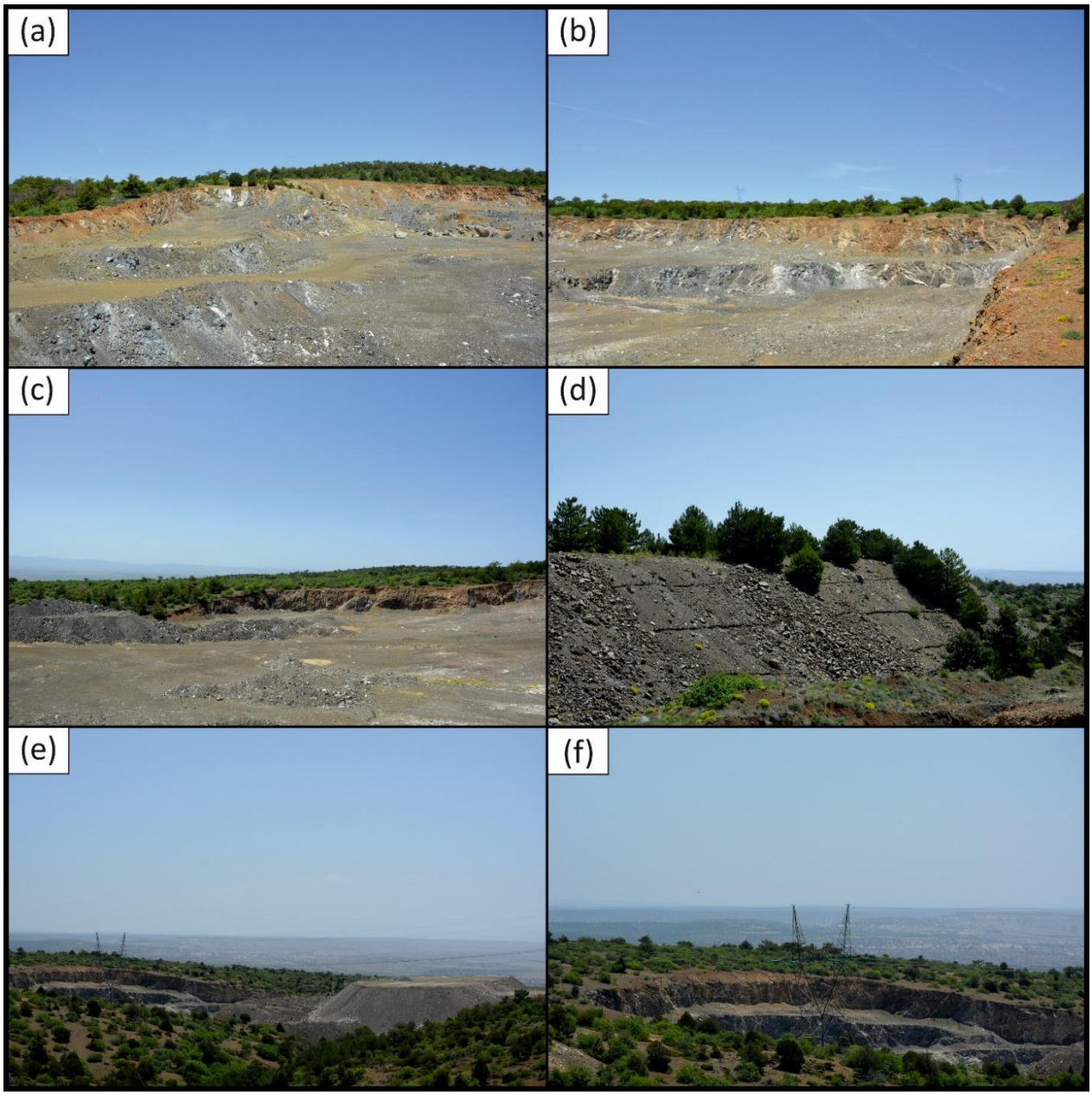
Toprak kaybı miktarları, Avrupa Birliği tarafından geliştirilen ve arazi örtüsü/arazi kullanımı değişimlerinin izlenmesinde yaygın olarak kullanılan CORINE (Coordination of Information on the Environment) arazi sınıflandırması temel alınarak analiz edilmiştir. CORINE, Avrupa'nın arazi örtüsü hakkında tutarlı ve karşılaştırılabilir veri sağlaması, farklı ülkeler ve bölgeler arasında analiz yapma imkânı sunması nedeniyle tercih edilmiştir (Büttner, 2014). Çalışma alanının toplam büyüklüğü 1.079.744,67 hektar olup, toplam yıllık toprak kaybı 2,538,269.32 ton olarak hesaplanmıştır. Ekilebilir alanlar, toplam alanın %29,91'ini kapsamakta olup, bu alanlar toplam toprak kaybının %28,62'sine karşılık gelmektedir. Özellikle Altıntaş ve Aslanapa çevresinde yüksek toprak kaybı gözlemlenmiştir. Bu alanları orman-çalı geçiş alanları takip etmektedir; bu alanlar toplam yüzölçümünün %14,93'ünü oluşturmakta ve toprak kaybına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Tablo 4). Özellikle Mihalıççık çevresinde erozyon riski yüksek olarak tespit edilmiştir.

Bu bulgular, arazi kullanım türlerinin erozyon üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu ekilebilir alanlarda erozyonun arttığı ve bu bölgelerde alınacak koruma önlemlerinin ne denli önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ekilebilir alanlar ve orman-çalı geçiş alanları gibi bölgelerde erozyon riskini azaltmaya yönelik tedbirlerin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu tedbirler, yerel ekosistemleri koruma ve toprak kaybını en aza indirme açısından büyük bir öneme sahiptir.

Tablo 4. Arazi sınıflarına göre toprak kaybı alan ve oranları

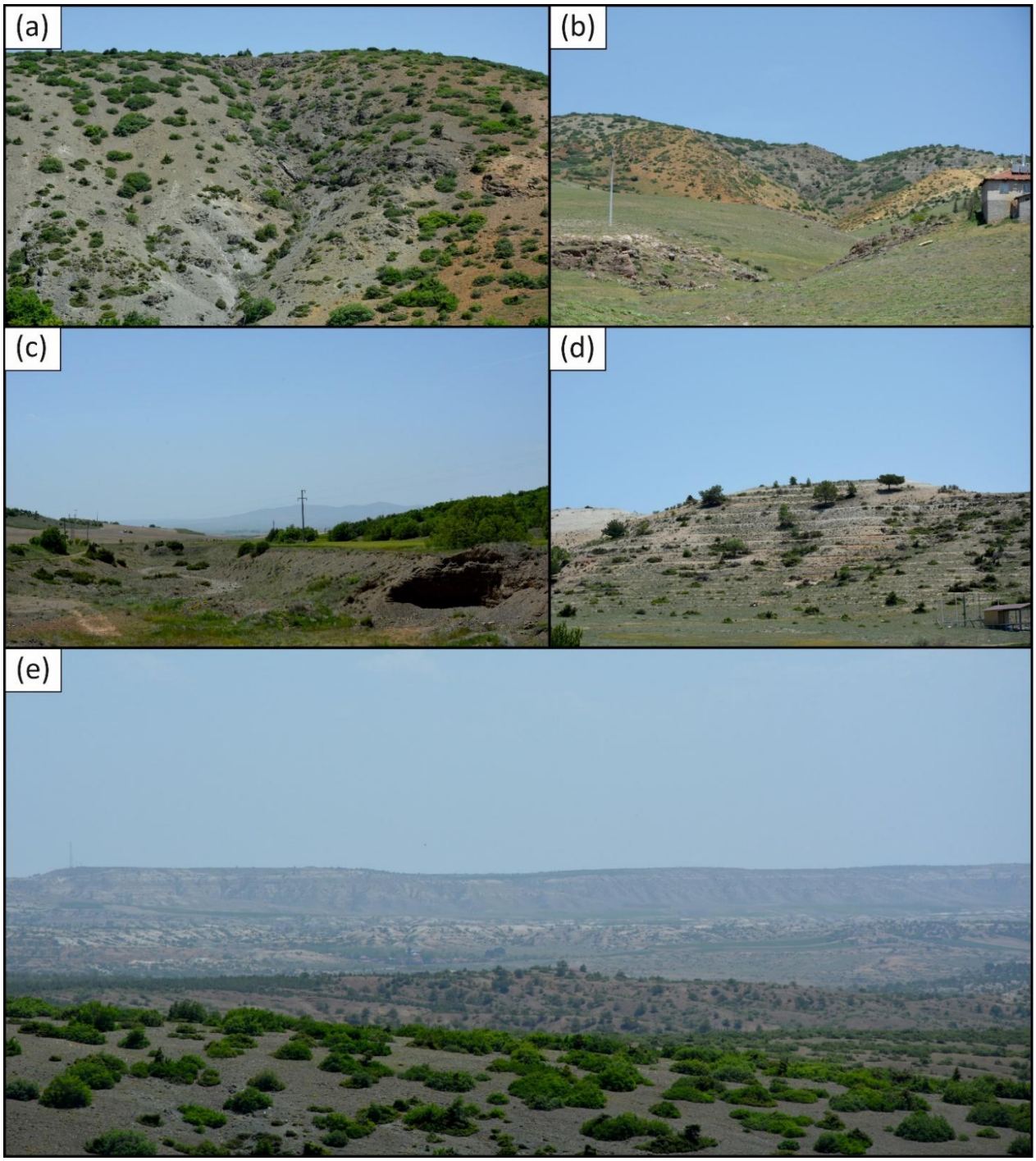
Arazi Sınıfı (CORINE)	Alan (ha)	Oran (%)	Toplam Toprak Kaybı (ton)
211-Ekilebilir Alanlar	322,867.18	29.91	726,467.87
324-Orman-Çalı Geçiş Alanları	161,229.92	14.93	362,767.03
212-Sürekli Sulanan Araziler	107,355.19	9.94	241,402.80
333-Seyrek Bitkili Alanlar	86,476.92	8.01	194,611.80
321-Doğal Otlaklar	80,015.73	7.41	180,077.40
312-İğne Yapraklı Ormanlar	73,642.96	6.82	165,873.14
243-Tarım ve Doğal Alan Karışımları	64,166.87	5.94	144,475.56
231-Çayırlar	33,455.67	3.10	75,480.68
323-Çalılık ve Makilik	26,725.79	2.48	60,319.53
311-Geniş Yapraklı Ormanlar	23,589.64	2.19	53,156.23
313-Karışık Ormanlar	22,885.94	2.12	51,975.27
242-Heterojen Tarım Alanları	14,592.03	1.35	32,875.41
112-Kentsel Alanlar	11,501.79	1.06	26,423.14
121-Sanayi Alanları	5,274.74	0.49	12,111.92
131-Maden Sahaları	7,276.76	0.67	16,723.88
141-Yeşil Alanlar	1,581.14	0.15	3,634.71
332-Kayalık Alanlar	1,160.73	0.11	2,672.76
133-İnşaat Sahaları	738.22	0.07	1,636.61
213-Pirinç Tarlaları	633.51	0.06	1,403.30
222-Meyve Bahçeleri	528.07	0.05	1,170.10
142-Spor ve Dinlenme Alanları	421.85	0.04	935.01
244-Tarım-Doğal Alan Mozaikleri	421.85	0.04	935.01
411-İç Bataklıklar	316.71	0.03	702.82
421Sahil Bataklıkları	3,794.38	0.35	8,417.76
111-Sürekli Kentsel Alanlar	3,055.99	0.28	6,782.96
124-Havaalanları	210.68	0.02	467.31
132-Atık Alanları	210.68	0.02	467.31
Toplam	**1,079,744.67**	**100.00**	**2,538,269.32**

Porsuk Çayı Havzası'nda RUSLE modeli sonuçlarının yerinde doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı saha çalışmaları, havzanın farklı bölgelerinde hem doğal hem de antropojenik faktörlerin etkisiyle gelişen erozyon süreçlerini ayrıntılı biçimde belgelemektedir. Özellikle Kozlubel Köyü'nün kuzey kesimleri, Kozlubel-Söğütçük yolu arasındaki yamaçlar ve Alpu ilçesi yakınlarındaki Sündiken Dağları yamaçlarında yoğunlaşan arazi gözlemleri, insan faaliyetlerinin erozyon üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. Şekil 6'da sunulan antropojenik etkilere bakıldığında, maden çıkarım sahalarının (Şekil 6a, 6b ve 6c) doğal arazi örtüsünü tamamen ortadan kaldırarak yüksek düzeyde erozyon riski oluşturduğu görülmektedir. Bu alanlarda üst toprak katmanının kaldırılması ve bitki örtüsünün yok edilmesi, toprağın erozyona karşı direncini önemli ölçüde azaltmaktadır. Şekil 6d'de görülen heyelan ve toprak kayması riskini azaltmaya yönelik alınan sınırlı önlemler ise, antropojenik müdahalelerin yol açtığı erozyon süreçlerini kontrol altına alma çabalarını yansıtmaktadır. Ayrıca, Şekil 6e'de maden işletmelerinden çıkan atık malzeme ve molozların vadi tabanına kontrolsüz biçimde depolanmasının, doğal sediment taşınım süreçlerini kesintiye uğratarak vadinin hidrojeomorfolojik dengesini bozduğu tespit edilmiştir. Bu durum, aşağı havzadaki doğal sediment bütçesini değiştirerek yeni erozyon alanlarının oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Şekil 6f ise, havza genelinde antropojenik etkilerin yaygınlığını gösteren panoramik bir görünüm sunmakta ve insan faaliyetlerinin doğal peyzaj üzerindeki geniş ölçekli dönüştürücü etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Çalışma sahasındaki antropojenik etkilerin gösterimi: maden çıkarım sahalarındaki tahribatın erozyon süreçlerine etkisi (a, b, c), erozyon riskini azaltmak için alınan tedbirler (d), maden işletmelerinden çıkan atık malzeme ve molozların vadi tabanına kontrolsüz biçimde depolanması (e, f)

Havzada gözlemlenen doğal erozyon süreçleri ise Şekil 7'de belgelenmiştir. Şekil 7a ve 7b'de, eğimli yamaçlarda seyrek bitki örtüsü nedeniyle gelişen yüzey erozyonu örnekleri yer almaktadır. Bu alanlarda bitki örtüsünün yetersizliği ve eğim faktörü, erozyon şiddetini artıran başlıca etmenlerdir. Yağış sularının etkisiyle toprak parçacıklarının taşınması ve ince oyuntuların oluşumu bu bölgelerde belirgin şekilde gözlenmiştir. Şekil 7c'de ise, daha ileri aşamadaki bir erozyon süreci olan yarıntı erozyonu görülmektedir. Bu tür erozyon, yoğun yağışlar sonrasında yüzey akışının belirli hatlarda yoğunlaşmasıyla oluşmakta ve önemli miktarda toprak kaybına yol açmaktadır. Söğütçük Köyü civarında uygulanan teraslama yöntemi (Şekil 7d), eğimli yamaçlarda basamaklar oluşturarak yüzey akışının hızını azaltmakta ve toprağın yerinde tutulmasını sağlayan etkili bir erozyon kontrol önlemi olarak öne çıkmaktadır. Şekil 7e'de ise Sündiken Dağları'nın yamaçlarında gözlemlenen geniş ölçekli erozyon alanlarının uzaktan görünümü, yüksek eğim, seyrek bitki örtüsü ve uygun olmayan arazi kullanımı gibi faktörlerin birleşiminin bölgesel ölçekte erozyon riskini artırdığını göstermektedir.



Şekil 7. Çalışma sahasındaki doğal erozyon süreçlerinin gösterimi: yüzey ve yarıntı erozyon tiplerinin görünümü (a, b, c) ve alınan tedbirler (d, Söğütçük köyü), Sündiken Dağları'nın yamaçlarında gözlemlenen erozyon alanlarının görünümü (e)

Saha gözlemleri, RUSLE modeli sonuçlarıyla büyük ölçüde uyumlu bulgular sunmuştur. Özellikle Sündiken Dağları'nın güneye bakan yamaçlarında gözlemlenen yoğun erozyon izleri, modelde yüksek ve çok yüksek risk sınıfında gösterilen alanlarla örtüşmektedir. Benzer şekilde, maden çıkarım sahalarında insan eliyle oluşturulan yapay erozyon alanları da modelde yüksek risk taşıyan bölgelerle uyumludur. Arazi çalışmaları sırasında önemli bir husus olarak, RUSLE modelinin Sentinel-2 uydu görüntülerinden türetilen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) değerlerine dayalı olarak hesaplanan C faktörü ve diğer parametreler üzerinden bir değerlendirme yaptığı tespit edilmiştir. Model, mevcut bitki örtüsü yoğunluğu ve arazi koşullarına dayalı bir risk değerlendirmesi sunmakta; ancak erozyonun doğal mı yoksa antropojenik kökenli mi olduğunu ayırt edememektedir. Bu nedenle, arazi gözlemleri, maden sahalarındaki antropojenik erozyon ile doğal yamaç süreçlerinin ayrımının yapılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Nitekim bazı bölgelerde, yoğun toprak taşınımının vadi tabanında doğal birikim alanları oluşturması beklenirken, maden sahalarından çıkarılan fazla malzemenin vadi içlerine kontrolsüz biçimde yığılması nedeniyle bu doğal sürecin engellendiği gözlemlenmiştir. Bu durum, antropojenik faktörlerin havzadaki doğal erozyon ve sedimentasyon dinamiklerini nasıl değiştirebildiğini açıkça göstermektedir.

Havzanın genişliği nedeniyle, Altıntaş, Aslanapa, Emirdağ, Kütahya'nın batı kesimleri, Uşak ve Afyonkarahisar sınırındaki bazı alanlar ile Murat Dağı çevresi gibi ulaşılması güç veya zaman kısıtlaması nedeniyle gözlem yapılamayan bölgelerde, erozyon riski modelleme sonuçları, literatür ve uzaktan algılama verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu alanlarda da özellikle yüksek eğimli ve bitki örtüsü zayıf yamaçlarda benzer erozyon süreçlerinin etkili olduğu öngörülmektedir. Sonuç olarak, RUSLE modelinin nicel sonuçlarını doğrulayan arazi çalışmaları, erozyon süreçlerinin doğal mı yoksa antropojenik mi olduğunu ayırt etme imkânı sağlamış; bu ayrım ise havzada erozyon kontrolüne yönelik stratejilerin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Porsuk Çayı Havzası'ndaki erozyon süreçlerini etkileyen faktörlerin mekânsal dağılımını ve erozyon riskinin farklı bölgelerde nasıl değiştiğini ortaya koymuştur. Yapılan analizler, eğim, yağış ve bitki örtüsü gibi faktörlerin erozyon üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir (Şekil 8).

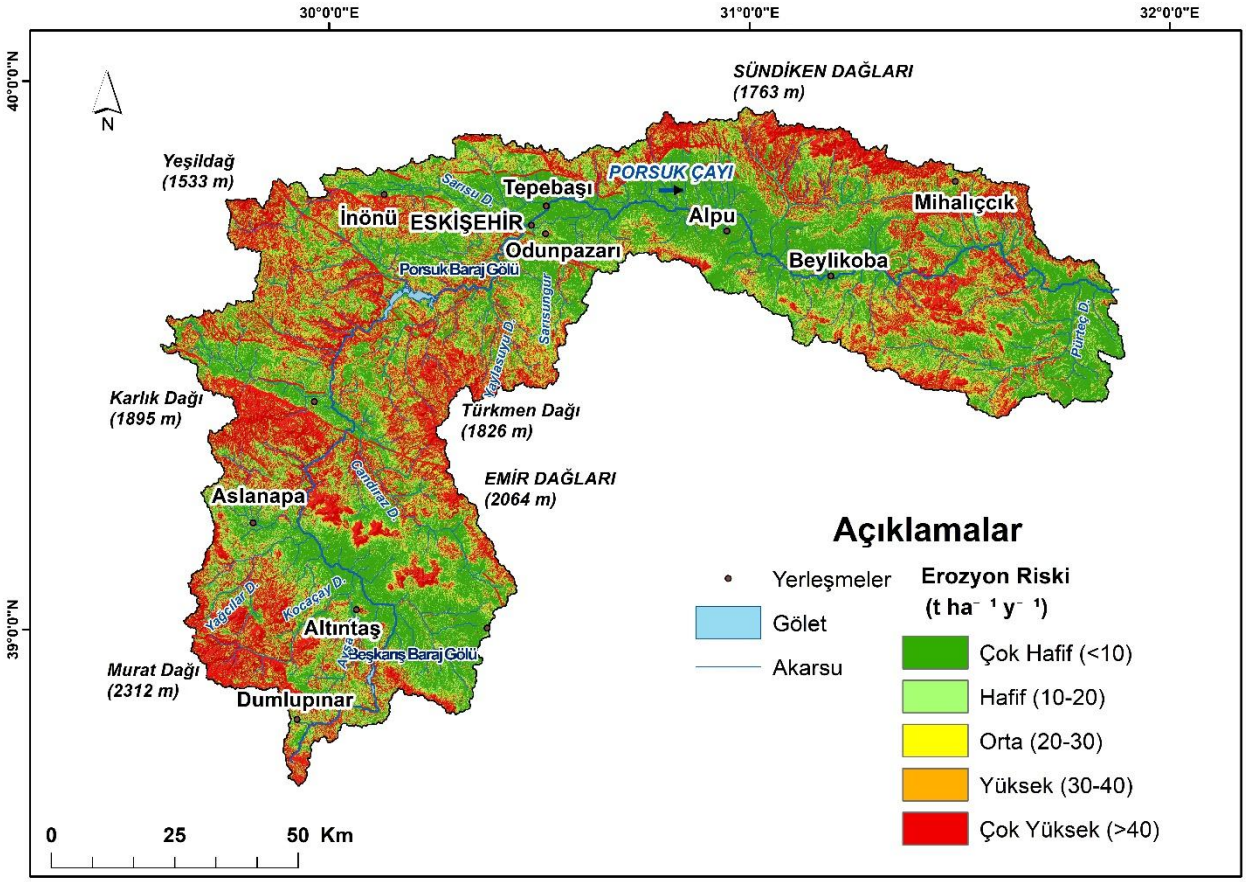
Yağış (R faktörü) ve eğim (LS faktörü) gibi faktörler, erozyon riskini belirlemede kritik rol oynamaktadır. R faktörü, havzada yağış kaynaklı erozyonun yüksek olduğunu ve ortalama 25393 (MJ mm ha^{-1} y^{-1}) olarak hesaplanan bu değerin, bölgede toprak kaybının önemli bir kısmını oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğimin yüksek olduğu alanlarda, özellikle LS faktörünün etkisiyle erozyon riski daha da artmaktadır. Sündiken, Karlık ve Emir Dağları gibi yüksek eğimli bölgelerde, LS değeri maksimum 98.74'e kadar çıkmakta ve bu alanlarda aşırı yüksek erozyon riski belirlenmiştir. Bu durum, eğimin ve yağışın birleşiminin erozyon üzerindeki etkisinin ne kadar büyük olduğunu vurgulamaktadır. Bitki örtüsü ve arazi kullanımı (C faktörü), erozyon riskinin arttığı bölgelerde, çıplak ve tarımsal alanların etkisini pekiştirmektedir. Bu tür alanlarda, bitki örtüsünün yetersizliği nedeniyle yağmur damlalarının doğrudan toprak yüzeyine çarpması ve yüzey akışını artırarak erozyonu tetiklemesi gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, ormanlık alanlarda bitki örtüsünün koruyucu etkisi sayesinde erozyon oranlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, P faktörünün (koruma önlemleri) düşük olduğu bölgelerde erozyon riski önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum erozyon kontrolüne yönelik tedbirlerin alınmasının gerekliliğini göstermektedir.

Havzanın toplam hektar başına yıllık ortalama toprak kaybı 2.35 ton ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak hesaplanırken, toplam yıllık toprak kaybı 2,538,269.32ton olarak belirlenmiştir. Özellikle eğimli alanlarda, yüksek yağışlar ve yüzey akışı birleşerek erozyonun şiddetini artırmaktadır. Bu bağlamda, eğimli alanlarda erozyonun daha fazla olduğu ve düzlük alanlarda riskin azaldığı gözlemlenmiştir. Yerel iklim verilerinin ve arazi kullanımı verilerinin birlikte değerlendirilmesi, erozyon süreçlerini etkileyen faktörler arasında güçlü bir etkileşimin varlığını ortaya koymuştur. Kuzeydoğu bölgelerindeki yoğun yağış, özellikle tarım alanlarındaki bitki örtüsünün yetersizliği nedeniyle erozyon riskini arttırmaktadır. Bu etkileşim, LS faktörü yüksek olan bölgelerde daha belirgindir.

Porsuk Çayı Havzası'ndaki bulgular, Türkiye'nin diğer havzalarındaki erozyon süreçleriyle karşılaştırıldığında, özellikle kullanılan veri setlerinin ve modelleme tekniklerinin önemli bir fark yarattığını göstermektedir. Karaş vd. (2009) tarafından yapılan Sakarya-Porsuk-Sarısu Havzası çalışmasında yıllık ortalama potansiyel toprak kaybı 1.88 t/ha/yıl olarak hesaplanmışken, bu çalışmada daha güncel veriler ve gelişmiş modelleme teknikleri kullanılarak hektar başına ortalama yıllık toprak kaybı 2.35 ha^{-1} $yıl^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu farklılık, kullanılan yöntemlerin ve veri kaynaklarının erozyon risk analizlerinde doğruluğu artırdığını göstermektedir. Ayrıca, Karaş vd. (2009) çalışmasında havzanın %79,22'sinin yüksek erozyon riski taşıdığı belirtilmişken, bu çalışmada yüksek ve çok yüksek riskli alanların oranı %34,57 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, kullanılan veri setlerinin ve modelleme tekniklerinin erozyon risk analizlerine büyük katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Porsuk Çayı Havzası'nda erozyon riskinin mekânsal dağılımı belirlenmiş ve bu dağılımın, bölgenin fiziki ve beşerî coğrafya özelliklerinden doğrudan etkilendiği görülmüştür. Yüksek eğimli bölgeler, yüzey akışını artırarak erozyonun şiddetini artırmaktadır. Ayrıca, bakı, jeolojik yapı ve toprak özellikleri gibi faktörler de erozyon süreçlerinin hızlanmasına neden olmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, erozyon riskini azaltmaya yönelik olarak özellikle yüksek eğimli alanlarda ağaçlandırma ve teraslama gibi önlemlerin artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca, erozyon analizlerinde farklı modellerin bir arada kullanılması, daha güçlü ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. RUSLE ve ICONA gibi modellerin birleştirilmesi, erozyon duyarlılığının mekânsal dağılımını ve toprak kaybı miktarını daha doğru bir şekilde ortaya koyma potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, yerel koşulların dikkate alındığı daha spesifik ve uygulanabilir erozyon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, toprak kaybını azaltmada önemli bir rol oynayacaktır. Özellikle, yüksek eğimli bölgelerde *Pinus sylvestris* (Sarıçam) ve *Juniperus communis* (Ardıç) gibi yerel türlerin kullanıldığı yoğun ağaçlandırma çalışmaları yapılmalı ve bu ağaçlandırma, toprak kaymasının sık görüldüğü yamaçlarda 2x2 metre aralıklarla gerçekleştirilmelidir.

Eğimli tarım arazilerinde ise kontur teraslama uygulanmalı ve teraslar, %15'ten fazla eğime sahip arazilerde 5 metre genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde olacak şekilde inşa edilmelidir. Mihalıççık çevresindeki yüksek erozyon riskine sahip orman-çalı geçiş alanlarında, yangın riskini azaltmaya yönelik önlemler alınmalı ve bu alanlarda erozyonu önleyici bitki türleri kullanılarak rehabilitasyon çalışmaları yapılmalıdır. Erozyon kontrolü çalışmalarının başarısı için yerel halkın katılımı büyük önem taşımaktadır. Belediyeler ve sivil toplum kuruluşları, erozyonun nedenleri ve sonuçları hakkında farkındalık yaratma çalışmaları yürütmeli ve toprak yönetimi konusunda çiftçilere eğitimler vermelidir. Bu tür spesifik ve yerel koşullara uygun erozyon yönetimi stratejileri, Porsuk Çayı Havzası'nda toprak kaybını azaltmada etkili olacaktır (Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 2024; Görcelioğlu, 1996).



Şekil 8. Porsuk çayı havzası RUSLE sonuç haritası

Katkı Belirtme ve Teşekkür

Bu çalışma, sorumlu yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Arazi çalışmalarındaki değerli destekleri için Doç. Dr. Levent Uncu ve Dr. Öğr. Üyesi Arda Bay'a teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışma sürecinde yapıcı katkılarından dolayı editör ve hakemlere şükranlarımızı sunarız.

Kaynaklar

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for remote sensing big data analysis: A comprehensive tutorial. *Remote Sensing, 12*(15), Article 2503. https://doi.org/10.3390/rs12152503

Anderson, M. G., & Richards, K. S. (1981). Geomorphological aspects of slopes in mudrocks of the United Kingdom. *Quarterly Journal of Engineering Geology, 14*(4), 363–372. https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1981.014.04.13

Atalay Dutucu, A., & Mutlu, Y. E. (2022). Yuvacık Barajı Havzası'nda Erozyon risk analizi. *Ege Coğrafya Dergisi, 31*(2), 289–303. https://doi.org/10.51800/ecd.1133879

Ataol, M., & Köle, M. M. (2016, May 23–26). *Kızılırmak Deltası'nda 2000-2015 yılları arasında gözlenen kıyı erozyonu* [Conference presentation]. 4th International Geography Symposium (GEOMED 2016), Kemer, Antalya, Türkiye.

Avcı, V., Sunkar, M., & Toprak, A. (2017). Malatya kuzeydoğusunda Ballı ve Memikan dereleri arasındaki sahanın erozyon duyarlılık analizi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (27)*, 769–799.

Avcıoğlu, A., Bayrakdar, C., Sarı, E., & Kaya, T. N. A. (2020). TanDEM-X12 m sayısal yükselti verisine dayalı toprak erozyonu tespiti (RUSLE). *Coğrafya Dergisi, (41)*, 93–107. https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0047

Aykır, D., & Fıçıcı, M. (2022). Çıldır Gölü Havzasında erozyon risk analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 9*, 38–49. https://doi.org/10.46453/jader.1144699

Bakış, R., Altan, M., Gümüşlüoğlu, E., Tuncan, A., Ayday, C., Önsoy, H., & Olgun, K. (2008). Porsuk Havzası su potansiyelinin hidroelektrik enerji üretimi yönünden incelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*(2), 125–162.

Bozyiğit, R., & Kaya, B. (2017). Altınapa Barajı Havzasında (Konya) erozyon ve önlemler. *Marmara Coğrafya Dergisi, 36*, 285–303. https://doi.org/10.14781/mcd.331368

Büttner, G. (2014). Land cover information in Europe. *Land Use Policy, 38*, 589–594. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.007

Cebel, H., Akgül, S., & Doğan, O., & Elbaşı, F. (2013). Erodibility "K" factor of great soil groups in Turkey. *Toprak Su Dergisi, 2*(1), 30–45.

Clark, G., & Jacks, D. (2007). Coal and the industrial revolution, 1700–1869. *European Review of Economic History, 11*(1), 39–72. https://doi.org/10.1017/S1361491606001870

Copernicus Land Monitoring Service. (2018). *CORINE land cover (CLC) 2018 raster (100 m)* [Data set]. European Environment Agency (EEA). https://land.copernicus.eu/en/mapviewer?product=130299ac96e54c30a12edd575eff80f7

Çeliknalça, O. E., Demirci, R., & Elmas, Ç. (2014). Renkli görüntülerin üç boyutlu histogram yardımıyla ayrıştırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3*(1), 38–44.

Çetin, H. C. (2011). *Porsuk Çayı Havzası yönetim stratejilerinin belirlenmesinde DPSIR yaklaşımının kullanılması* [Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Çilek, A., & Berberoğlu, S. (2013, 6–8 Kasım). *Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla Seyhan Havzasında PESERA ve RUSLE erozyon modellerinin kıyaslanması* [Bildiri sunumu]. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye.

Çilek, A., Berberoğlu, S., Erdoğan, M. A., & Dönmez, C. (2014, 8–10 Ekim). *PESERA ve RUSLE erozyon modellerinin Akdeniz ve Ege havzalarındaki sonuçlarının karşılaştırılması* [Bildiri sunumu]. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZAL-CBS 2014), İstanbul, Türkiye.

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2021). *Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS)*. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://cem.csb.gov.tr/dinamik-erozyon-modeli-ve-izleme-sistemi-demis-i-108100

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2022). *2022 su erozyonu istatistikleri*. https://cem.csb.gov.tr/2022-su-erozyonu-istatistikleri-i-112579

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü. (2024). *Türkiye'de erozyon*. https://cem.csb.gov.tr/turkiye-de-erozyon-i-103687

Danacıoğlu, Ş., & Tağıl, Ş. (2017). Bakırçay Havzasında RUSLE modeli kullanarak erozyon riskinin değerlendirmesi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 20*(37), 23–39. https://doi.org/10.31795/baunsobed.645168

Değerliyurt, M. (2013). Antakya şehri ve yakın çevresinde meydana gelen erozyonun coğrafi dağılışı ve analizi. *Turkish Studies, 8*(8), 1745–1764. https://doi.org/10.7827/TurkishStudies.5501

Demirtaş, İ. (2024). Dinamik Erozyon Modeli ve İzleme Sistemi (DEMİS) ile ulusal ölçekte arazi kullanım türüne göre erozyon istatistiklerinin belirlenmesi. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 1*(Özel Sayı), 148–167.

Desmet, P. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation, 51*(5), 427–433.

Dorak, S., & Aşık, B. B. (2018). Sakarya ili Taraklı ilçesi sulama suyu kaynaklarının su kalitesinin belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi, 1. Uluslararası Tarımsal Yapılar ve Sulama Kongresi Özel Sayısı*, 265–273.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120,* 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

Dursun, İ., & Babalık, A. A. (2023). Burdur Gölü Havzasındaki morfometrik parametrelerin ve erozyon durumunun değerlendirilmesi. *Turkish Journal of Forestry, 24*(1), 25–38. https://doi.org/10.18182/tjf.1205157

Duvan, A., Aktürk, G., & Yıldız, O. (2021). Meteorolojik kuraklığın zamansal ve alansal özelliklerine iklim değişikliğinin etkisi, Sakarya Havzası örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 3*(2), 207–217.

Eraslan, S., İmamoğlu, A., Coşkun, A., Saygın, F., & Dengiz, O. (2016, 18–21 Mayıs). İnebolu Havzası topraklarının erozyon duyarlılıklarını belirlenmesinde agregat ve strüktür stabilite durumları, arazi örtüsü ile olan ilişkileri [Bildiri sunumu]. *Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*, Antalya, Türkiye.

Erinç, S. (1973). Türkiye'nin şekillenmesinde neotektoniğin rolü ve jeomorfoloji–jeodinamik ilişkileri. *Jeomorfoloji Dergisi, 5*(1), 11–26.

Erkal, T., & Yıldırım, Ü. (2012). Soil erosion risk assessment in the Sincanlı sub-watershed of the Akarçay Basin (Afyonkarahisar, Turkey) using the universal soil loss equation (USLE). *Ekoloji, 21*(84), 18–29.

Erol, O. (2003). Ceyhan Deltasının jeomorfolojik evrimi. *Ege Coğrafya Dergisi, 12*(2), 1–26.

Fıçıcı, M. (2016). *Kapıdağ Yarımadası'nda erozyon ve arazi kullanma ilişkisi* [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

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

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202,* 18–27.

Görcelioğlu, E. (1996). Ağaçlandırma alanlarında su ve toprak koruma amacıyla kullanılan teraslar ve orman yollarında erozyon kontrolü. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *46*(2), 23–31.

Gül, A., Yılmaz, M., & Uzel, N. (2008). Sakarya Nehri Kirmir Çayı'nda yaşayan *Capoeta tinca* Heckel, 1843'da Civa-II Klörür'ün akut toksik etkisi. *Kastamonu Education Journal, 16*(1), 199–206.

Gündüzoğlu, H. A. G. (2019). *Küçük Menderes Havzası'nda sürdürülebilir arazi planlaması* [Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Güngör, Ö. (2011). *Aşağı Porsuk Çayı Havzasında askıda katı madde taşınımının belirlenmesi ve modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Hatipoğlu, İ. K., & Hatipoğlu, Ş. C. (2020). Harşit Çayı Havzası'nda ICONA ve alternatif olarak geliştirilen MICONA modellerinin karşılaştırılması. *Journal of Social Sciences and Humanities, 4*(2), 108–135.

İlgüz, N. (1955). M. K. Paşa Çayı Havzasında erozyon şiddeti ve bununla Ulubat Gölü'nün ilgisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni, 6*(1), 81–108.

İmamoğlu, A. (2020). Alaca Çayı Havzası erozyon durumunun morfometrik ölçümler ile ilişkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 18,* 868–878. https://doi.org/10.31590/ejosat.710987

İnce, K. (2019). Türkiye'de rüzgâr erozyonu toprak duyarlılık değişkenlerinin ulusal ölçekte belirlenmesi ve haritalanması. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 56*(1), 121–130. https://doi.org/10.20289/zfdergi.455581

Karakoca, E. (2025). CBS ve uzaktan algılama teknikleri ile ICONA modeli kullanılarak Katrancı Çayı Havzası'nda (Haymana, Ankara) toprak erozyonu duyarlılığı değerlendirmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 14,* 126–145. https://doi.org/10.46453/jader.1653839

Karakoca, E., & Uncu, L. (2020). Orta Sakarya Vadisi akarsu seki sistemlerinin morfometrik ve sedimantolojik özellikleri (İnhisar–Gemiciköy arası, Bilecik). *Coğrafya Dergisi, 41,* 165–177. https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0057

Karakoca, E., Uncu, L., Sarıkaya, M. A., Şahiner, E., & Köse, O. (2025). Geomorphology and chronology of Late Quaternary terrace staircases of the Sakarya River, northwest Türkiye. *Journal of Quaternary Science, 40*(3), 386–399. https://doi.org/10.1002/jqs.3695

Karakoyun, E., & Kaya, N. (2022). Hydrological simulation and prediction of soil erosion using the SWAT model in a mountainous watershed: A case study of Murat River Basin, Turkey. *Journal of Hydroinformatics, 24*(6), 1175–1193. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.056

Karaş, E., Oğuz, İ., Türkseven, E., & Keskin, S. (2009, 16–18 Haziran). Sakarya–Porsuk–Sarısu Havzası'nda CORINE, LEAM ve USLE metodolojilerinin kullanılarak erozyon risk haritalarının hazırlanması [Bildiri sunumu]. *I. Ulusal Kuraklık ve Çölleşme Sempozyumu,* Konya, Türkiye.

Kaymak, H. (2020). Morfo-klimatik özelliklerin Sündiken Dağları'nda (Eskişehir) bitki örtüsünün dağılışı üzerindeki etkileri. *Türk Coğrafya Dergisi, 75,* 17–32. https://doi.org/10.17211/tcd.639024

Köse, E., Çiçek, A., Emiroğlu, Ö., Tokatlı, C., Uğurluoğlu, A., Başkurt, S., ... & Uylaş, M. (2016). Water quality assessment of Porsuk stream basin. *Biological Diversity and Conservation, 9*(3), 119–126.

Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(33), 13268–13272. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104

Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal, 50*(5), 1294–1298. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data, 13*(9), 4349–4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Mutlu, Y. E., Soykan, A., & Fıçıcı, M. (2021). Kille Çayı (Balıkesir) Havzasında erozyon risk analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi, 6,* 98–111. https://doi.org/10.46453/jader.866903

Nearing, M. A. (2013). Soil erosion and conservation. In A. J. Jakeman, R. A. Letcher, & J. P. Norton (Eds.), *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity* (pp. 365–378). John Wiley & Sons.

Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE, 32*(5), 1587–1593.

Ocak, A., Orhan, A., & Özdeniz, E. (2012). Porsuk Çayı ve çevresinin florası. *Biological Diversity and Conservation, 5*(2), 41–52.

Ocakoğlu, F., & Akkiraz, M. S. (2019). A Lower Pleistocene to Holocene terrestrial record from the Eskişehir Graben (Central Anatolia): Paleoclimatic and morphotectonic implications. *Quaternary International, 510,* 88–99. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.12.026

Okçu, D., Söğüt, A. S., Aslan, Z., Sunar, F., & Maktav, D. (2006). Marmara Bölgesi erozyon riski, CBS uygulaması. *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 19*(2), 61–72.

Özdemir, A. (2021). İklim değişikliğinin havza ölçeğinde akım ve sediman miktarına etkilerinin değerlendirilmesi: Yuvacık Baraj Gölü Havzası. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 45*(1), 129–154.

Özdemir, M. A., & Dönmez, S. T. (2016). CBS tabanlı RUSLE yöntemiyle Işıklı Gölü Havzasının erozyon risk analizi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8*(1), 1–21.

Özden, Ş., & Özden, D. M. (1997). *Türkiye toprak erozyon tahmin modeli TURTEM*. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları.

Özşahin, E. (2016a). Çok şiddetli erozyon probleminin değerlendirilmesine yönelik pilot bir çalışma: Kavakdere Havzası (Trakya Yarımadası) örneği. *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi, 7*(22), 100–119.

Özşahin, E. (2016b). Ergene Havzasında (Trakya) arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişikliklerinin erozyon üzerine etkileri. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 31*(1), 117–126. https://doi.org/10.7161/anajas.2016.31.1.117-126

Öztürk, R., & Altan, T. (2008). Porsuk Çayı çevre sorunları ve bunların çözümlenmesinde havza yönetimi önerileri. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17*(8), 79–89.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy, 48,* 38–50.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & Porter, J. P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil & Water Conservation, 46*(1), 30–33.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Eds.). (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook No. 703). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974, December 10–14). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS* [Symposium presentation]. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Texas, USA.

Rümeysa, E. R., & Atalay Dutucu, A. (2020). Sakarya Nehri Havzası'nda sıcaklık, yağış ve akarsu rejiminde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi (Examination of changes in temperature, rainfall and stream regime in Sakarya River Basin). *Journal of Anatolian Cultural Research (JANCR), 4*(2), 127–143.

Sönmez, O. (2013). *Nehirlerde 2 boyutlu taşkın modellemesi ve taşkın haritalarının oluşturulması* [Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Sunkar, M., & Avcı, V. (2015). Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama (UA) ile Hasret Dağı ve çevresinin (Elazığ) erozyon duyarlılık analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi, 13*(1), 17–40. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000161

Şengörür, B., & İsa, D. (2001). Sakarya Nehri'ne ait su kalite gözlemlerinin faktör analizi. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 25,* 415–425.

Şengör, A. M. C., & Yılmaz, Y. (1983). Türkiye'de Tetis'in evrimi: Levha tektoniği açısından bir yaklaşım. *Türkiye Jeoloji Kurumu Yerbilimleri Özel Dizisi, 1,* 75.

Tağıl, Ş., Alevkayalı, Ç., & Aytan, B. (2023). Gediz Deltası sulak alanı boyunca kıyı şeridi evrimi ve erozyon hassasiyetinin değerlendirilmesi. *Ege Coğrafya Dergisi, 32*(Cumhuriyet'in 100. Yılı Özel Sayısı), 127–142.

Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geospatial big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 164,* 152–170. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001

Tekkanat, İ., & Sarış, F. (2015). Porsuk Çayı Havzasında akarsu akımlarında gözlenen uzun dönemli eğilimler. *Türk Coğrafya Dergisi, 64,* 69–83. https://doi.org/10.17211/tcd.44842

Tekkanat, S. İ. (2016). Porsuk Çayı üst kesiminde ortalama akımların Şen trend metodu kullanılarak araştırılması. *Coğrafi Bilimler Dergisi, 14*(1), 49–57. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000180

Uludağ, M., & Fıçıcı, M. (2018). Saray ilçesinde (Tekirdağ) toprak erozyonunun RUSLE yöntemiyle değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi, 70,* 67–78. https://doi.org/10.17211/tcd.356669

Ustaoğlu, B., & Koç, D. (2018). Sakarya'nın toprak özellikleri. In C. İkiel (Ed.), *Sakarya'nın fiziki, beşerî ve iktisadi özellikleri* (pp. 253–274). Sakarya Üniversitesi Yayınları.

Uzun, M., & Garipağaoğlu, N. (2022). Göksu Çayı Havzası'nın (Sakarya Nehri Havzası) tehlike duyarlılık analizleri kapsamında havza yönetimi. *Ege Coğrafya Dergisi, 31*(2), 449–471.

Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe* (Publication No. EUR 19044 EN). European Soil Bureau, Joint Research Centre, European Commission.

Yalçınkaya, N. M., Çakar, M. M., & Say, N. (2022). Erozyon ile mücadele kapsamında ağaçlandırma projelerinin etkinliği: Atatürk Barajı örneği. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5*(1), 282–300. https://doi.org/10.47495/okufbed.1018855

Yurteri, C. (2024). Morphometric analysis of drainage basin with geographic information systems: A case study of Porsuk Stream Basin, Eskisehir, Western Anatolia, Türkiye. *Geography with Multidisciplinary Approaches, 1*(1), 1–13. https://doi.org/10.29329/mdag.2024.1095.1

Zengin, M., Özer, S., & Özgül, M. (2009). Çoruh Havzası (İspir–Pazaryolu) erozyon durumunun CBS ile belirlenmesi ve çözüm önerileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 40*(1), 9–19.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 252–276
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Bayes Olasılık Modeli ve Frekans Oranı (FO) Yöntemi ile Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce) Heyelan Duyarlık Analizi

Landslide Susceptibility Analysis of Esmahanım Stream Basin (Düzce) by Using Bayesian Probability Model and Frequency ratio (Fr) Method

Vedat Avci[1,2]*

[1]*Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 12000, Bingöl/Türkiye.*
[2]*Bingöl Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Doğal Afet Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 12000, Bingöl/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Vedat Avci
vavci@bingol.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1708584

Yayın süreci
Geliş tarihi: 04.06.2025
Kabul tarihi: 25.07.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışmada, Bayes Olasılık Modeli ve Frekans oranı (FO) yöntemi ile Esmahanım Deresi Havzası'nın heyelan duyarlılık analizinin yapılması amaçlanmıştır. Batı Karadeniz Bölümü'nde Düzce ili sınırları içerisinde yer alan havza, Melen Çayı su toplama alanı içerisindedir. Bu çalışmada heyelan duyarlılığı üzerinde etkili olan litoloji, yükselti, eğim, yamaç eğriselliği, bakı, topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), akarsu güç indeksi (SPI), akarsulara uzaklık, akarsu yoğunluğu, yollara yakınlık, yağış, arazi örtüsü ve Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI) analizleri yapılmıştır. Bu parametreler doğal aralık yöntemi ile yeniden sınıflandırılmış ve raster formata dönüştürülen heyelan envanter verisi ile zonal istatistikle çakıştırılmıştır. Böylece alt grupların heyelanlı ve heyelansız hücre sayıları bulunmuştur. Bayes olasılık modeli ve frekans oranı yöntemlerinde uygulanan formülle alt grupların heyelan üzerinde ağırlık değerleri bulunmuş, katmanların öznitelik tablosuna işlenmiş ve katmanlar toplanarak duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Duyarlılık haritasının doğruluğu, kontrol (test) heyelanları kullanılarak ROC analizi ile yapılmıştır. Eğri Altında Kalan (AUC) değeri, Bayes olasılık modeli için 0.815, Frekans oranı için 0.791 olarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: *Esmahanım deresi havzası, Düzce, Bayes olasılık modeli, Frekans oranı, Heyelan duyarlılık*

Abstract

In this study, it is aimed to conduct landslide susceptibility analysis of Esmahanim Stream Basin by using Bayesian Probability Model and Frequency Ratio (FR) Method. Bordered by Duzce Province in the Western Black Sea Region, the basin is located within the water collection area of Melen River. Following analyses were performed: Lithology, elevation, slope, curvature, aspect, topographic wetness index (TWI), stream power index (SPI), distance to streams, stream density, proximity to roads, precipitation, land cover and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which affect landslide susceptibility. These parameters were reclassified with the natural range method and the landslide inventory data converted to raster format was superimposed with zonal statistics. Thus, the landslide and landslide-free cell numbers of the subgroups were found. The weight values of the subgroups on the landslide were found with the formula applied in the Bayesian probability model and frequency ratio methods, the layers were processed into the attribute table and the susceptibility map was made. The accuracy of the susceptibility map was determined by ROC analysis using control (test) landslides. The Area Under the Curve (AUC) value was found as 0.815 for the Bayesian Probability Model and 0.791 for the frequency ratio.

Keywords: *Esmahanım stream basin, Düzce, Bayesian probability model, Frequency ratio, Landslide susceptibility*

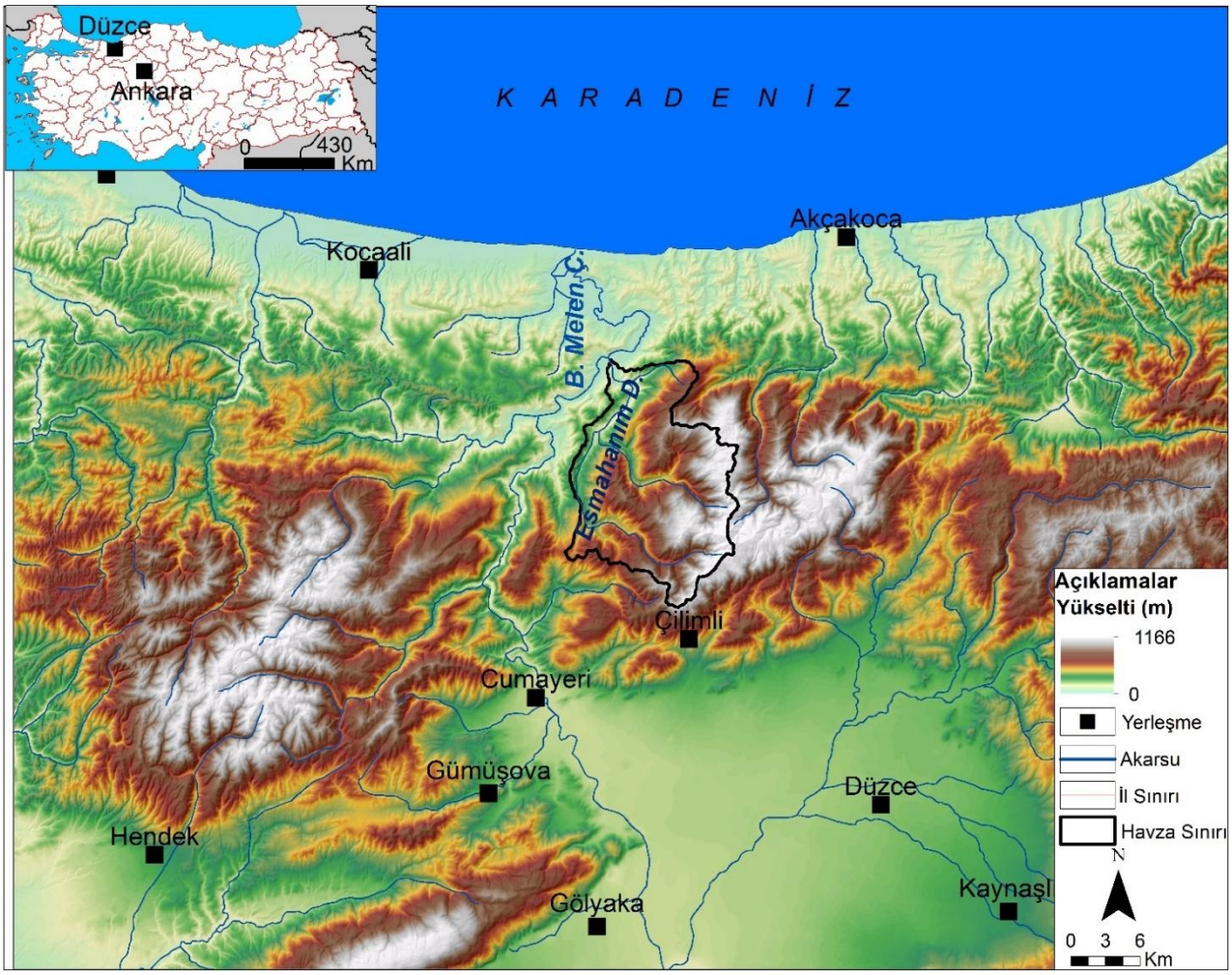
1. Giriş

Doğal afet, doğal çevre kaynaklı olayların sosyoekonomik sistem üzerindeki ani veya önemli bir etkisi olarak tanımlanmaktadır. Doğal afet kaynaklı ölümler, mal kayıpları, yaralanmalar ve çevresel zararlarda son yıllarda büyük bir artış görülmektedir (Singh & Kumar, 2018; El Jazouli vd., 2019; Shano vd., 2020; Batar & Watanabe, 2021; Yong vd., 2022; Badavath vd., 2024). Doğal afetlerden biri olan heyelan, yer çekimi etkisi altında toprak, kaya veya ayrışmaya bağlı olarak ortaya çıkan malzemenin yamaç aşağı hareketi olup, aynı zamanda bu hareketlerin sonucunda oluşan arazi yapısını da ifade etmektedir (Highland & Bobrowsky, 2008). Heyelanlar, dünya genelinde birçok bölgede yaygın jeolojik tehlikelerden olup meydana geldiği alandaki toplumun ekonomik kaynakları ve sosyal yapısı üzerinde derin etkilere yol açmaktadır (Sujatha & Sudharsan, 2024). Küresel iklim değişikliği, ekstrem hava olaylarının sıklığını artırmış, yağış kaynaklı heyelanlar nedeniyle büyük can ve ekonomik kayıplar meydana gelmiştir (Zong vd., 2024). Dünya genelinde her yıl yaşanan heyelanlar, 20 milyar ABD doları değerinde ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Dünyada, 2004-2019 yılları arasında sismik olmayan heyelanlar, yaklaşık 70.000 kişinin ölümüne neden olmuştur (Klose, 2015; Froude & Petley, 2018; Bhuyan vd., 2024). Türkiye'de meydana gelen başlıca doğal afetler arasında deprem, heyelan, sel, erozyon, kuraklık, kaya düşmesi ve çığ yer almaktadır (Ergünay, 2007; Aksoy, 2023; Dalkes & Korkmaz, 2023). Fidan ve Görüm (2020), 1929-2019 yılları arasında Türkiye'de ölümcül heyelan sayısı ve bununla ilişkili ölü sayısının artış trendine sahip olduğunu, 2001–2019 zaman serisi boyunca ölümcül heyelan sayısında önceki zaman serilerine göre çok ciddi bir artış görüldüğünü, 1929–2019 yılları boyunca ölümcül heyelan sayısı ve ölü sayısında hafif bir artış trendi gözlenirken, 2001–2019 zaman serisi döneminde ölümcül heyelan sayısı ile ölü sayısının kuvvetli bir artış trendi gösterdiğini belirtmiştir. Heyelan duyarlılığı haritalaması, heyelanları önlemenin ve zararlarını azaltmanın ilk aşaması olarak bilinmektedir (Corominas vd., 2014; Sun vd., 2023; Gu vd., 2024). Heyelan tehlikesinin azaltılması ve erken uyarının etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için genellikle arazi ve çevre koşullarına bağlı olarak bir bölgede heyelan meydana gelme olasılığının bir göstergesi olan heyelan duyarlılık değerlendirmesi (Landslide susceptibility assesment - LSA) yapılmaktadır (Reichenbach vd., 2018; Han & Semnani, 2025). Bir sahanın heyelan duyarlılığının etkin bir şekilde değerlendirilmesi afet tahmini açısından oldukça önemlidir (Chen vd., 2024a). Heyelana eğilimli bölgelerin belirlenmesi, heyelanlardan etkilenen bölgelerde arazi kullanım planları geliştirmek için zorunludur. Heyelan duyarlılık haritaları, heyelan tehlikelerini haritalamak ve heyelanlardan kaynaklanan riski değerlendirmek için çok önemlidir (Sujatha & Sudharsan, 2024). Heyelan duyarlılığının analizi, ekolojik ve ekonomik tehlikelerin azaltılması ve yönetilmesinde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Aksoy, 2023). Duyarlılık haritalamasında heyelan envanteri önemli olup, tespit edilen tüm geçmiş heyelanların yerleri ve özellikleri heyelan oluşumu ile heyelana neden olan faktörler arasındaki mekânsal ilişkiyi değerlendirmek için önemlidir (Chen vd., 2024b). Heyelan duyarlılığının değerlendirmesinin doğruluğu heyelan envanteri ile birlikte raster çözünürlüğünden etkilenmektedir. 25*25 m raster çözünürlüğü nispeten iyi bir tahmin performansı için uygun değer olarak görülmektedir (Yang vd., 2024). Heyelan duyarlılığı, yalnızca heyelan oluşumunda etkili olan çevresel faktörlerin etkisi göz önüne alındığında (dış tetikleyiciler dikkate alınmaz) bir yamaçtaki mekânsal dengesizlik olasılığı olarak açıklanmaktadır (Xing vd., 2023). Heyelan, arazinin eğim, rölyef ve drenaj özellikleri, toprak ve ana kayanın yoğunluğu ve dayanıklılığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. İklim, hidroloji, ekoloji ve deprem gibi çevresel koşullar da yamaç duraysızlığına neden olabilmektedir (Montgomery & Dietrich, 1994; Dietrich vd., 1995; Montgomery vd., 1998; Guzzetti vd., 1999; Radbruch-Hall, 1982; Baum vd., 2002; Meunier vd., 2008; Youssef vd., 2023). Heyelanlar şiddetli yağış, toprak erozyonu, doğal yamaç süreçleri ve insan faaliyetleri (ormansızlaşma, inşaat, maden işletmeciliği) tarafından da tetiklenebilir (Haque vd., 2019; Luu vd., 2024). Yukarıda açıklanan nedenlere bağlı olarak heyelan duyarlılığının belirlenmesinde uygun parametrelerin seçilmesi önemlidir. Literatürde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojileri kullanılarak, doğal ve beşeri tehlike kaynaklarının risk ve duyarlılıklarının belirlenmesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Kavzoğlu vd., 2014; Özşahin, 2014; Silalahi vd., 2019; Mersha & Meten, 2020; Başara vd., 2021; Dilekçi vd., 2021; Öz & Günek, 2021; Wubalem, 2021; Yağcı & İşcan, 2021; Aydın vd., 2022; Demir & Ülke Keskin, 2022; Mutlu vd., 2022; Huang vd., 2023; Yılmaz, 2023; Kaya vd. 2024; İrcan vd. 2024; Özşahin & Öztürk, 2024; Güneş & Kömüşcü, 2025; Karakoca & Ünver, 2025; Öz, 2025; Uysal vd., 2025). Akıncı vd. (2017), Bayes Olasılık Modeli ve Frekans oranı (FO) yöntemi ile Canik (Samsun) için yaptıkları analizde, Bayes olasılık yöntemi ile hazırlanan heyelan duyarlılık haritasında test heyelanlarının %83,5'inin çok yüksek ve yüksek duyarlı alanlarda bulunduğunu ve modelle oluşturulan haritaların arazi kullanım planlaması ve heyelan riskinin azaltılması çalışmalarında kullanışlı olduğunu bildirmişlerdir. Demir (2018), FO yöntemiyle Suşehri (Sivas) Havzası için heyelan duyarlılık haritalaması yapmıştır. Çalışma sonucunda heyelan olasılığı yüksek olan sahalar için planlama çalışmalarında duyarlılık haritalarının dikkate alınarak mühendislik önlemleri uygulandığı takdirde can ve mal kaybının azaltılabileceği ifade edilmiştir. Silalahi vd. (2019), Batı Java'da (Endonezya) yer alan Bogor bölgesinin heyelan duyarlılığını değerlendirdikleri çalışmada FO yönteminin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Dağdelenler (2020), FO yöntemi ile Batı Karadeniz'de Bartın-Ulus İlçesi için heyelan duyarlılık analizi yapmıştır. Çalışmada, heyelanlara bağlı olarak meydana gelebilecek potansiyel zararların aza indirilmesinde, sağlıklı ve güvenilir heyelan envanterinin temel unsur olduğu ortaya konmuştur.

Tayland'ın Uttaradit Eyaletindeki Mae Phun bölgesinde heyelan duyarlılığı, WoE (Weight of Evidence), FO ve indeks modelleri ile belirlenmiş, eğim, yükselti, arazi kullanımı/arazi örtüsü ve yollara uzaklığın heyelan duyarlılığında önemli bir etkisinin olduğu ortaya konulmuştur (Moazzam vd., 2020). Bayes olasılık modeli ile Orta Etiyopya'daki Kabi-Gebro bölgesinin heyelan duyarlılığının belirlendiği çalışmada, model doğruluğunun %82,4'lük bir başarı oranı gösterdiği ve yöntemin kullanışlı olduğu belirtilmiştir (Getachew & Meten, 2021). Van ili için yapılan heyelan duyarlılık zonlaması çalışmasında, duyarlılık haritalarının lokal olarak belirlenen sahalar için yapılacak çalışmalarda kullanılabileceği belirtilmiştir (Üzel Günini & Öztürk, 2021). Karaburun Yarımadası için FO yöntemi ile hazırlanan duyarlılık haritasının; özel koruma alanı ilan edilen, turizm faaliyetleri ve enerji tesisleri için önemli bir saha olan bölgenin sürdürülebilir stratejik ve fiziksel planlama süreçlerine önemli katkılarının olabileceği ifade edilmiştir (Karaman vd., 2022). Bu çalışmada, Bayes olasılık modeli ve frekans oranı yöntemi ile Esmahanım Deresi Havzası'nın heyelan duyarlılığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Havzada meydana gelen heyelanlar nedeniyle yaşanan kayıplar çalışma alanı olarak seçilmesine neden olmuştur. Havza alanı, Karadeniz Bölgesi'nin, Batı Karadeniz Bölümü'nde Düzce ili sınırları içerisinde yer almaktadır. Havza alanında 2019 yılında meydana sel ve taşkınlar nedeniyle 7 kişi hayatını kaybetmiştir (Avci, 2023). Yaşanan sel ve taşkınlarda Düzce İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'nün tespitlerine göre, 7 konut sel ve selin tetiklemesine bağlı olarak oluşan heyelanlardan zarar görmüştür. 1 konutta ağır, 6 konutta ise hafif hasar meydana gelmiştir (Taş & Ceylan, 2020). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2022) verilerine göre havzada 1969-2022 yılları arasında 16 heyelan olayı yaşanmıştır. Bu veriler havzanın heyelan duyarlılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmada duyarlılık haritası oluşturularak öneriler sunulmuştur.

1.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Batı Karadeniz Bölümü'nde, büyük bölümü Düzce ili Akçakoca ilçesi idari sınırları içerisinde yer alan Esmahanım deresi havzasıdır (Şekil 1). Toplam 61.7 km^2 alan kaplayan çalışma alanında Dilaver, Küpler, Kurukavak, Karatavuk, Yenice, Uğurlu, Kırkharman (Çilimli) ve Esmahanım gibi yerleşmeler bulunmaktadır. Bu yerleşmelerden, Dilaver ve Esmahanım yerleşmeleri dağ-yamaç-vadi kenarlarında kurulmuş yerleşmeler iken, diğer yerleşmeler orman içerisinde kurulmuştur (Olğaç & Doğan, 2024). 2024 yılı nüfus verilerine göre havzadaki bu yerleşmelerde toplam 2176 kişi yaşamaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025). Çalışma alanında tanımlanmış aktif fay bulunmamakla birlikte havza dışında güneydoğuda yer alan Çilimli Fayı, Emre vd. (2013) tarafından aktif fay olarak haritalanmıştır. Bu tektonik konum nedeniyle çalışma alanı dışındaki fayların hareketine bağlı olarak meydana gelebilecek depremlerin heyelanları tetiklemesi olasıdır. Çalışma alanında, sedimanter birimler (killi kireçtaşı, kireçtaşı, kumtaşı, çakıltaşı-kumtaşı-çamurtaşı, alüvyon) ve volkanitler (piroklastikler-andezit-bazalt) litolojiyi oluşturmaktadır (Altun & Aksay, 2002a; Gedik & Aksay, 2002a; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002; 2025; Pehlivan vd., 2002; Timur & Aksay, 2002; Emre vd., 2013). Dağlık alanlar ve vadiler, jeomorfolojik birimleri oluşturmaktadır. Dağlık alanlar doğu ve güneydoğuda yer alırken, Esmahanım Deresi ve kollarının oluşturduğu vadiler diğer morfolojik birimlerdir. Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisine göre havzada yükselti 8-1166 m, eğim 0-55° arasında değişmekte olup hâkim bakı yönü ise kuzeydir. Ilıman denizel iklim özelliklerinin görüldüğü Akçakoca'da yılın büyük bir bölümü yağışlı ve denizel etkilerden dolayı nemlidir (Olğaç & Doğan, 2024). Akçakoca Meteoroloji istasyonu (1980-2018) verilerine göre çalışma alanında yıllık ortalama sıcaklık 13,1^{o}C ve yıllık yağış toplamı ise 1129 mm'dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2020).



Şekil 1. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce) lokasyon haritası

Her mevsim yağışın görüldüğü çalışma alanında maksimum yağış ekim, minimum yağış mayıs aylarında düşmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2020). Doğal bitki örtüsünün ormanlardan oluştuğu çalışma alanında, batıda yerleşmelerin bulunduğu sahalarda ormanlar tahrip edilmiştir. Yerleşmelerin büyük bir bölümünün orman köylerinden oluşması ve orman alanlarının fındıklıklara dönüştürülmesi, ormanların tahrip edilmesine neden olmuştur. Çalışma alanının % 70.5'i ormanlarla, %25.3'ü meralarla kaplıdır (Environmental Systems Research Institute, 2024). Büyük Melen Çayı'nın kolunu oluşturan Esmahanım Deresi'nin iki önemli kolu Kurukavak ve Kırkharman dereleridir.

2. Materyal ve Yöntem

Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan temel veriler heyelan envanteri, topoğrafya haritaları, SYM, uydu görüntüleri, yağış ve yol verilerinden oluşmaktadır. Heyelan envanter verisi Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA) 1/500.000 ölçekli heyelan haritaları Zonguldak paftası (Duman vd., 2005) ile Google Earth Pro uydu görüntüsünden faydalanılarak hazırlanmıştır. Duyarlılık haritalarının oluşturulmasında envanter verisinin % 70'inin analizde, % 30'unun da doğrulamada kullanılması önerilmektedir (Acharya, 2018). Bu nedenle heyelan envanteri ArcGIS arayüzü Geostatisical Analyst, Subset Features aracı kullanılarak analiz ve doğrulama heyelanları olarak iki kısma ayrılmıştır. Bu veri Polygon to Raster aracı kullanılarak 10*10 m hücre boyutunda raster formata dönüştürülmüştür. Heyelanların toplam alanı yaklaşık 4 km^2 olup analizde kullanılan heyelanlar yaklaşık 2.6 km^2, kontrol heyelanları 1.4 km^2 alan kaplamaktadır. Çalışma alanı ile heyelan alanları dikkate alındığında havzada heyelan riskinin yüksek olduğu ve oluşan heyelanların çevreye zarar verdiği bilinmektedir (Şekil 2; Şekil 3a). Çalışma alanı için doğru parametreleri seçmek zorlayıcı bir süreçtir. Parametreler farklı alanlara uygulandığında farklı sonuçlar verir ve bu parametrelerden bazıları genel olarak değerlendirilebilirken, bazıları havzaların karakteristiklerini ve özelliklerini yansıtır (Çellek, 2023). Bu çalışmada literatür ve arazi gözlemlerine göre litoloji, yükselti, eğim, yamaç eğriselliği, bakı, topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), akarsu güç indeksi (SPI), akarsulara uzaklık, akarsu yoğunluğu, yollara yakınlık, yağış, arazi örtüsü ve normalize

fark bitki indeksi (NDVI) heyelan duyarlılığı üzerinde etkili olan parametreler olarak kullanılmıştır. Yükselti, eğim, bakı, yamaç eğriselliği, TWI ve SPI katmanları SYM'den üretilmiştir. Akarsular 1/25.000 ölçekli topoğrafya haritaları (Harita Genel Komutanlığı, 2001) kullanılarak sayısallaştırılmış, ArcGIS arayüzü Spatial Analiz-Distance-Euclidean Distance aracı ile akarsulara uzaklık bulunmuştur. Akarsu yoğunluğu, ArcGIS arayüzü line density (çizgi yoğunluğu) aracı ile bulunmuştur. OpenStreetMap (2025) veri tabanı kullanılarak çalışma alanına ait yol ağı indirilmiş ve Euclidean Distance aracı ile yollara yakınlık katmanı oluşturulmuştur. Akçakoca meteoroloji istasyonu yağış verisi (1980-2018) Schreiber yöntemi ile enterpole edilerek sahanın yağış haritası oluşturmuştur. Schreiber formülü her 100 m'de yağış artışının 54 mm olduğu ilkesine dayanmaktadır (Aydınözü, 2013). Arazi örtüsü uydu görüntüleri analiz edilerek (ArcGIS Living Atlas, 2025) elde edilmiştir (Tablo 1). Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI), havzayı kapsayan 15 Ağustos 2024 tarihli Landsat 8 uydu görüntüsünden (EarthExplorer, 2025) oluşturulmuştur. CBS teknolojileri kullanılarak elde edilen verilerle Bayes olasılık modeli ve frekans oranı yöntemi kullanılarak heyelan duyarlılığı belirlenmiştir.



Şekil 2. Çalışma alanında yerleşmeleri (a, b, c, d), yolları etkileyen (e, f, h, ı) ve orman alanlarını (g) etkileyen heyelanlar (b, c, d fotoğrafları Düzce İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğünden alınmıştır).

Tablo 1. Çalışma alanının heyelan duyarlılık analizinde kullanılan veriler

No	Veri	Hücre Boyutu	Veri Tipi	Üretilen Katmanlar	Kaynak
1	Jeoloji Haritası	-	Vektör	Litolojik birimler	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2025)
2	Sayısal Yükseklik Modeli	10*10	Raster	Yükselti, Eğim, Bakı, Yamaç Eğriselliği, TWI,	Harita Genel Komutanlığı (HGK, 2001)
3	1/25000 Ölçekli topoğrafya haritaları	10*10	Raster	Akarsulara Uzaklık, Akarsu yoğunluğu	Harita Genel Komutanlığı (HGK, 2001)
4	Meteorolojik veri	10*10	Raster	Yağış	Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2020)
5	Yol Verisi	-	Vektör	Yollara Uzaklık	OpenStreetMap (2025)
6	Arazi Örtüsü	10*10	Raster	Arazi Örtüsü	ArcGIS Living Atlas (2025)
7	Uydu görüntüsü	30*30	Raster	NDVI	EarthExplorer (2025)

"Bir olayla ilgili daha önceki olasılık beklentilerini, olayın gerçekleşmesi durumunda elde edilen yeni bilgiler dâhilinde güncelleyerek daha sonraki bir zamanda benzer bir olayın gerçekleşme" olasılığı Bayes olasılık modeli ile belirlenmektedir (Akıncı vd., 2017; Aydoğan & Dağ, 2023). Bayes olasılık modeli "Kanıt Ağırlıkları (Weight of Evidence, WoE)" modeli ile daha açık olarak hesaplanmaktadır (Akıncı vd., 2017; Kılıçoğlu, 2020; Aydoğan & Dağ, 2023). WoE modelinin diğer istatistiksel yöntemlere göre avantajı, bu yöntemin veri odaklı olması onu oldukça popüler istatistiksel bir yöntem haline getirmiştir (Pradhan, 2010; Nohani vd., 2019). Modelde çok önemli olan iki temel parametre negatif (W−) ve pozitif ağırlıktır (W+). Bu yöntem, heyelana neden olan her bir faktörün (A) ağırlığını, aşağıda gösterildiği gibi belirtilen bir alandaki heyelanın varlığı veya yokluğu temelinde tahmin etmektedir (Pradhan, 2010; Bonham-Carter., 2014; Nohani vd., 2019; Khosravi vd., 2016; Formül 1).

$$W^{+} = ln\left[\frac{\frac{A1}{A1+A2}}{\frac{A3}{A3+A4}}\right] \qquad W^{-} = ln\left[\frac{\frac{A2}{A1+A2}}{\frac{A4}{A3+A4}}\right] \tag{1}$$

Formülde, seçilen alt sınıfta yer alan heyelanlı piksel sayısı A1 ile ifade edilirken, A2 seçilen sınıf dışındaki toplam heyelanlı piksel sayısına karşılık gelmektedir. A3 seçilen sınıftaki heyelansız piksel sayısı ve A4 seçilen sınıf dışındaki toplam heyelansız piksel sayısıdır. Çalışma alanındaki toplam heyelanlı hücre sayısı A1+A2 iken, A3+A4 çalışma alanındaki toplam heyelansız hücre sayısına karşılık gelmektedir. W+ ve -W ağırlıkları arasındaki fark ağırlıklar kontrası (C) olarak ifade edilmektedir ve heyelan olayı ile neden olan faktör arasındaki nihai konumsal ilişki formül 2 ile bulunmaktadır (Corsini vd., 2009; Özdemir & Altural 2013; Akıncı vd., 2014a, Akıncı vd., 2014b).

$$C = W^{+} - W^{-} \tag{2}$$

Sıfıra (0) eşit bir kontrast (fark) değeri heyelana neden olan faktörün alt kategorisinin heyelan duyarlılık analizi için etkisinin önemli olmadığını göstermektedir. Pozitif kontrast heyelan duyarlılık ile alt kategori arasında pozitif bir konumsal ilişkiyi, negatif kontrast ise tersine bir ilişkiyi göstermektedir (Corsini vd. 2009; Özdemir & Altural 2013; Akıncı vd., 2014 a, b).

Frekans oranı yöntemi ise (FO); "genel olarak belirli bir doğa olayının meydana gelmesinin, aynı olayın meydana gelmemesine oranının" (Aydoğan & Dağ, 2023) olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Yöntem, duyarlılık analizlerinde "heyelanlar geçmişte hangi şartlar altında meydana gelmişse, gelecekte de benzer şartlar altında meydana gelir" prensibine dayanılarak kullanılmaktadır (Aydoğan & Dağ, 2023). FO değeri parametrelerin heyelan oluşumu üzerindeki etkisini ortaya koyması bakımından önemlidir. FO değeri 1'den büyük ise değerlendirilen parametrenin heyelan oluşumu üzerindeki etkisinin yüksek, 1'den küçük ise parametre etkisinin düşük olduğunu ifade etmektedir (Lee & Talib, 2005; Aydoğan & Dağ, 2023). FO modelinde, heyelan üzerinde etkili olan herhangi bir faktörün ağırlık değeri için, heyelanların meydana geldiği alanın yüzdesi çalışma alanında heyelana neden olan faktörün toplam yüzdesine bölünür. FO aşağıdaki Formül 3'le hesaplanmaktadır (Erener & Düzgün, 2010):

$$FO = \frac{PLO}{PIF} \tag{3}$$

Formülde *PLO* her bir sınıf için heyelan oluşum yüzdesi, *PIF*, verilen sınıf için etki eden faktör yüzdesidir. PLO, her bir sınıftaki heyelanlı piksel sayısının toplam heyelanlı piksel sayısına bölünmesiyle, PIF ise, alt sınıf piksel sayısının çalışma alanı toplam piksel sayısına bölünmesiyle bulunmaktadır (Erener & Düzgün, 2010).

Çalışmada tüm katmanlar aynı hücre boyutunda (10*10 m) raster formata dönüştürülmüştür. Raster katmanlar 10*10 m hücre boyutunda Reclassify aracı ile yeniden sınıflandırılmıştır. Duyarlılık haritalarının oluşturulmasında katman alt gruplarının sayısı için genel bir kural yoktur. Ancak sınıflar belirlenirken çok az veya çok fazla olmasından kaçınılmalıdır (Ross, 2014; Xing vd., 2021; Üzel Günini & Öztürk, 2021). Çünkü, çok az sınıf sayısı bir sınıftaki gerçek veri değerleri hakkında bilgi kaybına yol açabilir. Fazla sınıf sayısı da sınıf frekanslarının, bir örüntünün fark edilmesi açısından çok küçük olması sonucuna yol açabilir (Ross, 2014; Üzel Günini & Öztürk, 2021).

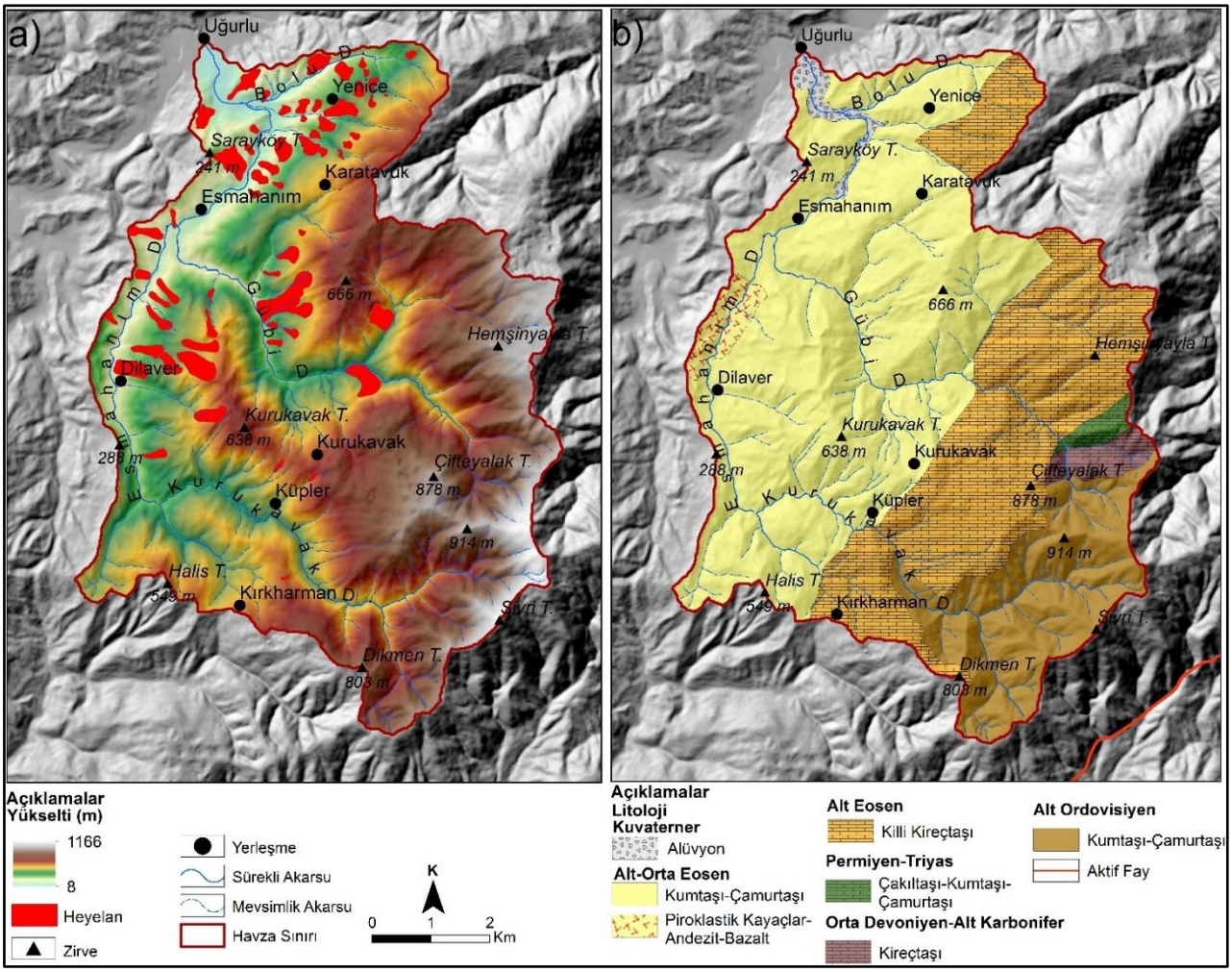
5-15 arasında değişen sınıf sayıları genel olarak ideal bir frekans dağılımı için uygun kabul edilen sınıf aralıklarıdır (Sharma & Gupta, 2017; Üzel Günini & Öztürk, 2021). Bu çalışmada da litolojik birimler dışındaki katmanlar doğal kırılım yöntemiyle 5 alt sınıfa ayrılmıştır. Yeniden sınıflandırılan tüm katmanlar ArcGIS arayüzü Combine aracı kullanılarak heyelan envanter verisi ile birleştirilmiş, katman alt sınıflarının heyelanlı ve heyelansız piksel sayıları bulunmuştur. Microsoft Excel programı ile formül doğrultusunda katman alt gruplarının ağırlıkları belirlenmiştir. Ağırlık değerleri alt grupların öznitelik tablosuna Lookup aracı ile eklenmiş, tüm katmanlar Raster Calculator aracı ile toplanarak sonuç haritaları üretilmiştir. Bu haritalar doğal kırılım yöntemiyle beş sınıfa ayrılmıştır. Literatürde parametre haritaları ile sonuç haritalarının hazırlanmasında doğal kırılım (natural break) yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir (Conforti & Letto, 2021; Guo vd., 2021; Ke vd., 2023; Arca, 2024). Duyarlılık sınıfları çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklindedir. Yeniden sınıflandırılan duyarlılık haritalarının piksel sayılarından her bir grubun toplam alanı ve oranı bulunmuştur (Tablo 1).

3. Heyelan Oluşumunda Etkili Olan Faktörler

Çalışma alanında heyelan duyarlılığı 1) Litoloji, 2) Yükselti ve eğim, 3) Yamaç eğriselliği ve bakı, 4) Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) ve Akarsu güç indeksi (SPI), 5) Akarsu yoğunluğu ve Akarsulara uzaklık, 6) Yollara yakınlık ve yağış, 7) arazi örtüsü ve NDVI gibi faktörlerin etkisiyle meydana gelmektedir.

3.1 Litoloji

Litoloji, yamaç stabilitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Çünkü, litolojik ve yapısal değişimler sıklıkla toprağın geçirimliliği üzerinde etkili olmaktadır (Kavzoğlu vd.,2014; Akıncı vd., 2020). Havzada temel birimleri güneydoğuda yüzeylenen Alt Ordovisiyen kumtaşı-çamurtaşı, Orta Devoniyen-Alt Karbonifer kireçtaşı ve Permiyen-Triyas kumtaşı, kumtaşı-çamurtaşı birimleri oluşturmaktadır. Alt Eosen, Alt-Orta Eosen ve Kuvaterner birimleri ise örtü kayaçlarını oluşturmaktadır. Alt Eosen killi kireçtaşı havza doğusunda, Alt-Orta Eosen piroklastik kayaçlar-andezit ve bazalt ile bu döneme ait kumtaşı-çamurtaşı havza batısında, Kuvaterner birimleri ise havzanın kuzeyinde yüzeylenmektedir (Altun & Aksay, 2002a; Gedik & Aksay, 2002a; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002; 2025; Pehlivan vd., 2002; Timur & Aksay, 2002, Şekil 3b). Havzanın % 51.5'i Alt-Orta Eosen kumtaşı-çamurtaşı birimlerinden, %27.9'u Alt Eosen killi kireçtaşı ve %14.9 Alt Ordovisyen kumtaşı-çamurtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Diğer birimlerin toplam alana oranı oldukça düşüktür (Şekil 3b).

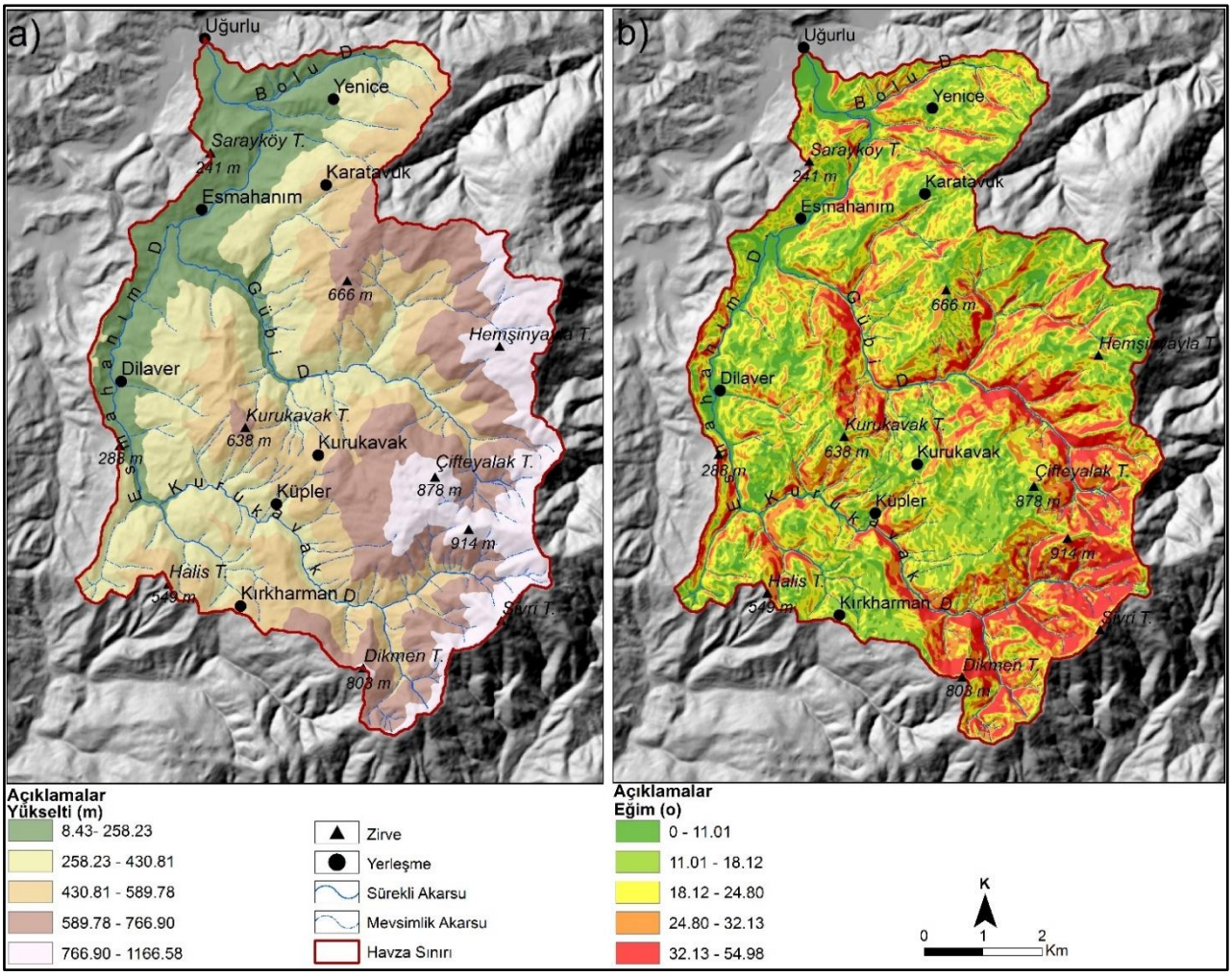


Şekil 3. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) heyelan envanteri (Duman vd., (2005) ile Google Earth Pro verisinden hazırlanmıştır) ve b) jeoloji haritası (Altun & Aksay, 2002a; Gedik & Aksay, 2002a; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002; 2025; Pehlivan vd., 2002; Timur & Aksay, 2002; Emre vd., 2013)

3.2 Yükselti ve Eğim

Yükselti ve yükselti değişimi bir alanda heyelan oluşumuna neden olabilmektedir. Çünkü farklı yükseltilerde bitki örtüsü, sıcaklık ve yağış yoğunluğu, yağış biçimi ve insan faaliyetleri değişmektedir (Catani vd., 2013; Ali vd., 2024; Gulbet & Getahun, 2024). İncelenen havzada yükselti değerleri 8-1666 m arasında değişmekte ve GD-KB doğrultusunda yükselti azalmaktadır. Yükselti basamaklarının oransal dağılımı; 8-258 m % 19.7, 258-430 m % 32.8, 430-589 m % 24.7, 589-766 m % 18.9, 766.9 m ve üzeri % 3.7 şeklindendir (Şekil 4a).

Heyelan oluşumundaki etkisi nedeniyle yamaç eğimi, duyarlılığı haritalamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir yamaçtaki toprak, kaya veya diğer malzeme, her zaman yer çekimine maruz kalır ve bu da yamaç üzerindeki malzemenin aşağı doğru kaymasına neden olur (Badavath vd., 2024). Eğim değerlerinin artması, yerçekimi kuvvetini artırarak heyelan duyarlılığını yükseltir (Ekinci, 2011; Özşahin, 2015). Havzada eğim değerleri 0-55° arasında değişmekte olup güneydoğuda ve akarsu vadilerinde eğim değerleri yüksek iken, KB'da vadi tabanlarında eğim değerleri düşüktür (Şekil 4a, b). Havzada, 0-11° eğim grubu % 12.8, 11-18.1° % 26.7, 18.1-24.8° % 27.6, 24.8-32.1° % 20.8, 32.1° ve üzeri % 11.8 oran kaplamaktadır (Şekil 4b). Bu değer ve oranlar havzada eğimin yüksek olduğunu ve derince parçalanmayı göstermektedir. Bu yapı ise heyelan oluşumu için uygun ortam oluşturmaktadır.



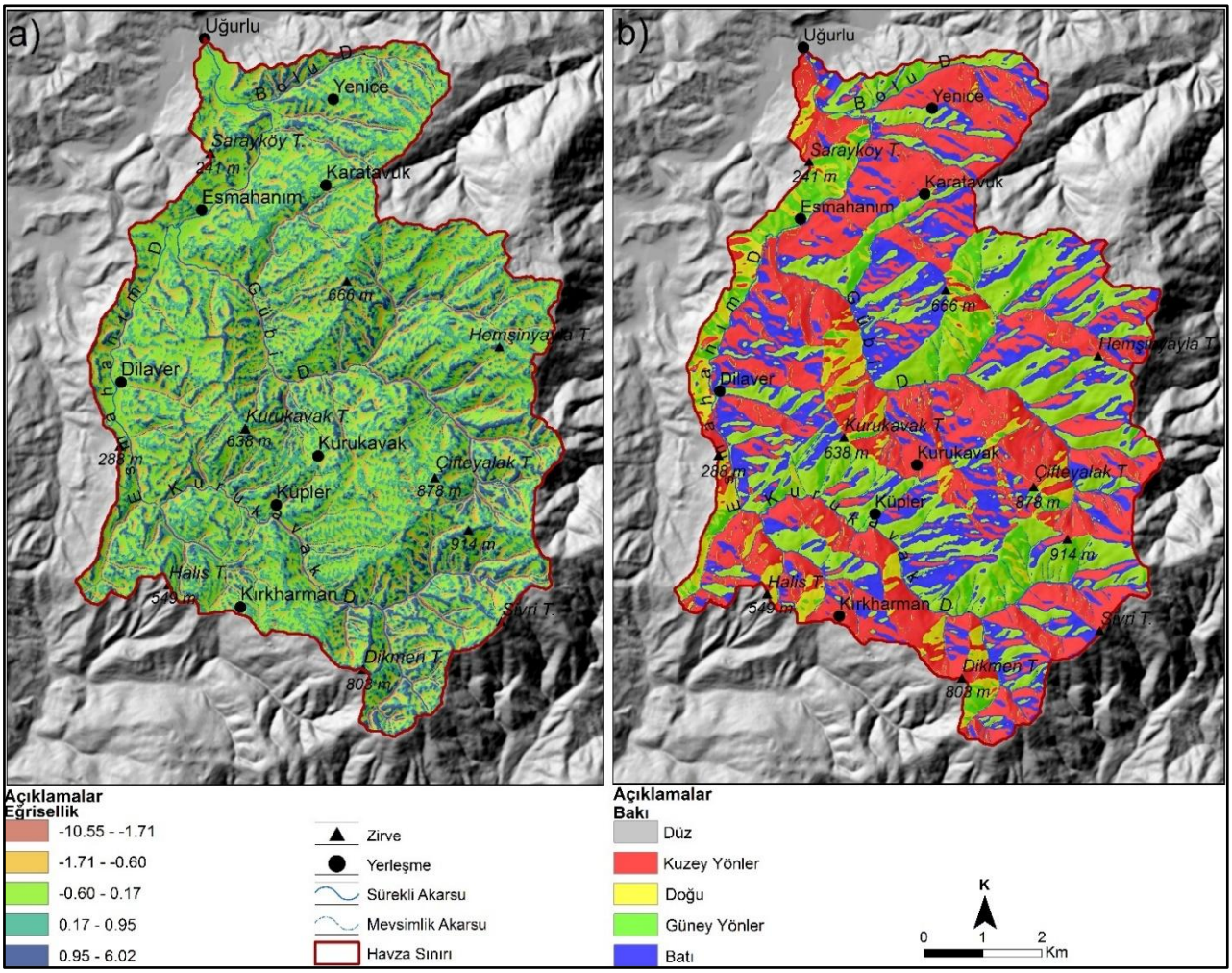
Şekil 4. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) yükselti basamakları ve b) eğim haritası

3.3 Yamaç Eğriselliği ve Bakı

Eğrisellik, yamaç üzerinde su birikimini belirleyeceğinden heyelan oluşumu üzerinde etkili olmaktadır (Chen vd., 2017; Mengstie vd., 2024). SYM'den elde edilen yamaç eğriselliği verisinde pozitif piksel değerleri dışbükey yamaçları, sıfır değerleri düz (geçiş) alanları, negatif piksel değerleri içbükey yamaçları göstermektedir. Yamaçların içbükey ya da dışbükey şeklinde olması yağış sularının akışı ve birikimi üzerinde oldukça önemlidir. Dışbükey yamaçlar suyu eşit olarak dağıtırken, içbükey yamaçlarda su en alt kısımda birikerek heyelan oluşumunu tetiklemektedir (Senouci vd., 2021; Yılmaz, 2023). İçbükey yamaçlar ile heyelanlar arasında pozitif bir korelasyon olduğu birçok çalışmayla ortaya konulmuş ve bu yamaçlarda heyelanların daha fazla meydana geldiği belirtilmiştir (Getachew & Meten, 2021). Esmahanım Deresi Havzası'nda yamaç eğriselliği -10.55 ile 6.02 arasında değişmektedir. Yamaç eğriselliği sınıflarının oransal dağılımı; -10.5-(-1.71), % 4.1, -1.71-(-0.6) % 16.1, -0.6-0.17 % 36.3, 0.17-0.95 % 31.4, 0.95-6.02 % 11.9'dur. İçbükey yamaçların oranı, dış bükey yamaçlara oranla daha fazla olup bu değerler heyelan oluşumunu tetiklemektedir (Şekil 5a).

Yamaç eğim yönü olan bakı, heyelan duyarlılığında hayati öneme sahiptir. Çünkü bakı, nem tutulmasını, bitki örtüsünü ve toprak mukavemetini etkilemektedir. Bazı yönler yağış konsantrasyonunu artırarak heyelanların meydana gelmesini kolaylaştırmaktadır (Chaabane vd., 2024). Hâkim bakıda olan yamaçlar ile diğer yamaçlar arasında bitki örtüsü, geçirimlilik ve boşluk suyu basıncı açısından farklılıklar bulunmaktadır (Akıncı vd., 2015; Yılmaz, 2023).

Çalışma alanında yamaç yönelimi düz, kuzey, doğu, güney ve batı olmak üzere 5 sınıfta değerlendirilmiş olup hâkim yön kuzeydir. Kuzey yönlü yamaçların oranı %41,2, güney yönlü yamaçların oranı % 30.9, batı yönelimli yamaçlar %20.5, doğu bakılar %7.2'dir. Düz alanların oranı ise %1'den azdır (Şekil 5b).



Şekil 5. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) yamaç eğriselliği ve b) bakı haritası

3.4 Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI) ve Akarsu Güç İndeksi (SPI)

TWI, bir havzada herhangi bir noktadaki akış birikiminin teorik bir ölçüsü ve dolayısıyla toprak nemliliği olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, TWI bir bölgedeki su birikiminin derecesini ölçmekte olup (Bragagnolo vd., 2020; Pourghasemi vd., 2013; Akıncı vd., 2020), formül 4'le hesaplanmaktadır (Beven & Kirkby, 1979, Moore vd., 1991; Rahmati vd., 2019)

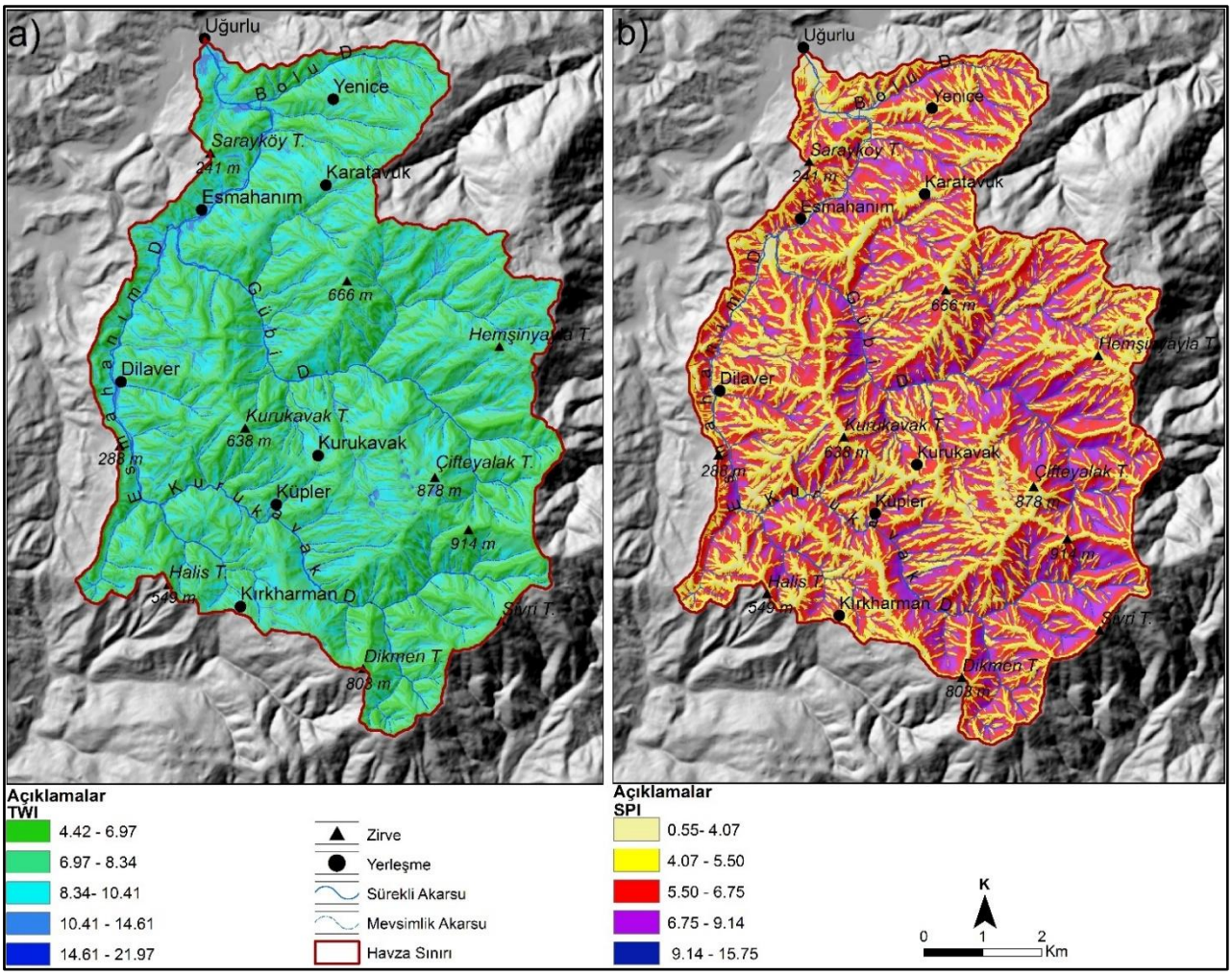
$$TWI = ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \tag{4}$$

Formülde "As" su toplama alanını, β ise derece cinsinden eğim açısını ifade etmektedir (Moazzam vd., 2020). TWI değeri ile heyelan arasında doğrudan bir ilişki olup TWI değeri artınca heyelan duyarlılığı da artmaktadır (Lee & Min, 2001; Moazzam vd., 2020). Esmahanım Deresi Havza için TWI, SAGA GIS yazılımı ile elde edilmiş ve ArcMap ortamına export edilmiştir. Havzada TWI değerleri 4,42-21,97 arasında değişmekte olup TWI gruplarının oransal dağılımı; 4.42-6.97 % 27.8, 6.97-8.34 % 44.6, 8.34-10.41 % 21.8, 10.41-14.61 % 4.8, 14.61-21.97 % 0.8 şeklindendir (Şekil 6a).

SPI, nehir erozyon kapasitesini ölçmek için önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Shirani vd., 2018; Zhang vd., 2024). Daha yüksek SPI değerleri dik yerleri, ancak daha düşük değerler geniş alüvyonlu düzlükleri, taşkın yataklarını temsil etmektedir (Kanwal vd., 2016; Moazzam vd., 2020). SPI değerleri arttıkça heyelanların artış eğilimi gösterdiği, bu durumun tarihsel heyelanlarla pozitif korelasyona işaret ettiği belirlenmiştir (Agboola vd., 2024). SPI, formül 5 ile hesaplanmaktadır (Whipple & Tucker, 1999; Rahmati vd., 2019; SAGA GIS, 2024).

$$SPI = As * tan\beta \tag{5}$$

Burada "As" su toplama alanını, β ise derece cinsinden eğimi ifade etmektedir (Moazzam vd., 2020). SPI, ArcGIS arayüzü eklentisi olarak çalışan SWPT Master aracı (Rahmati vd., 2019) ile otomatik olarak elde edilmiştir. Havzada SPI değerleri 0,55-15,75 arasında değişmekte olup SPI değerlerinin oransal dağılımı ise 0.55-4.07 % 13.4, 4.07-5.50 % 29.4, 5.50-6.75 % 37.7, 6.75-9.14 % 16.5, 9.14-15.75 % 2.8'dir (Şekil 6b).

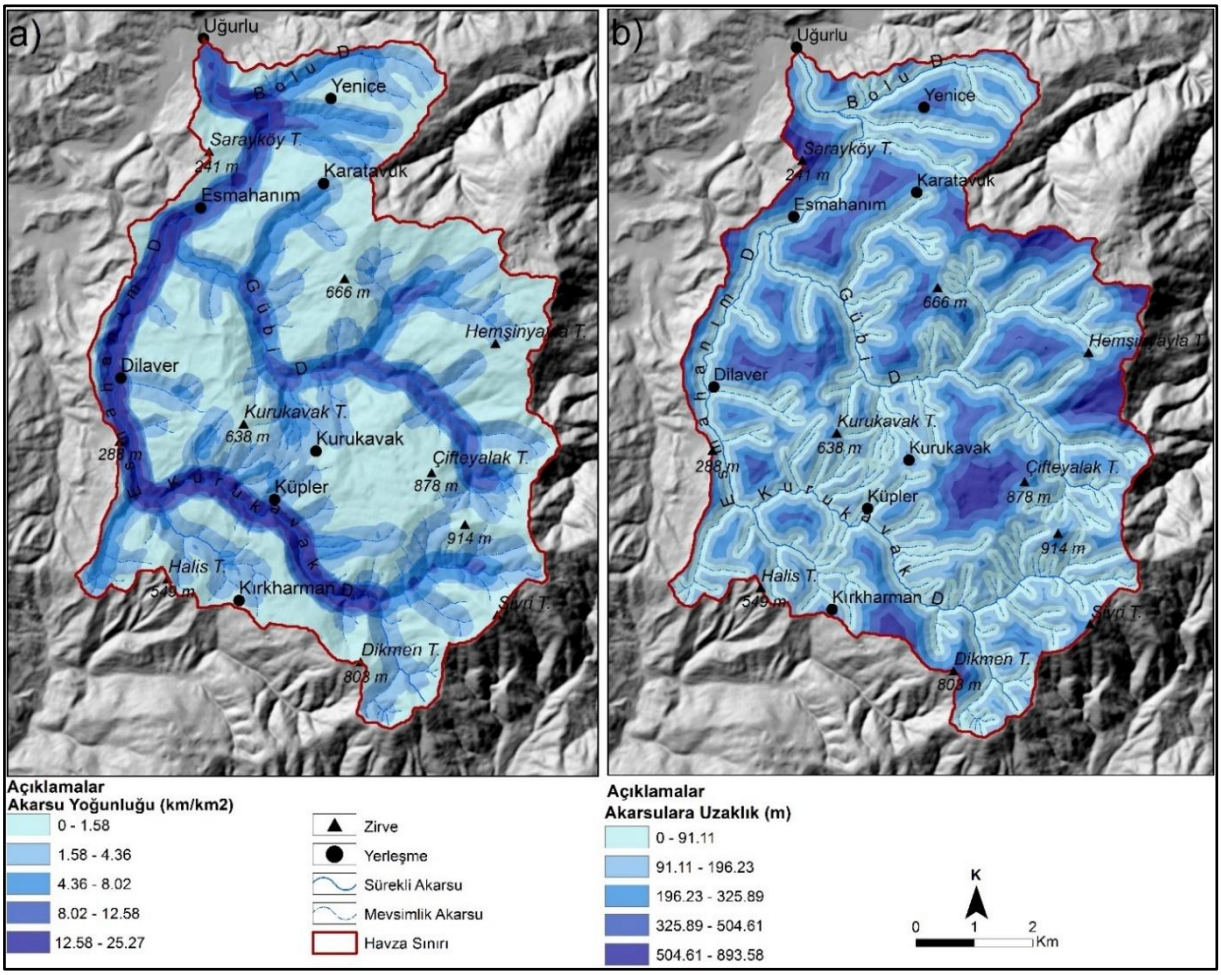


Şekil 6. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) TWI ve b) SPI dağılış haritası

3.5 Akarsu Yoğunluğu ve Akarsulara Uzaklık

Akarsu yoğunluğu birim alana düşen akarsu uzunluğuna karşılık gelmektedir (Kavzoğlu vd., 2014). Akarsu yoğunluğu arttıkça heyelan duyarlılığı da artmaktadır (Kavzoğlu vd., 2014). Havza içerisinde akarsu yoğunluğu (km/km^2) 0-25.7 arasında değişmekte olup ortalama değeri ise 3.63'dür. Esmahanım Deresi ve yan kollarında akarsu yoğunluğunun daha yüksek olduğu görülmektedir. Akarsu yoğunluğunun oransal dağılımı ise 0-1.58 % 43.1, 1.58-4.36 % 27.1, 4.36-8.02 % 14.5, 8.02-12.58 % 9, 12.58-25.27 % 6'dır (Şekil 7a).

Heyelanların vadi yamaçlarında daha çok meydana gelmesi, heyelan oluşumunda akarsuların etkisinin önemli olduğunu göstermektedir (Sunkar & Avcı, 2016). Akarsular yamaç topuğunu aşındırdığı, akarsu seviyesinin altındaki yamaç malzemesini suya doygun hale getirdiği ve zeminin kayma direncini azalttığı için yamaç stabilitesini (duraylılığını) azaltmaktadır (Demir, 2018). Bu değerlendirmelere göre yamaçların akarsulara yakın olduğu alanlarda heyelan duyarlılığının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Araştırma sahasında akarsulara uzaklık 0-893 m arasında değişmektedir (Şekil 7b). Akarsulara uzaklığın oransal dağılımı; 0-91.11 %36.9, 91.11-196.23 %29.4, 196.23-325.89 %19.7, 325.89-504.61 %10.5, 504.61-893.58 %3.3'dür. Analiz sonuçlarına göre yamaçların büyük bölümünün akarsulara yakın konumda olması duyarlılığı artırmaktadır.



Şekil 7. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) akarsu yoğunluğu ve b) akarsulara uzaklık haritası

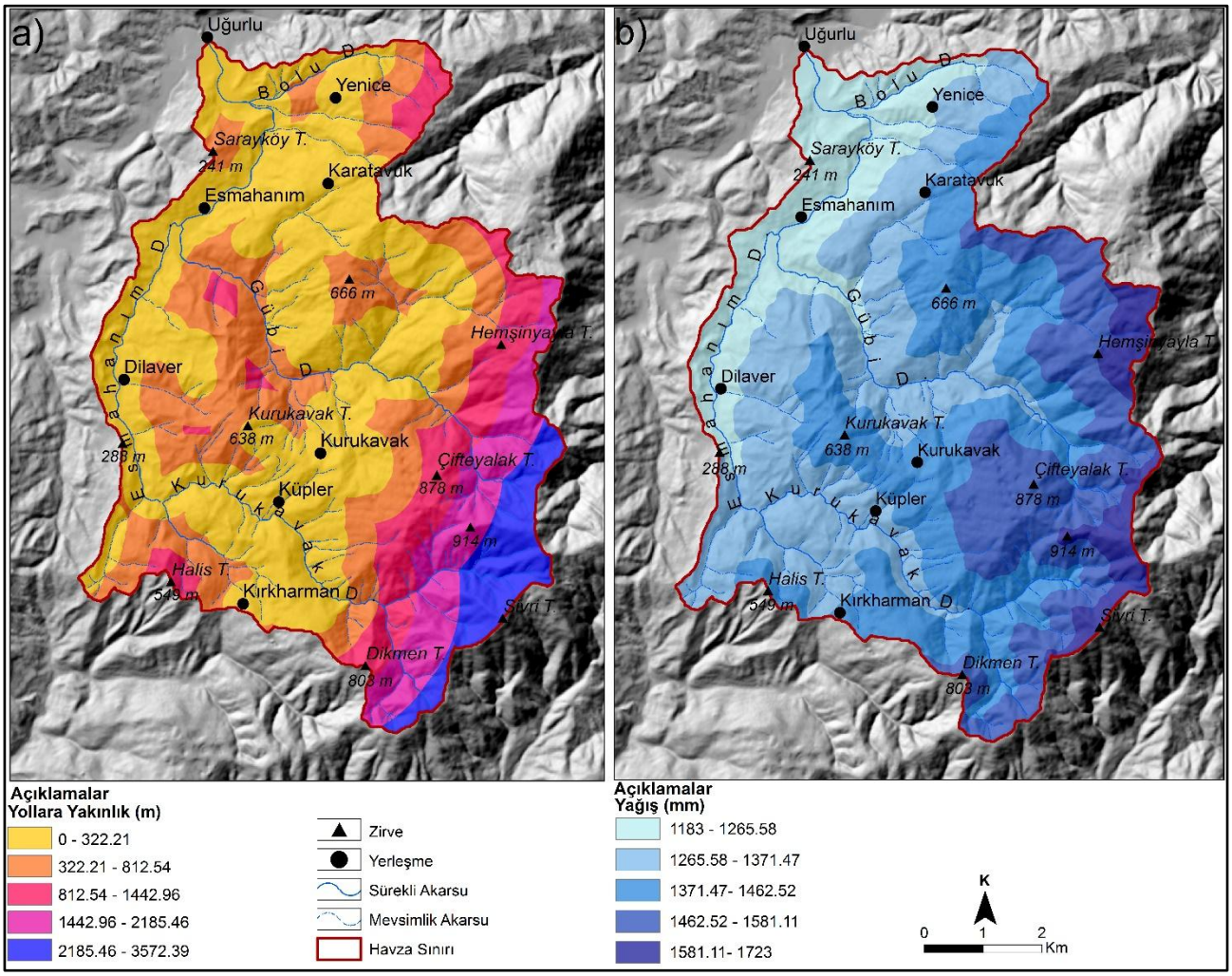
3.6 Yollara Yakınlık ve Yağış

Heyelanlar, özellikle dağlık bölgelerde ulaşım altyapısı için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Jallayu vd., 2024). Özellikle yeni yollara yakınlık arttıkça, kazıdan kaynaklanan yamaç dengesizliği ve yetersiz drenaj sistemi nedeniyle heyelan riski de artmaktadır (Jallayu vd., 2024). Yol yapımı sırasında yarma şevleri ile eğim açısının çoğu zaman yükseltilmesi, yamaç topuğunda yük azalmasına yol açmaktadır. Bu durum gerilme artışlarına sebep olduğundan heyelana neden olmaktadır (Demir, 2018).

Esmahanım Deresi Havzası'nda karayolları akarsu vadilerinden geçirilmiştir. Bu durum karayollarını da etkileyen heyelanların meydana gelmesine neden olmuştur. Çalışma sahasında yollara yakınlık değeri 0-3572 m arasında değişmektedir (Şekil 8a). Yollara yakınlığın oransal dağılımı; 0-322.2 % 48.6, 322.2-812.5 % 26.2, 812.5-1442.9 % 10.9, 1442.9-2185.4 % 8.4, 2185.4 -3572.3 % 5.7'dir. Araştırma sahasının büyük bir kısmı yollara ortalama 0-812 m uzaklıkta bulunmaktadır. Havza batısında yerleşme yoğunluğunun arttığı sahalarda yollara olan mesafe 0-322 m arasında değişmektedir. 2019 yılında meydana gelen sel ve tetiklenen heyelanlar nedeniyle Esmahanım-Uğurlu köyleri arasında yer alan karayolu büyük zarar görmüştür.

Yağış heyelanları "tetiklemede" önemli bir rol oynamaktadır (Rahaman vd., 2024). Yağış, yüzey ve yeraltı suyunun miktarını artırarak heyelan duyarlılığını artırmakta ve yamaç stabilitesini farklı şekillerde etkilemektedir. Yağmur, toprak doygunluğunu ve toprak boşluklarındaki gözenek suyu basıncını artırmaktadır (Kebeba vd., 2024). Havzaya düşen yağış miktarı 1183-1723 mm arasında değişmektedir. Yağış artışı doğu ve güneydoğuya doğru yükselti artışına paralel olarak da artmaktadır (Şekil 8b). Havza genelinde yüksek yağış miktarı zeminin suya doymasına neden olarak heyelanlara yol açmaktadır. Havzada 2019 yılında şiddetli yağışlara bağlı olarak heyelanlar meydana gelmiştir (Avci, 2023). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2022) verilerine göre havzada 1969-2022 yılları arasında yaşanan heyelanların 5'i kış, 5'i ilkbahar, 5'i yaz mevsimlerinde meydana gelmiştir. Sonbahar mevsiminde kayıtlara geçen heyelan sayısı 1'dir. Kış mevsiminde yağışlara bağlı olarak heyelanlar görülürken, ilkbahar mevsiminde kar erimelerine bağlı olarak meydana gelmektedir.

Yaz mevsiminde heyelanların görülmesi konvektif yağışlara bağlı olarak zeminin kısa sürede suya doymasının sonucudur. Çalışma alanında kısa süreli fazla yağışların küresel iklim değişikliğine bağlı olarak daha sık görülmesi heyelanların meydana gelme nedenlerinden biridir. 2019 yılında meydana gelen sel-taşkın ve heyelanlarda Temmuz ayı toplamı kadar yağış bir günde düşmüştür (Avci, 2023). Bu değerlendirmeler küresel iklim değişikliğine bağlı olarak ekstrem yağışların sıklığının arttığını ve bu durumun da heyelanlara yol açtığını göstermektedir.



Şekil 8. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) yollara yakınlık ve b) yağış haritası

3.7 Arazi Örtüsü ve NDVI

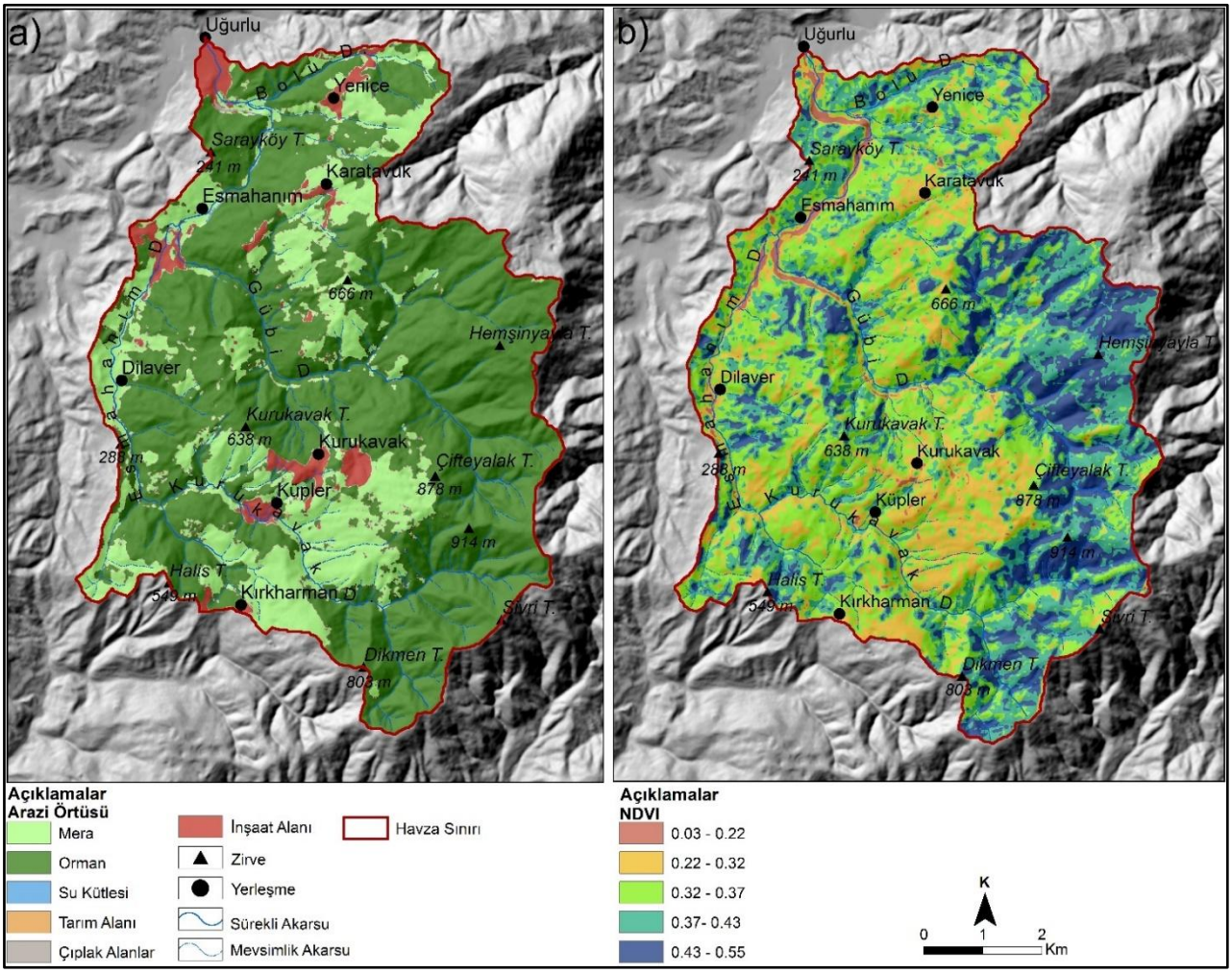
Arazi örtüsü, yamaç stabilitesinin dolaylı bir göstergesidir. Çorak ve seyrek bitki örtüsüyle kaplı alanlar ormanlardan daha fazla duraysızlık göstermektedir. Orta derecede eğimli tarım arazileri, tekrarlayan sulama süreçleri nedeniyle heyelanlara karşı duyarlı hale gelmektedir (Çevik & Topal, 2003; Akıncı vd., 2020). Havza alanının %70.5'i orman, %25.3'ü ise mera alanıdır. İnşaat alanları, su kütlesi, tarım alanı ve çıplak alanlar havzanın %4.2'sini kaplamaktadır (Şekil 9a). "Fındık ağaçlarının kök sistemleri, su tutma kapasiteleri ve kapalılık oranları" çok düşüktür (Görüm, 2006). Çalışma sahasında ormanların fındıklıklara dönüştürülmesi heyelanların artışına neden olmuştur. Havza batısında bu durum belirgindir. Ayrıca alternatif ürün tarımı için doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi heyelanlarla birlikte sel ve taşkınlara yol açmıştır.

Normalize Fark Bitki İndeksi (NDVI) değeri ne kadar büyük ise bitki örtüsü miktarı da o kadar fazladır. Bitki örtüsünün kökü, yamaç eğiminin sabitlenmesine ve heyelan oluşumunun azalmasına neden olmaktadır (Nohani vd., 2019).

Havzaya ait NDVI verileri, 15 Ağustos 2024 tarihli Landsat 8 uydu görüntüsünün (U.S. Geological Survey, 2024) 4. ve 5. bantları ile Formül 6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$NDVI = Float\frac{Band5 - Band4}{Band5 + Band4} \quad \text{(U.S. Geological Survey, 2024)} \tag{6}$$

NDVI verisinin histogramına göre minimum değer 0.03, maksimum değer 0,55, ortalama değer ise 0,37'dir. Havza içerisinde NDVI değerleri akarsu vadilerinde düşük, yüksek sahalarda ise fazladır (Şekil 9b). Havza doğusunda NDVI nispeten yüksektir. Çalışma alanında genel olarak NDVI KB-GD doğrultusunda artmaktadır. Bu durum orman tahribatının doğu ve güneydoğuda daha az olmasının sonucudur. Çünkü bu doğrultuda nüfus ve yerleşmeler azalmaktadır.



Şekil 9. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) arazi örtüsü (ArcGIS Living Atlas, 2025; ArcGIS, 2025) ve b) NDVI haritası

4. Bulgular ve Tartışma

Bayes olasılık modeline göre alt sınıfların ağırlık değeri C ile, FO yönteminde ise (Landslide Susceptibility Index-LSI) ile gösterilmiştir. Bayes olasılık modeline göre tüm litolojik birimlerin duyarlılık değeri negatiftir. FO yöntemine göre kumtaşı-çamurtaşı ve piroklastikler-andezit ve bazalttan oluşan birimlerin ağırlık değerinin 1'den yüksek olduğu, bu birimler ile heyelanlar arasında güçlü bir ilişki bulunduğu görülmektedir (Tablo 2). Heyelanların daha çok Alt-Orta Eosen kumtaşı-çamurtaşı birimi içerisinde meydana gelmesinin nedeni, volkanik malzeme içeren kumtaşlarının daha çok karbonat çimentolu olması ve volkanitlerin tüf içermeleridir (Altun & Aksay, 2002b). FO yöntemine göre piroklastikler-andezit ve bazaltların ağırlık değeri en yüksektir. Çünkü piroklastikler tüflerden oluşmaktadır ve tüflerin heyelan duyarlılığı yüksektir. Ayrıca lavların arakatmanlar halinde kiltaşı içermeleri de heyelan duyarlılığını yükseltmiştir (Gedik & Aksay, 2002b).

Yükselti alt grupları ile Bayes olasılık modeline göre hazırlanan haritaya göre pozitif yönlü güçlü ilişki 8-258 m yükselti basamağındadır. FO yönteminde de sonuçlar benzerdir. Bu yükselti basamağı ile heyelan duyarlılığı arasındaki pozitif yönlü güçlü ilişki antropojenik etkilerin bu basamakta fazla olmasının sonucudur. Zira bu yükselti basamağında yerleşmelerin yoğun olması ile yerleşmeleri birbirine bağlayan yolların bulunmasına bağlı olarak antropojenik etkiler fazladır. Doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi, yanlış arazi kullanımı, orman alanlarının fındıklıklara dönüştürülmesi, yol yapımı sırasında yamaç eğim açısının yükseltilmesi ve yamaçlara malzeme biriktirilmesi heyelan duyarlılığını artırmıştır. İki modelde de eğimin belirli bir değere kadar artması heyelan duyarlılığını artırırken, belirli bir eğim derecesinden sonra duyarlılık azalmaktadır. Her iki modelde de heyelan-eğim arasında pozitif yönlü güçlü ilişki 11,01-18° eğim grubunda saptanmıştır. Her iki modelde 2. ve 3. eğrisellik grubu ile duyarlılık arasındaki ilişki güçlü ve pozitif yönlüdür. Sahada iç bükey yamaçlarda heyelan duyarlılığının daha yüksek olduğu söylemek mümkündür. Bu durum heyelanların daha çok akarsu vadilerinin içbükey profilli yamaçlarında meydana gelmesi ile ilgilidir. İçbükey yamaçlar suyun toplanmasını ve yamaç nemliliğinin artmasını sağladığından duyarlılığın yüksek olması üzerinde etkili olmaktadır. Heyelan duyarlılığı ile yamaç eğim yönü arasında her iki modelde de kuzey ve doğu yönlü yamaçlar için pozitif yönlü ilişki bulunmuştur. Bu durum bu yamaçlarda yağış miktarının fazla olması ile ilgilidir. Yağış miktarının artması yüzey ve yeraltı suyu miktarını ve boşluk suyu basıncını artırarak, duyarlılığı yükseltmiştir. Her iki modelde TWI değerlerinin artmasına bağlı olarak duyarlılığın arttığı görülmektedir. Bu açıdan pozitif yönlü güçlü ilişki 3 ve 4. TWI sınıflarındadır. Bu TWI gruplarında heyelan duyarlılığının artması TWI değerleri ile birlikte yamaç eğim açısının artmasının bir sonucudur. Maksimum TWI değerinin ölçüldüğü akarsu vadi tabanlarında duyarlılık düşüktür. Bu durum üzerinde eğimin az olmasının etkisi bulunmaktadır. Genel olarak TWI değerlerinin düşük olduğu dolayısıyla zemin nemliliğinin düşük olduğu sahalar ile duyarlılık arasında ilişki seviyesi düşüktür. SPI katmanında 4. sınıf hariç tutulduğunda genelde değerin artmasına bağlı olarak heyelan duyarlılığının artması her iki yöntem için de geçerlidir. Akarsu yoğunluğu heyelan duyarlılığı arasındaki ilişki iki modelde de benzer olup, genel olarak akarsu yoğunluğu değeri arttığında duyarlılık da artmaktadır. Her iki modelde akarsu yoğunluğu ile heyelan arasında güçlü ilişki 3.ve 4.sınıflarda olup, akarsu yoğunluğunun artmasına bağlı olarak duyarlılığının arttığı görülmektedir. Akarsulara uzaklık-heyelan duyarlılığı arasında güçlü ilişki her iki model için de aynı olup akarsulara 196-325 m ile 325-504 m uzaklıkta olan alanlarda görülmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Bayes olasılık modeli (WoE) ve FO yöntemlerine göre heyelan duyarlılık analizinde katman alt gruplarının ağırlık değerleri

Parametreler	Alt Sınıflar	A1	A2	A3	A4	W+	W-	C	PLO	PIF	FO
Litoloji	Alt-Orta Eosen Kumtaşı-Çamurtaşı	23763	2302	294680	296396	-0.69605	-0.6902482	-0.005806	91.168	51.6	1.767
	Alt Eosen Killikireçtaşı	935	25130	171572	419504	-1.23694	-0.3428715	-0.89407	3.5872	27.95	0.128
	Alt-Orta Eosen Piroklastikler-Bazalt-Andezit	1039	25026	9484	581592	-4.13234	-0.0161754	-4.116163	3.9862	1.705	2.338
	Kuvaterner-Alüvyon	279	25786	7375	583701	-4.38385	-0.0125557	-4.371293	1.0704	1.24	0.863
	Alt Ordovisiyen Kumtaşı-Çamurtaşı	49	26016	92483	498593	-1.85492	-0.1701545	-1.684765	0.188	14.99	0.013
	Permiyen-Triyas Çakıltaşı-Kumtaşı-Çamurtaşı	0	26065	5433	585643	-4.68945	-0.0092342	-4.680219	0	0.88	0
	Orta Devoniyen-Alt Karbonifer Kireçtaşı	0	26065	10049	581027	-4.07447	-0.0171474	-4.057324	0	1.628	0
Yükselti (m)	1	15899	10166	105693	485383	1.227069	-0.7445383	1.971607	60.998	19.7	3.096
	2	8483	17582	194386	396690	-0.01043	0.00507172	-0.015502	32.546	32.87	0.99
	3	1632	24433	151053	440023	-1.40647	0.23045887	-1.636932	6.2613	24.74	0.253
	4	51	26014	116830	474246	-4.6153	0.21825987	-4.833558	0.1957	18.94	0.01
	5	0	26065	23114	567962	0	0.03989009	-0.03989	0	3.745	0
Eğim (°)	1	4239	21826	75125	515951	0.246525	-0.0415587	0.2880839	16.263	12.86	1.265
	2	9722	16343	155258	435818	0.350654	-0.1620739	0.5127282	37.299	26.73	1.395
	3	8245	17820	162592	428484	0.139714	-0.0585808	0.1982949	31.632	27.68	1.143
	4	3048	23017	125881	465195	-0.5995	0.11512759	-0.714628	11.694	20.89	0.56
	5	811	25254	72220	518856	-1.36785	0.09870936	-1.466562	3.1115	11.83	0.263
Eğrisellik	1	427	25638	25108	565968	-0.95281	0.02688927	-0.979696	1.6382	4.138	0.396
	2	4871	21194	94650	496426	0.154465	-0.0323651	0.1868297	18.688	16.13	1.159
	3	12247	13818	211893	379183	0.270551	-0.1906957	0.4612464	46.986	36.32	1.294

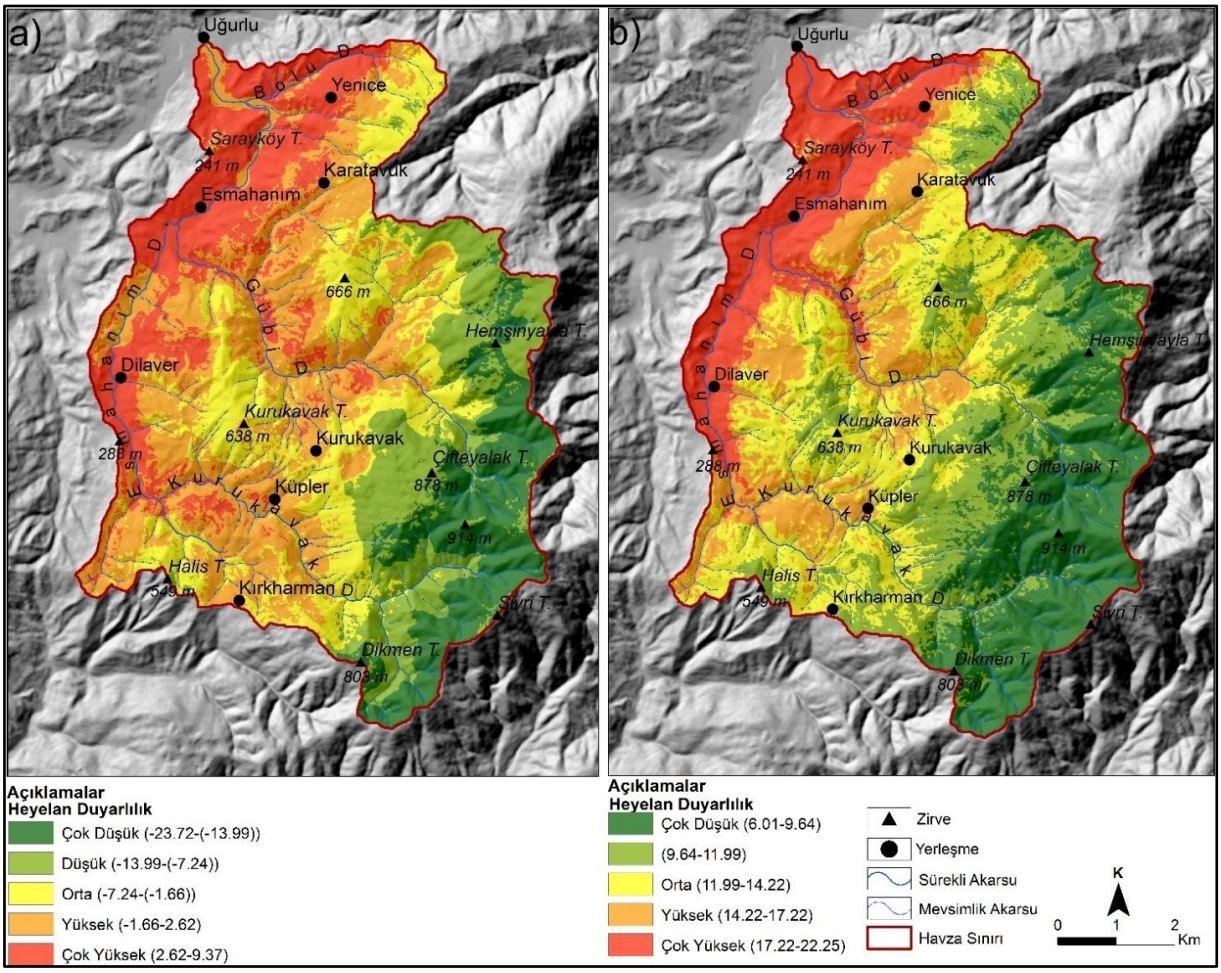
Parametreler	Alt Sınıflar	A1	A2	A3	A4	W+	W-	C	PLO	PIF	FO
	4	6829	19236	187502	403574	-0.19126	0.07777484	-0.269035	26.2	31.49	0.832
	5	1691	24374	71923	519153	-0.62892	0.06266954	-0.691594	6.4876	11.93	0.544
Bakı	Düz	0	26065	3	591073	0	5.0755E-06	0	0	5E-04	0
	Kuzey	11888	14177	242851	348225	0.104433	-0.0798767	0.1843093	45.609	41.28	1.105
	Doğu	2540	23525	42269	548807	0.309461	-0.028332	0.3377933	9.7449	7.261	1.342
	Güney	7493	18572	183536	407540	-0.07709	0.03286717	-0.109958	28.747	30.95	0.929
	Batı	4144	21921	122417	468659	-0.26442	0.05892084	-0.323341	15.899	20.51	0.775
TWI	1	4894	21171	166906	424170	-0.40807	0.12384919	-0.531919	18.776	27.84	0.674
	2	10862	15203	264378	326698	-0.07076	0.05380777	-0.124566	41.673	44.6	0.934
	3	8054	18011	126902	464174	0.364105	-0.1279256	0.4920305	30.9	21.87	1.413
	4	2151	23914	27598	563478	0.569541	-0.038313	0.6078538	8.2524	4.82	1.712
	5	104	25961	5292	585784	-0.80821	0.00499548	-0.813205	0.399	0.874	0.456
SPI	1	2747	23318	80523	510553	-0.25668	0.03508233	-0.291765	10.539	13.49	0.781
	2	7743	18322	174182	416894	0.00804	-0.0033783	0.0114179	29.707	29.48	1.008
	3	10571	15494	222148	368928	0.076122	-0.0487975	0.1249192	40.556	37.71	1.076
	4	4201	21864	97604	493472	-0.02424	0.00472652	-0.028971	16.117	16.5	0.977
	5	803	25262	16619	574457	0.091404	-0.0027728	0.0941768	3.0808	2.823	1.091
Akarsu Yoğunluğu (km/km^2)	1	10634	15429	255791	335285	-0.05888	0.04269586	-0.101572	40.798	43.17	0.945
	2	4889	21174	162825	428251	-0.38426	0.11449246	-0.498753	18.757	27.18	0.69
	3	6066	19999	83754	507322	0.496167	-0.1121125	0.6082791	23.273	14.55	1.599
	4	3310	22755	52233	538843	0.362585	-0.0432882	0.4058731	12.699	9	1.411
	5	1164	24901	36475	554601	-0.32341	0.01801021	-0.341424	4.4658	6.099	0.732
Akarsulara Uzaklık (m)	1	5621	20444	222559	368517	-0.55733	0.22955378	-0.786885	21.565	36.97	0.583
	2	7331	18734	174331	416745	-0.04749	0.01921672	-0.066709	28.126	29.44	0.955
	3	7684	18381	103240	487836	0.523435	-0.1573106	0.6807456	29.48	19.71	1.496
	4	4635	21430	43637	547439	0.879082	-0.119108	0.99819	17.782	10.54	1.687
	5	794	25271	19817	571259	-0.09586	0.00316598	-0.099027	3.0462	3.34	0.912
Yollara Yakınlık (m)	1	21604	4461	278756	312320	0.563893	-1.1273042	1.691197	82.885	48.67	1.703
	2	4249	21816	157462	433614	-0.49115	0.13184009	-0.622989	16.302	26.2	0.622
	3	161	25904	67114	523962	-2.91139	0.11432942	-3.025722	0.6177	10.9	0.057
	4	44	26021	52345	538731	-3.96007	0.09103872	-4.05111	0.1688	8.489	0.02
	5	7	26058	35399	555677	-5.40718	0.06148882	-5.468666	0.0269	5.737	0.005
Yağış (mm)	1	13532	12533	85402	505674	1.279039	-0.5761758	1.8552148	51.916	16.03	3.238
	2	9753	16312	180287	410789	0.204376	-0.1048275	0.3092036	37.418	30.79	1.215
	3	2729	23336	178083	412993	-1.05696	0.24791778	-1.304881	10.47	29.3	0.357
	4	49	26016	117302	473774	-4.65934	0.21933251	-4.878668	0.188	19.02	0.01
	5	2	26063	30002	561074	-6.49452	0.05201507	-6.546536	0.0077	4.862	0.002
Arazi Örtüsü	Su	0	26065	437	590639	0	0.0007396	-0.00074	0	0.071	0
	Orman	18446	7619	416653	155977	-0.02776	0.07058293	-0.098343	70.769	70.5	1.004
	Tarım Alanı	0	26065	160	590916	0	0.00027073	-0.000271	0	0.026	0
	İnşaat Alanı	1519	24546	23404	566153	0.383923	-0.0195375	0.4034607	5.8277	4.038	1.443
	Çıplak Alan	18	26047	336	590740	0.194612	-0.0001222	0.194734	0.0691	0.057	1.204
	Mera	6082	19983	150049	441027	-0.08428	0.027127	-0.111404	23.334	25.3	0.922
NDVI	1	300	25765	10725	580351	-0.4552	0.00673508	-0.461934	1.151	1.786	0.644

Parametreler	Alt Sınıflar	A1	A2	A3	A4	W+	W-	C	PLO	PIF	FO
	2	3701	22364	96973	494103	-0.14448	0.02605971	-0.170538	14.199	16.31	0.87
	3	11184	14881	202539	388537	0.224903	-0.140952	0.3658549	42.908	34.65	1.238
	4	8388	17677	160550	430526	0.169548	-0.0713922	0.24094	32.181	28.88	1.114
	5	2492	23573	89818	501258	-0.46335	0.06433224	-0.527681	9.5607	18.37	0.52

Yollara yakınlık ile heyelan duyarlılığı arasında pozitif korelasyon 0-322 m grubunda saptanmıştır. Bu gruptan itibaren korelasyon zayıflamaktadır. Her iki modelde yollara en yakın olan grubun duyarlılık üzerindeki etkisi maksimumdur. Bu durum antropojenik etkilerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisine örnektir. Yağış-duyarlılık ilişkisinde yağış miktarının artmasına bağlı olarak duyarlılık azalmaktadır. Heyelanların büyük bir kısmının nüfusun yoğun olduğu ve yağışın nispeten az olduğu aşağı havzada (1183-1265 mm) meydana gelmesi bu duruma yol açmıştır.

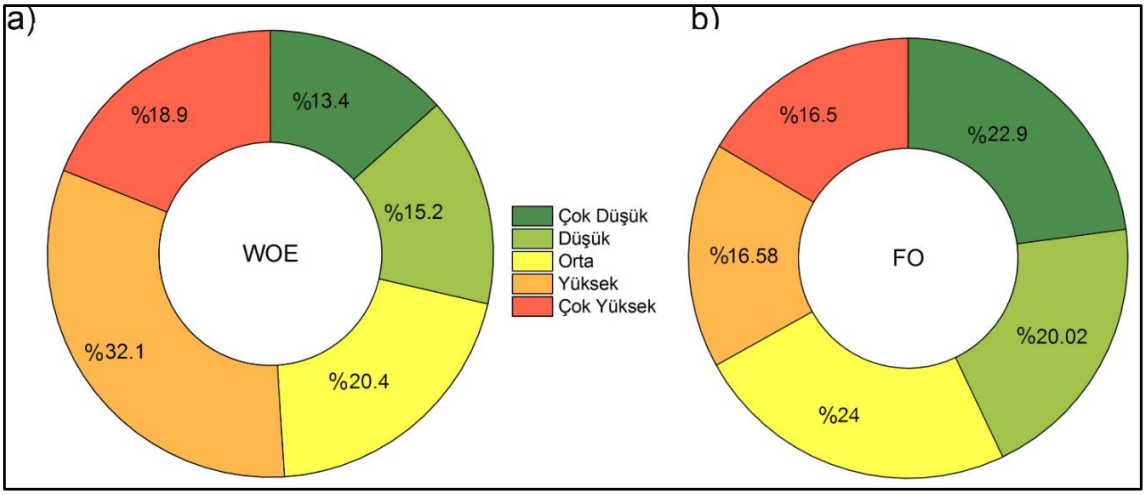
NDVI değerlerinin artması heyelan duyarlılığının artmasına neden olmuştur. Her iki modelde de arazi örtüsü duyarlılık arasında pozitif yönlü ilişki inşaat alanı ve çıplak alanlar için söz konusudur. FO yönteminde orman alanları ile duyarlılık arasında pozitif yönlü ilişki bulunmaktadır. Bu durum heyelanların daha sık meydana geldiği eğimli yamaçlarda bitki kök sistemlerinin gelişmeyişi ile ilişkilidir.

Bayes olasılık modeline göre oluşturulan haritaya göre duyarlılık sınıfları çok düşük % 13,4, düşük % 15,2 orta % 20,4 yüksek % 32,1 ve çok yüksek % 18,9 oransal dağılım sergilemektedir. Bu haritaya göre havza batısında duyarlılık yüksek ve çok yüksek, doğu ve güneydoğusunda düşüktür. Haritada en dikkat çeken özellik yerleşmelerin tamamının yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıfta yer almasıdır. Frekans oranı yöntemi ile hazırlanan haritada duyarlılık sınıflarının oranı; çok düşük % 22,9 düşük % 20,02, orta % 24, yüksek % 16,58, çok yüksek % 16,5'dir. Çok yüksek ve yüksek duyarlı alanlar çalışma alanı batısında Esmahanım Deresi Havzası'nın yukarı, orta ve aşağı bölümlerine denk gelmektedir. Bu yöntemde de havzada yer alan yerleşmelerin tamamı çok yüksek ve yüksek duyarlı sınıfta yer almaktadır (Şekil 10, 11).



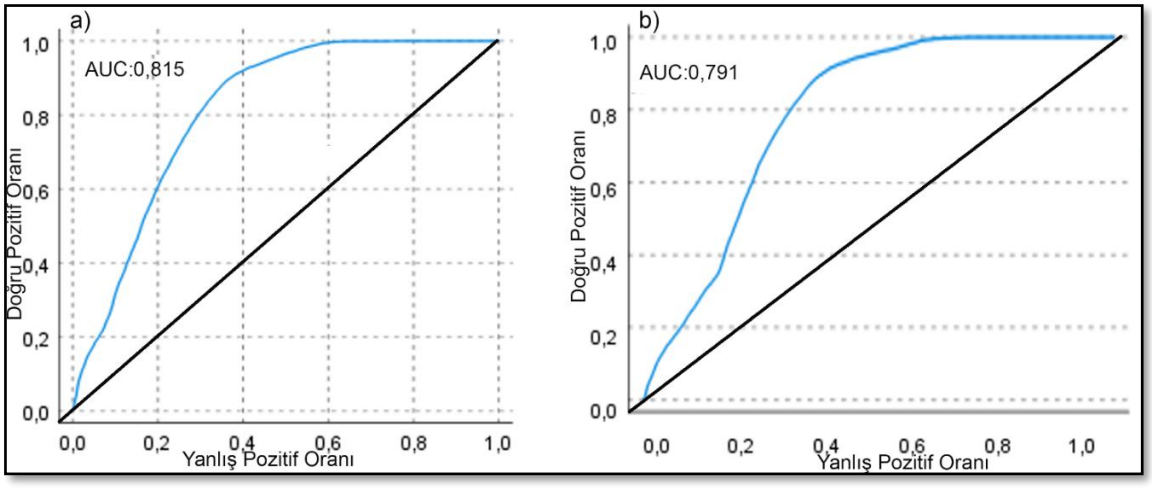
Şekil 10. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) Bayes olasılık modeli (WoE) ve b) FO yöntemlerine göre hazırlanan heyelan duyarlılık haritaları

Heyelan duyarlılık analizinde doğruluk değerlendirmesi için literatürde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de ROC Eğrisi Altında Kalan Alan (AUC-EAA) yaklaşımıdır (Dağdelenler, 2020). Bu analiz için kontrol heyelanları nokta formatına dönüştürülmüş ve heyelan duyarlılık haritası ile çakıştırılmıştır. SPSS programı ROC Analysis Modülü ile yapılan hesaplamalarda, Bayes Olasılık modeli için AUC değeri 0,815, Frekans oranı için 0,791 olarak bulunmuştur. ROC eğrisi altında kalan alanın (AUC: Eğri altında kalan alan) değeri 0,5 ila 1 arasında değişmektedir. AUC değeri 1 olduğunda mükemmel uyum, 0,5 olduğunda ise rastgele uyum olduğu kabul edilmektedir. AUC değeri ne kadar büyükse uyumun o kadar iyi olduğu kabul edilmektedir (Demir, 2011; 2018; Deng vd., 2017; Üzel Günini & Öztürk, 2021). AUC ölçeğine göre değerlendirildiğinde (Mandrekar, 2010) 0,70'in üzerinde değer, modelin iyi bir uyum gösterdiğini ifade etmektedir. 0,70'in üzerindeki AUC değeri modelin yeterli olduğu anlamına gelmektedir (Üzel Günini & Öztürk, 2021). Bu sınıflandırmaya göre havza için her iki modele göre hazırlanan haritaların performansının iyi olduğu görülmektedir (Şekil 12).



Şekil 11. Esmahanım Deresi Havzası'nda (Düzce); a) Bayes olasılık modeli (WoE) ile b) Frekans oranı yöntemine göre heyelan duyarlılığının oransal dağılım grafiği

Doğrulama için kullanılan bir başka yöntem de heyelan duyarlılık haritası ile kontrol heyelanlarının çakıştırılmasıdır. Wubalem (2021), test heyelanlarının %60'ından fazlasının beş sınıflı kategorik bir haritada çok yüksek ve yüksek duyarlılık sınıfında yer almasının modellerin çok iyi doğruluğa sahip olduğunu teyit ettiğini belirtmiştir (Üzel Günini & Öztürk, 2021). Buna göre Bayes modeli ile hazırlanan haritada kontrol heyelanlarının %95'ü çok yüksek ve yüksek duyarlı sınıfta yer almaktadır. Frekans oranı yöntemi ile hazırlanan haritada çok yüksek ve yüksek duyarlı sınıfta kontrol heyelanlarının %77.3'i bulunmaktadır. Sonuçlara göre Bayes modeli ile hazırlanan haritada doğruluk oranı daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 12. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) Bayes olasılık yöntemine ve b) Frekans oranı yöntemine göre oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının ROC eğrisi

5. Sonuçlar

Esmahanım Deresi Havzası'nın heyelan duyarlılığı analizlerinde litoloji, yükselti, eğim, eğrisellik, bakı, TWI, SPI, akarsu yoğunluğu, akarsulara uzaklık, yollara yakınlık, yağış, NDVI, arazi örtüsü verileri kullanılmıştır. Katman alt gruplarının ağırlığı her iki modele göre bulunmuş ve katman öznitelik tablosuna işlenmiştir. Katmanlar CBS ortamında toplanarak duyarlılık haritası oluşturulmuş ve doğal kırılım yöntemi ile 5 sınıfa ayrılmıştır. Her iki yönteme göre hazırlanan duyarlılık haritalarında havza batısında duyarlılık yüksek ve çok yüksek çıkmıştır. Bu durum havza batısında yerleşmelerin yoğun olması ve antropojenik etkinin fazla olması ile ilişkilidir. Çalışma alanı batısında yol ağının sık olmasına bağlı olarak heyelan duyarlılığı artmaktadır. Yollara yakınlık-heyelan duyarlılığı arasındaki ilişkinin her iki yöntemde de yola yakın alanlarda fazla olması bu durumu kanıtlamaktadır. Bayes olasılık modeli ile hazırlanan haritada çok düşük, düşük ve orta duyarlı alanlar % 49, yüksek ve çok yüksek % 51, frekans oranı ile hazırlanan haritada çok düşük, düşük ve orta duyarlı alanlar % 67, yüksek ve çok yüksek olan alanların oranı % 33'dür.

8-258 m yükselti basamağı, 11,01-18° eğim grubu, kuzey ve doğu yönlü bakılar, içbükey yamaçlar, genel olarak TWI, SPI ve akarsu yoğunluğunun arttığı sahalar, inşaat ve çıplak alanlar, yollara 0-322 m uzaklıkta olan sahalar ile heyelan duyarlılığı arasında güçlü ilişki saptanmıştır.

Her iki yönteme göre hazırlanan haritaların doğruluk analizi için eğri altında kalan alan yöntemi ve duyarlılık sınıfları ile kontrol heyelanları çakıştırılması yöntemi kullanılmıştır. AUC değeri Bayes olasılık modeli için 0,815, Frekans oranı için 0,791 olarak bulunmuştur. Kontrol heyelanları duyarlılık haritaları ile çakıştırıldığında; Bayes modelinde heyelanların % 93'ü çok yüksek ve yüksek, Frekans oranı yönteminde ise heyelanların % 79.1'i çok yüksek ve yüksek duyarlı sınıfta yer almaktadır. Bu sonuçlar her iki modele göre oluşturulan haritaların kullanılabilirliğinin yüksek olduğunu ve mekânsal planlama çalışmaları için elverişli olduğunu göstermektedir.

Havza batısında alternatif ürün tarımı için doğal bitki örtüsünün tahrip edilmesi, yol yapımı sırasında yamaç dengesinin bozulması, küresel iklim değişikliğine bağlı olarak ekstrem yağışların daha fazla görülmesi heyelanların havzada sık meydana gelmesine yol açmıştır. Küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkileri devam edecektir. Bu nedenle havzada yerleşmelerin heyelanlara karşı dirençli hale getirilmesi için gerekli çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmaların başında yanlış arazi kullanımının önüne geçmek gelmektedir. Vadi yamaçlarında yerleşmelerin kurulmasına izin verilmemeli, orman alanları fındıklıklara dönüştürülmemelidir. Çalışma alanında yerleşmelerin büyük bir kısmı yüksek ve çok yüksek duyarlı sınıfta yer almaktadır. Bu nedenle yerleşmelerin heyelanlara karşı dirençli hale getirilmesi önem arz etmektedir. Heyelanların etkilerinin azaltılması için doğal bitki örtüsünü korumak gerekmektedir.

Kaynakça

Acharya, T. D. (2018). *Regional scale landslide hazard assessment using machine learning methods in Nepal* [Doctoral dissertation, Kangwon National University].

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2022). *Afet bilgileri envanteri*. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Agboola, G., Beni, L. H., Elbayoumi, T., & Thompson, G. (2024). Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques. *Ecological Informatics, 81*, Article 102583. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583

Akıncı, H., Yavuz Özalp, A., Özalp, M., Temuçin Kılıçer, S., Kılıçoğlu, C., & Everan, E. (2014a, 14–17 Ekim). *Bayes olasılık teoremi kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi* [Bildiri sunumu]. 5. Uzaktan Algılama–CBS Sempozyumu (UZAL–CBS 2014), İstanbul.

Akıncı, H., Yavuz Özalp, A., Özalp, M., Kılıçoğlu, C., Everan, E., & Temuçin Kılıçer, S. (2014b). *Artvin il merkezinin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi*. Artvin Çoruh Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (AÇÜBAP), Bilimsel Araştırma Projesi sonuç raporu.

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

Akıncı, H., Doğan, S., & Kılıçoğlu, C. (2017). Landslide susceptibility mapping of Canik (Samsun) district using Bayesian probability and frequency ratio models. *Selcuk University Journal of Engineering Science and Technology, 5*(3), 283–299. https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.89

Akıncı, H., Kılıçoğlu, C., & Doğan, S. (2020). Random forest-based landslide susceptibility mapping in coastal regions of Artvin, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(9), Article 553. https://doi.org/10.3390/ijgi9090553

Aksoy, H. (2023). Determination of landslide susceptibility with Analytic Hierarchy Process (AHP) and the role of forest ecosystem services on landslide susceptibility. *Environmental Monitoring and Assessment, 195*, Article 1525. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12100-0

Ali, Y., Gugsa, T. H., & Raghuvanshi, T. K. (2024). GIS-based statistical analysis for landslide susceptibility evaluation and zonation mapping: A case from Blue Nile Gorge, Gohatsion–Dejen road corridor, Central Ethiopia. *Environmental Challenges, 16*, Article 100968. https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100968

Altun, İ. E., & Aksay, A. (2002a). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları Ereğli F26 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Altun, İ. E., & Aksay, A. (2002b). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları açınsamalı Ereğli F26 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara

Arca, D. (2024). A comparison of GIS-based landslide susceptibility assessment of the Merkez and Ovacık districts (Karabük, NW Türkiye) by frequency ratio and fuzzy inference system methods. *Environmental Engineering and Management Journal, 23*(2), 359–376.

ArcGIS. (2025). *Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series*. 11 Nisan 2025'te https://www.arcgis.com/home/item.html?id=cfcb7609de5f478eb7666240902d4d3d adresinden alındı.

ArcGIS Living Atlas. (2025). *Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover*. 11 Nisan 2025'te https://livingatlas.arcgis.com/landcover/ adresinden alındı.

Avci, 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

Aydın, M. C., Sevgi Birincioğlu, E., & Büyüksaraç, A. (2022). Landslide susceptibility mapping in Bitlis Province using GIS-based AHP method. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 3*(2), 160–171. https://doi.org/10.48123/rsgis.1119723

Aydınözü, D. (2013). Yükseldikçe bölgelerimize göre her 100 m'deki yağış artışı üzerine bir deneme. *Marmara Coğrafya Dergisi, 17*, 174–186.

Aydoğan, E., & Dağ, S. (2023). İstatistiksel yöntemlerle Yukarı Karasu Havzası'nın kuzeydoğu bölümünün (Erzurum) heyelan duyarlılık analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 4*(1), 64–82. https://doi.org/10.48123/rsgis.1202140

Badavath, N., Sahoo, S., & Samal, R. (2024). Landslide susceptibility mapping for West-Jaintia Hills District, Meghalaya. *Sādhanā, 49*, Article 52. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02404-9

Başara, A. C., Tabar, M. E., & Şişman, Y. (2021). Landslide susceptibility mapping of Samsun (Turkey) Province using frequency ratio and AHP methods. *Turkish Journal of Geographic Information Systems, 3*(1), 24–30.

Batar, A. K., & Watanabe, T. (2021). Landslide susceptibility mapping and assessment using geospatial platforms and weights of evidence (WoE) method in the Indian Himalayan region: Recent developments, gaps, and future directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 10*(3), Article 114. https://doi.org/10.3390/ijgi10030114

Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). *TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0* (Open-File Report 2008–1159). U.S. Geological Survey.

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal, 24*(1), 43–69.

Bhuyan, K., Rana, K., Ferrer, J. V., Cotton, F., Öztürk, U., Catani, F., & Malik, N. (2024). Landslide topology uncovers failure movements. *Nature, Nature Communications, 15*, Article 2633. https://doi.org/10.1038/s41467-024-46741-7

Bonham-Carter, G. F. (2014). *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS* (Vol. 13). Elsevier.

Bragagnolo, L., da Silva, R. V., & Grzybowski, J. M. V. (2020). Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. *Catena, 184*, Article 104240. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104240

Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S., & Tofani, V. (2013). Landslide susceptibility estimation by random forests technique: Sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 13*(11), 2815–2831.

Chaabane, F. Z., Lamine, S., Guettouche, M. S., Bachari, N. E. I., & Hallal, N. (2024). Landslide risk assessments through multicriteria analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 13*, Article 303. https://doi.org/10.3390/ijgi13090303

Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D. T., Duan, Z., & Ma, J. (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena, 151*, 147–160.

Chen, Z., Quan, H., Jin, R., Jin, A., Lin, Z., Jin, G., & Jin, G. (2024a). Assessment of landslide susceptibility using the PCA and ANFIS with various metaheuristic algorithms. *KSCE Journal of Civil Engineering, 28*, 1461–1474. https://doi.org/10.1007/s12205-024-1598-y

Chen, Z., Tang, J., & Song, D. (2024b). Modeling landslide susceptibility using alternating decision tree and support vector. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 35*, Article 12. https://doi.org/10.1007/s44195-024-00074-6

Conforti, M., & Letto, F. (2021). Modeling shallow landslide susceptibility and assessment of the relative importance of predisposing factors, through a GIS-based statistical analysis. *Geosciences, 11*(8), Article 333. https://doi.org/10.3390/geosciences11080333

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73*, 209–263. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Corsini, A., Cervi, F., & Ronchetti, F. (2009). Weight of evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: An application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology, 111*(1–2), 79–87. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.03.015

Çellek, S. (2023). Linear parameters causing landslides: A case study of distance to the road, fault, drainage. *Kocaeli Journal of Science and Engineering, 6*(2), 94–113. https://doi.org/10.34088/kojose.1117817

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. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0838-6

Dağdelenler, G. (2020). İki farklı örneklem tekniği kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının frekans oranı (FO) yöntemi ile karşılaştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 44*(1), 19–38. https://doi.org/10.24232/jmd.740509

Dalkes, M., & Korkmaz, M. S. (2023). Analitik Hiyerarşi Süreci ve Frekans Oranı yöntemlerinin heyelan duyarlılık analizinde karşılaştırılması: Trabzon ili Akçaabat ve Düzköy ilçeleri örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 9*(1), 16–38. https://doi.org/10.21324/dacd.1105000

Demir, G. (2011). *Kuzey Anadolu Fayı üzerinde Niksar–Suşehri arasındaki alanın CBS tabanlı heyelan duyarlılık analizi* [Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Demir, G. (2018). Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Suşehri (Sivas) heyelan duyarlılık analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8*(1), 96–112. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.299987

Demir, V., & Ülke Keskin, A. (2022). Taşkın tehlike haritalarının oluşturulması (Samsun, Mert Irmağı örneği). *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 4*(1), 47–54. https://doi.org/10.56130/tucbis.1120501

Deng, X., Li, L., & Tan, Y. (2017). Validation of spatial prediction models for landslide susceptibility mapping by considering structural similarity. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 6*(4), Article 103. https://doi.org/10.3390/ijgi6040103

Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. L., & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes, 9*(3–4), 383–400.

Dilekçi, S., Marangoz, A. M., & Ateşoğlu, A. (2021). Zonguldak ve Ereğli Orman İşletme Müdürlükleri orman yangını risk alanlarının belirlenmesi. *Geomatik, 6*(1), 44–53. https://doi.org/10.29128/geomatik.660623

Duman, T. Y., Emre, Ö., Çan, T., Nefeslioğlu, H. A., Keçer, M., Doğan, A., Durmaz, S., & Ateş, Ş. (2005). *1/500 000 Ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası Zonguldak Paftası*, MTA Genel Müdürlüğü.

EarthExplorer. (2025). *USGS EarthExplorer data portal*. 11 Nisan 2025'te https://earthexplorer.usgs.gov/ adresinden alındı.

Ekinci, D. (2011). *Zonguldak–Hisarönü arasındaki Karadeniz akaçlama havzasının kütle hareketleri duyarlılık analizi*. Titiz Yayıncılık.

El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS–multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters, 6*, Article 3. https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7

Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., & Şaroğlu, F. (2013*). Açıklamalı Türkiye diri fay haritası (Ölçek 1:1.250.000)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Environmental Systems Research Institute. (2024). Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover. 12 Aralık 2024'te https://livingatlas.arcgis.com/landcover/ adresinden alındı.

Erener, A., & Düzgün, H. S. B. (2010). Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of Møre and Romsdal (Norway). *Landslides, 7*, 55–68.

Ergünay, O. (2007, 5–7 Aralık). *Türkiye'nin afet profili* [Bildiri sunumu]. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Fidan, S., & Görüm, T. (2020). Türkiye'de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi, 74*, 123–134. https://doi.org/10.17211/tcd.731596

Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(8)*, 2161–2181. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018

Gedik, İ., & Aksay, A. (2002a). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları Adapazarı G25 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.

Gedik, İ., & Aksay, A. (2002b). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları açınsamalı Adapazarı G25 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.

Getachew, N., & Meten, M. (2021). Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi–Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters, 8*, Article 6. https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z

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.

Gu, T., Duan, P., Wang, M., Li, J., & Zhang, Y. (2024). Effects of non-landslide sampling strategies on machine learning models in landslide susceptibility mapping. *Nature Scientific Reports, 14*, Article 7201. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57964-5

Gulbet, E., & Getahun, B. (2024). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy process method in Awabel Woreda, Ethiopia. *Quaternary Science Advances, 16*, Article 100246. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100246

Guo, Z., Shi, Y., Huang, F., Fan, X., & Huang, J. (2021). Landslide susceptibility zonation method based on C5.0 decision tree and K-means cluster algorithms to improve the efficiency of risk management. *Geoscience Frontiers, 12*(6), Article 101249. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101249

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology, 31(1-4)*, 181–216.

Güneş, B., & Kömüşcü, A. Ü. (2025). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı AHS yöntemi ile Erzincan–Sivas karayolu ve çevresinin heyelan duyarlılık analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 11*(1), 89–103.

Han, Y., & Semnani, S. J. (2025). Important considerations in machine learning-based landslide susceptibility assessment under future climate conditions. *Acta Geotechnica, 20*, 475–500. https://doi.org/10.1007/s11440-024-02363-3

Harita Genel Komutanlığı. (2001). *1/25.000 Ölçekli Topoğrafya Haritaları (F25c3, F26d4, G25b2 ve G26a1 Paftaları)*. Harita Genel Komutanlığı, Ankara.

Haque, U., da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen, P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J. H., & Glass, G. E. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of the Total Environment, 682*, 673–684. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook – A guide to understanding landslides* (Circular 1325, 129). U.S. Geological Survey.

Huang, W., Ding, M., Li, Z., Yu, J., Ge, D., Liu, Q., & Yang, J. (2023). Landslide susceptibility mapping and dynamic response along the Sichuan–Tibet transportation corridor using deep learning algorithms. *Catena, 222*, Article 106866. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106866

Jallayu, P. T., Sharma, A., & Singh, K. (2024). Vulnerability of highways to landslide using landslide susceptibility zonation in GIS: Mandi District, India. *Innovative Infrastructure Solutions, 9*, Article 354. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01653-9

İrcan, M. R., Kale, M. M., & Duman, N. (2024). Morfometrik analizlerle taşkın duyarlılık değerlendirmesi: Şanlıurfa örneği. *Geomatik, 9*(3), 361–374. https://doi.org/10.29128/geomatik.1506840

Kanwal, S., Atif, S., & Shafiq, M. (2016). GIS-based landslide susceptibility mapping of northern areas of Pakistan: A case study of Shigar and Shyok Basins. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8*(2), 348–366.

Karakoca, E., & Ünver, A. (2025). Analitik hiyerarşi süreci ve coğrafi bilgi sistemleri kullanarak Eşen Çayı Havzası'nda taşkın riski değerlendirmesi ve haritalandırılması. *Geomatik, 10*(1), 127–143.

Karaman, M. O., Çabuk, S. N., & Pekkan, E. (2022). Utilization of frequency ratio method for the production of landslide susceptibility maps: Karaburun Peninsula case, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 91285–91305. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21931-2

Kavzoğlu, T., Şahin, E. K., & Çölkesen, İ. (2014). Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides, 11*, 425–439. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0391-7

Kaya, C., Öztürk, Y., Karataş, A., Sayın, H., & Balcıoğlu, Y. E. (2024). Ağrı Dağı volkanik kütlesi'nde lahar oluşumları ve lahar duyarlılığının CBS tabanlı analizi (Doğu Anadolu–Kuzeybatı İran). *Geomatik, 10*(1), 29–46.

Kebeba, O., Shano, L., Chemdesa, Y., & Jothimani, M. (2024). Integration of geospatial analysis, frequency ratio, and analytical hierarchy process for landslide susceptibility assessment in the Maze Catchment, Omo Valley, southern Ethiopia. *Quaternary Science Advances, 15*, Article 100203. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100203

Ke, C., He, S., & Qin, Y. (2023). Comparison of natural breaks method and frequency ratio dividing attribute intervals for landslide susceptibility mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82*, Article 384. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03392-0

Khosravi, K., Pourghasemi, H. R., Chapi, K., & Bahri, M. (2016). Flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran: A comparison between Shannon's entropy, statistical index, and weighting factor models. *Environmental Monitoring and Assessment, 188*, Article 656. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5665-9

Kılıçoğlu, C. (2020). Frekans oranı metodu ve Bayesyen olasılık modeli kullanılarak Samsun ili Vezirköprü ilçesinin heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20*(1), 138–154. https://doi.org/10.35414/akufemubid.658662

Klose, M. (2015). *Landslide databases as tools for integrated assessment of landslide risk*. Springer.

Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology, 40*, 1095–1113. https://doi.org/10.1007/s002540100310

Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology, 47*, 982–990. https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z

Luu, C., Ha, H., Tran, X. T., Vu, T. H., & Bui, Q. D. (2024). Landslide susceptibility and building exposure assessment using machine learning models and geospatial analysis techniques. *Advances in Space Research, 74*(11), 5489–5513. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.046

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2002). *1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Zonguldak paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2025). *1/25.000 ölçekli sayısal jeoloji haritaları*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Mandrekar, J. N. (2010). Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *Journal of Thoracic Oncology, 5*(9), 1315–1316. https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e3181ec173d

Mengstie, L., Nebere, A., Jothimani, M., & Taye, B. (2024). Landslide susceptibility assessment in Addi Arkay, Ethiopia using GIS, remote sensing, and AHP. *Quaternary Science Advances, 15*, Article 100217. https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100217

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2020). *Akçakoca sıcaklık ve yağış verileri*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.

Mersha, T., & Meten, M. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters, 7*, Article 20. https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x

Meunier, P., Hovius, N., & Haines, J. A. (2008). Topographic site effects and the location of earthquake-induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters, 275*(3–4), 221–232. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.020

Moazzam, M. F. U., Vansarochana, A., Boonyanuphap, J., Choosumrong, S., Rahman, G., & Djueyep, G. P. (2020). Spatio-statistical comparative approaches for landslide susceptibility modeling: Case of Mae Phun, Uttaradit Province, Thailand. *SN Applied Sciences, 2*, Article 384. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2106-8

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research, 30*(4), 1153–1171. https://doi.org/10.1029/93WR02979

Montgomery, D. R., Sullivan, K., & Greenberg, H. M. (1998). Regional test of a model for shallow landsliding. *Hydrological Processes, 12*(6), 943–955.

Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes, 5*(1), 3–30. https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103

Mutlu, S., Cindioğlu, İ., Kul, A. Ö., & Sağlam Selçuk, A. (2022). Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve Parametre Puanlama Yöntemi ile Hakkâri ili çığ tehlike haritasının oluşturulması. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 4*(2), 71–78.

Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B. T., Lee, S., & Melesse, A. M. (2019). Landslide susceptibility mapping using different GIS-based bivariate models. *Water, 11*(7), Article 1402. https://doi.org/10.3390/w11071402

Olğaç, İ., & Doğan, M. (2024). Düzce Akçakoca ilçesinde köy yerleşmelerinin coğrafi açıdan değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 34*(2), 469–482. https://doi.org/10.18069/firatsbed.1436601

OpenStreetMap. (2025). https://www.openstreetmap.org/#map=9/40.874/31.690

Özdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences, 64*, 180–197. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014

Öz, T. (2025). Heyelan duyarlılığının Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Frekans Oranı (FR) ile belirlenmesi: Kürk Çayı Havzası (Elazığ) örneği. *Fırat University Journal of Social Sciences, 35*(2), 467–485.

Öz, T., & Günek, H. (2021). Solaklı Havzası'nın (Trabzon) heyelan duyarlılığı ve yerleşim yeri risk analizi. *International Journal of Geography and Geography Education, 44*, 396–412. https://doi.org/10.32003/igge.931516

Özşahin, E. (2014). Tekirdağ ilinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Süreci kullanarak heyelan duyarlılık analizi. *Humanitas – Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi, 2*(3), 167–186. https://doi.org/10.20304/husbd.84015

Özşahin, E. (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla heyelan duyarlılık analizi: Ganos Dağı örneği (Tekirdağ). *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7*(1), 47–63. https://doi.org/10.15659/hartek.15.04.68

Özşahin, E., & Öztürk, M. (2024). Kentsel heyelanlara bir örnek: Alkaya Heyelanı (Tekirdağ). *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 5*(2), 240–253. https://doi.org/10.48123/rsgis.1530698

Pehlivan, Ş., Bilginer, E., & Aksay, A. (2002). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları Adapazarı G26 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.

Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gökçeoğlu, C., & Moezzi, K. D. (2013). A comparative assessment of prediction capabilities of Dempster–Shafer and Weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 4*(2), 93–118.

Pradhan, B. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 38*, 301–320. https://doi.org/10.1007/s12524-010-0020-z

Radbruch-Hall, D. (1982). *Landslide overview map of the conterminous United States* (Vol. 1183). US Government Printing Office.

Rahaman, A., Dondapati, A., Gupta, S., & Raj, R. (2024). Leveraging artificial neural networks for robust landslide susceptibility mapping: A geospatial modeling approach in the ecologically sensitive Nilgiri District, Tamil Nadu. *Geohazard Mechanics, 2*(4), 258–269. https://doi.org/10.1016/j.ghm.2024.07.001

Rahmati, O., Samadi, M., Shahabi, H., Azareh, A., Rafiei-Sardooi, E., Alilou, H., Melesse, A. M., Pradhan, B., Chapi, K., & Shirzadi, A. (2019). SWPT: An automated GIS-based tool for prioritization of sub-watersheds based on morphometric and topo-hydrological factors. *Geoscience Frontiers, 10*(6), 2167–2175. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.03.009

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews, 180*, 60–91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability and statistics for engineers and scientists*. Academic Press.

SAGA GIS. (2024). *Tool Stream Power Index*. SAGA-GIS Tool Library Documentation. 12 Aralık 2024'te https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/3.0.0/ta_hydrology_21.html adresinden alındı.

Senouci, R., Taibi, N. E., Teodoro, A. C., Duarte, L., Mansour, H., & Meddah, R. Y. (2021). GIS-based expert knowledge for landslide susceptibility mapping (LSM): Case of Mostaganem Coast District, west of Algeria. *Sustainability, 13*(2), Article 630. https://doi.org/10.3390/su13020630

Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, M. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques – A review. *Geoenvironmental Disasters, 7*, Article 18. https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0

Sharma, M., & Gupta, A. (2017). *The practice of business statistics: Using statistics for decision making*. Khanna Book Publishing.

Shirani, K., Pasandi, M., & Arabameri, A. (2018). Landslide susceptibility assessment by Dempster–Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun Basin, Southwestern Iran. *Natural Hazards, 93*, 1379–1418. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3356-2

Silalahi, F. E. S., Pamela Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters, 6*, Article 10. https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4

Singh, K., & Kumar, V. (2018). Hazard assessment of landslide disaster using information value method and analytical hierarchy process in highly tectonic Chamba region in the bosom of Himalaya. *Journal of Mountain Science, 15*, 808–824. https://doi.org/10.1007/s11629-017-4634-2

Sujatha, E. R., & Sudharsan, J. S. (2024). Landslide susceptibility mapping methods—A review. In G. K. Panda, R. Shaw, S. C. Pal, U. Chatterjee, & A. Saha (Eds.), *Landslide: Susceptibility, risk assessment and sustainability* (Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol. 52). Springer, Cham.

Sun, D., Gu, Q., Wen, H., Xu, J., Zhang, Y., Shi, S., Xue, M., & Zhou, X. (2023). Assessment of landslide susceptibility along mountain highways based on different machine learning algorithms and mapping units by hybrid factors screening and sample optimization. *Gondwana Research, 123*, 89–106. https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.07.013

Sunkar, M., & Avcı, V. (2016). Şepker Çayı Aşağı Havzası'nın (Adıyaman Batısı) Heyelan Duyarlılık Analizi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 26*(2), 13–43. https://doi.org/10.18069/firatsbed.346901

Taş, M. A., & Ceylan, M. A. (2020). Melen Çayı Havzası'nda 17–18 Temmuz 2019 tarihinde meydana gelen sel afetinin Uğurlu, Esmahanım, Dilaver ve Davutağa köylerine (Akçakoca) etkilerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarıyla tespiti. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, 13*(74), 174–192.

Timur, E., & Aksay, A. (2002). *1/100.000 ölçekli jeoloji haritaları Ereğli F-24–F25 paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). *Akçakoca ve Çilimli köy yerleşmelerinin nüfus miktarı*. 11 Nisan 2025'te https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr adresinden alındı.

U.S. Geological Survey. (2024). *Landsat Normalized Difference Vegetation Index*. 12 Aralık 2024'te https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index adresinden alındı.

Uysal, A., Sunkar, M., & Avci, V. (2025). Malatya ve çevresinde aletsel dönem (1900–2024) depremlerinin mekânsal analizleri. *Geomatik, 10*(2), 218–240. https://doi.org/10.29128/geomatik.1593289

Üzel Günini, N., & Öztürk, D. (2021). Van ili heyelan duyarlılığının frekans oranı yöntemiyle analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26*(3), 865–884. https://doi.org/10.17482/uumfd.969246

Yağcı, C., & İşcan, F. (2021). GIS-based site suitability analysis of afforestation in Konya Province, Turkey. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi, 3*(2), 89–95.

Yang, S., Li, D., Sun, Y., & She, X. (2024). Effect of landslide spatial representation and raster resolution on the landslide susceptibility assessment. *Environmental Earth Sciences, 83*, Article 132. https://doi.org/10.1007/s12665-024-11442-3

Yılmaz, O. S. (2023). Frekans oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler Köyü örneği. *Geomatik, 8*(1), 42–54. https://doi.org/10.29128/geomatik.1108735

Yong, C., Jinlong, D., Fei, G., Bin, T., Tao, Z., Hao, F., Li, W., & Qinghua, Z. (2022). Review of landslide susceptibility assessment based on knowledge mapping. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36*, 2399–2417. https://doi.org/10.1007/s00477-021-02165-z

Youssef, K., Shao, K., Moon, S., & Bouchard, L.-S. (2023). Landslide susceptibility modeling by interpretable neural network. *Nature Communications Earth & Environment, 4*, Article 162. https://doi.org/10.1038/s43247-023-00806-5

Whipple, K. X., & Tucker, G. E. (1999). Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104*(B8), 17661–17674.

Wubalem, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters, 8*(1), 1–21. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-15731/v2

Xing, Y., Yue, J., Guo, Z., Chen, Y., Hu, J., & Travé, A. (2021). Large-scale landslide susceptibility mapping using an integrated machine learning model: A case study in the Lvliang Mountains of China. *Frontiers in Earth Science, 9*, Article 722491. https://doi.org/10.3389/feart.2021.722491

Xing, Y., Huang, S., Yue, J., Chen, Y., Xie, W., Wang, P., Xiang, Y., & Peng, Y. (2023). Patterns of influence of different landslide boundaries and their spatial shapes on the uncertainty of landslide susceptibility prediction. *Natural Hazards, 118*, 709–727. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06025-7

Zhang, J., Qian, J., Lu, Y., Li, X., & Song, Z. (2024). Study on landslide susceptibility based on multi-model coupling: A case study of Sichuan Province, China. *Sustainability, 16*(16), Article 6803. https://doi.org/10.3390/su16166803

Zong, H., Dai, Q., & Zhu, J. (2024). Ensemble predictions of rainfall-induced landslide risk under climate change in China integrating antecedent soil-wetness factors. *Atmosphere, 15*(8), Article 1013. https://doi.org/10.3390/atmos15081013

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, September 2025, 6(2): 277–299
Journal homepage: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Shaping the Future of Datça Peninsula: Exploring Suitable Settlement Areas and Land-Use Scenarios

Datça Yarımadasının Geleceğini Şekillendirmek: Uygun Yerleşim Alanları ve Arazi Kullanım Senaryolarını Keşfetmek

Zekeriya Konurhan[1]*, Mehmet Akif Ceylan[2]

[1]Munzur University, Department of Geography, Tunceli/Türkiye.
[2]Marmara University, Department of Geography İstanbul/Türkiye.

ORIGINAL PAPER

*** Corresponding author:**
Zekeriya Konurhan
zkonurhan@munzur.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1717957

Article history
Received: 11.06.2025
Accepted: 16.09.2025
Published: 27.09.2025

Abstract

This study examines land use/land cover (LULC) scenarios and identifies areas suitable for settlement on the Datça Peninsula. Datça is one of the four peninsulas in the Aegean Sea and is administratively part of the Muğla province of Türkiye. Forests prevail across the landscape, especially around the stretch shaped by the Datça–Marmaris highway, while agriculture is concentrated on the Datça Plain, Cumali, and Yaka. This study aims to determine land use scenarios and identify suitable areas for future development and settlement. The GeoSOS-FLUS software package, developed based on Markov Chains and Artificial Neural Networks for land use simulations, was used. Aware of the limitations of simulations that do not consider land suitability, a suitability analysis was performed using the Best-Worst Method (BWM), one of the Multi-Criteria Decision Making approaches. Sixteen criteria within four groups—topography, socioeconomics, location, and environment—were evaluated. The suitability analysis results were compared with simulated land use scenarios, and the most suitable areas for future settlements in the Datça Peninsula were identified. This integrated approach provides important information for the sustainable development of the region and the shaping of land use planning.

Keywords: *Datça peninsula, Land-use/land-cover (LUCL) scenarios, Settlement suitability analysis, BWM*

Özet

Bu çalışma, arazi kullanımı/arazi örtüsü (LULC) senaryolarını incelemekte ve Datça Yarımadası'nda yerleşime uygun alanları belirlemektedir. Datça, Ege Denizi'ndeki dört yarımadadan biridir ve idari olarak Türkiye'nin Muğla iline bağlıdır. Ormanlık alanlar, özellikle Datça-Marmaris otoyolunun oluşturduğu alan çevresinde manzara sunarken tarımsal faaliyetler ise ağırlıklı olarak Datça Ovası, Cumali ve Yaka çevresinde yoğunlaşmaktadır. Bu çalışma, arazi kullanım senaryolarını belirlemeyi ve gelecekteki gelişme ve yerleşim için uygun alanları tespit etmeyi amaçlamaktadır. Arazi kullanım simülasyonları için Markov Zincirleri ve Yapay Sinir Ağları temelinde geliştirilen GeoSOS-FLUS yazılım paketi kullanılmıştır. Arazinin uygunluğunu dikkate almayan simülasyonların sınırlılıklarının farkında olarak, Çok Kriterli Karar Verme yaklaşımlarından biri olan En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) kullanılarak uygunluk analizi gerçekleştirilmiştir. Topografya, sosyo-ekonomik faktörler, konum ve çevresel koşullar olmak üzere dört ana kategoride on altı kriter değerlendirilmiştir. Uygunluk analizi sonuçları simüle edilmiş arazi kullanım senaryolarıyla karşılaştırılmış ve Datça Yarımadası'nda gelecekteki yerleşim yerleri için en uygun alanlar belirlenmiştir. Bu entegre yaklaşım bölgenin sürdürülebilir kalkınması ve arazi kullanım planlamasının şekillendirilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Datça yarımadası, Arazi-kullanım/arazi-örtüsü senaryoları, Yerleşime uygunluk analizi, BWM*

1. Introduction

Land use is defined in different ways in the literature. In an extended definition, land use is defined as people's use of land and resources (such as settlement, agriculture, grazing, logging) (Turner & Meyer, 1994; Meyer, 1995; Mwavu & Witkowski, 2008; Melese, 2016), land use, classification according to its value and determination of the use strategy, or the use of the whole or a specific part of the earth by individuals in various ways and for various purposes (Dağlı, 2021).

Anthropogenic processes affecting land use have profoundly impacted the world's ecosystems and global environmental change (Foley et al., 2005; Kalnay & Cai, 2003). Over the past century, the process of land use change has accelerated significantly due to the intensification of human activities, including deforestation, the opening of new agricultural areas, and urban expansion (Meyer & Turner, 1992; Ramankutty et al., 2006). Concerns about changes in land use worldwide are growing daily. Human activities, including population growth, urbanization, and rapid economic development, have significantly altered the Earth's surface processes. This has led to changes in environmental characteristics, such as climate, soil quality, and biodiversity, at both regional and global levels (Samie et al., 2017). Therefore, solutions for managing limited land efficiently and promoting sustainable development, especially in developing countries, have become crucial for both government planners and researchers (Yang et al., 2020). The environmental impacts of land use have been felt worldwide from the past to the present. For example, land-use practices have played a role in altering the global carbon cycle and potentially the global climate. Indeed, approximately 35% of human-caused CO2 emissions since 1850 have come directly from land use. Changes in land use and cover also affect regional climates through changes in surface energy and water balance. In this sense, humans have also transformed the hydrological cycle to provide fresh water for irrigation, industry, and domestic consumption. Land use also contributes to the loss, alteration, and fragmentation of habitats, as well as soil and water degradation, and the overexploitation of species, resulting in a decline in biodiversity (Foley et al., 2005).

One of the primary sources of such a change in land use worldwide and its impacts is the increase in urbanization rates. According to data from the United Nations (UN), the rate of urbanization worldwide was approximately 30% in 1950, but this rate increased to approximately 65% by 2023. Turkey has also experienced similar changes in land use. Especially after the 1950s, an intense wave of migration from rural areas to cities has led to a transformation of land use in cities, favoring urbanization, which has brought numerous problems, including unplanned settlements and the destruction of agricultural lands. This situation has begun to manifest itself in the Datça Peninsula, the study area, particularly with the recent surge in tourism activity. The fact that it has been removed mainly from tourism for a long time due to its remote location has delayed the change and transformation of land use. However, the increasing number of tourists in recent years has contributed to urbanization and initiated changes and transformations in land use.

Planning land use changes and transformation, and following a path towards it, is essential. Indeed, several land-use/land-cover (LULC) models have been developed in recent years to meet the needs of land management and better assess and predict the future role of land use change in the functioning of the Earth system. Modeling, especially spatially explicit, integrated, and multi-scale, is an essential technique for envisaging alternative pathways into the future, conducting experiments that test our understanding of fundamental processes, and quantifying them. Land-use change models represent part of the complexity of land-use systems. They offer the possibility to test the sensitivity of land-use models to changes in selected variables. They also allow testing the stability of linked social and ecological systems through scenario building. Although no model can capture all aspects of reality, it provides valuable information about the system's behavior under various conditions. Different modeling approaches are adopted in LULC change studies (Veldkamp & Lambin, 2001). Artificial Neural Networks (ANN) and Markov Chain (MC) are essential models used in land use scenarios. In land use scenario analyses, the GeoSOS-FLUS model, proposed by Liu and his team in 2017, is a software that uses ANN and MC together (Liu et al., 2017). The FLUS model uses a multilayer feed-forward artificial neural network algorithm to combine land use types and select variables from natural, social, and economic factors based on initial terrain data. This model generates a probability distribution map associated with the relevant variables for each land use type. However, the ability of traditional cellular automata models to simulate real-world changes is limited because they often assume static land change processes and fail to consider dynamic processes such as urbanization or development adequately. To overcome this limitation and improve simulation accuracy, the FLUS model combines the traditional cellular automata model with artificial neural networks to account for dynamic variables. In this way, the impact of natural processes and human activities on land use types becomes better managed, particularly in the face of more complex and uncertain transformations (Konurhan, 2024). In land use scenarios, a scenario and simulation cannot yet be created according to the suitability of the land. Land use is simulated by the variables determined by the current land use pattern. Therefore, simulation results may not be suitable for land use. For this reason, suitability analyses were also conducted within the scope of the study to determine areas suitable for settlement in the Datça Peninsula.

Suitability analyses are integrated with Multi-Criteria Decision-Making Methods (MCDM) and Geographic Information Systems (GIS) tools. In this study, the Best-Worst Method (BWM), an MCDM method proposed by Rezaei in 2015, was prepared using ArcGIS in an integrated manner (Konurhan, 2024).

There are numerous studies on land use scenarios suitable for settlement analyses using GIS-CCDM methods. Döker (2012), which examines land use scenarios, investigated the determination, monitoring, and modeling of Istanbul's urban growth process. Dağlı (2021) simulated Diyarbakır city development, while Görentaş (2021) simulated the city development on the Mersin-Tarsus-Adana line. Apart from these, numerous studies in the literature have explored land use scenarios (Oğuz & Bozali, 2014; Hamad et al., 2018; Han et al., 2015; Konurhan & Ceylan, 2024). In the literature, studies have also been conducted on determining areas suitable for settlement using GIS and MCDM methods (Foroozesh et al., 2022; Deliry & Uygurçgil, 2020; Luan et al., 2021). This study generates FLUS-based land use scenarios (2026–2044) for the Datça Peninsula by validating them using a long-term Landsat (1990–2022, 30 m) dataset, which is based on a validated SVM classification. It combines it with the spatial overlap/conflict analysis using the settlement suitability surface obtained with BWM-CBS. There are a few studies in the literature that use FLUS and BWM together (Gao et al., 2022); however, most of these studies do not address concrete planning proposals based on long-term Landsat-based validation and pixel-level scenario-suitability matching within the same framework. In this context, the contribution of the article is specific to Datça: (i) the direct application of scenario parameters calibrated in the thesis (Cost Matrix, neighbourhood weights), (ii) the presentation of model reliability with OA=88.74% and Kappa=0.84 reported from 2012–2018 to 2022 prediction -validation from 2012–2018 to 2022, with OA= 88.74% and Kappa=0.84, and (iii) the conversion of these two outputs into concrete recommendations (≤15% slope threshold, agricultural buffer zones, 400–500 m around Palamutbükü, etc.). Additionally, FLUS or similar CA-Markov approaches have been used to generate scenarios for different metropolitan areas, producing decision support with MCDM-based suitability maps. However, most of these studies have not addressed long-term LULC validation and scenario-suitability spatial overlap within the same framework. Indeed, this paper evaluates land use scenarios for the Datça Peninsula alongside BWM-based suitability, indicating not only where expansion should occur but also where it should not.

2. Literature Review

In the literature on land use/land cover (LULC) projections, cellular automaton-based approaches, primarily FLUS and CA-Markov, have been successfully applied in different contexts. Han et al. (2015) predict scenario-based LULC change in Beijing, reporting that urban expansion is concentrated in areas close to transport corridors; Hamad et al. (2018) provide a comparative analysis of LULC change using a two-scenario CA-Markov approach; Lin et al. (2020) integrate FLUS scenarios with flood risk assessment; the theoretical/applied framework of the model was established by Liu et al. (2017), and studies such as Chen et al. (2022) have continued the validation-prediction framework with FLUS across multiple scenarios. Meanwhile, Melese (2016) highlights the effects of LULC changes on forest resources in terms of ecological outcomes, indicating that model results should be evaluated not only in terms of spatial expansion but also from a resource management perspective. While the aforementioned studies detail their methodologies, their outputs are primarily focused on the question of ‘where is growth expected?’ This article follows this line of inquiry but also presents areas of compatibility/conflict for FLUS projections using the MCDM method for land suitability produced at the exact resolution in a decision-support context.

At the national level, Dağlı (2021) in Diyarbakır and Görentaş (2021) in the Mersin-Tarsus-Adana corridor address LULC change and urban growth using time series and CA-based simulations; the findings support patterns of intensive urban expansion around transport hubs. However, most of these theses and international examples either omit or relegate to a secondary level the step of combining projections with an independent suitability layer at the pixel level and mapping the resulting alignment/conflict areas as quantitative ‘priority/avoidance’ zones. This article highlights precisely this reconciliation in the context of the Datça Peninsula, making the spatial variation between projections and suitability visible.

In the context of MCDM and suitability assessment, the literature indicates that classical multi-criteria approaches, such as AHP, are effectively used in conjunction with GIS to weight criteria for urban development. Foroozesh et al. (2022) established a GIS-based hybrid MCDM framework for the city of Karaj, determining criterion weights using group fuzzy BWM and AHP, and prioritising areas using TOPSIS–GIS. The findings indicate that socio-economic criteria—particularly employment—are decisive in suitability and that the method provides practical decision support for planners (Foroozesh et al., 2022). Liu et al. (2014) produced a land suitability map for urban development in Beijing using opportunity/constraint-based indicators and multi-criteria evaluation (IPM/OWA); they tested the robustness of the model by conducting a sensitivity analysis. The results revealed that areas close to the transport network and existing settlement fabric exhibited higher suitability, and that conflicting planning decisions could be spatially distinguished.

Malmir et al. (2016) weighted numerous (approximately 25–30) sub-criteria using a fuzzy logic + ANP approach in Ahvaz District and produced an urban suitability map via WLC. It was emphasised that suitable areas were concentrated in the central and southern parts and that the method provided transferable decision support for different cities. An example of the applicability of the BWM-GIS approach in the context of urban suitability in Turkey is presented in Konurhan (2023). Konurhan (2023) demonstrated that criteria (e.g., slope, elevation, road distance, etc.) can be transparently weighted using BWM-GIS. In this article, scenarios are first generated using the FLUS model, and then the suitability surface for settlement is calculated using the BWM-CBS approach. The two outputs are compared at the pixel level with the exact spatial resolution, and areas suitable and unsuitable for planning are identified.

3. Material and Methods

This study used two different methods to conduct the analysis phase. First, the land-use simulation analysis of the Datça Peninsula was applied. Here, the future land-use status for the specified years was examined. Then, a suitability analysis was carried out for the land class of the settlement areas, as an example in the Datça Peninsula. The recent increase in tourism in Datça has begun to drive the development of urban areas. For this reason, the land class of the settlement areas was selected for the suitability analysis. Finally, these two analyses were compared, and the necessary evaluations were made. The flow diagram of the study is shown in Figure 1.

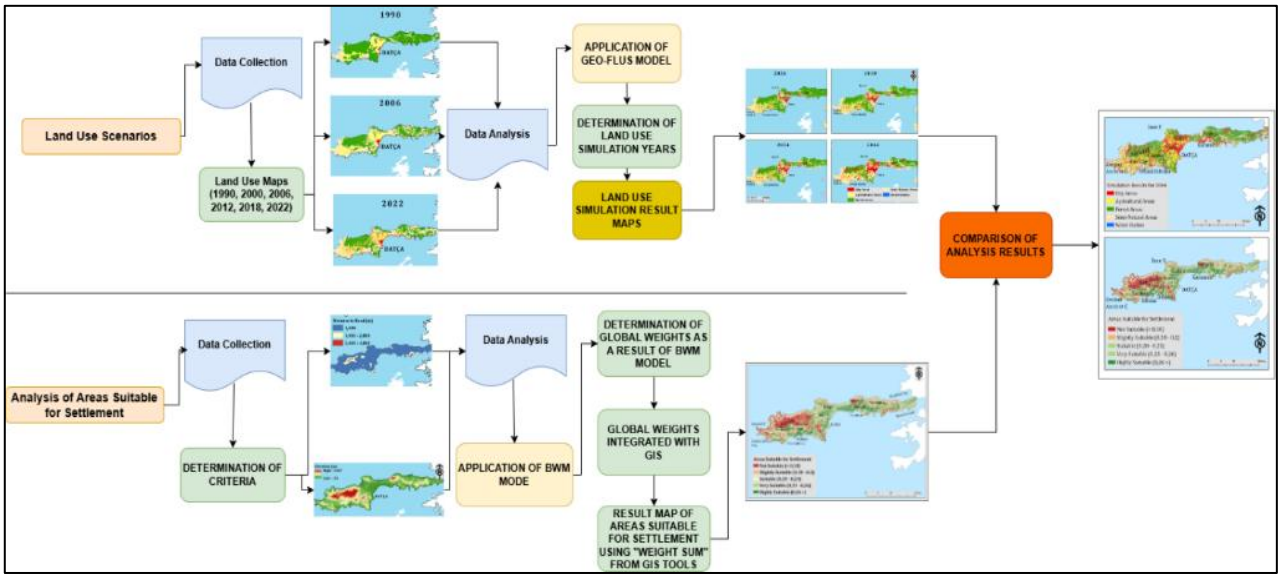


Figure 1. Flow diagram of the study

3.1. Aim of the Study

This study aims to determine the land use scenarios of the Datça Peninsula and the areas suitable for settlement in the peninsula. Another aim of the study is to compare land use scenarios and areas suitable for settlement with each other and to make necessary evaluations. The Datça Peninsula is located near Bodrum, Marmaris, and Fethiye, which are key tourism centers in Turkey. The Datça Peninsula stands out as an essential alternative to these regions due to the increasing number of tourists in these tourism areas in recent years, and the tourists' search for quieter places amid the COVID-19 pandemic. The number of tourists in Datça has increased in recent years. Therefore, the increase in tourists brings with it urbanization. This situation was observed in field studies around Bodrum, Marmaris, and Fethiye. At the same time, in the Datça Peninsula, the expansion tendencies of the settlement areas in and outside the district center have attracted attention in recent years. The expansion of settlement areas around Datça is expected to destroy agricultural and forest areas in the future. For this reason, it is necessary to determine the areas suitable for settlement to ensure the appropriate growth of settlements. In this context, the study aims to determine the areas suitable for settlement.

3.2. Study Area

The study area consists of the Datça Peninsula, located in the southwestern Anatolian part of our country, and administratively includes the Datça district of Muğla province (Figure 2). Datça Peninsula has a thin morphological structure that reaches 20 km in the broadest part, does not exceed 0.6 km in the narrowest part, and extends 70 km. The peninsula is surrounded by the Aegean Sea to the north and the Mediterranean Sea to the south, with Karadağ (627 m), Kırzeytin Mountain (705 m), and Balan Mountain (999 m) to the east. The peninsula, which attracts attention with its rugged terrain, exceeds 1000 m in height at some points. The highest peaks include Bozdağ (1174 m), Kalecik Mountain (881 m), Kocadağ (786 m), Emecik Mountain (704 m) and Yarık Mountain (615 m). Due to lithological differences, the west of the peninsula is hillier than the east. The plains are Karaköy, Kızlan, Mesudiye and Palamutbükü. In the peninsula where the Mediterranean climate prevails, red pine forests and maquis vegetation specific to this climate spread over large areas. When the maquis cover is damaged, furigana (garig) species dominate (Konurhan & Ceylan, 2024).



Figure 2. Location map of the study area

The geographical structure of the Datça Peninsula has a significant influence on tourism. The peninsula features a diverse range of geomorphological characteristics, including shallow bays, expansive sandy beaches, rising hills, and dramatic cliffs. These elements make the peninsula attractive for beach holidays, water sports, and nature tourism. In particular, the shallow bays of the peninsula offer visitors spectacular views and provide an excellent environment for nature activities such as trekking, hiking, and mountain biking. In addition, the coastal and karstic structure of the peninsula harbors many natural beauties that attract tourists with its caves and natural resources. However, the rugged structure of the Datça Peninsula and brutal transport conditions make the region problematic in terms of access. While the Marmaris-Datça highway, which provides access to the peninsula, was narrow and winding until recently, the modernization of this road in 2023 has made transportation somewhat easier. Despite this, access to the ancient city of Knidos, one of the most important cultural sites, remains difficult and limited. Despite all these difficulties, the peninsula's natural structure and geographical advantages offer great tourism potential. A significant increase in domestic and foreign tourists visiting Datça in recent years is notable. Datça is the largest settlement unit on the peninsula.

Settlements have historically exhibited a dispersed structure due to the peninsula's rugged topography and limited transport infrastructure. Significant differences exist between the settlements, particularly along the east-west axis. The eastern regions have a relatively more developed settlement network, while the settlements in the west are more rural and have difficulties in terms of access. Recently, there has been a significant increase in the number of housing units, driven by the demand created by tourism. There is an expansion around Datça towards Reşadiye, Karaköy, and Kızlan (Konurhan, 2024).

3.3. Data Collection

In this study, land-cover maps were produced using the supervised Support Vector Machine (SVM) classification model developed by Konurhan (2024) for the Bodrum-Fethiye coastal belt. Landsat 4–5 TM (1990, 2000, 2006, 2012) and Landsat 7 ETM+ and 8 OLI (2018, 2022) images were obtained at a spatial resolution of 30 m; and were prepared for classification after mosaicking, cropping, and selecting appropriate band combinations (e.g., 7-6-4 'Urban', 5-4-3 'Vegetation'). Training and validation sample areas for the SVM model were selected on an area-based basis to represent at least 10% of the surface area of each land class. Google Earth, Landsat natural colour composites, topographic/orthophotomaps, and CORINE data sets were used together in the sample determination process. This approach was preferred because it provides more reliable results than single-point control. Accuracy assessments of the classification outputs were performed using the Confusion Matrix tool in QGIS 3.32.1 software. Confusion matrices were created for each year, and producer accuracy, user accuracy, overall accuracy, and the Kappa coefficient were calculated. In the 2022 classification, the overall accuracy was found to be 88.74%, and the Kappa coefficient was 0.89; during the 1990–2018 period, the overall accuracy values ranged from 88% to 95%, and the Kappa coefficients ranged from 0.88 to 0.90. The relevant tables (Tables 6–12) and formulas (Table 5) are presented in detail in Konurhan (2024). All analyses were performed using ArcGIS 10.8 and Pro, QGIS 3.32.1 software, and the FLUS package program.

In this article, the classification model presented in Konurhan (2024) thesis was directly applied to the Datça Peninsula, and the classification algorithm, band combinations, and training-validation strategy were integrated into the sub-region without modification. Therefore, the reliability of the classification is maintained, and the model outputs were evaluated directly without further accuracy analysis. Indeed, the requested accuracy data are included in the relevant section of the source thesis and are summarized in this study. Furthermore, as in the thesis, the land cover classes used consist of urban areas, agricultural areas, forest areas, semi-natural areas (scrub/grassland/sparse vegetation), and water surfaces.

In the suitability analyses, the characteristics of the study area and criteria based on the literature were determined. Data were obtained according to the characteristics of each criterion. For example, elevation criterion data was obtained using a Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 30 m. In contrast, data such as roads and rivers were obtained from the OSM platform. Analyses such as buffer, slope, and aspect were applied according to the characteristics of the criteria to prepare the data for analysis. All analyses were performed using ArcGIS 10.8 and Pro software with the FLUS package program.

3.4. Establishment of Land Use Scenarios

Land use scenarios are reasonable and consistent descriptions of land use under different conditions or policy choices. They are used to explore and analyze the potential impacts of various land use decisions and development patterns. Land use scenarios aim to facilitate informed decision-making, identify potential risks and opportunities, and help stakeholders develop robust and adaptable land use plans. Land use scenarios offer valuable insights into the effects of various development strategies, facilitating more sustainable and adaptable land use planning practices. They are an essential tool in urban and regional planning, environmental management, and sustainability assessments, and can be used in various ways. Land use models are needed for the application of land use scenarios. Land use models are tools used to better understand the functioning of the land use system and to analyze the causes and consequences of land use changes, thereby supporting land use planning and policy (Verburg et al., 2004).

GeoSOS-FLUS (referred to as FLUS in the text), which is based on MC and ANN, was used for generating future simulation maps. The FLUS model was developed by Liu Xiaoping's team in 2017 (Liu et al., 2017). Firstly, the model is based on system dynamics and the cellular automaton model. It also integrates the ANN algorithm and random selection mechanism to improve the accuracy of LUCC change simulation (Lin et al., 2020; Wang et al., 2021). This mechanism effectively addresses the complexity and uncertainty associated with the interplay of various factors, including natural, social, and economic factors, and the mutual transformation between various land-use (cover) types (Zhu et al., 2023).

In the FLUS program, it is necessary to determine some variables as input data for simulation analyses. In this sense, a total of 10 natural and human variables affecting land-use change in the study area were determined.

The following variables are considered: elevation, slope, vegetation cover, distance to rivers, distance to roads, distance to power lines, distance to fault lines, distance to city centers, current population density, and distance to lakes/dams. Variables were evaluated and determined based on the characteristics of the study area and relevant literature sources. The determined variables were normalized and shown between 1 (high) and 0 (low) values (Figure 3).

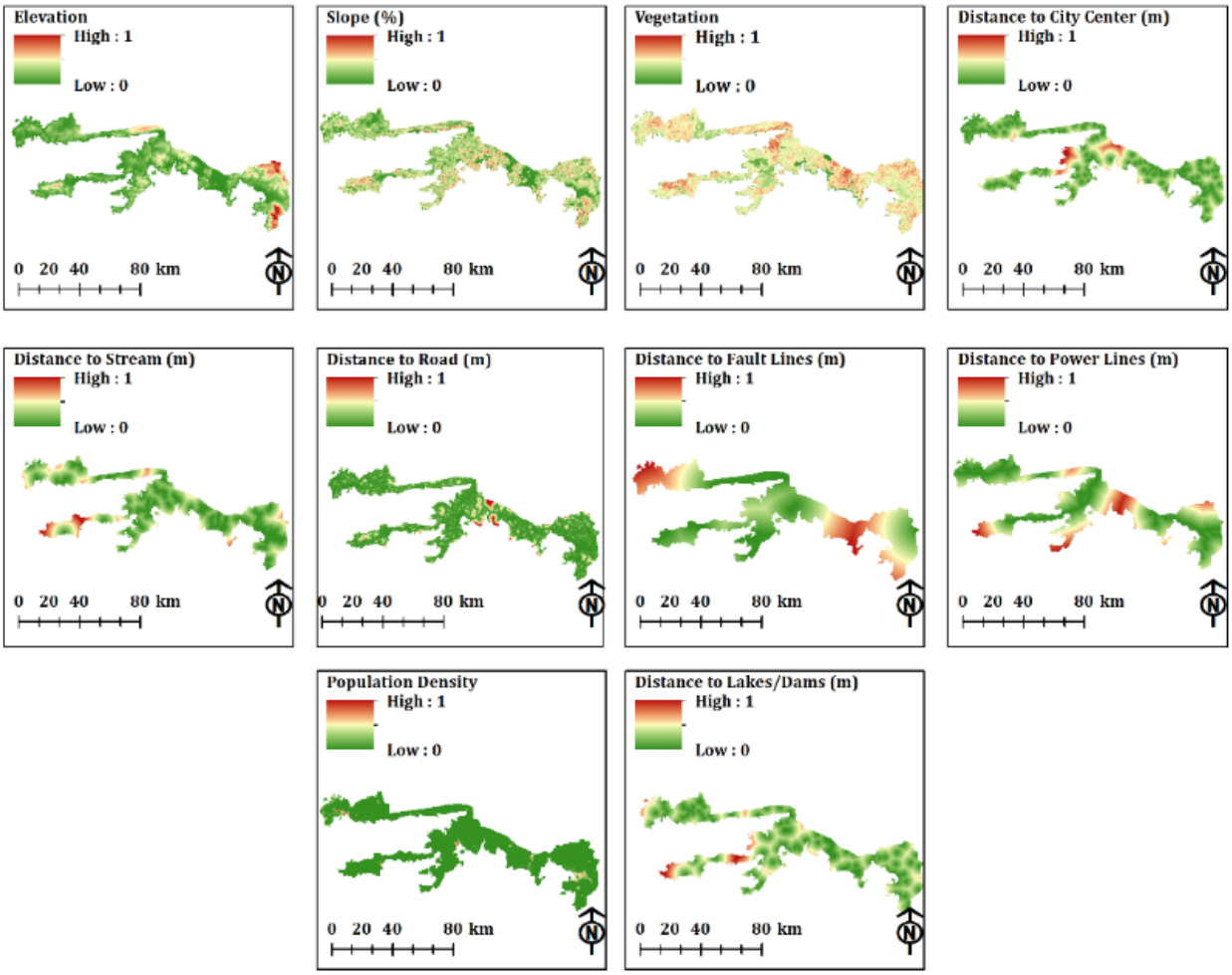


Figure 3. Variables used in land use simulations

Model calibration was performed by selecting the parameter set that provided the highest overall accuracy (88.74%) and FoM (0.27) according to the 2012-2018-2022 validation maps; in this context, water bodies were left stationary (0) in the Cost Matrix, the highest neighborhood weight (Weight = 1) was assigned to the artificial area class. The weights of the other courses were applied according to the values provided in Table 53 of the thesis (Konurhan, 2024).

3.5. Determination of Model Accuracy

Uncertainties are inevitable in land-use simulations. Therefore, it is necessary to determine the accuracy of the initial LULC data used in the simulation. For this purpose, firstly, an existing land-use map should be simulated, and the actual and simulated maps should be compared. In this context, a simulation map for 2022 was created using the land-use maps of 2012 and 2018 for the study area. Figure 4 and Table 1 compare the predicted results and the 2022 land-use map.

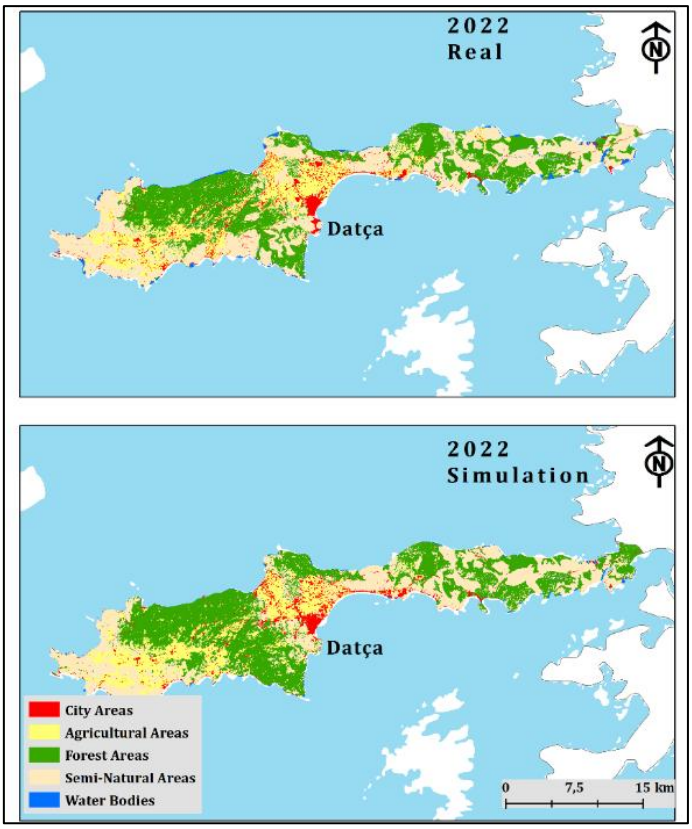


Figure 4. Actual and simulation maps of Datça Peninsula in 2022

Within the scope of the study, the accuracy of land use analyses was assessed using the Kappa coefficient index. The Kappa coefficient was determined by using the verification tools in the FLUS program. Here, the Kappa coefficient is calculated by taking random samples from the maps. Accordingly, the Kappa coefficient was calculated as 0.84. A Kappa coefficient greater than 0.8 indicates that the model accuracy has reached a satisfactory level of statistical significance (Landis & Koch, 1977; Rahnama, 2021; Talukdar et al., 2020). Therefore, according to the Kappa result, the data are suitable for simulation analysis.

Table 1. Comparison of 2022 actual and 2022 simulation land classes of Datça Peninsula

Land Class	2022 Real (km^2)	2022 Simulation (km^2)
City Areas	33,41	41,05
Agricultural Areas	41,13	48,21
Forest Areas	204,42	195,37
Semi-Natural Areas	145,17	139,75
Water Bodies	7,14	6,89
Total	**431,27**	**431,27**

The highest deviation observed in Table 1 is in the urban area class (≈ approximately +7.6 km^2; ≈ approximately 23%). Since this class covers only approximately 7% of the Datça Peninsula's surface area, even a small number of incorrect pixels can result in a high percentage error (Konurhan, 2024). The validation tables in Konurhan (2024), from which the data were obtained, indicate that the producer accuracy for urban areas is 75%, sensitivity is 83%, and specificity is 98%. The model overestimates urban sprawl, particularly in road corridors, due to spectral mixing and neighborhood effects. The 'semi-natural' class was not further subdivided because it consists of the aggregation of scrub-grassland subgroups in CORINE, and water bodies were left unchanged in the Cost Matrix (Konurhan, 2024). Therefore, these factors explain the relative error margin in the urban class, and the model performs in line with the overall model accuracy (overall accuracy: 88.74%; Kappa: 0.84). Overall accuracy and Kappa were calculated across all five classes; sensitivity of 83% and specificity of 98% for the urban class indicate that the primary sources of relative percentage error in the agricultural class may be the 30 m pixel mix and parcel boundaries.

In summary, model calibration was performed using a comparison of 2012–2018–2022 data; for 2022, OA=88.74% and Kappa=0.84 were obtained. Additionally, FoM=0.27 was reported using FLUS validation tools. In scenario design, water bodies were fixed (Cost Matrix=0), artificial area neighbourhood weight was assigned as 1; other class weights were used with the values in Table 53 of the thesis. Thus, the scenarios were supported by thesis-derived calibration parameters and validation against an independent time series.

3.6. Best-Worst Method (BWM)

BWM is a CRM method proposed by Rezaei in 2015. The BWM method is a weighting tool based on pairwise comparisons (2n-3, where n is the number of criteria) that simplifies the evaluation process by eliminating the need to compare all criteria individually. Firstly, the 'best' and 'worst' criteria are identified and then systematically compared with the other criteria. For these comparisons, a scale of 1-9 is used, where '1' indicates equal importance between the two criteria and '9' indicates a highly significant difference. To ensure consistency, two particular vectors are used:' from best relative to others' and 'from worst relative to others' (Rezaei, 2020).

Step 1: The criteria to be evaluated are determined. The requirements for decision-making are denoted by (c1, c2...cn).

Step 2: The best (most important, most desirable) and worst (least important, least desirable) criteria are determined. No pairwise comparison is made at this stage.

Step 3: Using numbers between 1-9, determine how different the best criterion is from the other criteria. The vector for best to other is constructed as follows: A_B=(a_B1,a_B2,...,a_Bn), where a_Bj indicates the preference of the best criterion B concerning the criterion. The comparison of the criteria with themselves (a_BB=1) is formulated in this way.

Step 4: Using numbers between 1-9 determines how different the worst criterion is from the other criteria. The Other-Worst vector is constructed as follows: A_B=(a_1W,a_2W,...,a_nW) where a_jW indicates the preference of criterion a_jW over the worst criterion.

Step 5: The formula determines the weight: w_1^*,w_2^*, 〖...,w〗 _n^*). When the necessary transformation is done, the problem is formed as follows:

minξ

|w_B/w_j -a_Bj |≤ ξ for all j

|w_j/w_W -a_jW |≤ξ for all j

Σw_j=1w_j≥0 for all j

Optimum weights in problem-solving are calculated by the formulae w_1^*,w_2^*, 〖...,w〗 _n^*, and ξ^*. The optimum weight values are transferred to ArcGIS to be used in the study output. Here, in the application phase of the 'Weight Sum' analysis, one of the overlapping analyses, each criterion is entered separately, and the resulting map is created.

In line with the BWM method, the consistency ratio (CR) of the weight values obtained from pairwise comparisons of the best and worst criteria was calculated according to Rezaei's (2015) formula, yielding a value of CR = 0.10. Since this value falls within the CR ≤ 0.10 limit accepted in the literature, the pairwise comparisons were considered consistent; surveys that exceeded this threshold in the initial calculation were re-evaluated and adjusted by experts to ensure consistency.

3.7. Selection of Criteria for Areas Suitable for Settlement

Different criteria are considered when determining suitable areas for land use settlements. In this study, the criteria were selected based on the literature and the region's characteristics (Foroozesh et al., 2022; Liu et al., 2014). Using BWM, 16 criteria were defined under four main headings: topography, socioeconomic factors, location, and environmental conditions (Table 2).

Table 2. Criteria determined for areas suitable for settlement

Topography	Socio-Economic Conditions	Location	Environmental and Land Conditions
Elevation	Population Density	Distance to Road Network	Land use
Slope	Distance to City Centers	Distance to Stream	Distance to Dam - Lakes
Aspect	Distance to Beach Areas	Distance to Power Lines	Vegetation
	Distance to Industrial Facilities	Distance to Fault Lines	Distance to Nature Park Areas
		Distance to Shore	

Topography criteria include elevation, slope, and aspect. Elevation is one of the essential criteria frequently used in site selection analyses. Generally, elevations between 0 and 500 m are considered the most suitable values for settlement (Liu et al., 2014; Luan et al., 2021). The topography of the Datça Peninsula is rugged, and elevations increase rapidly over short distances. However, elevations are lower around the Datça Plain and on the southern and southwestern coasts, ranging from approximately 0 to 600 m. These areas are among the most suitable places for settlement. In this context, regions between 0 and 500 m in elevation have been mapped as suitable for settlement. The slope is another critical factor in site selection. High slopes increase construction costs, disrupt slope stability, and increase the risk of erosion and landslides. For this reason, slope degrees of 0-5% are generally considered suitable for settlement (Arnous, 2013; Foroozesh et al., 2022; Luan et al., 2021). The Datça Peninsula has high slope values due to its rugged structure. These areas are unsuitable for settlement, especially since the slope is high in the northern parts. Accordingly, regions with a slope range of 0-5% are considered suitable for settlement. Finally, aspect is also among the topography criteria. The orientation of the settlement affects its capacity to receive sunlight. Since Turkey is located in the northern hemisphere, areas facing north and west receive less sunlight. On the other hand, the south and east directions receive more sunlight and heat in the winter months and are considered more advantageous for settlement (Konurhan, 2023). A map was created in Datça by considering these suitable aspect directions, and areas facing south and east were evaluated as suitable for settlement (Figure 5).

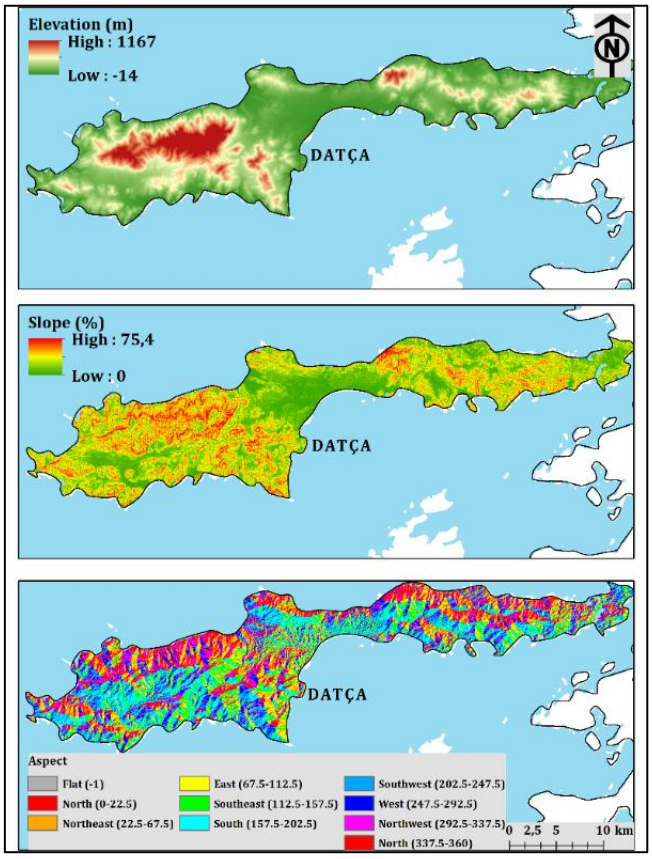


Figure 5. Topography criteria determined for areas suitable for settlement in the Datça Peninsula

The main criterion of socio-economic conditions includes sub-criteria such as population density, industrial zones, existing residential areas, and distance to beaches. High population density can create adverse effects on people, such as stress, aggression, and loneliness (Huang et al., 2019) and can also make municipal services difficult. Therefore, more densely populated areas are needed for new settlements. In the study, areas with a population density of 0-40 people per ha were considered very suitable, and those with a population density of 40-80 people per ha were considered suitable (Foroozesh et al., 2022). Yazıköy, Cumalı, Yaka, Mesudiye, Karaköy, and Kızlan surroundings in the Datça Peninsula were determined as suitable residential areas with low population density. Proximity to existing residential areas is also important because these areas typically have established infrastructure, cultural activities, and a well-defined socio-economic structure (Liu et al., 2014). The proximity to existing urban areas was analyzed for Datça, and suitable residential areas were identified accordingly.

Distance to industrial zones is also an important criterion. Industrial facilities play a critical role in the development of residential areas and the creation of job opportunities. Industrial areas on the Datça Peninsula were identified, and areas at least 1 km away were deemed suitable for residential use (Aburas et al., 2017). Finally, proximity to beaches is a significant advantage, particularly in the tourism industry. Beaches are natural attraction areas that increase tourism mobility. Beach areas on the Datça Peninsula were identified, distance analyses were conducted, and areas close to the beaches were evaluated positively regarding settlement (Figure 6).

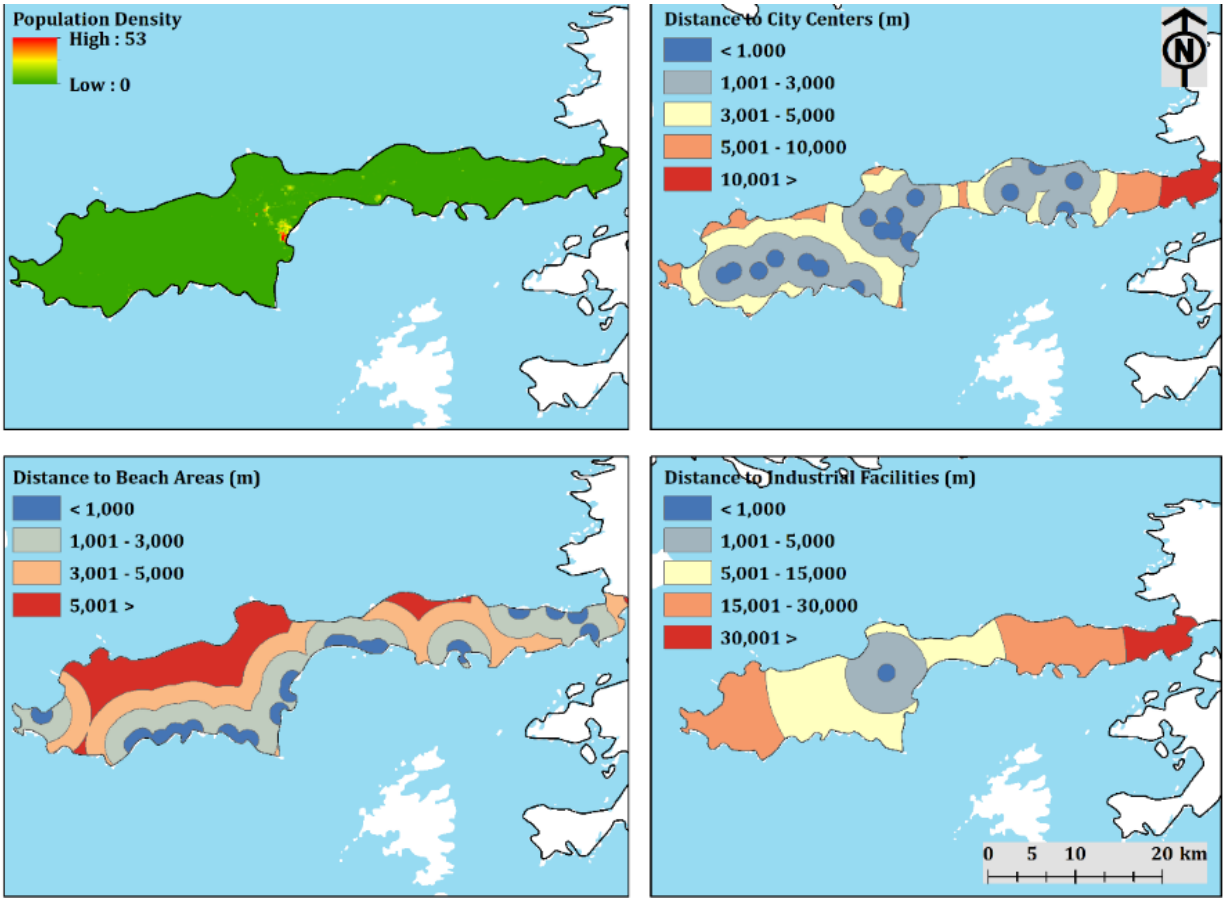


Figure 6. Socio-economic criteria determined for areas suitable for settlement in the Datça Peninsula

The location of settlements plays a critical role in their development. Therefore, location is of great importance in determining settlement areas. Under the location criterion, five sub-criteria were determined, including road network, stream, power lines, fault lines, and distance to the coast. Proximity to the road network is one of the most important of these criteria. Settlements 1 km away from the road network are suitable for settlement (Mahiny & Clarke, 2012; Liu et al., 2014; Luan et al., 2021). As a result of the analysis conducted in the Datça Peninsula, areas located 1 km from the road network were classified as the most suitable.

Proximity to the stream is also essential for settlement, as water resources are vital to the sustainability of settlements. Areas within 1 km of streams have been accepted as the most suitable areas for settlement (Deliry & Uyguçgil, 2020; Chabuk et al., 2019). Another important sub-criterion is the distance to power lines. Access to energy is a basic need for settlements. Areas within 1 km of power transmission lines on the Datça Peninsula have been identified as the most suitable for settlement (Figure 7).

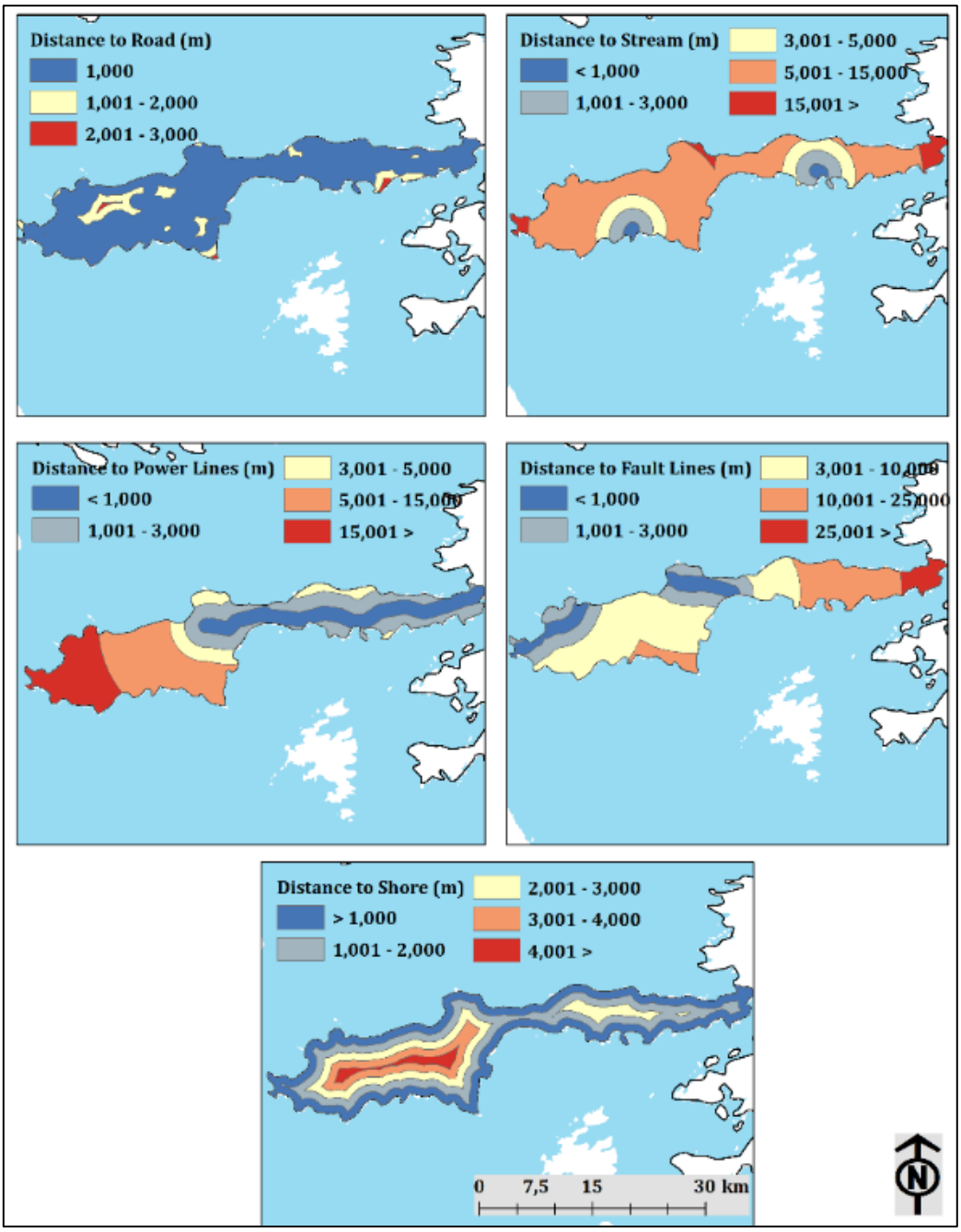


Figure 7. Location criteria determined for areas suitable for settlement in the Datça Peninsula

Due to earthquake risk, distance to fault lines is a critical factor in settlement planning. The Datça Peninsula carries a high earthquake risk due to the Datça Fault and the fault lines in the Aegean Sea and Bozburun Peninsula. Therefore, settlements should be at least 1 km from the fault lines (Sakieh et al., 2015). As a result of the analyses, suitable settlement areas were determined by considering the distance to the fault lines. While the Kızlan area and the skirts of Kocadağ are among the riskiest areas, Yazıköy, Cumalı, Yaka, Mesudiye, Hızırşah, Reşadiye, and Datça center in the southern parts of the peninsula were classified as lower risk areas. Another vital element in the primary location criterion is the distance to the coast. Proximity to the seashore provides advantages to settlements in terms of socio-cultural activities and commercial activities (especially fishing). As a result of the distance analyses conducted on the Datça Peninsula, suitable areas were classified gradually according to their proximity to the coast (Figure 6).

The main environmental and land conditions criteria include sub-criteria such as LULC, distance to dam-lake areas, vegetation, and distance to nature parks. The land-cover/land-use criterion focuses on existing land; bare areas are considered the most suitable for settlement. Agricultural and forest areas are not suitable for settlement. In this context, suitable areas were identified using the 2022 land-use/land-cover map for Datça.

Another vital criterion is proximity to water resources, and although there is no dam on the Datça Peninsula, there are a few small ponds. Distance analysis was performed by considering the distance to these ponds and identifying suitable areas for settlement.

Regarding vegetation, bare areas with little vegetation are preferred for settlement areas. A vegetation map was created for the Datça Peninsula, and bare areas where settlement could be established with minimal vegetation loss were classified as suitable. Finally, the distance to nature parks is an important criterion. While building settlement areas near nature parks is forbidden, density construction in these areas may damage the natural environment. For this reason, it is recommended to establish settlement areas at least 1 km away from nature parks (Malmir et al., 2016; Li et al., 2018). The surroundings of Çubucak and Kovanlık Nature Parks in Datça were not deemed suitable areas, and the areas outside these parks were identified as suitable for settlement (Figure 8).

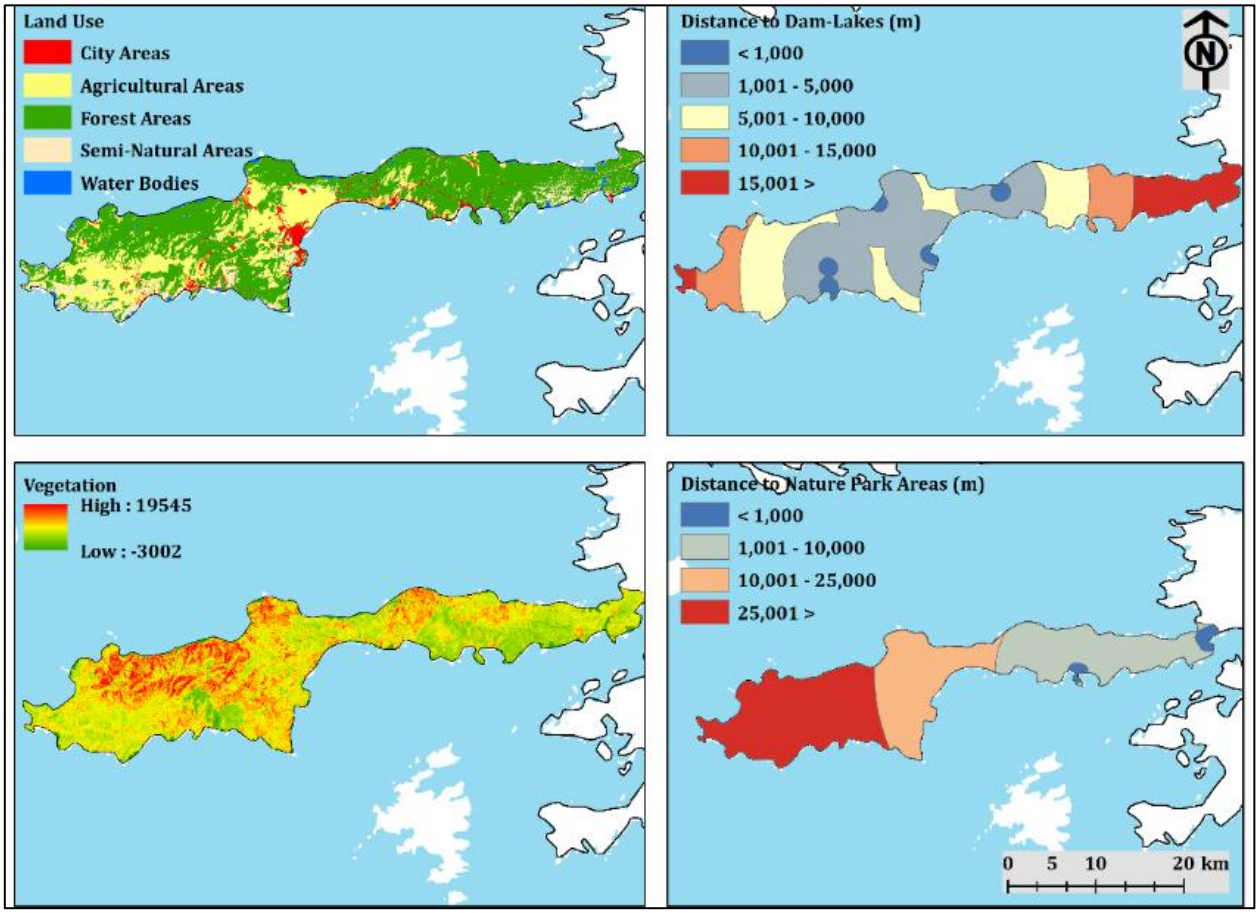


Figure 8. Environmental and land condition criteria determined for areas suitable for settlement in the Datça Peninsula

4. Application Results

4.1 Land Use in Datça Peninsula

Five main classes were determined in the LULC analyses on the Datça Peninsula. These include settlements, agricultural areas, forests, semi-natural habitats, and water bodies. Forests and semi-natural areas dominate the peninsula, which covers an area of approximately 430 km². In 1990, forests covered the largest area, approximately 240 km², followed by semi-natural areas of 110 km², agricultural areas of 68 km², water bodies of 7 km², and residential areas of 5 km². By 2000, forests were again the largest class, regressing to approximately 230 km², while semi-natural areas increased to 120 km². During the same period, the agricultural areas covered 64 km², and the residential areas covered 6 km². Between 1990 and 2000, semi-natural and residential areas expanded slightly, while forests and agricultural areas decreased by approximately 9 km². No significant changes were observed in the water bodies. There was no significant change in the LULC pattern on the peninsula over the 10 years (Figure 9; Table 3).

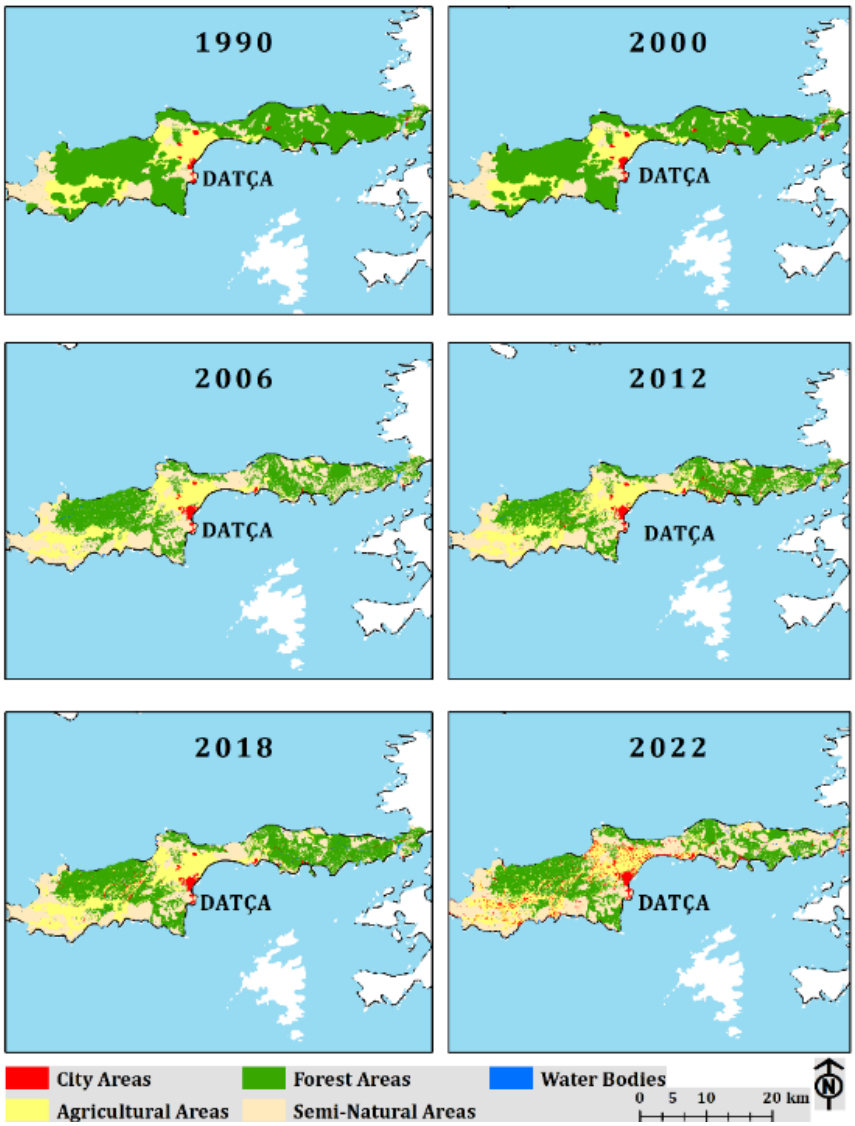


Figure 9. Land-Use/Land-Cover (LULC) composition of the Datça Peninsula, 1990 – 2022

The LULC assessments conducted between 2012 and 2022 showed a significant increase in residential areas. In 2012, forest areas were approximately 220 km², semi-natural areas 135 km², agricultural areas 55 km², residential areas 15 km², and water bodies were around 7 km². In 2022, forest areas reached 205 km², semi-natural areas 145 km², agricultural areas 40 km², and residential areas 33 km². Significant increases were recorded in semi-natural and residential areas, while there was no change in water bodies. In particular, the residential areas land class expanded the most, with an increase of 17 km², while agricultural areas decreased by approximately 14 km² and became the land class that shrank the most (Figure 8; Table 3).

Table 3. Land-use/land-cover (LULC) data of Datça Peninsula between 1990-2022 (km²)

Land Classes	1990	2000	2006	2012	2018	2022
City Areas	4,93	6,02	10,62	16,37	24,88	33,41
Agricultural Areas	68,23	64,08	61,32	55,19	48,47	41,13
Forest Areas	238,45	233,45	228,45	218,07	213,29	204,42
Semi-Natural Areas	112,54	120,20	123,75	134,75	137,21	145,17
Water Bodies	7,12	7,53	7,13	6,89	7,42	7,14
Total	431,27	431,27	431,27	431,27	431,27	431,27

According to LULC data, the residential areas in the Datça Peninsula have gradually increased since 2006 and reached approximately 35 km² in 2022. One of the main reasons for the partial increase in the land class of residential areas in the Datça Peninsula between 2012 and 2022 is the increasing number of tourists. The increase in residential areas is expected to continue in the coming years, as tourist movements are projected to remain high.

4.2. Results of Land-Use Scenarios

In the study, scenarios for the years 2026, 2030, 2034, and 2044 were conducted based on parameters created with FLUS software in a doctoral thesis (Konurhan, 2024). In the thesis, Markov transition probabilities were obtained from land use maps for the years 2012, 2018, and 2022, as well as elevation, slope, vegetation cover, distance to waterways and power lines, distance to fault lines, and distance to settlements. Land use maps for the years 2012–2018–2022. The scenario settings were created entirely according to the values defined in the thesis: water bodies were assumed to be stationary, the highest propagation weight (Weight = 1) was assigned to the artificial area class, and inter-class transition constraints were determined using the Cost Matrix (Konurhan, 2024).

According to LULC simulations conducted on the Datça Peninsula, residential areas are expected to grow in the coming years. The 2026 simulation results indicate that the residential land class will cover approximately 40 km², agricultural areas will encompass 43 km², forest areas will occupy 200 km², semi-natural areas will span 138 km², and water bodies will comprise 7 km². In 2034, residential areas are expected to expand to 61 km², representing a 20 km² increase. Semi-natural areas also increase by approximately 7 km², while agricultural and forest areas constantly decrease. According to the 2044 simulations, residential areas are expected to expand significantly, reaching 78.46 km²; agricultural areas will increase to 21.49 km²; forest areas will increase to 166.68 km²; and semi-natural areas will increase to 156.78 km². A stable situation of approximately 7.86 km² is envisaged for water masses (Figure 10; Table 4).

According to the simulation results, the settlement areas in the Datça Plain spread from the Datça city center to the north towards Reşadiye, Karaköy, and Kızlan. According to the 2034 simulation, the settlement areas are connected from south to north without interruption. The development of the settlement areas began in Datça city and extended to Reşadiye, Karaköy, and the Datça Kairos Marina in the north. This growth has occurred mainly in agricultural areas, which indicates the loss of agricultural land.

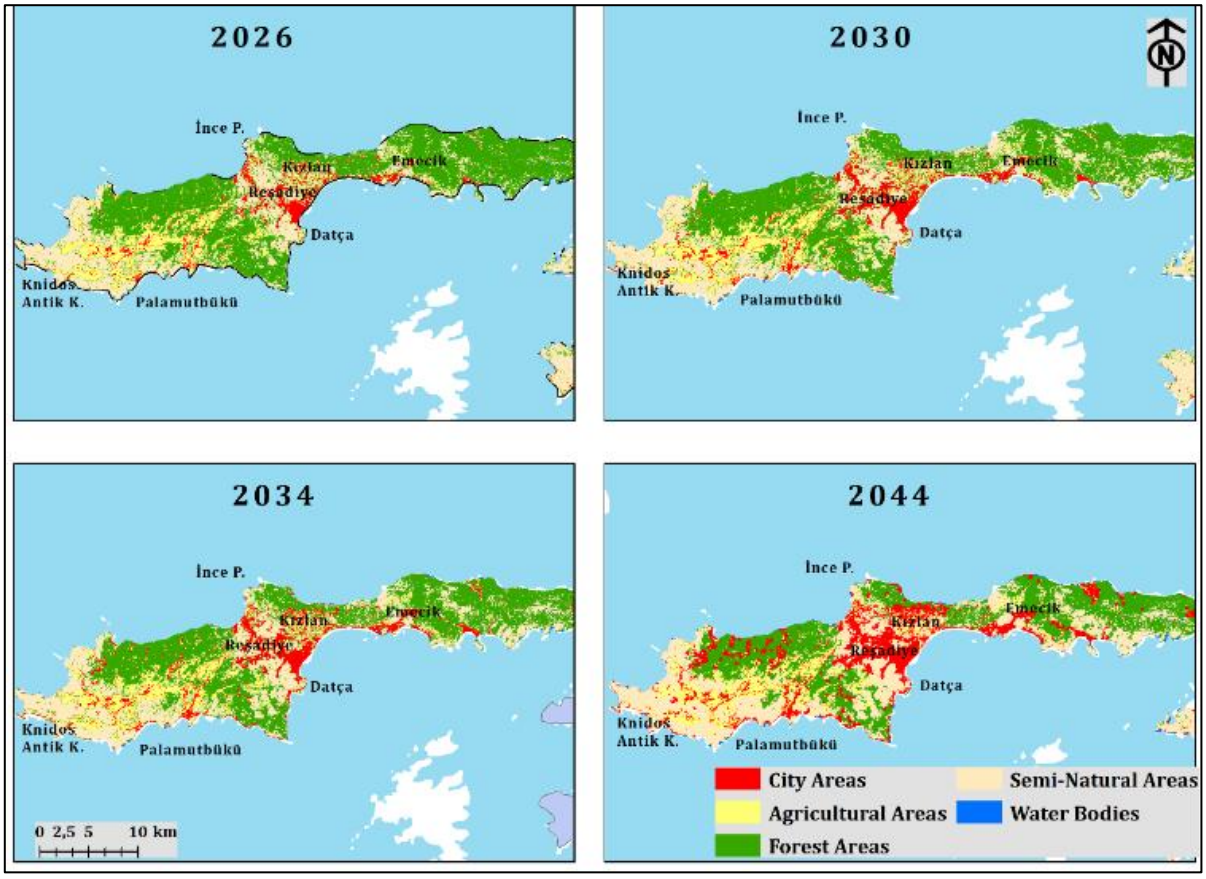


Figure 10. Datça Peninsula land-use simulation results

Table 4. Datça Peninsula land-use simulation (2026-2044) Data (km^2)

Land Classes	2026	2030	2034	2044
City Areas	40,82	53,08	61,18	78,46
Agricultural Areas	43,31	39,15	31,32	21,49
Forest Areas	200,42	190,12	185,06	166,68
Semi-Natural Areas	138,84	141,12	145,87	156,78
Water Bodies	7,88	7,80	7,84	7,86
Total	**431,27**	**431,27**	**431,27**	**431,27**

According to the 2044 LULC simulations, almost all of the Datça Plain is covered by residential areas. In 2034, residential areas expanded towards Reşadiye, Karaköy, and the north. By 2044, this expansion had shifted eastwards to Kızlan. Residential areas spread to include Datça city center, Karaköy, Reşadiye and Kızlan. The expansion generally followed the existing road network and low-altitude areas. It was observed that residential areas in Karaincir and Emecik, located east of Datça Plain, grew parallel to the Marmaris-Datça road route. The expansion towards the west spread to the Karaköy and Hızırşah areas, and these areas were predominantly simulated to be occupied by agricultural lands.

The settlements such as Yazıköy, Cumalı, Yaka, and Sındı located in the west of the peninsula, are in the flat areas on the skirts of Kocadağ. In the south, settlements are found around Palamutbükü and Ovabükü. The reason for these settlements being concentrated in the south is that the north is mountainous and rugged. According to the 2044 simulation results, the settlement areas around Mesudiye Neighborhood and Palamutbükü have also grown by following the existing road routes and low-elevation areas.

Since the Datça Peninsula has a mountainous and rugged topography, settlements are generally concentrated in the flatter, more accessible plain areas. In the land-use simulation, the expansion of settlement areas is modeled based on these flat areas. This is because the variables used in the simulation are compatible with the current land-use pattern. For example, the settlement areas in the study area are generally concentrated at low altitudes, near road routes, and in flat areas. This has led to the simulation results taking shape in this direction. Similarly, the development of settlement areas in Datça has increased in less rugged areas, close to road connections and plains. In this process, settlement areas are simulated to expand by occupying mostly agricultural lands and partly forested areas.

4.3. Determination of Areas Suitable for Settlement

BWM, one of the MCDM methods, was used to determine areas suitable for settlement. In this direction, the weight value of each criterion was calculated using the LINGO 20.0 package program. The calculated weight values were superimposed using the "Weight Sum" tool, one of the ArcGIS 10.8 tools, and suitable settlement areas for the Datça Peninsula were determined.

Among the global weight values calculated with the BWM method, the most important criterion was the "elevation" criterion (0,1318). The elevation criterion was followed by the distances to the road network (0.1071), dams and lakes (0.0966), and power lines (0.0949). The least important criterion was calculated as the aspect criterion (0.0124) (Table 5).

Table 5. Global weight values calculated using BWM

Criteria	Weight Value	Criteria	Weight Value
Elevation	0,1318	Distance to Stream	0,0624
Slope	0,0831	Distance to Power Lines	0,0949
Aspect	0,0124	Distance to Fault Lines	0,0872
Population Density	0,0544	Distance to Shore	0,0145
Distance to City Centers	0,0464	Land use	0,0868
Distance to Beach Areas	0,0154	Distance to Dams-Lakes	0,0966
Distance to Industrial Facilities	0,0743	Vegetation	0,0170
Distance to Road Network	0,1071	Distance to Nature Park Areas	0,0148

BWM weights, obtained by optimizing the ‘best/worst’ comparisons of six experts experienced in regional planning and geography in LINGO, were consistent with CR = 0.10. Since participants emphasized that settlements have developed primarily at low elevations and near roads, elevation (0.138) and distance from the road network (0.107) received the

highest weights. Since slope values are already closely related to elevation, they were included in the model with a lower weight (0.084) to avoid duplication. Since the presence of agriculture and forestry was considered in LULC conversion probabilities, the 'land use' criterion was left at a medium level (0.087). Thus, the weights were determined in a manner consistent with field reality and expert opinions.

The base maps, created according to the calculated weight values , were combined to determine suitable areas for settlement in the Datça Peninsula. According to the results, the southern shores of the peninsula stand out as suitable areas for settlement. In particular, the Datça Plain surroundings, the region extending to Ovabükü and Palamutbükü in the southwest, were identified as the most suitable areas for settlement. Kızlan, Reşadiye, Datça district center, and the northern shores of the Datça Plain are also among the most suitable areas for settlement. These areas are among the lowest altitudes of the peninsula. In addition, the existing urbanization, developed road network, industrial site, and coastline have made these areas suitable for settlement (Figure 11).

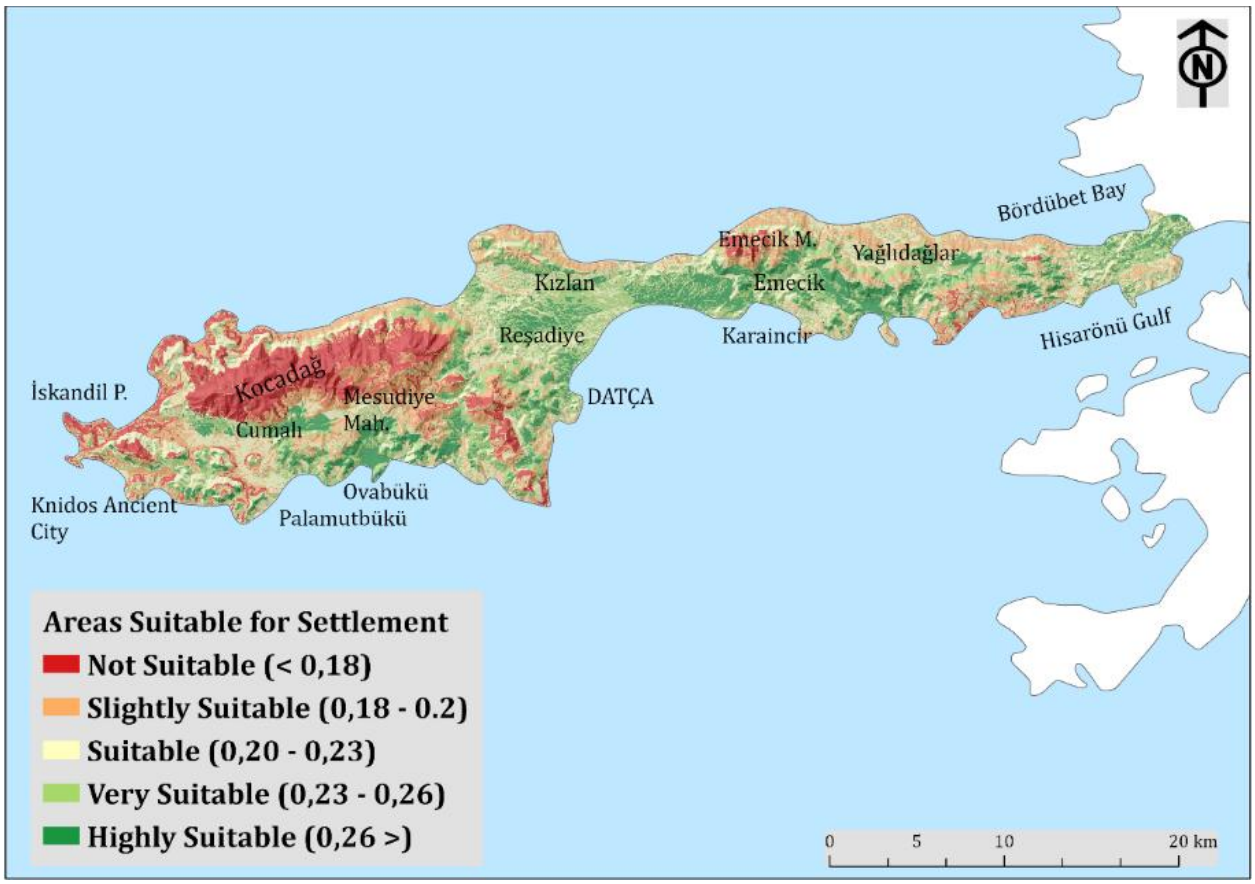


Figure 11. Areas suitable for settlement in the Datça Peninsula

Emecik and Karaincir's surroundings on the Datça-Marmaris road are among the areas suitable for settlement due to their low elevation values. The southern shores of the region, forming the isthmus of the peninsula through which this road passes, have also been generally determined as suitable areas for settlement. Karaincir and Bencik Bay are suitable for settlement, except for some sections where the elevation increases. Although the isthmus area is generally rugged, the elevation on the southern shores mainly varies between 0 and 450 m, and the highest point is Kocadağ, at 747 m, located north of Emecik. Therefore, according to the elevation criterion, these regions are ideal places for settlement. Additionally, the existence of the Datça-Marmaris highway has been a crucial factor in determining whether this region is suitable. Elevation and proximity to the road network are among the most important elements in the criterion evaluation.

According to the analysis results, the northwestern part of the Datça Peninsula, where the elevation and slope are high, the road network is underdeveloped, and it is far from the district center, is unsuitable for settlement. Bozdağ in this region is the highest point of the peninsula with 1162 m and has a very rugged topography covered with forests and no settlements. Therefore, it is not suitable for settlement.

Additionally, the Kocadağ area, located in the north of Emecik, is also among the unsuitable areas. The north of Kargı Bay and the northwest of Datça district center are also classified as other areas unsuitable for settlement.

When the spatial distribution of the outputs is examined, the areas showing high suitability are approximately 37 km², and the very suitable areas are 85 km². These two classes are of great importance for suitable settlement areas, and these areas can be evaluated as suitable for settlement. However, approximately 45% of the Datça Peninsula is not suitable for settlement (Table 6).

Table 6. Suitability classes and spatial distribution in Datça Peninsula

Suitability Classes	Suitability Value	Area	
		km²	%
Highly Suitable	0,26 >	37,23	8,62
Very Suitable	0,23- 0,26	86,07	19,95
Suitable	0,20-0,23	112,54	26,09
Slightly Suitable	0,18-0,20	119,75	27,76
Not Suitable	< 0,18	75,68	17,54
Total		**431,27**	**100**

5. Discussion

According to the simulation results, the development of settlements in the Datça Peninsula is primarily directed to the north and east of the Datça Plain. This situation leads to the destruction and disappearance of agricultural lands in the plain. A similar process has occurred in the past, and the city of Datça has continuously expanded to agricultural lands.

Figure 10 and Table 4 simulation outputs for 2026–2044 reveal a striking concentration around the Datça Plain. Model results indicate that settlement areas will increase from 40.8 km² to 78.5 km² (+92%) over the four scenario years, while agricultural areas will decrease by half, from 43.3 km² to 21.5 km², and forest areas will decline from 200.4 km² to 166.7 km² (-17%). Urbanisation is primarily developing in the 0–150 m elevation band and within 1 km of the existing road network, forming a continuous strip along the north-south axis from Datça city centre to Reşadiye, Karaköy, and Kızlan; it extends as far as Palamutbükü and Ovabükü in the southwest. The 2044 scenario suggests that nearly the entire Datça Plain, which serves as the backbone of agricultural production, will face significant settlement pressure, while forested and semi-natural areas on the steep northern slopes will remain relatively protected. This scenario highlights the need to guide settlement expansion within a balance between conservation and use; particularly by defining a ≤ 15% slope limit for agricultural lands and agricultural buffers, and shifting new residential areas to the sparsely vegetated maquis belt at an elevation of 400–500 metres around Palamutbükü emerges as a sustainable scenario.

According to the simulation results of the settlement suitability analysis conducted for Datça, the Datça Plain is one of the prominent areas. This area stands out in both the simulation and suitability analyses due to its low elevation and slope values. Urban development is more accessible in such flat and low-cost areas. However, suitability analyses indicate that the Datça Plain and regions such as the northwest of the district center, the west, and the southwest coast are suitable for settlement. In addition, the southern shores of the isthmus on the Datça-Marmaris highway are suitable for settlement, except for certain altitudes (Figure 12).

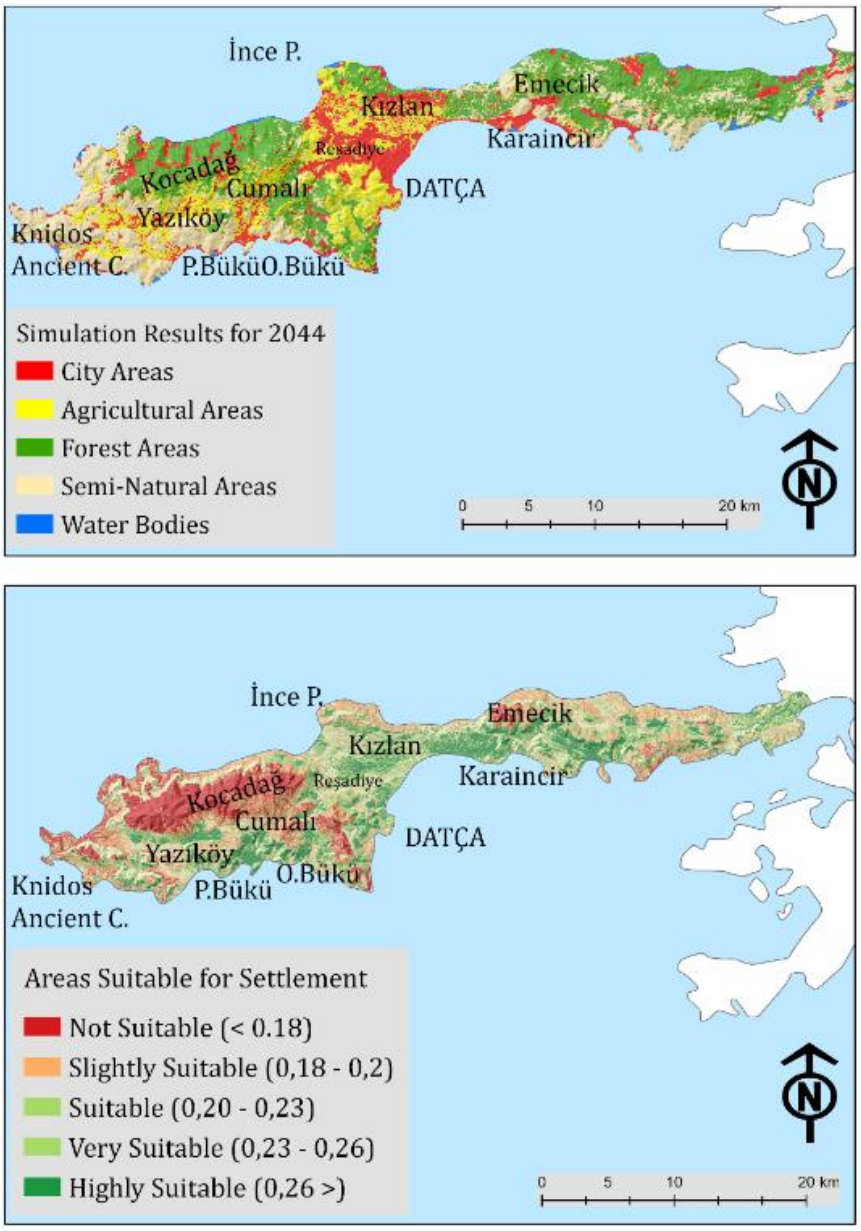


Figure 12. Areas suitable for settlement with 2044 simulation results of Datça Peninsula

The current situation and simulation results show that settlement areas are destroying agricultural lands. However, land suitability analyses reveal regions with higher altitudes and sparse forest cover outside agricultural areas. Especially the areas between Yazıköy and Mesudiye Neighborhood, as well as the surroundings of Palamutbükü and Ovabükü, fall into this category. Necessary examinations can be conducted in these regions, and suitable locations can be identified for settlement. Thus, sustainable urban development can be carried out in suitable areas by protecting agricultural lands. Today, construction has started around the Balcahisar and İskele Locations in the northwest of Datça and İçkoru Location in the southeast. It is important for urban development that this construction continues in suitable areas without damaging agricultural and forest areas.

Considering the increasing tourism activities in recent years, new alternative settlement areas need to be created outside the Datça district center. According to the analysis results, the Palamutbükü area stands out in this regard. New settlements can be developed at altitudes of 400-500 meters without damaging agricultural and forest areas. There are already old settlements in this area. For example, areas with little vegetation and hilly areas around Palamutbükü attract attention. Places such as Sakızyayla Ridge and Karabalık Hill (381 m) can be considered suitable for new settlement areas (Figure 13).



Figure 13. View of Datça Peninsula Palamutbükü and surroundings

Consequently, there are areas on the Datça Peninsula where the simulation results coincide with areas suitable for settlement. These overlaps are particularly evident in the Datça Plain. According to the simulation, areas with less intensive urban development on the southwestern and southeastern coasts of the peninsula are suitable for new settlements. Therefore, the development of settlements in Datça should be planned in a way that prioritises the protection of agricultural and forest areas and strikes a balance between conservation and use. On the other hand, the output results are consistent with land use scenarios considered in other studies. Simulations conducted for Beijing show that urban expansion is concentrated around low elevations and transport networks (Han, 2015). CA-Markov-based studies emphasize that scenario assumptions have significant effects on agricultural/forest conversions (Hamad et el., 2018). In the Guangzhou case, FLUS scenarios were evaluated in conjunction with flood sensitivity, highlighting expansion pressures in low-lying areas (Lin et al., 2020). Studies in Diyarbakır (Dağlı, 2021) and Mersin-Tarsus-Adana (Görentaş, 2021) in Turkey also indicate that growth is concentrated around plain bases and road networks. Similarly, scenarios obtained for the Datça Peninsula show that settlement pressure is concentrated in the 0–150 m elevation band and areas close to the road network. That conversion from agricultural land is significant. The divergent results for the peninsula are that geographical constraints and tourism pressure shape the direction of growth. While there is a tendency for expansion in coastal and plain strips, steep forest-semi-natural belts are relatively protected. Unlike scenario outputs in literature, this study aligns FLUS projections with suitability surfaces produced at the exact resolution at the pixel level, making areas of compatibility/conflict clearly visible. Thus, it assesses not only the question ‘where is growth expected?’ but also ‘where should growth not occur?’ from a planning perspective.

6. Conclusion

The study focused on the land-use scenarios of the Datça Peninsula and identified areas suitable for settlement. The Datça Peninsula has recently emerged as an alternative to the surrounding regions, including Bodrum, Marmaris, and Fethiye. The increase in the number of tourists in recent years is a clear indication of this. This has caused an increase in population and construction in certain parts of the peninsula. In particular, the city of Datça has begun to expand and grow towards Kızlan and Reşadiye on the plain. Indeed, while the settlement areas in the peninsula were approximately 5 km² in 1990, this area increased to approximately 33 km² by 2022. According to the land-use scenario results, this rate is expected to increase and reach approximately 78 km² by 2040.

The Datça Peninsula has a rugged topography that is generally covered with forest areas. Only certain areas are suitable for settlement. As part of the study, areas suitable for settlement were identified throughout the peninsula. Accordingly, the ratio of very suitable and highly suitable areas on the peninsula is approximately 30%. These areas are generally located on the southern shores of the peninsula because the northern shores are very mountainous. The Datça Plain and its surroundings, including Karaincir, Palamutbükü, Mesudiye, Cumalı, and Yazı, are among the most suitable areas for settlement on the peninsula.

When the land-use scenario and settlement suitability analysis results are compared, certain areas overlap, such as Datça Plain and its surroundings. However, the increase in settlements in Datça Plain and its surroundings leads to the destruction of almond trees and agricultural areas, are important species for Datça. Therefore, within the scope of this study, it is recommended that settlement areas expand towards certain heights around Palamutbükü, which are suitable for settlement according to the analysis results. These areas can be suitable for settlement due to their low elevation and barren maquis communities.

Landsat assessments for the period 1990–2022 show that settlement areas increased by +28 km² (≈ 560%), while agricultural land decreased by –27 km² (≈ 40%), and forests decreased by –34 km² (≈ 14%). The FLUS scenario predicts that this trend will continue, increasing the settlement area to 78 km² by 2044, with approximately half of this coming from converted agricultural land. Seventy percent of the increase will be concentrated in the 0–150 m elevation band and within < 1 km of roads.

These findings underscore the importance of measures such as a ≤ 15% slope limit, agricultural buffer zones, and post-fire development restrictions on northern slopes in maintaining the balance between conservation and use in the Datça Plain. Additionally, the sparse maquis belt around Palamutbükü at an elevation of 400–500 meters could be planned as an ‘alternative settlement area. This would enable simultaneous management of agricultural production, forest ecosystems, and tourism pressures.

The study provides important information for future research by analyzing land use scenarios and identifying areas suitable for settlement on the Datça Peninsula. In future studies, higher-resolution and multi-source fusion approaches can be evaluated; classification can be retrained, and scenario parameters (transition costs and neighborhood weights) can be recalibrated; and the scenario-suitability integration presented here can be tested with more detailed local models. More comprehensive integration of factors such as climate change, natural disaster risk, and ecological balance could significantly contribute to the development of sustainable settlement strategies. Furthermore, incorporating surveys conducted with the participation of local communities and other stakeholders into these analyses could further strengthen their socio-economic dimensions.

References

Aburas, M. M., Abdullah, S. H. O., Ramli, M. R., & Asha’ari, Z. H. (2017). Land suitability analysis of urban growth in Seremban, Malaysia, using GIS-based Analytical Hierarchy Process. *Procedia Engineering, 198*, 1128–1136. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.155

Arnous, M. O. (2013). Geotechnical site investigations for possible urban extensions at Suez City, Egypt, using GIS. *Arabian Journal of Geosciences, 6*(5), 1349–1369. https://doi.org/10.1007/s12517-011-04411

Chabuk, A., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Laue, J., Hazim, A., Knutsson, S., & Pusch, R. (2019). Landfill sites selection using MCDM and comparing method of change detection for Babylon Governorate, Iraq. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(35), 35325–35339. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05064-7

Dağlı, D. (2021). *Diyarbakır kenti ve çevresinde arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimi ve kentsel büyümenin modellenmesi* [Doktora tezi, Fırat Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Deliry, S. İ., & Uyguçgil, H. (2020). GIS-based land suitability analysis for sustainable urban development: A case study in Eskişehir, Turkey. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20*(4), 634–650. https://doi.org/10.35414/akufemubid.679980

Döker, M. F. (2012). *İstanbul kentsel büyüme sürecinin belirlenmesi, izlenmesi ve modellenmesi* [Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., & Gibbs, H. K. (2005). Global consequences of land use. *Science, 309*(5734), 570–574.

Foroozesh, F., Monavari, S. M., Salmanmahiny, A., Robati, M., & Rahimi, R. (2022). Assessment of sustainable urban development based on a hybrid decision-making approach: Group fuzzy BWM, AHP, and TOPSIS–GIS. *Sustainable Cities and Society, 76*, Article 103402. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103402

Gao, J., An, T., Shen, J., Zhang, K., Yin, Y., Zhao, R., He, G., Hynes, S., & Ullah, J. (2022). Development of a land–sea coordination degree index for coastal regions of China. *Ocean & Coastal Management, 230*, Article 106370. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106370

Görentaş, S. (2021). *Mersin–Tarsus–Adana hattında şehirleşmenin mekânsal yapılanması ve Markov Chain modeliyle arazi kullanım senaryolarının üretilmesi* [Doktora tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA–Markov model under two different scenarios. *Sustainability, 10*(10), Article 3421. https://doi.org/10.3390/su10103421

Han, H., Yang, C., & Song, J. (2015). Scenario simulation and the prediction of land use and land cover change in Beijing, China. *Sustainability, 7*(4), 4260–4279. https://doi.org/10.3390/su7044260

Huang, H., Li, Q., & Zhang, Y. (2019). Urban residential land suitability analysis combining remote sensing and social sensing data: A case study in Beijing, China. *Sustainability, 11*(8), Article 2255. https://doi.org/10.3390/su11082255

Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature, 423*(6939), 528–531. https://doi.org/10.1038/nature01675

Konurhan, Z. (2023). Sürdürülebilir kentsel gelişim için arazi uygunluğunun değerlendirilmesi: Çanakkale ilinde bir BWM–CBS yaklaşımı. In S. Birinci, K. Ç. Kaymaz, & Y. Kızılkan (Eds.), *Cumhuriyetin 100. yılına armağan: Coğrafya ve insan* (pp. 589–615). Kriter.

Konurhan, Z. (2024). *Güneybatı Anadolu kıyılarında (Bodrum–Fethiye arası) turizmin mekânsal etkileri ve arazi kullanım senaryoları* [Doktora tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Konurhan, Z., & Ceylan, M. A. (2024). Turizmin arazi kullanımı üzerindeki etkileri ve arazi kullanım senaryoları: Bodrum–Datça örneği. *Turkish Academic Research Review, 9*(1), 1–32. https://doi.org/10.30622/tarr.1400541

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, 33*(1), 159–174.

Li, F., Gong, Y., Cai, L., Sun, C., Chen, Y., Liu, Y., & Jiang, P. (2018). Sustainable land-use allocation: A multiobjective particle swarm optimization model and application in Changzhou, China. *Journal of Urban Planning and Development, 144*(2). https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000425

Lin, W., Sun, Y., Nijhuis, S., & Wang, Z. (2020). Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou metropolitan area as a case study. *Science of the Total Environment, 739*, Article 139899. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139899

Liu, R. Z., Zhang, K., Zhang, Z. Z., & Borthwick, A. G. L. (2014). Land-use suitability analysis for urban development in Beijing. *Journal of Environmental Management, 145*, 170–179. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.020

Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y. ve Pei, F. (2017). A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land Use Scenarios By Coupling Human and Natural Effects. Landscape and Urban Planning, *168*, 94-116.

Luan, C., Liu, R., & Peng, S. (2021). Land-use suitability assessment for urban development using a GIS-based soft computing approach: A case study of Ili Valley, China. *Ecological Indicators, 123*, Article 107333. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107333

Mahiny, A. S., & Clarke, K. C. (2012). Guiding SLEUTH land-use/land-cover change modeling using multicriteria evaluation: Towards dynamic sustainable land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design, 39*(5), 925–944. https://doi.org/10.1068/b37092

Malmir, M., Zarkesh, M. M. K., Monavari, S. M., Jozi, S. A., & Sharifi, E. (2016). Analysis of land suitability for urban development in Ahwaz County in southwestern Iran using fuzzy logic and Analytic Network Process (ANP). *Environmental Monitoring and Assessment, 188*(8), Article 447. https://doi.org/10.1007/s10661-016-5401-5

Melese, S. M. (2016). Effect of land use/land cover changes on the forest resources of Ethiopia. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management, 1*(2), 51–57. https://doi.org/10.11648/j.ijnrem.20160102.16

Meyer, W. B. (1995). Past and present land use and land cover in the U.S.A. *Consequences: The Nature and Implications of Environmental Change, 1*(1), 24–33.

Meyer, W. B., & Turner, B. L. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics, 23*(1), 39–61.

Mwavu, E. N., & Witkowski, E. T. F. (2008). Land-use and cover changes (1988–2002) around Budongo Forest Reserve, NW Uganda: Implications for forest and woodland sustainability. *Land Degradation & Development, 19*(6), 606–622. https://doi.org/10.1002/ldr.869

Oğuz, H., & Bozali, N. (2014). Gaziantep kentinde 2040 yılına kadar oluşabilecek arazi kullanımı/arazi örtüsü değişiminin tahmini. *Journal of Agricultural Sciences, 20*(1), 83–101. https://doi.org/10.15832/tbd.77489

Rahnama, M. R. (2021). Forecasting land-use changes in Mashhad metropolitan area using cellular automata and Markov chain model for 2016–2030. *Sustainable Cities and Society, 64*, Article 102548. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102548

Ramankutty, N., Graumlich, L., Achard, F., Alves, D., Chhabra, A., DeFries, R. S., Foley, J. A., Geist, H., Houghton, R. A., Goldewijk, K. K., Lambin, E. F., Millington, A., Rasmussen, K., Reid, R. S., & Turner, B. L. (2006). Global land-cover change: Recent progress, remaining challenges. In E. F. Lambin & H. Geist (Eds.), *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts* (pp. 9–39). Springer.

Rezaei, J. (2015). Best–worst multi-criteria decision-making method. *Omega, 53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Rezaei, J. (2020). A concentration ratio for nonlinear Best Worst Method. *International Journal of Information Technology & Decision Making, 19*(3), 891–907.

Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., Feghhi, J., & Dezhkam, S. (2015). Scenario-based evaluation of urban development sustainability: An integrative modeling approach to compromise between urbanization suitability index and landscape pattern. *Environment, Development and Sustainability, 17*(6), 1343–1365. https://doi.org/10.1007/s10668-014-9609-7

Samie, A., Deng, X., Jia, S., & Chen, D. (2017). Scenario-based simulation on dynamics of land-use–land-cover change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability, 9*(8), Article 1285. https://doi.org/10.3390/su9081285

Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Pal, S., Liou, Y.-A., & Rahman, A. (2020). Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. *Remote Sensing, 12*(7), Article 1135. https://doi.org/10.3390/rs12071135

Turner, B. L., & Meyer, W. B. (1994). Global land-use and land-cover change: An overview. In W. B. Meyer & B. L. Turner II (Eds.), *Changes in land use and land cover: A global perspective* (pp. 3–10). Cambridge University Press.

Veldkamp, A., & Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 85*(1–3), 1–6. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2

Yang, Y., Bao, W., & Liu, Y. (2020). Scenario simulation of land system change in the Beijing–Tianjin–Hebei region. *Land Use Policy, 96*, Article 104677. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104677

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, September 2025, 6(2): 300–314
Journal homepage: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Assessment of Burned Area and Fire Severity Using Sentinel-2 Imagery: Case Studies from Türkiye's Summer 2025 Wildfires

Sentinel-2 Görüntüleri Kullanılarak Yanmış Alan ve Yangın Şiddetinin Değerlendirilmesi: Türkiye 2025 Yazı Orman Yangınlarından Örnekler

Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz[1]*

[1]*Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, 61080 Trabzon/Türkiye.*

ORIGINAL PAPER

***Corresponding author:**
Çiğdem Şerifoğlu Yılmaz
cigdemserifoglu@ktu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1751391

Article history
Received: 26.07.2025
Accepted: 12.09.2025
Published: 27.09.2025

Abstract

This study examines five major wildfires in Türkiye during the summer of 2025 (Aliaga-Foca, Seferihisar-Menderes, Akhisar, Tarakli-Geyve-Golpazari, and Antakya) using Sentinel-2 imagery. Burned areas and fire severity were assessed with Normalized Burn Ratio (NBR), differenced NBR (dNBR), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Burn severity mapping was complemented by analyses of pre-fire vegetation stress, wind dynamics, and topographic factors influencing fire spread. Results were validated against European Forest Fire Information System (EFFIS) data. Findings confirm that Sentinel-2 dNBR captured both the extent and severity of fire damage, showing consistency with EFFIS estimates. The most accurate results were achieved for Aliağa-Foça, Akhisar and Taraklı-Geyve-Gölpazarı. Seferihisar-Menderes (96.13 km²) and Tarakli-Geyve-Golpazari (61.31 km²) experienced the largest and most severe fires, marked by heterogeneous burn patterns. Notably, the strongest pre-fire drought signal did not align with the largest fire, underscoring the key role of real-time weather, fuel availability, and topography in shaping fire size and spread. For visual interpretation, False Colour Composite (FCC) imagery outperformed True Colour Composite (TCC) and NDVI. Overall, results highlight the effectiveness of Sentinel-2 and dNBR-based methods for post-fire monitoring and their importance for fire management under growing climate-related fire risks.

Keywords: *Wildfires, Burned area mapping, Burn severity, Sentinel-2, Remote sensing*

Özet

Bu çalışma, 2025 yazında Türkiye'de meydana gelen beş büyük orman yangınını (Aliağa-Foça, Seferihisar-Menderes, Akhisar, Taraklı-Geyve-Gölpazarı ve Antakya) Sentinel-2 görüntüleri kullanarak incelemektedir. Yanmış alanlar ve yangın şiddeti, Normalize Yanıklık Oranı (NBR), fark alınmış NBR (dNBR) ve Normalize Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI) üzerinden değerlendirilmiştir. Yangın şiddeti haritalaması, yangın yayılımını etkileyen yangın öncesi bitki örtüsü stresi, rüzgâr dinamikleri ve topoğrafik faktörlerin analizi ile desteklenmiştir. Sonuçlar, Avrupa Orman Yangını Bilgi Sistemi (EFFIS) verileri ile doğrulanmıştır. Bulgular, Sentinel-2 dNBR yönteminin yangın hasarının boyutunu ve şiddetini ortaya koyduğunu ve EFFIS tahminleri ile uyum gösterdiğini kanıtlamaktadır. En doğru sonuçlar Aliağa-Foça, Akhisar ve Taraklı-Geyve-Gölpazarı için elde edilmiştir. Seferihisar-Menderes (96.13 km²) ve Taraklı-Geyve-Gölpazarı (61.31 km²) en geniş ve en şiddetli alanları kapsayarak heterojen yanıklık desenleri sergilemiştir. İlginç bir şekilde, en güçlü kuraklık sinyali en büyük yangınla örtüşmemiştir; bu durum yangın boyutu ve yayılımında anlık meteoroloji, yakıt mevcudiyeti ve topoğrafyanın kritik rolünü vurgulamaktadır. Görsel yorumlamada Sahte Renk Kombinasyon görüntülerinin, Gerçek Renk Kombinasyon ve NDVI'dan daha etkili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak sonuçlar, Sentinel-2 ve dNBR tabanlı yöntemlerin farklı iklim ve ekolojik bölgelerde yangın sonrası izleme için uygunluğunu ve iklim kaynaklı artan yangın riskleri karşısında yönetim açısından önemini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: *Orman yangınları, Yanmış alanların tespiti, Yangın şiddeti, Sentinel-2, Uzaktan algılama*

1. Introduction

Remote sensing has emerged as a fundamental approach for monitoring and assessing fire-affected regions, offering a reliable and objective means of detecting spatial and temporal changes over large and often inaccessible areas (Lentile et al., 2006). The assessment of fire extent and severity is crucial for understanding the ecological and environmental impacts of wildfires, as well as for guiding post-fire restoration and management strategies. Conventional ground-based surveys, while valuable, are constrained by logistical challenges, high costs and limited spatial and temporal coverage, making them inadequate for capturing the dynamic and large-scale nature of wildfires. In contrast, satellite and airborne remote sensing systems provide consistent, repetitive and medium to high-resolution observations across multiple spectral bands, enabling the identification of burned areas, estimation of burn severity, and analysis of vegetation recovery patterns. Spectral indices such as the Normalized Burn Ratio (NBR) and its derivatives enhance the ability to discriminate fire-induced changes in vegetation structure and soil properties. The integration of remote sensing data into fire research not only enhances the accuracy and efficiency of fire monitoring but also contributes to a deeper understanding of fire behavior (Chu & Guo, 2014), ecological succession and the long-term resilience of affected ecosystems.

Owing to their medium spatial resolution and high temporal resolution, Landsat and Sentinel-2 satellite imagery have been increasingly utilized for evaluating the effects of fires in Türkiye in recent years. Kurnaz et al. (2020) applied object-based classification and seven vegetation indices on Landsat-8 and Sentinel-2 imagery to map a 425 ha burned area in Zeytinköy, concluding that Sentinel-2 provided superior accuracy for post-fire monitoring. Another study utilizing both Landsat-8 and Sentinel-2 imagery identified NBR, Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as the most effective indices for detecting the influences of the wildfires that occurred in İzmir on August 18, 2019 (Atak & Tonyaloğlu, 2020). Gülci et al. (2021) utilized pre- and post-fire difference NBR (dNBR) calculated from Landsat-8 and Sentinel-2 images via Google Earth Engine (GEE) and Geographic Information Systems (GIS) in order to classify burn severity, revealing close agreement between sensors. Soydan (2022) used pre- and post-fire Landsat 8 images, NBR, NDVI and dNBR indices along with a pixel-based maximum likelihood classifier to map the 28 July 2021 Manavgat fire, with results showing reasonable consistency with General Directorate of Forestry data despite some differences. The Karabağlar 2019 wildfire burned forest areas were successfully mapped with Landsat-8 data, where Relativized Burn Ratio (RBR) provided 99% consistency with field observations, enabling detailed estimation of burn intensity related to tree density (Öncü & Çorumluoğlu, 2023). In one of the most recent studies, Ibrahim et al. (2025) assessed the burn severity and ecological impacts of forest fires in Kozan using Landsat 8-derived difference NDVI (dNDVI) and dNBR indices integrated with land use data, demonstrating their high potential for spatial wildfire analysis by quantifying burned areas and identifying fuel load as the main severity driver. Using Sentinel-2 and Landsat-8/9 imagery, burned areas from the July 16 and August 22, 2023 Çanakkale fires were mapped with dNBR, RBR and dNDVI, with dNBR providing the highest accuracy (Overall Accuracy: 0.76-0.89; Kappa: 0.52-0.78) (Bitek et al., 2025).

The growing frequency and intensity of forest fires in Türkiye underscore the urgent need for up-to-date and regionally comprehensive assessments of fire-affected areas and burn severity. While numerous studies have successfully utilized remote sensing techniques to monitor past wildfires, large-scale and multi-event evaluations focusing on very recent fires are still limited. In this study, five extensive and recent wildfires that occurred in different regions of Türkiye in 2025 summer were analyzed: Aliaga-Foca and Seferihisar-Menderes in İzmir province, Akhisar in Manisa province (Ege Region), Tarakli-Geyve-Golpazari spanning Sakarya and Bilecik provinces (Marmara Region) and Antakya in Hatay province (Mediterranean Region). These fires, which affected diverse forest types and landscapes, offer a unique opportunity to evaluate the spatial distribution and severity of fire damage across multiple regions within the same fire season. Furthermore, the burned areas identified in this study were compared with European Forest Fire Information System (EFFIS) data, similar to approaches adopted in previous studies (Turco et al., 2019; Filipponi, 2019; Achour et al., 2022), to ensure the reliability and accuracy of the results. The study was also expanded to evaluate pre-fire vegetation stress using the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and to analyze the role of wind speed and direction, and topographic features. Conducting such a comparative and timely analysis not only enriches the existing wildfire database for Türkiye but also provides essential information for forestry authorities and decision-makers, facilitating the creation of more efficient wildfire management strategies and post-fire restoration plans tailored to regional ecological characteristics.

2. Study Areas

This study investigated the forest fires that occurred in June 2025 in five provinces and eight districts of Türkiye with different climatic and ecological characteristics, i.e., Aliaga and Foca, Seferihisar and Menderes (İzmir), Akhisar (Manisa),

Tarakli and Geyve (Sakarya), Golpazari (Bilecik) and Antakya (Hatay). The fire-affected areas analyzed are presented in Figure 1.

The districts of Aliaga, Foca, Seferihisar, Menderes and Akhisar, located in the Aegean Region, are under the impact of a typical Mediterranean climate according to the Köppen climate classification calculated using the 1991-2020 climatological period data of the Turkish State Meteorological Service. Summers in these areas are dry and hot, whereas winters are rainy and mild (*https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx*). These regions host fire-prone vegetation types, including Turkish red pine (*Pinus brutia*) and maquis formations (Altun, 2006). The average June temperature, based on long-term records, is 25.4 °C for İzmir (1938-2024) and 25.2 °C for Manisa (1930-2024) (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025).

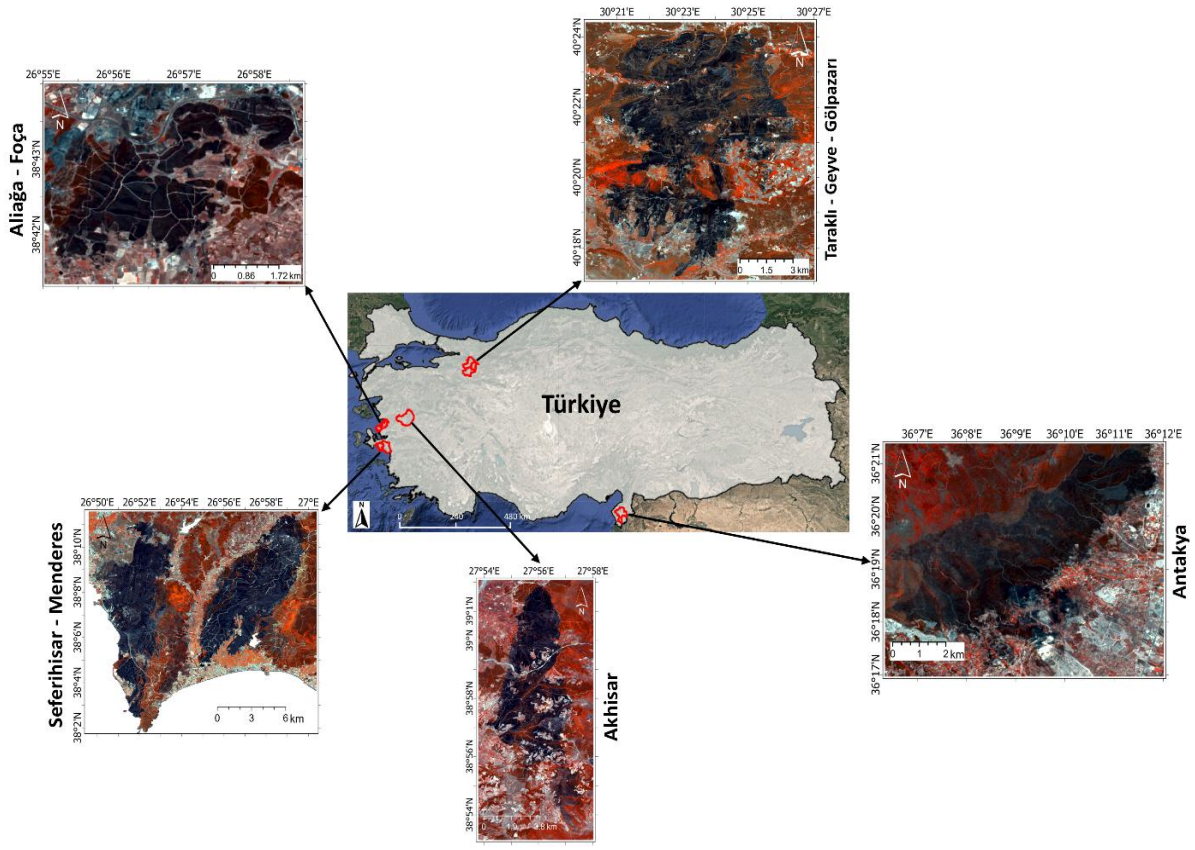


Figure 1. Study area. The areas are illustrated with Sentinel-2 imagery in a False Colour Composite (FCC) band combination

Geyve and Golpazari, situated in the Marmara Region, experience the effects of a Mediterranean climate, marked by hot, dry summers and mild, wet winters. In contrast, Tarakli (Sakarya) features a warm temperate climate with precipitation fairly evenly distributed year-round (*https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx*). The southern and southeastern parts of Sakarya, within the study area, represent a transitional zone between the Black Sea and Mediterranean climates, where mesophytic and xerophytic species coexist. In particular, Pinus nigra is the dominant species in Geyve, while Turkish red pine (Pinus brutia) appears as a secondary dominant species (İkiel, 2018). The average June temperature is 21.5 °C for Sakarya between 1954 and 2024, and 19.9 °C for Bilecik between 1939 and 2024 (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025).

Antakya, located in Hatay province of the Mediterranean Region, is strongly influenced by the Mediterranean climate, and its vegetation is largely characterized by Mediterranean maquis and Turkish red pine (Pinus brutia) forests (Çelik & Karabulut, 2014). The average June temperature for Hatay, based on data from 1940 to 2024, is 24.8 °C (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025). The slope gradients of the study areas, derived from the USGS/SRTMGL1_003 digital elevation data extracted along the fire-affected area perimeters, vary considerably across the regions. The coastal districts of Aliaga-Foca (16.23%) and Seferihisar-Menderes (19.84%) are characterized by relatively gentle slopes, whereas Akhisar (24.12%) and Tarakli-Geyve-Golpazari (25.01%) represent moderately sloping inland terrains. The steepest slopes are observed in Antakya (34.45%), reflecting its rugged mountainous topography (Farr et al., 2007; Atalay & Mortan, 2011).

3. Data

The current study used Sentinel-2 surface reflectance (SR) images to detect burned areas and examine fire severity. The images were obtained from the GEE platform under the COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED collection, which provides atmospherically corrected Level-2A products. These multispectral images, captured by the Multispectral Instrument (MSI) onboard Sentinel-2A and Sentinel-2B satellites, include 13 spectral bands with spatial resolutions of 10 m, 20 m and 60 m. For burn severity mapping, primarily the red (Band 4), near-infrared (Band 8) and shortwave infrared (Band 12) bands were used to calculate indices NBR, dNBR and NDVI. In the study, the B12 band was resampled to a 10 m resolution using the nearest neighbor method, as it was used together with other 10 m resolution bands in index calculations.

To improve data quality, preprocessing steps were performed to minimize cloud and water-related misclassifications. A cloud and cirrus masking procedure was applied using the QA60 band, where bit 10 (clouds) and bit 11 (cirrus) pixels were masked by bitwise operations to remove atmospheric effects. Additionally, permanent water bodies were excluded from the analysis to prevent confusion between burned areas and water surfaces. For this purpose, the Joint Research Centre (JRC) Global Surface Water (GSW1_4) dataset was used; pixels with more than 50% water occurrence were masked as water, while non-water areas were retained for further analysis (Pekel et al., 2016). Table 1 presents the wildfire locations, fire dates and the acquisition dates of the satellite imagery used in the analysis.

Topographic correction (C-correction) semi-empirically removes the systematic effect of illumination differences caused by slope and aspect on band reflectance (Kobayashi & Sanga-Ngoie, 2008). In this study, particularly for Antakya, which is the steepest region, pixel-based C-corrections were calculated. The correction was performed on the bands prior to index calculations; cloud and water masks were preserved throughout the process.

Table 1. Wildfire locations, event dates and acquisition dates of the satellite images used in the study

District	Province	Fire Dates Start Date-End Date	Pre-fire Image Acquisition Start Date-End Date	Post-fire Image Acquisition Start Date-End Date
Aliaga-Foca	Izmir	25.06.2025 - 26.06.2025	15.06.2025 - 24.06.2025	25.06.2025 - 04.07.2025
Seferihisar-Menderes	Izmir	29.06.2025 - 04.07.2025	19.06.2025 - 28.06.2025	29.06.2025 - 04.07.2025
Akhisar	Manisa	28.06.2025 - 01.07.2025	18.06.2025 - 27.06.2025	28.06.2025 - 04.07.2025
Tarakli-Geyve-Golpazari	Sakarya-Bilecik	27.06.2025 - 29.06.2025	17.06.2025 - 26.06.2025	27.06.2025 - 07.07.2025
Antakya	Hatay	30.06.2025 - 02.07.2025	16.06.2025 - 29.06.2025	30.06.2025 - 09.07.2025

The EFFIS, developed by the European Commission JRC, delivers harmonized and reliable information on wildfires across Europe and neighbouring regions. EFFIS supports forest fire management, prevention and policy-making by offering near-real-time monitoring of active fires, mapping of burned areas and historical fire statistics. The system integrates various satellite-based products, primarily derived from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and Sentinel satellite series, to detect and map burned areas with consistent methodologies across different countries. Due to its wide spatial coverage, standardized processing chain and public accessibility; EFFIS data are widely used as a reference for validating burned area estimations obtained from other remote sensing sources (Tonbul, 2024; European Forest Fire Information System, 2025; Henner, & Kirchengast, 2025; Vittucci et al., 2025).

4. Methodology

Understanding the spatial variability of wildfire intensity is essential for assessing its ecological and economic consequences and for developing effective post-fire recovery strategies. Wildfires significantly modify vegetation structure, reducing plant density, altering moisture content and changing spectral properties, which in turn affect the spectral response of the land cover features (Şerifoğlu Yılmaz, 2024; Lentile et al., 2006; Chuvieco et al., 2006; Robichaud et al., 2007; Boer et al., 2008). Such changes enable the detection of burned areas and the evaluation of burn severity by utilizing spectral indices computed from satellite data.

FCC was generated to visually detect burned areas. In Sentinel-2 images, infrared bands are highly sensitive to vegetation health. Therefore, a band combination of Band 8 (NIR), Band 4 (Red) and Band 3 (Green) (8-4-3) was used to produce FCC images. In these composites, healthy vegetation is displayed in bright red hues, whereas burned or damaged areas appear in brown or dark tones.

NDVI was employed to evaluate vegetation health and density. The NDVI for Sentinel-2 images was calculated using the following formula:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

NDVI values vary between -1 and +1, where greater values indicate healthy vegetation and lower or negative values indicate burned or sparse vegetation.

To detect burned areas and evaluate burn severity, the Normalized Burn Ratio (NBR) and differenced NBR (dNBR) were calculated. The NBR emphasizes the distinction between healthy and burned vegetation using NIR and SWIR bands (Key & Benson, 2006):

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (2)$$

In Sentinel-2 images, SWIR corresponds to Band 12. Greater NBR values represent healthy vegetation, while lower values signify burned or stressed vegetation.

Burn severity changes were assessed using the dNBR, which quantifies the change by calculating the difference between pre-fire and post-fire NBR values:

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (3)$$

Higher dNBR values represent severely burned areas, whereas low or negative values indicate unburned or low-severity burned areas. In this study, dNBR outcomes were categorized into five burn severity classes, following the classification proposed by Key & Benson (2006). Table 2 shows the reference burn severity levels.

Table 2. Burn severity levels (Key & Benson, 2006)

Severity Level	dNBR Values
Unburned	< 0.1
Low	0.1-0.26
Moderate-Low	0.27-0.43
Moderate-High	0.44-0.65
High	≥ 0.66

5. Results and Discussion

The results of the fire-affected area analyses are presented in Figures 2-6. The burn severity and total burned area results derived from dNBR for the investigated fire-affected regions are presented in Table 3. When calculating the unburned areas, all unburned regions within the rectangular polygons (AOIs) representing each fire area (those satisfying the condition dNBR values < 0.1) were taken into account. The table also includes total burned area information from the EFFIS system, which was used as a reference.

Figure 2 illustrates the fire analysis results for the Aliaga-Foca region. Although the burned areas are not clearly distinguishable in the True Colour Composite (TCC) images for this region, they can be visually identified more effectively in the FCC and, to a lesser extent, in the NDVI images (see Figure 2). According to the dNBR analysis, the fire, which lasted approximately one day, resulted in a total burned area of 9.16 km^2, distributed as follows: 2.82 km^2 of low-severity burn, 2.87 km^2 of moderate-low severity, 3.24 km^2 of moderate-high severity and 0.23 km^2 of high-severity burn (see Table 3). The total burned area derived from EFFIS data for the same region was recorded as 9.72 km^2.

Figure 3 presents the analysis results for the Seferihisar-Menderes region. According to the Sentinel-2 TCC, FCC and NDVI images provided in this figure, the burned areas can be visually distinguished with high clarity. A comparison between the pre-fire Sentinel-2 RGB data (Figure 3a) and the post-fire Sentinel-2 RGB data (Figure 3b) reveals significant differences. In the post-fire TCC image, the green-toned vegetation cover observed before the fire has shifted to grey tones. Similarly, the differences between images (c) and (d) are clearly visible; while healthy vegetation prior to the fire exhibits high reflectance values in the near-infrared band, the post-fire image (d) shows a notable decrease in reflectance values in the burned areas, which appear darker.

In the NDVI images presented in Figure 3e and 3f, burned areas are distinctly identifiable, with NDVI values approaching -1 in these regions. The fire, which lasted approximately six days, burned a total area of 96.13 km^2 according to the dNBR analysis, with severity levels distributed as follows: 15.40 km^2 low severity, 21.46 km^2 moderate-low severity, 26.13 km^2 moderate-high severity and 33.15 km^2 high severity (see Table 3). Based on EFFIS data, the total area impacted by the wildfire in this region was estimated as 99.84 km^2.

Analyses of the Akhisar fire, which continued for nearly three days, are illustrated in Figure 4. The pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery (Figure 4a and 4b) show a noticeable change in the vegetation cover following the fire event.

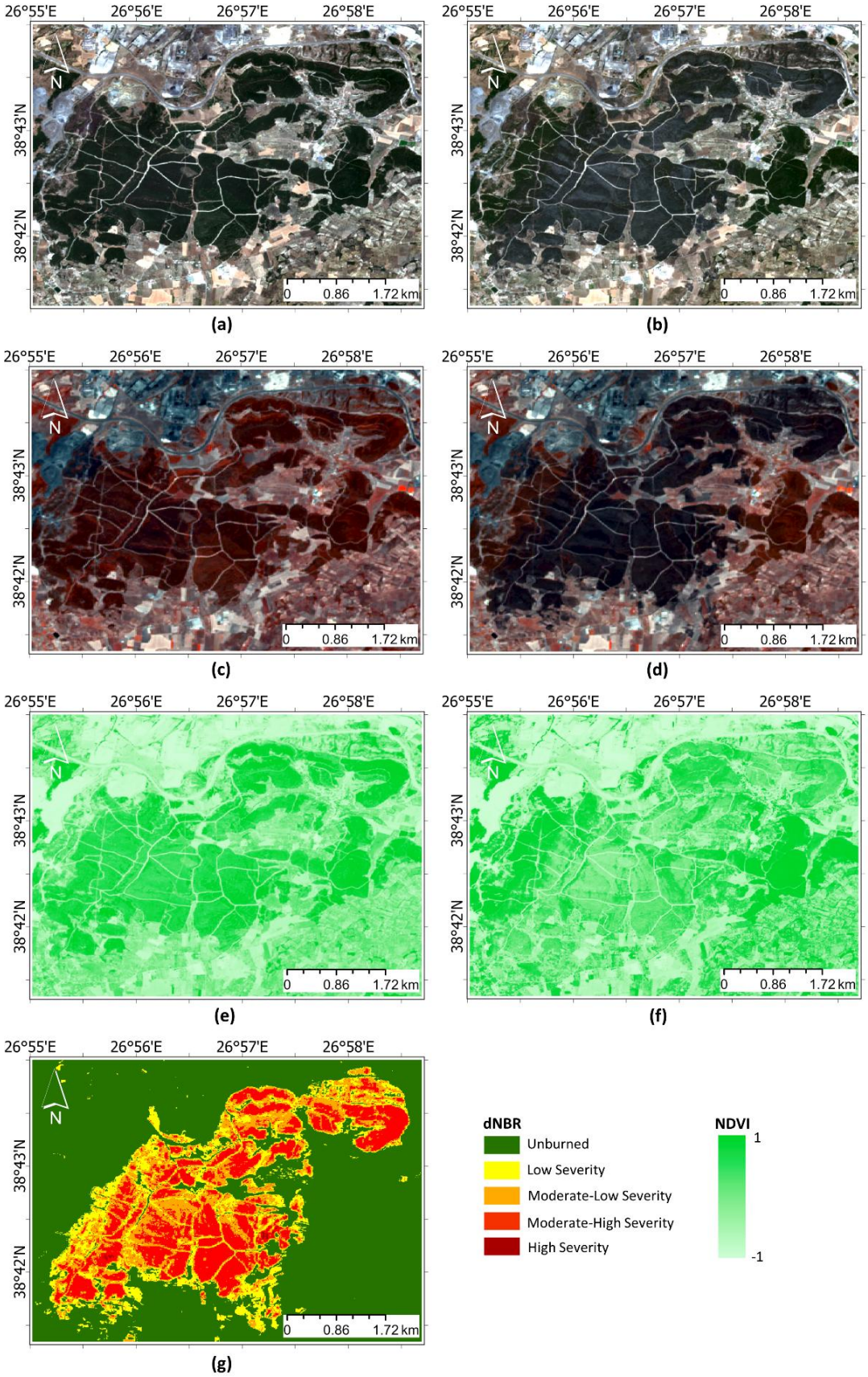


Figure 2. Pre- and post-fire analyses of the Aliaga-Foca region: a) and b) Pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery; c) and d) Pre- and post-fire Sentinel-2 FCC imagery; e) and f) Pre- and post-fire NDVI imagery; g) dNBR image

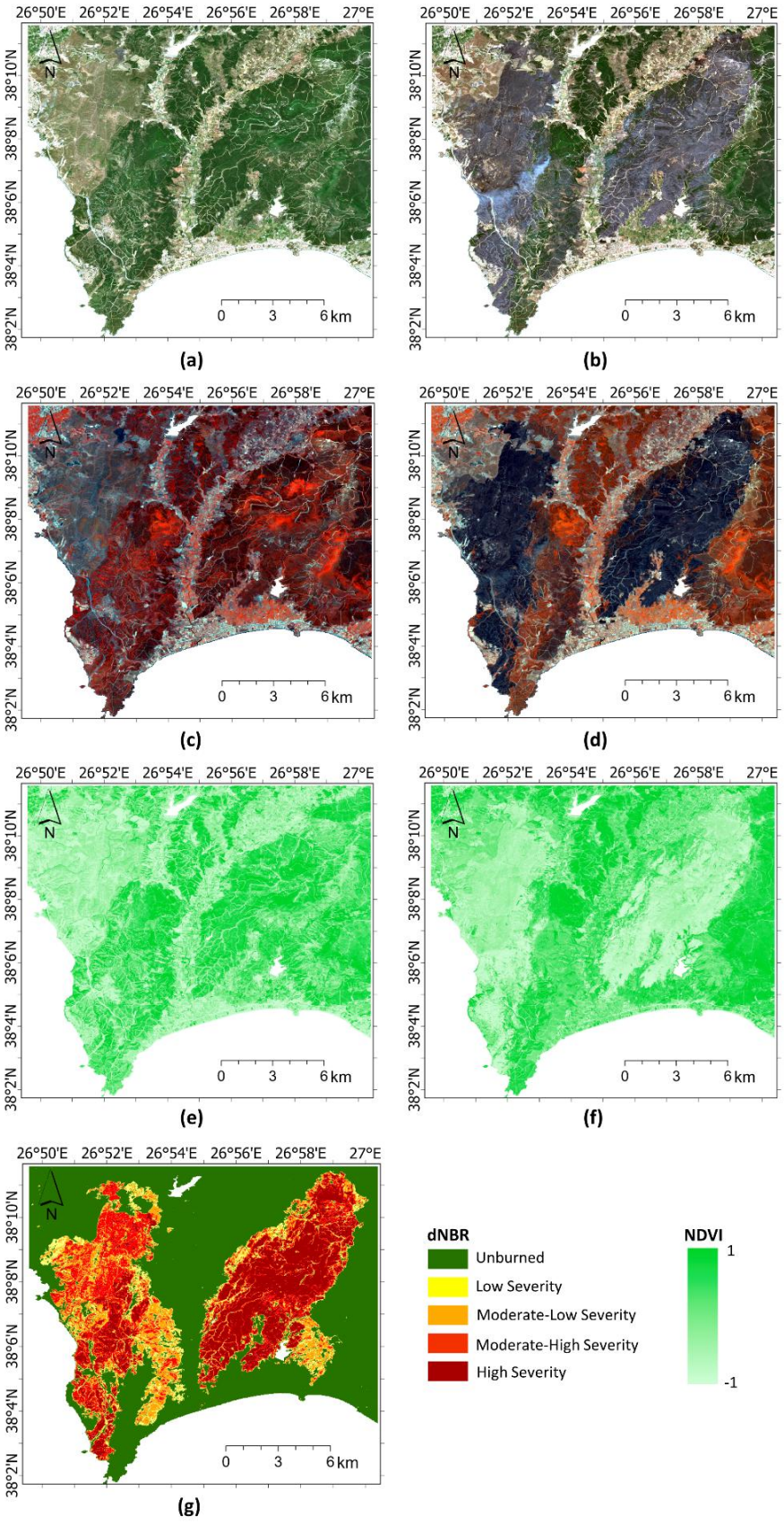


Figure 3. Pre- and post-fire analyses of the Seferihisar-Menderes region: a) and b) Pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery; c) and d) Pre- and post-fire Sentinel-2 FCC imagery; e) and f) Pre- and post-fire NDVI imagery; g) dNBR image

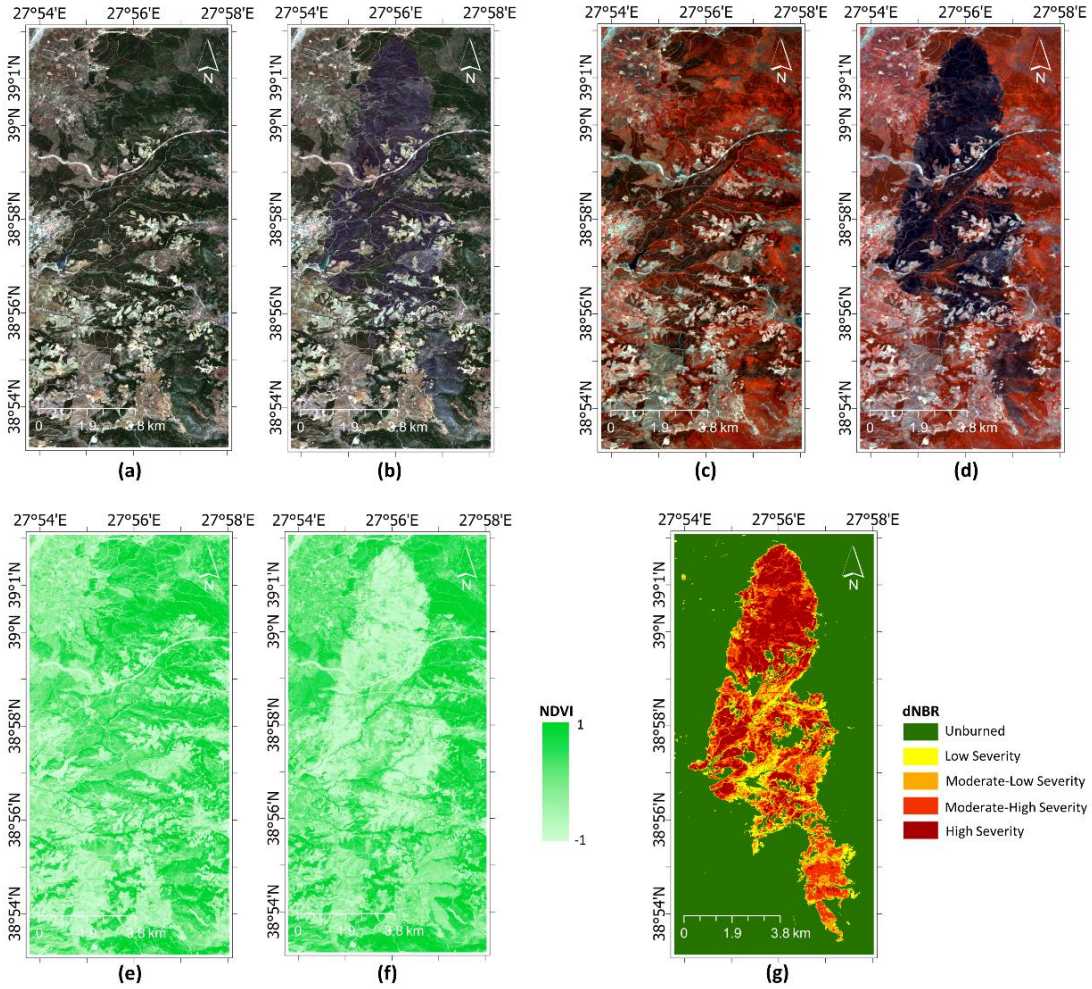


Figure 4. Pre- and post-fire analyses of the Akhisar region: a) and b) Pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery; c) and d) Pre- and post-fire Sentinel-2 FCC imagery; e) and f) Pre- and post-fire NDVI imagery; g) dNBR image

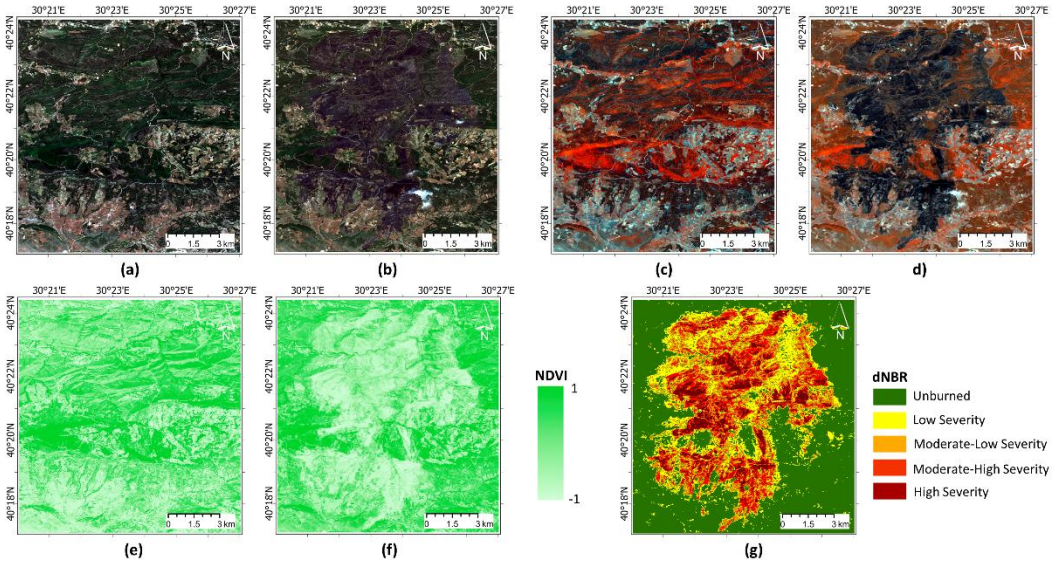


Figure 5. Pre- and post-fire analyses of the Tarakli-Geyve-Golpazari region: a) and b) Pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery; c) and d) Pre- and post-fire Sentinel-2 FCC imagery; e) and f) Pre- and post-fire NDVI imagery; g) dNBR image

The green-toned healthy vegetation observed before the fire has largely shifted to greyish tones in the post-fire image, indicating significant vegetation loss. In the FCC images (Figure 4c and 4d), this difference is even more pronounced; the healthy vegetation, which appears in bright red tones prior to the fire, exhibits a substantial decrease in reflectance in the post-fire image, with burned areas turning from grey to nearly black tones. The NDVI images (Figure 4e and 4f) clearly distinguish burned areas, where NDVI values significantly decline and approach -1, indicating complete vegetation loss and soil exposure.

The dNBR image (Figure 4g) further confirms the spatial distribution and severity of the burned areas. Higher dNBR values are concentrated in the northeastern and central parts of the region, corresponding to areas of high to moderate-high burn severity, while lower values are observed around the periphery, suggesting low-severity or unburned areas. dNBR analysis revealed that the total burned area was estimated as 29.34 km^2, with the following severity distribution: 5.44 km^2 low severity, 6.28 km^2 moderate-low severity, 8.18 km^2 moderate-high severity, and 9.44 km^2 high severity. EFFIS data indicate that the total burned area in the region reached 28.49 km^2.

The analyses related to the Tarakli-Geyve-Golpazari fire, which lasted approximately three days, are presented in Figure 5. The pre- and post-fire Sentinel-2 TCC imagery (Figure 5a and 5b) reveal a significant transformation in vegetation cover following the fire event. Healthy green vegetation visible in the pre-fire image is largely replaced by greyish tones in the post-fire image, indicating substantial vegetation loss.

The differences are more prominent in the FCC images (Figure 5c and 5d): the bright red tones, which represent dense and healthy vegetation before the fire, have significantly diminished in the post-fire data, where the burned areas appear as nearly black regions due to decreased vegetation density and moisture content.

The NDVI images (Figure 5e and 5f) distinctly highlight the burned areas, with NDVI values markedly decreasing and approaching -1, indicating severe vegetation degradation and soil exposure in the affected zones.

The dNBR image (Figure 5g) confirms the spatial extent and severity of the burned areas. High to moderate-high severity burn patches dominate the central and southern parts of the region, while low-severity and unburned areas are mainly distributed along the periphery. Based on the dNBR analysis, the fire affected a total area of 61.31 km^2, including 19.55 km^2 classified as low severity, 18.00 km^2 as moderate-low severity, 15.89 km^2 as moderate-high severity and 7.88 km^2 as high severity. The total fire-impacted area in this region was determined as 62.91 km^2 based on EFFIS records.

Table 3. Burn severity distribution and total burned areas derived from dNBR analysis and EFFIS data for the studied regions (unit: km^2)

Region	Unburned Area	Low Severity	Moderate-Low Severity	Moderate-High Severity	High Severity	Total Burned Area (dNBR)	Total Burned Area (EFFIS)
Aliaga-Foca	16.73	2.82	2.87	3.24	0.23	9.16	9.72
Seferihisar-Menderes	116.88	15.40	21.46	26.13	33.15	96.13	99.84
Akhisar	70.92	5.44	6.28	8.18	9.44	29.34	28.49
Tarakli-Geyve-Golpazari	69.36	19.55	18.00	15.89	7.88	61.31	62.91
Antakya	42.56	7.82	11.82	5.01	0.61	25.26	27.58

A visual comparison of the pre- and post-fire Sentinel-2 imagery from the Antakya fire (Figure 6) reveals distinct spectral changes associated with fire-induced vegetation loss. In the TCC images, the post-fire surface exhibits a clear reduction in green vegetation cover, replaced predominantly by greyish-brown tones, indicating areas of intense burning. The FCC imagery (Figure 6c and 6d) provide an even clearer spectral contrast: vibrant red patches representing dense vegetation in the pre-fire state have noticeably faded or disappeared, giving way to dark brown and black regions that correspond to severely burned surfaces.

The NDVI (Figure 6e and 6f) comparison further supports these observations. The post-fire NDVI image shows extensive areas with markedly lower values, some approaching -1, which reflects substantial canopy destruction and soil exposure.

The dNBR analysis (Figure 6g) highlights the spatial variability of burn severity, with contiguous high-severity clusters interspersed with patches of moderate and low severity. This spatial pattern suggests a heterogeneous fire impact, possibly influenced by local topography or wind direction during the fire event. The fire was estimated, based on dNBR analysis, to have affected 25.25 km^2 in total, with severity levels distributed as follows: 7.85 km^2 low severity, 11.68 km^2 moderate-low severity, 5.10 km^2 moderate-high severity and 0.62 km^2 high severity. The total burned area derived from EFFIS data was 27.58 km^2. EFFIS, which provides near-real-time monitoring and mapping of burned areas across Europe, serves as a reliable reference dataset (Misseyanni et al., 2025; Vittucci et al., 2025). The Rapid Damage Assessment (RDA) module, operational since 2003, integrates data from MODIS (250 m), VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, 375 m), and Sentinel-2 (20 m) to generate burned area perimeters.

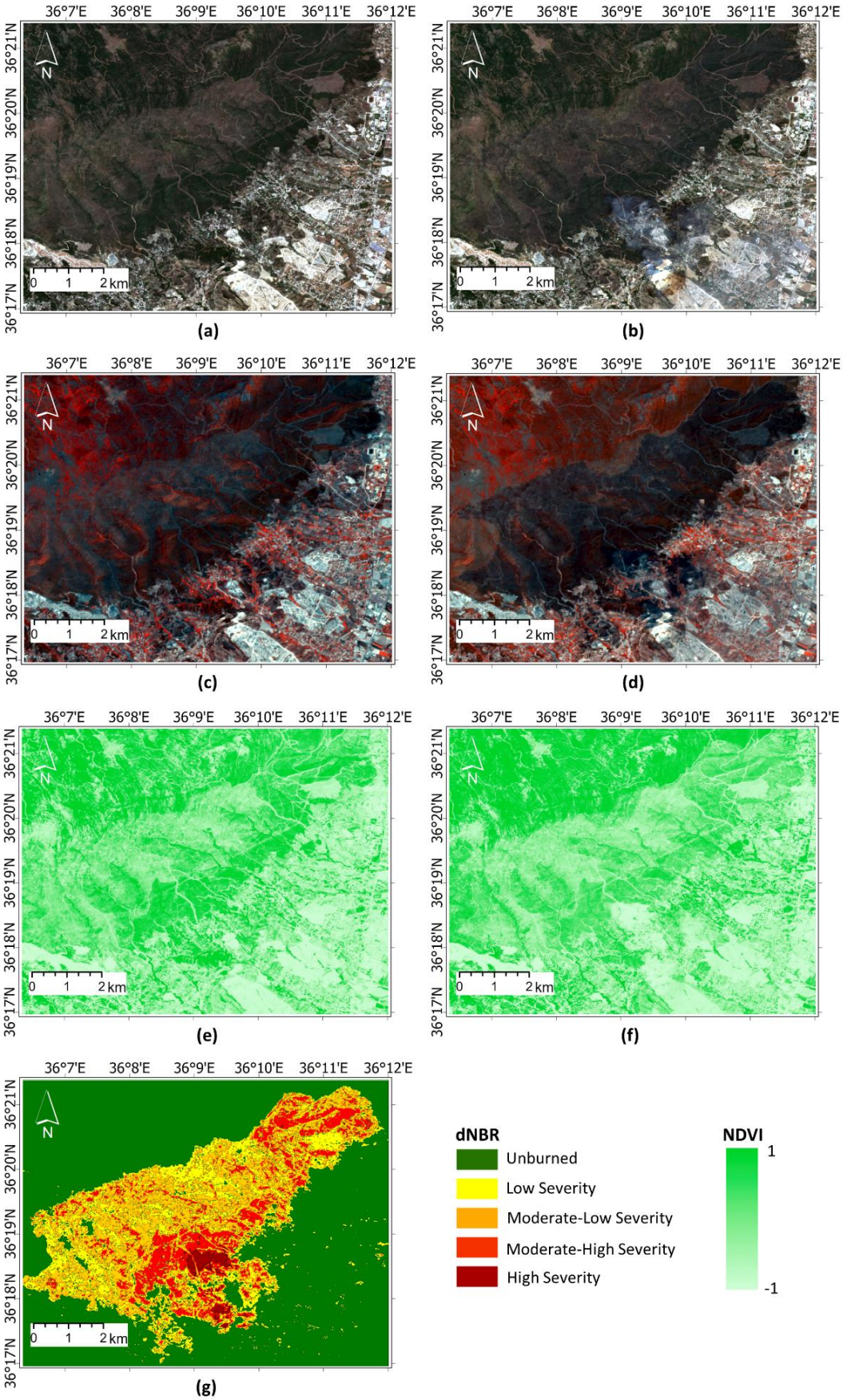


Figure 6. Pre- and post-fire analyses of the Antakya region: a) and b) Pre- and post-fire Sentinel-2 TCC images; c) and d) Pre- and post-fire Sentinel-2 FCC images; e) and f) Pre- and post-fire NDVI images; g) dNBR image

While EFFIS provides robust estimates of total burned areas, it does not deliver detailed information on burn severity. Since 2018, fire perimeters initially detected with MODIS have been refined using higher-resolution Sentinel-2 imagery, enabling the detection of fires smaller than 30 ha. Nevertheless, due to its 5-day revisit time, Sentinel-2 is slower than MODIS; finalized Sentinel-2-based perimeters are typically integrated into EFFIS within several days to a week following a fire (*https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/about-effis/technical-background/rapid-damage-assessment*).

In the Seferihisar-Menderes region, the difference between the burned area estimated by EFFIS and the total burned area identified through dNBR analysis was found to be greater compared to other regions. This discrepancy may be due to EFFIS's tendency to expand fire boundaries based on modelling, the sensitivity of dNBR to image acquisition timing (such as the use of smoke-covered Sentinel-2 imagery) and the region's topographic structure.

Sentinel-2 imagery combined with dNBR analysis provides a critical advantage. The 10-m spectral bands of the Sentinel-2 images enable precise detection of fire impacts, including smaller patches of varying severity levels, which are crucial for ecological and forest recovery assessments. The dNBR-based classification allowed to map burn severity into distinct categories (low, moderate-low, moderate-high and high), offering insights beyond the total burned area. This level of detail is essential for evaluating post-fire vegetation dynamics, prioritizing rehabilitation efforts and developing region-specific fire management strategies.

To assess the relationship between fire severity and pre-fire vegetation stress, a drought analysis based on the NDMI was conducted in five fire regions. NDMI is a normalized difference of near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR1) bands, calculated as (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1), and reflects the water content and hydrological stress level of vegetation (Wang et al., 2011). Unlike NDVI, which is sensitive to the 'greenness' of vegetation, NDMI is sensitive to 'water content,' making it more suitable for monitoring the effects of drought on vegetation (Jin & Sader, 2005). Analyses were performed using Landsat 8/9 satellite imagery. For each fire, the median NDMI value of the 30-day pre-fire period was compared with the climatological median value for the same month from the 2013-2024 period. Z-score values, calculated using the climatological standard deviation (Kendall, 1948; Mann, 1945), were used to determine the magnitude of anomaly and statistical significance of the pre-fire period relative to the climatological norm. The resulting z-scores were classified as follows: values less than -1.50 as 'very high,' between -1.50 and -1.00 as 'high,' between -1.00 and -0.50 as 'moderate,' between -0.50 and -0.25 as 'low,' and greater than -0.25 as 'very low/normal.' This classification was based on both statistical significance thresholds and practical effect size (Table 4).

Table 4. Pre-fire vegetation stress analysis based on NDMI z-scores*

Region	z-score	Drought Severity	NDMI_pre	NDMI_clim	Anomaly	p-value
Aliaga-Foca	-0.95	Moderate-High	0.040	0.060	-0.020	>0.05
Seferihisar-Menderes	-0.15	Very Low	0.064	0.067	-0.003	>0.05
Akhisar	-0.74	Moderate	0.069	0.083	-0.014	>0.05
Tarakli-Geyve-Golpazari	-0.26	Low	0.100	0.107	-0.007	>0.05
Antakya	-1.30	High	0.038	0.072	-0.034	<0.10

**NDMI_pre: Median NDMI value for the 30-day pre-fire period; NDMI_clim: Climatic median NDMI value for the 2013-2024 period; Anomaly: NDMI_pre - NDMI_clim.*

The analysis results reveal that pre-fire vegetation stress levels exhibited statistically significant differences at the regional scale prior to the summer 2025 wildfires. The Antakya fire displayed the most pronounced drought signal, approaching the 90% confidence level (z = -1.30), followed by the Aliaga-Foca (z = -0.95) and Akhisar (z = -0.74) fires, respectively. In contrast, the Tarakli-Geyve-Golpazari (z = -0.26) and Seferihisar-Menderes (z = -0.15) fires showed statistically non-significant deviations from the climatological norm ($p > 0.05$). Particularly in Antakya, the marked drying observed during the pre-fire period-despite a relatively high climatological moisture mean (0.072), suggests that regional climatic anomalies or hydrological stress emerged as prominent precursor factors for fire ignition. This deviation in Antakya, with a z-score of -1.30, approaches the significance threshold at the 90% confidence level and indicates a high fire risk in practical terms.

The findings indicate that the relationship between pre-fire vegetation stress (NDMI z-score) and fire severity (proportion of high-severity burned area) is non-linear. For instance, in Antakya, which had the highest drought signal (z = -1.30), the proportion of high-severity burned area was only 2.4% (0.61 km² / 25.26 km²), whereas in Seferihisar-Menderes, which had the lowest drought signal (z = -0.15), this proportion reached 34.5% (33.15 km² / 96.13 km²). Similarly, in Aliaga-Foca, which exhibited high drought conditions (z = -0.95), the high-severity burn rate remained at a low level of 2.5% (0.23 km² / 9.16 km²), while in Akhisar, which experienced moderate drought (z = -0.74), the rate reached 32.2% (9.44 km² / 29.34 km²).

Table 5 presents the mean and maximum wind speed and direction during the fire period in the fire regions, according to ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) hourly 10 m wind data. The directions reported in the table follow the meteorological standard as the direction from which the wind originates (hence, the "direction of flow" is approximately 180° opposite). In Aliaga-Foca, the mean speed was 4.64 m/s (max. 6.83 m/s), and the prevailing direction was ENE (~67.5°); this indicates that the wind originated from the ENE and blew toward the WSW, while at the peak hour (i.e., the hour of maximum wind speed), it flowed from E to W. Seferihisar–Menderes experienced the strongest conditions (mean 6.35 m/s, max. 9.97 m/s), with directions concentrated around E; thus, the wind blew from E to W, with a prominent ENE → WSW orientation at peak hour. In Akhisar, the mean speed was 3.80 m/s (max. 6.68 m/s), and the circular mean direction was N; this implies a flow from North to South, with a shift toward ENE - WSW at peak hour. Tarakli-Geyve-Golpazari exhibited a low-to-moderate wind regime (mean 2.36 m/s, max. 4.75 m/s) dominated by E direction; the wind blew from E to W. In Antakya, winds were weak, with a mean of 2.31 m/s (max. 4.80 m/s), and the prevailing direction was S; this indicates a flow from South to North, with an ESE → WNW orientation at peak hour. Overall, the eastern sector (E-ENE) was dominant in four regions, resulting in a prevalent westerly/southwesterly (W/WSW) wind transport; Antakya diverged with its southern sector. These interpretations should be considered with the awareness that ERA5-Land's hourly means and ~0.1° spatial resolution may not fully represent local gusts and topographic accelerations. However, the obtained wind directions appear consistent with the spread directions of the fires.

Table 5. Summary of hourly ERA5-Land 10 m winds data during the fire period: mean and maximum speed (m/s), circular mean direction, and peak-hour direction (from)

Region	Mean Wind Speed	Maks Wind Speed	Circular Mean Direction	Wind Direction at Peak Wind Hour
Aliaga-Foca	4.64	6.83	ENE	E
Seferihisar-Menderes	6.35	9.97	E	ENE
Akhisar	3.80	6.68	N	ENE
Tarakli-Geyve-Golpazari	2.36	4.75	E	E
Antakya	2.31	4.8	S	ESE

In the study, aspect derived from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (U.S. Geological Survey, 2025) was treated as the down-slope (steepest descent) azimuth; the up-slope direction was obtained using (aspect + 180°) mod 360 (Table 6). The topographic analysis revealed that the slope and aspect characteristics of each fire region had distinct and varying effects on fire behavior. The Antakya fire stood out as the region with the steepest topography, with an average slope of 34.45%; this condition created a potential environment for the fire to accelerate and intensify. In contrast, the Aliaga-Foca fire developed in a relatively gentler topography (16.23% slope). Regarding aspect directions, the Seferihisar-Menderes (SW), Akhisar (W), and Tarakli-Geyve-Golpazari (WSW) fires occurred on westerly-facing slopes, where solar radiation and wind effects are more intense in Türkiye's Mediterranean climate zone, leading to drier and more flammable vegetation. The Aliaga-Foca fire was located on a South-Southwest (SSW) aspect. The Antakya fire's occurrence on a Southeast (SE) aspect differentiated it from the other regions, a situation that may be attributed to the area's local microclimatic conditions, prevailing wind direction (S and ESE), and vegetation structure. Overall, it is evident that the studied fires predominantly developed on south- and west-facing slopes, and topographic factors (slope and aspect) played a decisive role in fire spread direction.

Table 6. Topography analysis results of the fire regions derived from SRTM data

Region	Mean Slope (%)	Circular Mean Aspect (°)	Compass Label
Aliaga-Foca	16.23	194.54°	SSW
Seferihisar-Menderes	19.84	230.81°	SW
Akhisar	24.12	277.26°	W
Tarakli-Geyve-Golpazari	25.01	247.84°	WSW
Antakya	34.45	132.93°	SE

6. Conclusion

This study highlights the efficiency of Sentinel-2 imagery and dNBR-based analysis in assessing post-fire burn severity across different climatic and ecological regions of Türkiye. The focus was on the most recent large-extent fires, which occurred between late June and early July 2025. The results demonstrate that burn severity and total burned areas vary substantially depending on vegetation type, topography and climatic conditions. Climatic anomalies in June 2025 likely contributed to the extent and severity of these fires. According to the Turkish State Meteorological Service (MGM), the June 2025 mean temperature was 23.0 °C, exceeding the 1991-2020 climatological average (21.8 °C) by 1.2 °C. Most regions in Türkiye, including the Aegean and Mediterranean districts analysed in this study (e.g., Akhisar, Antakya, Seferihisar-Menderes), experienced above-normal temperatures, increasing fire susceptibility (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025).

The comparison between dNBR-derived results and the EFFIS data revealed a high degree of consistency, with total burned area estimates showing minor differences, e.g., 9.16 km^2 vs. 9.72 km^2 for Aliaga-Foca, 96.13 km^2 vs. 99.84 km^2 for Seferihisar-Menderes, 29.34 km^2 vs. 28.49 km^2 for Akhisar, 61.31 km^2 vs. 62.91 km^2 for Tarakli-Geyve-Golpazari and 25.26 km^2 vs. 27.58 km^2 for Antakya. As can be seen, consistency between the estimated burned areas and EFFIS data is greater for Tarakli-Geyve-Golpazari and Aliaga-Foca.

It can also be concluded that burned areas can be visually better comprehend using FCC of satellite imagery, compared to TCC and NDVI images.

While EFFIS remains a reliable reference for large-scale burned area validation, medium-to-high-resolution dNBR analysis is indispensable for understanding burn severity patterns and guiding ecological restoration and fire mitigation strategies, particularly under increasingly warming climatic conditions.

Extending beyond post-fire assessment, the relationship between pre-fire vegetation stress (NDMI) and ultimate fire size was evaluated. The results reveal a more nuanced picture. The most pronounced pre-fire drought signal was detected in Antakya (z = -1.30), yet the subsequent total burned area remained relatively confined (25.25 km^2). By contrast, the Seferihisar-Menderes fire exhibited the weakest pre-fire drought stress (z = -0.15) and produced the largest burned area (96.13 km^2). This inverse relationship suggests that, while NDMI-derived moisture deficit is a valuable indicator of vegetation stress, it is not the primary driver determining a fire's final spatial extent. Instead, our analyses indicate that synchronous meteorological conditions, particularly strong wind speeds, as observed in Seferihisar-Menderes (mean 6.35 m/s), were likely the dominant factor controlling fire spread and overall burned area. Moreover, the availability of continuous fuel loads, which can be reduced under severe long-term drought (e.g., Antakya), plays a critical role in constraining or enabling lateral propagation. This underscores that fuel moisture content and fuel availability are distinct yet interconnected determinants of fire outcomes. Therefore, while pre-fire drought assessment provides essential context for fuel flammability, forecasting final fire size requires an integrated approach that, alongside topographic structure, assigns greater weight to synchronous weather events and fuel connectivity.

The nominal 5-day revisit cycle of Sentinel-2 may in some cases be ineffective for dNBR-based fire mapping; due to cloud/smoke interference and acquisition planning, the time interval between pre- and post-fire images can extend to several weeks. Such delays weaken the dNBR contrast because of the rapid changes in ash and char as well as the onset of early regrowth, which may particularly lead to the underestimation of burn severity and area. In contrast, Sentinel-1 C-band SAR measurements, with their ability to penetrate clouds and smoke and to provide day-and-night imaging, offer a distinct advantage for timely mapping, especially under cloudy conditions. Variations in SAR backscatter and/or coherence are sensitive to canopy loss, surface roughness, and moisture dynamics; therefore, post-fire changes can be used to reliably delineate burned areas.

References

Achour, H., Toujani, A., Trabelsi, H., & Jaouadi, W. (2022). Evaluation and comparison of Sentinel-2 MSI, Landsat 8 OLI, and EFFIS data for forest fires mapping. Illustrations from the summer 2017 fires in Tunisia. *Geocarto International, 37*, 7021–7040. https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1980118.

Altun, N. (2006). *Urla–Seferihisar (İzmir) bölgesinin jeolojisi ve toprak özellikleri* [Uzmanlık tezi, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Ege Ormancılık Araştırma Müdürlüğü]. https://www.ogm.gov.tr/egearastirma/yayinlarimiz/muhtelif-yayinlar

Atak, B. K., & Tonyaloğlu, E. E. (2020). Evaluating spectral indices for estimating burned areas in the case of Izmir / Turkey. *Eurasian Journal of Forest Science, 8*, 49–59. https://doi.org/10.31195/ejejfs.657253

Atalay, İ., & Mortan, K. (2011). *Türkiye bölgesel coğrafyası*. İnkılap Kitabevi.

Bitek, D., Sanli, F. B., & Erenoglu, R. C. (2025). Spatial and statistical analysis of burned areas with Landsat-8/9 and Sentinel-2 satellites: 2023 Çanakkale forest fires. *Environmental Monitoring and Assessment, 197*, Article 60. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13474-5.

Boer, M. M., Macfarlane, C., Norris, J., Sadler, R. J., Wallace, J., & Grierson, P. F. (2008). Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely-sensed changes in leaf area index. *Remote Sensing of Environment, 112*(12), 4358–4369. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.005.

Çelik, M. Ç., & Karabulut, M. (2014). Antakya–Kahramanmaraş Grabeninde Kızılçam (Pinus brutia Ten.) orman alanları ile yağış arasındaki ilişkilerin MODIS verileri (2000–2010) kullanılarak incelenmesi. *Coğrafi Bilimler Dergisi, 12*(1), 49–68. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000152.

Chu, T., & Guo, X. (2014). Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in boreal forest regions: A review. *Remote Sensing, 6*, 470–520. https://doi.org/10.3390/rs6010470

Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F. M., & Martin, P. (2006). Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 111*, Article G04S09. https://doi.org/10.1029/2005JG000143

European Forest Fire Information System. (2025). *Welcome to EFFIS*. Retrieved July 7, 2025, from https://effis.jrc.ec.europa.eu/

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics, 45*(2), Article RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Filipponi, F. (2019). Exploitation of Sentinel-2 time series to map burned areas at the national level: A case study on the 2017 Italy wildfires. *Remote Sensing, 11*, Article 622. https://doi.org/10.3390/rs11060622

Gülci, S., Yüksel, K., Gümüş, S., & Wing, M. (2021). Mapping wildfires using Sentinel-2 MSI and Landsat 8 imagery: Spatial data generation for forestry. *European Journal of Forest Engineering, 7*, 57–66. https://doi.org/10.33904/ejfe.1031090

Henner, D. N., & Kirchengast, G. (2025). Forest fire risk under climate change in Austria and comparable European regions. *Trees, Forests and People*, *20*, Article 100889. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100889

Ibrahim, S., Kose, M., Adamu, B., & Jega, I. M. (2025). Remote sensing for assessing the impact of forest fire severity on ecological and socio-economic activities in Kozan District, Turkey. *Journal of Environmental Studies and Sciences, 15*, 342–354. https://doi.org/10.1007/s13412-024-00951-z

İkiel, C. (2018). *Sakarya'nın fiziki, beşeri ve iktisadi coğrafya özellikleri*. Sakarya Üniversitesi.

Jin, S., & Sader, S. A. (2005). Comparison of time series Tasseled Cap Wetness and the Normalized Difference Moisture Index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment, 94*(3), 364–372.

Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*. Griffin, Oxford, England.

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). *Landscape assessment: Sampling and analysis methods*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, Ogden.

Kobayashi, S., & Sanga-Ngoie, K. (2008). The integrated radiometric correction of optical remote sensing imageries. *International Journal of Remote Sensing, 29*, 5957–5985.

Kurnaz, B., Bayik, C., & Abdikan, S. (2020). *Forest fire area detection by using Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images: A case study in Mugla, Turkey*. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-26787/v1

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., & Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire, 15*(3), 319–345.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, 13*, 245–259.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). *2025 Yılı Haziran Ayı Ortalama Sıcaklıklarının 1991–2020 Normallerine Göre Mukayesesi*. Retrieved July 25, 2025, from https://www.mgm.gov.tr/

Misseyanni, A., Christopoulou, A., Kougkoulos, I., Vassilakis, E., & Arianoutsou, M. (2025). The impact of forest fires on ecosystem services: The case of Greece. *Forests, 16*(3), Article 533. https://doi.org/10.3390/f16030533

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data, 13*(9), 4349–4383.

Öncü, G., & Çorumluoğlu, Ö. (2023). Determination of spatial distribution of damage intensity of Tınazlı-İzmir forest fire using remote sensing indexing techniques. *International Journal of Environment and Geoinformatics, 10*, 151–158.

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature, 540*(7633), 418–422. https://doi.org/10.1038/nature20584

Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Laes, D. Y., Hudak, A. T., Kokaly, R. F., & Zamudio, J. A. (2007). Postfire soil burn severity mapping with hyperspectral image unmixing. *Remote Sensing of Environment, 108*(4), 467–480. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.027

Şerifoğlu Yılmaz, C. (2024). Assessing air pollutant emissions in the aftermath of the 2021 forest fires in Marmaris and Manavgat, Türkiye: Insights from satellite-based monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48*, 329–336. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-329-2024

Soydan, O. (2022). Detection of burnt areas by remote sensing techniques: Antalya Manavgat forest fire. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 10*, 3029–3035. https://doi.org/10.24925/turjaf.v10isp2.3029-3035.5764

Tonbul, H. (2024). Google Earth Engine ile Türkiye'de yanmış alanların MODIS ve FireCCI51 küresel yanmış alan uydu gözlem verileriyle karşılaştırmalı değerlendirilmesi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi, 5*(1), 69–82. https://doi.org/10.48123/rsgis.1410382

Turco, M., Herrera, S., Tourigny, E., Chuvieco, E., & Provenzale, A. (2019). A comparison of remotely-sensed and inventory datasets for burned area in Mediterranean Europe. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 82*, Article 101887. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.020

U.S. Geological Survey. (2025). *SRTM mission*. Retrieved September 5, 2025, from https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm

Vittucci, C., Cordari, F., Guerriero, L., & Di Sanzo, P. (2025). Design and evaluation of a cloud-oriented procedure based on SAR and multispectral data to detect burnt areas. *Earth Science Informatics, 18*(3), Article 322. https://doi.org/10.1007/s12145-025-01829-6

Wang, L., Qu, J. J., Hao, X., & Hunt, E. R., Jr. (2011). Estimating dry matter content from spectral reflectance for green leaves of different species. *International Journal of Remote Sensing, 32*, 7097–7109.

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 315–342
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi İçin Rize Kıta Sahanlığında CBS Destekli Hibrit Çok Kriterli Saha Seçimi

Hybrid Multi-Criteria GIS-based Site Selection for Offshore Wind Energy in the Continental Shelf of Rize

Murat Başeğmez[1]*

[1]*Milli Eğitim Bakanlığı, CBS ve Emlak Daire Başkanlığı, Ankara/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Murat Başeğmez
murat.basegmez@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1754468

Yayın süreci
Geliş tarihi: 30.07.2025
Kabul tarihi: 14.09.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Rize ili kıta sahanlığı için açık deniz rüzgâr santrali saha seçimine yönelik coğrafi bilgi sistemleri (CBS) destekli, çok kriterli ve entegre bir karar destek çerçevesi geliştirmiştir. Bulanık analitik hiyerarşi süreci (FAHP), analitik hiyerarşi süreci (AHP), entropi ağırlıklandırma yöntemi (EWM) ve yarı-karesel programlama (HQP) yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla hem öznel uzman görüşleri hem de nesnel veriler dengeli şekilde değerlendirilmiş, karar sürecine güvenilirlik ve tutarlılık kazandırılmıştır. CBS'nin mekânsal analiz kapasitesi sayesinde, uygunluk kriterlerinin coğrafi dağılımı yüksek doğrulukla görselleştirilmiş ve uygulanabilir, şeffaf sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma alanının %13,5'i yüksek ve çok yüksek uygunluk düzeyinde bulunurken, özellikle Rize Merkez, Pazar ve Çayeli açıklarında yoğunlaşan bölgeler stratejik avantajlar taşımaktadır. Ancak bölgenin genel rüzgâr rejiminin zayıf olması, türbin seçiminin ve enerji üretim modellerinin dikkatli planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Çalışmanın literatüre katkısı, teknik uygunluğun ötesinde çevresel, jeolojik ve lojistik faktörleri çok katmanlı biçimde ele alması ve hibrit ağırlıklandırma yaklaşımıyla saha seçim sürecini yenilikçi biçimde modellemesidir. Geliştirilen yöntem, farklı bölgesel ve iklimsel koşullarda da tekrarlanabilir bir referans çerçevesi sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: *Açık deniz rüzgâr enerjisi, CBS, ÇKKV, FAHP, Yarı-karesel programlama (HQP)*

Abstract

This study develops an integrated, multi-criteria decision support framework for offshore wind farm site selection within the continental shelf of Rize Province, utilizing Geographic Information Systems (GIS). By combining the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), Analytic Hierarchy Process (AHP), Entropy Weighting Method (EWM), and Half-Quadratic Programming (HQP), the framework balances subjective expert judgments with objective data-driven metrics, enhancing the reliability and consistency of the decision-making process. GIS-based spatial analysis enables high-accuracy visualization of the spatial distribution of suitability criteria, producing actionable and transparent outcomes. Approximately 13.5% of the study area was identified as having high or very high suitability, with optimal zones concentrated off the coasts of Rize Central, Pazar, and Çayeli—regions that offer strategic advantages such as proximity to port and transmission infrastructure, suitable water depths, and low ecological sensitivity. Nevertheless, the region's generally weak wind regime necessitates careful turbine selection and energy modeling. The study contributes to the literature by offering a multilayered evaluation that goes beyond technical suitability to include environmental, geological, and logistical dimensions, while introducing a hybrid weighting strategy that models the site selection process innovatively. The proposed framework is flexible and replicable under diverse regional and climatic conditions, serving as a reference for future applications.

Keywords: *Offshore wind energy, GIS, MCDM, FAHP, Half-quadratic programming (HQP)*

1. Giriş

Sürdürülebilir enerji üretimine geçiş ve çevresel açıdan duyarlı toplumsal yapılar inşa etmek, günümüzde küresel ölçekte acil bir gereklilik haline gelmiştir (İnci & Türksoy, 2019). Fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğal gaz gibi) hızla tükenmesi ve bu kaynakların yüksek sera gazı emisyonlarına yol açması; yalnızca insan sağlığı ve ekonomik istikrar üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yaratmakla kalmayıp, dolaylı olarak çevresel geri besleme mekanizmaları üzerinden gıda güvenliğini de tehlikeye atmaktadır (Poudyal vd., 2019). Buna karşın, rüzgâr, güneş, gelgit ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları, tükenmeyen yapıları ve düşük emisyon profilleri ile konvansiyonel yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu kendini yenileyebilen kaynakların stratejik biçimde kullanımı, hem enerji arz güvenliği sorunlarını hafifletmek hem de çevresel bozulmayı azaltmak açısından hayati öneme sahiptir. Bu nedenle birçok ülke, gelecekteki enerji darboğazlarını önlemek ve artan karbon emisyonları ile hava kirliliğini kontrol altına almak amacıyla yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmektedir (Emeksiz & Demirci, 2019; Lo vd., 2021; Urfalı & Eymen, 2021).

Birleşmiş Milletler, yenilenebilir kaynaklar arasında rüzgâr enerjisini en çevreci üretim biçimlerinden biri olarak tanımlamakta ve küresel yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada kilit bir unsur olarak görmektedir (Büyüközkan vd., 2018). Özellikle açık deniz rüzgâr enerjisi, su yüzeyindeki istikrarlı rüzgâr akımları sayesinde büyük ve nispeten sabit bir enerji potansiyeli sunmakta; bu özellik, Avrupa'daki birçok ülkede yaygın benimsenmesine olanak sağlamaktadır (Lerch vd., 2018). Kara tesislerine kıyasla deniz üstü alanlarda yüzey pürüzlülüğünün düşük olması, daha yüksek ortalama rüzgâr hızları ve artan enerji yoğunluğu sağlayarak türbin verimliliğini anlamlı ölçüde artırmaktadır (Emeksiz & Demirci, 2019). Ayrıca offshore rüzgâr çiftlikleri, tarım veya kentsel alanlarla rekabet etmediği için, arazi edinimine ilişkin yüksek sermaye maliyetlerinden de kaçınmayı mümkün kılmaktadır (Li vd., 2020). Bu mekânsal avantaj, kara kapasitesinin sınırlandığı veya artan sosyo-politik kısıtların bulunduğu bölgelerde offshore projelerini öncelikli tercih haline getirmektedir.

Rüzgâr çiftliklerinin optimum yerleşimi, hâkim rüzgâr akımlarına sürekli erişim gerektirdiğinden, kıyı ve açık deniz alanları büyük ölçekli tesisler için son derece elverişlidir (Aldersey-Williams vd., 2019). Bununla birlikte, sahip olduğu yüksek potansiyele rağmen, açık deniz rüzgâr projeleri çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Özellikle deniz mühendisliği sistemlerinin — temeller, çapa ve halat bağlantıları ile iletim hatları dahil olmak üzere — karmaşıklığı ve yüksek sermaye ihtiyacı, halen önemli teknolojik ve finansal engeller oluşturmaktadır (Negro vd., 2017). Buna ek olarak, açık deniz rüzgâr enerjisi altyapısının mekânsal planlaması; rüzgâr kaynağı potansiyeli, deniz ulaşım yolları, görsel ve ekolojik etkiler ile sosyo-ekonomik kalkınma öncelikleri gibi karşılıklı etkileşim halindeki çok sayıda değişkeni eşzamanlı olarak değerlendirmeyi gerektirmektedir (Vieira vd., 2019).

Kara üzerindeki uygun alanların giderek azalmasıyla birlikte, iki temel strateji öne çıkmıştır: mevcut kara rüzgâr enerjisi altyapısının yeniden güçlendirilmesi veya deniz alanlarına doğru genişleme (Hou vd., 2017; Ioannou vd., 2018; Yılmaz vd., 2023). Bu eğilim, özellikle Avrupa'da yenilenebilir enerji dağıtım modellerinde belirgin bir dönüşüm yaratmış; yalnızca 2016 yılında rüzgâr enerjisi sektörü 12,5 GW ek kapasite devreye alarak küresel toplam kapasiteyi 153,7 GW'a yükseltmiştir (Castro-Santos vd., 2020). Çin, günümüzde toplam rüzgâr kapasitesinde dünya lideri olmasına rağmen (Zhang vd., 2017), Avrupa Birliği açık deniz kurulumlarında öncü konumunu sürdürmekte; 2018 itibarıyla Avrupa'daki kapasite 18.519 MW iken, Asya'da bu rakam Çin'de 4.588 MW, Vietnam'da 99 MW ve Japonya'da 65 MW olarak kaydedilmiştir (International Renewable Energy Agency, 2020).

Teknolojik ilerlemeler sayesinde Tension Leg Platform (TLP), spar tipi temeller ve yarı batık platformlar gibi yüzer rüzgâr enerjisi altyapıları geliştirilmiş ve daha derin sularda kurulum mümkün hale gelmiştir (Jeon vd., 2013; Oguz vd., 2018). Bu yenilikler, optimize edilmiş santral yerleşim düzenleri ve ortak elektrik altyapıları ile birleştirildiğinde, maliyetlerin azaltılması ve ölçeklenebilirliğin artırılması açısından yeni fırsatlar sunmaktadır (Chen & Macdonald, 2014; Mittal vd., 2017; Pillai vd., 2017). Ancak, yalnızca yüksek kaliteli rüzgâr kaynağı, uygunluk için yeterli değildir; hukuki kısıtlamalar, korunan ekosistemler, deniz ulaşım yolları ve görsel etkiler gibi faktörler, teknik açıdan ideal görünen lokasyonları dahi elverişsiz hale getirebilmektedir (Maslov vd., 2017). Bu nedenle, açık deniz rüzgâr enerjisi geliştirme süreçleri; teknik, çevresel, hukuki ve toplumsal boyutları entegre eden ileri düzey çok kriterli karar verme (ÇKKV) çerçeveleri gerektiren karmaşık bir problem haline gelmiştir (Bidwell, 2017).

Söz konusu birbiriyle ilişkili ve sıklıkla çelişen kriterleri sistematik bir biçimde değerlendirebilmek için literatürde çeşitli ÇKKV yöntemleri uygulanmıştır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) (Jadoon vd., 2020; Hasanzadeh vd., 2024; Başeğmez, 2025a), Analitik Ağ Süreci (ANP) (Liu vd., 2020), Bayesçi En İyi–En Kötü Yöntemi (BWM) (Lo & Liou, 2018) ve DEMATEL (Yang vd., 2020; Başeğmez, 2025b) gibi yöntemler, uzman anketleri ve ikili karşılaştırmalar temelinde karar faktörlerini yapılandırılmış bir şekilde incelemeye olanak tanımaktadır. Öte yandan, alternatiflerin belirsizlik altında sıralanmasında TOPSIS (Susanty vd., 2019; Sarı & Koyuncu, 2021; Topçu vd., 2023), VIKOR (B. Wang vd., 2019; Savanović vd., 2024), ELECTRE (Wu vd., 2016; Liao vd., 2019) ve Grey Rational Analysis (GRA) (Basegmez & Aydin, 2025) gibi performansa dayalı sıralama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bulanık mantık ve performansa bağlı teorileri birleştiren hibrit modeller, enerji planlamasında belirsiz veriler ve uzman önyargıları ile başa çıkmak için giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır (Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Lo & Liou, 2018; Başeğmez, 2025a; Basegmez & Aydin, 2025).

Ancak mevcut modellerin çoğu, değerlendirme kriterleri arasındaki karşılıklı bağımlılıkları yeterince ele almamakta ve ağırlıklandırma şemaları arasındaki çelişkili tercihleri çözümleyememektedir. Bu boşluğu kapatmak amacıyla, öznel (FAHP) ve nesnel (EWM) ağırlıklandırma sonuçlarını uzlaştırmaya yönelik çeşitli hibrit yaklaşımlar geliştirilmiştir. Böylece hem insan yargısını hem de sistemsel etkileri yansıtan, uzlaşmaya dayalı küresel ağırlıklar elde edilmektedir (Basegmez & Aydin, 2025; Luthra vd., 2017). Özellikle, yüksek riskli enerji altyapısı kararlarında dengeli bir önceliklendirme sağlamak açısından bu yaklaşım daha sağlam ve yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Bununla paralel olarak, CBS mekânsal karar süreçlerinde vazgeçilmez hale gelmesi, rüzgâr hızı, deniz derinliği, kıyıya uzaklık, ekolojik koruma alanları ve deniz ulaşım yolları gibi farklı mekânsal katmanların üst üste bindirilmesine ve potansiyel sahaların etkili bir şekilde görselleştirilmesine olanak tanımıştır (Ali vd., 2017; Argin vd., 2019) CBS ve ÇKKV modellerinin entegrasyonu, yalnızca teknik düzeyde saha değerlendirmelerini desteklemekle kalmayıp, politika yapıcılar ve paydaşlarla etkili iletişimi de kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, FAHP, EWM ve HQ programlamayı CBS tabanlı bir ÇKKV çerçevesi içinde bütüncül bir biçimde birleştiren model sayısı sınırlıdır. Ayrıca, sürdürülebilir kalkınma ilkeleri çoğunlukla yüzeysel ele alınmakta, kriterler arasındaki dinamik ilişkiler ve bağımlılıklar göz ardı edilmektedir. Bu boşluğu kapatmak üzere, bu çalışmada aşağıdaki bileşenleri içeren entegre bir melez karar destek çerçevesi önerilmektedir:

- FAHP ile uzman yargısı ve öznel tercihlerin belirsizlik altında modellenmesi.
- EWM ile kriterler arasındaki etkisel ilişkilerin nesnel olarak hesaplanması.
- HQP ile FAHP ve EWM sonuçları arasındaki uyumsuzlukların denge odaklı bir uzlaşıyla çözülmesi.
- CBS ile mekânsal verilerin görselleştirilmesi ve fiziksel ile hukuki kısıtlamalara göre uygun alanların belirlenmesi.

Önerilen çerçeve, açık deniz rüzgâr enerjisi yatırımları için en uygun bölge seçiminin belirlenmesine yönelik gerçek bir saha çalışmasına uygulanmıştır. Sonuçlar, belirsizlik altında çok kriterli enerji planlaması için hem metodolojik bir yenilik sunmakta hem de sürdürülebilirlik, ekonomik getiri ve paydaş beklentilerini dengelemek isteyen karar vericilere ve yatırımcılara pratik öneriler sağlamaktadır.

2. Literatür Taraması

CBS, açık deniz rüzgâr enerjisi saha seçimi süreçlerinde çevresel, teknik ve düzenleyici kısıtlamaların mekânsal olarak analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. ÇKKV yöntemleriyle entegre edildiğinde, CBS; rüzgâr potansiyeli, su derinliği, yasak bölgeler ve mevcut altyapıya yakınlık gibi farklı veri katmanlarını üst üste bindirerek kapsamlı uygunluk haritaları üretir (Iyappan & Pandian, 2016; Shao vd., 2025). Bu entegrasyon sayesinde, saha önceliklendirme süreci daha şeffaf hale gelir ve ekolojik ya da yasal kısıtlamalara duyarlı alanlar hızlıca tespit edilebilir (Castro-Santos vd., 2020; Umoh vd., 2025). Son yıllarda, CBS tabanlı senaryo modelleme ve enerji–ekserji performans analizlerinin de geliştirilmesi, bu teknolojilerin karar destek kapasitesini daha da artırmıştır (Isiacik Colak vd, 2021).

ÇKKV yöntemleri, teknik fizibilite, ekonomik maliyet, çevresel etki ve toplumsal kabul gibi çoğu zaman çelişen parametreleri yapılandırılmış bir çerçevede değerlendirme imkânı sunar (Gil-García vd., 2023; Takeuchi, 2023). Hem niteliksel hem niceliksel verileri bütünleştirerek aday sahaları sürdürülebilirlik göstergelerine göre sıralar ve önceliklendirir. Kara ve deniz verilerini görselleştiren CBS ile bir arada kullanıldığında, rüzgâr hızı, deniz tabanı özellikleri, ekolojik hassasiyet ve altyapıya yakınlık gibi mekânsal katmanları içeren haritalar üreterek karar vericilere somut araçlar sağlar (Gil-García vd., 2023; Shao vd., 2025). Ayrıca, türbülans etkisi, paydaşlar arası tercih farklılıkları ve düzenleyici belirsizlik gibi planlama zorluklarını ele alarak karar süreçlerini optimize eder ve şeffaflığı artırır (Wu vd., 2020; Shao vd., 2025).

FAHP, uzman yargılarındaki belirsizlikleri ve muğlaklıkları işleyebilme kapasitesi sayesinde açık deniz rüzgâr sahası seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. FAHP, rüzgâr potansiyeli, deniz tabanı koşulları, ekolojik duyarlılık ve maliyet etkinliği gibi çelişkili kriterlerin, bulanık mantık temelli ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendirilmesini mümkün kılar (Zhao vd., 2024; Lee vd., 2025). Özellikle yüzer platformların bağlantı noktaları ve ankraj sistemlerinin seçiminde; teknik güvenilirlik, çevresel etki ve ekonomik uygunluk dikkate alınarak hem sistem performansı hem de yatırım fizibilitesi artırılabilmektedir (Lee vd., 2025). FAHP, CBS ile entegre edildiğinde saha sıralamalarına mekânsal bir boyut kazandırarak uzun vadeli stratejik planlamayı destekler (Umoh vd., 2025).

FAHP'nin en önemli avantajlarından biri, muğlak ya da eksik bilgileri işleyebilmesidir. Küresel ya da aralıklı bulanık uzantılar, belirsizlik içeren veri ortamlarında uygunluk değerlendirmelerinin sağlamlığını daha da artırmaktadır (Zhao vd., 2024; Umoh vd., 2025). Bununla birlikte, bazı modeller dinamik deniz tabanı koşullarını tam olarak yansıtamayabilir veya jeo-verideki belirsizlikleri yeterince dikkate almayabilir; bu da karmaşık deniz ortamlarında karar güvenilirliğini azaltabilir (Hosseinzadeh vd., 2023). Bu sınırlamaları gidermek amacıyla, FAHP'nin simülasyon araçları, CBS veya olasılıksal modelleme yaklaşımlarıyla hibrit hale getirilmesi önerilmektedir.

EWM, çok kriterli karar verme süreçlerinde her bir kriterin bilgi içeriğine dayalı olarak nesnel bir ağırlıklandırma sağlamasıyla öne çıkmaktadır. Geleneksel bulanık ya da öznel değerlendirme modellerinin öznelliğini azaltmayı hedefleyen EWM'de, kriterler için toplanan veriler normalize edildikten sonra Shannon entropisiyle her göstergenin bilgi miktarı belirlenir; yüksek entropi, düşük varyanslı ve daha az belirleyici bir kriteri işaret ederken, düşük entropili

kriterlere daha yüksek ağırlık atfedilir (Zhu vd., 2020). EWM'nin temel avantajı, belirsiz ya da eksik veri setlerinde dahi tutarlı sonuçlar üretebilmesi ve uzman öznelliğini minimize etmesidir (Başeğmez, 2025a). Bununla birlikte, standartlaştırma aşamasında oluşabilecek sapmalar ve entropi değerlerinin 1'e yaklaşması durumunda ağırlık dağılımlarında bozulmalar gözlenebilir; bu nedenle veri ön işleme ve kalite kontrolü kritik önemdedir (Feng vd., 2019; Yang vd., 2022). Güncel çalışmalar, EWM'yi CBS-ÇKKV meta-sezgisel yaklaşımlarla bütünleştirerek ölçek farklılıklarından kaynaklanan tutarsızlıkları gideren çok ölçekli çerçeveler geliştirmektedir. Böylece saha seçimi süreçlerinde hem operasyonel esneklik hem de karar güvenilirliği artırılmaktadır (Xilin & Long, 2019; Basegmez & Aydin, 2025). Sonuç olarak, enerji altyapısı yatırımlarında saha seçimi kararları; teknik uygunluk, ekonomik verimlilik ve ekolojik koruma boyutlarını dengeli biçimde yansıtan, nesnel temelli bir zemine dayandırılmış olmaktadır.

HQP, saha seçimi çalışmalarında eksik parametrelerin diğer kriterlerin güçlü yönleriyle dengelenmesini sağlayan, tazmin edici bir model olarak öne çıkmaktadır. Bu sayede hızlı, kolay ve maliyet etkin analizler gerçekleştirilebilir (Zaredar & Kheirkhah Zarkesh, 2012). HQP, niteliksel ve niceliksel faktörleri çok boyutlu bir matris içerisinde bütünleştirerek seçim hata payını en aza indirir (Vaisi vd., 2024). Kentleşme ya da enerji projeleri gibi çevresel planlama bağlamlarında, saha seçimi kararlarının HQP performansı üzerinde doğrudan belirleyici olduğu ve uygun lokasyon seçiminin modelin başarısını doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Bununla birlikte, yüksek duyarlılığı nedeniyle karar vericinin öznelliğine açık olması, modelin önemli sınırlılıklarından biridir (Zaredar & Kheirkhah Zarkesh, 2012).

Mevcut literatürde açık deniz rüzgâr santrali saha seçiminde CBS ve ÇKKV yöntemlerinin yaygın biçimde kullanıldığı görülmekle birlikte; belirsizlik yönetimi, kriterler arası nedensel ilişkilerin modellenmesi ve ağırlıkların dinamik olarak dengelenmesi konularında ciddi eksiklikler bulunmaktadır. Çoğu çalışma, sabit ağırlıklar ya da tekil yöntemler kullanmakta, çevresel, teknik ve sosyo-politik kriterlerin etkileşimlerini yeterince dikkate almamakta ve öznel önyargı riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, Rize açık deniz sahasında uygulanacak üç aşamalı hibrit çerçevenin — bulanık uzman yargılarını modelleyen FAHP, kriterler arası etkileşim ağını kuran EWM ve denge odaklı nihai ağırlıkları hesaplayan HQP — eş zamanlı kullanılması, alandaki metodolojik boşluğu kapatarak belirsizlikleri yönetebilen, kriter etkileşimlerini dikkate alan ve ağırlıkları uyarlanabilir biçimde güncelleyebilen şeffaf bir planlama aracı ortaya koymaktadır.

Türkiye'de açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyeline ilişkin çalışmalar oldukça sınırlıdır ve büyük ölçüde Marmara ve Ege kıyılarına odaklanmaktadır (Bayram vd., 2021). Bu araştırmalar çoğunlukla rüzgâr kaynağına ilişkin teknik değerlendirmelerle sınırlı kalmış, kapsamlı ÇKKV temelli mekânsal uygunluk analizlerine yeterince yer verilmemiştir. Argin vd. (2019) tarafından yürütülen kapsamlı bir çalışmada Türkiye'nin 55 kıyı bölgesi çok kriterli bir çerçevede değerlendirilmiş ve Bozcaada, Bandırma, Gökçeada, İnebolu ve Samandağ bölgeleri öne çıkan alanlar olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, söz konusu çalışma esas olarak rüzgâr hızı ve deniz derinliği gibi teknik parametreler üzerine yoğunlaşmış, karar sürecinde belirsizliklerin sistematik yönetimi konusunda sınırlı katkı sunmuştur. Deveci vd. (2020) Karadeniz kıyılarında (İnebolu, Amasra, Karasu) bulanık mantık tabanlı bir ÇKKV yaklaşımı uygulayarak, farklı kriterleri eşzamanlı biçimde değerlendiren çok boyutlu bir karar modeli geliştirmiştir. Bu yönüyle çalışma, Karadeniz'de offshore rüzgâr enerjisi potansiyelini inceleyen az sayıdaki öncü girişimden biri olarak dikkat çekmektedir. Cali vd. (2018) ise Türkiye'nin yüksek potansiyel arz eden üç açık deniz bölgesi için teknik-ekonomik bir fizibilite analizi gerçekleştirmiştir. Ancak bu çalışma, ekonomik uygulanabilirlik boyutuna odaklanmış olup mekânsal ÇKKV entegrasyonunu içermemektedir. Bu bağlamda, mevcut çalışmanın özgün katkısı; Karadeniz'in Rize kıta sahanlığı özelinde, FAHP, AHP, EWM ve HQP yöntemlerini bütünleştiren kapsamlı bir metodolojik yaklaşım geliştirmesi ve yalnızca rüzgâr kaynağına değil, altyapı, çevresel ve jeolojik faktörlere dayalı çok boyutlu bir mekânsal karar modeli sunmasıdır. Böylelikle, Türkiye literatüründe hâlihazırda sınırlı olan Karadeniz odaklı çalışmalar güçlendirilmiş, belirsizlik yönetimi ve kriter entegrasyonu açısından metodolojik bir yenilik ortaya konmuştur.

Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan TOPSIS, VIKOR, DEMATEL gibi yöntemlere yer verilmemesinin temel nedeni, araştırmanın yöntemsel kapsamının ağırlıklı olarak kriter ağırlıklandırma süreçlerine odaklanmış olmasıdır. Söz konusu yöntemler daha çok alternatiflerin sıralanması ve karar verme çıktılarının değerlendirilmesinde kullanılmakta olup, kriter ağırlıklarının belirlenmesi sürecine doğrudan katkı sağlamamaktadır. Bu nedenle, çalışmada özellikle ağırlıklandırma temelli yöntemler (AHP, FAHP, EWM) ve bunların entegrasyonunu sağlayan HQP yaklaşımı tercih edilmiştir. Böylece, yöntemsel çeşitlilik yerine, kriter ağırlıklarının farklı bakış açılarından dengeli biçimde belirlenmesi hedeflenmiştir.

3. Materyal ve Yöntemler

3.1. Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (FAHP)

AHP, karar unsurlarını hiyerarşik bir yapıda organize ederek, 1–9 ölçeği üzerinden ikili karşılaştırmalar yoluyla kriter ağırlıklarını türeten en yaygın ÇKKV yöntemlerinden biridir (Saaty, 1987). Ancak AHP'nin temel sınırlılığı, kesin sayısal verilere dayanması nedeniyle, uzman yargılarındaki belirsizlik ve muğlaklığı yeterince yansıtamamasıdır. Bu eksikliği gidermek amacıyla geliştirilen FAHP, uzman değerlendirmelerini üçlü bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers, TFN)

aracılığıyla ifade eder (Tablo 1). Her TFN üçlüsü (l, m, u) sırasıyla alt sınır, en olası değer ve üst sınır olmak üzere belirsizlik aralığını tanımlar ve karar verme sürecinde belirsizliğin sistematik biçimde modellenmesine olanak sağlar (Sarkar vd., 2022; Başeğmez, 2025b).

Tablo 1. Dilsel terimler ve TFN karşılıkları

Dilsel Terim	TFN	Keskin Değer
Eşit	(1,1,1)	1
Orta derece	(2,3,4)	3
Güçlü	(4,5,6)	5
Çok güçlü	(6,7,8)	7
Aşırı güçlü	(9,9,9)	9
Ara değer (1-3)	(1,2,3)	2
Ara değer (3-5)	(3,4,5)	4
Ara değer (5-7)	(5,6,7)	6
Ara değer (7-9)	(7,8,9)	8

Bir TFN A = (l, m, u)'nun tersi A^{-1} = (1/u, 1/m, 1/l) ile gösterilir.

Adım 1: Bulanık Karşılaştırma Matrisi (PCM) Oluşturma: Uzmanlar dilsel terimlerle verdikleri ikili değerlendirmeleri TFN'lere dönüştürerek bulanık PCM'yi oluşturur (Chang, 1996).

Adım 2: Yargıların Birleştirilmesi (Bulanık Geometrik Ortalama): Her kriter i için tüm a_{ij} karşılaştırmalarının bulanık geometrik ortalaması hesaplanır (n kriter sayısı olmak üzere) (Buckley, 1985):

$$W_{\text{İ}=\left(\prod_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{1/n}} \quad (1)$$

Adım 3: Keskinleştirme ve Normalize Etme: Bulanık ağırlıklar, merkezi değer yöntemiyle keskin hâle getirilir:

$$w_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \quad (2)$$

Ardından ağırlıklar 1'e eşit toplam oluşturacak şekilde normalize edilir (Wang & Chen, 2008).

Adım 4: Tutarlılık Kontrolü: Uzman yargılarının tutarlılığı, Tutarlılık Oranı (CR) ile denetlenir; CR<0.1 ise kabul edilebilir ve bu durum tutarlılığın sağlanmış olduğunu göstermektedir (Saaty, 1987).

3.2. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP)

ÇKKV yöntemleri arasında en yaygın kullanılanlardan biri olan AHP, karmaşık ve çok katmanlı karar problemlerine çözüm bulmak için ikili karşılaştırmalara dayanır. Alternatifler, belirlenen amaca uygun olarak oluşturulan kriter ve alt kriterlerin ağırlıklarına göre değerlendirilir (Başeğmez, 2025a).

İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması sürecinde, karar vericiler kriterlerin birbirine göre görece önem derecelerini belirler. Bu süreçte, kriterlerin göreli önemini belirlemek için Tablo 3'te sunulan ölçeklerden yararlanılır. Söz konusu ölçek, kriter ağırlıklarının tutarlı ve homojen biçimde hesaplanmasına olanak tanır. Kriterlerin değerlendirilmesinin ardından, ikili karşılaştırma matrisleri oluşturularak kriter ağırlıkları hesaplanır (Saaty, 2008). Bu yöntem sayesinde, karar sürecine dahil edilen tüm kriterler sistematik bir şekilde analiz edilerek alternatiflerin en uygun şekilde sıralanması sağlanır. AHP, karar vericilere karmaşık problemleri basitleştirme ve nesnel çözümler elde etme imkânı sunar (Caner & Aydin, 2021; Topçu vd., 2023).

3.3. Entropy Ağırlık Yöntemi (EWM)

EWM, basit matematiksel yapısı ve çok kriterli farklı senaryolara kolayca uygulanabilirliği sayesinde, karar vericiler arasında yaygın biçimde tercih edilen nesnel bir ağırlıklandırma yaklaşımıdır. Ancak, yalnızca veri dağılımındaki farklılıklara dayanması nedeniyle, kriterler arasındaki olası korelasyonları göz ardı edebilmekte; bu da düşük ağırlıklı

kriterlerin, yüksek ağırlıklı kriterler üzerinde beklenmedik etkilere yol açmasına neden olabilmektedir (Wu vd., 2021; Qin vd., 2022; Feng vd., 2023).

Shannon'un entropi kavramına dayanan bu yöntem, verinin dağılımı genişledikçe entropi değerinin azalacağını öngörür; daha düşük entropi, daha yüksek bilgi içeriğine işaret eder ve ilgili kritere daha yüksek ağırlık atfedilmesi gerektiğini gösterir (Neelakanta vd., 1992; Basegmez & Aydin, 2025). Böylece, kriterlerin ayırt ediciliği nesnel biçimde hesaplanarak ağırlıklandırma sürecine aktarılır.

Adım 1: Karar Matrisi Oluşturma: Alternatiflerin kriterlere göre performans değerleri kullanılarak karar matrisi (DM) kurulur:

$$\text{DM} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada
xij, i. alternatifin j. kriterdeki performansıdır.

Adım 2: Normalizasyon: Farklı ölçekli verilerin karşılaştırılabilir hale gelmesi için matris normalize edilir:

$$\text{nij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (4)$$

Adım 3: Entropi Değerlerinin Hesaplanması: Her bir kriter için entropi değeri Ej hesaplanır:

$$\text{Eij} = -\text{ k } \sum_{i=1}^{m} n_{ij} \ln n_{ij} \quad (5)$$

Entropi, kriterin bilgi belirsizliğini ölçer.

Adım 4: Çeşitlilik Derecesinin Tespiti: Kriterin karar sürecindeki önemini gösteren çeşitlilik derecesi dj :

$$\text{dj} = 1 - \text{Ej} \quad (6)$$

Adım 5: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması: Nihai kriter ağırlıkları wj, çeşitlilik derecelerinin normalize edilmesiyle elde edilir:

$$\text{wj} = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \text{ , } w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \quad (7)$$

Bu adımlar, EWM ile kriter önceliklendirmesini veri temelli ve öznellikten arındırılmış bir şekilde gerçekleştirmeyi sağlar.

3.4. HQ Programming (HQP)

Ensemble yöntemler, farklı ÇKKV tekniklerinin çıktılarının birleştirilmesi yoluyla karar sürecinin sağlamlığını artırmayı amaçlar. Literatürde, bu yöntemler başlıca İstatistiksel Ortalama (Statistical Means, SM) ve Oylama Teknikleri (Voting Techniques, VT) olmak üzere iki ana kategoride değerlendirilmektedir (Roy & Majumder, 2019; Vyas vd., 2022; Mohammadifar vd., 2023). SM yaklaşımında, her bir yöntemden elde edilen sıralama vektörleri geometrik ortalama ile birleştirilirken, VT yöntemi alternatifleri en çok tekrar eden üst sıralardan seçer. Her iki yöntem de basit ve hızlı uygulama imkânı tanısa da sıralamalar arasındaki tutarsızlıkların optimizasyonu açısından sınırlı kalmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sınırlamaları aşmak amacıyla, HQP algoritması dinamik bir optimizasyon temelli ensemble çerçevesi sunar. HQ Programlama, her bir ÇKKV yönteminin sıralama vektörleri Rj ile nihai ensemble sıralama vektörü $R*$ arasındaki farkı minimize edecek şekilde yöntem ağırlıklarını $aj*$ dinamik olarak ayarlar (Mohammadi & Rezaei, 2020; Sharma vd., 2023). Model şu şekilde formüle edilir:

$$min_{R*,a*}\, J\,(R^*, a^*) = \sum_{j=1}^{n} a_j^* \left\| R_j - R^* \right\|_2^2 + \lambda\psi\,(a_j^*) \quad (8)$$

Burada ‖·‖2 öklid normunu; ψ (a_j^*) gereksiz ağırlıkları caydıran ceza fonksiyonunu; λ ise bu ceza teriminin etki düzeyini kontrol eden hiperparametreyi ifade etmektedir (Zaidan vd., 2024).

HQ programlamanın etkinliğini değerlendirmek için iki performans ölçütü tanımlanmıştır: Uzlaşma İndeksi (Consensus Index, CI) ve Güven Düzeyi (Trust Level, TL). CI, farklı ÇKKV tekniklerinden elde edilen sıralamaların ne ölçüde uzlaştığını gösterirken,

$$CI(R^*) = \frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} q_{ij}, \quad q_{ij} = f_\sigma(r_{ij} - r_i^*) \tag{9}$$

$$f_\sigma(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}x^2} \tag{10}$$

formülleri ile hesaplanır. TL ise, yöntem ağırlıklarının dağılımı ve sıralamaların güvenilirliğini,

$$TL(R^*) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j^*}{\|a^*\|_1} q_{ij} \tag{11}$$

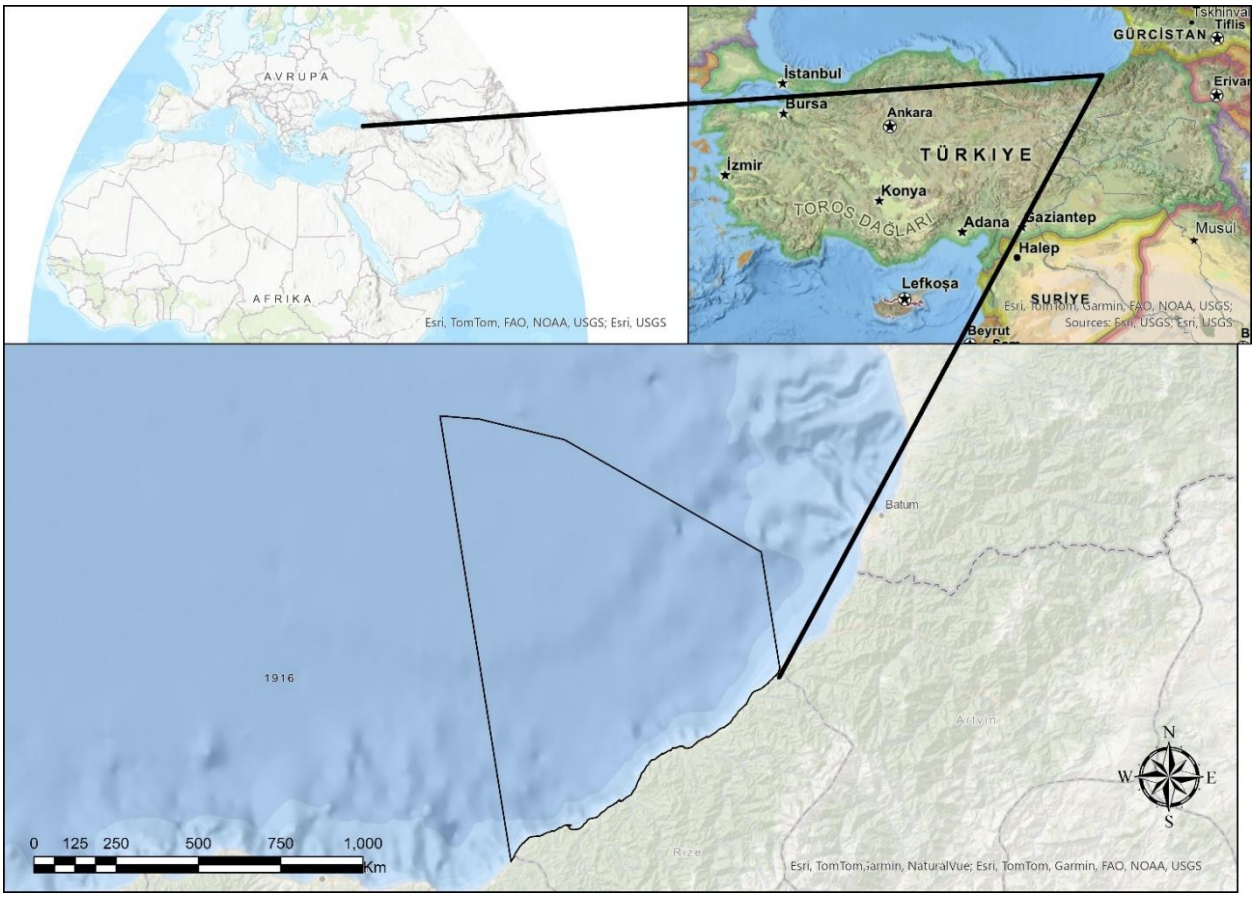
ifadeleriyle ölçer (Zaidan vd., 2024). Yüksek CI ve TL değerleri, ensemble sıralamanın hem yöntemler arası uyum hem de güvenilirlik açısından başarılı olduğuna işaret etmektedir.

3.5. Çalışma Alanı

Bu çalışmada önerilen açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi çerçevesinin uygulanacağı çalışma alanı olarak, Türkiye'nin kuzeydoğusunda Karadeniz kıyısında yer alan Rize ili (41.0255° N, 40.5177° E) belirlenmiştir (Şekil 1). Doğu Karadeniz Bölgesi'nin önemli bir kenti olan Rize, ekonomisini ağırlıklı olarak tarım, balıkçılık ve hizmet sektörlerinden almakta, aynı zamanda yenilenebilir enerji yatırımları için gelişmekte olan bir potansiyele sahiptir.

İl sınırları boyunca yaklaşık 80 kilometrelik bir kıyı şeridine sahip olan Rize; Pazar, Ardeşen ve Çayeli açıklarında yer alan bölgelerle birlikte, Karadeniz kıyısında açık deniz rüzgâr enerjisi için umut vadeden alanlar arasında değerlendirilmektedir. Bölgede 100 m yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızlarının 2–5 m/s aralığında olduğu, yüzey pürüzlülüğünün düşük ve batimetrik eğimlerin nispeten yüksek olduğu belirlenmiştir (Bayram vd., 2021). Bu özellikler sabit tabanlı sistemlerden ziyade yüzer platform teknolojileri için daha elverişli koşullar sunmaktadır. Rize'nin konumu, Trabzon ve Samsun limanlarına olan görece yakınlığı sayesinde lojistik destek açısından da belirli avantajlar sağlamaktadır.

Rize kıta sahanlığının vaka alanı olarak seçilmesinin üç temel gerekçesi bulunmaktadır. Birincisi, Karadeniz Havzası'nda yer alması ve doğu enerji koridorlarına olan yakınlığı sebebiyle bölge stratejik öneme sahiptir. İkincisi, denizel, meteorolojik ve jeolojik verilerin başta Copernicus Marine Service, Global Wind Atlas ve USGS (United States Geological Survey) gibi ulusal ve uluslararası platformlardan açık erişimle sağlanabilmesi, veri erişilebilirliği açısından bu bölgeyi uygun hale getirmektedir. Üçüncüsü ise, literatürde Rize açıklarında çok kriterli karar verme yöntemleriyle yapılmış CBS tabanlı offshore RES saha seçimi çalışmalarının yok denecek kadar az olması, bu çalışmanın metodolojik ve bölgesel bir boşluğu doldurma potansiyelini ortaya koymaktadır. Tüm bu nedenlerle, bölge düşük rüzgâr hızlarına sahip olsa dahi, çok boyutlu karar verme modellerinin test edilebileceği anlamlı ve uygulanabilir bir vaka alanı sunmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı

Sonuç olarak, Rize; ölçülü düzeyde rüzgâr kaynağı potansiyeli, Karadeniz havzasındaki stratejik konumu, gelişmekte olan enerji altyapısı ve ulusal yenilenebilir enerji hedefleriyle uyumu sayesinde, Türkiye'nin açık deniz rüzgâr enerjisi planlaması için anlamlı ve zorlu bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Çalışmadan elde edilecek bulguların, Karadeniz kıyısındaki benzer ortamlarda yürütülecek daha geniş ölçekli açık deniz rüzgâr sahası planlama çalışmalarına da katkı sağlaması beklenmektedir.

3.6. Kriterlerin Tanımlanması

Açık deniz rüzgâr santrali saha uygunluğunun değerlendirilmesi; jeofiziksel kısıtlar, denizel çevre koşulları, altyapıya erişilebilirlik ve sosyo-politik hassasiyetler arasındaki karmaşık etkileşimi yansıtan, mekânsal olarak entegre birçok ÇKKV çerçevesi gerektirir. Bu çalışmada, Karadeniz kıyısındaki Rize ili açıklarında açık deniz rüzgâr santrali kurulabilirliğini değerlendirmek amacıyla CBS tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiş ve toplam 14 özgün kriter analize dâhil edilmiştir.

Tüm mekânsal veri setleri, Türkiye ulusal jeodezik altyapısıyla uyumlu olacak şekilde ED50 UTM Zone 37N koordinat sistemine projelendirilmiş ve haritacılık tutarlılığı sağlanmıştır. Mekânsal veriler Türkiye Cumhuriyeti kamu kurumlarından, Copernicus Marine Service, Global Wind Atlas, USGS ve Open Street Map gibi ulusal ve uluslararası veri kaynaklardan temin edilmiştir.

Geometrik özelliklere sahip veriler — fay hatları, koruma alanları, gemi rotaları ve altyapı bilgileri gibi — mesafe temelli yakınlık analizi ve mekânsal üst üste bindirme (overlay) teknikleri kullanılarak modellenmiştir. Sürekli değişkenler — örneğin batimetri, rüzgâr hızı, deniz akıntıları ve gemi yoğunluğu — 30 m piksel çözünürlükte standartlaştırılmış raster katmanlara dönüştürülmüş ve detaylı sınıflandırmaya uygun hale getirilmiştir. Her kriter, ulusal mevzuat, uluslararası en iyi uygulamalar ve ampirik literatürdeki eşik değerleri dikkate alınarak 1 (uygunsuz) ile 5 (çok uygun) arasında derecelendirilen uygunluk skorları ile puanlandırılmıştır.

Kriterlerin her biri, farklı mekânsal uygunluk düzeylerini temsil eden beş dereceli alt kriterlere ayrılarak standartlaştırılmıştır. Her alt kriter için eşik değerleri ve puanlama mantığı, Karadeniz bölgesine özgü koşullar dikkate alınarak uluslararası açık deniz planlama standartlarıyla uyumlu biçimde geliştirilmiştir.

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz kıyılarında yer almakla birlikte, göçmen kuşların ana göç yolları üzerinde bulunmamaktadır. Bu nedenle, göç yolları kriteri analize dahil edilmemiştir. Bölgenin kuş göçü açısından ikincil öneme sahip olması, modelde dikkate alınan diğer çevresel faktörlerin (ör. korunan alanlar, deniz seviyesi anomalileri) görece daha belirleyici olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, çalışma alanının kuş göç yolları dışında kalması, analizin bütünlüğünü ve geçerliliğini olumsuz yönde etkilememektedir.

Tablo 2, her kriterin dahil edilme gerekçesi ve literatürdeki dayanaklarını özetlerken, Tablo 3 her alt kriterin eşik değerlerini ve skorlamasını ayrıntılı olarak sunmaktadır. Bu yapılandırılmış puanlandırma yaklaşımı, karar sürecinin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini temin ederken, çok kriterli raster modelleme yoluyla oluşturulan CBS tabanlı uygunluk haritasının da temelini oluşturur. Sonuçta elde edilen puanlama matrisi; FAHP ile ağırlıklandırma, EWM ile nesnel ağırlıklandırma ve HQP ile denge odaklı nihai ağırlık optimizasyonu gibi sonraki karar destek süreçlerine girdi olarak kullanılmıştır.

Tablo 2. Veri katmanları

Kriterler	Veri Tipi	Kaynak	Referans
Fay Hatları	Line	(U.S. Geological Survey, 2025)	(Castro-Santos vd., 2020; Tercan vd., 2020; Caceoğlu vd., 2022)
Havalimanı	Point	(OpenStreetMap, 2025)	(Chamanehpour, 2017; Díaz-Cuevas vd., 2018; Castro-Santos vd., 2020; Ospino-Castro vd., 2023; Ali vd., 2024)
Korunan Alanlar	Polygon	(T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Díaz-Cuevas vd., 2018; Kim vd., 2018; Lo vd., 2021; Ospino-Castro vd., 2023)
Limanlar ve Tersaneler	Point	(OpenStreetMap, 2025)	(Kabak & Akalın, 2022; Caceoğlu vd., 2022; Hosseinzadeh vd., 2023; Ospino-Castro vd., 2023; Canat & Özkan, 2024)
Elektrik İletim Hatları	Line	(OpenStreetMap, 2025)	(Díaz-Cuevas vd., 2018; Emeksiz & Demirci, 2019; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021; Caceoğlu vd., 2022)
Kıyıya Uzaklık	Line	(OpenStreetMap, 2025)	(Díaz-Cuevas vd., 2018; Emeksiz & Demirci, 2019)
Deprem Derinliği	Point	(U.S. Geological Survey, 2025)	(Castro-Santos vd., 2020; Tercan vd., 2020; Genç vd., 2021; Caceoğlu vd., 2022; Kabak & Akalın, 2022)
Deprem Büyüklüğü	Point	(U.S. Geological Survey, 2025)	(Castro-Santos vd., 2020; Tercan vd., 2020; Genç vd., 2021; Caceoğlu vd., 2022; Kabak & Akalın, 2022)
Su Derinliği	Raster	(European Commission, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Wu vd., 2016; Emeksiz & Demirci, 2019; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021)
Deniz Seviyesi Anomalisi	Raster	(European Space Agency, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Wu vd., 2016; Emeksiz & Demirci, 2019; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021)
Gemi Yoğunluğu	Raster	(European Commission, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Wu vd., 2016; Chamanehpour, 2017; Díaz-Cuevas vd., 2018; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021; Ali vd., 2024)

Tablo 2'nin devamı

Kriterler	Veri Tipi	Kaynak	Referans
Gemi Rota Yoğunluğu	Raster	(European Commission, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Wu vd., 2016; Chamanehpour, 2017; Díaz-Cuevas vd., 2018; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021; Ali vd., 2024)
Rüzgâr Hızı	Raster	(DTU Wind and Energy Systems, 2025)	(Wu vd., 2016; Ali vd., 2017; Chamanehpour, 2017; Emeksiz & Demirci, 2019; Castro-Santos vd., 2020; Lo vd., 2021)
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	Raster	(DTU Wind and Energy Systems, 2025)	(Fetanat & Khorasaninejad, 2015; Wu vd., 2016; Emeksiz & Demirci, 2019; Castro-Santos vd., 2020)

Tablo 3. Kriterler ve alt kriterler

Kriterler	Alt Kriterler	Puan
Fay Hatları	<10 km	1
	10–15	2
	15–20	3
	20–25	4
	25 <	5
Havalimanı	<5 km	3
	5–15	5
	15–20	4
	20-40	2
	40<	1
Korunan Alanlar	<5 km	1
	5–10	2
	10–15	3
	15-20	4
	20<	5
Limanlar ve Tersaneler	<20 km	5
	20–40	4
	40–60	3
	60-80	2
	80<	1
Elektrik İletim Hatları	<10 km	5
	10–20	4
	20–30	3
	30-40	2
	40<	1
Kıyıya Uzaklık	<5 km	1
	5–10	2
	10–15	3
	15–20	4
	20<	5
Deprem Derinliği	<11.7 km	1
	11.7-14.9	2
	14.9-18.3	3
	18.3-23.1	4
	23.1<	5

Tablo 3'ün devamı

Kriterler	Alt Kriterler	Puan
Deprem Büyüklüğü	<3.5	5
	3.5–3.8	4
	3.8-4.0	3
	4.0-4.2	2
	4.2<	1
Su Derinliği	<-500 m	1
	-500 – -250	2
	-250 – -100	3
	-100 – -50	4
	-50<	5
Deniz Seviyesi Anomalisi	<-0.139 m	5
	-0.139– -0.106	4
	-0.106– -0.070	3
	-0.070– -0.040	2
	-0.040<	1
Gemi Yoğunluğu	<500 km²/yıl	5
	500–1000	4
	1000–2000	3
	2000–3000	2
	3000<	1
Gemi Rota Yoğunluğu	<500 km²/yıl	5
	500 – 1000	4
	1000 –1500	3
	1500 –2000	2
	2000<	1
Rüzgâr Hızı	<4 m /s	1
	4–5	2
	5–5.5	3
	5.5–6	4
	6<	5
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	<180 W/m²	1
	180–250	2
	250–340	3
	340–450	4
	450<	5

4. Uygulama

4.1. FAHP ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi için kullanılan mekânsal karar kriterlerinin göreli önem derecelerini sistematik olarak belirlemek amacıyla FAHP uygulanmıştır. Uzman görüşlerini yansıtan ve karar sürecine belirsizliği entegre eden üçgen bulanık sayılara dayalı yapılandırılmış bir ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur (Ek A).

Her bir kriterin yerel ağırlıkları, bulanık özdeğer problemi çözülerek elde edilmiş ve ortaya çıkan öncelik vektörü normalize edilerek tutarlı ağırlık katsayıları üretilmiştir (Tablo 4). Uzman tabanlı karşılaştırmaların mantıksal tutarlılığını doğrulamak amacıyla bulanık tutarlılık oranı (FCR) hesaplanmıştır. Elde edilen FCR değeri 0.0661 olup, kabul edilebilir eşik olan 0.10'un oldukça altında kalmış ve yargı matrisinin iç tutarlılığını ve güvenilirliğini teyit etmiştir.

Geleneksel AHP yapısına bulanıklık entegrasyonu sayesinde FAHP yöntemi, öznel belirsizliği azaltmış ve çok boyutlu mekânsal faktörlerin daha sağlam bir biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Böylece ağırlıklandırma sürecinin güvenilirliği artırılmış ve sonraki mekânsal karar modelleme adımları için sağlam bir temel sağlanmıştır.

Tablo 4. FAHP ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıklar (Lamda Max Metodu)
Fay Hatları	0.0250
Havalimanı	0.0371
Korunan Alanlar	0.0500
Limanlar ve Tersaneler	0.1444
Elektrik İletim Hatları	0.1173
Kıyıya Uzaklık	0.0884
Deprem Derinliği	0.0250
Deprem Büyüklüğü	0.0250
Su Derinliği	0.0362
Deniz Seviyesi Anomalisi	0.0094
Gemi Yoğunluğu	0.0779
Gemi Rota Yoğunluğu	0.0334
Rüzgâr Hızı	0.1439
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	0.1915

4.2. AHP ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, mekânsal karar kriterlerinin ağırlıklarını belirlemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) uygulanmıştır. AHP, uzman görüşlerine dayalı ikili karşılaştırmalar yoluyla karar kriterlerinin göreli önemlerini sistematik biçimde ortaya koyan bir yöntemdir. Özellikle çok kriterli karar verme süreçlerinde, karar vericilerin deneyim ve önceliklerini hiyerarşik olarak yapılandırarak tutarlı bir karar desteği sağlamasıyla öne çıkar.

Öncelikle, literatürden alınan değerlendirmelere dayanarak kriterlerin birbirine göre göreli önem derecelerini yansıtan ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matris kullanılarak her bir kriterin yerel ağırlıkları hesaplanmış, elde edilen öncelik vektörü normalize edilerek nihai ağırlık katsayıları üretilmiştir (Tablo 5).

İkili karşılaştırma matrisinin mantıksal tutarlılığını doğrulamak için tutarlılık oranı (Consistency Ratio, CR) hesaplanmış ve 0.0510 olarak bulunmuştur. Bu değer, kabul edilebilir eşik olan 0.10'un oldukça altında olup, uzman değerlendirmelerinin tutarlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Böylelikle AHP, uzman temelli öncelikleri şeffaf ve sistematik bir çerçevede değerlendirerek, kriterlerin yalnızca hiyerarşik önemini değil, karar vericilerin yargılarındaki öncelik ilişkilerini de karar sürecine entegre etmiştir. AHP'nin bu şekilde uygulanması, karar verme sürecinde tutarlılığı güvence altına almış ve mekânsal çok kriterli analiz için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Tablo 5. AHP ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıklar
Fay Hatları	0.0221
Havalimanı	0.0315
Korunan Alanlar	0.0411
Limanlar ve Tersaneler	0.1486
Elektrik İletim Hatları	0.1102
Kıyıya Uzaklık	0.0758
Deprem Derinliği	0.0221
Deprem Büyüklüğü	0.0221
Su Derinliği	0.0308
Deniz Seviyesi Anomalisi	0.0126
Gemi Yoğunluğu	0.0673
Gemi Rota Yoğunluğu	0.0291
Rüzgâr Hızı	0.1452
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	0.2414

4.3. EWM ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, mekânsal karar kriterlerinin nesnel ağırlıklarını belirlemek amacıyla EWM uygulanmıştır. EWM, karar kriterlerinin bilgi içeriğine dayalı olarak ağırlıklarını türeten ve uzman öznelliğini minimize eden bir yöntemdir. Özellikle çok kriterli karar verme süreçlerinde, farklı kaynaklardan gelen verilerin varyansını dikkate alarak, her bir kriterin ayırt ediciliğini nesnel biçimde hesaplamasıyla öne çıkar.

Öncelikle, FAHP yöntemiyle elde edilen kesin ağırlık değerleri kullanılarak karar matrisi oluşturulmuştur. Bu sayede EWM, uzman yargılarına dayalı FAHP sonuçları üzerinde çalışarak, belirsizliğin azaltıldığı ve tutarlı hale getirildiği bir veri seti üzerinde nesnel ağırlıklandırma yapmıştır. Daha sonra, bu karar matrisi normalize edilmiş; Shannon entropisi formülasyonu ile her bir kriterin bilgi entropisi değeri hesaplanmış ve kriterlerin ayırt edici gücünü gösteren ayrıntı derecesi (1 − entropi değeri) elde edilmiştir. Bu değerler üzerinden ağırlıklar normalize edilerek nihai nesnel ağırlık katsayıları üretilmiştir (Tablo 6).

Böylelikle EWM, FAHP ile belirlenen uzman temelli öncelikleri dikkate almış, ancak bunun üzerinde, veriye dayalı olarak bilgi içeriğini ölçmüş ve nihai ağırlıkları daha sağlam ve dengeli bir çerçevede üretmiştir. Kriterlerin yalnızca hiyerarşik önemi değil, aynı zamanda verilerindeki ayırt edicilik gücü de değerlendirme sürecine entegre edilmiştir. EWM'nin bu şekilde uygulanması, çok kriterli değerlendirme sürecinde hem karar verme şeffaflığını hem de sonuçların nesnelliğini güçlendirmiş; FAHP ile başlayan karar destek sürecini tamamlayıcı ve dengeleyici bir katmanla zenginleştirmiştir.

Tablo 6. EWM ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıklar
Fay Hatları	0.1152
Havalimanı	0.0873
Korunan Alanlar	0.0849
Limanlar ve Tersaneler	0.0360
Elektrik İletim Hatları	0.0465
Kıyıya Uzaklık	0.0639
Deprem Derinliği	0.1152
Deprem Büyüklüğü	0.1152
Su Derinliği	0.0915
Deniz Seviyesi Anomalisi	0.0409
Gemi Yoğunluğu	0.0655
Gemi Rota Yoğunluğu	0.0833
Rüzgâr Hızı	0.0374
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	0.0169

4.4. HQP ile Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

FAHP, EWM ve AHP yöntemlerinin çıktıları arasında denge sağlamak ve uzlaştırılmış, tutarlı bir kriter ağırlıkları seti elde etmek amacıyla HQP yaklaşımı uygulanmıştır. Bu entegrasyon adımı, uzman görüşlerine dayalı öznel öncelikler ile veriye dayalı nesnel ağırlıklar arasındaki potansiyel uyumsuzlukları minimize ederek, her üç bakış açısını da yansıtan bir çözüm üretmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, belirsizlik altında uzman yargılarını temsil eden FAHP'den elde edilen ağırlık vektörü, kriterlerin bilgi içeriğini nesnel olarak ölçen EWM'den türetilen ağırlık vektörü ve AHP'den elde edilen ağırlık vektörü HQP çerçevesinde üç karşıt eğilimli ancak tamamlayıcı bilgi kaynağı olarak ele alınmıştır. HQP, bu vektörler arasındaki sapmayı azaltmak ve dengeli bir çözüm bulmak için iteratif olarak çözülmüş ve nihai ağırlıklar bir uzlaşma noktası olarak hesaplanmıştır.

Bu yöntemlerin belirsizlik karşısındaki farklı tutumları da karar süreci açısından dikkatle ele alınmalıdır. FAHP yöntemi, bulanık mantık temelli yapısı sayesinde uzman görüşlerinde yer alan muğlaklık ve belirsizlikleri nicel olarak modele entegre edebilirken; AHP ve EWM yöntemleri deterministik yapıları gereği bu tür belirsizlikleri doğrudan modelleyemez. AHP, karar verici tutarlılığını test edebilse de, tercih belirsizliği veya çoklu yargı uyumsuzluğu gibi durumlara duyarlı değildir. EWM ise tamamen verilere dayalı bir yaklaşımla çalıştığından, verideki rastlantısallık veya ölçüm hatalarına duyarsız kalabilir. Bu nedenle, sadece deterministik yöntemlere dayanılarak yapılan analizlerde, karar modelinin belirsizlik karşısındaki dayanıklılığı zayıflayabilir. Ancak bu çalışmada önerilen HQP yaklaşımı, hem belirsizliği dikkate alan hem de deterministik analizlerden gelen bilgiyle dengelenmiş bir çözüm sunarak, yönteme özgü belirsizlik

kaynaklarını minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu yapı, karar sürecinin hem açıklığını hem de güvenilirliğini artıran bütüncül bir entegrasyon stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

HQP optimizasyon problemi, her üç yöntemin katkısını en iyi şekilde temsil eden ağırlık katsayılarını minimize edilmiş hata terimleri ve düzenleme koşulları altında çözerek, hem öznel hem de nesnel önceliklerin bütünleştirilmesini sağlamıştır. Özellikle FAHP, EWM ve AHP ağırlıklarının karekök tabanlı farkları üzerinde kurulan hedef fonksiyon, HQP algoritması aracılığıyla minimize edilerek, nihai ağırlıklar elde edilmiştir (Tablo 7).

HQP yaklaşımı, üç farklı ağırlıklandırma yönteminden elde edilen vektörler arasındaki farkları minimize eden, çok amaçlı bir optimizasyon problemine dayanmaktadır. Bu yöntemde hedef fonksiyon, her bir yöntemin ağırlık vektörü ile elde edilmek istenen nihai ağırlık vektörü arasındaki karekök tabanlı farkların toplamını minimize eder. Optimizasyon süreci, karar matrislerinde yer alan çelişkileri azaltırken, her yöntemin katkı düzeyini uyarlanabilir katsayılar aracılığıyla belirlemeye olanak tanır. Problem, Lagrange çarpanları ve ceza terimi içeren klasik bir ikinci dereceden programlama yaklaşımıyla çözülmektedir. Kullanılan ceza terimi, elde edilen ağırlıkların normalize edilmesini garanti altına alır. Yöntemde hiperparametre olarak ek bir kullanıcı girdisine gerek duyulmaması ve tüm çözümün iteratif olarak yakınsaması, yöntemin uygulama kolaylığı ve kararlılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bunun yanı sıra, HQP yöntemi; geometrik ortalama, aritmetik ortalama veya çoğunluk oyu (voting) gibi yaygın ensemble yaklaşımlarına kıyasla daha esnek ve uyarlanabilir bir çerçeve sunmaktadır. Klasik ensemble tekniklerinde, yöntemler arasındaki güven düzeyi veya katkı ağırlığı sabit varsayılırken, HQP bu katkı katsayılarını optimize ederek her yöntemin bilgi değeri üzerinden dinamik bir biçimde belirlemektedir. Böylece, uzman görüşüne dayalı yöntemlerle veriye dayalı yöntemler arasında ortaya çıkabilecek epistemik çatışmalar, nicel olarak dengelenmiş olur. Bu yapı, sadece birleşik bir çözüm üretmekle kalmaz, aynı zamanda elde edilen çözümün tutarlılığını Trust Level (TL) gibi bir performans göstergesi ile değerlendirme olanağı sunar. HQP bu yönüyle, klasik yöntemsel entegrasyonların ötesine geçerek hem metodolojik hem de hesaplamalı açıdan üstün bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada, FAHP, EWM ve AHP yöntemlerinin nihai katkı katsayıları sırasıyla FAHP: 0.341548, EWM: 0.321151 ve AHP: 0.337301 olarak belirlenmiş, ayrıca yöntemler arasındaki entegrasyonun güvenilirliğini değerlendirmek için hesaplanan Trust Level (TL) değeri ise 17.2943 olarak bulunmuştur. TL değerinin yüksekliği, HQP ile elde edilen nihai ağırlık setinin dengeli ve güvenilir bir yapıda olduğunu göstermektedir.

Bu yöntem sayesinde, nihai ağırlıklar yalnızca uzman yargılarını ve ikili karşılaştırmaları dikkate almakla kalmayıp, aynı zamanda kriterlerin veri tabanlı ayırt edicilik derecelerini de içeren, dengeli ve çatışmasız bir temel oluşturmuştur. Böylelikle çok kriterli mekânsal analiz için şeffaf, güvenilir ve uyumlu bir karar destek mekanizması geliştirilmiştir.

Bu çalışmada birden fazla ağırlıklandırma yönteminin birlikte kullanılmasının temel gerekçesi, çok kriterli karar verme süreçlerinde farklı metodolojik yaklaşımların bütüncül şekilde değerlendirilmesine yöneliktir. FAHP, uzman görüşlerindeki belirsizlik ve muğlaklığı modelleyerek karar sürecine esneklik kazandırırken; AHP, ikili karşılaştırmalar üzerinden tutarlılığı test edilebilir yapı sağlamaktadır. Bu iki öznel yaklaşım birbirini tamamlayıcı niteliktedir. Öte yandan, EWM yöntemi ise kriterlerin bilgi içeriğine dayalı olarak tamamen veriye bağlı nesnel ağırlıklar üretmekte ve uzman önyargılarından bağımsız bir denge unsuru sunmaktadır. Söz konusu yöntemlerin birlikte kullanımı, hem yargı temelli hem de veri temelli karar bileşenlerinin uyumlu şekilde harmanlanmasına olanak sağlamaktadır. HQP algoritması ise bu yöntemler arasında sayısal uyum ve tutarlılık sağlayarak nihai ağırlıkları çatışmasız ve dengeli bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu yapı, karar destek sürecini metodolojik olarak güçlendirirken, çok boyutlu belirsizliklerin yönetilmesinde de önemli avantajlar sunmaktadır.

Tablo 7. HQP ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıklar
Fay Hatları	0.0530
Havalimanı	0.0513
Korunan Alanlar	0.0582
Limanlar ve Tersaneler	0.1110
Elektrik İletim Hatları	0.0922
Kıyıya Uzaklık	0.0763
Deprem Derinliği	0.0530
Deprem Büyüklüğü	0.0530
Su Derinliği	0.0521
Deniz Seviyesi Anomalisi	0.0206
Gemi Yoğunluğu	0.0703
Gemi Rota Yoğunluğu	0.0480
Rüzgâr Hızı	0.1101
Rüzgâr Gücü Yoğunluğu	0.1523

Yöntemsel çeşitliliğin okuyucu nezdinde oluşturabileceği kavramsal karmaşıklığın azaltılması amacıyla, çalışmada kullanılan dört ağırlıklandırma yönteminin metodolojik temelleri, göreli güçlü ve zayıf yönleri ile karar sürecine sağladıkları katkılar sistematik bir biçimde karşılaştırılmıştır (Tablo 8). Sunulan karşılaştırmalı tablo, yöntemler arası tamamlayıcılık ilişkisini ve HQP entegrasyonundaki işlevsel rolleri açıkça ortaya koyarak, okuyucunun analitik çerçevenin bütüncül yapısını daha net kavrayabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, çok kriterli karar verme yaklaşımında izlenen metodolojik strateji yalnızca uygulama düzeyinde değil, aynı zamanda kavramsal düzeyde de şeffaf ve anlaşılır hale getirilmiştir.

Tablo 8. Kullanılan ağırlıklandırma yöntemlerinin karşılaştırmalı özeti

Yöntem	Temel Yaklaşım	Güçlü Yönleri	Sınırlılıkları	Karar Sürecine Katkısı
AHP	Hiyerarşik, öznel	Tutarlılık oranı ile sistematiklik, sezgisel uyum	Belirsizlikleri modellemez	Uzman yargısının yapısal ifadesi
FAHP	Bulanık mantık, öznel	Belirsizlik ve muğlaklığı dikkate alır, esneklik sağlar	Karmaşık hesaplama, yorum farklılıkları olabilir	Belirsizlik altında uzman katkısı
EWM	Veriye dayalı, nesnel	Tamamen ölçülebilir, uzman önyargısından bağımsız	Uzman bilgisi içermez	Bilgi içeriğine göre denge sağlar
HQP	Optimizasyon, hibrit	Öznel ve nesnel yaklaşımları uzlaştırır, güvenilir sonuçlar	Yüksek hesaplama ihtiyacı	Tüm yöntemlerin dengeli birleşimi

Bu hususlara ek olarak bu çalışmada, nihai karar haritası HQP yöntemi ile elde edilmiş olmakla birlikte, AHP, FAHP ve EWM yöntemlerine ait öncül ağırlıklandırma sonuçları da ayrı ayrı sunulmuştur. Bu tercih, yalnızca yöntemlerin bireysel çıktılarının değil, aynı zamanda HQP optimizasyonunun her bir bilgi kaynağından ne ölçüde etkilendiğinin şeffaf biçimde izlenebilmesini amaçlamaktadır. Okuyucunun, yöntemler arası sonuç varyansını değerlendirebilmesi ve nihai uzlaşmanın mantıksal zeminini kavrayabilmesi açısından bu yaklaşım bütüncül bir analitik perspektif sunmaktadır.

Ayrıca, AHP, FAHP ve EWM yöntemlerinden elde edilen ağırlıklandırma sonuçlarının ayrı ayrı sunulmasının temel amacı, HQP algoritmasının nasıl bütünleştirici bir işlev gördüğünü şeffaf şekilde gösterebilmektir. Her bir yönteme ait çıktılar, nihai çözümün oluşumunda rol oynayan bilgi kaynaklarını temsil etmektedir. Bu yöntemlerin karşılaştırmalı görsel ya da sayısal analizleri sunulmamıştır; çünkü çalışmanın amacı bu yöntemleri tekil olarak kıyaslamak değil, HQP optimizasyonu aracılığıyla çatışmasız ve tutarlı bir bileşik ağırlık vektörü elde etmektir. Bu entegrasyonun başarısı, hesaplanan yöntemsel katkı katsayıları ve yüksek Trust Level (17.2943) değeri ile desteklenmiş olup, nihai çözümün denge ve güvenilirlik temelli bir uzlaşıya dayandığı açık biçimde gösterilmiştir.

Ağırlıklandırma sonuçları, FAHP ve AHP yöntemlerinde sismik faktörlerin (Deprem Büyüklüğü, Fay Hatları) görece düşük öncelik aldığı, buna karşın EWM yönteminde bu kriterlerin yüksek bilgi içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Bu farklılık, yöntemlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Uzman görüşlerine dayalı FAHP/AHP uygulamalarında, jeolojik faktörler diğer teknik ve ekonomik kriterlere kıyasla ikincil düzeyde değerlendirilmiş; özellikle Rüzgâr Hızı, Rüzgâr Gücü Yoğunluğu, Limanlar ve Tersaneler gibi doğrudan enerji üretimiyle ilişkili kriterler daha baskın bulunmuştur. Buna karşılık, EWM yönteminde veri varyansının yüksekliği nedeniyle sismik parametreler istatistiksel açıdan daha belirleyici hale gelmiştir. Özellikle Deprem Büyüklüğü ve Fay Hatlarına ilişkin mekânsal verilerin yüksek heterojenlik göstermesi, entropi değerlerini artırarak EWM'de bu kriterlere daha yüksek ağırlık atfedilmesine yol açmıştır. Dolayısıyla, söz konusu farklılık uzman öngörülerinin önceliklendirme mantığı ile jeolojik veri dağılımının nesnel ölçümü arasındaki ayrışmayı yansıtmaktadır. Bu durum, öznel ve nesnel yöntemlerin birlikte kullanılmasının, karar modelinde hem teknik öncelikleri hem de veri tabanlı hassasiyetleri dengeleme açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir.

4.5. Mekânsal Analitik Süreç ve Çok Kriterli Karar Destek Akışı

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm mekânsal analizler, heterojen coğrafi veri setlerinin yönetilmesi ve çok kriterli mekânsal değerlendirmelerin yürütülmesi için güçlü bir platform sunan ArcGIS Pro yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Analitik çalışma akışı, Rize ili kıyı ve denizel alanlarında açık deniz rüzgâr santrali saha seçimine yönelik olarak; raster, vektör (nokta, çizgi, poligon) ve enterpolasyon yüzeyleri dâhil olmak üzere çeşitli veri türlerini kapsayacak şekilde yapılandırılmıştır.

Çalışmada 14 mekânsal kriter değerlendirilmiş olup, bu kriterler çevresel, jeolojik, teknik ve denizcilik boyutlarını içermektedir:

- Vektör tabanlı yakınlık kriterleri: Fay Hatlarına Uzaklık (çizgi), Havalimanına Uzaklık (nokta), Korunan Alanlara Uzaklık (poligon), Limanlar ve Tersanelere Uzaklık (nokta), Elektrik İletim Hatlarına Uzaklık (çizgi) ve Kıyıya Uzaklık (çizgi).
- Raster tabanlı çevresel ve teknik göstergeler: Su Derinliği (Batimetri), Deniz Seviyesi Anomalisi, Gemi Yoğunluğu, Gemi Rota Yoğunluğu, Rüzgâr Hızı ve Rüzgâr Gücü Yoğunluğu.
- Sismik parametreler: Deprem Derinliği ve Deprem Büyüklüğü, 1975–2025 arasındaki sismik olay kayıtlarından türetilmiştir.

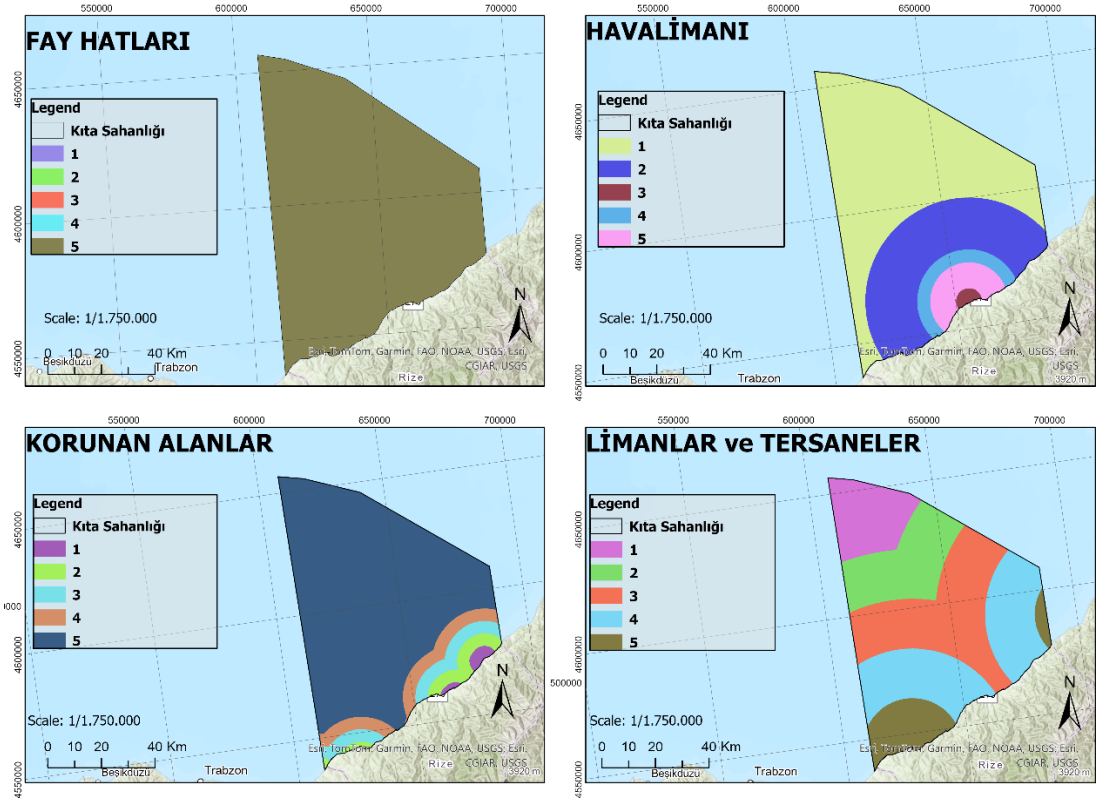
Yakınlık temelli kriterler, öncelikle Öklid Uzaklık (Euclidean Distance) analizleri ile işlenerek mekânsal etki bölgelerini temsil eden sürekli yüzeyler oluşturulmuş ve bu yüzeyler raster formata dönüştürülmüştür. Deprem Derinliği ve Deprem Büyüklüğü gibi sismik parametreler ise, tarihsel sismik kayıtlar kullanılarak Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW) enterpolasyon yöntemiyle sürekli mekânsal dağılım yüzeyleri hâline getirilmiştir.

Tüm raster katmanlar, tutarlı üst üste bindirme işlemleri yapılabilmesi için 30 m × 30 m mekânsal çözünürlükte standardize edilmiştir. Kriterler, alt kriterlerine göre sınıflandırılmış ve uygunluk ölçeğinde 1 (uygunsuz) ile 5 (çok uygun) arasında yeniden sınıflandırılarak karar sürecine dâhil edilmiştir (Tablo 9).

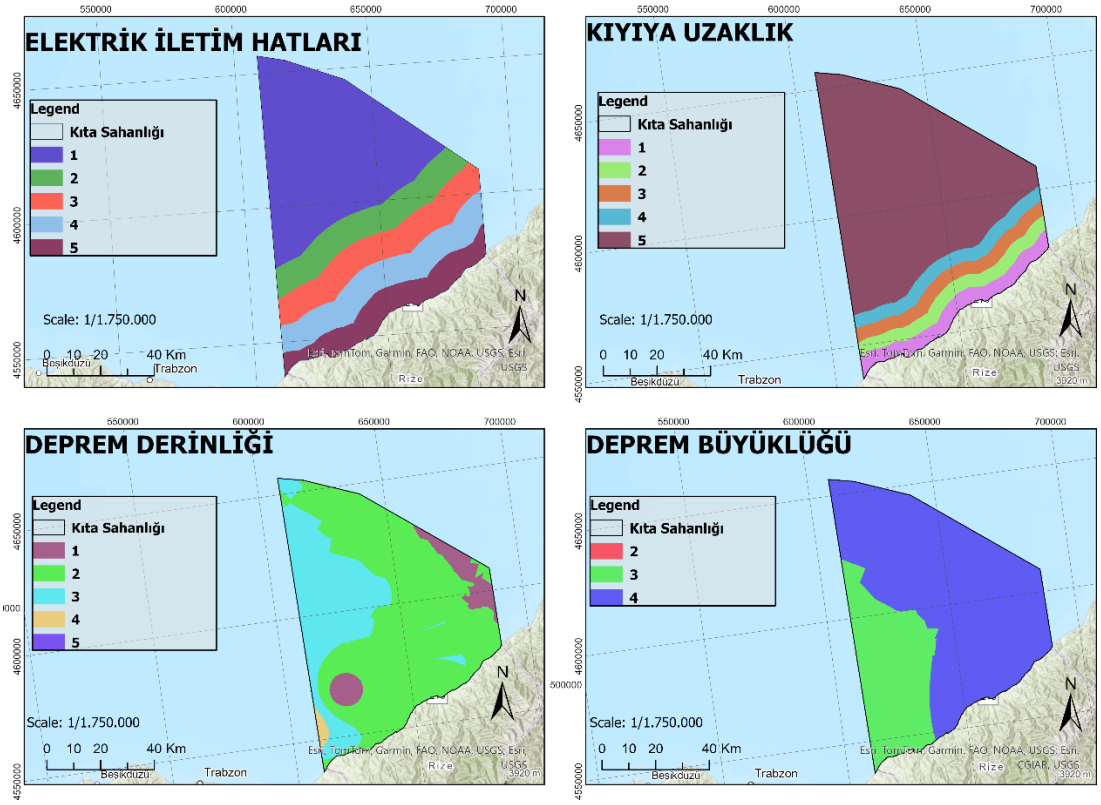
Tablo 9. Alan uygunluk sınıflandırması

Sınıf	Sınıflandırma	Açıklama
1	Çok Düşük Uygunluk	Alan, amaçlanan kullanım için uygun değildir.
2	Düşük Uygunluk	Alan, ciddi sınırlamalarla birlikte genelde uygun değildir.
3	Orta Düzey Uygunluk	Alan, bazı kısıtlamalarla birlikte ortalama potansiyele sahiptir.
4	Yüksek Uygunluk	Alan, yalnızca küçük sınırlamalarla birlikte uygundur.
5	Çok Yüksek Uygunluk	Alan, son derece uygun ve ideal koşullara sahiptir.

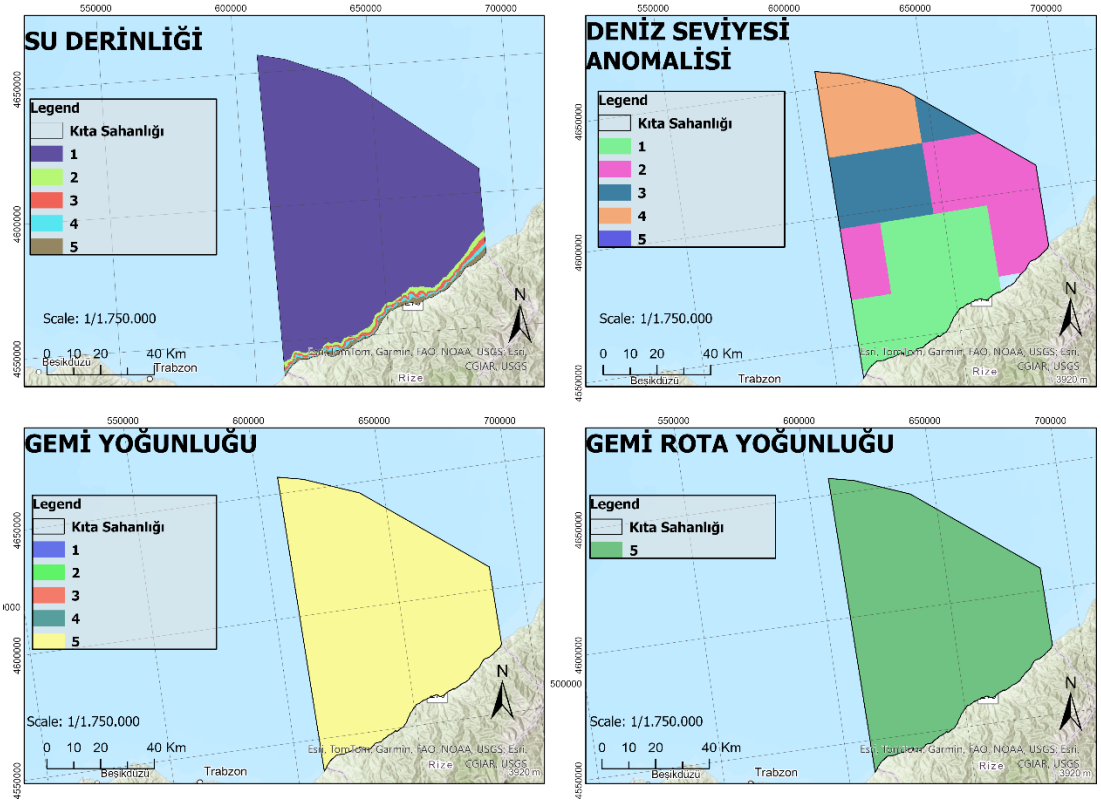
Raster veri setleri, ArcGIS Pro'nun Spatial Analyst ve 3D Analyst eklentileriyle üretilmiş (Şekil 2-5) ve ağırlıklı üst üste bindirme işlemleri sonucunda nihai ağırlık setine (Tablo 7) dayalı olarak bileşik bir mekânsal uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 6). Nihai ağırlık seti, FAHP, AHP ve EWM yöntemlerinden elde edilen ağırlıkların HQP yöntemi aracılığıyla uzlaştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu sistematik ve çok katmanlı analitik akış, karar vericilere şeffaf, bilimsel olarak savunulabilir ve tekrarlanabilir bir saha seçimi desteği sağlayan bir uygunluk haritası sunmuştur.



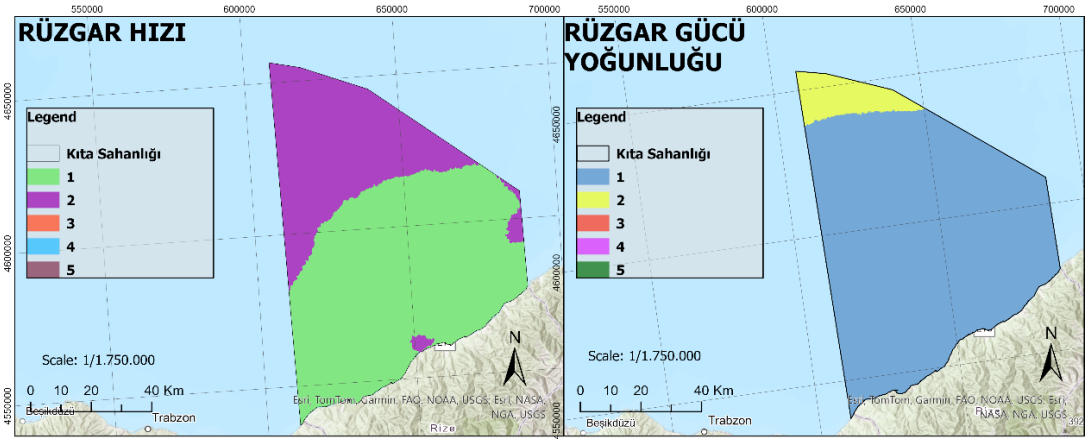
Şekil 2. Kriterler (1-4)



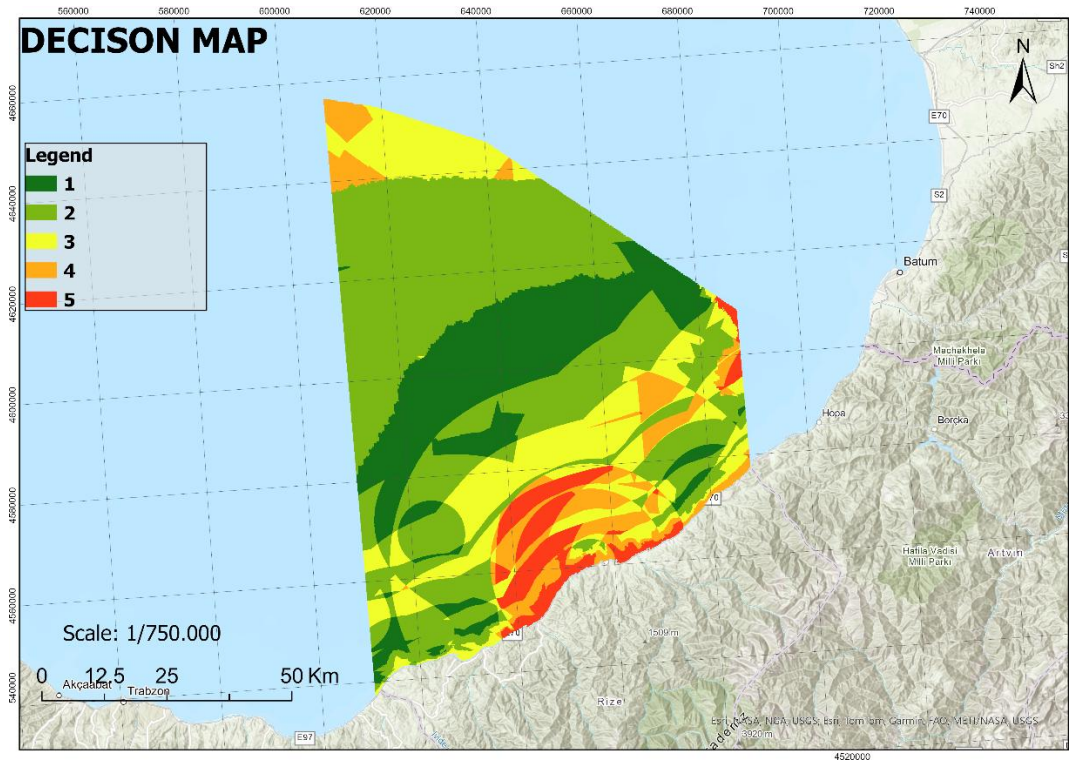
Şekil 3. Kriterler (5-8)



Şekil 4. Kriterler (9-12)



Şekil 5. Kriterler (13-14)



Şekil 6. Karar haritası

5. Bulgular

5.1. FAHP, EWM ve HQP Yaklaşımlarıyla Entegre Saha Seçimi Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, Rize açıklarında açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi için FAHP, AHP, EWM ve HQP yöntemlerinin bütüncül bir çerçevede uygulanması, karar destek sürecinin sağlamlığını, şeffaflığını ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Her bir yöntem, karar verme çerçevesine kendine özgü katkılarda bulunarak farklı yönleri aydınlatmış ve analitik yaklaşımı zenginleştirmiştir.

FAHP yöntemi, belirsizlik ve muğlaklık koşullarında uzman görüşlerini sistematik olarak sayısallaştırarak karar sürecine entegre etmiştir. Üçgen bulanık sayılara dayalı olarak oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi ile kriter ağırlıkları hesaplanmış ve ortaya çıkan bulanık tutarlılık oranı (FCR) değeri 0.0661 bulunmuştur. Bu değer, kabul edilebilir eşik olan 0.10'un oldukça altında kalarak uzman yargılarının tutarlılığını ve güvenilirliğini teyit etmiştir.

FAHP sonucunda en yüksek ağırlığa sahip kriterler sırasıyla Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (0.1915), Limanlar ve Tersaneler (0.1444), Rüzgâr Hızı (0.1439) ve Elektrik İletim Hatları (0.1173) olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, saha seçiminin teknik ve lojistik bileşenlerinin belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır (Tablo 4).

AHP yöntemi de karar vericilerin önceliklerini hiyerarşik bir yapı içerisinde değerlendirerek, tutarlılık oranı (CR) 0.0510 olarak elde edilmiş ve bu değer de güvenilir ve tutarlı bir uzman yargısı seti sağlandığını göstermiştir.

AHP sonuçları, FAHP'ye benzer biçimde teknik ve lojistik faktörlerin ön plana çıktığını göstermiştir. Özellikle Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (0.2414), Limanlar ve Tersaneler (0.1486) ve Rüzgâr Hızı (0.1452) en yüksek ağırlıklara sahip kriterler olarak belirlenmiştir. AHP'nin çıktıları, FAHP'ye kıyasla Rüzgâr Gücü Yoğunluğu kriterine daha yüksek önem atfetmiş ve bu bulgu, enerji üretim kapasitesinin saha seçimindeki temel belirleyici olduğunu bir kez daha doğrulamıştır (Tablo 5).

EWM yöntemi ise verinin bilgi içeriğine dayanarak nesnel ağırlıklar üretmiş ve uzman öznelliğini minimize etmiştir. FAHP'den elde edilen kesin değerler üzerinden oluşturulan karar matrisi üzerinde, Shannon entropisi kullanılarak kriterlerin bilgi entropileri hesaplanmış ve nesnel ağırlık katsayıları türetilmiştir.

EWM sonuçları, Fay Hatları (0.1152), Deprem Derinliği (0.1152) ve Deprem Büyüklüğü (0.1152) gibi sismik kriterlerin öne çıktığını göstermiştir. Bu durum, Karadeniz kıyısındaki jeolojik risklerin nesnel olarak önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, Rüzgâr Gücü Yoğunluğu (0.0169) gibi teknik kriterlerin EWM'de daha düşük ağırlıklara sahip olması, yöntemin verinin dağılımına dayalı yapısının teknik kriterlerin daha öngörülebilir olmasından kaynaklandığını düşündürmektedir (Tablo 6).

FAHP, AHP ve EWM yöntemlerinden elde edilen ağırlıklar arasında uyum sağlamak ve uzlaştırılmış bir kriter ağırlıkları seti oluşturmak amacıyla HQP yaklaşımı uygulanmıştır. HQP optimizasyonu sonucunda yöntemlerin katkı katsayıları sırasıyla FAHP: 0.341548, EWM: 0.321151, AHP: 0.337301 olarak hesaplanmıştır. Bu dağılım, FAHP ve AHP yöntemlerinin öznelliği ve tutarlılığı ile EWM'nin nesnelliği arasında dengeli bir çözüm sağlandığını göstermektedir. Ayrıca yöntemler arasındaki entegrasyonun güvenilirliğini ölçmek için hesaplanan Trust Level (TL) değeri 17.2943 olarak bulunmuştur; bu yüksek değer, uzlaştırılmış ağırlık setinin dengeli ve güvenilir bir yapıda olduğunu teyit etmektedir.

HQP ile elde edilen nihai ağırlıklar, teknik ve lojistik kriterlerin (örneğin Rüzgâr Gücü Yoğunluğu: 0.1523, Limanlar ve Tersaneler: 0.1110, Rüzgâr Hızı: 0.1101) belirleyici olduğunu, ancak sismik ve çevresel faktörlerin de makul düzeyde dikkate alındığını göstermiştir (Tablo 7). Böylece, hem öznel hem de nesnel bilgi kaynakları dengelenmiş ve karar sürecinde çatışmasız, bütüncül bir temel oluşturulmuştur.

5.2. Açık Deniz Rüzgâr Santrali Saha Seçimini Etkileyen Kriterlerin Bütüncül Analizi

Açık deniz rüzgâr santrali saha seçimine ilişkin kriterlerin bütüncül ve titiz bir biçimde değerlendirilmesi, yenilenebilir enerji projelerinin sürdürülebilirliği, operasyonel etkinliği ve ekonomik fizibilitesinin temini açısından asli bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, FAHP, AHP, EWM ve HQP yöntemlerinin entegre biçimde uygulanmasıyla gerçekleştirilen analizler, çok boyutlu karar kriterlerinin göreli ağırlıkları ile aralarındaki etkileşimler hakkında kapsamlı ve derinlemesine bulgular sunmuştur. Elde edilen sonuçlar ve bunların stratejik yansımaları aşağıda sistematik olarak sunulmaktadır.

- Rüzgâr Gücü Yoğunluğu, tüm yöntemlerde en yüksek önceliğe sahip kriter olarak öne çıkmıştır. FAHP (0.1915), AHP (0.2414), EWM (0.0169) ve HQP (0.1523) ağırlıkları, bu kriterin enerji üretim kapasitesi ve teknik performans açısından merkezi bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle HQP'nin sağladığı dengeli ağırlıklandırma, hem uzman yargılarını hem de veri temelli ölçümleri bu kriter üzerinde birleştirmiştir.
- Rüzgâr Hızı, enerji üretim potansiyelinin sürekliliği ve yeterliliği bakımından yüksek öncelikli bir diğer teknik kriter olarak değerlendirilmiştir (FAHP: 0.1439, AHP: 0.1452, EWM: 0.0374, HQP: 0.1101).
- Limanlar ve Tersanelere Uzaklık, lojistik destek ve bakım-onarım olanakları açısından stratejik öneme sahip olup, dengeli bir biçimde yüksek önceliklendirilmiştir (FAHP: 0.1444, AHP: 0.1486, EWM: 0.0360, HQP: 0.1110).
- Elektrik İletim Hatlarına Uzaklık, iletim verimliliği ve altyapı maliyetlerini azaltma açısından orta düzeyde bir öncelik taşımaktadır (FAHP: 0.1173, AHP: 0.1102, EWM: 0.0465, HQP: 0.0922).
- Kıyıya Uzaklık, hem görsel-etkisel boyutlar hem de operasyonel erişilebilirlik açısından dikkate değer bulunmuş ve orta-yüksek öneme sahip olmuştur (FAHP: 0.0884, AHP: 0.0758, EWM: 0.0639, HQP: 0.0763).
- Sismik Kriterler (Fay Hatları, Deprem Derinliği, Deprem Büyüklüğü), EWM sonuçlarında yüksek önceliklendirilmiş (her biri 0.1152) olmasına karşın, FAHP, AHP ve HQP'de daha düşük (HQP'de ~0.0530) ağırlıklarla değerlendirilmiştir. Bu durum, uzman yargılarının mühendislik çözümleri ile sismik risklerin yönetilebilir olduğunu öngördüğünü, verinin ise jeolojik değişkenliğe duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.
- Su Derinliği (Batimetri), yapısal uygunluk ve inşaat karmaşıklığı üzerinde doğrudan etkili olan bir kriter olarak tüm yöntemlerde orta-düşük düzeyde ağırlıklandırılmıştır (FAHP: 0.0362, AHP: 0.0308, EWM: 0.0915, HQP: 0.0521). EWM'de nispeten daha yüksek görünmesi, verinin dağılımından kaynaklanmakta olup; HQP'de elde edilen dengeli ağırlık, su derinliği faktörünün teknik açıdan dikkate alınmakla birlikte belirleyici bir unsur olmadığını göstermektedir.

- Gemi Yoğunluğu ve Gemi Rota Yoğunluğu, denizcilik güvenliği açısından operasyonel planlamada önem arz etmekle birlikte, düşük–orta ağırlıklarla değerlendirilmiştir (HQP: 0.0703 ve 0.0480).
- Korunan Alanlar ve Deniz Seviyesi Anomalisi, çevresel sürdürülebilirlik bakımından anlamlı olmakla birlikte, karar sürecinde ikincil önemde görülmüştür. Özellikle Deniz Seviyesi Anomalisi, HQP'de 0.0206 ile en düşük öncelikli kriterlerden biri olarak yer almıştır.
- Havalimanına Uzaklık, ikincil bir operasyonel faktör olarak düşük önceliklendirilmiştir (HQP: 0.0513).

Bu kapsamlı analiz, saha seçiminin merkezine teknik ve operasyonel etkinlik kriterlerinin yerleştiğini; bununla birlikte çevresel koruma, denizcilik güvenliği ve jeolojik istikrarın da dengeli biçimde dikkate alındığını göstermektedir. FAHP ve AHP sonuçları teknik ve lojistik önceliklere güçlü vurgu yaparken; EWM, özellikle sismik ve çevresel risklere dikkat çekmiş; HQP ise bu üç yöntemi uzlaştırarak çatışmasız, dengeli ve güvenilir bir ağırlıklandırma sunmuştur.

5.3. Karar Haritasının Yorumlanması ve Mekânsal Uygunluk Analizinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada geliştirilen karar haritası, Rize ili kıta sahanlığı içerisindeki açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi için mekânsal uygunluk değerlendirmelerini görselleştirmiş ve çalışmanın en önemli çıktılarından birini oluşturmuştur. Karar haritası, çalışma alanını 1'den 5'e kadar olan uygunluk sınıflarına ayırmış ve her sınıfın toplam alan içindeki oransal dağılımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. HQP değerlendirmesine dayalı uygunluk sınıflarının mekânsal dağılımı

Sınıf	Yüzde (%)
1	20.44
2	47.14
3	18.96
4	8.44
5	5.01

Tablo 9, Rize kıyılarında yaklaşık %13,5'lik bir alanın (Sınıf 4 ve 5 toplamı) yüksek ve çok yüksek uygunluk düzeyinde olduğunu, %47,14'lük alanın ise sınıf 2'de, yani düşük–orta uygunlukta olduğunu ortaya koymaktadır. Harita üzerinde en uygun alanların (Sınıf 5: kırmızı, Sınıf 4: turuncu) daha çok güneydoğu kıyı şeridinde ve kıyıya yakın bazı bantlarda kümelendiği görülmektedir. Bu bölgeler, yüksek rüzgâr potansiyeli, uygun su derinliği, liman ve iletim altyapısına yakınlık gibi avantajlarla öne çıkmaktadır.

Şekil 6'da görülen mekânsal dağılım, farklı kriterlerin ağırlıklandırılarak üst üste bindirilmesi sonucu ortaya çıkan bütüncül etkiyi yansıtmaktadır. Özellikle Rize Merkez, Pazar ve Çayeli açıklarında yüksek uygunluk değerlerinin yoğunlaşması; rüzgâr gücü yoğunluğu, su derinliği ve altyapıya yakınlık kriterlerinin mekânsal örtüşmesinin doğrudan bir sonucudur. Bu durum, kriterlerin birlikte değerlendirilmesinin karar modeline kattığı ayırt edici katkıyı örnek bölgeler üzerinden görünür kılmaktadır.

Toplam alanın yaklaşık %13,45'ini oluşturan sınıf 4-5, optimal teknik, çevresel ve lojistik koşulları bir arada sağlamaktadır. Özellikle Rize Merkez ve güneydoğusundan Pazar ilçesi açıklarına kadar uzanan alanlarda yüksek uygunluk gözlenmiştir. Bu bölgeler, yüksek rüzgâr gücü yoğunluğu ve hıza sahip, altyapıya erişilebilir ve ekolojik açıdan daha az hassas alanlardır.

Örneğin, Pazar açıklarında yüksek uygunluk değerleri; özellikle Havalimanı, Limanlar ve Tersaneler, Elektrik İletim Hatları, Deprem Büyüklüğü ve Fay Hatları kriterlerinin mekânsal örtüşmesinden kaynaklanmıştır. Buna karşılık, Çayeli açıklarında yüksek uygunluk düzeyinin oluşmasında Deprem Büyüklüğü, Elektrik İletim Hatları, Korunan Alanlar, Limanlar ve Tersaneler, Havalimanı ve Fay Hatları kriterleri baskın rol oynamıştır. Bu bulgu, farklı örnek bölgelerde yüksek uygunluk alanlarının tek bir kritere değil, bölgesel ölçekte değişen çoklu faktörlerin etkileşimine dayalı olarak şekillendiğini göstermektedir.

En geniş alanı oluşturan (%47,14) sınıf 2, önemli kısıtlamalarla karşılaşan ancak tamamen elverişsiz olmayan bölgeleri temsil etmektedir. Karar vericiler, bu alanlarda proje geliştirmeyi düşünürken kapsamlı risk analizleri ve iyileştirici stratejiler planlamak durumundadır.

Toplam alanın yaklaşık %20,44'ünü oluşturan sınıf 1, derin deniz morfolojisi, altyapılara uzaklık ve özellikle rüzgâr potansiyelinin az olması gibi nedenlerle açık deniz rüzgâr santrallerinin kurulumu ve geliştirme açısından olumsuz özellikler taşımaktadır. Özellikle kuzeyde kıta sahanlığının orta kısımlarında ve bazı kıyıya çok yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır.

Karar haritasının Rize ili kıta sahanlığı üzerindeki mekânsal dağılımı, yüksek ve çok yüksek uygunluk sınıflarının özellikle Rize Merkez ve güneydoğu ilçeleri (Pazar, Çayeli açıkları) yönünde odaklandığını, düşük uygunluk alanlarının ise

kıyıya yakın koruma bölgeleri ve kuzeyde daha baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, proje planlamasında hem kıyıya yakınlık ve erişilebilirliği hem de çevresel kısıtları dikkate alan bir dengeleme stratejisinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Sonuç olarak, karar haritası, Rize ili açıklarında yaklaşık %13,5 oranında yüksek potansiyele sahip alanın mevcut olduğunu ortaya koymakta; kalan alanların ise çeşitli kısıtlarla karşı karşıya olduğunu göstermektedir.

Uygunluk haritasında yüksek skor alan bölgeler yalnızca mekânsal avantajlarıyla değil, aynı zamanda mühendislik ve yatırım uygulanabilirliği açısından da dikkate değer nitelikler taşımaktadır. Örneğin, Pazar ve Çayeli açıklarında belirlenen yüksek uygunluk alanları, limanlar, tersaneler ve elektrik iletim hatlarına yakınlık sayesinde altyapı kurulum maliyetlerini azaltıcı bir potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, bu bölgelerdeki su derinlikleri yüzer platform teknolojileri için elverişli olup, güncel uluslararası uygulamalarla uyumlu bir geliştirme olanağı sağlamaktadır. Sismik risklerin görece düşük seviyede olduğu kesimlerde deprem büyüklüğü ve fay hatlarının etkisi sınırlı kalırken, korunan alanlardan uzak bölgeler ekolojik kısıtların daha az belirleyici olduğu yatırım alanlarını işaret etmektedir. Dolayısıyla, yüksek uygunluk skoruna sahip bölgeler mühendislik altyapısı, maliyet etkinliği ve uzun vadeli uygulanabilirlik açısından da güçlü yatırım potansiyeli taşımaktadır.

Çalışma alanının kıta sahanlığı içindeki konumu dikkate alındığında, önerilen açık deniz rüzgâr santrali sahalarının balıkçılık, turizm ve rekreasyonel yüzme faaliyetleri üzerindeki potansiyel etkileri sınırlı düzeydedir. Rize kıyılarındaki balıkçılık faaliyetleri ağırlıklı olarak kıyıya yakın bölgelerde ve küçük ölçekli teknelerle gerçekleştirildiğinden, santrallerin kurulması öngörülen yüksek uygunluk alanları bu faaliyetlerle mekânsal olarak büyük ölçüde çakışmamaktadır. Benzer şekilde, kıyıya çok yakın yüzme ve rekreasyon alanları turizm açısından öncelikli kullanım bölgeleri olup, bu alanlar çalışma kapsamında düşük uygunluk sınıflarında yer aldığı için planlamada dışlanmıştır. Dolayısıyla, karar modelinin öne çıkardığı yüksek uygunluk bölgeleri, turizm ve yüzme faaliyetlerinden mekânsal olarak ayrışmış; balıkçılıkla olan etkileşim potansiyeli ise sınırlı kalmıştır. Bu durum, seçilen sahaların yalnızca teknik ve çevresel değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik sürdürülebilirlik açısından da daha uyumlu alanlar olduğunu göstermektedir.

Çalışmada belirlenen düşük rüzgâr rejiminin enerji çıktıları üzerindeki etkisini daha somut biçimde gösterebilmek amacıyla, tipik türbin kapasiteleri üzerinden basit bir senaryo analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, 5 MW'lık bir türbin için kapasite faktörünün %15–20 aralığında gerçekleşmesi durumunda yıllık enerji üretimi yaklaşık 6,600–8,800 MWh düzeyinde olmaktadır. 10 MW'lık türbinlerde bu değer 13,000–17,500 MWh, 15 MW'lık türbinlerde ise 19,700–26,300 MWh aralığında hesaplanmaktadır. Bu senaryo analizi, düşük rüzgâr hızlarının enerji çıktısını sınırlandırmakla birlikte, büyük ölçekli türbinlerin ve yüzer platform teknolojilerinin uygulanmasının saha uygunluğunu artırabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, Rize kıta sahanlığındaki düşük rüzgâr rejimi mutlak bir kısıt oluşturmamakta; uygun türbin teknolojisi ve kapasite faktörü varsayımları ile ekonomik ölçekte enerji üretimi mümkün olabilmektedir.

Modelin geçerliliğini desteklemek amacıyla, yüksek uygunluk düzeyinde tanımlanan bölgeler Türkiye'deki mevcut rüzgâr enerji yatırımları ve kamuya açık veri kaynaklarıyla karşılaştırılmıştır. Ancak TEİAŞ ve EPDK tarafından yayımlanmış lisanslı offshore rüzgâr projeleri veya Karadeniz açıklarında aktif rüzgâr ölçüm istasyonlarına ilişkin kamuya açık, konumsal bir veri bulunmamaktadır. Bununla birlikte, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2021 yılında açıklanan Türkiye Açık Deniz Rüzgâr Enerjisi Yol Haritası kapsamında Karadeniz'de offshore yatırımlarına yönelik stratejik hedefler tanımlanmış ve bölgenin uzun vadeli yatırım alanı olarak değerlendirildiği bildirilmiştir. Çalışmamızda modelin yüksek uygunluk verdiği bölgeler, bu stratejik öncelikler ve bölgesel rüzgâr potansiyeli analizleriyle tutarlılık göstermektedir. Bu durum, geliştirilen mekânsal karar destek modelinin geçerlik düzeyini kurumsal planlama eğilimleri ve potansiyel yatırım ilgisiyle uyumlu biçimde ortaya koymaktadır.

6. Tartışma

Bu çalışmada, Rize ili kıta sahanlığı içerisinde açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi için önerilen FAHP, AHP, EWM ve HQP tabanlı mekânsal karar destek çerçevesi; literatürde yer alan yöntemsel eksikliklere yanıt vermesi, hem öznel uzman yargılarını hem de nesnel veri temelli ölçütleri dengeli biçimde bütünleştirmesi açısından dikkat çekici sonuçlar ortaya koymuştur. Tartışma bölümünde elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut bilgiler ışığında yorumlanmış ve metodolojik katkıları, pratik uygulamalara yönelik çıkarımları ve potansiyel sınırlılıkları ele alınmıştır

6.1. Yöntemsel Katkılar

Çalışmada kullanılan ÇKKV yöntemlerinin entegre edilmesi, özellikle FAHP ve EWM'nin HQP ile uzlaştırılması, saha seçiminde daha dengeli ve çatışmasız bir ağırlıklandırma sağlamıştır. Literatürde pek çok çalışma ya yalnızca uzman yargılarına dayalı öznel yöntemlerle (örn. AHP, FAHP) (Jadoon vd., 2020) ya da yalnızca veri dağılımına dayalı nesnel yöntemlerle (örn. EWM) (Zhu vd., 2020) saha seçimi yapmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, tek başına kullanıldığında önemli bir metodolojik eksiklik olan karar desteğinde önyargı ve dengesizlik riskini beraberinde getirmektedir.

HQP yöntemi ile sağlanan uzlaştırma; farklı bilgi kaynaklarının, yani öznel ve nesnel değerlendirmelerin, karar sürecine eşit ve optimal katkıda bulunmasını sağlamış; FAHP (0.3415), EWM (0.3211) ve AHP (0.3373) katkı katsayılarının dengeli dağılımı ve yüksek Trust Level değeri (17.2943) bunun açık bir göstergesi olmuştur. Bu bulgu, (Luthra vd., 2017; Başeğmez, 2025a; Basegmez & Aydin, 2025) gibi çalışmaların öngördüğü hibrit yaklaşımın etkinliğini doğrulamaktadır.

6.2. Karar Kriterlerinin Öncelikleri ve Anlamı

Elde edilen sonuçlar, teknik ve lojistik kriterlerin (ör. rüzgâr gücü yoğunluğu, limanlara uzaklık, rüzgâr hızı) yüksek önceliğe sahip olduğunu, çevresel ve sismik kriterlerin ise dikkate değer ancak ikincil düzeyde etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle rüzgâr gücü yoğunluğu kriterinin tüm yöntemlerde en yüksek önceliği alması, açık deniz rüzgâr enerji potansiyelinin sürdürülebilir ve verimli kullanımı için temel belirleyici olduğunu bir kez daha teyit etmektedir (Büyüközkan vd., 2018; Lerch vd., 2018).

EWM'de sismik kriterlerin öne çıkması, verinin dağılımının jeolojik çeşitlilikten etkilendiğini göstermektedir. Buna karşın FAHP ve AHP'de daha düşük ağırlıklar, mühendislik çözümleri sayesinde sismik risklerin yönetilebilir olduğuna ilişkin uzman görüşlerinin hâkim olduğunu düşündürmektedir. Bu durum, Hosseinzadeh vd. (2023) ve Maslov vd. (2017) tarafından vurgulanan jeolojik risklerin projelendirme sürecinde mutlaka dikkate alınması gerektiği ama üstesinden gelinebilir olduğu görüşünü desteklemektedir.

6.3. Mekânsal Bulgular ve Politik Çıkarımlar

Karar haritasının ortaya koyduğu mekânsal uygunluk dağılımı, Rize ili kıta sahanlığında yaklaşık %13,5'lik bir alanın yüksek ve çok yüksek uygunluk düzeyinde olduğunu göstermektedir. Bu oran, literatürde Avrupa kıyılarındaki (%15–20) potansiyel oranlarıyla karşılaştırıldığında, Rize'nin de anlamlı bir offshore rüzgâr kapasitesine sahip olabileceğini düşündürmektedir (Castro-Santos vd., 2020; International Renewable Energy Agency, 2020).

En uygun bölgelerin, güneydoğu kıyı şeridinde (özellikle Pazar ve Çayeli açıkları) kümelenmiş olması; liman ve enerji altyapısına yakınlık, çevresel elverişlilik ve bazı teknik avantajlarla ilişkilendirilebilir. Buna karşın kuzeyde ve kıyıya daha yakın alanlarda uygunluğun azalması, koruma bölgeleri, teknik altyapıya uzaklık, su derinliği ve düşük rüzgâr profili gibi kısıtlamalardan kaynaklanmaktadır. Ancak, elde edilen sonuçlar dikkatle yorumlanmalıdır. Her ne kadar uygunluk haritasında belirli alanlar teknik, çevresel ve lojistik açılardan "yüksek" olarak sınıflandırılmış olsa da, bölgenin rüzgâr hızı ve rüzgâr gücü yoğunluğu bakımından mutlak anlamda yüksek potansiyele sahip olmadığı görülmektedir. Özellikle elde edilen ortalama rüzgâr hızlarının 2–5 m/sn aralığında kaldığı dikkate alındığında, Rize'nin rüzgâr rejimi, Avrupa'daki açık deniz projelerinde yaygın olarak görülen ≥6 m/sn'lik hızlarla kıyaslandığında belirgin şekilde düşüktür.

Bu durum, saha seçiminde yüksek uygunluk alanlarının aslında göreceli olarak diğer alanlara göre optimal, ancak uluslararası standartlara göre sınırlı bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, karar haritasında "çok yüksek uygunluk" olarak sınıflandırılan alanlar, bölgenin mevcut bağlamı içinde görece avantajlıdır; fakat mutlak anlamda yüksek enerji üretimi kapasitesi beklemek gerçekçi olmayabilir.

Dolayısıyla bu bulgu, açık deniz rüzgâr santrali planlamasında iki önemli çıkarım sunmaktadır: Birincisi, saha seçiminde yalnızca teknik uygunluk değil, aynı zamanda ekonomik fizibilite ve enerji verimliliği açısından da bütüncül bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. İkincisi ise, bölgede rüzgâr rejiminin daha fazla yaralanabilmek için ileri teknolojili türbinler (düşük rüzgâr hızlarına uygun modeller) ve hibrit enerji çözümleri (ör. dalga enerjisiyle entegrasyon) gibi stratejilerin araştırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen karar haritası, Rize kıta sahanlığı içinde açık deniz rüzgâr projeleri için kısmen uygun alanları belirlemiş, ancak rüzgâr rejiminin düşük olması nedeniyle bölgenin mutlak potansiyelinin sınırlı olduğunu da ortaya koymuştur. Bu durum, planlamada teknik, çevresel ve lojistik avantajların yanı sıra enerji üretim verimliliğinin de titizlikle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

6.4. Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

Her ne kadar bu çalışma metodolojik olarak özgün ve kapsamlı bir çerçeve sunmuş olsa da, bazı sınırlılıkları göz ardı etmemek gerekir. Öncelikle, bazı kriterlerin (örn. deniz ekosistemine etkiler, türbülans yoğunluğu) daha detaylı veri eksikliği nedeniyle doğrudan analiz edilememesi, karar haritasında daha ince ölçekli bir duyarlılık değerlendirmesi yapılmasını engellemiştir. Ayrıca, uzman görüşlerinin sayısı ve çeşitliliği artırılarak, öznellikten kaynaklanabilecek etkiler daha da azaltılabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar; mevsimsel rüzgâr değişkenliklerini, deniz ekosistemine uzun vadeli etkileri ve deniz trafiği ile daha yüksek çözünürlüklü etkileşimleri modelleyerek, saha seçimini daha da rafine edebilir. Ayrıca, farklı iklim senaryoları altında uygunluk değişimlerinin analiz edilmesi, karar vericilere daha esnek ve ileriye dönük stratejiler geliştirme imkânı sunacaktır.

6.5. Bulguların politika ve uygulama için önemi

Bu çalışmada geliştirilen bütünleşik metodolojik çerçeve ve elde edilen mekânsal bulgular, yalnızca Rize ili için değil, Türkiye'nin diğer kıyı bölgelerinde de uygulanabilir niteliktedir. Özellikle FAHP, AHP ve EWM yöntemlerinden elde edilen ağırlıkların HQP ile uzlaştırılması ve CBS üzerinde görselleştirilmesi, karar destek sürecine şeffaf, bilimsel temelli ve tekrarlanabilir bir yapı kazandırmıştır.

Elde edilen sonuçlar, karar vericiler ve politika yapıcılar için güvenilir bir planlama aracı sunarken, uygunluk haritaları yatırımcılar açısından da somut bir yol haritası oluşturmaktadır. Özellikle belirlenen %13,5'lik yüksek ve çok yüksek uygunluk alanı, kısa ve orta vadede stratejik olarak önceliklendirilebilecek bölgelerin açıkça ortaya konulmasını sağlamıştır. Bu durum, Türkiye'nin enerji planlamasında kaynakların verimli tahsisi açısından önemli bir katkıdır.

Bununla birlikte, bulgular rüzgâr rejiminin bölgesel sınırlılıklarını da ortaya koymuştur. Rize kıta sahanlığı üzerinde ortalama rüzgâr hızlarının 2–5 m/sn düzeyinde seyretmesi, Avrupa'daki yüksek kapasiteli projelere kıyasla daha düşük bir enerji üretim potansiyeline işaret etmektedir. Bu bağlamda, karar haritasında "çok yüksek uygunluk" olarak belirlenen alanlar göreceli olarak avantajlı olmakla birlikte, bölgesel bağlamda enerji verimliliği açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

Literatürdeki birçok çalışmada (Büyüközkan vd., 2018; Aldersey-Williams vd., 2019; Emeksiz & Demirci, 2019) ağırlıklı olarak rüzgâr potansiyeline odaklanılırken, bu çalışmada bölgesel bağlamdaki düşük rüzgâr hızlarına rağmen uygun alanların belirlenmesi ve diğer çevresel, lojistik, jeolojik ve teknik kriterlerle dengelenerek değerlendirilmesi, metodolojik bir yenilik olarak literatürdeki boşlukları doldurmaktadır. Ayrıca, literatürde yaygın olan tek yöntemli ağırlıklandırmalar yerine (yalnızca AHP veya EWM), üçlü bir metodolojik yaklaşımın (FAHP, AHP, EWM + HQP) kullanılması ve uzlaştırılması, daha sağlam ve kapsayıcı bir karar destek mekanizması sunmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma; karar vericilerin bölgesel bağlama uygun, dengeli ve sürdürülebilir planlamalar yapabilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle düşük rüzgâr hızlarına sahip bölgelerde dahi, uygun alanların belirlenmesi ve alternatif stratejilerin geliştirilmesi için kullanılabilecek bütüncül bir çerçeve ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, düşük rüzgâr hızlarına uyumlu türbin teknolojilerinin tercih edilmesi, hibrit enerji sistemlerinin (güneş-rüzgâr-dalga) değerlendirilmesi ve altyapı iyileştirmeleri ile bu bölgelerin potansiyelinin artırılması mümkündür.

Sonuçların politika ve uygulama için önemi, yalnızca mevcut uygun alanların belirlenmesiyle sınırlı olmayıp, aynı zamanda rüzgâr rejimi gibi sınırlılıkların da hesaba katılarak daha rasyonel ve sürdürülebilir kararlar alınmasına katkı sağlamasıdır.

7. Sonuçlar

Bu çalışma, Rize ili kıta sahanlığı içerisinde açık deniz rüzgâr santrali saha seçimi için CBS ile bütünleştirilmiş FAHP, AHP, EWM ve HQP yöntemlerinin entegre edildiği yenilikçi ve bütüncül bir karar destek çerçevesi geliştirmiştir. CBS'nin sunduğu mekânsal analiz olanakları sayesinde heterojen veriler tutarlı biçimde işlenmiş, uygunluk kriterlerinin mekânsal dağılımları yüksek doğrulukla görselleştirilmiştir. Böylece yalnızca sayısal analizlerle değil, mekânsal bağlamda da karar vericilere yol gösterici, uygulanabilir ve şeffaf bir çözüm sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan yöntemlerin her biri, karar destek mekanizmasına farklı ve tamamlayıcı katkılar sağlamıştır. FAHP ve AHP, uzman görüşlerinden beslenen öznel öncelikleri belirlemiş; EWM, veriye dayalı nesnel ölçütlerle öznellikten doğan sapmaları azaltmış; HQP ise bu farklı bilgi kaynaklarını dengeli biçimde birleştirmiştir. Özellikle HQP'nin sağladığı uzlaştırılmış ağırlıklandırma, karar sürecinin güvenilirliğini ve tutarlılığını artırmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanının yaklaşık %13,5'lik kısmı (Sınıf 4 ve 5) yüksek ve çok yüksek uygunluk düzeyinde belirlenmiştir. Özellikle çok yüksek uygunluk gösteren Sınıf 5 alanları %5,01, yüksek uygunluk gösteren Sınıf 4 alanları ise %8,44 oranında olup, Rize Merkez, Pazar ve Çayeli açıklarında güneydoğu kıta sahanlığında yoğunlaşmaktadır. Bu bölgeler; liman ve iletim altyapısına yakınlık, uygun su derinliği, düşük ekolojik hassasiyet gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Orta ve düşük düzeyde uygunluk gösteren Sınıf 3 (%18,96) ve Sınıf 2 (%47,14) alanlar ise, dikkatli planlama ve uygun teknoloji seçimiyle geliştirilebilecek rezerv alanlar olarak değerlendirilebilir. En düşük uygunluk gösteren Sınıf 1 alanlar, toplam alanın %20,44'ünü kapsamış ve özellikle kuzeyde ve kıyıya yakın koruma bölgelerinde yoğunlaşmıştır.

Çalışmanın önemli bulgularından biri, belirlenen yüksek uygunluk bölgelerinin mevcut bağlam içinde göreceli olarak avantajlı olmakla birlikte, bölgenin genel rüzgâr rejiminin düşük olmasıdır. Ortalama rüzgâr hızlarının 2–5 m/sn aralığında olması, Rize ili için mutlak anlamda yüksek enerji üretim potansiyelinin sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, düşük rüzgâr hızlarına uyumlu türbin teknolojilerinin seçilmesini, hibrit (ör. rüzgâr–dalga) enerji çözümlerinin araştırılmasını ve ekonomik fizibilite analizlerinin titizlikle yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Çalışmanın literatüre katkısı, yalnızca teknik uygunluk değil, aynı zamanda çevresel, jeolojik ve lojistik kriterleri de kapsayan çok katmanlı ve dengeli bir değerlendirme yapması; geleneksel tek yöntemli yaklaşımlar yerine FAHP, AHP, EWM ve HQP'yi bir arada kullanarak hibrit ve uzlaştırılmış bir ağırlıklandırma sunması ve CBS ile görselleştirmesi

bakımından yenilikçi bir örnek oluşturmasıdır. Ayrıca, bölgesel rüzgâr rejimi zayıf olan alanlarda bile, göreceli olarak en uygun sahaları belirlemek için kullanılabilecek esnek ve tekrarlanabilir bir çerçeve geliştirilmiştir.

Gelecek çalışmalar, mevsimsel rüzgâr değişkenliklerini, deniz ekosistemi üzerindeki uzun vadeli etkileri ve deniz trafiği ile etkileşimleri daha yüksek çözünürlükte modelleyerek, saha seçimini daha rafine edebilir. Ayrıca farklı iklim senaryoları altında uygunluk değişimlerinin analiz edilmesi, karar vericilere daha esnek ve ileriye dönük stratejiler geliştirme imkânı sunacaktır.

Kaynaklar

Aldersey-Williams, J., Broadbent, I. D., & Strachan, P. A. (2019). Better estimates of LCOE from audited accounts – A new methodology with examples from United Kingdom offshore wind and CCGT. *Energy Policy, 128*, 25–35. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.044

Ali, S., Lee, S. M., & Jang, C. M. (2017). Determination of the most optimal on-shore wind farm site location using a GIS–MCDM methodology: Evaluating the case of South Korea. *Energies, 10*(12), Article 2072. https://doi.org/10.3390/en10122072

Ali, F., Etemad-Shahidi, A., Stewart, R. A., Sanjari, M. J., Hayward, J. A., & Nicholson, R. C. (2024). Co-located offshore wind and floating solar farms: A systematic quantitative literature review of site selection criteria. *Renewable Energy Focus, 50*, Article 100611. https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100611

Argin, M., Yerci, V., Erdogan, N., Kucuksari, S., & Cali, U. (2019). Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. *Energy Strategy Reviews, 23*, 33–46. https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.005

Başeğmez, M. (2025a). Strategic multi-criteria framework for nuclear plant siting: Integrating AHP, EWM, and game theory with GIS. *Progress in Nuclear Energy, 188*, Article 105897. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105897

Başeğmez, M. (2025b). A comprehensive GIS-driven hybrid approach for safe and sustainable radioactive waste disposal facility planning. *Annals of Nuclear Energy, 223*, Article 111629. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111629

Basegmez, M., & Aydin, C. C. (2025). Climate change impact on green spaces planning in an urban area using a hybrid approach. *Environmental Science and Pollution Research, 32*(7), 4288–4312. https://doi.org/10.1007/s11356-025-35927-1

Bayram, P., Celep, E., Kostak, S., & Öztürk, Z. K. (2021). Heterojen rüzgâr çiftliği saha seçimi. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 4*(2), 64–78. https://doi.org/10.51764/SMUTGD.962923

Bidwell, D. (2017). Ocean beliefs and support for an offshore wind energy project. *Ocean & Coastal Management, 146*, 99–108. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.06.012

Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems, 17*(3), 233–247. https://doi.org/10.1016/0165-0114(85)90090-9

Büyüközkan, G., Karabulut, Y., & Mukul, E. (2018). A novel renewable energy selection model for United Nations' Sustainable Development Goals. *Energy, 165*, 290–302. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.215

Caceoğlu, E., Yildiz, H. K., Oğuz, E., Huvaj, N., & Guerrero, J. M. (2022). Offshore wind power plant site selection using analytical hierarchy process for Northwest Turkey. *Ocean Engineering, 252*, Article 111178. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111178

Cali, U., Erdogan, N., Kucuksari, S., & Argin, M. (2018). Techno-economic analysis of high-potential offshore wind farm locations in Turkey. *Energy Strategy Reviews, 22*, 325–336. https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.10.007

Canat, A. N., & Özkan, C. (2024). Appropriate port selection for floating based offshore wind farms with MCDM methods: The case of Türkiye. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40*(1), 639–652. https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.1398232

Caner, H. I., & Aydin, C. C. (2021). Shipyard site selection by raster calculation method and AHP in GIS environment, İskenderun, Turkey. *Marine Policy, 127*, Article 104439. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104439

Castro-Santos, L., Lamas-Galdo, M. I., & Filgueira-Vizoso, A. (2020). Managing the oceans: Site selection of a floating offshore wind farm based on GIS spatial analysis. *Marine Policy, 113*, Article 103803. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103803

Chamanehpour, E. (2017). Site selection of wind power plant using multi-criteria decision-making methods in GIS: A case study. *Computational Ecology and Software, 7*(2), 49–64.

Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research, 95*(3), 649–655. https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2

Chen, L., & Macdonald, E. (2014). A system-level cost-of-energy wind farm layout optimization with landowner modeling. *Energy Conversion and Management, 77*, 484–494. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.003

Deveci, M., Özcan, E., & John, R. (2020, February 6–7). *Offshore wind farms: A fuzzy approach to site selection in a Black Sea Region* [Conference presentation]. 2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA.

Díaz-Cuevas, P., Biberacher, M., Domínguez-Bravo, J., & Schardinger, I. (2018). Developing a wind energy potential map on a regional scale using GIS and multi-criteria decision methods: The case of Cadiz (south of Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy, 20*(6), 1167–1183. https://doi.org/10.1007/s10098-018-1539-x

DTU Wind and Energy Systems. (2025). *Global Wind Atlas*. Retrieved April 1, 2025, from https://globalwindatlas.info/en/

Emeksiz, C., & Demirci, B. (2019). The determination of offshore wind energy potential of Turkey by using novelty hybrid site selection method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 36*, Article 100562. https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100562

European Commission. (2025). *EMODnet map viewer*. Retrieved January 24, 2025, from https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/#

European Space Agency. (2025). *Copernicus Marine Data Store | Copernicus Marine Service*. Retrieved January 4, 2025, from https://data.marine.copernicus.eu/products?facets=areas%7EBlack+Sea

Feng, Y., Fanghui, Y., & Li, C. (2019). Improved entropy weighting model in water quality evaluation. *Water Resources Management, 33*(6), 2049–2056. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02227-6

Feng, Z., Li, G., Wang, W., Zhang, L., Xiang, W., He, X., Zhang, M., & Wei, N. (2023). Emergency logistics centers site selection by multi-criteria decision-making and GIS. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 96*, Article 103921. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103921

Fetanat, A., & Khorasaninejad, E. (2015). A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran. *Ocean & Coastal Management, 109*, 17–28. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.02.005

Genç, M. S., Karipoğlu, F., Koca, K., & Azgın, Ş. T. (2021). Suitable site selection for offshore wind farms in Turkey's seas: GIS-MCDM based approach. *Earth Science Informatics, 14*(3), 1213–1225. https://doi.org/10.1007/s12145-021-00632-3

Gil-García, I. C., Ramos-Escudero, A., Molina-García, Á., & Fernández-Guillamón, A. (2023). GIS-based MCDM dual optimization approach for territorial-scale offshore wind power plants. *Journal of Cleaner Production, 428*, Article 139484. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139484

Hasanzadeh, M., Kamran, K. V., Feizizadeh, B., & Mollabashi, S. H. (2024). GIS based spatial decision-making approach for solar energy site selection, Ardabil, Iran. *International Journal of Engineering and Geosciences, 9*(1), 115–130. https://doi.org/10.26833/IJEG.1341451

Hosseinzadeh, S., Etemad-Shahidi, A., & Stewart, R. A. (2023). Site selection of combined offshore wind and wave energy farms: A systematic review. *Energies, 16*(4), Article 2074. https://doi.org/10.3390/en16042074

Hou, P., Enevoldsen, P., Hu, W., Chen, C., & Chen, Z. (2017). Offshore wind farm repowering optimization. *Applied Energy, 208*, 834–844. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.064

İnci, M., & Türksoy, Ö. (2019). Review of fuel cells to grid interface: Configurations, technical challenges and trends. *Journal of Cleaner Production, 213*, 1353–1370. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.281

Ioannou, A., Angus, A., & Brennan, F. (2018). A lifecycle techno-economic model of offshore wind energy for different entry and exit instances. *Applied Energy, 221*, 406–424. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.143

International Renewable Energy Agency. (2020). *Renewable capacity statistics 2020*. https://www.eaere.org/policy/energy/irenas-renewable-capacity-statistics-2020/.

Isiacik Colak, T. A., Senel, G., & Goksel, C. (2021). GIS-based maritime spatial planning for site selection of offshore wind farms with exergy efficiency analysis: A case study. *International Journal of Exergy, 34*(2), 255–268. https://doi.org/10.1504/IJEX.2021.113008

Iyappan, L., & Pandian, P. K. (2016). Geoprocessing model for identifying potential wind farm locations. *IET Renewable Power Generation, 10*(9), 1287–1297. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0187

Jadoon, T. R., Ali, M. K., Hussain, S., Wasim, A., & Jahanzaib, M. (2020). Sustaining power production in hydropower stations of developing countries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 37*, Article 100637. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100637

Jeon, S. H., Cho, Y. U., Seo, M. W., Cho, J. R., & Jeong, W. B. (2013). Dynamic response of floating substructure of spar-type offshore wind turbine with catenary mooring cables. *Ocean Engineering, 72*, 356–364. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.07.017

Kabak, M., & Akalın, S. (2022). A model proposal for selecting the installation location of offshore wind energy turbines. *International Journal of Energy and Environmental Engineering, 13*(1), 121–134. https://doi.org/10.1007/s40095-021-00421-0

Kim, C. K., Jang, S., & Kim, T. Y. (2018). Site selection for offshore wind farms in the southwest coast of South Korea. *Renewable Energy, 120*, 151–162. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.081

Lee, J., Qin, S., Coughlan, K., & Aubeny, C. P. (2025, May 5–8). *Decision-making framework for marine anchor selection in floating offshore wind farms* [Conference presentation]. Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.

Lerch, M., De-Prada-Gil, M., Molins, C., & Benveniste, G. (2018). Sensitivity analysis on the levelized cost of energy for floating offshore wind farms. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 30*, 77–90. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.09.005

Li, Y., Huang, X., Tee, K. F., Li, Q., & Wu, X. P. (2020). Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: A case study for southeast coastal region of China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 39*, Article 100711. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100711

Liao, H., Jiang, L., Lev, B., & Fujita, H. (2019). Novel operations of PLTSs based on the disparity degrees of linguistic terms and their use in designing the probabilistic linguistic ELECTRE III method. *Applied Soft Computing, 80*, 450–464. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.018

Liu, P. C. Y., Lo, H. W., & Liou, J. J. H. (2020). A combination of DEMATEL- and BWM-based ANP methods for exploring the green building rating system in Taiwan. *Sustainability, 12*(8), Article 3216. https://doi.org/10.3390/su12083216

Lo, H. W., Hsu, C. C., Chen, B. C., & Liou, J. J. H. (2021). Building a grey-based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm site selection. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 43*, Article 100935. https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100935

Lo, H. W., & Liou, J. J. H. (2018). A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. *Applied Soft Computing, 73*, 684–696. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.09.020

Luthra, S., Govindan, K., & Mangla, S. K. (2017). Structural model for sustainable consumption and production adoption: A grey-DEMATEL based approach. *Resources, Conservation and Recycling, 125*, 198–207. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.018

Maslov, N., Claramunt, C., Wang, T., & Tang, T. (2017). Method to estimate the visual impact of an offshore wind farm. *Applied Energy, 204*, 1422–1430. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.053

Mittal, P., Mitra, K., & Kulkarni, K. (2017). Optimizing the number and locations of turbines in a wind farm addressing energy–noise trade-off: A hybrid approach. *Energy Conversion and Management, 132*, 147–160. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.014

Mohammadi, M., & Rezaei, J. (2020). Ensemble ranking: Aggregation of rankings produced by different multi-criteria decision-making methods. *Omega, 96*, Article 102254. https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102254

Mohammadifar, A., Gholami, H., & Golzari, S. (2023). Novel integrated modelling based on multiplicative long short-term memory (mLSTM) deep learning model and ensemble multi-criteria decision making (MCDM) models for mapping flood risk. *Journal of Environmental Management, 345*, Article 118838. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118838

Neelakanta, P., Kapur, J., & Kesavan, H. (1992). *Entropy optimization principles with applications*. Academic Press/Harcourt Brace Jovanovich Publishers.

Negro, V., López-Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., Alberdi, P., Imaz, M., & Serraclara, J. M. (2017). Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions. *Ocean Engineering, 133*, 253–261. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.02.011

Oguz, E., Clelland, D., Day, A. H., Incecik, A., López, J. A., Sánchez, G., & Almeria, G. G. (2018). Experimental and numerical analysis of a TLP floating offshore wind turbine. *Ocean Engineering, 147*, 591–605. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.052

OpenStreetMap. (2025). *OpenStreetMap data*. Retrieved March 19, 2025, from https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.031/35.252

Ospino-Castro, A., Robles-Algarín, C., Mangones-Cordero, A., & Romero-Navas, S. (2023). An analytic hierarchy process-based approach for evaluating feasibility of offshore wind farm on the Colombian Caribbean coast. *International Journal of Energy Economics and Policy, 13*(6), 64–73. https://doi.org/10.32479/ijeep.14621

Pillai, A. C., Chick, J., Khorasanchi, M., Barbouchi, S., & Johanning, L. (2017). Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm. *Ocean Engineering, 139*, 287–297. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.049

Poudyal, R., Loskot, P., Nepal, R., Parajuli, R., & Khadka, S. K. (2019). Mitigating the current energy crisis in Nepal with renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 116*, Article 109388. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109388

Qin, Y., Guan, K., Kou, J., Ma, Y., Zhou, H., & Zhang, X. (2022). Durability evaluation and life prediction of fiber concrete with fly ash based on entropy weight method and grey theory. *Construction and Building Materials, 327*, Article 126918. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126918

Roy, U., & Majumder, M. (2019). Productivity yielding in shell and tube heat exchanger by MCDM–NBO approach. *Measurement and Control, 52*(3–4), 262–275. https://doi.org/10.1177/0020294019836109

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling, 9*(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83–98.

Sarı, F., & Koyuncu, F. (2021). Multi-criteria decision analysis to determine the suitability of agricultural crops for land consolidation areas. *International Journal of Engineering and Geosciences, 6*(2), 64–73. https://doi.org/10.26833/ijeg.683754

Sarkar, B., Das, P., Islam, N., Basak, A., Debnath, M., & Roy, R. (2022). Land suitability analysis for paddy crop using GIS-based fuzzy-AHP (F-AHP) method in Koch Bihar District, West Bengal. *Geocarto International, 37*(25), 8952–8978.

Savanović, R., & Savanović, M. (2024). The need for renewal of the cadastral maps on the territory of Vojvodina, Republic of Serbia. *International Journal of Engineering and Geosciences, 9*(3), 324–333. https://doi.org/10.26833/ijeg.1422964

Shao, M., Mao, Z., Sun, J., Guan, X., Shao, Z., & Tang, T. (2025). Multi-scale offshore wind farm site selection decision framework based on GIS, MCDM and meta-heuristic algorithm. *Ocean Engineering, 316*, Article 119921. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119921

Sharma, R., Mahanti, G. K., Panda, G., Rath, A., Dash, S., Mallik, S., & Zhao, Z. (2023). Comparative performance analysis of binary variants of FOX optimization algorithm with half-quadratic ensemble ranking method for thyroid cancer detection. *Scientific Reports, 13*(1), Article 19598. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46865-8

Susanty, A., Saptadi, S., Dewi, W. R., & Tjahjono, B. (2019). Analyzing the drivers of green manufacturing practices using fuzzy TOPSIS: Case study Bandarharjo fish smoked industry centre. *International Journal of Applied Science and Engineering, 16*(1), 47–56. https://doi.org/10.6703/ijase.201906_16(1).047

Takeuchi, A. (2023). Social dimensions of offshore wind energy: A review of theories and frameworks of multi-criteria decision-making. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 10*(4), 243–249. https://doi.org/10.1007/s40518-023-00225-2

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *TUCBS*. Retrieved February 1, 2025, from https://tucbs.gov.tr/

Tercan, E., Tapkın, S., Latinopoulos, D., Dereli, M. A., Tsiropoulos, A., & Ak, M. F. (2020). A GIS-based multi-criteria model for offshore wind energy power plants site selection in both sides of the Aegean Sea. *Environmental Monitoring and Assessment, 192*(10), Article 652. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08603-9

Topçu, G. Z., Bayır, K., Cavıldak, Z. E., Başeğmez, M., & Aydın, C. C. (2023). Yeşil alan uygunluk analizinin CBS tabanlı AHP ve TOPSIS yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Geomatik, 8*(3), 235–249. https://doi.org/10.29128/geomatik.1171069

Umoh, K., Hasan, A., & Kenjegaliev, A. (2025). Combined AHP–GIS methodology for floating offshore wind site selection in South Africa. *Ocean Engineering, 317*, Article 120037. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120037

U.S. Geological Survey. (2025). *Search Earthquake Catalog*. Retrieved January 4, 2025, from https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

Urfalı, T., & Eymen, A. (2021). CBS ve AHP yöntemi yardımıyla Kayseri ili örneğinde rüzgâr enerji santrallerinin yer seçimi. *Geomatik, 6*(3), 227–237. https://doi.org/10.29128/geomatik.772453

Vaisi, S., Shariati, E., & Ghaslani, N. (2024). Integrated methodology for construction site selection: A case study of the Tazeh Abad neighborhood, Sanandaj City. *Journal of Studies in Science and Engineering, 4*(2), 48–73. https://doi.org/10.53898/josse2024423

Vieira, M., Snyder, B., Henriques, E., & Reis, L. (2019). European offshore wind capital cost trends up to 2020. *Energy Policy, 129*, 1364–1371. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.036

Vyas, V., Uma, V., & Ravi, K. (2022). Aspect-based approach to measure performance of financial services using voice of customer. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 34*(5), 2262–2270. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.12.009

Wang, B., Song, J., Ren, J., Li, K., Duan, H., & Wang, X. (2019). Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP–VIKOR based prioritization from life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling, 142*, 78–87. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.011

Wang, T. C., & Chen, Y. H. (2008). Applying fuzzy linguistic preference relations to the improvement of consistency of fuzzy AHP. *Information Sciences, 178*(19), 3755–3765. https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.05.028

Wu, H.-W., Li, E., Sun, Y., & Dong, B. (2021). Research on the operation safety evaluation of urban rail stations based on the improved TOPSIS method and entropy weight method. *Journal of Rail Transport Planning & Management, 20*, Article 100262. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100262

Wu, Y., Tao, Y., Zhang, B., Wang, S., Xu, C., & Zhou, J. (2020). A decision framework of offshore wind power station site selection using a PROMETHEE method under intuitionistic fuzzy environment: A case in China. *Ocean & Coastal Management, 184*, Article 105016. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105016

Wu, Y., Zhang, J., Yuan, J., Geng, S., & Zhang, H. (2016). Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic fuzzy environment: A case of China. *Energy Conversion and Management, 113*, 66–81. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.020

Xilin, L., & Long, C. (2019). Evaluation and research on site selection scheme of high-speed railway station based on binary semantic combination weighting method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 688*(2), Article 022040. https://doi.org/10.1088/1757-899X/688/2/022040

Yang, J. J., Chuang, Y. C., Lo, H. W., & Lee, T. I. (2020). A two-stage MCDM model for exploring the influential relationships of sustainable sports tourism criteria in Taichung City. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(7), Article 2319. https://doi.org/10.3390/ijerph17072319

Yang, J., Xing, S., Qiu, R., Chen, Y., Hua, C., & Dong, D. (2022). Mathematical problems in engineering decision-making based on improved entropy weighting method: An example of passenger comfort in a smart cockpit of a car. *Mathematical Problems in Engineering, 2022*(1), Article 6846696. https://doi.org/10.1155/2022/6846696

Yılmaz, D., Akkaya, S., & Vaheddoost, B. (2023). Gemlik ilçesi rüzgâr enerji santrali potansiyel yer analizi. *Geomatik, 8*(3), 264–276. https://doi.org/10.29128/geomatik.1209940

Zaidan, B. B., Ibrahim, H. A., Mourad, N., Zaidan, A. A., Pilehkouhic, H., Qahtan, S., Deveci, M., & Delen, D. (2024). An in-depth analysis of ensemble multi-criteria decision making: A comprehensive guide to terminology, design, applications, evaluations, and future prospects. *Applied Soft Computing, 167*, Article 112267. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112267

Zaredar, N., & Kheirkhah Zarkesh, M. M. (2012). Examination of compensatory model application in site selection. *Environmental Monitoring and Assessment, 184*(1), 397–404. https://doi.org/10.1007/s10661-011-1976-z

Zhang, J., Zhang, J., Cai, L., & Ma, L. (2017). Energy performance of wind power in China: A comparison among inland, coastal and offshore wind farms. *Journal of Cleaner Production, 143*, 836–842. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.040

Zhao, H., Ge, Y., & Wang, W. (2024). A study on offshore wind farm site selection based on CRITIC and CPT-TOPSIS: A case study of China. *Kybernetes, 53*(3), 1117–1147. https://doi.org/10.1108/K-09-2022-1267

Zhu, Y., Tian, D., & Yan, F. (2020). Effectiveness of entropy weight method in decision-making. *Mathematical Problems in Engineering, 2020*(1), Article 3564835. https://doi.org/10.1155/2020/3564835

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 343–359
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Komşu Mahallelerdeki Konut Fiyat Farklılıklarının Mekansal Analizlerle İncelenmesi: Ankara Çankaya İlçesi Örneği

Investigating Housing Price Differences in Adjacent Neighborhoods Using Spatial Analysis: The Case of Ankara's Çankaya District

Ayşe Giz Gülnerman Gengeç[1*], Tuğba Memişoğlu Baykal[1]

[1]*Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Tapu Kadastro Yüksekokulu, Tapu Kadastro Bölümü, 06500 Yenimahalle/Ankara.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Ayşe Giz Gülnerman Gengeç
ayse.gulnerman@hbv.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1731127

Yayın süreci
Geliş tarihi: 30.06.2025
Kabul tarihi: 20.09.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, konut piyasasında yakın bölgeler arasındaki satılık fiyat farklılıklarını araştırarak bu durumu mekânsal analizlerle incelemektedir. Ankara'nın Çankaya ilçesi çalışma alanı olarak belirlenmiş ve konut satış birim (m^2) fiyatları için Endeksa web sayfası veri kaynağı olarak kullanılmıştır. 2020-2024 yıllarına ait mahalle bazlı konut fiyat değişimleri incelenirken, Getis-Ord ve Lokal Moran's I mekânsal analiz teknikleri kullanılmıştır. Getis-Ord analizi ile incelenen yıllarda konut fiyatlarındaki yüksek ya da düşük fiyat kümelenmeleri ortaya çıkarılmış, Lokal Moran's I yöntemiyle ise yakın bölgeler arasındaki fiyatların mekânsal otokorelasyonu tespit edilmiştir. Bu çalışma, Çankaya ilçesindeki konut satış fiyatlarının yıllara göre mekânsal dağılımını ortaya koyarak tutarlı kümelenme örüntülerini ve ayrışan bölgeleri belirlemiştir. Bulgular, konut piyasasındaki bölgesel dinamiklerin anlaşılmasına katkı sağlayarak yatırım ve planlama kararları için mekânsal temelli bir analiz sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: *Konut piyasası, Mahalle bazlı konut fiyatı analizi, Getis-Ord Gi*, Lokal Moran's-I*

Abstract

This study investigates the differences in asking prices between nearby areas in the housing market and examines this situation through spatial analyses. The district of Çankaya in Ankara is selected as the study area, and data on unit sale prices per square meter are obtained from the Endeksa website. Neighborhood-based housing price changes for the years 2020–2024 are analyzed using the spatial analysis techniques of Getis-Ord and Local Moran's I. While the Getis-Ord analysis revealed clusters of high or low pricing during the examined years, the Local Moran's I method identified the spatial autocorrelation of prices between neighboring areas. This study reveals the spatial distribution of housing sale prices in Çankaya district over the years, identifying consistent clustering patterns as well as diverging areas. The findings contribute to understanding regional dynamics in the housing market and offer a spatially grounded analysis to inform investment and planning decisions.

Keywords: *Housing market, Neighborhood-level housing price analysis, Getis-Ord Gi*, Local Moran's-I*

1. Giriş

Barınma hakkı küresel ölçekte en temel insan haklarından biri olarak kabul edilmektedir (UN-Habitat, 2009; United Nations, 1948). Bu hakkın sağlanabilmesi konut piyasasındaki konut sayısı ve nüfus ve hane halkı büyüklükleri ile doğrudan ilişkilidir (Erçetin, 2022). Günümüzde barınma hakkı sadece herhangi bir yerde konut ihtiyacının karşılanması olarak görülmemekte, aynı zamanda vatandaşların sosyal ve ekonomik ihtiyaçlarını da kapsayıcı şekilde değerlendirilmektedir (Kutsal & Polatoğlu, 2023). Kentsel alanda barınma ihtiyacını karşılanması için vatandaşın tercihlerini yönlendirebilecek çeşitli kriterler (erişilebilirlik, sosyal donatı alanlarının zenginliği, güvenlik, kentsel canlılık

vb.) göz önünde bulundurulmaktadır (Memiş, 2019; Sarkar & Jana, 2023). Kentsel alandaki barınma ihtiyacını karşılamak için dikkate alınan kriterler, konut satış birim fiyatlarında farklılıklara yol açmakta ve bu durum, konut piyasasında mekânsal olarak ayrışan alt piyasa yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Teoride belirlenen bu tercihler ve Birinci Coğrafya Yasası: "Her şey her şeyle ilişkilidir, ancak yakın olan şeyler, uzak olanlara göre daha güçlü bir ilişkiye sahiptir." (Tobler, 2004) düşünüldüğünde komşu alanlarda benzer bir fiyatlama ve piyasa oluşacağı düşünülmektedir. Ancak kentsel alan yapılı çevre haricinde insan algısını şekillendirebilen farklı perspektiflere sahip olabilir ve bu konut piyasasında düzenli bir fiyatlama görülmeyebilir. Dahası konut piyasasında suni fiyatlama, kentsel alanda yenileme, yeniden yapılaşma gibi veride ya da mekânsal alanda çarpıcı değişiklikler olabilir. Bu değişikler de konut piyasasında tutarsız fiyatlamanın görülmesine, benzer alanlarda haksız fiyat farklılıkların ortaya çıkmasına sebep olarak piyasada algı yönetimine sebep olabilir.

Bu çalışmanın amacı, Ankara ili Çankaya ilçesinde yer alan birbirine yakın bölgelerdeki konut satış birim fiyatlarını inceleyerek konut piyasasındaki fiyatlamanın yıllara göre tutarlılığını araştırmaktır. Yapılan mekânsal otokorelasyon ve mekânsal kümeleme analizleri ile çalışma konut fiyat piyasasındaki tutarsız fiyat değişimlerini zaman-mekân perspektifinde ortaya koyarak, bu desenlerin olası nedenlerinin (suni fiyatlama, kentsel dönüşüm, yenileme vb.) gelecekteki çalışmalarda araştırılmasına zemin hazırlamaktadır. Küresel ve lokal mekânsal otokorelasyon analizi ile verinin mekânda rastgele dağılıp dağılmadığı, birbirine yakın olan bölgelerin birbirlerine göre durumları test edilir. Böylece birbirine komşu bölgelerin birbirlerine göre fiyatlarının yüksek ya da düşük olma durumları anlaşılabilir. Mekânsal kümeleme analizi ile benzer mekânsal örüntüleri belirlemek ve bu örüntüleri kümelemek için kullanılır. Bu sayede Ankara ili Çankaya İlçesinde bir araya gelen benzer konut fiyatlarına sahip bölgeler (sıcak, soğuk, nötr olarak) tespit edilebilir.

1.1. Literatür özeti

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı mekansal kümeleme yöntemleri, birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlardan birisi de konut piyasasındaki zamana bağlı fiyat değişiminin tespiti ve gelişen ya da gelişmekte olan alanların tespit edilerek alım-satım işlemlerinin kolayca yapılabilmesine olanak sağlayan analizler yürütmektir. Özellikle mekânsal kümeleme yöntemleri fiyat değişimlerinin nerelerde meydana geldiğinin belirlenmesinde ve nedenlerini mümkün olduğunca açıklayan ilişkilerin kurulmasında kolaylık sağlamaktadır.

Literatür incelendiğinde, bu konuda birçok yayına rastlanmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları CBS'nin kümeleme yöntemleriyle yürütülen çalışmalarken, bazıları da CBS'nin farklı analiz avantajlarından yararlanılarak gerçekleştirilen çalışmalar niteliğindedir (Tablo 1). Ülkemiz açısından düşünüldüğünde konumsal kümeleme yöntemleriyle gerçekleştirilen çalışmaların mevcutta olduğu ancak sıcak nokta kümeleme analizleriyle yürütülerek karşılaştırmalı olarak sunulduğu çalışmaların sayısının az olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla bu çalışma ile Ankara ili özelinde CBS'ye dayalı kümeleme analizleri yürütülerek konut satış fiyatlarının nerelerde daha fazla nerelerde daha az olduğunun tespiti yapılarak kıyaslamalı bir analiz yürütülmüştür. Böylece bölgesel farklılıkları daha iyi tespit edebilmek, elde edilen mahalle bazlı kümelemeler ile sağlanmıştır. Bu çalışma hem ilgili il açısından hem de ülke genelinde benzer nitelikteki bir satış çerçevesine sahip iller için altlık oluşturabilecektir.

Tablo 1. Literatür özeti

Çalışma	Yıl	Çalışma alanı	Veri		Kullanılan Yöntem
			Yıl-Dönem	Nitelik	
(Basu & Thibodeau, 1998)	1998	Dallas, Texas	1991:4 (Ekim-Aralık dönemi) ile 1993:1 (Ocak-Mart dönemi)	5000 Konut satış işlem fiyatları	Hedonik yöntem, Küresel otokorelasyon, Genelleştirilmiş en küçük kareler yöntemi (EGLS), En Küçük Kareler Yöntemi (OLS)
(Eğdemir, 2001)	2001	İstanbul, Türkiye	1997	15 ilçede Konut satış fiyatları	Çoklu Regresyon Analizi
(Vui, 2006)	2006	Johor Bahru, Malezya	-	125 Bireysel teraslı ünite	Çoklu Regresyon Analizi (GIS-MRA)
(Bitter vd., 2007)	2007	Tucson, Arizona, ABD	2000	15.986 kayıtlı Konut satış fiyatları	Mekansal Genişleme Yöntemi ve Coğrafi Ağırlıklı Regresyon (GWR)
(Huang vd., 2010)	2008	Calgary, Kanada	2002 - 2004	Konut satış fiyatları	OLS, Zamansal Ağırlıklı Regresyon (TWR) ve Coğrafi ve Zamansal Ağırlıklı regresyon (GTWR)
(Hanink vd., 2012)	2012	Çin	2000	Konut satış fiyatları	Hedonik Yöntem ve GWR

Tablo 1'in devamı

Çalışma	Yıl	Çalışma alanı	Veri		Kullanılan Yöntem
			Yıl-Dönem	Nitelik	
(De Bruyne & Van Hove, 2013)	2012	Belçika	2001	Belçika'nın 589 belediyesindeki konut fiyatları	Coğrafi engellerin konut fiyatları üzerindeki açık etkisini gösteren bir model
(Manganelli vd., 2014)	2014	Potenza, İtalya,	2008 - 2010	280 Konut emlak işlemi	GWR
(Boza, 2015)	2015	Ankara, Türkiye	2010 - 2011	Konut fiyatları	Eşzamanlı Mekânsal Otoregresyon,GWR ve OLS'ye dayalı Hedonik Konut Değerleme modelleri
(Tuna vd., 2015)	2015	Ankara, Türkiye	11 Aralık 2011- 23 Nisan 2012	Konut fiyatları, nüfus bilgileri, konutlara ait 42 parametre bilgisi	Lineer Regresyon
(Hu vd., 2016)	2016	Wuhan, Çin	Ocak 2003 - Aralık 2013	10 yıllık bir Konut arazi fiyatı panel veri seti	GWR
(Li vd., 2017)	2017	Wuhan, Çin	01 Ocak 2005- 31 Ocak 2015	4638 yeni konut birimi ve 7752 liste fiyatı	Kernel Density Estimation, IDW, En Yakın Komşu Yöntemi, GWR
(Kok vd., 2018)	2018	Malezya	2002 - 2015	Konut fiyatları	Yapısal Vektör Otoregresif Regresyon (SVAR) yöntemi
(Yang vd., 2018)	2018	Dalian, Çin	Aralık 2016	Konut özelliklerine dair örnek veriler ve Dalian'ın altyapı ve ulaşım ağına dair veriler	GWR
(Barreca vd., 2018)	2018	Torino, İtalya	2011- 2017	3071 Konut ilanı verileri ve inşa yılı ile fiziksel durum verileri	Moran's I, Anselin Local Moran's I, OLS
(Cao vd., 2019)	2018	Singapur	Makale açık erişime sahip olmadığından veri bilgisine erişilemedi	Kamu konutları ikinci el satış fiyatları	OLS, Öklid mesafesi temelli (ED-temelli) GWR modeli ve seyahat süresi temelli GWR modeli
(Wang vd., 2019)	2019	Taitung, Tayvan	2013 - 2017	3533 Gayrimenkul işlem fiyatı	Hedonik fiyat yöntemi, Mekansal gecikme ve Mekansal hata modeli, Moran's I, Anselin Local Moran's I
(Cellmer vd., 2019)	2019	Varşova, Polonya	2013 - 2017	288 Tek ailelik evlerin satış işlem fiyatları	OLS, Mekansal otoregresif model ve GWR
(Liu vd., 2020)	2020	Wuhan, Çin	2010 - 2018	Wuhan'ın ana kentsel alanındaki 619 konut sitesine ait veriler	GTWR
(Genç, 2021)	2021	Trabzon, Türkiye	2020	42 mahallede 372 Konuta ait konut fiyatları ve fiyata etki eden 21 bağımsız değişken	GWR
(Aydınoğlu vd., 2021)	2021	İstanbul-Kocaeli, Türkiye	2015 - 2020	Cadde bazındaki arsa rayiç verileri	Moran's I Getis-Ord Gi* Anselin Local Moran's I
(Bagheri & Shaykh-Baygloo, 2021)	2021	Isfahan, İran	2018	Konut başına metrekare fiyatı, mahalle düzeyinde 40 kriter	Ana bileşen analizi (PCA), OLS ve GWR
(Souza vd., 2021)	2021	Salvador, Brezilya	Aralık 2020 – Ocak 2021	27949 daire ve 3726 evin satış fiyatları	Getis-Ord Gi*, Anselin Local Moran's I
(Şişman & Aydınoğlu, 2022)	2022	İstanbul-Kocaeli, Türkiye	01 Ocak 2019- 09 Mart 2020	200.000 Emlak değeri içeren 121 kriter	Boxplot tekniği, Pearson Korelasyon tekniği, Mekansal Kısıtlı Çok Değişkenli Kümeleme Analizi

Tablo 1'in devamı

Çalışma	Yıl	Çalışma alanı	Veri		Kullanılan Yöntem
			Yıl-Dönem	Nitelik	
(Wang vd., 2022)	2022	Shunde, Çin	Shunde İlçe Arazi İdaresi'nden 2003, 2006 ve 2010	Arazi fiyatı güncelleme veritabanı verileri—toplamda 653 örnek alandan 1498 konut fiyatı	Mekansal-zamansal model (FSTM)
(Habash & Unanoğlu, 2022)	2022	Türkiye	01 Ocak 2010 – 31 Aralık 2020	Nüfus, enflasyon, GSYİH ve faiz oranı (bağımsız değişkenler) ve 10 yıllık Konut Fiyat Endeksi (bağımlı değişken)	VIF (Çoklu Doğrusal Bağlantı) Testi, CUSUM Testi, Regresyon ve Çoklu Regresyon Testi, Normallik Testi, Nokta Grafiği Testi, White Heteroskedastisite Testi, Otokorelasyon (Durbin-Watson) Testi, Heteroskedastisite Testi, Birim Kök Testi, Kolmogorov-Smirnov Testi, Korelasyon Testi
(Iliopoulou & Feloni, 2022)	2022	Atina, Yunanistan	2020 yılının ilk çeyreği	4995 Konut satış fiyatları ve konutlara ilişkin büyüklük, yaş, kat sayısı, konum gibi bilgiler	Moran's I, Getis-Ord Gi*, GWR
(Güneş & Apaydın, 2022)	2022	Ankara, Türkiye	13 Kasım 2021	2784 Konutun ilan fiyatlarını ve özellikleri	GWR
(Iban, 2022)	2022	Mersin, Türkiye	Ocak 2021 - Haziran 2021	1002 örnek ve 43 Bağımsız değişken içeren bir veri kümesi	Random Forest, XGBoost, LightGBM ve Gradient Boosting
(Liu & Strobl, 2023)	2023	Zhuhai, Çin	2018	862 konut sitesindeki ortalama konut yeniden satış fiyatları	Moran's I, OLS, GWR ve Çok ölçekli Coğrafi Ağırlıklı Regresyon (MGWR)
(Toprak & Güngör, 2023)	2023	Kayseri, Türkiye	2022 Ocak ayı	Konutun çevresine, konutun içinde bulunduğu binaya ve konutun iç özelliklerine ilişkin bilgiler içeren 1365 veri	Çoklu Regresyon ve GWR
(Alkan vd., 2023)	2023	Antalya, Türkiye	2019	200 adet Gayrimenkul örneklem verisi	En Yakın KomşuAlgoritması (KNN), Rastgele Orman (RF) ve Destek Vektör Makineleri (SVM)
(Soylu & Kaynak, 2024)	2024	Türkiye	2010 Ocak - 2021 Aralık dönemi	Ekonomik büyüme, enflasyon oranı, kur getirisi ve konut kredi faiz oranı, yapı kullanım izin sayıları	AR (3)-TGARCH (1,1) modeli
(Hazer vd., 2024)	2024	Yozgat, Türkiye	2022 ve 2023	Taşınmaz verileri	Bayes Tekniği, Topluluk Regresyonu, Çekirdek Regresyonu, Doğrusal Regresyon, DVM ve İkili Karar Ağacı Regresyonu
(Sadaa, 2024)	2024	Ankara, Türkiye	2022'nin son çeyreği	Konut satış fiyatları	OLS ve GWR
(Ulucan vd., 2025)	2025	Niğde, Türkiye	2019 - 2022	676 konuta ait yapısal ve mekânsal özellikler	Yapay Sinir Ağları (ANN), RF, Karar Ağacı (DT) ve KNN

2. Materyal

2.1. Araştırma Bölgesi

Araştırma alanı olarak Ankara ilinin Çankaya ilçesi seçilmiştir. Çankaya ilçesi Ankara'nın en eski yerleşim yerlerini barındırmakta ve şehrin merkezinde yer almaktadır. Ayrıca adrese dayalı kayıt sistemi (ADNKS) verilerine göre 2013-2024 yılları arasında Ankara'nın en kalabalık ilçesidir (Tablo 2) (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025a).

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'nun konut satış istatistiklerine göre, Çankaya ilçesi 2020-2024 yılları arasında yıllık ortalama 23 bin satış ile açık ara en fazla konut satışına sahiptir. Çankaya'yı, en kalabalık ilçelerden Keçiören yıllık ortalama 20 bin, Mamak 17 bin ve Yenimahalle 14 bin konut satışı ile takip etmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025b). Ankara nüfusunun %16'sından fazlasının yaşadığı bu bölgenin seçilmesinin başlıca sebebi, alım-satım işlemlerinin bu alanda fazla olması ve oldukça farklılık göstermesidir. Bu farklılıklar tespit edilerek mekânsal olarak ortaya konulmak istenmektedir. Böylece, konut fiyatlarının açıklanabilmesi ve veriden anlamlı çıkarımlar elde edilebilmesi için bir veri altlığı sağlanarak, gelişen ya da gelişmekte olan bölgelerin tespit edilmesi ve bu alanlarda kolaylıkla seçim yapılmasına olanak tanınmış olacaktır.

Tablo 2. Ankara ilçelerinde 2013-2024 yılları arasındaki nüfus değişimi

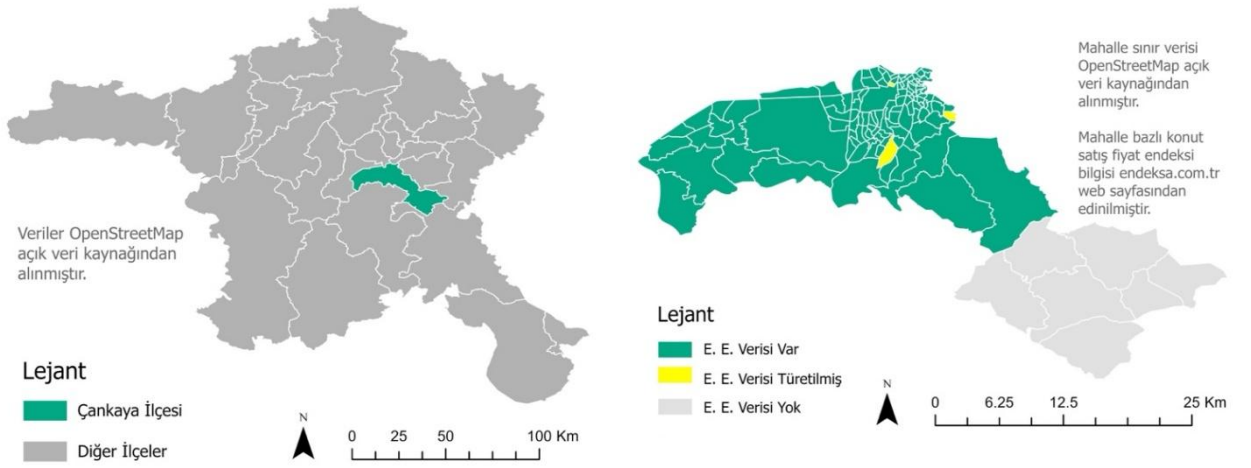
İlçe Adı	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Ortalama
Akyurt	28,349	29,403	30,245	31,541	32,863	34,588	36,123	37,456	38,588	40,625	43,918	44,541	**35,687**
Altındağ	359,597	361,259	363,687	365,842	371,366	370,024	389,510	396,165	407,675	413,994	412,267	414,893	**385,523**
Ayaş	12,997	13,018	12,678	12,276	12,289	15,540	13,900	13,686	13,093	12,998	15,581	13,670	**13,477**
Bala	23,138	22,142	21,618	21,533	21,682	33,644	30,280	25,780	22,966	20,521	28,704	21,893	**24,492**
Beypazarı	47,234	47,646	47,582	50,431	48,476	48,274	48,371	48,732	48,393	48,357	48,558	48,445	**48,375**
Çamlıdere	7,181	6,781	6,479	6,483	7,389	15,148	9,825	8,883	8,350	8,100	13,971	10,475	**9,089**
Çankaya	914,501	913,715	922,536	919,119	921,999	920,890	944,609	925,828	949,265	942,553	937,546	947,330	**929,991**
Çubuk	83,449	84,636	86,055	87,603	90,063	89,046	90,764	91,142	91,363	95,449	99,096	100,750	**90,785**
Elmadağ	43,873	43,666	43,776	44,166	45,513	45,349	45,557	45,122	44,236	44,379	45,034	45,133	**44,650**
Etimesgut	469,626	501,351	527,959	542,752	566,500	570,727	587,052	595,305	606,472	614,891	617,229	629,112	**569,081**
Evren	2,995	2,901	2,847	2,784	2,753	3,606	3,097	3,045	2,965	2,952	3,581	3,096	**3,052**
Gölbaşı	115,924	118,346	122,288	123,681	130,363	134,378	138,944	140,649	142,961	150,047	157,605	165,201	**136,699**
Güdül	8,921	8,626	8,392	8,282	8,050	10,074	8,892	8,438	8,155	8,079	10,014	8,521	**8,704**
Haymana	42,566	31,176	28,355	28,127	27,277	45,931	30,930	28,922	27,298	26,016	33,494	27,241	**31,444**
Kalecik	13,678	13,604	13,388	13,251	52,079	53,522	54,806	56,736	57,913	59,123	60,804	62,060	**42,580**
Kazan	45,879	47,224	51,764	50,746	12,897	13,450	13,234	12,941	12,502	12,794	13,296	12,801	**24,961**
Keçiören	848,305	872,025	889,876	903,565	917,759	909,787	939,161	938,568	942,884	939,279	923,404	932,128	**913,062**
Kızılcahamam	26,694	25,767	25,179	25,021	24,947	32,647	28,350	27,507	26,968	26,872	31,800	28,823	**27,548**
Mamak	568,396	587,565	607,878	625,083	637,935	647,252	665,978	669,465	682,420	687,535	682,279	686,777	**645,714**
Nallıhan	29,797	29,289	29,209	28,721	28,621	28,091	27,579	27,434	26,961	26,553	26,831	26,488	**27,965**
Polatlı	117,393	121,101	121,858	122,424	124,464	122,287	125,075	126,623	127,526	128,378	128,895	130,515	**124,712**
Pursaklar	123,857	129,152	133,961	137,808	142,317	143,055	150,488	157,082	159,676	162,389	161,926	165,665	**147,281**
Şereflikoçhisar	34,577	33,946	33,729	33,420	33,599	34,202	33,821	33,310	33,475	33,140	34,122	33,316	**33,721**
Sincan	484,694	497,516	506,950	517,316	524,222	518,893	535,637	549,108	561,411	572,609	571,889	590,309	**535,880**
Yenimahalle	591,462	608,217	632,286	644,543	659,603	663,580	687,093	695,395	703,809	704,652	701,638	714,866	**667,262**
Toplam	**5,045,083**	**5,150,072**	**5,270,575**	**5,346,518**	**5,445,026**	**5,503,985**	**5,639,076**	**5,663,322**	**5,747,325**	**5,782,285**	**5,803,482**	**5,864,049**	**5,521,733**

**En kalabalık ilçeler koyu yeşil ile ifade edilmiştir.*

2.2. Veri

Çalışmada konut piyasasındaki fiyat değişiminin tespiti için kullanılan veriler, Endeksa ilan sayfasından elde edilmiştir (Endeksa, 2025). İlan sayfası mahalle bazlı emlak endeksi verilerini geriye dönük 4 yıla kadar web sayfası kullanıcılarına sunmaktadır. Dolayısıyla buradan hareketle çalışmada, analizler için kullanılacak veriler 2020 Aralık- 2024 Aralık arasında kalan 4'er aylık dönemler (Mart, Haziran, Eylül, Aralık) halinde, mahalle bazlı olarak elde edilmiş ve Microsoft Excel (*xls) programında düzenlenmiştir. Bazı mahallere ait veriler bütünsel ya da kısmen yer almamaktadır (Şekil 1a). Bu şekilde veri eksiği olan ve Şekil 1a'da gösterilen 3 mahallede (Sakarya Mahallesi, Orta İmrahor Mahallesi, Namık Kemal Mahallesi) ara değer kestirim yöntemi ile eksik veri tamamlanmıştır. Ancak çeperde yer alan mahallelerde (Akarlar Mahallesi, Evciler Mahallesi, Karahasanlı Mahallesi, Kömürcü Mahallesi, Yayla Mahallesi) bu yöntem teknik olarak uygulanamamıştır ve çalışma alanı dışında bırakılmıştır (Şekil 1b).

Mekansal analizlere altlık oluşturacak il, ilçe ve mahalle sınırları verisi, OpenStreetMap (OSM) açık verisi Overpass API kullanılarak elde edilmiştir (Raifer, 2025). 2013-2023 yılları arasında ilçelere bağlı nüfus değişiminin incelenmesi içinse Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemine (ADNKS) bağlı nüfus verileri, TÜİK istatistik veri portalından edinilmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025).



(a) Çankaya ilçesinin konumu

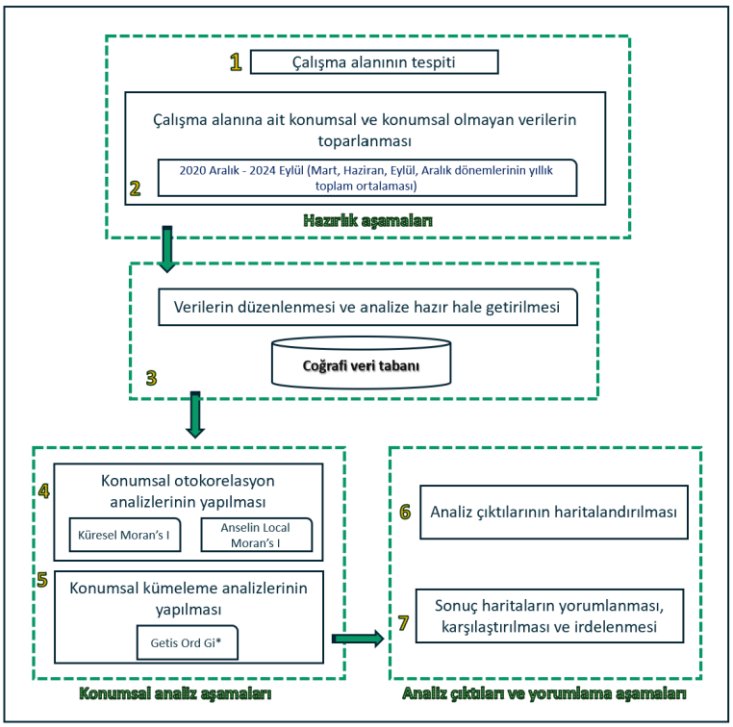
(b) Çankaya mahallelerindeki Endeksa emlak endeksi (E.E.) verilerinin mevcut durumu

Şekil 1. Çalışma alanı

3. Metodoloji

Bu çalışmada nicel veriler (konut fiyatları) mekânsal istatistik yöntemleri ile analiz edilmiştir. Kullanılan veriler ikincil veri olup, Endeksa platformundan elde edilmiştir. Mekânsal veriler (ilçe ve mahalle sınırları) OSM'den alınmış ve CBS ortamında düzenlenmiştir. Çalışmada nitel veri kullanılmamış, ancak mekânsal desenlerin yorumlanmasında piyasa dinamikleri gibi olgular tartışılmıştır. Seçilen çalışma alanı için bu çalışmada aşağıdaki adımlar yürütülmüştür: (Şekil 2)

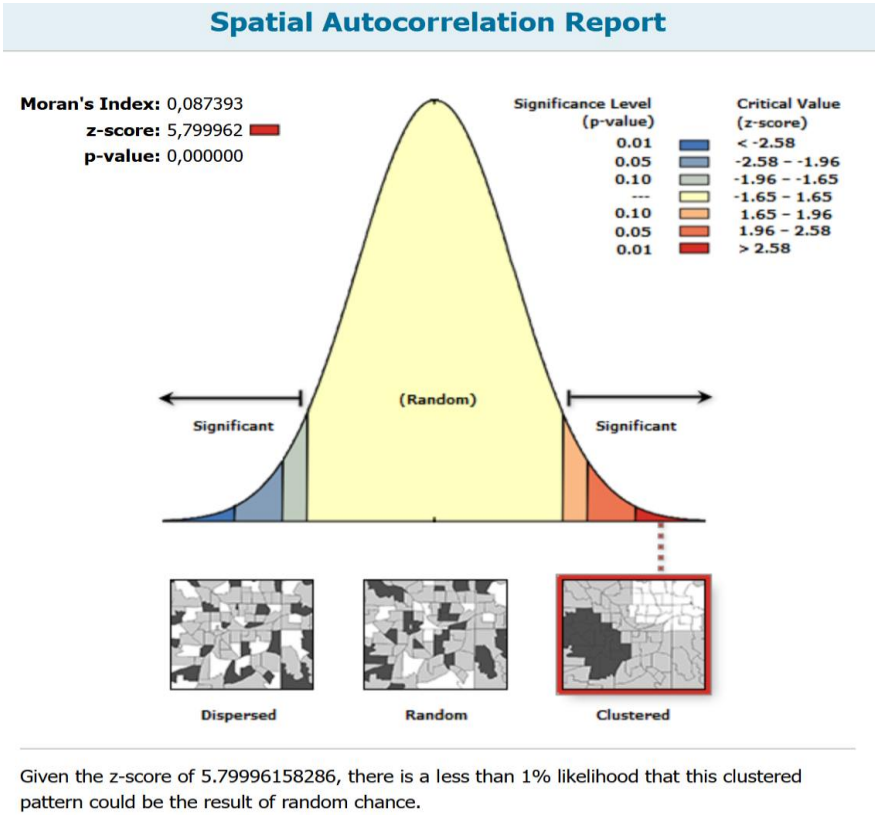
1. Çalışma alanının tespiti
2. Bölgeye ait konumsal ve konumsal olmayan verilerin toparlanması,
3. Verilerin düzenlenmesi, tek bir projeksiyon sisteminde birleştirilmesi ve Coğrafi veritabanına aktarılması
4. Konumsal otokorelasyon (Küresel Moran's I ve Lokal Anselin Local Moran's I) ile verilerin kümeleme eğiliminde olup olmadığının tespiti
5. Getis-Ord Gi* ve Anselin Local Moran's I konumsal kümeleme analizlerinin ArcGIS Pro programında yürütülmesi
6. Analiz çıktılarının haritalandırılması
7. Sonuç haritaların yorumlanması, karşılaştırılması ve irdelenmesi



Şekil 2. Çalışmanın iş akış şeması

3.1. Küresel Konumsal Otokorelasyon (Küresel Moran's I)

Konumsal Otokorelasyon (Küresel Moran'ın I'i), hem özellik konumlarına hem de özellik değerlerine dayalı olarak mekansal otokorelasyonu aynı anda ölçen global bir kümeleme istatistiklerinden birisidir. Bir dizi özellik ve ilişkili bir öznitelik verildiğinde, ifade edilen desenin kümelenmiş, dağılmış veya rastgele olup olmadığını değerlendirir. Moran'ın I Endeksi değerini ve hem z-puanı hem de p-değerini hesaplayarak bu endeksin önemini değerlendiren bir teknik niteliğindedir (Şekil 3) (ESRI, 2025a).



Şekil 3. Konumsal otokorelasyon (Küresel Moran's I'e göre) p ve z değerine göre örnek sonuçlar

Konumsal otokorelasyon, gözlemlenen endeks değerleri ile beklenen endeks değerleri hesaplayarak birbiri arasında karşılaştırır. Aralarındaki farkın anlamlı olup olmadığını gösteren bir z-skoru ve bu skora karşılık gelen tablosal istatistik değeri olan p-olasılık değeri hesaplanır ve bu değerler üzerinden sonuçlar yorumlanır. Eğer sonuç normal bir dağılım eğrisinin sol ve sağ uçlarında ise bu noktalarda çok küçük p değerleri ile çok yüksek ya da çok düşük z değerleri bulunduğunu ifade eder. Dolayısıyla bu noktalarda rastgelelik olmadığı ve anlamlı bir durumun söz konusu olduğu tespit edilir (ESRI, 2025a). ESRI (2025a)'e göre mekansal otokorelasyon için Moran I istatistiği şu şekilde ifade edilir:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^{n} {z_i}^2} \quad (1)$$

Burada z_i özellik i için bir niteliğin ortalamasından $(x_i - X)$ sapmasıdır, *wi,j* özellik i ve j arasındaki mekansal ağırlıktır, *n*, toplam özellik sayısına eşittir, S_0 ise tüm mekansal ağırlıkların toplamını ifade eder (ESRI, 2025a).

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \quad (2)$$

ESRI (2025a)'ya göre istatistik için z_I puanı şu şekilde hesaplanır:

$$z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (3)$$

Burada;

$$E\,[I] = -1\,/(n-1) \tag{4}$$

$$V\,[I] = E\,[I^2] - E\,[I]^2 \tag{5}$$

Burada, *I* istatistik veya gözlemlenen değerdir, *E[I] I* istatistiğinin beklenen değeri (ortalaması) dır, *V[I]* I istatistiğinin varyansıdır.

3.2 Lokal Konumsal Otokorelasyon (Anselin Local Moran's I)

Mekansal Otokorelasyon (Moran'ın I) istatistiği, özniteliklerin konumları ve değerleri üzerinden mekansal otokorelasyonu küresel ölçekte aynı anda değerlendirir. Ancak, bu endeks, dağılımın hangi bölgelerde kümelendiğini göstermez (Moran, 1950). Bu eksikliği gidermek amacıyla, bölgesel ölçekte dağılımın mekansal analizini yapmak için Anselin'in yerel Moran'ın I endeksi geliştirilmiştir (Anselin, 1995). Bu yöntem, her bir konum için anlamlılık testi ile bir istatistik sunar. Ayrıca, yerel istatistikler ile buna karşılık gelen küresel istatistik arasında orantılı bir ilişki kurar.

Anselin Local Moran'ın I istatistiği, ArcGIS küme ve aykırı değer analiz araçlarına uygulanarak yüksek veya düşük değerlere sahip özniteliklerin mekansal kümelerini tanımlar. Araç aynı zamanda mekansal aykırı değerleri de tespit eder. Her bir istatistiksel olarak anlamlı öznitelik için bu araç, Yerel Moran'ın I değeri, z-skoru, p-değeri ve küme türünü temsil eden bir kod hesaplar. Z-skorları ve p-değerleri, hesaplanan endeks değerlerinin istatistiksel anlamlılığını belirler (ESRI, 2025b). I istatistiği için pozitif bir değer, bir özniteliğin komşu özniteliklerle benzer şekilde yüksek ya da düşük değerlere sahip olduğunu gösterir; bu öznitelik, bir kümenin parçasıdır. Negatif bir I değeri ise, özniteliğin komşu özniteliklerle farklı değerlere sahip olduğunu belirtir; bu durumda öznitelik bir aykırı değeri temsil eder. Her iki durumda da küme veya aykırı değerin istatistiksel olarak anlamlı sayılabilmesi için özniteliğin p-değerinin yeterince küçük olması gerekir (ESRI, 2025b). Anselin'in Yerel Moran'ın I istatistiği, dört farklı kümelenme türünü ayırt eder:

HH **--** istatistiksel olarak anlamlı yüksek değerler kümesi,
LL **--** düşük değerler kümesi,
HL **--** yüksek değerin çoğunlukla düşük değerlerle çevrili olduğu aykırı değer,
LH **--** düşük değerin çoğunlukla yüksek değerlerle çevrili olduğu aykırı değer.

Anselin (1995) ve ESRI (2025b)'ye göre mekânsal ilişkinin Yerel Moran's I istatistiği şu şekilde verilmiştir:

$$I_i = \frac{x_i - X^-}{S_i^2} \sum_{j=1, j\neq i}^{n} w_{i,j}\left(x_j - X^-\right) \tag{6}$$

Burada xi, i özelliğine ait bir niteliktir, X ¯ ilgili niteliğin ortalamasıdır, wi,j ise i ve j özellikleri arasındaki ağırlıktır:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j\neq i}^{n}(x_j - X^-)^2}{n-1} \tag{7}$$

İstatistikler için z_{I_i} skoru şu şekilde hesaplanır:

$$z_{I_i} = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}} \tag{8}$$

Burada,

$$E[I_i] = -\frac{\sum_{j=1, j\neq i}^{n} w_{ij}}{n-1} \tag{9}$$

$$V[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2 \tag{10}$$

3.3. Mekansal Kümeleme Yöntemi (Getis-Ord Gi*)

Getis-Ord Gi* istatistiği, riskli bölgelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, her bir kaza olayı için z-skoru ve buna karşılık gelen p-değeri içeren yeni bir çıktı veri kümesi oluşturur. Getis-Ord Gi* fonksiyonu, istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak noktayı hem yüksek değerlere sahip olan hem de yüksek değerli komşularla çevrili bir konum olarak tanımlar. Bir öznitelik ve onun komşularının yerel toplamı, tüm çalışma alanındaki toplam değerle orantılı biçimde karşılaştırılır. Elde edilen yerel toplam, beklenenden anlamlı şekilde farklıysa ve bu fark tesadüfen oluşamayacak kadar büyükse, sonuç yüksek bir z-skoru ve düşük bir p-değeriyle ifade edilir. Bu durum, analiz edilen alanın istatistiksel olarak anlamlı bir sıcak nokta (veya soğuk nokta) olduğunu gösterir. Bu durum, istatistiksel olarak anlamlı bir yüksek yoğunlaşmayı (kümeleşmeyi) ortaya koymaktadır (Getis & Ord, 1992; Ord & Getis, 1995; ESRI, 2025c). Başka bir deyişle, veri kümesindeki her bir öznitelik için hesaplanan Gi* istatistiği bir z-skoru olarak ifade edilir. İstatistiksel olarak anlamlı pozitif z-skorlarında, z-skoru ne kadar yüksekse, yüksek değerlerin (sıcak noktaların) kümelenmesi o kadar yoğundur. Benzer şekilde, istatistiksel olarak anlamlı negatif z-skorlarında ise, z-skoru ne kadar düşükse, düşük değerlerin (soğuk noktaların) kümelenmesi o kadar yoğundur (Getis & Ord, 1992; Ord & Getis, 1995). Getis & Ord (1992) ve Ord & Getis (1995)'e göre Getis-Ord yerel istatistiği şu şekilde ifade edilir:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{S\sqrt{\frac{[n\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^{n} w_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (11)$$

Burada, x_i öznitelik j için olan değeridir, w_{ij} öznitelik i ile j arasındaki mekansal ağırlıktır, n ise toplam öznitelik sayısını ifade eder.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n} \quad (12)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (13)$$

Gi* istatistiği, doğrudan bir z-skoru olarak hesaplanır; ek bir işleme gerek yoktur. Bu istatistik, her bir öznitelik için bir z-değeri üretir. Daha yüksek z-değerleri, daha uzun bir zaman diliminde meydana gelen herhangi bir olayın kümelendiğini gösterirken, daha düşük z-değerleri ise, belirli bir alan çevresinde daha kısa bir sürede gerçekleşen çok sayıda olaya işaret eder.

4. Bulgular

4.1 Konut Fiyatlarına Ait Değerlerin İstatistik Değerlendirmesi

Ankara ili Çankaya ilçesine ait temin edilen veriler ile bu bölümde öncelikle istatistiksel sorgulamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Çankaya ilçesinde bulunan Akarlar Mahallesi, Evciler Mahallesi, Karahasanlı Mahallesi, Kömürcü Mahallesi, Yayla Mahallesi hariç tüm mahalleler için elde edilen konut satış fiyatları ile ortalama, maksimum, minimum ve standart sapma gibi analizler yürütülerek mevcut satışların istatistiği irdelenmiştir (Tablo 3). Buna göre maksimum fiyat yıllar arasında katlanarak artarken, minimum ve maksimum arasında ayırt edici fiyatlamanın 2023 ve 2024 yıllarında ortaya çıktığını göstermektedir.

Tablo 3. Konut satış fiyatlarının zamana bağlı istatistiksel değerlendirme sonuçları

Yıl	**Minimum** (TL/m^2)	**Maksimum** (TL/m^2)	**Ortalama** (TL/m^2)	**Standart sapma** (TL/m^2)
2020	1775	10986	3679.56	1446.98
2021	1585	14085	4565.37	2034.95
2022	3756	31431	12086.45	4755.20
2023	9513	59360	24318.02	8328.58
2024	11801	95450	33244.08	13106.39

4.2 Küresel Konumsal Otokorelasyon Analiz Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde konumsal otokorelasyon analizi konut satışlarının belirlendiği tüm yıllar için ayrı ayrı yürütülmüştür ve analiz için kullanılan verinin kümelene eğilimi gösterip göstermediği tespit edilmiştir. Analiz için, Küresel Moran's I (Spatial autocorrelation) istatistiği ele alınmış ve yöntemde komşuluk ilişkileri ilkesinde ters mesafe yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen z ve p değeri ile analizlerde kullanılacak verilerin kümeleme eğiliminde olduğu hatta yüksek anlamlılık düzeyinde mevcut olduğu kümelendiği gözlemlenmektedir. ArcGIS Pro programında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına ait konumsal otokorelasyon değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

2020-2024 yılları arasındaki mekânsal otokorelasyon düzeylerini gösteren Tablo 4, her yıl için Moran-I değeri, beklenen değer, varyans, z-skoru ve p değerini sunmaktadır. Bu çizgeye göre tüm yıllarda Moran-I değeri 0'ın üzerinde ve beklenen değerden oldukça uzaktır. Bu sonuç pozitif mekânsal otokorelasyona işaret etmektedir. Başka bir deyişle konut fiyatlarının mekânsal kümelenme eğilimi olduğunu göstermektedir. Z-skoru her yıl için yüksektir ve p-değeri 0'dır. Bu da konu fiyatlarındaki mekânsal desenin rastlantısal olmadığını mekânsal dağılımın anlamlı olduğunu anlatır. Moran-I değeri en yüksek 2022 yılında görülürken, 2023 ve 2024 yıllarında biraz daha düşüktür. Bu durum, fiyatlardaki mekânsal desenin zamanla biraz azaldığını, ancak hala yüksek oranda seyrettiğini göstermektedir.

Tablo 4. Konut satış fiyatlarının yıllara bağlı konumsal otokorelasyon sonuçları

Yıl	Moran's Index	Expected Index	Variance	z-score	p-value
2020	0,17439	-0,00862	0,00038	9,45344	0,0000
2021	0,21534	-0,00862	0,00038	11,5350	0,0000
2022	0,23501	-0,00862	0,00038	12,4587	0,0000
2023	0,21758	-0,00862	0,00038	11,5979	0,0000
2024	0,19291	-0,00862	0,00038	10,4067	0,0000

4.3 Lokal Konumsal Otokorelasyon Analiz Sonuçları (Anselin Local Moran's I)

Çalışmanın bu aşamasında, kümeleme eğilimi gösteren veriler kullanılarak yıllara göre (2020-2024) konut satış fiyatlarına bağlı olarak analiz için, Anselin Local Moran's I (Kümeleme ve Aykırılık) istatistiği ele alınmış ve yöntemde komşuluk ilişkileri ilkesinde yine ters mesafe yöntemi kullanılmıştır (Şekil 4). Elde edilen sonuçlar Yüksek-Yüksek (HH), Yüksek-Düşük (HL), Düşük-Yüksek (LH) ve Düşük-Düşük (LL) olarak elde edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, kırmızı alanlar konut fiyatlarının zamana bağlı olarak yüksek seyrettiği bölgeleri; mavi alanlar düşük fiyatlı bölgeleri göstermektedir. Ara tonlar ise istatistiksel olarak aykırı değerleri temsil etmektedir.

Elde edilen sonuç çıktıları, Yüksek-Yüksek kümelenmelerin yüksek konut fiyatına sahip olan mahallelerin, aynı zamanda yüksek konut fiyatına sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğu alanlar olduğu göstermektedir. Düşük-Düşük kümelemeler, düşük konut fiyatına sahip olan mahallelerin, aynı zamanda düşük konut fiyatına sahip olan komşu mahalleler ile çevrili olduğu alanlar olduğu göstermektedir. Bunun yanında, Yüksek-Düşük aykırılıklar, yüksek konut fiyatına sahip olan mahallelerin, aynı zamanda düşük konut fiyatına sahip olan komşu mahalleler; Düşük-Yüksek aykırılıklar ise düşük konut fiyatına sahip olan mahallelerin, aynı zamanda yüksek konut fiyatına sahip olan komşu mahallelerle çevrelendiğini ifade etmektedir.

2020 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, Yüksek-Yüksek kümelemenin 13 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Üniversiteler, Ahlatlıbel, Beytepe, Alacaatlı ve Söğütözü mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Bu yıl içinde düşük-düşük kümelemelerin ise 63 mahallede meydana geldiği bu mahallelerin de çoğunlukla Çankaya ilçesinin merkezine ve kuzeydoğuda yer alan mahallelere denk geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca 13 mahallede (Yücetepe, Remzi Oğuz Arık, Güvenevler, Aziziye, Güzeltepe, Yıldızevler, Hilal, Çankaya, Gaziosmanpaşa, Barbaros, Büyükesat, Kazım Özalp, 50. Yıl mahalleleri) yüksek-düşük kümeleme ile yüksek konut alım-satım noktaların etrafında düşük alım-satımların yer aldığı söylenebilir.

2021 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, Yüksek-Yüksek kümelemenin ise 12 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Beytepe, Alacaatlı, Söğütözü ve Çukurambar mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Bu yıl içinde düşük-düşük kümelemelerin ise 61 mahallede meydana geldiği bu mahallelerin de çoğunlukla Çankaya ilçesinin merkezine ve kuzeydoğusunda yer alan mahallelere denk geldiği gözlemlenmektedir.

Ayrıca 12 mahallede (Anıttepe, Yücetepe, Ayrancı, Güzeltepe, Remzi Oğuz Arık, Güvenevler, Aziziye, Çankaya, Gaziosmanpaşa, Barbaros, Büyükesat ve Kazım Özalp mahalleleri) yüksek-düşük kümeleme ile yüksek konut alım-satım noktaların etrafında düşük alım-satımların yer aldığı söylenebilir.

2022 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, Yüksek-Yüksek kümelemenin ise 14 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Beytepe, Alacaatlı, Ahlatlıbel, Söğütözü, Çukurambar ve Emek mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Bu yıl içinde düşük-düşük kümelemelerin ise 50 mahallede meydana geldiği bu mahallelerin de çoğunlukla Çankaya ilçesinin merkezine ve sağ üst köşede yer alan mahallelere denk geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca 13 mahallede (Yücetepe, Maltepe, Namık Kemal, Kavaklıdere, Remzi Oğuz Arık, Güvenevler, Aziziye, Çankaya, Gaziosmanpaşa, Barbaros, Büyükesat, Kazım Özalp ve Hilal mahalleleri) yüksek-düşük kümeleme ile yüksek konut alım-satım noktaların etrafında düşük alım-satımların bunun yanında 2 mahallede (Balgat ve Oğuzlar mahalleleri) de düşük-yüksek kümeleme ile düşük konut alım-satım noktaların etrafında yüksek alım-satımların yer aldığı söylenebilir.

2023 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, Yüksek-Yüksek kümelemenin ise 14 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Beytepe, Alacaatlı, Ahlatlıbel, Üniversiteler, Söğütözü ve Çukurambar mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Bu yıl içinde düşük-düşük kümelemelerin ise 59 mahallede meydana geldiği bu mahallelerin de çoğunlukla Çankaya ilçesinin merkezine ve kuzeydoğusunda yer alan mahallelere denk geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca 12 mahallede (Anıttepe, Yücetepe, Remzi Oğuz Arık, Güvenevler, Aziziye, Güzeltepe, Barbaros, Çankaya, Gaziosmanpaşa, Kazım Özalp, Büyük Esat ve Karataş mahalleleri) yüksek-düşük kümeleme ile yüksek konut alım-satım noktaların etrafında düşük alım-satımların yer aldığı söylenebilir.

2024 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, Yüksek-Yüksek kümelemenin ise 11 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Beytepe, Alacaatlı ve Söğütözü mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Bu yıl içinde düşük-düşük kümelemelerin ise 60 mahallede meydana geldiği bu mahallelerin de çoğunlukla Çankaya ilçesinin merkezine ve kuzeydoğusunda yer alan mahallelere denk geldiği gözlemlenmektedir. Ayrıca 13 mahallede (Yücetepe, Remzi Oğuz Arık, Güvenevler, Aziziye, Çankaya, Güzeltepe, Barbaros, Yıldızevler, Gaziosmanpaşa, Büyükesat, Esatoğlu, Kazım Özalp ve Karataş mahalleleri) yüksek-düşük kümeleme ile yüksek konut alım-satım noktaların etrafında düşük alım-satımların bunun yanında 1 mahallede (Yakupabdal Mahallesi) de düşük-yüksek kümeleme ile düşük konut alım-satım noktaların etrafında yüksek alım-satımların yer aldığı söylenebilir.

Elde edilen çıktılar incelendiğinde yüksek-yüksek kümeleme alanlarının yıllar içinde pek çok yerde benzer olduğunu bunun yanında düşük-düşük kümelemelerinin de çokça yerde aynı mahallelere düştüğünü göstermiştir. Bunun yanında düşük-yüksek kümeleme alanlarının ise yıllar içinde yalnızca 2022 ve 2024 yıllarında gözlemlendiği tespit edilmiştir.

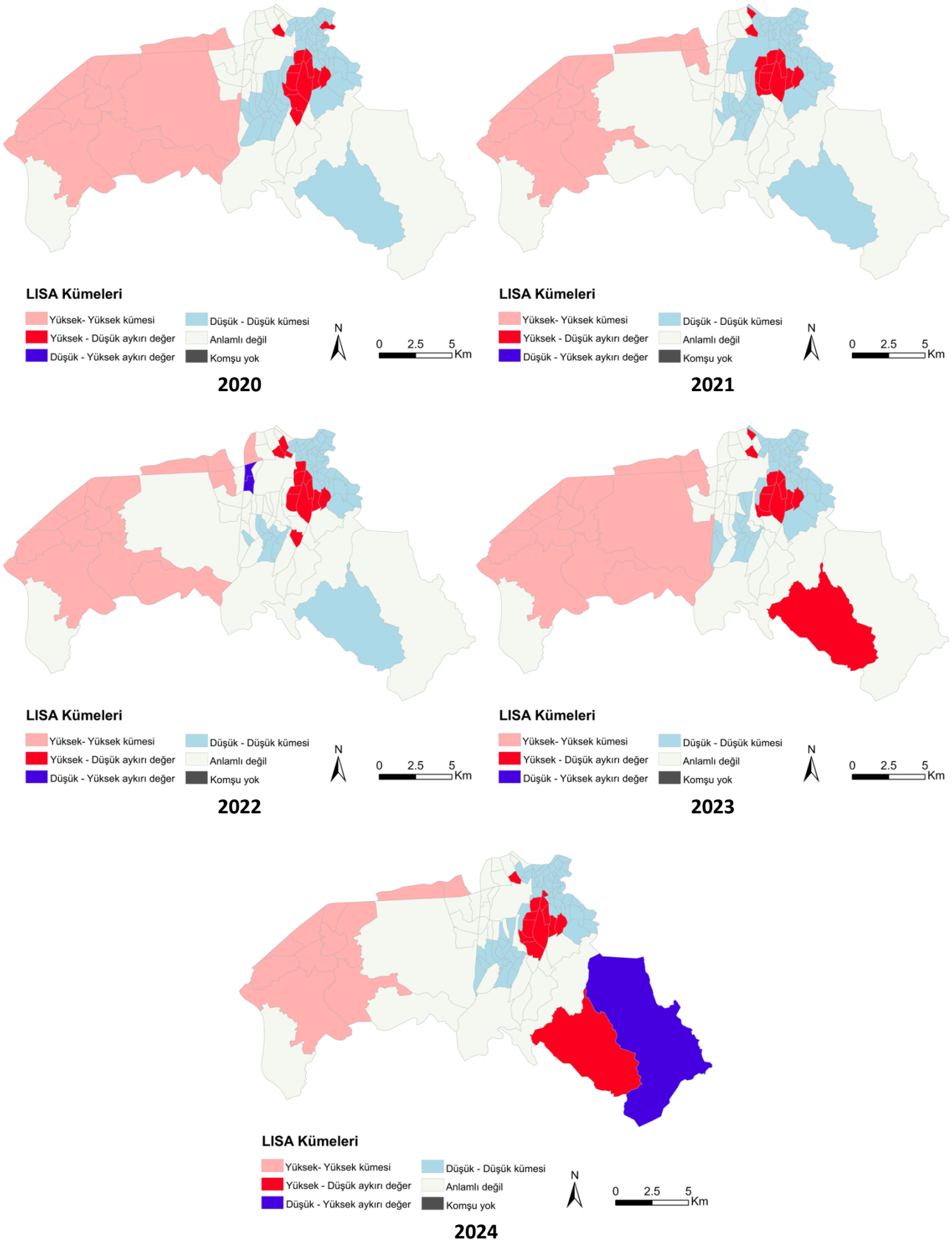
4.4. Konumsal Kümeleme Analiz Sonuçları (Getis-Ord Gi*)

Çalışmanın bu aşamasında, kümeleme eğilimi gösteren veriler kullanılarak yıl yıl (2020-2024) konut satış fiyatlarına bağlı olarak analiz için, Getis-Ord Gİ* (Sıcak nokta analizi) istatistiği ele alınmış ve yöntemde komşuluk ilişkileri ilkesinde ters mesafe yöntemi kullanılmıştır (Şekil 5). Sonuçlar %90, %95 ve %99 güven aralıklarında sunulmuştur. Diğer yöntem ile kıyaslamak içinse sonuçlardan %99 güven aralığı dikkate alınarak her yıl ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır. Dolayısıyla kırmızı olarak tespit edilen alanların konut satışlarında fiyat değişimin en fazla olduğu alanları gösterirken mavi olan noktaların ise daha az olduğu noktalar olduğu söylenebilir.

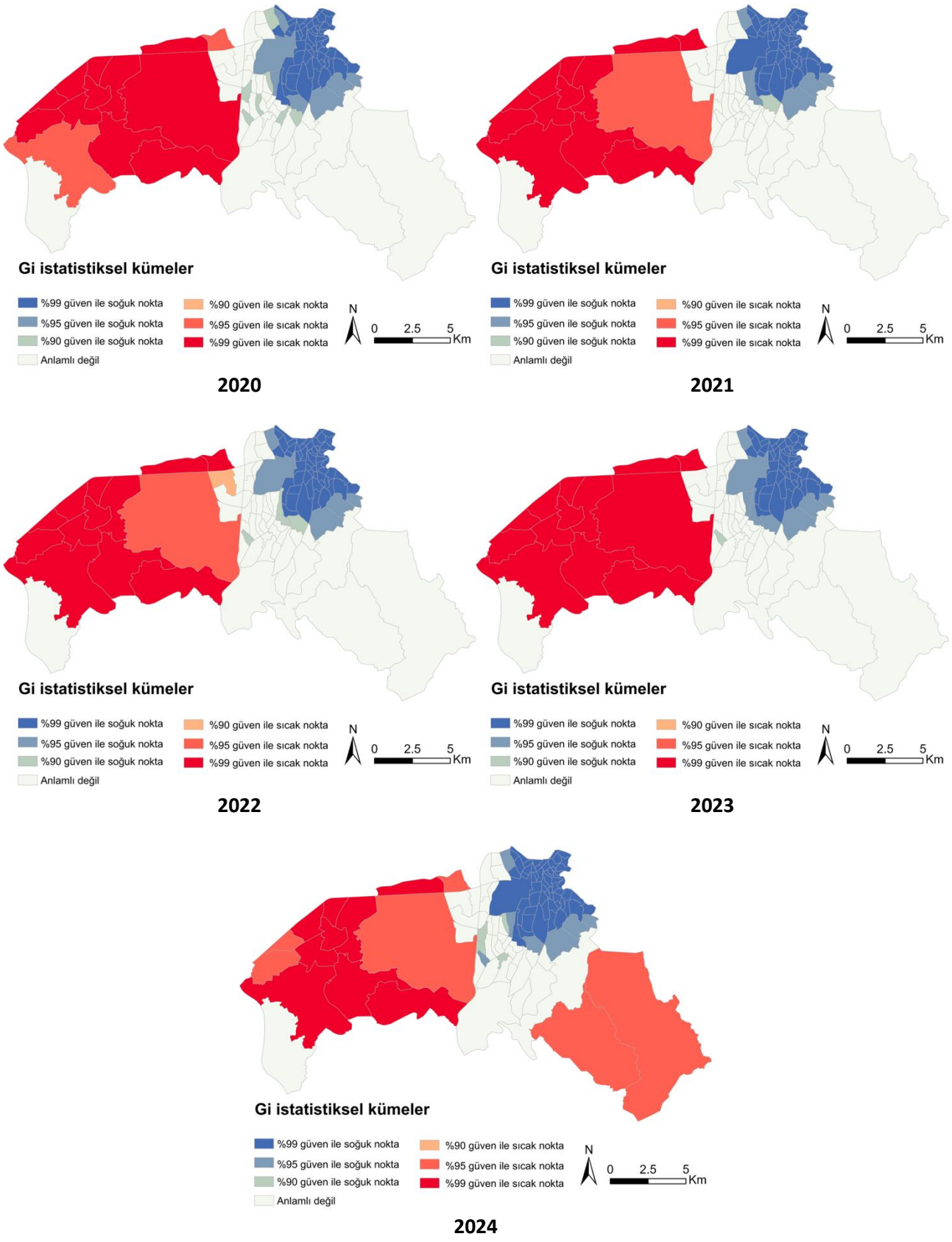
2020 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, konut piyasasındaki fiyat değişiminin en fazla kırmızı renkle gözüken 11 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Üniversiteler, Ahlatlıbel, Beytepe mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Buna karşılık en az yoğun olan noktaların mavi renkle gösterilmiş olan 54 mahallede yer aldığı, bu noktaların ise çalışma alanının genellikle kuzeydoğusunda yer alan mahallelere denk geldiği gözükmektedir.

2021 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, konut piyasasındaki fiyat değişiminin en fazla kırmızı renkle gözüken 12 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Ahlatlıbel, Beytepe, Söğütözü ve Alacaatlı mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Buna karşılık en az yoğun olan noktaların mavi renkle gösterilmiş olan 56 mahallede yer aldığı, bu noktaların ise yine çalışma alanının genellikle kuzeydoğusundaki mahallelere denk geldiği gözükmektedir.

2022 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, konut piyasasındaki fiyat değişiminin en fazla kırmızı renkle gözüken 12 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Ahlatlıbel, Beytepe, Söğütözü ve Alacaatlı mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Buna karşılık en az yoğun olan noktaların mavi renkle gösterilmiş olan 55 mahallede yer aldığı, bu noktaların ise çalışma alanının genellikle yine kuzeydoğundaki mahallelere denk geldiği gözükmektedir.



Şekil 4. Anselin Local Moran's I analiz sonuçları



Şekil 5. Getis-Ord Gi* analiz sonuçları

2023 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, konut piyasasındaki fiyat değişiminin en fazla kırmızı renkle gözüken 13 mahallede: Yaşamkent, Konutkent, Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Ahlatlıbel, Beytepe, Üniversiteler, Söğütözü ve Alacaatlı mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Buna karşılık en az yoğun olan noktaların mavi renkle gösterilmiş olan 55 mahallede yer aldığı, bu noktaların ise çalışma alanının genellikle yine kuzeydoğusundaki mahallelere denk geldiği gözükmektedir.

2024 yılına ait analiz sonuçları dikkate alındığında, konut piyasasındaki fiyat değişiminin en fazla kırmızı renkle gözüken 9 mahallede: Koru, Ümit, Prof. Dr. Ahmet Taner Kışlalı Mah., Çayyolu, Mutlukent, Mustafa Kemal, Ahlatlıbel, Beytepe ve Alacaatlı mahallelerinde yüksek anlamlılık düzeylerinde olduğu tespit edilmektedir. Buna karşılık en az yoğun olan noktaların mavi renkle gösterilmiş olan 57 mahallede yer aldığı, bu noktaların ise çalışma alanının genellikle yine kuzeydoğusundaki mahallelere denk geldiği gözükmektedir.

Elde edilen çıktılar incelendiğinde sıcak nokta alanlarının yıllar içinde genel olarak aynı noktalara denk geldiğini ancak son yıllarda sayısının mahalle bazında azaldığı görülmektedir. Özellikle 2024 yılında diğer yıllarda yüksek konut fiyatlarının gözüktüğü Yaşamkent ve Konutkent mahallerinde düşüşün meydana geldiği gözlemlenmektedir.

5. Sonuçlar ve İrdeleme

Bu çalışma, literatürde sıcak nokta (hot spot) ve lokal otokorelasyon analizlerinin birlikte yürütülerek konut fiyatlarındaki lokal değişimlerin karşılaştırmalı biçimde ortaya konulduğu çalışmaların azlığından hareketle geliştirilmiştir. Çalışmanın, Getis-Ord Gi* ve Anselin Local Moran's I yöntemlerini ön planda tutarak analiz ve çıktılar üretmesi, Barreca vd. (2018), Aydınoğlu vd. (2021), Souza vd. (2021), Iliopoulou ve Feloni (2022) ve Liu ve Strobl (2023) gibi çalışmalarda kullanılan yöntemlerle benzerlik göstermektedir. Ancak söz konusu çalışmaların çoğu Avrupa, Çin veya Güney Amerika kentlerine odaklanırken; bu araştırma Ankara özelinde mahalle ölçeğinde yürütülerek bölgesel ve ölçeksel açıdan farklılık ortaya koymaktadır. Bu yönüyle, yöntemsel benzerlikler taşısa da konunun Türkiye bağlamında ele alınması, literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Tablo 1'deki diğer araştırmalar incelendiğinde, konut fiyatlarındaki mekânsal değişimlerin tespitinde yalnızca konumsal kümeleme yöntemlerinin değil, aynı zamanda hedonik modeller (Basu & Thibodeau, 1998; Boza, 2015), coğrafi ağırlıklı regresyon (Bitter vd., 2007; Genç, 2021; Güneş & Apaydın, 2022), zamansal/mekânsal modeller (Huang vd., 2010; Liu vd., 2020) ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin (Iban, 2022; Alkan vd., 2023) de sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bu çeşitlilik, konut fiyat analizlerinde yöntemsel zenginliği ve potansiyel araştırma alanlarını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan sıcak nokta ve lokal otokorelasyon teknikleri, mevcut literatürdeki istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yanında tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

Diğer açıdan, bu çalışmada farklı mekânsal istatistik teknikleri ile Ankara'nın en yüksek nüfusa sahip Çankaya ilçesine ait konut satış fiyatları mahalle bazlı olarak araştırılmıştır. Çalışma ilçenin Ankara merkezine nispeten uzak olan batı kesimindeki konut kullanımının yoğun olduğu mahallelerde konut satış fiyatı bakımından tutarlı bir benzerlik olduğunu göstermektedir. Yıllara göre bu benzerlik farklılaşsa da merkeze nispeten uzak ve hala konut üretiminin yüksek oranda aktif olduğu Yaşamkent Mahallesi gibi alanlarda fiyat dalgalanmaları olduğu görülmüştür. Konumsal kümeleme analizi ile ortaya konulan bir başka çıktı ise mekânsal komşuluk ilişkilerine göre merkez bölgelerde konut fiyatlarında yüksek-düşük sınıflarının hemen her yıl görülmesidir. Buna karşın merkeze nispeten uzak olan batı kesiminde yüksek-yüksek sınıfı görülmektedir. Çankaya ilçesinde öne çıkan bir diğer alan ise kuzeydoğu bölgesinde yer alan ve düşük-düşük fiyat ile kümelenen bölgedir. Bu düşük fiyatlı bölge Ankara'nın yüksek fiyatlı merkez mahallelerini sarmaktadır.

Lokal konumsal otokorelasyonda "yüksek-düşük" olarak tanımlanan mahalleler, komşu mahallelere göre fiyatlarının yüksek olduğu alanları temsil etmektedir. Bu durum, teoride baz alınan Tobler'in Birinci Coğrafya Yasası'na aykırı bir sonuç ortaya koymaktadır. Özellikle kent merkezine yakın mahallelerde görülen bu yüksek-düşük alanlar; sosyal donatı alanlarına yakınlık, erişilebilirlik gibi özelliklerle doğrudan açıklanabilir. Bazı yıllarda ortaya çıkan "yüksek-düşük" tanımlı mahallelerdeki durum ise yeni kentsel dönüşüm projeleri ve altyapı yatırımları (ulaşım, enerji, çevre, sosyal ve kültürel) ile ilişkilendirilebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yıllara göre değişim gösterebilen bu alan tanımlarının nedenselliği bu kapsamlar çerçevesinde değerlendirilecektir.

Bu çalışma konut fiyatlarını yıllık bazda inceleyerek konut fiyatlarındaki lokal değişimleri mekânsal olarak ortaya koymaktadır. Çalışma sonuçları Çankaya ilçesinin batısındaki mahallelerin birçoğunda tutarlı bir fiyat hareketi görürken, merkez ve merkezi saran mahallelerde yıllar içerisinde fiyat açısından birbirinden ayrıklaşan mahalleler görülmektedir. Bu çalışma sonuçları kullanılan veri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle veri kaynağındaki veri eksiklikleri çalışmanın limitlerinden biridir. Ayrıca kullanılan veri gerçek konut alım fiyatlarını değil konut için talep edilen satış fiyatlarını yansıtmaktadır. Bu nedenle talep edilen konut fiyatları verisinde bölgesel manipülasyonlar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlara ek olarak mahalle bazlı konut arz oranı bilinmemektedir. Bu da verideki yanlılığın araştırılmasının önüne geçmektedir. Çalışma kentsel konut fiyat dinamiklerinin mekânsal olarak anlaşılması için yöntem ortaya koymaktadır.

Bu dinamiklerin anlaşılması konut fiyatlarının emsal yöntemi ile belirlenmesinde dikkat çekici bir girdi olarak kullanılabilir. Ayrıca konut fiyatlarının yıllara göre farklılaşması yatırımcıların risk alma seviyelerine göre tercihlerini yönlendirici bilgiler sunabilir.

Çalışmada kullanılan mahalle bazında birim metrekare fiyatları (TL/m^2) Endeksa web sitesinden elde edilmiştir. Mahalle bazlı yapılan bu araştırma kapsamında konut tipi (müstakil, apartman), oda sayısı (1+1, 2+1, 3+1) gibi özellikler göz ardı edilmiştir. Bu tür bilgiler çoğunlukla mahalle bazlı konut arzındaki talep yönelimini ölçmek açısından önemli katkılarda bulunabilir. Ayrıca yapılı çevrenin tasarımı, sosyal donatıların ve ulaşım hatlarının varlığı ve erişilebilirliği gibi bir çok özellik konut fiyatlarındaki bu farklılıkları açıklamak için önemli girdilerdir. Gelecek çalışmalarda konutun tipi, oda sayısı, yapılı çevre, sosyal donatı, ulaşım gibi özellikler göz önünde bulundurularak, konut fiyatlarındaki değişimlerin bu özelliklerle açıklanabilirliği sorgulanacaktır.

Kaynaklar

Alkan, T., Dokuz, Y., Ecemiş, A., Bozdağ, A., & Durduran, S. S. (2023). Using machine learning algorithms for predicting real estate values in tourism centers. *Soft Computing*, *27*(5), 2601–2613. https://doi.org/10.1007/s00500-022-07579-7

Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, *27*(2), 93–115. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

Aydınoğlu, A. Ç., Şişman, S., & Yılmaz, Y. (2021). Taşınmaz Yönetiminde Arsa Rayiç Değerindeki Zamansal Değişimin Konumsal Analiz Teknikleri ile İncelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, *21*(3), 606–619. https://doi.org/10.35414/akufemubid.892510

Bagheri, B., & Shaykh-Baygloo, R. (2021). Spatial analysis of urban smart growth and its effects on housing price: The case of Isfahan, Iran. *Sustainable Cities and Society*, *68*, Article 102769. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102769

Barreca, A., Curto, R., & Rolando, D. (2018). Housing vulnerability and property prices: Spatial analyses in the turin real estate market. *Sustainability*, *10*(9), Article 30368. https://doi.org/10.3390/su10093068

Basu, S., & Thibodeau, T. G. (1998). Analysis of Spatial Autocorrelation in House Prices. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, *17*(1), 61–85. https://doi.org/10.1023/A:1007703229507

Bitter, C., Mulligan, G. F., & Dall'erba, S. (2007). Incorporating spatial variation in housing attribute prices: A comparison of geographically weighted regression and the spatial expansion method. *Journal of Geographical Systems*, *9*(1), 7–27. https://doi.org/10.1007/s10109-006-0028-7

Boza, E. (2015). *Investigation of housing valuation models based on spatial and non-spatial techniques* [PhD thesis, Middle East Technical University]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Cao, K., Diao, M., & Wu, B. (2019). A Big Data–Based Geographically Weighted Regression Model for Public Housing Prices: A Case Study in Singapore. *Annals of the American Association of Geographers*, *109*(1), 173–186. https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1470925

Cellmer, R., Bełej, M., & Konowalczuk, J. (2019). Impact of a vicinity of airport on the prices of single-family houses with the use of geospatial analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(11), Article 471. https://doi.org/10.3390/ijgi8110471

de Bruyne, K., & van Hove, J. (2013). Explaining the spatial variation in housing prices: An economic geography approach. *Applied Economics*, *45*(13), 1673–1689. https://doi.org/10.1080/00036846.2011.636021

Eğdemir, F. G. (2001). *İstanbul'da konut fiyatlarının mekansal analizi* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Endeksa. (2025). *Ankara ili Çankaya ilçesi konut satış fiyatları*. 17 Ocak 2025'te https://www.endeksa.com/tr/ adresinden alındı.

Erçetin, C. (2022). Konut sorununa geçmişten bir bakış: yerel yönetimler ve konut sunumu. *İDEALKENT*, *13*(37), 1410–1429. https://doi.org/10.31198/idealkent.1177401

ESRI. (2025a). *How Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) works.* 11 Nisan 2025'te https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/ spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm adresinden alındı.

ESRI. (2025b). *How Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I) works*. 11 Nisan 2025'te https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-m.htm adresinden alındı.

ESRI. (2025c). *How Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*) works.* 11 Nisan 2025'te https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/ h-how-hot-spot-analysis-getis-ord-gi-spatial-stati.htm adresinden alındı.

Genç, N. (2021). *Konut taşınmazların değerini etkileyen faktörlerin coğrafi ağırlıklandırılmış regresyon analizi ile CBS tabanlı irdelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, *24*(3), 189–206. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x

Güneş, T., & Apaydın, A. (2022). Spatial Heterogeneity in Housing Market: Ankara Metropolitan Area. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *63*, 9–15. https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.1122568

Habash, A. Al, & Unanoğlu, M. (2022). Factors Influencing Prices of Residential Real Estate in Turkey. *Florya Chronicles of Political Economy*, *8*(2), 153–172. https://doi.org/10.17932/iau.fcpe.2015.010/fcpe_v08i2002

Hanink, D. M., Cromley, R. G., & Ebenstein, A. Y. (2012). Spatial Variation in the Determinants of House Prices and Apartment Rents in China. *Journal of Real Estate Finance and Economics*, *45*(2), 347–363. https://doi.org/10.1007/s11146-010-9262-3

Hazer, A., Bozdağ, A., & Atasever, Ü. H. (2024). Hiper-optimize edilmiş makine öğrenim teknikleri ile taşınmaz değerlemesi, Yozgat Kenti örneği. *Geomatik*, *9*(3), 299–312 https://doi.org/10.29128/geomatik.1454915

Hu, S., Yang, S., Li, W., Zhang, C., & Xu, F. (2016). Spatially non-stationary relationships between urban residential land price and impact factors in Wuhan city, China. *Applied Geography*, *68*, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.01.006

Huang, B., Wu, B., & Barry, M. (2010). Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International Journal of Geographical Information Science*, *24*(3), 383–401. https://doi.org/10.1080/13658810802672469

Iban, M. C. (2022). An explainable model for the mass appraisal of residences: The application of tree-based Machine Learning algorithms and interpretation of value determinants. *Habitat International*, *128*, Article 102660. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102660

Iliopoulou, P., & Feloni, E. (2022). Spatial Modelling and Geovisualization of House Prices in the Greater Athens Region, Greece. *Geographies*, *2*(1), 111–131. https://doi.org/10.3390/geographies2010008

Kok, S. H., Ismail, N. W., & Lee, C. (2018). The sources of house price changes in Malaysia. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, *11*(2), 335–355. https://doi.org/10.1108/IJHMA-04-2017-0039

Kutsal, S., & Polatoğlu, Ç. (2023). Türkiye'de artan konut ihtiyacı ve konut sorununun dinamikleri. *Topkapı Sosyal Bilimler Dergisi, 2*(1), 133–158.

Li, S., Ye, X., Lee, J., Gong, J., & Qin, C. (2017). Spatiotemporal Analysis of Housing Prices in China: A Big Data Perspective. *Applied Spatial Analysis and Policy*, *10*(3), 421–433. https://doi.org/10.1007/s12061-016-9185-3

Liu, F., Min, M., Zhao, K., & Hu, W. (2020). Spatial-Temporal variation in the impacts of urban infrastructure on housing prices in Wuhan, China. *Sustainability*, *12*(3), Article 1281. https://doi.org/10.3390/su12031281

Liu, N., & Strobl, J. (2023). Impact of neighborhood features on housing resale prices in Zhuhai (China) based on an (M)GWR model. *Big Earth Data*, *7*(1), 146–169. https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2031543

Manganelli, B., Pontrandolfi, P., Azzato, A., & Murgante, B. (2014). Using geographically weighted regression for housing market segmentation. *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*, *9*(2), 161–177. https://doi.org/10.1504/IJBIDM.2014.065100

Memiş, S. (2019). Tüketicilerin Konut Tercihini Etkileyen Faktörlerin AHP İle Ölçülmesi: Giresun İli Örneği. *Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi*, *7*(16), 783–796. https://doi.org/10.33692/avrasyad.543867

Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, *37*(1–2), 17–23. https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.17

Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis*, *27*(4), 286–306. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x

Raifer, M. (2025). *Overpass API*. 11 Nisan 2025'te https://overpass-turbo.eu/index.html adresinden alındı.

Sadaa, D. A. (2024). *Developing a GIS tool to analyze housing price variability in urban regions case study: Ankara* [Master thesis, Middle East Technical University]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Sarkar, A., & Jana, A. (2023). Interpreting the energy choices and environmental satisfaction determinants in low-income housing typologies: Cases from slums and slum rehabilitation housing of Mumbai, India. *Cities*, *143*, Article 104576. https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104576

Şişman, S., & Aydınoğlu, A. C. (2022). Improving performance of mass real estate valuation through application of the dataset optimization and Spatially Constrained Multivariate Clustering Analysis. *Land Use Policy*, *119*, Article 106167. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106167

Souza, T. G. D., Fonseca, F. D. R., Fernandes, V. D. O., & Pedrassoli, J. C. (2021). Exploratory spatial analysis of housing prices obtained from web scraping technique. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, *43*(B4-2021), 135–140. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-135-2021

Soylu, A. T., & Kaynak, S. (2024). Konut Fiyatları ve Değişkenliğinin Modellenmesi: Türkiye Örneği. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, *10*(2), 195–214.

Tobler, W. (2004). On the first law of geography: A reply. *Annals of the Association of American Geographers, 94*(2), 304–310. https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.2004.09402009.x

Toprak, M. F., & Güngör, O. (2023). Kayseri'de çoklu regresyon ve coğrafi ağırlıklı regresyon yöntemleri ile konutların toplu değerlemesi. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, *4*(1), 114–124.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025a). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS).* 11 Nisan 2025'te https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr adresinden alındı.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025b). *Konut Satış İstatistikleri*. 11 Nisan 2025'te https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr adresinden alındı.

Tuna, M. F., Türk, T., & Kitapçı, O. (2015, 25–28 Mart). *Lineer Regresyon ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Yardımıyla Ev Fiyatlarının Tahmin Edilmesi: Ankara Örneği* [Bildiri sunumu]. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.

UN-Habitat. (2009). *The Right to Adequate Housing. Fact Sheet No. 21/Rev.1*. Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights (OHCHR). https://unhabitat.org/the-right-to-adequate-housing-fact-sheet-no-21rev1

Ulucan, A. G., Bozdağ, A., Karakoyun, M., & Alkan, T. (2025). Forecasting pandemic-induced changes in real estate market values through machine learning approaches. *International Journal of Strategic Property Management*, *29*(3), 196–214. https://doi.org/10.3846/ijspm.2025.24063

United Nations. (1948, December 10). *Universal declaration of human rights, article 25. https://www.un.org/en/about-us/universal-declaration-of-human-rights*

Vui, C. C. (2006). *Using geographical information system - multiple regression analysis - generated location value response surface approach to model locational factor in the prediction of residential property values* [Master thesis, Universiti Teknologi Malaysia]. Universiti Teknologi Malaysia Institutional Repository. http://eprints.utm.my/5144/

Wang, W. C., Chang, Y. J., & Wang, H. C. (2019). An application of the spatial autocorrelation method on the change of real estate prices in Taitung city. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *8*(6), Article 249. https://doi.org/10.3390/ijgi8060249

Wang, L., Wang, G., Yu, H., & Wang, F. (2022). Prediction and analysis of residential house price using a flexible spatiotemporal model. *Journal of Applied Economics*, *25*(1), 503–522. https://doi.org/10.1080/15140326.2022.2045466

Yang, J., Bao, Y., Zhang, Y., Li, X., & Ge, Q. (2018). Impact of Accessibility on Housing Prices in Dalian City of China Based on a Geographically Weighted Regression Model. *Chinese Geographical Science*, *28*(3), 505–515. https://doi.org/10.1007/s11769-018-0954-6

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 360–383
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Afet Acil Durum Toplanma Alanlarının Yer Seçim Kriterleri ve Tsunami Riskine Yönelik Bir Değerlendirme: Trabzon Akçaabat Örneği

Evaluation of Site Selection Criteria for Disaster Emergency Assembly Areas and Tsunami Risk Assessment: The Case of Akçaabat, Trabzon

Gülten Kara[1]*, Aslı Sümeyye Özhan[1]

[1]*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.*

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Gülten Kara
gispir@ktu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1764550

Yayın süreci
Geliş tarihi: 17.08.2025
Kabul tarihi: 24.09.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Tarih boyunca depremler, sualtı heyelanları ve volkanik patlamalar gibi olaylar tsunamileri tetiklemiş, bu durum hem dünyada hem de ülkemizde yıkıcı etkilere yol açmıştır. Türkiye'de yapılan çalışmalar, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde olası bir tsunamide dalga yüksekliğinin 1-3 m arasında olabileceğini, tarihsel veriler ise su baskınlarının kıyıdan itibaren 60 m ile 1 km arasında etkili olabileceğini göstermektedir. Bölgenin coğrafi yapısı ve yerleşim yerlerinin kıyıya yakınlığı, güvenli toplanma alanlarının belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, Trabzon'un Akçaabat ilçesinde tsunami riskinin azaltılması amacıyla kamu kurumları arasında iş birliği yapılarak mevcut afet toplanma alanlarının gözden geçirilmesi ve güvenli bölgelere taşınması için bir çalışma başlatılmıştır. Bu çalışmada, Akçaabat'taki toplanma alanlarının yer seçim kriterleri tsunami tehlikesi açısından değerlendirilmiş, eksiklikler tespit edilmiş ve iyileştirme önerileri sunulmuştur. Çalışma, afet yönetimi politikalarında ikincil tehlikelerin dikkate alınmasının önemini vurgulamakta ve benzer kıyı yerleşimleri için bir model oluşturmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: *Afet acil durum toplanma alanı, Tsunami, AFAD, Deprem*

Abstract

Throughout history, events such as earthquakes, submarine landslides, and volcanic eruptions have triggered tsunamis, causing devastating impacts both globally and in our country. Studies conducted in Turkey indicate that a potential tsunami in the Eastern Black Sea Region could produce wave heights of 1-3 meters, while historical data suggest that flood inundation may affect areas extending 60 meters to 1 km inland from the coastline. The region's geographical features and the proximity of settlements to the coast necessitate the identification of safe assembly areas. In this context, a collaborative effort among public institutions in Akçaabat district of Trabzon has been initiated to review existing disaster assembly areas and relocate them to safer zones to mitigate tsunami risks. This study evaluates the site selection criteria of current assembly areas in Akçaabat from a tsunami hazard perspective, identifies shortcomings, and proposes improvements. The research emphasizes the importance of considering secondary hazards in disaster management policies and aims to establish a model for similar coastal settlements.

Keywords: *Disaster emergency assembly area, Tsunami, DEMP (Disaster and Emergency Management Presidency), Earthquake*

1. Giriş

Türkiye'de meydana gelen doğal afetler, tarihsel süreçte önemli can kayıplarına ve yüksek maddi hasarlara sebep olmuştur. Özellikle yapılaşmanın yoğun olduğu kentsel alanlarda, afet anlarında kullanılacak toplanma alanlarının yetersizliği veya uygun olmayışı ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Kentsel bölgelerdeki boş alanların giderek azalması, afet yönetimi açısından kritik öneme sahip olan acil toplanma bölgeleri, tahliye güzergâhları, yardım dağıtım merkezleri ve geçici barınma alanlarının planlanmasını güçleştirmektedir.

Deprem gibi afetlerin hemen sonrasında, afetzedelere acil yardım ve ilk müdahale hizmetlerinin sağlanabilmesi için bu toplanma alanlarının doğru konumlandırılması ve yeterli kapasitede olması hayati önem taşımaktadır.

Doğal afetler, tarih boyunca insanlık için büyük tehdit oluşturmuş ve özellikle kıyı bölgelerinde yaşayan topluluklar üzerinde yıkıcı etkiler bırakmıştır. Tsunamiler de bu afetler arasında öne çıkan, deprem, sualtı heyelanları ve volkanik patlamalar gibi olaylarla tetiklenen ani gelişen tehlikelerden biridir. Türkiye'de de geçmişte yaşanan tsunamiler, bu tehdidin yalnızca okyanus kıyılarıyla sınırlı olmadığını, Karadeniz gibi kapalı denizlerde de etkili olabileceğini göstermiştir. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yapılan çalışmalar, olası bir tsunami durumunda dalga yüksekliğinin 1-3 m arasında değişebileceğini, tarihsel veriler ise su baskınlarının kıyıdan itibaren 60 m ile 1 kilometreye kadar ilerleyebileceğini ortaya koymaktadır (Altinok vd., 2011; Nikonov vd., 2018; Yalçiner vd., 2004).

Bölgenin engebeli coğrafyası ve yerleşim alanlarının kıyıya yakınlığı, afet anında güvenli toplanma bölgelerinin belirlenmesini hayati bir gereklilik haline getirmektedir. Bu kapsamda, Trabzon'un Akçaabat ilçesinde tsunami riskinin azaltılması amacıyla kamu kurumları arasında iş birliği yapılarak mevcut afet toplanma alanlarının yeniden değerlendirilmesi ve daha güvenli bölgelere taşınması için bir çalışma başlatılmıştır. Bu çalışmaya katkı sağlamak amacıyla, toplanma alanlarının yer seçim kriterleri tsunami tehlikesi açısından analiz edilmiş, eksiklikler belirlenmiş ve öneriler sunulmuştur. Buna ek olarak afet yönetimi politikalarında birincil riskler kadar ikincil risklerin de dikkate alınmasının önemi vurgulanmıştır ve alınacak tedbirler belirlenmiştir. Bu noktadan hareketle, ilgili literatürü değerlendirerek yer seçim kriterlerinin belirlenmesi ve tsunami risk analizlerinin değerlendirilmesi için literatür taraması iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Trabzon ili Akçaabat ilçesindeki toplanma alanlarının yer seçim kriterlerinin belirlenmesi amacıyla ulusal ve uluslararası literatürdeki ilgili çalışmalar sistematik olarak incelenmiştir. İkinci aşamada ise, deprem kaynaklı tsunami risk analizleri ve afet yönetimi çalışmaları değerlendirilmiştir.

1.1 Toplanma Alanlarının Yer Seçim Kriterleri

Afet sonrası toplanma alanlarının belirlenmesi, kriz yönetiminin en kritik aşamalarından biridir. Bu alanların doğru seçimi, can kaybını en aza indirmek ve acil müdahale sürecini etkin bir şekilde yönetebilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde toplanma alanlarının yer seçimine yönelik çeşitli kriterler bulunmakta olup, bu kriterler genellikle erişilebilirlik, nüfus yoğunluğu, jeolojik güvenlik, altyapı yeterliliği ve afet türüne göre özel gereksinimler gibi faktörlere dayanmaktadır. Bu bölümde, ulusal ve uluslararası çalışmalar ışığında toplanma alanı seçiminde dikkate alınması gereken temel parametreler incelenmiş ve Akçaabat ilçesi özelinde uygulanabilir bir yöntem oluşturulması hedeflenmiştir.

Aksoy vd. (2009), İstanbul Fatih ilçesinde, yeşil alanların afetlerdeki rolünü 1999 Marmara depremi öncesi ve sonrası olmak üzere iki dönem itibarıyla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, bir yandan ilçedeki yeşil alan varlığını ve kişi başına düşen yeşil alan miktarını ortaya koyarken, diğer yandan bu alanların olası bir deprem afeti sonrasında nüfusa sağlayabileceği hizmet kapasitesini (toplanma ve barınma alanı olarak) değerlendirmektir.

Cheng & Yang (2012), toplanma alanlarının değerlendirilmesi için kapsamlı ve hiyerarşik bir model önermektedir. Değerlendirme kriterlerini kapasite, yaşam olanakları, güvenlik ve erişilebilirlik olmak üzere dört ana grupta toplayan kriter hiyerarşisi oluşturulmuştur.

Rezaei (2014), afet sonrası geçici barınma alanlarının yer seçimi problemini çözmek için karar destek sistemi (KDS) tabanlı bir model önermiştir. Çalışmada, potansiyel alanlar, altyapı, erişilebilirlik, kapasite ve güvenlik kriterlerine göre değerlendirerek uygunluklarına göre sıralanmıştır ve optimum yerler belirlenmiştir.

Anand vd. (2015), afet sonrası geçici toplanma alanlarının yer seçimi konusunda kapsamlı bir derleme sunmaktadır. Bu çalışma, araştırmacılar için mevcut metodolojik eğilimlerin anlaşılmasında bir başlangıç noktası oluştururken, uygulayıcılar için de kritik öneme sahip kriterlerin kapsamlı bir listesini sağlayarak hem kuramsal hem de pratik anlamda önemli bir referanstır.

Anhorn & Khazai (2015), deprem sonrası acil barınma ihtiyacını karşılamak için açık alanların uygunluk analizine yönelik bir metodoloji önermektedir. Katmandu Vadisi'nde yapılan analizle, uygun alanların dahi yüksek nüfus yoğunluğu karşısında yetersiz kalabileceğini somut olarak gösterilmiştir.

Çelik vd. (2017), afet durumunda kullanılacak toplanma alanlarının belirlenmesi için demografik nitelikler ve alansal büyüklük, ulaşım ve erişilebilirlik, altyapı özellikleri, topografik ve jeolojik nitelikler, toprak kabiliyeti, litolojik özellikler, meteorolojik ve klimatik faktörler, çevresel risk durumu olmak üzere sekiz temel kriter ortaya koymuştur. Araştırmada, kentlerdeki boş alanların, parkların ve kamu kurumlarının bahçelerinin bu kriterler doğrultusunda değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Çınar vd. (2018), İzmir-Karşıyaka ilçesindeki acil toplanma alanları incelenmiştir. Araştırmada, bu alanların belirlenmesinde toprak özellikleri, jeolojik yapı, yola yakınlık ve eğim durumu olmak üzere dört ana kriter kullanılmıştır. Çalışmada ağırlık çakıştırma yöntemi uygulanarak alanların uygunluk dereceleri belirlenmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak yapılan analizler sonucunda, mevcut toplanma alanlarının bir kısmının gerek ulusal gerekse uluslararası standartları tam olarak karşılamadığı tespit edilmiştir.

Mengi & Erdin (2018), afet toplanma alanlarının yönetimi için dört aşamalı bütüncül bir sistem önermiştir. Model, afet öncesi (alan belirleme ve halkı bilgilendirme), afet anı (grafik yönlendirme sistemlerinin etkin kullanımı), afet sonrası (geçici barınma alanlarına entegrasyon) ve uzun vadeli (sosyal yaşam alanlarına dönüşüm) olmak üzere dört aşamayı içermektedir. Çalışmada kullanılan temel kriterler; güvenli mesafe, erişilebilirlik (0-500 m yürüme mesafesi), ana yol bağlantıları, kamusal mülkiyet, altyapı olanakları ve bilgilendirme sistemlerinin entegrasyonu olarak sıralanmaktadır.

Taylan (2018), Çankırı il merkezi ve ilçelerindeki toplanma alanlarının, ulusal ve uluslararası kuruluşların (AFAD, FEMA, UNHCR vb.) belirlediği teknik standartlara ve kriterlere uygunluk düzeyini değerlendirmiştir. Kapasite, erişilebilirlik, güvenlik ve altyapı açısından değerlendirilen toplanma alanlarının, belirlenen ulusal ve uluslararası standartları (kişi başına düşen alan, altyapı, donatı) karşılamakta yetersiz kaldığını ortaya koymuştur.

Aman (2019), olası bir Marmara depremi sonrası için hayati öneme sahip afet toplanma alanlarının yer seçimi problemini İstanbul Bağcılar ilçesinde ele almıştır. Çalışmanın amacı, toplanma alanı seçimine yönelik bilimsel, teknik ve sosyal temelleri olan kriterleri oluşturmak ve bu kriterleri konumsal olarak değerlendirebilecek bir metodoloji geliştirmektir. Belirlenen kriterlere ve geliştirilen yönteme göre Bağcılar ilçesi için mevcut durumu analiz etmiş ve yeşil alanların/boş alanların büyük bir kısmının bu kriterleri sağlamakta yetersiz kaldığını tespit etmiştir.

Özkılıç (2020), İstanbul ilinde toplanma alanlarını nüfus yoğunluğu, ulaşım ağı, yaya erişimi ve alan büyüklüğü kriterlerine göre değerlendirmiştir. Toplanma alanlarının nüfus ihtiyacını karşılamakta son derece yetersiz kaldığı ve güvenli yürünebilir erişim mesafelerinin birçok bölge için sağlanamadığı belirtilmiştir.

Gerdan & Şen (2019), Kocaeli İzmit ilçesindeki afet toplanma alanlarının mevcut durumu detaylı şekilde incelenmiştir. Araştırmada, toplanma alanlarının değerlendirilmesinde; uzaklık ve erişilebilirlik, ana yol bağlantıları, çok fonksiyonluluk, kamu arazisi olma durumu, alansal büyüklük olmak üzere beş temel kriter kullanılmıştır. Çalışmada, İzmit ilçesindeki toplanma alanlarının %80'inden fazlasının su ve elektrik altyapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Mahalle bazında yapılan incelemelerde, 6 mahalledeki 14 toplanma alanının metrekare olarak yeterli büyüklükte olduğu tespit edilmiştir.

Bektaş & Sakarya (2020), İstanbul'un Kadıköy ilçesindeki afet toplanma alanları erişilebilirlik ve alansal yeterlilik açısından analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, Kadıköy'deki toplanma alanlarının %57'si önerilen 500 m yürüme mesafesi standardını karşılamaktadır. Ancak bu alanların büyük çoğunluğunun bölgedeki nüfus yoğunluğuna göre yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Yapılan ağ analizleri, mevcut toplanma alanlarının kapasite ve erişilebilirlik açısından önemli eksiklikler barındırdığını ortaya koymuştur.

Şekkeli (2020), Kahramanmaraş'ın Onikişubat ilçesinde toplanma alanları değerlendirilerek afet lojistiği kapsamında toplanma alanlarının seçimine yönelik bir model geliştirmiştir. Çalışmada, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP-Analytic Hierarchy Process) yöntemi kullanılarak dört temel kriter belirlenmiştir: güvenlik (alanın afet risklerinden uzaklığı), ulaşım olanakları (erişilebilirlik), altyapı (temel hizmetlerin varlığı) ve alan büyüklüğü (nüfus yoğunluğuna göre yeterlilik). Uzman görüşleri alınarak bu kriterlerin önem dereceleri belirlenmiş ve alternatif alanlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Öztürk & Kaya (2020), İstanbul'un Küçükçekmece ilçesindeki acil durum toplanma alanları; ulaşım, altyapı, güvenlik, alan büyüklüğü ve konutlara yakınlık gibi çok kriterli değerlendirme ölçütleriyle analiz etmiştir. Çalışmada, karar verme sürecinde kriterlerin ağırlıklarını dikkate alan PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. Özellikle ulaşım kriterine en yüksek ağırlık verilmiş, elektrik ve su gibi altyapı unsurları da afet anındaki kullanılabilirlik açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda bazı alanların altyapı eksiklikleri nedeniyle yetersiz olduğu ve yeniden düzenlenmesi gerektiği belirlenmiştir.

Gökgöz vd. (2020), acil durum toplanma alanlarının seçimi için AHP yöntemi kullanılarak çok kriterli bir değerlendirme modeli geliştirilmiştir. Toplanma alanlarının belirlenmesinde fiziksel özellikler, jeolojik yapı, ulaşım olanakları, güvenlik ve altyapı gibi temel kriterler dikkate alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, toplanma alanı seçiminde en önemli kriterlerin alan büyüklüğü ve erişilebilirlik olduğu tespit edilmiştir. Diğer önemli faktörler arasında güvenlik ve altyapı olanakları yer almaktadır. Geliştirilen model, afet yönetimi süreçlerinde karar vericilere bilimsel bir rehber sunmayı amaçlamaktadır.

Gerdan & Şen (2020), Kocaeli'nin Başiskele ilçesindeki 35 afet toplanma alanını AHP yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada altyapı olanakları, kişi başına düşen alan, erişilebilirlik ve ulaşım kriterleri temel alınmıştır. Araştırma sonuçlarına göre toplanma alanlarının %77,14'ü elektrik ve su altyapısına sahip olduğu ve 22 mahalledeki alanların 5'inde alan büyüklüğünün yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Ana yollara erişim ve alan büyüklüğü en kritik faktörler olarak belirlenmiştir. Özellikle nüfus yoğun mahallelerde yeni toplanma alanlarına ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Şirin & Ocak (2020), Gümüşhane şehir merkezindeki 24 afet toplanma alanının yeterliliğini AHP yöntemi ile değerlendirmiş ve 26 yeni alan önermiştir. Çalışmada AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı) kriterleri temel alınarak nüfus yoğunluğu, eğim, jeoloji ve su kaynaklarına uzaklık gibi coğrafi faktörler analiz edilmiştir. Mevcut alanların büyük oranda yetersiz olduğu vurgulanmıştır.

Ekin & Sarıkaya (2021), Kütahya'nın yoğun nüfuslu mahallelerinde afet toplanma alanlarını belirlemek için AHP-TOPSIS entegrasyonu ile kentsel afet planlamasına metodolojik yaklaşım önermiştir. Araştırmada 26 potansiyel alan dikkate alınarak kriterler belirlenmiştir. Değerlendirmede altyapı durumu, alansal büyüklük, ulaşım olanakları ve çevre

güvenliği öne çıkan kriterlerdir. Yoğun nüfuslu dar yerleşimlerde özellikle mahalle ölçeğinde alternatif çözüm ihtiyacının olduğu tespit edilmiştir.

Kalkan (2022), Uşak ilindeki 8 mahallede 43 toplanma alanı; erişilebilirlik (200 m), kapasite, ana yollara yakınlık, kamusal mülkiyet ve altyapı (yaya yolları, engelli erişimi, elektrik, su) özellikleri açısından değerlendirmiştir. Sonuçlara göre, Uşak'taki toplanma alanlarının sadece %18'i seçilen kriterleri karşılamaktadır. Toplanma alanlarının kapasite ve altyapı yönünden eksik olduğu ve iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle standartları karşılamayan mahallelerde yeni toplanma alanlarının belirlenmesi önerilmiştir.

Saygılı & Akpınar (2022), Aydın Efeler ilçesindeki yeşil alanların afet toplanma alanı olarak yeterliliği incelenmiştir. Sonuçlara göre ilçede toplam 494,502 m²'lik alan toplanma alanı olarak kullanılabilir durumdadır. Bu alanlar parklar, pazar yerleri ve okul bahçeleri gibi çok amaçlı alanlardan oluşmaktadır. Kapasite olarak uluslararası standart olan kişi başına 2,5 m² kriteri baz alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, mevcut alanların ilçe nüfusunun %67'sine yetecek kapasitede olduğu tespit edilmiştir. Ancak araştırmada, sadece afet toplanma amacıyla ayrılmış bağımsız alanların bulunmadığı da ortaya çıkmıştır. Özellikle deprem riski yüksek olan bölgede yeni ve bağımsız toplanma alanları oluşturulmasının önemi vurgulanmıştır.

Partigöç (2023), Denizli'nin Merkezefendi ilçesindeki 48 afet toplanma alanı; büyüklük, konum ve erişilebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Nüfus yoğunluğu açısından toplanma alanlarının alansal büyüklükleri ve erişilebilirlikleri dikkate alınarak her bir alanın afet sonrası kullanım yeterliliği incelenmiştir.

Sabuncu (2023), İstanbul Bakırköy ilçesindeki yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve uzaktan algılama tekniklerini kullanarak, açık ve yeşil alanların otomatik olarak tespit edilmesi ve bu alanların geçici barınma alanı olarak uygunluklarını değerlendirmiştir.

Uyar & Töre (2023), İstanbul ilindeki toplanma alanlarını kapasite, topoğrafya, erişilebilirlik ve toplumsal farkındalık kriterleri açısından değerlendirmiştir. Çalışma, sadece alanların haritada işaretlenmesinin yeterli olmadığını, fiziksel, erişilebilir, güvenli, donanımlı ve toplum tarafından bilinir hale getirilmeleri gerektiğini ortaya koymaktadır.

Öcal & Yıldız (2023), 2023 Kahramanmaraş depremleri öncesinde Antakya'daki afet toplanma alanları deprem öncesi ve sonrası durumu fay hattı mesafeleri, ulaşım ağları, nüfus dağılımı, arazi eğimi ve yer altı yapısı gibi faktörler açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, toplanma alanları hem sayı hem de büyüklük açısından yetersiz bulunmuştur. Özellikle nüfus yoğunluğu açısından mevcut alanların şehrin ihtiyacını karşılamadığı görülmüştür. Ayrıca bu alanların çoğunun fiziki ve coğrafi koşullarının afet durumunda yeterli koruma sağlayamayacağı tespit edilmiştir.

Kart vd. (2023), Konya ilindeki 125 afet toplanma alanı; kişi başına en az 1,5 metrekare alan düşmesi, yaya erişimine uygun olması, kamusal mülkiyette bulunması ve ana yollara bağlantılı olması açısından değerlendirilmiştir. Sonuçta toplanma alanlarının bu standartları büyük ölçüde karşıladığı tespit edilmiştir. Afet anında panik durumunun önlenmesi ve güvenli alanlara hızlı ulaşım sağlanması amacıyla mobil uygulama geliştirilmiştir.

Erdin vd. (2023), parklar, okul bahçeleri, spor tesisleri gibi kamunun ortak kullanım alanlarının afet anında nasıl etkin şekilde değerlendirmek için dört aşamadan oluşan yöntem önermiştir. Bu yöntem kapsamında; kullanılabilirlik (örneğin, alanın kapasitesi), güvenlik (afet sonrası güvende olma durumu), ve erişilebilirlik (ulaşım yollarına yakınlık) gibi kriterler dikkate alınmıştır.

Atmaca vd. (2023), Ankara Gölbaşı ilçesindeki acil toplanma alanlarını erişilebilirlik, altyapı durumu, çevresel güvenlik ve kapasite olmak üzere dört temel kriter üzerinden değerlendirmiştir. Bu kriterleri AHP yöntemiyle ağırlıklandırarak TOPSIS, COPRAS ve BORDA teknikleriyle entegre edilmiş ve beş optimal alan belirlemiştir.

Doğan (2023), iş güvenliği uzmanlarının görüşleri doğrultusunda AHP yöntemi kullanılarak acil durum toplanma alanları; güvenlik, erişim kolaylığı ve alan özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Bu kriterlerin alt kriterleri olarak nüfus yoğunluğu, erişim ve tahliye kolaylığı, düz ve beton zemin, yürüyerek ulaşım, tabela ile işaretleme, alternatif rotaların belirlenmesi, çevresel risklerden uzaklık, temel ihtiyaçlara yakınlık ve ikincil tehlikelerden uzaklık kriterleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda özellikle ikincil tehlikelerden uzaklık ve görsel işaretlemenin en önemli faktörler olduğu tespit edilmiştir.

Afet ve acil durum toplanma alanlarının belirlenmesinde, AFAD tarafından önerilen kriterlerin literatürde ağırlıklı olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu kriterler, AHP gibi çok kriterli karar verme yöntemleriyle analiz edilmiş olup, özellikle ulaşım kriterinin ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, mevcut toplanma alanlarının çoğunun afet planlaması sürecinde özel olarak tasarlanmadığı, aksine açık yeşil alanlar ve kamu kurumlarının bahçeleri gibi mevcut alanların bu amaçla kullanıldığı belirlenmiştir. Bu durum, planlama aşamasında toplanma alanlarının sistematik bir şekilde ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, afete dayanıklı şehirlerin oluşturulması için toplanma alanlarının planlama sürecinde oluşturulması, bu alanların plan notlarında açıkça tanımlanması ve planlama sürecine entegre edilmesi kritik bir öneme sahiptir.

Literatür incelendiğinde, Trabzon'un Akçaabat ilçesindeki toplanma alanlarının mevcut uygunluk durumlarının ve tsunami riski açısından değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir çalışmanın bulunmadığı dikkat çekmektedir. Ayrıca, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde tsunami tehlikesi bağlamında toplanma alanlarının güvenliğini inceleyen bir araştırmaya da rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında, belirlenen değerlendirme kriterleri doğrultusunda Akçaabat ilçesindeki afet

toplanma alanlarının uygunluk analizi yapılmıştır ve farklı tsunami senaryoları altında bu alanların güvenliği test edilmiştir. Bu çalışma, Akçaabat ilçesi özelinde toplanma alanlarının afet uygunluk değerlendirmesini ve tsunami risk analizini bir arada ele alan ilk araştırmalardan biri olma niteliği taşımaktadır. Literatürde afet toplanma alanlarının belirlenmesine yönelik pek çok çalışma bulunmakla birlikte, özellikle tsunami senaryolarına dayalı olarak bu alanların güvenliğini inceleyen benzer bir araştırmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma, hem bölgesel ölçekte bir eksikliği gidermeyi hem de afet yönetimi stratejilerine yeni bir boyut kazandırmayı hedeflemektedir.

1.2 Tsunami Risk Analizleri ve Afet Yönetimi Çalışmaları

Tsunamiler, okyanus ve deniz tabanında meydana gelen ani deformasyonlar sonucu oluşan uzun periyotlu devasa dalgalardır. 1900-2020 yılları arasında tsunamilerin %80'sinin tektonik kökenli depremlerden kaynaklandığı bilinmektedir (Reid & Mooney, 2023). Uluslararası Afet Veri tabanı EM-DAT'ın kayıtlarına göre, 2000-2025 yılları arasında dünya genelinde 30 tsunami meydana gelmiştir ve orijini deprem olan 5 tsunami kaydedilmiştir (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2025). Özellikle dalma-batma zonlarında meydana gelen büyük magnitüdlü depremler (M>7,0), tsunami üretme potansiyeli en yüksek olan olaylardır. Tsunamiler, nadir görülmelerine rağmen yüksek yıkım potansiyeli taşıyan doğal kaynaklı afetler arasında yer almaktadır. Özellikle deprem kaynaklı tsunamiler, kıyı bölgelerinde ani su baskınlarına ve geniş çaplı hasara yol açabilmektedir. Bu nedenle, tsunami risk analizleri ve afet yönetimi stratejileri, kıyı yerleşimlerinin planlanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, tarihsel tsunami vakaları, modelleme çalışmaları ve risk azaltma stratejileri literatürdeki güncel araştırmalar eşliğinde değerlendirilmiştir.

Marmara Denizi'ndeki tsunami tehlikesi, birçok araştırmacı tarafından tarihsel belgeler ve sayısal modellemeler kullanılarak incelenmiştir. Yalçıner vd. (2002), Marmara Denizi'nde tarihsel ve sayısal tsunami modellemesi yaparak bölgenin tsunami potansiyelini ortaya koyan çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Marmara Denizi'nde tsunami dalga yüksekliklerinin 1-6 m arasında değişebileceği, özellikle İstanbul, Tekirdağ ve Kocaeli kıyılarında yıkıcı etkiler oluşturabileceği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Altinok vd. (2011), Türkiye kıyıları ve çevre bölgeleri etkileyen tsunami olaylarının kapsamlı bir revizyonunu sunmak için MÖ 1410'dan 2011 tarihine kadar uzanan 134 tsunamiyi sistematik olarak incelemiş, mevcut tsunami kataloglarını güncel verilerle zenginleştirerek eksik ve hatalı bilgileri düzeltmiştir. Sonuçlara göre Türkiye çevresindeki tsunami dalga yüksekliklerinin 0,5-6 m arasında değişiklik gösterdiği ve etki alanlarının 1-300 km arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tsunami aktivitelerinin sırasıyla Marmara Denizi, Ege Denizi ve Akdeniz'de yoğun olduğu ve incelenen çalışmalardan %78'inin deprem kaynaklı tsunamiler olduğu belirlenmiştir.

Türkiye kıyılarındaki tsunami tehlikesine yönelik bilimsel çalışmalar, bölgesel farklılıklar göz önüne alınarak geniş bir literatürde ele alınmıştır. Karadeniz'de yapılan araştırmalar, özellikle heyelan kaynaklı tsunami tehlikesine odaklanmaktadır. Yalçıner vd. (2002) tarafından yapılan çalışmalar, bölgedeki tarihsel tsunami kayıtlarını incelemiş ve 1598 Trabzon tsunamisi gibi olayları belgelemiştir. NOAA'nın Global Tarihsel Tsunami Veri tabanı verileri, Karadeniz'deki tsunami olaylarının küresel ölçekte nadir ancak yıkıcı etkileri olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle, 1939 Erzincan Depremi sonrasında Karadeniz'de gözlemlenen su çekilmeleri ve heyelan kaynaklı dalgalar, NOAA'nın deniz seviyesi ölçüm verileriyle de uyumludur (National Centers for Environmental Information, 2025). Ayrıca, NOAA tarafından geliştirilen DART (Derin Okyanus Tsunami Ölçüm) sistemleri, benzer heyelan tsunamilerinin erken tespiti için modelleme çalışmalarında referans alınmaktadır. Bu veriler, Türkiye'nin Karadeniz kıyılarındaki riskin yalnızca depremlerle değil, denizaltı toprak kaymalarıyla da tetiklenebileceğini vurgulamaktadır.

Hébert vd. (2005), Marmara Denizi'ndeki tsunami tehlikesini sayısal modelleme yöntemleriyle inceleyerek aktif faylanmanın etkilerini ve İstanbul kıyı alanlarına olası etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, Kuzey Anadolu Fay Hattının Marmara Denizi içindeki segmentlerinde oluşabilecek çeşitli deprem senaryolarına dayalı tsunami simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, özellikle Orta Marmara Çukuru ve Çınarcık Havzası'ndaki fay segmentlerinin 7,2-7,4 büyüklüğündeki depremlerle tetiklenebilecek tsunamilerin, İstanbul'un güney kıyılarında 2-4 m arasında dalga yüksekliklerine neden olabileceğini göstermektedir.

Gusiakov (2016), Rusya Pasifik kıyılarındaki tsunami tehlikesini tarihsel veriler ve güncel analizlerle ele alan kapsamlı bir çalışma sunmaktadır. 1737'den günümüze kadar uzanan bir katalogda, 110 tsunami belgelenmiş olup bunların %95'i deprem kaynaklıdır. Diğer tetikleyiciler arasında volkanik patlamalar (%3), heyelanlar (%2) ve meteorolojik olaylar (%3) yer almaktadır. Özellikle 1737 ve 1952'deki 20 metreyi aşan dalga yükseklikleriyle iki büyük tsunami, bölgede yıkıcı etkiler yaratmıştır. Çalışma, tsunami dalga yüksekliklerinin deprem büyüklüğüyle ilişkisini, konumsal dağılım örüntülerini ve ortalama tekrarlanma aralıklarını (yıkıcı tsunamiler için 25 yıl, tehlikeli olanlar için 10-15 yıl) istatistiksel olarak analiz etmektedir.

Nikonov vd. (2018), Karadeniz ve Azak Denizi'nde meydana gelen tsunamilerin Rusya kıyılarındaki tehlikesini yeni bir tsunami kataloğu temelinde değerlendirmektedir. Tarihsel tsunami verileri bir araya getirilerek bölgesel risk analizi yapılmış ve Rusya'nın Karadeniz kıyıları için tsunami tehlike haritaları oluşturulmuştur. MÖ 4. yüzyıldan itibaren incelenen 85 tsunamiden %62'si deprem kaynaklı, %18'i heyelan kaynaklı ve %20'si meteorolojik, volkanik nedenlerden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Maksimum dalga yüksekliği tarihsel dönem içinde 1-6 m aralığında değiştiği belirtilmiştir.

Bazykina vd. (2018), 12 Eylül 1927 Yalta depreminin neden olduğu Karadeniz tsunamisini incelemek üzere nonlineer uzun dalga modeli kullanarak kapsamlı bir sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 30 saniyelik batimetrik grid ile tüm Karadeniz için geniş ölçekli simülasyon ve 50 metrelik yüksek çözünürlüklü grid ile Kırım'ın güney kıyıları için detaylı modelleme yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre en yüksek 2 metrelik dalga yüksekliği Yalta'da gözlemlenirken, Nikita ve Gurzuf bölgelerinde dalga yükseklikleri 2 metreye yaklaşmış ve kıyı çekilmesi sırasında deniz seviyesinde 3 metreden fazla düşüş tespit edilmiştir. Çalışma, Karadeniz'deki tarihsel tsunami tehlikelerinin anlaşılmasına önemli katkı sağlamış ve bölgedeki tsunami risk değerlendirmeleri için temel oluşturmuştur.

Baranova & Mazova (2020), 12 Eylül 1927 Yalta depremine benzer lokasyonlarda meydana gelebilecek tsunamijenik (tsunami oluşturma potansiyeli olan) depremlerin Kırım kıyıları ve Kerç Boğazı'ndaki tsunami tehlikesini sayısal modelleme yöntemleriyle incelemektedir. Araştırmada, tarihsel depremin yanı sıra benzer büyüklükteki (M≥7) iki farklı senaryo deprem için tek bloklu ve çift bloklu sismik kaynak modelleri oluşturulmuş, sığ su denklemleri kullanılarak tsunami dalga üretimi ve yayılımı simüle edilmiştir. Sonuçlar, Kerç Boğazı'ndaki Kırım Köprüsü'nün batı ayakları civarında dalga yüksekliklerinin 0,3-0,5 m'yi, doğu ayaklarındaysa 0,6-1,95 m'yi aşmayacağını göstermiştir. Çalışma özellikle köprü gibi kritik altyapıların tsunami risk değerlendirmesi için önem taşımakta olup, bölgedeki tarihsel tsunami kayıtlarıyla karşılaştırmalı analizler sunmuş ve kıyı morfolojisinin dalga amplifikasyonundaki rolünü vurgulamıştır.

Vilibić vd. (2021), Akdeniz ve Karadeniz'de gözlemlenen meteorolojik tsunamileri kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Çalışma, bu bölgelerdeki meteorolojik tsunamilerin tarihsel olaylarını, oluşum mekanizmalarını, atmosferik kaynaklı enerji transfer süreçlerini ve kıyıya ulaşım dinamiklerini ele alarak, bu olayların kıyı altyapısı ve insan yaşamı üzerindeki potansiyel etkilerini incelemiştir. Ayrıca, mevcut gözlem sistemleri, deterministik ve stokastik modelleme yaklaşımları ile erken uyarı sistemleri değerlendirilmiş; araştırma ve operasyonel uygulamalardaki boşluklara dikkat çekilmiştir.

Gasperini vd. (2022), Doğu Marmara Denizi'nde Kuzey Anadolu Fay Sistemi boyunca yer alan büyük bir denizaltı heyelanının tsunami potansiyelini incelemiştir. Yüksek konumsal çözünürlüklü deniz jeofizik verileri kullanılarak, Çınarcık Havzası'nda tespit edilen Güney Çınarcık Heyelanının geometrik ve jeolojik özellikleri analiz edilmiş, heyelanın deprem tetiklemesiyle harekete geçmesi durumunda oluşturabileceği tsunami senaryoları sayısal modelleme ile simüle edilmiştir. Sonuçlar, heyelan kütlesinin boyutları ve kinematiğine bağlı belirsizliklerle birlikte, Doğu Marmara'nın geniş bir kıyı şeridinde 15-20 metreyi aşan tsunami dalgalarının oluşabileceğini göstermektedir.

Oynakov vd. (2023), Karadeniz bölgesindeki tsunami oluşturabilen zonların belirlenmesi amacıyla 1905-2022 dönemini kapsayan homojen bir sismik katalog derlemiştir. Ulusal ve uluslararası katalogdaki veriler birleştirilerek moment magnitüd (Mw) ölçeğine dönüştürülmüş ve 18.528 deprem olayı analiz edilmiştir. Çalışmada, genel ortogonal regresyon ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak farklı magnitüd ölçekleri standartlaştırılmış, ayrıca sismik aktivitenin yoğunlaştığı Shabla, Kırım ve Doğu-Güneydoğu Karadeniz kıyıları gibi bölgelerde tsunami potansiyeli taşıyan depremler (Mw ≥ 5) belirlenmiştir. Araştırma, bu bölgelerde gelecekte tsunami riski oluşturabilecek güçlü depremlerin meydana gelme olasılığını ortaya koyarak, bölgesel risk değerlendirmelerine katkı sağlamaktadır.

Aykurt Vardar vd. (2023), aktif tektonik yapısı nedeniyle Marmara Denizi'nin kuzeybatı kıyılarındaki tsunami tehlikesini senaryo temelli bir yaklaşımla değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşıma göre, bölgedeki olası bir depremin (örneğin Mw 7,0-7,4 büyüklüğünde) 1-4 m arasında tsunami dalgaları oluşturabileceği ve alçak kıyı kesimlerinde 0,5-2 m su baskınına yol açabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle Tekirdağ, Şarköy ve Kumbağ gibi alçak kıyı şeritlerinin bu tür olaylardan ciddi şekilde etkilenebileceği belirtilmektedir.

Türkiye'de tsunami tehlikesi en yüksek bölgelerin başında Marmara Denizi ve Ege kıyıları gelmektedir. Mevcut çalışmalar, Karadeniz ve Marmara Denizi gibi iç denizlerde tsunami tehlikesinin yalnızca tektonik değil, aynı zamanda meteorolojik ve heyelan kaynaklı süreçlerle de ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. NOAA'nın deniz seviyesi verileri ve DART sistemleri, heyelan kaynaklı tsunamilerin erken tespiti için önemli araçlar sunarken, Hébert vd. (2005) ve Aykurt Vardar vd. (2023) gibi araştırmalar, Marmara Denizi'nde Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca gelişebilecek depremlerin İstanbul ve çevresinde 1-6 m aralığında tsunami dalgaları oluşturabileceğini göstermektedir. Gusiakov (2016) ve Nikonov vd. (2018), Karadeniz ve Rusya kıyılarındaki tarihsel tsunami olaylarını analiz ederek, bu bölgelerdeki riskin önemli bir kısmının deprem ve heyelan kaynaklı olduğunu vurgulamışlardır. Bazykina vd. (2018) ile Baranova & Mazova (2020), 1927 Yalta tsunamisi üzerinden gerçekleştirdikleri sayısal modellemelerle, kıyı morfolojisinin dalga amplifikasyonundaki rolünü ortaya koymuştur. Vilibić vd. (2021), Akdeniz ve Karadeniz'deki meteorolojik tsunamileri inceleyerek, atmosferik koşulların da tsunami üretiminde etkili olabileceğini göstermiştir. Gasperini vd. (2022), Marmara Denizi'ndeki büyük denizaltı heyelanlarının 15-20 metreyi aşan tsunami dalgaları yaratabileceğini belirtirken, Oynakov vd. (2023) ise Karadeniz'deki sismik aktiviteyi analiz ederek, tsunami potansiyeli taşıyan bölgeleri tanımlamıştır. Bu çalışmalar, bölgesel tsunami tehlikesinin çok kaynaklı doğasını vurgulamakta ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi gerekliliğine dikkat çekmektedir. Mevcut literatür değerlendirildiğinde Ege ve Marmara bölgelerinde oluşacak 7 ve üzerindeki büyüklükteki depremlerin 1-6 m dalga yükseklikleri ve özellikle Doğu Karadeniz kıyılarında 1-3 m dalga yükseklikleri öngörülmektedir. Bu literatür bulguları ışığında, deprem-tsunami ilişkisinin afet yönetimi politikalarında bütüncül bir şekilde ele alınması gerektiği açıktır. Özellikle kıyı yerleşimlerinde hem deprem hem de tsunami tehlikesinin birlikte değerlendirilmesi, can kayıplarını azaltmada kritik öneme sahiptir. Türkiye'de gerçekleşen tsunami olayları ve erken uyarı sistemleri için Kandilli

Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü çalışmaları incelenmiştir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi UNESCO-Hükümetler arası Oşinografi Komisyonu - Kuzey-Doğu Atlantik, Akdeniz ve Bağlantılı Denizler Tsunami Erken Uyarı ve Zararlarını Azaltma Sistemi Hükümetlerarası Koordinasyon Grubu (ICG/NEAMTWS) çatısı altında Ulusal Tsunami Uyarı Merkezi olarak görev yapmakta ve 2012 yılından beri sorumluluk alanları Karadeniz, Ege ve Doğu Akdeniz'i kapsayacak şekilde ülkemiz ve çevresinde meydana gelen tüm depremleri ve denizlerde meydana gelebilecek deniz seviyesi değişimlerini gözlemleyerek ilgili ulusal kurum ve kuruluşlara Deprem Bilgi Mesajı ve Tsunami Erken Uyarısı yayınlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Türkiye'nin uzun kıyı şeritlerinde tarih boyunca meydana gelen tsunami olayları, bilimsel araştırmalarda önemli bir yer tutmaktadır. 8300 kilometreyi aşan sahil şeridinde yapılan çalışmalar, son üç bin yılda doksandan fazla tsunami vakasının kaydedildiğini ortaya koymaktadır (Kandilli Rasathanesi, 2025a). Bu doğal afetler en yoğun şekilde Marmara Denizi'nde görülmekle birlikte, Ege, Akdeniz ve Karadeniz kıyılarında da etkili olmuştur.

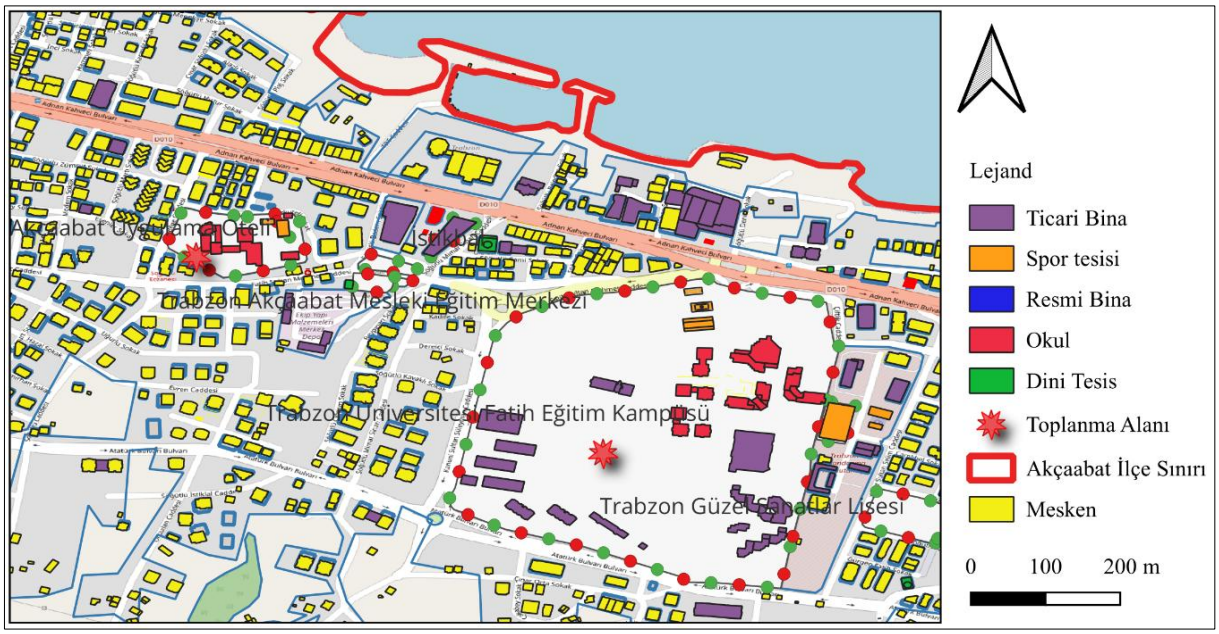
Tarihi kayıtlar incelendiğinde, özellikle 1509 ve 1894 yıllarında İstanbul'da, 1598'de Amasya'da, 1963'te Doğu Marmara'da, 1939'da Erzincan'da ve 1968'de Bartın'da meydana gelen depremlerin ardından önemli tsunami olayları yaşandığı anlaşılmaktadır. Bu olaylarda deniz sularının kıyıdan bir kilometre içeriye kadar ilerlediği gözlemlenmiştir (Kandilli Rasathanesi, 2025b). 1939 Erzincan depremi sonrasında Karadeniz'de yaşanan gelgit hareketleri dikkat çekicidir. Fatsa, Ünye ve Giresun sahillerinde 20 ila 100 m arasında değişen deniz çekilmeleri kaydedilmiş, depremin tetiklediği denizaltı heyelanları sonucu oluşan dalgalar ise dönemin Sovyet deniz gözlem istasyonları tarafından tespit edilmiştir. Benzer şekilde, 1968 Bartın depreminde meydana gelen tsunaminin 15 dakikalık aralıklarla 100 ve 60 m boyunca kıyıyı su altında bıraktığı, dalga yüksekliğinin ise yer yer üç metreye ulaştığı belgelenmiştir (Kandilli Rasathanesi, 2025a).

Yapılan araştırmalar, Karadeniz bölgesinde oluşabilecek tsunamilerin genellikle 1-3 m arasında dalga yüksekliğine sahip olacağını, bununla birlikte kıyı şeridinde 60 metreden bir kilometreye kadar varan su baskınlarına yol açabileceğini göstermektedir. Trabzon 2021 yılı İl Risk Azaltma Planı incelendiğinde; Türkiye'nin Yeni Deprem Tehlike haritasına göre, Trabzon ilinde beklenen en büyük yer ivme değerleri ortalama 0.2g civarındadır (Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 2021). Ancak, yer ivme değeri gevşek zeminlerde ve dolgu alanlarda çok daha fazla büyüyeceği ve depremin daha şiddetli hissedilmesine neden olabilecektir. Son yıllarda deniz dolgu alanlarında ve alüvyal arazilerde yapılaşmanın artması riskleri daha da artırmaktadır. Bu zemin ve yapılaşma koşulları, deprem sonrası oluşabilecek tsunami riskini de önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bağlamda çalışmanın temel amacı, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde olası bir tsunami tehlikesine karşı Trabzon'un Akçaabat ilçesindeki toplanma alanlarının uygunluğunu değerlendirmek ve güvenli alan olma özelliklerini incelemektir. Ayrıca, potansiyel yeni toplanma alanlarının belirlenmesi de hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında, geçmişte yaşanan tsunami olaylarının su baskın derinlikleri ve dalga yükseklikleri referans alınarak farklı senaryolar altında uygun toplanma alanları tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultuda, araştırma sahası olarak seçilen Trabzon ili Akçaabat ilçesindeki toplanma alanları öncelikle belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Trabzon ilinde Akçaabat, Araklı Arsin, Beşikdüzü, Çarşıbaşı, Çaykara, Dernekpazarı, Düzköy, Hayrat, Köprübaşı, Maçka, Of, Ortahisar, Sürmene, Şalpazarı, Tonya, Vakfıkebir ve Yomra olmak üzere toplam 18 ilçe, 1 büyükşehir belediyesi ile 19 belediye ve bu belediyelere bağlı 1707 mahalle bulunmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025). Bu çalışmada, afet yönetimi ve risk değerlendirme çalışmalarında etkinliği sıklıkla kanıtlanmış olan çok kriterli karar verme tekniği kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme tekniklerinin konumsal planlama problemlerine entegrasyonu, CBS yazılımları aracılığıyla güçlü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Literatürde, bu entegre yaklaşımın, özellikle heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi gibi afet risk modelleme çalışmalarında başarıyla uygulandığı görülmektedir (Aghlmand vd., 2020). Bu çalışma, söz konusu metodolojik çerçeveyi afet sonrası acil müdahale aşamasının kritik bir bileşeni olan toplanma alanlarının yer seçimi problemine uyarlamakta ve tsunami özelinde yeniden yapılandırmaktadır. Böylece, benzer bir yöntemin farklı bir afet türü ve afet yönetimi aşaması için kullanılabilirliği test edilmekte ve afet yönetimi yazınına katkı sağlanmaktadır.

2.1 Çalışma Alanının Belirlenmesi

Doğu Karadeniz Bölgesi, coğrafi yapısı nedeniyle derin ve dik vadilere sahiptir. Bu yüzden yerleşim yerleri genellikle dağınık bir şekilde, sınırlı düzlükler üzerine kurulmuştur. Vadilerin veya akarsuların denizle birleştiği kısımlarda ise akarsu yataklarının her iki tarafına kurulan yerleşim alanlarında ise tsunamiye benzer su taşkınlarının yaşanma riski çok yüksek olmaktadır. Karadeniz Sahil Yolu'nun deniz seviyesine çok yakın olması olası bir tsunami veya ani su taşkınında yolun su altında kalma riskini artırmakta ve tahliye, ulaşım gibi hayati öneme sahip faaliyetlerin aksamasına neden olabilmektedir. Bu durum, bölgedeki yerleşim yerlerinin güvenliği açısından önemli bir tehdit oluşturmakta ve afet risk yönetimi kapsamında alternatif güzergâhların ve altyapı güçlendirmelerinin değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Yapılan çalışmada bahsi geçen tehlikelerin değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yapılan çalışmalar, bölgenin tsunami riski taşıdığını ortaya koymaktadır. Akçaabat da bu risk alanında yer almakta olup, kıyıya

yakın yerleşim bölgeleri ve mevcut toplanma alanlarının önemli bir kısmı bu tehdit altındadır. Dolayısıyla, ilçedeki toplanma alanlarının yer seçim kriterleri ve tsunamiye karşı uygunluğunun yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Trabzon il merkezine yakınlığı, gelişen ulaşım ağı ve artan nüfusuyla Akçaabat, afet yönetimi açısından planlama ihtiyacı olan ilçelerden biridir. Bu nedenle, toplanma alanlarının sayısı, konumu ve güvenlik düzeyi gibi unsurların bilimsel yöntemlerle analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece, olası bir tsunami senaryosunda can kaybının ve kaosun önüne geçilebilmesi mümkün olacaktır. Tüm bu sebeplerle Şekil 1 ile verilen Akçaabat ilçesi hem mevcut durumun tespiti hem de geleceğe yönelik çözüm önerileri geliştirilmesi açısından ideal bir çalışma alanıdır. Elde edilecek bulguların, yalnızca Akçaabat için değil, benzer özelliklere sahip diğer kıyı ilçeleri için de yol gösterici olması hedeflenmektedir.



Şekil 1. Trabzon ili Akçaabat ilçesindeki bazı toplanma alanlarının dağılımı

Araştırma kapsamında, çalışma alanı olarak Trabzon'un Akçaabat ilçesi seçilmiştir. İlçenin coğrafi, demografik ve yerleşim özellikleri, toplanma alanlarının değerlendirilmesi açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Akçaabat, Karadeniz'e kıyısı olan ve kıyı şeridinde yoğun yapılaşma ile nüfus baskısı altında bulunan bir yerleşim yeridir. Bu durum, olası bir tsunami tehlikesi karşısında ciddi riskler doğurabileceği anlamına gelmektedir.

2.2 Toplanma Alanlarının Değerlendirilmesi

Trabzon, Türkiye'nin Karadeniz kıyısında, düz alanların sınırlı olduğu belirgin bir engebeli topoğrafyaya sahiptir. Karadeniz'in kapalı havza özellikleri büyük ölçekli tsunami oluşum olasılığını azaltmakla birlikte, tarihsel kayıtlar ve modern modellemeler, deprem tetikli lokal tsunami olaylarının bölge için bir risk teşkil ettiğini göstermektedir (Kandilli Rasathanesi, 2025a). Trabzon'da kentsel planlama ve altyapı tasarımı, yalnızca deniz mesafesi değil, aynı zamanda dik topoğrafik eğim ve sınırlı düz alanlar gibi coğrafi kısıtlar dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu çalışma, Trabzon'un tsunami risk profilini ve mevcut toplanma alanlarının yer seçim kriterlerine göre uygunluğunu değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tablo 1 ile verilen AFAD tarafından belirlenen toplanma alanları, güvenlik ve tsunami tehlikesi açısından analiz edilmiştir.

Toplanma alanlarının afet sonrası geçici barınma için kişi başına en az 1,5 m² alan sağlaması gerekmektedir. Ancak Akçaabat ilçesinde yapılan incelemelerde, mevcut toplanma alanlarının büyük çoğunluğunun kişi başına yalnızca 1 m² alan sunduğu ve bu nedenle kapasite standartlarını karşılamadığı tespit edilmiştir. 1,5 m²/kişi kriterine göre yapılan hesaplamalar, mevcut alanların önemli ölçüde yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır (Kara & Yavruoğlu 2025). Toplanma alanlarının uygunluk değerlendirmesi, dört temel altyapı kriterine (yol, elektrik, su ve kanalizasyon) göre yapılmıştır. Tüm altyapı sistemlerini barındıran alanlar "1", herhangi bir eksiklik durumunda ise "0" değeri atanmıştır. Analiz sonuçları, incelenen alanların çoğunun elektrik, temiz su ve tuvalet-kanalizasyon hizmetlerine sahip olduğunu göstermektedir. Afet risk yönetiminde toplanma alanlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, Trabzon özelinde tsunami riskine karşı uygun alanların seçiminde; yükseklik, kıyı mesafesi, jeolojik stabilite, altyapı erişilebilirliği (yol, elektrik, su-kanalizasyon) ve nüfus yoğunluğu gibi temel kriterler literatürdeki bilimsel yaklaşımlar ışığında değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Trabzon ili Akçaabat ilçesi toplanma alanları

Mahalle	No	Adı	Yol Durumu	Elektrik	Su	Tuvalet Kanalizasyon	Alanı (m²)	Kapasite (Kişi)
Dürbinar	T01	Akçaabat Sahil Parkı	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	29864.84	19910
Söğütlü	T02	Fatih Eğitim Fakültesi	Fatih Sultan Mehmet Caddesi	Var	Var	Var	27222.47	18148
Akpınar	T03	Akpınar Sağlık Ocağı Bahçesi	Akpınar Köyü Yolu	Var	Var	Var	671.88	448
Yaylacık	T04	Yaylacık Akçaabat Millet Bahçesi	Adnan Menderes Caddesi	Var	Var	Var	16400	10933
Darıca	T05	Darıca İlkokulu	Darıca Köy Yolu	Var	Var	Yok	910.66	607
Orta	T06	Atatürk Parkı	Atatürk Bulvarı	Var	Var	Var	1492.95	995
Dürbinar	T07	Selami Yardım Orta Okulu	İnönü Caddesi	Var	Var	Var	1589.43	1060
Dürbinar	T08	Abdullah Fazıl Ağanoğlu İlk Okulu	İnönü Caddesi	Var	Var	Var	724.85	483
Orta	T09	Merkez İlk Okulu	Atatürk Bulvarı	Var	Var	Var	1793.66	1196
Kavaklı	T10	Rahman Camii Bahçesi	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	5745.86	3831
Çolaklı	T11	Festival Alanı	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	4378.38	2919
Yıldızlı	T12	Yıldızlı İmam Hatip İö	Cumhuriyet Caddesi	Var	Var	Var	911.02	607
Yıldızlı	T13	Ayyıldız Ortaokulu	1337 Nolu Sokak	Var	Var	Var	1565.12	1043
Yıldızlı	T14	Yıldızlı Toki İö	Çevre Sokak	Var	Var	Var	2056.94	1371
Söğütlü	T15	Turizm Otelcilik Okulu	Esenler Sokak	Var	Var	Var	2477.69	1652
Yaylacık	T16	Alaattin Akçay İlk Okulu	Camili Sokak	Var	Var	Var	1979.28	1320
Salacık	T17	Salacık İlk Okulu	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	355.37	237
Osmanbaba	T18	Osmanbaba İlk Okulu	İhsanbey Caddesi	Var	Var	Var	166.15	111
Nefsipulathane	T19	Cumhuriyet Orta Okulu	Yiğitoğlu Sokak	Var	Var	Var	1301	867
Mersin	T20	Şehit Engin Saraç İlk Okulu	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	653.48	436
Derecik	T21	Derecik İö	Derecik Yolu	Var	Var	Var	824.93	550
Yeni	T22	Şehit Gökhan Uzun Fen Lisesi	Pelit Sokak	Var	Var	Var	2559.56	1706
Sarıtaş	T23	Sarıtaş İlk Okulu	Değirmenli Sokak	Var	Var	Var	1389.34	926
Akçakale	T24	Akçakale Merkez Camii	Trabzon Giresun Yolu	Var	Var	Var	636.52	424
Işıklar	T25	Işıklar Fabrika Bahçesi	Akçaabat-Düzköy Yolu	Var	Var	Var	420.29	280
Doğanköy	T26	Doğanköy İlk Okulu	Akçaabat-Düzköy Yolu	Var	Var	Var	628.06	419
Akçaköy	T27	Akçaköy Okul Bahçesi	Derecik Yolu	Var	Var	Var	820.68	547
Yaylacık	T28	Sahil Dolgu Alanı Kamelyalar Mevkii	Adnan Menderes Caddesi	Var	Var	Var	60077.62	40052

2.3 Verilerin Temini ve Hazırlanması

AFAD tarafından belirlenen mevcut toplanma alanlarının tsunami riski açısından uygunluğunun değerlendirilmesi ve yeni potansiyel toplanma alanları için uygun yerlerin belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir konumsal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde; topoğrafya (hâlihazır harita, yükseklik, eğim, bakı), jeolojik yapı (heyelan, jeoloji, lokal fay), hidrolojik özellikler (yeraltı suları, akarsu taşkın), iklim verileri (sıcaklık, yağış), arazi kullanımı ve ulaşım ağı (yol yakınlığı) gibi çeşitli faktörleri içeren tematik haritalar kullanılmıştır. Bu çok katmanlı analiz yaklaşımı, tsunami risk yönetimi için optimal toplanma alanlarının belirlenmesine yönelik bilimsel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

2.3.1 Hâlihazır Harita

Hâlihazır haritalar, bir bölgenin mevcut fiziksel özelliklerini ve yapılaşma durumunu gösteren temel kartografik belgelerdir. Bu çalışmada, Trabzon ili Akçaabat ilçesine ait hâlihazır harita verileri kullanılmıştır. Söz konusu haritalar, arazi kullanım desenleri, yapılaşma yoğunluğu, ulaşım ağları ve doğal/yapay arazi formları gibi detaylı bilgiler içermektedir. Afet toplanma alanlarının değerlendirilmesi ve tsunami riskine karşı potansiyel toplanma bölgelerinin belirlenmesi çalışmalarında bu haritalar temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Büyük ölçekli ve yüksek doğruluklu olmaları nedeniyle, konumsal analizlerin güvenilir şekilde yapılabilmesine olanak sağlamıştır. Özellikle afet risk değerlendirmeleri ve kentsel planlama çalışmaları için vazgeçilmez bir altlık oluşturur. Akçaabat Hâlihazır Haritası, çalışmada hem Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) oluşturmak hem de detaylı analizler yapmak amacıyla kullanılmıştır. Haritada tanımlı yerleşim birimleri, QGIS ortamında vektör katmanına dönüştürülerek tsunami risk haritalarıyla entegre edilmiştir. Bu entegrasyon, yerleşim alanlarının tsunami etkilerine karşı hassasiyetinin değerlendirilmesinde temel oluşturmuştur.

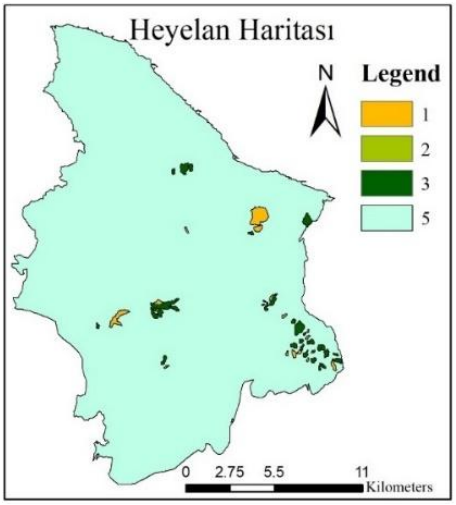
2.3.2 Heyelan Haritası

Depremlerin tetiklediği heyelan, zemin çökmeleri ve sıvılaşma gibi ikincil afetler, toplanma alanlarının güvenliğini önemli ölçüde tehdit etmektedir. Özellikle 4.0 ve üzeri büyüklükteki depremlerin heyelan riskini artırdığı bilinmektedir (Pacific Northwest Seismic Network, 2025). Ayrıca Doğu Karadeniz Bölgesinde, özellikle dolgu alanlarının yapılması deniz kıyı derinliğini daha da artırmaktadır. Özellikle, Trabzon, yüksek yağış miktarı, dik yamaçlar ve jeolojik olarak zayıf zemin yapısı nedeniyle Türkiye'nin en yüksek heyelan riskine sahip bölgeleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, MTA'nın Yerbilimleri Harita Görüntüleyicisi (Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, 2025) ile temin edilen Heyelan Tehlike

Haritası kullanılmıştır. Akçaabat ilçesi sınırları içindeki heyelan alanları GeoJSON formatında indirilerek analiz edilmiştir. Toplanma alanlarının heyelan bölgelerine olan mesafeleri, güvenlik açısından kritik öneme sahip bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Analizlerde MTA heyelan envanter verileri temel alınmış olup, heyelan bölgeleri türlerine göre sınıflandırılmış ve risk derecelendirmesi yapılmıştır. Şekil 2 ile verilen Heyelan haritası, Tablo 2 ile verilen ağırlık değerlerine göre toplanma alanlarının yer seçiminde dikkate alınmış olup heyelan riski taşımayan bölgeler en güvenli alanlar olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Heyelan alanlarına uzaklığın risk skorları

Fay Hattına Uzaklık (km)	Ağırlık	Risk Derecesi
Heyelan Alanı Dışındakiler	5	En Güvenli
Eski Heyelan	3	Orta
Alansal haritalanabilen aktif akma	2	Riskli
Aktif Heyelan	1	Yüksek Riskli



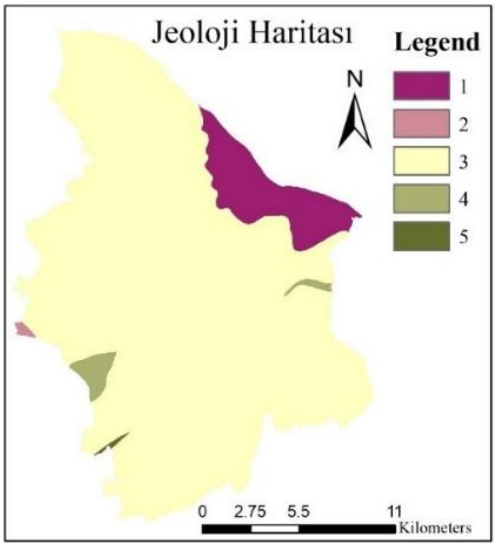
Şekil 2. Trabzon ili Akçaabat ilçesi heyelan haritası

2.3.3 Jeoloji Haritası

Toplanma alanlarının güvenliği açısından jeolojik zemin özellikleri kritik rol oynamaktadır. Sağlam zeminlerde konumlandırılan alanlar, deprem kaynaklı sıvılaşma ve zemin deformasyonu riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Çalışma alanındaki zeminler, farklı litolojik ve mühendislik özellikleri sergilemektedir. Jeolojik değerlendirmeler için MTA'nın Yerbilimleri Harita Görüntüleyicisi kullanılarak Akçaabat ilçesine ait jeolojik formasyonlar GeoJSON formatında temin edilmiştir. Trabzon ve çevresi, Kretase'den Kuvaterner'e uzanan çeşitli yaştaki kaya birimlerinden oluşmaktadır. Bölgenin karmaşık jeolojik yapısı, Pontid tektonik kuşağının evrimi sırasında şekillenmiştir. Tsunami toplanma alanı seçiminde zemin stabilitesi, sıvılaşma direnci ve topografik süreklilik temel kriterler olarak belirlenmiştir. Trabzon'un jeolojik birimlerinin litolojik özellikleri, stratigrafik konumları ve jeomekanik davranışları Tablo 3 ile verilmiştir. Her formasyonun mühendislik jeolojisi açısından uygunluğu literatür taramasıyla belirlenmiş “en uygun: 5”, “uygun: 3”, “uygun olmayan: 1” zeminler olarak sınıflandırılmıştır. Elde edilen jeoloji haritası Şekil 3 ile gösterilmiştir.

Tablo 3. Jeolojik birimlerin risk skorları

Açıklama	Yas	Risk Derecesi
Kırıntılılar ve karbonatlar	Üst kretase-eosen	4
Volkanitler ve sedimenter kayalar	Orta-üst eosen	3
Kırıntılılar ve karbonatlar	Üst kretase-eosen	4
Volkanitler ve sedimenter kayalar	Üst kretase	3
Karasal kırıntılılar	Pliyosen	1
Neritik kireçtaşı	Orta jura-kretase	5
Volkanitler ve sedimenter kayalar	Alt-orta jura	3
Ayrılmamış volkanitler	Eosen	2



Şekil 3. Trabzon ili Akçaabat ilçesi jeoloji haritası

2.3.4 Yükseklik Haritası

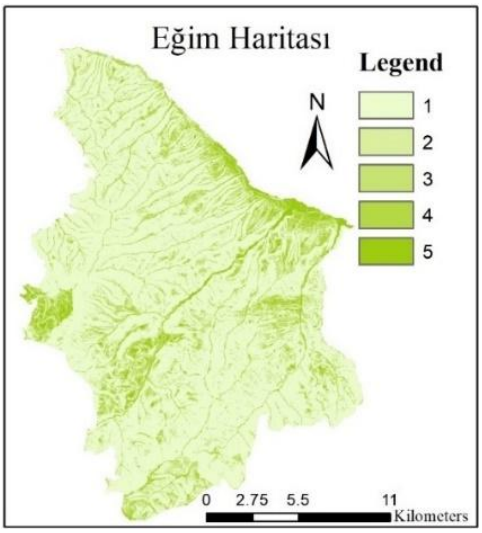
Tsunamiler, deniz tabanındaki sismik hareketler sonucu oluşan ve kıyı bölgelerinde yıkıcı etkilere yol açan doğal afetlerdir. Karadeniz'de, özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın denizel uzantıları nedeniyle tarihsel dönemlerde tsunami kayıtları bulunmaktadır. Trabzon, yoğun kıyı yerleşimleri ve nüfus yapısıyla bu tehlike karşısında önemli risk taşımaktadır. Tsunami risk yönetiminde toplanma alanlarının belirlenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu süreçte yükseklik haritaları temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Uluslararası standartlar, tsunami riski bulunan bölgelerde toplanma alanlarının deniz seviyesinden en az 10 m yüksekte olmasını önermektedir (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2020) Yükseklik verileri hem su baskın sınırlarının modellenmesinde hem de güvenli bölgelerin tespitinde kritik rol oynamaktadır.

2.3.5 Eğim Haritası

Toplanma alanlarının belirlenmesinde eğim değerleri kritik bir parametredir. Kılcı vd. (2015) tarafından yapılan çalışma, ideal toplanma alanları için %2-4 arası eğimlerin en uygun olduğunu ortaya koymuştur. NZ Transport Agency (2009) ve Türk Kızılay'ı standartları ise maksimum eğim sınırını %7-8 olarak belirlemiştir. Soltani vd. (2014, 2015) ise %25'ten fazla eğime sahip arazilerin heyelan riski ve ulaşım zorluğu nedeniyle uygun olmadığını belirtmiştir. Trabzon'un engebeli topoğrafik yapısı, bu çalışmada eğim analizlerini özel kılmaktadır. Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verileri kullanılarak hazırlanan eğim haritası, risk durumlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sonuçları Tablo 4 ile sunulmuş olup, eğim haritası Şekil 4 ile gösterilmiştir.

Tablo 4. Eğim yüzdelerinin risk skorları

Eğim (%)	Ağırlık	Risk Derecesi
20 -+	1	Yüksek Riskli
15-20	2	Riskli
10-15	3	Orta
5-10	4	Güvenli
0-5	5	En Güvenli



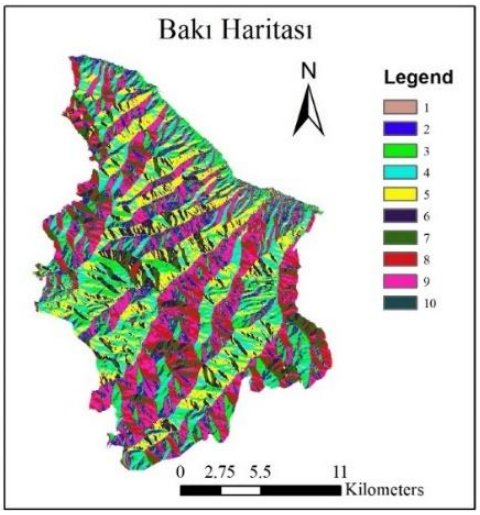
Şekil 4. Trabzon ili Akçaabat ilçesi eğim haritası

2.3.6 Bakı Haritası

Trabzon, tarihte doğal afetlere maruz kalmış ve tsunami riski taşıyan bir Karadeniz liman kentidir. Bu çalışmada, afet sonrası kullanılacak toplanma alanlarının belirlenmesi sürecinde bakı analizleri kullanılmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli verilerinden yararlanılarak oluşturulan bakı haritası, alan seçim kriterlerinin belirlenmesinde temel alınmıştır. Bakı değerleri, güneşlenme süreleri, rüzgâr etkisi, nem dağılımı ve bitki örtüsü özellikleri açısından detaylı şekilde analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bakı haritası Şekil 5, risk skorları ise Tablo 5 ile sunulmuştur. Bu veriler, Trabzon özelinde tsunami senaryolarına yönelik alan kullanım kararlarında bilimsel dayanak oluşturmaktadır.

Tablo 5. Bakı seviyelerine göre risk skorları

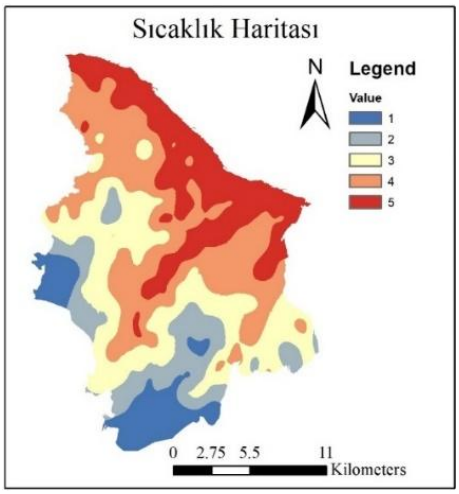
Bakı	Ağırlık	Risk Derecesi
0-22.5° (Kuzey)	1	Yüksek Riskli
22.5-67.5° (Kuzeydoğu)	2	Riskli
67.5-112.5° (Doğu)	3	Orta
112.5-157.5° (Güneydoğu)	4	Güvenli
157.5-202.5° (Güney)	5	En Güvenli
202.5-247.5° (Güneybatı)	4	Güvenli
247.5-292.5° (Batı)	3	Orta
292.5-337.5° (Kuzeybatı)	3	Orta
337.5-360° (Kuzey)	2	Riskli



Şekil 5. Trabzon ili Akçaabat ilçesi bakı haritası

2.3.7 Sıcaklık Haritası

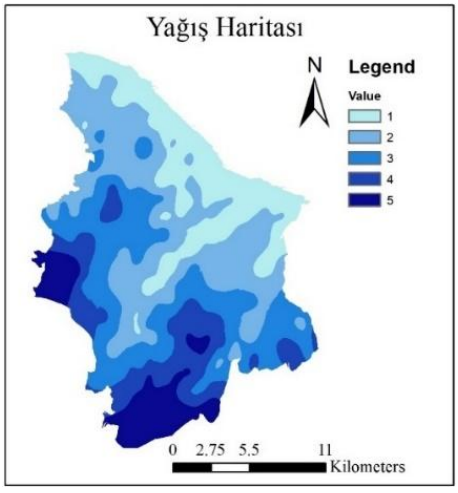
Trabzon il merkezinin (39 m rakım) yıllık ortalama sıcaklığı referans alınarak, her 200 metrede yaklaşık 1 °C azalan sıcaklık değerlerine dayalı bir sıcaklık haritası oluşturulmuştur. Bu hesaplamada, atmosferde yükseltiye bağlı sıcaklık değişimini ifade eden Lapse Rate oranı temel alınmıştır (Barry & Chorley, 2009). Bu ilişki temel alınarak her hücre için sıcaklık değeri hesaplanmış ve yeniden sınıflandırılarak Şekil 6 ile gösterilen sıcaklık haritası oluşturulmuştur. Bu harita özellikle tsunami sonrası toplanma alanlarının çevresel uygunluk analizinde mikroklima açısından değerlendirme yapılmasını sağlamıştır.



Şekil 6. Trabzon ili Akçaabat ilçesi sıcaklık haritası

2.3.8 Yağış Haritası

Çalışmada, Schreiber metoduna göre ve Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verileri kullanılarak hesaplanan yağış verilerinden yararlanılmıştır. Yağışın yükseltiye bağlı dağılımında, her 100 metrede 54 mm artış öngören Schneider metodu benimsenmiştir (Ardel vd., 1969). Bu doğrultuda, Trabzon il merkezindeki referans değer esas alınarak, her hücre için tahmini yıllık yağış miktarı hesaplanmıştır. Sınıflandırmada yağış bölgeleri düşük, orta ve yüksek yağış bölgeleri şeklinde Şekil 7 ile gösterildiği gibi gruplandırılmıştır.



Şekil 7. Trabzon ili Akçaabat ilçesi yağış haritası

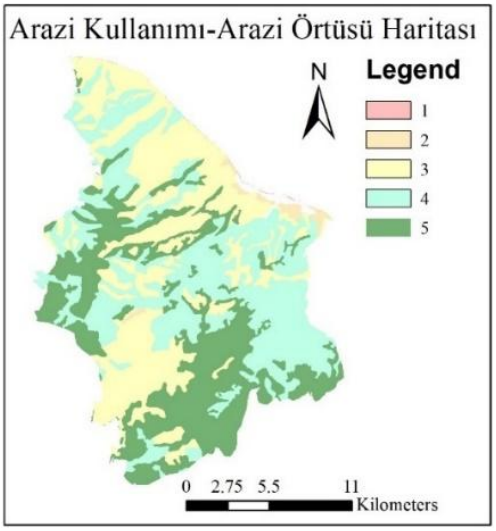
2.3.9 Arazi Kullanımı ve Arazi Örtüsü Haritası

Trabzon, Karadeniz'in tektonik hareketliliği nedeniyle tarihsel tsunami kayıtları göz önüne alındığında potansiyel risk taşımaktadır. Etkin bir afet müdahalesi için hayati öneme sahip toplanma alanlarının belirlenmesinde, arazi kullanımının belirleyici rolü bulunmaktadır.

Bu kapsamda, yerleşim dokusu, ulaşım altyapısı ve açık/yeşil alanlar gibi bileşenleri içeren bir arazi kullanım haritası, CORINE veri seti kullanılarak sınıflandırılmıştır (Copernicus Land Monitoring Service, 2025). Söz konusu veriler, kaçış yollarının güvenliği ile toplanma alanlarının erişilebilirliği ve kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, arazi kullanım türlerinin toplanma alanı seçimine etkisini değerlendirmek amacıyla Tablo 6 oluşturulmuş ve Şekil 8 ile verildiği gibi arazi kullanım haritası bu tabloya göre yeniden sınıflandırılarak overlay analizi için hazır hale getirilmiştir.

Tablo 6. Arazi kullanımına göre risk skorları

Arazi Kullanımı	Ağırlık	Risk Derecesi
İç Sular	1	Yüksek Riskli
Ayrık yapılaşmış alanlar, yoğun iğne yapraklı orman, seyrek iğne yapraklı orman, karışık orman	2	Riskli
Seyrek bitki örtüsü, kompleks tarım, geçici nadas	3	Orta
Kalıcı çayır, tarıma elverişli, doğal çayır-mera, sulu tarım alanı	4	Güvenli
Geniş yapraklı tarla, sebze bahçecilik, meyve, üzüm bağı, zeytinlik, yağlı tohum bitkisi	5	En Güvenli



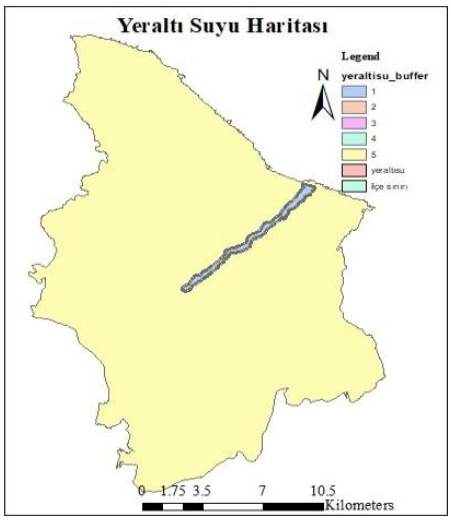
Şekil 8. Trabzon ili Akçaabat ilçesi arazi kullanımı ve arazi örtüsü haritası

2.3.10 Yeraltı Suları Haritası

Yeraltı su seviyesi, deprem kaynaklı sıvılaşma ve heyelan riskleri nedeniyle toplanma alanı seçiminde kritik bir parametre olarak değerlendirilmiştir (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2007). Çalışmada, DSİ 22. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen Akifer Haritası kullanılmıştır. Hidrojeolojik veriler kullanılarak oluşturulan raster katman, Tablo 7 ile belirtilen eşik değerlerine göre "riskli", "orta" ve "güvenli" olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sonuçları Şekil 9 ile sunulmuş olup, toplanma alanlarının belirlenmesinde önemli bir kriter olarak kullanılmıştır. Yeraltı suyu potansiyelinin bu şekilde haritalanması hem afet risklerinin azaltılmasına hem de sürdürülebilir kaynak yönetimine katkı sağlamıştır.

Tablo 7. Yeraltı suyuna yakınlığa göre risk skorları

Yeraltı Suyuna Uzaklık (m)	Ağırlık	Risk Derecesi
0-20	1	Yüksek Riskli
20-50	2	Riskli
50-100	3	Orta
100-150 m	4	Güvenli
150< 200+	5	En Güvenli



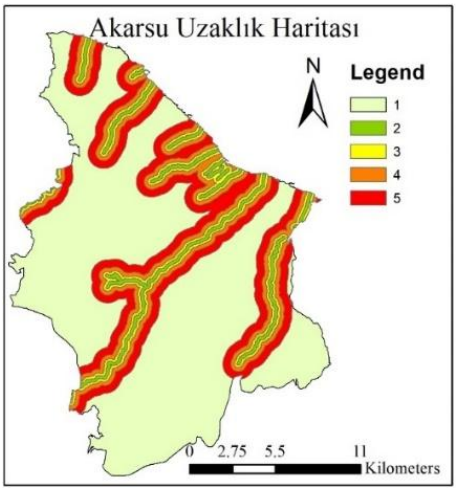
Şekil 9. Trabzon ili Akçaabat ilçesi yeraltı suyu haritası

2.3.11 Akarsu Uzaklık Haritası

Sel ve taşkın riski bulunan alanlar, geçici barınaklar için sıklıkla tercih edilmekle birlikte, bu durum ikincil afet risklerini artırmaktadır (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2020). Çalışmada, toplanma alanlarının belirlenmesinde nehir yataklarından en az 100 m uzakta olması (Soltani vd., 2014) ve sel tehlikesi bulunan bölgelerden kaçınılması (Soltani vd., 2015) temel prensip olarak benimsenmiştir. DSİ 22. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen Akarsu ve Taşkın Haritası, Trabzon Akçaabat'taki Söğütlü Deresi ve çevresindeki taşkın riskli bölgeleri göstermektedir. Bu harita, potansiyel toplanma alanlarının değerlendirilmesinde kritik rol oynar. Tsunami risk yönetiminde, akarsu ağızlarının dalgaların iç kesimlere ulaşmasını kolaylaştırdığı göz önüne alınarak, Tablo 8 ile akarsuya minimum uzaklık kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler doğrultusunda yeniden sınıflandırılan akarsu uzaklık haritası Şekil 10 ile verilmiştir. Çalışma, geleneksel tsunami risk değerlendirme yaklaşımlarına ek olarak akarsu etkileşimlerini de dikkate alan bütüncül bir metodoloji sunmaktadır.

Tablo 8. Akarsulara uzaklığa göre risk skorları

Akarsuya Uzaklık (m)	Ağırlık	Risk Derecesi
0-100	1	Yüksek Riskli
100-250	2	Riskli
250-500	3	Orta
500-1000	4	Güvenli
1000-+	5	En Güvenli



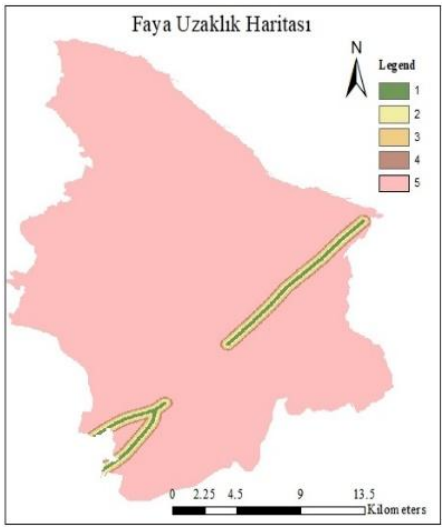
Şekil 10. Trabzon ili Akçaabat ilçesi akarsu uzaklık haritası

2.3.12 Lokal Fay Haritası

Akçaabat ilçesindeki lokal fay hatları, yerleşim alanlarına yakınlıkları nedeniyle önemli bir sismik risk kaynağıdır. Çalışmada, MTA Doğu Karadeniz Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen fay haritası kullanılmıştır. QGIS ortamında yapılan analizlerle fay hatlarına olan mesafeler hesaplanmış ve toplanma alanlarının belirlenmesinde bu veriler temel alınmıştır. Özellikle aktif fay zonlarına yakınlık, deprem riski açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntem, konumsal verilerin afet yönetimi çalışmalarında etkin kullanımını göstermesi açısından önem taşımaktadır. Çalışmada, fay hattına 100 metreden yakın alanlar yüksek riskli bölge olarak belirlenmiştir. Bu analizler doğrultusunda Şekil 11 ile gösterilen tematik harita için risk seviyeleri Tablo 9 ile verilmiştir. Özellikle fay zonlarına yakınlık, deprem riski açısından kritik öneme sahip olduğundan, bu sınıflandırma toplanma alanlarının yer seçiminde belirleyici rol oynamıştır.

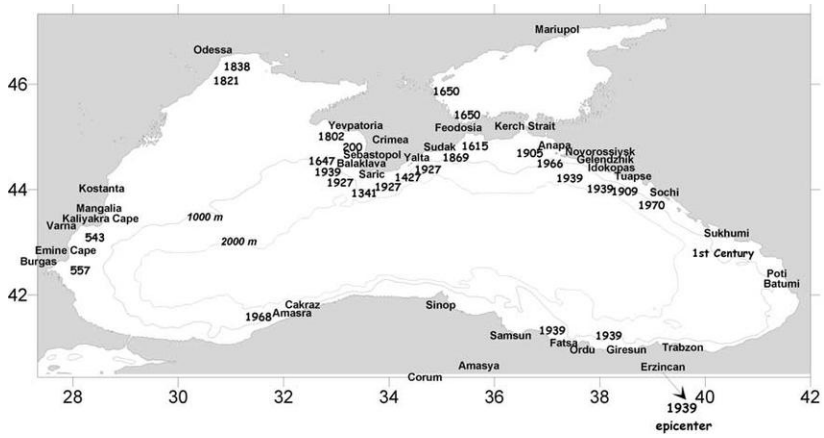
Tablo 9. Fay hattına uzaklıkların risk skorları

Fay Hattına Uzaklık (m)	Ağırlık	Risk Derecesi
0-100	1	Yüksek Riskli
100-200	2	Riskli
200-300	3	Orta
300-400	4	Güvenli
400 < +	5	En Güvenli



Şekil 11. Trabzon ili Akçaabat ilçesi faya uzaklık haritası

Karadeniz Bölgesi, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın etkisiyle tarih boyunca yıkıcı depremlerle sarsılmıştır. Şekil 12, ilk yüzyıldan itibaren karada veya yakın kıyıda meydana gelmiş ve hasara neden olmuş önemli tsunamileri göstermektedir.



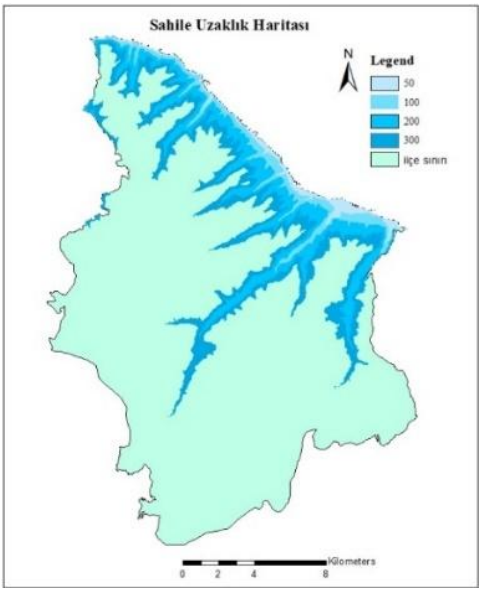
Şekil 12. Karadeniz Bölgesi'nde belgelenen tsunami konumları (Altinok vd., 2011)

2.3.13 Sahile Uzaklık Haritası

Tsunami riski açısından toplanma alanlarının belirlenmesinde kıyıya olan mesafe kritik bir faktördür. Çalışmada, Akçaabat ilçesi için denizden 500 m içeride ve minimum 10 m yükseklikteki alanlar güvenli bölge olarak tanımlanmıştır. Bu değerlendirme, Karadeniz'de tarihsel olarak kaydedilen 1-3 m tsunami dalga yüksekliği verileri temel alınarak Tablo 10 ile verilen risk skorları belirlenmiş ve Şekil 13 ile harita üzerinde görselleştirilmiştir. Analizler QGIS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kıyı yerleşimlerindeki toplanma alanlarının optimal konumlandırılması için güvenilir bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 10. Sahile uzaklıkların risk skorları

Sahile Uzaklık	Ağırlık	Risk derecesi
0-50	1	Yüksek Riskli
50-100	2	Riskli
100-200	3	Orta
200-300	4	Güvenli
300 < +	5	En güvenli



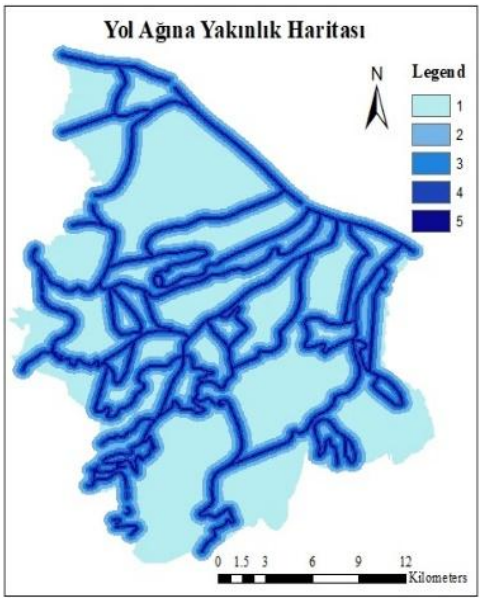
Şekil 13. Trabzon ili Akçaabat ilçesi sahile uzaklık haritası

2.3.14 Yol Ağına Yakınlık Haritası

Afet yönetimi planlamasında yol ağının erişilebilirliği hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Akçaabat ilçesinin mevcut yol ağı hâlihazır haritalardan elde edilerek detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Toplanma alanlarının belirlenmesi sürecinde, yol ağına yakınlık temel kriterlerden biri olarak değerlendirilmiştir. Hâlihazır üzerinden alınan yol ağı verisi kullanılarak Tablo 11 ile verildiği gibi risk skorlarıyla erişilebilirlik açısından yeniden sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Yeniden sınıflandırmaya göre oluşturulan yol ağına yakınlık haritası Şekil 14 ile verilmiştir.

Tablo 11. Yola yakınlığa göre risk skorları

Yola Yakınlık (m)	Ağırlık	Risk Derecesi
500 < +	1	Yüksek Riskli
300-500	2	Riskli
150-300	3	Orta
50-150 m	4	Güvenli
Anayola <50m	5	En Güvenli



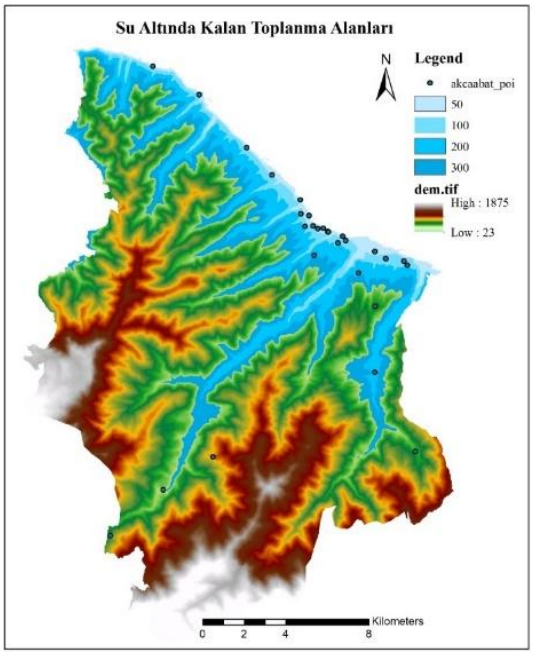
Şekil 14. Trabzon ili Akçaabat ilçesi yol ağına yakınlık haritası

3. Bulgular ve Tartışma

Trabzon'un Akçaabat ilçesinde olası bir tsunami sonrası oluşabilecek taşkın riskine karşı toplanma alanlarının uygunluğunu değerlendirmek ve alternatif alanlar önermek amacıyla bu çalışmada CBS tabanlı çok kriterli karar verme analizi kullanılmıştır. Analiz sürecinde yükseklik, eğim, bakı, sıcaklık, yağış, fay hattına uzaklık, heyelan duyarlılığı, jeolojik yapı, akarsu ve sahil mesafesi, arazi kullanımı, yeraltı suyu derinliği ve erişilebilirlik gibi kriterler değerlendirilmiştir. Bu veriler raster formata dönüştürülerek yakınlık analizleri, yeniden sınıflandırma, ağırlıklandırma ve AHP ile analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, yüksek eğimli ve yüksek rakımlı bölgelerin, sıvılaşma riski taşımayan jeolojik birimlerin, sahile ve fay hatlarına uzak alanların taşkın açısından düşük riskli olduğu belirlenmiştir. Ancak mevcut toplanma alanlarının büyük bir kısmının riskli bölgelerde yer aldığı ve olası bir tsunami durumunda bu alanların neredeyse tamamının sular altında kalabileceği tespit edilmiştir. Bu durum, bölgedeki afet planlarının gözden geçirilmesi ve daha güvenli alternatif toplanma alanlarının belirlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

3.1 Potansiyel tsunami alanları için belirlenen kriterler

Akçaabat'ta deprem veya denizaltı heyelanlarıyla tetiklenebilecek bir tsunaminin yol açacağı taşkın riski dört farklı senaryo üzerinden değerlendirilmiş ve mevcut toplanma alanlarının güvenliği incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler, kıyıdaki yerleşimlerin tsunami dalgalarından ciddi şekilde etkilenebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle dolgu alanları, zayıf zemin yapısı nedeniyle büyük risk taşımaktadır. Bu bölgeler, genellikle heterojen malzemeyle doldurulmuş, sıkışmamış ve suya doygun olduğu için deprem veya tsunami sırasında sıvılaşma, oturma ve deformasyon riski yüksektir. Akçaabat'ta dolgu alanları üzerinde toplanma bölgeleri, sosyal tesisler ve kritik altyapılar bulunmaktadır. Bu nedenle, bu alanların afet dayanıklılığının mühendislik ve planlama açısından detaylı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Karadeniz'de tarihsel olarak nadir görülen tsunamiler, deniz tabanı heyelanları nedeniyle yerel ölçekte tehlikeli olabilir. Dolayısıyla, toplanma alanlarının belirlenmesinde yalnızca erişilebilirlik ve nüfus yoğunluğu değil, zemin stabilitesi ve sıvılaşma riski gibi teknik faktörler de dikkate alınmalıdır. Bu yaklaşım, afet sonrası sürecin daha güvenli yönetilmesini sağlayarak can ve mal kaybını en aza indirecektir. Gerçekleştirilen konumsal analiz sonuçlarına göre deprem veya sualtı heyelanlarının etkisiyle meydana gelebilecek olası bir tsunami için taşkın senaryoları üretilerek 4 farklı senaryoya göre mevcut toplanma alanlarından hangilerinin güvenli toplanma alanları olacağı belirlenmiştir. Potansiyel toplanma alanları için kriterler değerlendirilerek uygun alanlar belirlenmiştir. Kara alanlarındaki tsunami yayılımında bölgede bulunan yerleşim alanları üzerinde ciddi etkileri olacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında tsunami afeti için 50m, 100m 200m ve 300m olmak üzere Şekil 15 ile verildiği gibi taşkın senaryoları üretilmiştir ve bu senaryolar sonucunda Tablo 12 ile verildiği gibi sular altında kalacak olan toplanma alanları verilmiştir. Tablo 12, deniz seviyesinden yüksekliğin toplanma alanlarının güvenliği üzerinde en kritik faktör olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 15. Trabzon ili Akçaabat ilçesi su altında kalan toplanma alanları

Şekil 15 ile gösterildiği gibi toplam 22 toplanma alanının olası bir tsunami sonucunda tsunami dalgalarından etkileneceği tespit edilmiştir. 50 metre ve altındaki alanlar, en fazla sayıda (12) ve en geniş alana (110,047,83 m²) sahip toplanma alanlarını barındırmasına rağmen, en yüksek risk grubundadır. Bu, riskin en yüksek olduğu bölgelerde, insanları tahliye etmek için en çok sayıda alana ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir, ancak bu alanların kendisi de risk altındadır. Toplam 164858.52 m^2 alan sular altında kalmaktadır.

Tablo 12. Tsunami sonrası yaşanabilecek taşkın senaryolarında sular altında kalacak toplanma alanı sayısı ve alanı

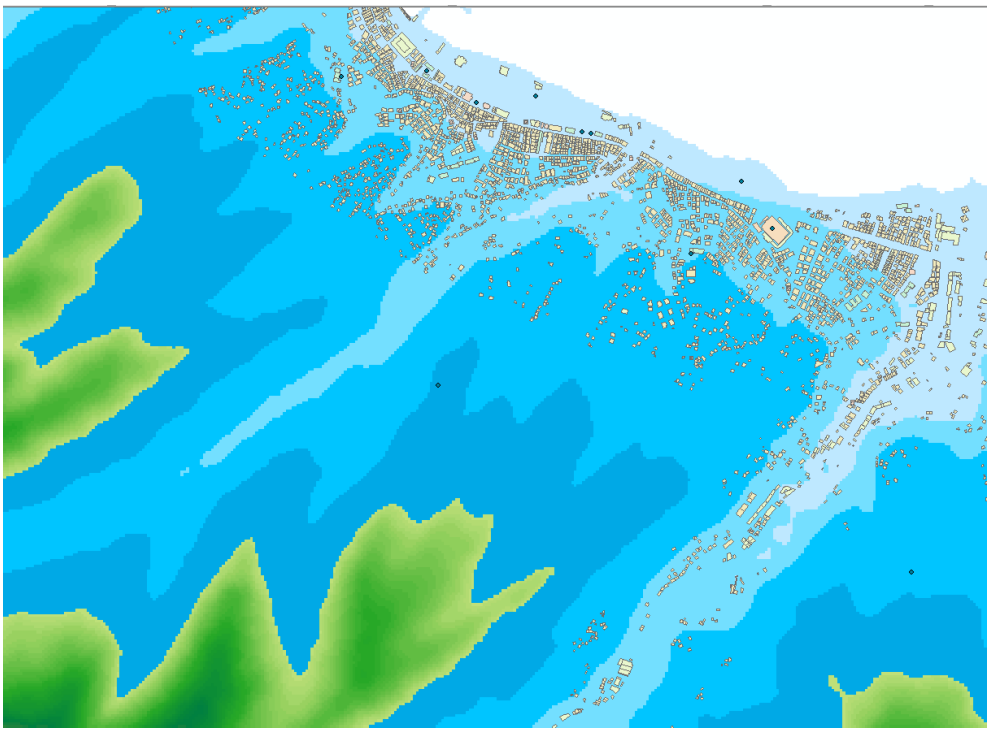
Mahalle	No	Adı	Toplanma Alanı Sayısı	Alanı (m²)	Yükseklik (m)
Dürbinar	T01	Akçaabat Sahil Parkı	12	110047.83	50m
Darıca	T05	Darıca İlkokulu			
Orta	T06	Atatürk Parkı			
Dürbinar	T07	Selami Yardım Orta Okulu			
Dürbinar	T08	Abdullah Fazıl Ağanoğlu İlk Okulu			
Orta	T09	Merkez İlk Okulu			
Kavaklı	T10	Rahman Camii Bahçesi			
Çolaklı	T11	Festival Alanı			
Söğütlü	T15	Turizm Otelcilik Okulu			
Salacık	T17	Salacık İlk Okulu			
Akçakale	T24	Akçakale Merkez Camii			
Yaylacık	T28	Sahil Dolgu Alanı Kamelyalar Mevkii			
Söğütlü	T02	Fatih Eğitim Fakültesi	7	52430.27	100m
Yaylacık	T04	Yaylacık Akçaabat Millet Bahçesi			
Yıldızlı	T12	Yıldızlı İmam Hatip İö			
Yıldızlı	T14	Yıldızlı Toki İö			
Yaylacık	T16	Alaattin Akçay İlk Okulu			
Nefsipulathane	T19	Cumhuriyet Orta Okulu			
Yeni	T22	Şehit Gökhan Uzun Fen Lisesi			
Osmanbaba	T18	Osmanbaba İlk Okulu	2	991.08	200m
Derecik	T21	Derecik İö			
Sarıtaş	T23	Sarıtaş İlk Okulu	1	1389.34	300m
Akpınar	T03	Akpınar Sağlık Ocağı Bahçesi	6	6148.85	-
Yıldızlı	T13	Ayyıldız Ortaokulu			
Mersin	T20	Şehit Engin Saraç İlk Okulu			
Işıklar	T25	Işıklar Fabrika Bahçesi			
Doğanköy	T26	Doğanköy İlk Okulu			
Akçaköy	T27	Akçaköy Okul Bahçesi			

Taşkından etkilenecek toplanma alanlarının mahalle bazında dağılımı (Dürbinar, Darıca, Orta, Kavaklı, Çolaklı, Söğütlü, Salacık, Akçakale, Yaylacık), tsunami taşkınının özellikle Akçaabat'ın sahil şeridindeki düz ve alçak dolgu alanlarını hedef alacağını göstermektedir. Bu, kıyıya yakın ve alçak rakımlı tüm yerleşimlerin ciddi risk altında olduğu anlamına gelir. En çarpıcı sonuç, bir afet sonrası insanların sığınması planlanan 12 toplanma alanının (T01'den T28'e kadar, 50m'de listelenenler) bizzat sular altında kalma riski taşımasıdır. Bu durum, mevcut afet planlamasında bu alanların "güvenli" varsayıldığını, ancak tsunami senaryosunda bu varsayımın geçersiz olduğunu gösterir. Bu alanlar artık "birincil toplanma alanı" olarak değil, ancak "ilk tahliye noktası" veya "buluşma noktası" olarak kullanılabilir; insanların buradan daha yüksek rakımlı bölgelere yönlendirilmesi gerekir.

Risk altında olmayan alanlar (200m ve 300m'deki alanlar) incelendiğinde, sayılarının (2 ve 1) ve toplam alanlarının (991,08 m² ve 1389,34 m²) son derece yetersiz olduğu görülmektedir. Sahildeki 110,000 m²'lik alana kıyasla, bu alanlar nüfusun ihtiyacını karşılayamaz. Bu da yüksek rakımlı bölgelerde acilen yeni, büyük ve donanımlı toplanma alanları tespit edilmesi veya inşa edilmesi gerektiğine işaret eder. Senaryo bazında değerlendirme yapıldığında ise;

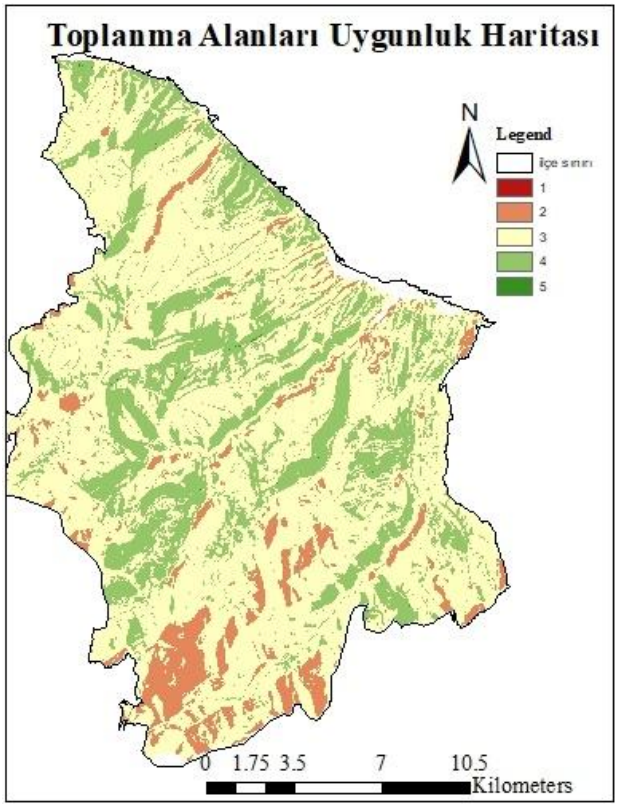
- 50m Senaryosu: En kötü senaryodur. Sahil şeridindeki neredeyse tüm toplanma altyapısı işlevsiz kalacaktır. Akçaabat Sahil Parkı (T01) gibi büyük alanlar bile sular altında kalacağı için, halkın buraya toplanması tehlikeli olacaktır. Tahliye planları, halkı doğrudan 100 m ve üzeri rakımlara yönlendirecek şekilde yeniden düzenlenmelidir.
- 100m Senaryosu: 50m senaryosuna göre risk azalmış olsa da (Fatih Eğitim Fakültesi, Millet Bahçesi gibi 7 alan hala riskli), hala ciddi bir tehdit söz konusudur. 100 m kotu, özellikle dalga yüksekliği büyük bir tsunami için yeterli bir emniyet mesafesi olmayabilir.
- 200m & 300m Senaryoları: Bu yükseklikler, bir tsunami için nispeten güvenli bölgeler olarak kabul edilebilir. Ancak, burada asıl sorun kapasite yetersizliğidir. Sadece 3 toplanma alanı (Osmanbaba İlk Okulu, Derecik İÖ, Sarıtaş İlk Okulu) bu yüksekliklerde listelenmiştir ve toplam alanları çok küçüktür. Bu, nüfusun bu bölgelere tahliyesi ve barındırılmasında ciddi bir lojistik problem olduğunu gösterir.

Akçaabat'ın mevcut tsunami afet planının ciddi bir şekilde gözden geçirilmesi ve yüksek rakımlı bölgelere odaklanan yeni bir tahliye stratejisi geliştirilmesi gerektiğini bilimsel olarak ortaya koymaktadır. Tsunami afeti taşkın alanı içerisinde bulunan yerleşim yerlerini ve nüfusu da etkileyeceği öngörülmektedir. Bu bağlamda sular altında kalacak yerleşim alanları Şekil 16 ile verilmiştir.



Şekil 16. Trabzon ili Akçaabat ilçesi taşkın alanlarının yerleşim alanlarına etkisi

Bu çalışmada, uygun alanların belirlenmesine yönelik yapılan çok kriterli değerlendirmede, toplam 13 farklı kriter dikkate alınmıştır. Her bir kriterin afet riski üzerindeki etkisi literatür ve bölgesel özellikler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiş ve Şekil 17 ile verildiği gibi toplanma alanları için uygunluk haritası oluşturulmuştur.



Şekil 17. Trabzon ili Akçaabat ilçesi toplanma alanları uygunluk haritası

4. Sonuç ve Öneriler

Akçaabat ilçesinde yürütülen bu çalışma, mevcut toplanma alanlarının tsunami tehlikesi karşısındaki yetersizliğini ortaya koyan önemli bulgular sunmaktadır. Gerçekleştirilen analizler, bölgedeki toplanma alanlarının büyük bölümünün olası bir tsunami durumunda sular altında kalacağını ve bu nedenle acilen yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapılan değerlendirmeler, güvenli toplanma alanlarının belirlenmesinde çok boyutlu bir yaklaşımın benimsenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sahilden yeterli uzaklıkta, yüksek kotlarda yer alan, jeolojik açıdan stabil zeminler üzerinde bulunan ve erişilebilirlik özelliklerini taşıyan alanların tercih edilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu kapsamda, mevcut toplanma alanlarının büyük çoğunluğunun konumlarının yeniden gözden geçirilmesi ve daha güvenli bölgelere taşınması gerekmektedir.

Çalışmanın bulguları, Akçaabat'ın yanı sıra benzer coğrafi özelliklere sahip diğer Karadeniz yerleşimleri için de önemli çıkarımlar sunmaktadır. Özellikle dolgu alanları üzerinde bulunan toplanma bölgelerinin, zemin yapısının zayıf olması nedeniyle ciddi risk taşıdığı anlaşılmaktadır. Bu durum, kıyı bölgelerindeki afet planlamasında zemin özelliklerinin daha fazla dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Akçaabat için geliştirilen bu yöntem, afet risk yönetiminde bilimsel verilere dayalı karar alma süreçlerinin önemini vurgulamaktadır. Yerel yönetimlerin, AFAD'ın ve ilgili diğer kurumların bu bulgular doğrultusunda acil önlemler alması ve afet hazırlık planlarını gözden geçirmesi gerekmektedir. Özellikle erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, alternatif toplanma alanlarının belirlenmesi ve halkın bilinçlendirilmesi yönünde adımlar atılmalıdır.

Karadeniz'in kapalı havza özelliğine rağmen, bölgedeki aktif fay hatları ve denizaltı heyelan potansiyeli dikkate alındığında, tsunami riskinin göz ardı edilmemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bu çalışma, sadece mevcut durumun tespitiyle yetinmeyip, gelecekte yapılacak afet yönetimi çalışmalarına yön verecek bir karar destek sistemi sunmaktadır. Elde edilen sonuçların, bölgedeki yerel yönetimler tarafından acilen uygulamaya konulması, olası can kayıplarının önlenmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

Kaynaklar

Aghlmand, M., Onur, M. İ., & Talaeı, R. (2020). Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde Analitik Hiyerarşi yönteminin ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *Özel Sayı*, 224–230.

Aksoy, Y., Turan, A. Ç., & Atalay, H. (2009). İstanbul Fatih ilçesi yeşil alan yeterliliğinin Marmara depremi öncesi ve sonrası değerleri kullanılarak incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *14*(2), 137–150.

Altinok, Y., Alpar, B., Özer, N., & Aykurt, H. (2011). Revision of the tsunami catalogue affecting Turkish coasts and surrounding regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *11*(2), 273–291.

Aman, D. D. (2019). *Olası Marmara depreminde toplanma alanları yer seçimi kriterlerinin belirlenmesi: İstanbul Bağcılar örneği* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Anand, A., Jethoo, A. S., & Sharma, G. (2015). Selection of temporary rehabilitation location after disaster: A review. *European Scientific Journal*, *11*(10), 161–169.

Anhorn, J., & Khazai, B. (2015). Open space suitability analysis for emergency shelter after an earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *15*(4), 789–803.

Ardel, A., Kurter, A., & Dönmez, Y. (1969). *Klimatoloji tatbikatı*. İstanbul Üniversitesi.

Atmaca, E., Aktaş, E., & Öztürk, H. N. (2023). Evaluated Post-Disaster and Emergency Assembly Areas Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques: A Case Study of Turkey. *Sustainability*, *15*(10), Article 8350. https://doi.org/10.3390/su15108350

Aykurt Vardar, H., Dogan, G. G., Vardar, D., Alpar, B., Alp, H., Demirel, S., & Yalciner, A. C. (2023). Scenario-based tsunami hazard assessment for the northwestern coast of Marmara Sea. *Geo-Marine Letters*, *43*(3), Article 12. https://doi.org/10.1007/s00367-023-00752-3

Baranova, E. A., & Mazova, R. Kh. (2020). Tsunami Hazard for the Crimean Coast of the Black Sea and the Kerch Strait at the Catastrophic Tsunamigenic Earthquakes, the Locations of which are Close to that of the Historical Yalta Earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, *27*(2), 110–125.

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). *Atmosphere, weather and climate*. Routledge.

Bazykina, A. Y., Mikhailichenko, S. Y., & Fomin, V. V. (2018). Numerical simulation of tsunami in the Black Sea caused by the earthquake on September 12, 1927. *Physical Oceanography*, *25*(4), 295–304.

Bektaş, Y., & Sakarya, A. (2020). An evaluation of an integrated disaster management and an emergency assembly area: the case of Kadıköy, Istanbul. *International Journal of Architecture and Planning*, *8*(2), 745–770.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2025). *The International Disaster Database. EM-DAT: The Emergency Events Database*. Université Catholique de Louvain. https://www.emdat.be

Cheng, H., & Yang, X. K. (2012). A comprehensive evaluation model for earthquake emergency shelter. Içinde *Sustainable transportation systems: Plan, design, build, manage, and maintain* (ss. 412–422).

Copernicus Land Monitoring Service. (2025). *CORINE Land Cover*. https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover

Çelik, H. Z., Ozcan, N. S., & Erdin, H. E. (2017). Afet ve acil durumlarda halkin toplanma alanlarinin kullanilabilirliğini belirleyen kriterler. *4. Uluslararasi Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansi*.

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.

Doğan, O. (2023). İş güvenliği uzmanlarının bakış açısıyla acil durum toplanma alan özelliklerinin AHP yöntemi ile değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *9*(1), 112–124.

Ekin, E., & Sarıkaya, Z. (2021). AHP tabanlı topsıs 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.

Gasperini, L., Zaniboni, F., Armigliato, A., Tinti, S., Pagnoni, G., Özeren, M. S., Ligi, M., Natali, F., & Polonia, A. (2022). Tsunami potential source in the eastern Sea of Marmara (NW Turkey), along the North Anatolian Fault system. *Landslides*, *19*(10), 2295–2310.

Gerdan, S., & Şen, A. (2019). Afet ve acil durumlar için belirlenmiş toplanma alanlarının yeterliklerinin değerlendirilmesi: İzmit örneği. *İdealkent*, *10*(28), 962–983.

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.

Gökgöz, A., İlerisoy, Z. Y., & Soyluk, A. (2020). *Acil durum toplanma alanlarının AHP yöntemi ile değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *19,* 935–945.

Gusiakov, V. K. (2016). Tsunamis on the Russian Pacific coast: history and current situation. *Russian Geology and Geophysics*, *57*(9), 1259–1268.

Hébert, H., Schindele, F., Altinok, Y., Alpar, B., & Gazioglu, C. (2005). Tsunami hazard in the Marmara Sea: a numerical approach to discuss active faulting and impact on the Istanbul coastal areas. *Marine Geology*, *215*(1-2), 23–43.

Intergovernmental Oceanographic Commission. (2020). *Preparing for community tsunami evacuations: from inundation to evacuation maps, response plans and exercises*. Intergovernmental Oceanographic Commission.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi. (2007). *İstanbul İli Mikrobölgeleme Projeleri*. https://depremzemin.ibb.istanbul/tr/istanbul-ili-mikrobolgeleme-projeleri

Kalkan, M. (2022). Uşak kentinde belirlenen afet ve acil durum toplanma alanlarının yeterliklerinin değerlendirilmesi. *Resilience*, *6*(2), 269–285.

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.

Kılcı, F., Kara, B. Y., & Bozkaya, B. (2015). Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey. *European journal of operational research*, *243*(1), 323–332.

Kandilli Rasathanesi. (2025a). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme Değerlendirme Merkezi*. http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tsunami/turkiye-ve-tsunami-riski/

Kandilli Rasathanesi. (2025b). *Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme Değerlendirme Merkezi*. http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tsunami/turkiyedeki-onemli-tsunamiler/

Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. (2025). *Yer Bilimleri Harita Görüntüleyicisi - Heyelan Alanları*. https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx

Mengi, O., & Erdin, H. E. (2018, May 04–06). *Afet ve acil durumlarda toplanma alanlarının yönetimi tasarım ve sistematik yaklaşımlar* [Symposium presentation]. 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya, Turkey.

National Centers for Environmental Information. (2025). *Natural Hazards Data*. https://www.ncei.noaa.gov/products/natural-hazards

Nikonov, A. A., Gusiakov, V. K., & Fleifel', L. D. (2018). Assessment of the tsunami hazard on the Russian coast based on a new catalogue of tsunamis in the Black Sea and the Sea of Azov. *Russian Geology and Geophysics*, *59*(2), 193–205.

NZ Transport Agency. (2009). *Pedestrian planning and design guide*. https://nzta.govt.nz/assets/resources/pedestrian-planning-guide/docs/pedestrian-planning-guide-superseded.pdf

Oynakov, E., Dimitrova, L., Pashova, L., & Dragomirov, D. (2023). Compilation of Regional Homogeneous Seismic Catalog for Identification of Tsunamigenic Zones in the Black Sea Region. *Geosciences*, *13*(8), Article 221. https://doi.org/10.3390/geosciences13080221

Öcal, T., & Yıldız, A. (2023). 2023 Kahramanmaraş Depremleri Öncesi Toplanma Alanlarının Coğrafi Analizi: Antakya ve Çevresi. *Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, *20*(52), 132–157.

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.

Partigöç, N. S. (2023). Afet sonrası toplanma alanlarına yönelik kapasite yeterliliğinin değerlendirilmesi: Merkezefendi ilçesi (Denizli) örneği. *Afet ve Risk Dergisi*, *6*(1), 128–147.

Pacific Northwest Seismic Network. (2025). *Landslides*. https://www.pnsn.org/outreach/earthquakehazards/landslides

Reid, J. A., & Mooney, W. D. (2023). Tsunami occurrence 1900–2020: A global review, with examples from Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, *180*(5), 1549–1571.

Rezaei, S. (2014). *Development of a decision support model for the optimum shelter location following a disaster* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Sabuncu, A. (2023). İstanbul Bakırköy İlçesinin Geçici Barınma Alanlarının Uzaktan Algılama Yöntemi ile Analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, *4*(2), 289–300.

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.

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*, *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*, *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 on iki şubat belediyesinde 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.

Taylan, S. (2018). *Afet sonrası acil toplanma ve geçici barınma alanları standartlarının değerlendirilmesi, Çankırı ili örneği* [Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü. (2021). *Trabzon İl Afet Risk Azaltma Planı*. T.C. Trabzon Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü. https://trabzon.afad.gov.tr/kurumlar/trabzon.afad/Haberler/2025/IRAP/Trabzon-IRAP-guncellenmis-27-03-2025.pdf

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). *İstatistik Veri Portalı*. https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109

Uyar, H. E., & Töre, E. (2023). Deprem sonrası ilk durak: İstanbul'da toplanma alanlarına dair bir inceleme. *Afet ve Risk Dergisi*, *6*(1), 226–242.

Vilibić, I., Denamiel, C., Zemunik, P., & Monserrat, S. (2021). The Mediterranean and Black Sea meteotsunamis: an overview. *Natural hazards*, *106*(2), 1223–1267.

Yalçıner, A. C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, İ., & Imamura, F. (2002). Tsunamis in the Sea of Marmara: Historical documents for the past, models for the future. *Marine Geology*, *190*(1-2), 445–463.

Yalçiner, A., Pelinovsky, E., Talipova, T., Kurkin, A., Kozelkov, A., & Zaitsev, A. (2004). Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental, and numerical data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *109*, Article C12023. https://doi.org/10.1029/2003JC002113

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS
Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi

Turk J Remote Sens GIS, Eylül 2025, 6(2): 384–401
Dergi Anasayfası: http://www.dergipark.org.tr/en/pub/rsgis

Fotogrametri ve Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Peyzaj Mimarlığına Entegrasyonu

Integration of Photogrammetry and Virtual Reality Applications in Landscape Architecture

Talha Aksoy[1]*, Şevval Özlü[2]

[1]*Kırklareli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 39000, Kırklareli/Türkiye.*
[2]*Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, 39000, Kırklareli/Türkiye.*

DERLEME MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**
Talha Aksoy
talha.aksoy@klu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1632100

Yayın süreci
Geliş tarihi: 03.02.2025
Kabul tarihi: 29.05.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Fotogrametri, üç boyutlu modelleme ve sanal gerçeklik teknolojilerinin peyzaj mimarlığındaki uygulamaları, disiplinin evriminde önemli bir yere sahiptir. Bu teknolojiler, özellikle doğal çevrenin sayısal ortamlarda hassas bir şekilde modellenmesi, peyzaj tasarım süreçlerinin daha verimli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Fotogrametrik veriler, bitki modelleme süreçlerine entegrasyonuyla, çevresel unsurların daha gerçekçi bir biçimde simüle edilmesine imkân verirken, bu teknolojilerin birleşik kullanımı, tasarımın doğruluğunu ve interaktifliğini artırmaktadır. Sanal gerçeklik, sayısal ortamda üç boyutlu modellerin etkileşimli olarak deneyimlenmesini sağlayarak, tasarım süreçlerini daha erişilebilir kılmakta ve kullanıcıların tasarım üzerinde daha bilinçli ve etkili bir şekilde etkileşimde bulunmalarına olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, peyzaj mimarlığında sayısallaşmanın sunduğu yeni fırsatları ve bu süreçlerin gelecekteki araştırma ve uygulamalara nasıl bir temel oluşturabileceğini incelemeyi amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Fotogrametri, 3B modelleme, Bitki modelleme, Sanal gerçeklik, Peyzaj mimarlığı*

Abstract

The applications of photogrammetry, three-dimensional modeling and virtual reality technologies in landscape architecture have an important place in the evolution of the discipline. These technologies, especially the precise modeling of the natural environment in digital environments, allow landscape design processes to be carried out more efficiently and effectively. Photogrammetric data, with its integration into plant modeling processes, allows environmental elements to be simulated more realistically, while the combined use of these technologies increases the accuracy and interactivity of the design. Virtual reality makes design processes more accessible by allowing three-dimensional models to be experienced interactively in a digital environment, and allows users to interact with the design more consciously and effectively. These developments aim to examine the new opportunities offered by digitalization in landscape architecture and how these processes can form a basis for future research and practice.

Keywords: *Photogrammetry, 3D modeling, Plant modeling, Virtual reality, Landscape architecture*

1. Giriş

Günümüzde fotogrametri ve sanal gerçeklik (VR) uygulamaları, peyzaj mimarlığı alanında önemli değişiklikler ve yenilikler getirmektedir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, peyzaj tasarımı ve uygulaması süreçlerinin daha verimli, detaylı ve etkileşimli bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Fotogrametri, gerçek dünyadaki nesnelerin ve alanların üç boyutlu modellerinin oluşturulmasını mümkün kılarken, sanal gerçeklik ise bu modellerin etkileşimli ve kullanıcı dostu bir ortamda deneyimlenmesine olanak tanımaktadır. Genel olarak, bu teknolojiler, peyzaj mimarlığı eğitiminden profesyonel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik uygulamalarının etkileşimli ortamlar oluşturma yeteneği, bu ortamlarda kullanılacak nesne ve mekanların modellenmesini zorunlu kılar.

İşte bu noktada fotogrametri, VR teknolojilerinin altyapısını oluşturan en önemli yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Fotogrametri, özellikle gerçek dünyadaki üç boyutlu (3B) hemen hemen her nesnenin modellenmesini sağlayabilmektedir. Modellenen bu çizimler, artırılmış gerçeklik ile görselleştirilerek peyzaj mimarlığında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Örnek olarak; Yiğit ve Uysal (2021)'in çalışması, fotogrametri yönteminin 3B modelleme, sayısal belgeleme ve sanal müzeler oluşturma konularındaki faydalarını detaylı bir şekilde incelemektedir. Fotogrametri ile elde edilen fotogerçekçi 3B modeller, kullanıcıların bu modelleri sanal ortamlarda daha iyi anlamalarına yardımcı olur ve aynı zamanda peyzaj mimarlığı uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilir (Yiğit & Uysal, 2021). Sanal gerçeklik uygulamaları, peyzaj mimarlığında interaktif deneyimler oluşturmak için kullanılmaktadır. Öğrenciler ve tasarımcılar, sanal gerçeklik ortamları aracılığıyla tasarımlarını daha canlı bir şekilde deneyimleyebilirler. Örneğin, Küçükkara ve arkadaşlarının çalışması (Küçükkara vd., 2024), mimarlık öğrencilerinin restorasyon derslerinde SG teknolojisi kullanarak tarihi yapıları inceleme deneyimlerini ele almıştır. Bu tür uygulamalar, öğrencilere uzaktan erişim ile daha önce erişemedikleri yapılara yakınlaşma imkânı tanımakta ve deneyimlerini zenginleştirmektedir (Küçükkara vd., 2024).

Peyzaj mimarlığı uygulamalarında fotogrametri ve sanal gerçeklik entegrasyonunun diğer bir avantajı, projelerin daha geniş kitlelere tanıtılmasını mümkün kılmaktır. Özeren ve arkadaşları, sanal gerçekliğin eğitimde ve tanıtımda nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceğine dikkat çekmektedir (Özeren vd., 2021). Sanal gerçeklik, kullanıcıların mekanları dönüşümlü olarak deneyimlemelerine olanak tanırken, aynı zamanda öğrencilerin ve tasarımcıların alan üzerinde daha iyi bir kavrayış geliştirmesine yardımcı olmaktadır. Entegre uygulamalar, peyzaj tasarımı süreçlerini optimize ederken aynı zamanda yapılan işlerin daha kaliteli olmasını sağlamaktadır. Artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik gibi teknolojiler, peyzaj tasarımında kullanılacak materyalleri ve çevreyle olan etkileşimi simüle edebilmekte, bu sayede tasarımcıların önlerinde daha bilinçli kararlar almalarını sağlamaktadır (Özeren vd., 2021).

Bunun yanı sıra, fotogrametri sayesinde oluşturulan veri setleri, tarihsel ve kültürel bağlamda önemli eserlerin korunması ve restorasyonu için de kullanılabilmektedir. Fidan ve Ulvi'nin çalışması, bu tür uygulamaların eğitim ve uygulama süreçlerindeki önemine vurgu yapmaktadır; bu araştırmalar, fotogrametrik verilerin sanal gerçeklik ortamında nasıl değerlendirildiğini göstermektedir (Fidan & Ulvi, 2022). Bu, peyzaj mimarlığı alanında kavramsal bilgilerin ve uygulamalı becerilerin gelişimine destek olurken, aynı zamanda kültürel mirasın korunmasına katkı sağlamaktadır. Öte yandan, sanal gerçeklik ortamlarında gerçek dünya ile sanal dünya arasındaki etkileşimi artırmak, peyzaj mimarlığı öğrencilerinin tasarım düşünme süreçlerini daha etkili hale getirdiği de gözlemlenmiştir. Eğitim alanında yapılan araştırmalar, sanal gerçekliği kullanan öğrencilerin karmaşık kavramları daha iyi anlama yetisine sahip olduklarını göstermiştir (Kahveci & Sondaş, 2023; Dilek, 2022). Bu bağlamda, sanal gerçeklik uygulamaları, eğitim sürecinde öğrenmeyi zenginleştirdiği gibi, öğrencilere daha yenilikçi tasarım yaklaşımları geliştirme fırsatı sunar.

Teknolojinin peyzaj mimarlığı eğitimine ve uygulamalarına etkisi üzerine kafa yorulduğunda, sanal gerçeklik tabanlı araçların motivasyon artışı sağladığı ve öğrenme süreçlerini macera dolu hale getirdiği aşikâr olmaktadır. Öğrencilerin sanal ortamlarda yer aldıkları ve kendi tasarımlarını görmek ve deneyimlemek için kaliteli bir deneyim yaşadıkları çalışmalardan elde edilen veriler, bu durumun doğruluğunu destekler niteliktedir (Dilek, 2022). Bununla beraber, bu dönüşüm, geleneksel eğitim sistemlerinin sınırlarını zorlayarak daha etkileşimli ve katılımcı bir öğrenme atmosferi sunmaktadır (Kahveci & Sondaş, 2023).

Özetlemek gerekirse, fotogrametri ve sanal gerçeklik uygulamaları, peyzaj mimarlığına entegrasyon süreçlerinde önemli birer araç haline gelmiştir. Bu teknolojiler, peyzaj tasarımında hem eğitsel hem de uygulayıcı boyutlarda önemli katkılar sağlamaktadır. Kullanıcıların düşünsel ve pratik becerilerini geliştirmekte, tarihi mirası koruma çabalarına katkıda bulunmakta ve mimari tasarımların daha geniş kitleler tarafından erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Fotogrametri ve sanal gerçeklik araçlarının birleşimi, peyzaj mimarlığı pratiğini ve eğitimini yeni ve etkili yollarla şekillendirmeye devam edecektir.

Fotogrametri tekniği hem üretim süreçleri hem de uygulama alanları açısından her geçen gün daha da genişleyerek kullanıcılarına fayda sağlamak amacıyla hızla gelişmeye devam etmektedir (Uysal, 2023). Fotogrametri tekniği, objeye doğrudan temas etmeksizin, 2B görsellerden güvenilir, doğru ve fotogerçekçi 3B modeller elde etmek için ekonomik ve etkili bir yöntem sunduğu için belgeleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Uslu, 2021). Fotogrametri tekniğiyle oluşturulan 3B modeller, gerçek boyut ve görselleriyle şekillenir (Şenol & Kaya, 2019).

Son yıllarda, 3B sayısal kültürel miras modellerinin uzun süreli depolanması ve yayılması için SketchFab, TurboSquid ve P3d.in gibi çevrimiçi platformlar ortaya çıkmıştır. Bu modellerin web tabanlı platformlarda uzun vadeli depolanması, kültürel mirasın korunması ve daha geniş kitlelere sunulması açısından önemlidir (Nihsanbaev, 2020).

2. Çalışmanın Kapsamı ve Derleme Yaklaşımı

Giriş bölümünde peyzaj mimarlığı disiplininin günümüzdeki zorlukları ve sayısal teknolojilerle olan artan etkileşimi genel hatlarıyla ortaya konulmuştur. Bu derleme makalesinde, söz konusu sayısal dönüşümün önemli bir bileşeni olan ve alana yenilikçi çözümler sunma potansiyeli taşıyan teknolojilere odaklanılmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, özellikle fotogrametri, 3B modelleme ve bu teknolojilerin ileri bir uygulaması olarak sanal gerçeklik ve dijital ikiz kavramlarının peyzaj mimarlığındaki yerini, mevcut uygulamalarını, avantajlarını, zorluklarını ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir literatür taramasıyla ortaya koymaktır.

Bu amacı gerçekleştirmek üzere, öncelikle ilgili anahtar kelimeler (örneğin, "peyzaj mimarlığı", "fotogrametri", "3B modelleme", "bitki modelleme", "sanal gerçeklik", "dijital ikiz", "İHA", "SfM") kullanılarak ulusal ve uluslararası akademik veri tabanları (Scopus, Web of Science, Google Scholar, DergiPark vb.), konferans bildirileri, kitap bölümleri ve teknik raporlar taranmıştır. Literatür tarama süreci sonucunda toplam 95 kaynak incelenmiş, ancak içerik bakımından yetersiz, konu dışı ya da yeterli bilimsel niteliğe sahip olmayan bazı popüler dergi makaleleri, kısa blog yazıları ve yalnızca ürün tanıtımı yapan teknik belgeler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Seçilen kaynaklar, ilgili teknolojilerin peyzaj mimarlığı disiplinindeki tarihsel gelişimini, teorik temellerini, farklı uygulama alanlarını (tasarım, planlama, belgeleme, analiz, eğitim, sunum) ve kullanılan yazılım/donanım altyapılarını kapsayacak şekilde değerlendirilmiştir. Derleme süreci, sadece mevcut durumu betimlemekle kalmayıp, aynı zamanda teknolojiler arasındaki ilişkileri, entegrasyon olanaklarını ve disiplinin geleceğine yönelik etkilerini analiz etmeyi hedefleyen tematik bir sentezleme yaklaşımı üzerine kurulmuştur.

Makalenin ilerleyen bölümleri, bu derleme yaklaşımı doğrultusunda yapılandırılmıştır. İlk olarak, peyzaj mimarlığında temel bir veri toplama, analiz ve belgeleme aracı olarak fotogrametri teknolojisinin yeri detaylandırılacaktır. Bu bölümde, fotogrametrinin peyzaj tasarımı, planlaması ve kaynak geliştirme gibi alt alanlardaki kullanımı, geleneksel ve modern yöntemlerle ilişkisi ve disiplinde kullanılan temel yazılım türleri (piksel, vektör, obje tabanlı) ele alınacaktır.

Ardından, fotogrametri tekniğinin tanımı, tarihsel süreci ve farklı sınıflandırmaları (yersel, hava, obje odaklı vb.) aktarılacaktır. Bu bölüm, fotogrametrinin temel prensiplerini anlamak için bir zemin oluşturduktan sonra, teknolojinin en önemli çıktılarından biri olan 3B modellemeye odaklanacaktır. Özellikle peyzaj mimarlığı için kritik öneme sahip olan bitkilerin fotogrametri kullanılarak nasıl modellendiği, bu süreçte kullanılan popüler yazılımların (Agisoft Metashape, Autodesk 123D Catch, 3DF Zephyr, RealityCapture vb.) karşılaştırmalı analizi ve bu yaklaşımın avantajları ile zorlukları tartışılacaktır. Bu kısım, fotogrametriden elde edilen verilerin nasıl somut sayısal varlıklara dönüştüğünü ve bu modellerin önemini vurgulayacaktır.

Son olarak, fotogrametri ve 3B modelleme ile oluşturulan sayısal içeriklerin, peyzaj mimarlığında daha etkileşimli ve sürükleyici deneyimler sunmak üzere nasıl kullanılabileceği ele alınacaktır. Bu bağlamda, sanal gerçeklik (VR) teknolojisinin tanımı, peyzaj mimarlığındaki kullanım alanları (tasarım görselleştirme, analiz, katılımcı süreçler) ve dijital ikiz kavramıyla olan ilişkisi incelenecektir. Bu bölüm, mevcut teknolojilerin gelecekteki potansiyelini ve peyzaj mimarlığı pratiğini nasıl dönüştürebileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3. Peyzaj Mimarlığında Fotogrametri Teknolojisinin Yeri

Peyzaj mimarlığında fotogrametri teknolojisi üç başlık altında incelenmiştir;

- Peyzaj Tasarım Çalışmaları,
- Peyzaj Planlama Çalışmaları,
- Kaynak Geliştirme ve Eğitim (Kurum & Çabuk, 1998).

Peyzaj tasarımı yapan kişi 2B çalışabileceği gibi 3B olarak çalışır, bilgisayar destekli tasarım teknolojilerinin ve görselleştirme teknolojilerinden yararlanır (Kurum & Çabuk, 1998). Tasarım sürecinde; çizim, 3B modelleme, animasyon, aydınlatma gibi unsurların simülasyonları yapılabilir, metraj hesaplamaları çıkarılabilir, çizimler şantiyeye anında aktarılabilir ve işverenle eşzamanlı çevrimiçi toplantılar düzenlenebilir. Bu sayede modern teknolojilerle birçok olanak sağlanmaktadır. Peyzaj mimarlığı ve mimarlık disiplini “Grafik” amaçlı yazılımlar “Piksel Bazlı Yazılımlar, Vektör Bazlı Yazılımlar ve Obje Bazlı Yazılımlar üç ana başlık altında incelenmiştir (Yılmaz, 2011).

3.1. Piksel Tabanlı Yazılımlar

Bilgisayarların tasarımcıyla etkileşimde bulunduğu ekranlar, çözünürlük adı verilen matris yapısına sahiptir. Bu matrisin her bir hücresi, düzlemdeki karelerden oluşan piksellerden meydana gelir. 2B en küçük birim olan piksellerin sıralanarak renklerin atanmasıyla grafikler oluşturulabilen yazılımlar, "Piksel Tabanlı" yazılımlar olarak adlandırılır. Bu yazılım türü, genellikle iki boyutlu grafikler oluşturmak için kullanılır. Mimari tasarım sürecinde bu yazılımlar genellikle uygun değildir, ancak son aşamada grafiklere efektler eklemek amacıyla kullanılabilirler (Yıldırım, 2004). Piksel bazlı yazılım programları arasında Photoshop**,** Corel Draw ve Corel Paintshop Pro yer almaktadır.

3.2. Vektör Tabanlı Yazılımlar

Vektör tabanlı yazılımlar, "çizgi" öğesini kullanarak "tel çerçeve" (wireframe) veya "ızgara" (mesh) biçiminde çizimler üretir. Bu yazılımlarda çizgiler, düz olabileceği gibi eğrisel (Spline) de olabilir. Geleneksel kalem yerine, tasarımda klavye, fare veya sayısallaştırıcı (digitizer) gibi giriş araçları kullanılır. 2B düzlemsel veya 3B Kartezyen uzayda, tasarımlar çizgiler ve düğümler aracılığıyla modellenir (Yıldırım, 2004). Vektör bazlı yazılım programları arasında AutoCAD, NetCAD, Landcadd, 3ds Max, Maya, SketchUp, Vectorworks Landmark, Vue, Cinema 4D, Blender ve Archicad yer almaktadır.

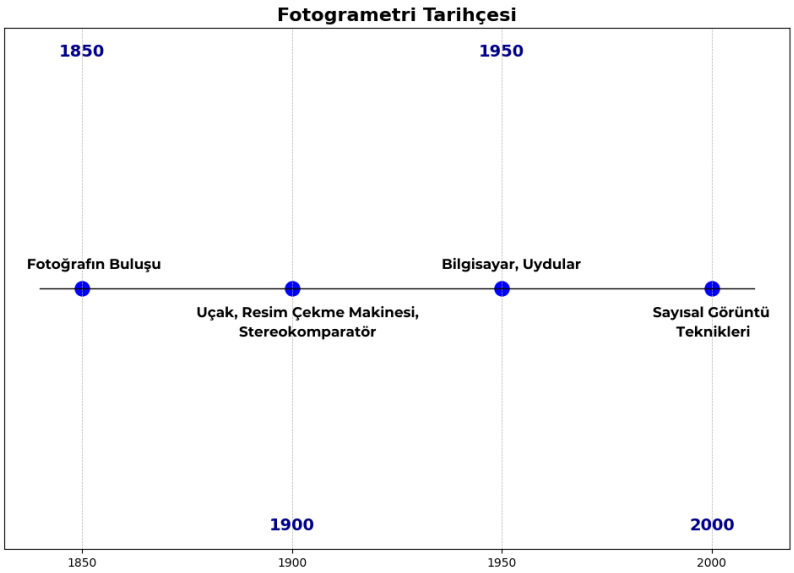
3.3. Obje Tabanlı Yazılımlar

Obje tabanlı yazılımlar, temel geometrik formlar ile taşıyıcı sistemler, duvarlar, kapılar, pencereler gibi yapı elemanlarının blok kütüphaneler şeklinde yazılımda mevcut olduğu ve tasarımcı tarafından parametrik olarak seçilerek mimari kompozisyonun oluşturulduğu yazılımlardır (Yıldırım, 2004). Obje bazlı yazılım programları arasında 3D Home Landscape Architecture**,** Allplan yer almaktadır.

Üstte bahsedilen Piksel, Vektör ve Obje bazlı yazılımlar peyzaj mimarlığında kullanılan geleneksel çizimlere destek olmakta ve tasarımcı/plancının işini büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Genel olarak kullanılan bu yöntemlere fotogrametrinin dahil edilmesi alan bazında genellikle büyük çalışılan peyzaj mimarlığı için günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Peyzaj mimarlığında fotogrametri, özellikle mimari ve kültürel mirasın belgelenmesi ve korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, bu teknolojinin peyzaj disiplininde bütünleşik ve sistematik bir şekilde kullanımı hala yeterince yaygın değildir. Piksel bazlı fotogrametri entegrasyonunun avantajları; veri tutarlılığı, gerçekçi tasarımlar elde etme ve etkileyici sunum teknikleri olarak sıralanabilir. Bu çalışmanın çıkış noktası, fotogrametrinin peyzaj mimarlığı alanındaki mevcut kullanımını analiz ederek, bu teknolojinin disiplinin her aşamasına entegre edilmesinin geleceğe yönelik yenilikçi tasarım ve planlama süreçlerine nasıl katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktır.

4. Fotogrametri Tekniği ve Uygulamaları

Fotogrametrinin ana hedefi plan ve harita üretimi olmakla birlikte, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte pek çok farklı alanda da kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1). Bu sistemin temel avantajları arasında, sayısal görüntü işleme ve Structure from Motion (SfM) algoritmalarının entegrasyonu sayesinde, manuel müdahaleye gerek kalmadan otomatik fotoğraf ölçümünün gerçekleştirilmesi ve bu sayede nesne ya da alanın 3B modellemesine yönelik verilerin eş zamanlı ve yüksek doğrulukla elde edilebilmesi yer almaktadır.



Şekil 1. Fotogrametrinin tarihsel gelişimi (Kılınçoğlu (2016)'dan esinlenilmiştir)

- Grafik Fotogrametri: Çizim ile yapılan, daha çok teorik olan fotogrametridir.
- Analog Fotogrametri: Değerlendirmelerin genellikle harita çizimlerinin analog aletlerle (Şekil 2) yapıldığı fotogrametridir.

- Analitik Fotogrametri: Matematiksel yöntemlerle yapılan çözümlerle, bilgisayar destekli (Şekil 3) fotogrametri uygulamalarına denir.
- Sayısal (Dijital) Fotogrametri: Sayısal fotoğraflarla çalışan fotogrametriye denir (Marangoz, 2012).



Şekil 2. Analog fotogrametri (Marangoz, 2012)



Şekil 3. Analitik fotogrametri (Marangoz, 2012)

Geçmişte yeryüzüne ait bilgilerin ve fotoğrafların toplanması ve haritalandırılması için hava fotoğrafçılığı kullanılmıştır. Fotogrametri, görüntü işleme sistemleri kullanarak yeryüzü ve çevresi hakkında doğru veriler elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Elde edilen görseller, harita üretiminin yanı sıra askeri uygulamalar ve uzay bilimleri gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Bilgi, 2007). Fotogrametrinin ilk amacı yalnızca harita ve plan yapımı iken, teknolojinin ilerlemesiyle kullanım alanları hızla genişlemiştir. Bu kapsamda fotogrametri Tablo 1'de sınıflandırılmıştır (Toprak, 2014).

Tablo 1. Fotogrametrinin sınıflandırılması (Toprak (2014)'den esinlenilmiştir)

1.Resim Çekilen Yerin Konumuna Göre	**2.Değerlendirmede Kullanılan Resim Sayısına Göre**	**3. Değerlendirme Yöntemine Göre**	**4.Uygulama Alanına Göre**	**5.Obje Büyüklüğüne Göre**
-Yersel Fotogrametri -Hava Fotogrametrisi -Uydu Fotogrametrisi -Yakın Resim Fotogrametrisi	-Tek Resim Fotogrametrisi -Çift Resim Fotogrametrisi	-Plançete Fotogrametrisi -Analog Fotogrametri -Analitik Fotogrametri -Dijital Fotogrametri	-Topografik Fotogrametri -Topografik Olmayan Fotogrametri • Foto-Yorumlama • Mühendislik Fotogrametrisi • Mimarlık Fotogrametrisi • Ortofotograf • Endüstri Fotogrametrisi • Jeodezik Fotogrametri • Kadastro Fotogrametrisi	-Mikro Fotogrametri -Makro Fotogrametri

Fotogrametri, görüntüleme ve veri toplama yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olup, çeşitli uygulamalarda farklı türlere ayrılmaktadır. Şekil 1'de çekim yapılan yerin konumuna göre sınıflandırma incelendiğinde; yersel fotogrametri, hava fotogrametri, uydu fotogrametrisi ve yakın mesafe fotogrametrisi bu çalışma kapsamında ayrıca açıklanmıştır. Her bir fotogrametri türü, belirli avantajları ve dezavantajları ile birlikte çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Yersel Fotogrametri: Yer yüzeyine yakın noktalardan yapılan görüntülemeleri içerir. Genellikle tripod üzerine sabitlenmiş bir DSLR kamera ile gerçekleştirilir ve pozlama ayarları ile çekim aralıkları dikkatlice planlanmalıdır. Yersel fotogrametri, detaylı ve yüksek çözünürlüklü 3D modeller oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Kronig vd., 2022). Örneğin, tarihi yapıların korunması ve restorasyonu gibi konularda, yersel fotogrametrinin hızı ve erişilebilirliği büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, kullanıcıların yararlanabileceği yüksek hassasiyet sunan ölçüm verileri sağlamaktadır. Ayrıca, karmaşık yüzeylerin ve yapısal özelliklerin detaylı analizleri için de uygundur (Cova vd., 2023).

Hava Fotogrametrisi: Hava araçları veya dronlar aracılığıyla yapılan görüntüleme işlemlerini kapsar. Yeryüzünden belirli bir yükseklikte ve geniş alanları kapsayacak şekilde yapılan çekimler, genellikle büyük ölçekli haritalama ve topografik analizler için kullanılır. Dronlar sayesinde, zorlu ve ulaşılması güç alanların görüntülenmesi, hava fotogrametrisini daha çekici hale getirir (Fan vd., 2023). Bu tür fotogrametri, doğa olaylarının analizi, orman envanteri, tarım uygulamaları ve çevresel izleme gibi alanlarda yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Szostak vd., 2024). Dron tabanlı hava fotogrametrisi, veri toplamada hız ve etkinlik sağlarken maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır (Mondino vd., 2022). Peyzaj mimarlığında yüksek çözünürlüklü sayısal veriye ulaşmak için sıklıkla kullanılır hale gelmiştir.

Uydu Fotogrametrisi: Uydu fotogrametrisi, doğrudan uzaydaki uydu görüntüleme sistemlerinden elde edilen verilerin kullanılmasıyla oluşur. Bu kategori, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile birlikte analiz edilerek büyük ölçekli alanların incelenmesine olanak tanır. Uydu görüntüleri, geniş coğrafi alanların izlenmesi, tarım ve çevre yönetimi gibi pek çok alanda kullanılabilirken; yüksek çözünürlük ve geniş kapsam sunmaktadır (Li vd., 2022). Çeşitli uydu sistemleri, farklı spektral bantlarda görüntü alarak yer yüzeyinin çeşitli özelliklerini ortaya koyabilir (Fărcaş vd., 2023). Bununla birlikte, uydu fotogrametrisinin sınırlamaları arasında bulut örtüsü ve yoğun bitki örtüsü gibi engeller nedeniyle görüntü elde etmede karşılaşılan zorluklar bulunmaktadır.

Yakın Mesafe Fotogrametri: Yakın mesafe fotogrametrisi, 3D modelleme ve ölçümleme için kullanılan bir tekniktir ve tipik olarak bir nesne ile kamera arasında 10 metreden az bir mesafede gerçekleştirilir. Yakın mesafe uygulamaları, mimari, arkeolojik veya endüstriyel nesnelerin detaylı analizini yapabilme olanağı sunar. Bu tür, bilgisayarlı görüş ve yapay zeka yöntemleri ile birleştiğinde daha da güçlü hale gelmektedir (Cova vd., 2023). Örneğin, bir projenin detaylı tasarımında, küçük yüzey detaylarının hassas modellemesi söz konusu olduğunda bu teknik önemli avantajlar sunmaktadır. Yakın mesafe fotogrametrisi sayesinde, çeşitli yapıların yüzeyi üzerinden üç boyutlu modeller elde edilebilir, bu da yapının mimari özelliklerinin korunmasını kolaylaştırır (An vd., 2021).

Kimya, mühendislik, arkeoloji ve doğa bilimleri gibi geniş bir yelpazede uygulama potansiyeline sahip olan fotogrametri, modern teknolojilerin gelişmesi ile daha yaygın bir hale gelmektedir. Örneğin, yapay zeka destekli süreçlerin kullanımı fotogrametrik veri setlerinin işlenmesini hızlandırmakta ve daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Jäger-Klein vd., 2023). Bunun yanı sıra, kullanıcıların çeşitli ortamlarda bu teknolojiyi kullanarak veri toplamayı ve görselleştirmeyi kolaylaştıran otomasyon yöntemleri de geliştirilmektedir (Kong vd., 2023).

Fotogrametrinin çeşitlendirilmesi ve spesifik ihtiyaçlara göre uygulama alanlarının genişletilmesi, bu teknolojinin gelecekteki gelişimleri için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Her bir fotogrametri türü, belirli koşul ve ihtiyaçlar doğrultusunda en uygun çözümü sunabilmekte, bu sayede hem akademik hem de pratik alanlarda fayda sağlamaktadır.

Bir başka fotogrametri yöntemi, sayısal fotogrametri yöntemidir. Bu yöntem, günümüzde yoğun olarak kullanıldığı için fotogrametri çeşitli parametreler doğrultusunda sınıflandırılmıştır (Uysal, 2023). Bu yöntem aşağıda bulunan üç başlıktan oluşmaktadır.

- Yersel Fotogrametri: Yer yüzeyinde çekilen fotoğraflarla yapılan fotogrametri uygulamaları.
- Hava Fotogrametrisi: Bir hava aracındaki kamera ile çekilen fotoğrafların kullanıldığı fotogrametri uygulamaları.
- Obje Odaklı Fotogrametri; İç mekanlarda veya dış mekanlarda kontrollü ortamlarda gerçekleştirilen, arkeolojik buluntular, sanat eserleri veya oyun/sinema için yapılan fotogrametri türüdür.

Bir diğer sınıflandırma, kullanım alanlarına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma, yalnızca ölçme, biçimlendirme ve konumlandırma ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bir nesnenin önceki ve sonraki hallerini değerlendirme gibi farklı işlevleri de kapsayan fotogrametri türüdür. Bu türler, yalnızca ölçme, biçimlendirme ve konumlandırma gibi temel işlevlerle sınırlı kalmaz; aynı zamanda nesnelerin önceki ve sonraki hallerini değerlendirme gibi farklı amaçlara da hizmet eder. Yakın Fotoğraf Fotogrametrisi, nesne ile kamera arasındaki mesafe 300 m'yi geçmeyen uygulamalar için kullanılırken, Topoğrafik Fotogrametri topoğrafik harita üretimi için kullanılır. Topoğrafik Olmayan Fotogrametri ise topoğrafik harita yapımı dışında kalan uygulamaları kapsar. Kadastro Fotogrametrisi, kadastro haritalarının üretiminde, Jeodezik Fotogrametri ise jeodezik noktaların üretiminde kullanılır. Mühendislik Fotogrametrisi, mühendislik projelerinde, Mimarlık Fotogrametrisi ise tarihi yapıların belgelenmesinde önemlidir. Tek Resim Fotogrametrisi, tek bir fotoğrafla metrik bilgiler üretirken, Çift Resim Fotogrametrisi, iki fotoğrafla ölçüm yaparak üç boyutlu görüş sağlar (Avşar, 2006.). Bilgisayar Oyunu Fotogrametrisi, oyunlardaki objelerin üç boyutlu dünyaya entegrasyonunu sağlar.

Sanatsal Fotogrametri ise sanat eseri yaratmak amacıyla uygulanır. Son olarak, Sinematografik Obje Fotogrametrisi, sinema sektöründe görsel efektlerle objelerin üretiminde kullanılır. Bu fotogrametri türleri, farklı sektörlerde çeşitli ihtiyaçlara yönelik çözümler sunar (Külür, 2002; Uysal, 2023).

4.1. Fotogrametri ve 3B Modelleme

Fotogrametri, peyzaj mimarlığında önemli bir tekniktir ve detaylı üç boyutlu (3B) modeller oluşturmak için 2B görüntü verilerini kullanır. Bu uygulama, insansız hava araçları (İHA) ve Hareketten Yapı (SfM) örtüşen 2B görüntülerden otomatik olarak kamera pozisyonlarını ve seyrek 3B nokta bulutlarını oluşturan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Bu ilk 3B çıktı, genellikle ek adımlarla daha detaylı ve yüksek çözünürlüklü 3B modellere dönüştürülmektedir ve jeoloji bilimlerinde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir (Carrivick vd., 2016). Bu teknolojiler, çağdaş peyzaj mimarlığı uygulamaları için gerekli olan yüksek kaliteli coğrafi ve topoğrafik verilerin hızlı bir şekilde edinilmesini sağlar. Bu yöntemler sayesinde, uygulayıcılar Dijital Yükseklik Modelleri (DYM), Dijital Ortofoto Haritaları (DOH) ve peyzajların kapsamlı 3B temsillerini etkili bir şekilde üretebilirler. Bu modeller, peyzaj tasarımı ve yönetiminde bilinçli kararlar almak için kritik öneme sahiptir (Luo vd., 2020; O'Driscoll, 2018).

İHA teknolojisinin yüksek taşınabilirliği ve zamanında veri toplama yeteneği, peyzaj mimarları ve planlamacılarının geniş alanlarda hızlı anketler yapmasına olanak tanır, böylece veri toplama süreçlerini daha verimli hale getirir (Luo vd., 2020). Bu gerçek zamanlı veri edinimi, özellikle peyzaj değişiklikleri veya müdahaleleri ile ilgili olarak, analiz ve koruma için yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç duyulduğunda çok önemlidir. Bu tür yetenekler, İHA fotogrametrisinin arkeolojik alanlar ve kentsel çevrelerin belgelenmesinde nasıl etkili olduğuna dair çeşitli vaka çalışmalarında görülmektedir; bu da onun çok yönlülüğünü ve uyarlanabilirliğini gösterir (Carvajal-Ramírez vd., 2019; O'Driscoll, 2018).

Planlama, mimarlık, çevresel değerlendirmeler ve turizm gibi alanlarda üç boyutlu veri ihtiyacı giderek artmaktadır (Lerma & Garcia, 2004). Fotogrametrik ve mesafe ölçme tabanlı sistemler, sadece gerçek objenin geometrisinin belirlenmesine değil, aynı zamanda objenin coğrafi referansı ile birlikte modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler, özellikle objenin gerçek görüntüsünü alarak, bu görüntünün doku olarak modellere aktarılmasına imkan sağlayarak ek avantajlar sunmaktadır (Yakar & Mırdan, 2017). Günümüzde sayısal fotogrametri, yüksek bir teknoloji seviyesine ulaşmıştır. Klasik fotogrametrinin aksine, burada görüntüler film üzerine kaydedilmek yerine piksel tabanlı sayısal fotoğraflar üzerinden işlenmektedir. Bu fotoğraflar, bilgisayar ortamında depolanarak çeşitli yazılımlar aracılığıyla farklı alanlarda fotogrametrik uygulamalar yapılabilmektedir (Ceylani & Yavuz, 2023).

Peyzaj mimarlığında bitkilerin 3B olarak kullanılması hem görsel estetik değerlere, hem de iklim, coğrafya ile alakalı tasarım/planlamada kullanılan parametreler için büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, fotogrametri ve diğer sayısal modelleme tekniklerinin entegrasyonu, peyzajın daha gerçekçi ve fonksiyonel bir biçimde analiz edilmesine olanak tanıyarak, gelecekte daha kapsamlı, doğru ve etkileşimli tasarım süreçlerinin gelişmesine olanak sağlayacak bir temel oluşturmaktadır. Çalışmanın devam eden bölümlerinde bitkilerin fotogrametri ile modellemesine ve kullanımına odaklanılmaktadır.

4.1.1. Fotogrametri Tekniklerinin 3B Bitki Modelleme Süreçlerindeki Uygulamaları

Son yıllarda bitki bilimi, ıslah ve yetiştiricilik çalışmalarında bitki fenotiplemesi önemli bir gelişim göstermektedir. Buna karşın 3B modellemeye yönelik teknik yöntemler ve uygulamalar daha çok bilgisayarlı görme alanı ile ilişkilendirilmektedir (Okura, 2022). Benzer şekilde, Peyzaj Mimarlığı disiplininde bitkisel tasarım projelerinde ağaçlar tasarımın temel öğesini oluşturmasına rağmen, 3B modelleme programlarında yer alan bitkisel materyaller çoğu zaman yetersiz kalmakta; bu durum özellikle artan üç boyutlu tasarım uygulamalarında gerçekçi ağaç görsellerine duyulan ihtiyacı daha görünür kılmaktadır (Uzun, 2015). Bu bağlamda, farklı 3B modelleme programlarının bitkisel materyalleri oluşturma ve görselleştirme konusundaki performansları aşağıda karşılaştırılmıştır:

Agisoft PhotoScan (Metashape), Autodesk 123D Catch, 3DF Zephyr ve RealityCapture programların, 3B modelleme yazılımlarını yapay zeka teknikleri ve kullanım özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Fotoğraflardan oluşturulan 3B modellerin kalitesi, çalışma prensipleri ve sağladıkları avantajlar değerlendirilmiştir (Tablo 2).

- **Agisoft PhotoScan (Metashape)**

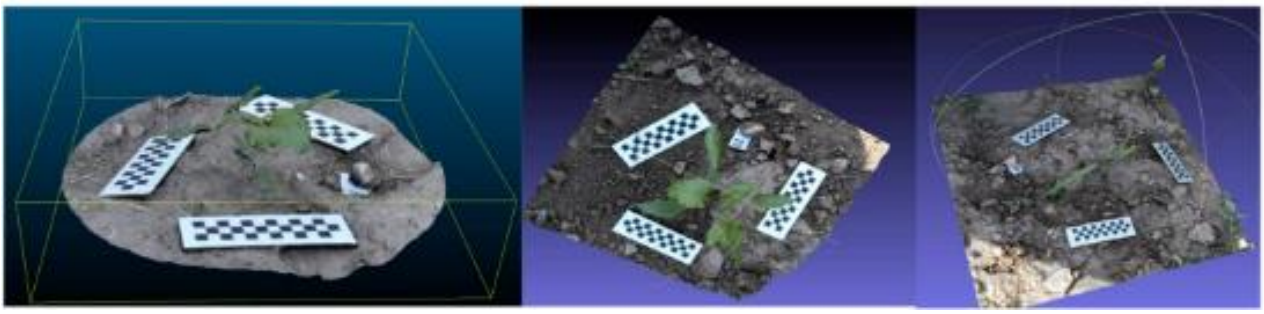
Temel Mantık: Agisoft PhotoScan, gelişmiş bir fotogrametri algoritması kullanır. Kullanıcıya daha fazla kontrol imkânı tanır ve büyük veri setleriyle daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesine olanak sağlar (Şekil 5 ve Şekil 6).

Yapay Zeka Kullanımı: Yapay zeka, fotoğraflardaki dokular, derinlikler ve kenarlar gibi ince detayların işlenmesinde önemli bir rol üstlenir. Nokta bulutları oluşturulurken ve detaylı işleme yapılırken yüksek hassasiyet sağlar.

Avantajlar: Kullanıcılar, çeşitli ayarlarla modellerini optimize edebilirler. Fotoğraf sayısı konusunda bir kısıtlama bulunmaz ve elde edilen modelin detay seviyesi oldukça yüksektir.



Şekil 4. Agisoft Photoscan uygulaması ile modellenen bitki (Uçar & Ergün, 2004)



Şekil 5. Agisoft Photoscan uygulaması ile modellenen bitki (Andújar, vd. 2018)

- **Autodesk 123D Catch**

Temel Mantık: Autodesk 123D Catch, fotogrametri temelli bir sistemle çalışmaktadır. Yazılım, yüklenen fotoğraflardaki (Benliay & Akbiyik, 2016). Ortak noktaları tespit ederek bu noktaları birleştirir ve bir nokta bulutu oluşturur. Çevrimiçi olarak çalışan bu uygulama, modelleme sürecini bulut üzerinde gerçekleştirir. Ancak, bu süreçte en fazla 70 fotoğraf karesiyle sınırlı kalınması, özellikle karmaşık modellerin oluşturulmasında zorluklar yaratabilir. Modelleme süreci tamamen otomatik olarak işlediği için, kullanıcı müdahalesi oldukça sınırlıdır (Şekil 7).

Yapay Zeka Kullanımı: Autodesk 123D Catch, temel düzeyde yapay zeka algoritmalarından yararlanarak çalışır. Bu algoritmalar, kullanıcı tarafından yüklenen fotoğraflar arasındaki ortak noktaları tespit eder ve bu noktaları kullanarak 3B modeller oluşturur. Ancak, karmaşık yapıları ve ince detayları işleme konusunda yapay zekanın katkıları sınırlıdır. Yazılım, gelişmiş yapay zeka algoritmaları yerine daha basit bir yaklaşım benimsediğinden, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren projelerde detay seviyesi düşük kalmakta ve modelin doğruluğu istenilen düzeyde olmamaktadır. Bu durum, yazılımın özellikle profesyonel ve ileri düzey projelerde yeterli performansı sergileyememesine yol açmaktadır.

Avantajlar: Yazılımın en belirgin avantajı, kullanıcı dostu bir arayüze sahip olmasıdır. Basit ve anlaşılır menü yapısı, özellikle amatör kullanıcıların programı kolaylıkla kullanabilmesini sağlar. İnternet erişimi olan ve temel düzeyde modelleme yapmak isteyen kullanıcılar için hızlı ve ücretsiz bir çözüm sunan bu yazılım, küçük ölçekli projeler için verimli ve pratik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleriyle, özellikle başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için tercih edilebilir bir seçenek oluşturur.



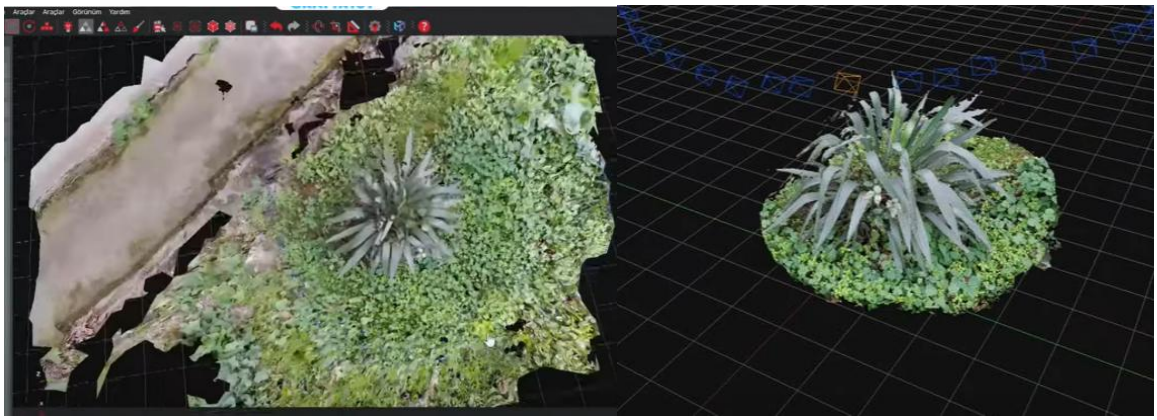
Şekil 6. Autodesk 123D Catch programının 3B bitki modellemesi (Benliay & Akbiyik, 2016)

- **3DF Zephyr**

Temel Mantık: 3DF Zephyr, fotogrametri ve yapay zeka teknolojilerini birleştirerek 3B modeller oluşturur. Otomatik işlem süreciyle birlikte, kullanıcılara manuel düzeltmeler yapma imkânı da sunar (Şekil 8).

Yapay Zeka Kullanımı: Yapay zeka, görüntü işleme ve modelin detaylandırılması aşamalarında etkin bir şekilde kullanılır. Ancak, karmaşık yapıların işlenmesi süreci daha uzun sürebilir.

Avantajlar: Farklı veri türlerini destekler ve çeşitli detay seviyelerinde çıktı sağlar.



Şekil 7. 3DF Zephyr ile modellenen bitkinin 3B yapısı (GRAFİK101, 2024)

- **RealityCapture**

Temel Mantık: RealityCapture, fotogrametri algoritmalarını ileri düzey yapay zeka teknikleriyle birleştirerek, büyük veri setlerini hızlı bir şekilde işleyip yüksek doğrulukta sonuçlar üretir (Şekil 9).

Yapay Zeka Kullanımı: Gelişmiş yapay zeka algoritmaları, modelin detaylandırılması ve yüksek hassasiyetle nokta bulutlarının oluşturulması aşamalarında etkin bir şekilde kullanılır.

Avantajlar: Büyük veri setleriyle hızlı işlem yapabilme yeteneği ve yüksek detay seviyesiyle sağlanan üst düzey sonuçlar, bu yazılımın öne çıkan özelliklerindendir.



Şekil 8. RealityCapture ile modellenen bitkinin 3B yapısı (Yusuf, 2022)

Tablo 2. Yukarıda incelenen 3B model programlarının karşılaştırması

Özellikler/Programlar	Autodesk 123D Catch	Agisoft Photoscan (Metashape)	3DF Zephyr	RealityCapture
Yapay Zeka Hassasiyeti	Düşük	Yüksek	Orta	Çok Yüksek
Fotoğraf Sınırı	70	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız
Detay Seviyesi	Düşük	Yüksek	Orta	Çok Yüksek
Fiyat	Ücretsiz	Lisans Gerekir	Lisans Gerekir	Lisans Gerekir
Kullanıcı Müdahalesi	Sınırlı	Esnek	Esnek	Esnek
Performans (hız)	Hızlı	Orta	Orta	Hızlı

Karşılaştırılan yazılımlar, peyzaj mimarlığı ve fotogrametri alanında yapılan güncel literatür taraması sonucunda en yaygın kullanılan programlar arasından seçilmiştir. Seçimde kullanım yaygınlığı, literatürdeki örnek çalışmalardaki yer alma sıklığı ve bitki modelleme süreçlerine uygunluk kriterleri esas alınmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda (Tablo 2);

Agisoft Metashape, fotogrametri alanında profesyonel uygulamalar için son derece güçlü ve kapsamlı bir yazılım platformudur. Gelişmiş algoritmalar ve yüksek derecede özelleştirilebilir parametre seçenekleri sunarak, büyük ve karmaşık veri setlerinin işlenmesine olanak tanır. Bu sayede, yüksek çözünürlükte ve büyük detay içeren üç boyutlu modellerin oluşturulması mümkündür. Yazılım, kullanıcıların model üzerinde derinlemesine ince ayarlar yapmalarına imkan tanıyarak, çeşitli projelere uyarlanabilir olmasını sağlar. Agisoft Metashape, özellikle büyük ölçekli projelerde ve yüksek hassasiyet gerektiren fotogrametrik analizlerde tercih edilen bir çözüm sunmakta olup, profesyonel kullanıcılar için idealdir.

Autodesk 123D Catch, fotogrametri temelli bir yazılım olarak, özellikle temel düzeyde 3B modelleme işlemleri gerçekleştirmek isteyen kullanıcılar için tasarlanmıştır. Bulut tabanlı bir sistem olarak çalışan bu yazılım, yüklenen fotoğraflardaki ortak referans noktalarını analiz ederek, otomatik olarak sayısal modeller oluşturur. Programın basit yapısı ve erişilebilir olması, küçük ölçekli projelerde ve amatör kullanıcılar için cazip bir çözüm sağlar. Bununla birlikte, fotoğraf sayısının sınırlı olması ve modelleme sürecinde ortaya çıkan düşük detay seviyesi, karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren projelerde yazılımın etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, internet bağlantısı gereksinimi ve kullanıcı müdahalesine izin vermemesi gibi kısıtlamalar, yazılımın esneklik açısından bazı dezavantajlara yol açmaktadır. Ancak, Autodesk 123D Catch, temel düzeydeki hızlı modelleme ihtiyaçlarını karşılayabilen ve erişilebilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

3DF Zephyr: 3DF Zephyr, farklı kullanıcı seviyelerine hitap edebilecek bir fotogrametri yazılımıdır. Orta düzeyde performans sağlayan bu yazılım, veri işleme esnekliği ve geniş parametre seçenekleri ile çeşitli projelere uygulanabilir. Ancak, yüksek çözünürlük ve karmaşıklık gerektiren projelerde yazılımın performansında sınırlamalar görülebilir.

RealityCapture: RealityCapture, fotogrametri ve yapay zeka teknolojilerini birleştirerek büyük veri kümelerini yüksek hızda işleyebilme ve yüksek doğrulukla sonuç elde etme kapasitesine sahip bir yazılımdır. Gelişmiş algoritmalar sayesinde karmaşık verilerden yüksek hassasiyetle 3D modeller oluşturulabilmektedir. Yazılım, sağladığı hız ve verimlilik ile endüstriyel ve akademik projelerde tercih edilmekte olup, profesyonel modelleme gereksinimlerini en yüksek düzeyde karşılayabilmektedir.

4.1.2. 3B Bitki Modellemede Fotogrametrinin Avantajları

Gerçek dünya bitkilerinden 3B yapılar çıkarmak, sanal bitkileri modellemenin hızlı bir yoludur. Bu hedefe ulaşmak için, 3B tarayıcılarla elde edilen nokta bulutları (Livny vd., 2010), çoklu görünüm görüntüleri (Isokane vd., 2018; Neubert vd., 2007) veya tek bir görüntü kullanılarak çeşitli yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemler, şimdiye kadar büyüme simülasyonları veya grafiksel uygulamalar için kullanılabilir olmuştur. Ancak, yeniden yapılandırmanın amacı, uygulamaların gereksinimlerine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, grafiksel uygulamaların amacı, makul ve fotogerçekçi 3B modeller oluşturmak olduğundan, bazı yöntemler, gerçek nesnelere sadık 3B modeller gerektiren bitki yetiştirme uygulamaları için uygun olmayabilir.

Metashape, 3DF Zephyr ve RealityCapture gibi fotogrametri yazılımları, çoklu görünüm görüntülerini kullandığı için kullanışlı ve kolaylık sağladığı söylenebilir. Ancak, bitki ve ağaçların fotogrametrisi zorlayıcı olabilir çünkü benzer dokuların tekrarı, düşük kaliteli sonuçlara veya 3B yeniden yapılandırmanın başarısız olmasına yol açabilir. Bu nedenle, yüksek verimli fenotipleme için 3B modellerin daha iyi ve daha hızlı yeniden yapılandırılmasını sağlamak amacıyla bazı çalışmalar, çoklu görünüm görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesi veya uygun görüntülerin seçilmesi konusunda çözümler önermektedir.

4.2. 3B Modelleme ve Fotogrametrinin Peyzaj Mimarlığındaki Geleceği

Peyzaj mimarlığında üç boyutlu bitki modellerinin kullanımı, teknolojik gelişmelerle birlikte önemli bir evrim geçirmiştir. Teknolojinin ilerlemesi, peyzaj mimarlığında 3B modelleme ve sanal gerçeklik uygulamalarının entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Tasarım tanımlarında yer alan "değişim" ve "geliştirme" gibi eylem terimlerinin kullanımı, bu süreci somut sonuçlara yol açan bir dönüşüm olarak tanımlar ve üretken bir biçimde şekillendirir (Boradkar, 2014). Mimarlık, içerisinde önemli insan müdahalesini barındıran bir alan olarak ele alınırken, peyzaj planlaması ise daha az insan müdahalesiyle şekillenen, büyük ölçüde doğal sistemlerin öne çıktığı bir alan olarak tanımlanmaktadır (Guo & Yang, 2013). Sayısal simülasyon yazılımlarının peyzaj mimarlığı uygulamalarında kullanımının yaygınlaşması, zamanla artan bir eğilim göstermiştir (Lange, 2011; Orland vd., 2001) ve bu süreç, 3B simülasyon ve sanal gerçeklik (VR) uygulamalarının gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Sayısal peyzaj görselleştirmelerinin başlangıcı, peyzaj planlama ve tasarımının erken dönemlerine denk gelmektedir (Lange, 2011). O zamandan bu yana, peyzaj VR uygulamaları, saha planlaması, peyzaj restorasyonu, parklar ve rekreasyon alanları, yeşil altyapı planlaması, konut peyzajları ve diğer birçok alanda, mesleğin çeşitli dallarında ilerlemelere katkıda bulunmuştur (Lange, 2011).

Peyzaj mimarlığında fotogrametrinin kullanımı, basit modelleme görevlerinin ötesine geçebilir ve çevresel özelliklerin karmaşık simülasyonlarını içerebilir. Örneğin, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve fotografik haritalama sistemleriyle peyzaj mimarlarına, farklı peyzaj bileşenlerinin çeşitli koşullar altında nasıl etkileşimde bulunduğuna dair içgörüler sunar (Edelman vd., 2023; Popescu vd., 2017). Dahası, fotogrametri ve diğer teknolojilerin, örneğin CBS entegrasyonu, peyzaj analizine çok boyutlu bir yaklaşım sunar ve peyzajdaki mekânsal dağılımları, desenleri ve ilişkileri daha derinlemesine anlamaya olanak tanır (O'Driscoll, 2018; Sánchez vd., 2022). Peyzaj mimarlığında sanal gerçeklik kullanımının en belirgin özelliği VR ile Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (CBS) entegrasyonudur (Duymuş, 2025). Bu entegrasyon, CBS tabanlı modelleme ile gerçekçi bir peyzajın temsili arasındaki bağlantıyı kurarak birkaç yıl boyunca yaşanabilecek zamansal değişimlerini görselleştirmeye imkân tanır (Ghadirian & Bishop, 2008). Sanal peyzaj tasarımı, bitkiler, dallar, çiçekler, yapraklar gibi unsurların ayrıntılı bir şekilde gösterilmesini gerektiren botanik açıdan gerçekçi bir bitki örtüsünü içermelidir. Bu unsurların detaylı bir ölçekte yürüyüş simülasyonunu oluşturmak, gelişmiş teknolojilerin yanı sıra yüksek teknik beceriler ve insan algısına dair derin bir anlayış geliştirilmesini zorunlu kılar (Honjo & Lim, 2001; Ware, 2013). Sayısal araçlar hızla gelişmekte olup, yakın gelecekte peyzaj mimarlığı alanında önemli ilerlemeler kaydedileceği açıktır. Gelecekte, peyzaj mimarlığı alanında en yeni araçlarla desteklenen eğitim odaklı sayısal araç programlarına ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (Mengots, 2016).

5. Fotogrametri, 3B Modelleme ve Etkileşimli Deneyimler: Sanal Gerçeklik

Sanal gerçeklik teknolojileri pek çok farklı alanda hizmet sunmaktadır. Sanal" terimi, gerçeklikte fiziksel olarak var olmayan, ancak dijital ortamda veya zihinde bir karşılığı olan şeyleri ifade eder. Mikro-coğrafyayı oluşturan kıvrımlar gibi, sanal kavramlar da zihinsel süreçler ve dijital yansımalar aracılığıyla varlık bulur. Sanal olan, bir yansımanın veya temsilin ürünü olarak kendini gösterir (Güzel, 2015). Gelişen teknolojilerin bir diğer etkisi, sanal dünyaların algılanması mimarlık ve peyzaj mimarlığı da dahil olmak üzere birçok farklı disiplinin işleyişinde kullanılmaktadır.

Sanal gerçeklik, kullanıcıların 3B bir ortamda hareket edebileceği ve farklı açılardan gözlemleyip etkileşimde bulunabileceği bir deneyim olarak tanımlanabilir. Ayrıca, 2B 360 derece fotoğraflar veya render görüntülerinin yanı sıra, kullanıcının tamamen içine daldığı (immersive) 3B simülasyonlar da sanal gerçeklik olarak kabul edilebilir.

Sanal gerçekliğin temel amacı, kullanıcıya bilgisayar tarafından üretilen nesnelerle ve varlıklarla etkileşime girme fırsatı sunarak, gerçeklik algısını yaratmaktır (Barcelo, 2007).

Bilişim teknolojileri, özellikle mimarlık alanında giderek daha fazla kullanılmakta ve sayısal miras (digital heritage/new heritage) gibi alt dallarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu gelişmeler, mimari tasarım süreçlerinde disiplinler arası çalışmalara zemin hazırlamış ve mimarlık pratiğine yeni bir boyut kazandırmıştır (Varinlioğlu, 2020). 3B modelleme ise, mimari tasarım ve yapı bilgisi araştırmalarının temel unsurlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, sayısal deneyimler ve sanal gerçeklik, mimarlık alanında daha derinlemesine analiz ve simülasyon imkânı sağlayarak, bilgisayar mühendisliği disiplinindeki alt alanlarla güçlü bir ilişki kurmaktadır (Kalay vd., 2008). Sanal gerçeklik, kullanıcıları sayısal olarak oluşturulmuş bir ortamda etkileşimde bulunmaya davet eden bir deneyim sunar. Mimarlıkta bu teknoloji, binaların tamamlanmadan önce nasıl görüneceği hakkında bir ön izleme yapma fırsatı sağlar. Peyzaj mimarlığı alanında ise sanal gerçeklik, belirli bir bölgenin gelecekteki ekolojik yapısı, altyapısı ve çevresel düzenlemelerini simüle ederek gerçek zamanlı bir analiz imkânı sunar. Fotogrametri ile elde edilen detaylı 3B modellerin sanal gerçeklik platformlarına entegre edilmesi, eğitim, restorasyon ve planlama alanlarında da yenilikçi bir dönüşüm sağlamaktadır. Tarihi alanların sanal turlar aracılığıyla deneyimlenmesi, özellikle turizm ve eğitim gibi sektörlerinde büyük bir potansiyele sahiptir.

Fotogrametri ile elde edilen detaylı 3B modellerin (genellikle yoğun nokta bulutları veya yüksek poligon sayılı ağ modelleri- mesh) VR ortamlarında doğrudan kullanılabilmesi için genellikle ek işlem adımları ve optimizasyonlar gerektirir. Fotogrametri yazılımları (örneğin Agisoft Metashape, RealityCapture) genellikle çıktılarını .obj, .fbx, .ply gibi yaygın 3B dosya formatlarında verirler. Ancak bu ham modeller, milyonlarca poligondan oluşabildiği ve büyük doku haritaları içerebildiği için VR sistemlerinin gerektirdiği gerçek zamanlı (real-time) işleme performansını sağlamakta yetersiz kalabilirler.

Bu nedenle, modellerin VR'a entegrasyonu öncesinde optimizasyon kritik öneme sahiptir. Bu süreçte yaygın olarak şu adımlar izlenir:

- Poligon Sayısının Azaltılması: Modelin görsel kalitesini mümkün olduğunca koruyarak poligon sayısını azaltmak için 'decimation' (seyreltme) veya daha kontrollü bir yaklaşım olan 'retopology' (yeniden topoloji oluşturma) teknikleri kullanılır. Bu işlem, modelin VR motorları tarafından daha akıcı işlenmesini sağlar.
- Doku Optimizasyonu: Fotogrametride sıklıkla çok sayıda ve yüksek çözünürlüklü doku haritası üretilir. VR için bu dokuların boyutları küçültülebilir, formatları (örn. JPEG, PNG yerine sıkıştırılmış formatlar) optimize edilebilir ve 'texture baking' veya 'atlaslama' yöntemleriyle birden fazla doku tek bir haritada birleştirilerek 'draw call' sayısı azaltılabilir.
- LOD (Level of Detail) Oluşturma: Özellikle geniş peyzaj alanlarında, kameranın uzaklığına göre modelin farklı detay seviyelerini (daha az poligonlu versiyonlarını) göstermek, performansı önemli ölçüde artırır.

Optimize edilen modeller, VR deneyimini oluşturmak için kullanılan oyun motorlarına (örneğin Unreal Engine, Unity) veya mimari görselleştirme odaklı gerçek zamanlı platformlara (örneğin Twinmotion, Enscape) aktarılır. Bu platformlara veri aktarımında, endüstri standardı haline gelen ve meta verileri (animasyon, materyal bilgisi vb.) iyi taşıyan .fbx formatı veya özellikle web ve mobil platformlar için optimize edilmiş, modern ve esnek .gltf / .glb formatları sıklıkla tercih edilir. Bu motorlar ve platformlar, optimize edilmiş 3B modelleri alıp, ışıklandırma, materyal atamaları, etkileşim mekanikleri ve VR başlıkları (örn. Oculus Quest, HTC Vive, HP Reverb) ile uyumluluk gibi ayarları yaparak sürükleyici sanal deneyimi oluşturur.

5.1. Sanal Gerçeklik ve Dijital İkiz

Günümüzde dijital ikiz teknolojisi, fiziksel nesneleri ve süreçleri gerçek zamanlı olarak izlemek ve simüle etmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntem, fiziksel dünyadaki öğelerin sanal bir kopyasını oluşturarak, onların davranışlarının dijital ortamda gözlemlenmesine ve analiz edilmesine olanak tanır. Böylece kullanıcılar nesnelerin güncel durumlarını ve performanslarını anlık olarak takip edebilmekte, olası sorunları ise önceden tespit edebilmektedir. Sanayi üretiminden akıllı şehir yönetimine kadar pek çok alanda etkin şekilde kullanılan bu teknoloji, mekânsal analiz ve tasarım süreçlerine de yeni olanaklar sunmaktadır (Duman, 2022).

Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte 3B mekânsal ve sayısal verilerin üretimi mümkün hale gelmiş, bu verilerin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından anlaşılabilirliği sağlanmıştır. 2B çizimlere kıyasla algıyı büyük ölçüde artıran bu gelişme, 3B kent modellerine olan ilgiyi hızla artırmıştır. 3B kent modelleri; binalar, yollar ve diğer yapay unsurların geometrik bileşenlerini dijital ortamda temsil eden ve kentsel mekânın bütüncül bir şekilde görselleştirilmesine olanak sağlayan modellerdir (Şekil 10). Literatürde bu modeller için farklı terimler bulunsa da en yaygın kullanılan kavramlar “Sanal Şehir” ve “Dijital Şehir”dir.



Şekil 9. Sanal gerçekliği tanımlayan görsel (TİNT Mimarlık, 2021)

Dijital ikiz, fiziksel bir varlık, süreç, sistem veya çevrenin dinamik bir sanal temsilidir ve gerçek dünyadaki karşılığıyla benzer şekilde çalışır. Bu, bir ürünün, nesnenin, çevrenin, sürecin veya hizmetin sanal bir modelini ifade eder (Grieves, 2019). Dijital ikiz, gerçek dünya ürünüyle karşılaştığında, olası performans sonuçları ve potansiyel sorunlar önceden tahmin edilebilmektedir (Qi vd., 2021). Dijital ikizler, fiziksel dünyadaki varlıkların hareketlerini, kuvvetlerini ve etkileşimlerini sanal ortamda temsil eden modellerdir. Bu, kullanıcıların üç boyutlu ve gerçek zamanlı olarak eylemlerine yanıt veren dinamik içeriklerle etkileşime girmelerini sağlar (Tuegel vd., 2021). Bu bağlamda, sanal ortamda gerçek dünya koşulları, olasılık senaryoları ve çeşitli durumlar etkili bir şekilde simüle edilebilir; sonuçlar ise mobil cihazlar, bilgisayarlar ve artırılmış, karmaşık ya da sanal gerçeklik platformlarında anında görselleştirilebilir (Yiğit & Uysal, 2023). Deng vd., (2021) dijital ikiz kavramını şu özelliklerle tanımlamaktadır:

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye kadar tüm verilerini bir araya getirir.
- Fiziksel ürünün yaşam döngüsü boyunca var olur, gelişir ve sürekli olarak bilgi toplar.
- Fiziksel nesnelerin tanımlanmasını ve optimize edilmesini sağlar.

Bu bağlamda dijital ikiz, üç boyutlu modelleme ve sensörler kullanarak sayısal temsiller oluşturan, fiziksel varlıkların sayısal kopyaları olarak tanımlanabilir.

Sanal gerçeklik, bilgisayarlar aracılığıyla oluşturulan, kullanıcıya gerçekmiş gibi bir deneyim sunan ve dinamik bir ortamda karşılıklı etkileşim olanağı sağlayan bir simülasyon modelidir (Şekil 17), (Bayraktar & Kaleli, 2007). Sherman ve Craig (2003), sanal gerçekliği, etkileşimli bilgisayar tabanlı simülasyonlardan oluşan, katılımcının konum ve hareketlerini algılayan, bir ya da daha fazla duyunun geri bildirimini değiştiren veya güçlendiren ve kullanıcının simülasyona ait bir dünyada olduğunu hissettiren bir ortam olarak tanımlamıştır.

5.2. Sanal Gerçekliğin Peyzaj Mimarlığında Kullanımı

Peyzaj mimarlığının çok yönlü ve çeşitli yapısı, disiplinler arası bilgi paylaşımını teşvik ederek, bilgi ve iletişim teknolojilerinin mimarlık alanında yeni kavramların ve değişimlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu teknolojiler, sadece sunum ve görselleştirme değil, aynı zamanda yaratıcı tasarımların oluşturulması ve ifade edilmesinde de önemli bir destekleyici rol oynamaktadır (Adanır, 2023). Sanal gerçeklik peyzaj mimarisinde;

- Özgün düşünebilme,
- Yeni çözümlere ulaşabilme,
- Üç boyutlu düşünebilme,
- Tasarım süreci ve görselleştirme (Adanır, 2023).

Sanal gerçeklik, tasarım sürecinde teknolojik araçlar kullanarak yaratıcı düşüncelerle yeni tasarımların ortaya çıkmasını sağlar. 3B görseller sayesinde, alanla ilgili daha ayrıntılı bilgi edinilir ve tasarım süreci boyunca sayısal ortamda yaratıcı sonuçlar elde edilir. Bu nedenle, sanal gerçeklik tasarım sürecinde yalnızca nihai modelin bir sonucu değil, tasarımcıların düşüncelerinin ve zihinsel süreçlerinin bir parçası olarak baştan sona kadar etkileşimde bulunulan bir araçtır (Şekil 11) (Kaya & Özlü,2022).



Şekil 10. Sanal gerçeklik kullanımının peyzaj mimarlığı için oluşturulmuş özet tablosu (Portman vd. (2015)'den esinlenilmiştir)

6. Sonuç ve Öneriler

Sanal gerçeklik ve 3B modelleme teknolojileri, peyzaj mimarlığı tasarım süreçlerinde yenilikçi yaklaşımlar sunmakla birlikte, bu teknolojilerin uygulanmasında çeşitli sınırlamalar ve zorluklar da gözlemlenmektedir. Öncelikle, sanal gerçeklik uygulamalarının doğal peyzaj unsurlarını tam anlamıyla taklit edebilme kapasitesi, özellikle detaylı ağaçlar, çalılar ve diğer bitki örtüsü gibi karmaşık modellerin oluşturulmasındaki maliyet ve zaman gereksinimleri açısından tartışmalıdır. Bu durum, peyzaj tasarımcılarının, doğal manzaraların sayısal temsillerini kullanma konusundaki eğilimlerini sınırlandırabilmektedir.

Fotogrametri ve 3B modelleme teknolojilerinin uygulanabilirliği, büyük ölçüde gerekli teknik donanım ve yazılımın erişilebilirliğine bağlıdır. Özellikle küçük ölçekli veya bütçe kısıtlamalarına sahip projelerde, yüksek kaliteli modelleme süreçlerinin yüksek maliyetleri ve zaman alıcı doğası, bu teknolojilerin yaygın kullanımını kısıtlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, fotogrametri verilerinin doğruluğu ve kalitesi, kullanılan ölçüm araçlarının hassasiyetine ve veri toplama yöntemlerine bağlıdır. Karmaşık doğal peyzaj unsurlarının doğru bir şekilde modellenmesi, yüksek çözünürlükte çoklu görüş açıları gerektirirken, bu gerekliliklerin yerine getirilmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Ayrıca, bu teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi, teknik bilgi ve uzmanlık gerektirmektedir. Tasarım ekiplerinin yeterli teknik donanıma ve eğitime sahip olmaması, süreçlerin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, bu yenilikçi teknolojilerin mevcut tasarım süreçlerine entegrasyonu ve kullanıcıların adaptasyon süreçleri de önemli bir zorluk olarak ortaya çıkmaktadır.

Sanal gerçekliğin peyzaj mimarlığında kullanımı, Bölüm 5.2'de belirtilen genel faydaların ötesinde, tasarımcının ve paydaşların karar alma süreçlerine doğrudan ve derinlemesine etki eden önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel 2B çizimler veya ekran tabanlı 3B modeller, mekanın gerçek ölçeğini, atmosferini ve üç boyutlu ilişkilerini tam olarak aktarmada yetersiz kalabilirken, VR kullanıcıyı tasarımın içine sokarak mekansal algıyı kökten değiştirir. Peyzaj mimarı için VR'ın karar alma sürecine temel katkıları şunlardır:

- Ölçek ve Oran Deneyimi: Tasarımcı, önerilen bir yapının, bitki grubunun veya oturma alanının gerçek boyutlarını ve çevresiyle olan oranını yerinde deneyimleyebilir. Bu, özellikle bitkilerin olgun boyuttaki hacimsel etkilerini veya yürüme yollarının yeterli genişlikte olup olmadığını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Yanlış ölçeklendirmeden kaynaklanan hatalar erken aşamada fark edilebilir.
- Mekansal İlişkiler ve Görsel Analiz: Farklı noktalar arasındaki görsel bağlantıları (vista, sightline), kapalılık/açıklık hissini, mahremiyet düzeyini ve mekanlar arası geçişleri VR içinde yürüyerek veya farklı noktalardan bakarak analiz etmek mümkündür. Bu, alanın kullanım senaryolarını ve kullanıcı deneyimini optimize etmede yardımcı olur.
    - Atmosfer ve Malzeme Değerlendirmesi: Farklı ışık koşulları (gün doğumu, öğlen, gün batımı, gece aydınlatması), mevsimsel değişimler veya farklı hava koşulları VR'da simüle edilebilir. Bu, seçilen malzemelerin dokusunun, renginin ve ışık altındaki görünümünün, bitki renk ve formlarının yaratacağı atmosferin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Malzeme ve bitki paleti kararları daha sağlam temellere oturtulur.
    - Tasarım Alternatiflerinin Hızlı Değerlendirilmesi: Farklı tasarım seçenekleri (örn. farklı zemin kaplamaları, farklı bitki düzenlemeleri, farklı donatı elemanları) VR ortamında kolayca değiştirilip anında

deneyimlenebilir. Bu, 'ya şöyle olsaydı?' sorusunun cevabını görsel ve mekansal olarak almayı sağlayarak daha verimli bir iterasyon süreci sunar.

- Paydaş İletişimi ve Katılım: VR, teknik çizimleri okumakta zorlanan müşterilere veya diğer paydaşlara tasarım fikrini en etkili şekilde aktarma yöntemlerinden biridir. Tasarımı 'deneyimlemek', soyut planlara bakmaktan çok daha etkilidir, geri bildirimlerin daha net olmasını sağlar, ortak bir anlayış oluşturur ve onay süreçlerini hızlandırabilir.

Sonuç olarak sanal gerçeklik, peyzaj mimarına sadece bir görselleştirme aracı değil, aynı zamanda tasarımı test etme, analiz etme ve kritik kararları daha yüksek bir güvenle alma imkanı sunan deneyimsel bir prototipleme platformu sağlar. Bu da projenin nihai kalitesini ve kullanıcı memnuniyetini artırma potansiyeli taşır.

Sanal gerçeklik teknolojilerinin peyzaj tasarımında önemli bir rolü de insan deneyimlerini simüle etme kapasitesidir. İnsanların doğal çevrelerle olan etkileşimlerini gerçekçi bir şekilde yansıtma yeteneği, sanal gerçeklik uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Bunun yanı sıra, fotogrametri ve 3B modelleme süreçleri, otomasyon ve yapay zeka gibi ileri teknolojilerle sürekli gelişim göstermektedir. Bu tür yenilikler, hem mevcut sınırlamaların aşılmasını sağlayacak hem de tasarım süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirecek potansiyel taşımaktadır.

Sonuç olarak, sanal gerçeklik ve fotogrametri teknolojileri, peyzaj mimarlığı tasarım süreçlerinde hem yaratıcı hem de işlevsel olanaklar sunarken, bunların etkili bir şekilde uygulanabilmesi için teknik bilgi, kaynak erişimi ve kullanıcı adaptasyonunun önemi büyüktür.

Bu doğrultuda, gelecekteki uygulamalar ve araştırmalar için bazı somut öneriler geliştirilmesi gereklidir**:**

- Peyzaj mimarlığı lisans ve yüksek lisans programlarına, VR destekli tasarım ve fotogrametri modüllerinin entegre edilmesi sağlanmalıdır. Böylece tasarımcı adayları bu teknolojilere daha erken aşamada adapte olabilir.
- Kamuya açık park, meydan ve rekreasyon alanı projelerinde artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) destekli sunumlar teşvik edilmelidir. Bu sayede halkın ve karar vericilerin tasarımları deneyimleyerek geri bildirimde bulunmaları sağlanabilir.
- Fotogrametri ve 3B modelleme süreçlerinde kullanılan donanım ve yazılımlar için daha erişilebilir, düşük maliyetli ve kullanıcı dostu çözümler geliştirilmesi desteklenmelidir.
- Tasarım büroları ve belediyeler için kısa süreli VR ve fotogrametri teknik eğitimleri düzenlenmeli, mevcut çalışanların da bu süreçlere uyumu artırılmalıdır.
- Projelerde tasarım alternatifi değerlendirme süreçlerinin VR ortamında yürütülmesi için prototip uygulamalar ve örnek çalışma raporları hazırlanmalıdır.

Bu tür somut adımlar, yeni teknolojilerin peyzaj tasarım süreçlerine entegrasyonunu hızlandıracak ve projenin hem tasarım kalitesi hem de kullanıcı memnuniyeti açısından daha başarılı sonuçlar doğurmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

Adanır, İ. (2023). *Peyzaj mimarlığında sanal gerçekliğin kullanımı* [Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Andújar, D., Calle, M., Fernández-Quintanilla, C., Ribeiro, Á., & Dorado, J. (2018). Three-dimensional modeling of weed plants using low-cost photogrammetry. *Sensors, 18*(4), Article 1077. https://doi.org/10.3390/s18041077

An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., & Zhang, Y. (2021). Measurement of rock joint surfaces by using smartphone structure-from-motion (SfM) photogrammetry. *Sensors, 21*(3), Article 922. https://doi.org/10.3390/s21030922

Avşar, E. Ö. (2006). *Tarihi köprülerin dijital fotogrametri tekniği yardımıyla modellenmesi* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Barceló, J. A. (2007). Automatic archaeology: Bridging the gap between virtual reality, artificial intelligence, and archaeology. In F. Cameron & S. Kenderdine (Eds.), *Theorizing digital cultural heritage: A critical discourse* (pp. 437–455). MIT Press.

Bayraktar, E., & Kaleli, F. (2007, 3 Ocak – 2 Şubat). *Sanal gerçeklik ve uygulama alanları* [Bildiri sunumu]. Akademik Bilişim'07 - IX. Akademik Bilişim Konferansı, Kütahya, Türkiye.

Benliay, A., & Akbiyik, İ. E. (2016). 3D modelling creating tool for landscape design: Camera. *Digital Landscape Architecture, 2016*, 237–244.

Bilgi, S. (2007). Fotogrametri ve uzaktan algılamada veri elde etme yöntemlerinin gelişimi ve kısa tarihçeleri. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 96*, 48–55.

Boradkar, P., & Dhadphale, T. (2014). *Visual research methods in the design process*. SAGE Publications.

Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from motion in the geosciences*. John Wiley & Sons.

Carvajal-Ramírez, F., Navarro, A., Agüera-Vega, F., Martínez-Carricondo, P., & Mancini, F. (2019). Virtual reconstruction of damaged archaeological sites based on unmanned aerial vehicle photogrammetry and 3D modelling: Study case of a southeastern Iberia production area in the Bronze Age. *Measurement, 136*, 225–236.

Ceylani, M. U., & Yavuz, U. G. (2023). Fotoğrafik modelleme: Fotogrametri tekniği ile video oyunlarında nesne-sahne tasarımı. *EKEV Akademi Dergisi*, *93*, 342–358.

Cova, G., Prichard, S., Rowell, E., Drye, B., Eagle, P., Kennedy, M., … & Nemens, D. (2023). Evaluating close-range photogrammetry for 3D understory fuel characterization and biomass prediction in pine forests. *Remote Sensing, 15*(19), Article 4837. https://doi.org/10.3390/rs15194837

Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering, 6*(2), 125–134.

Dilek, N. (2022). Investigation of user views and experiences on virtual reality technology used in recreation businesses. *GSI Journals Serie A: Advancements in Tourism Recreation and Sports Sciences, 5*(2), 204–222.

Duman, M. Ç. (2022). İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz. *Verimlilik Dergisi*, *2022*, 189–206. https://doi.org/10.51551/verimlilik.981349

Duymuş, H. Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (CBS) Peyzaj Mimarlığı Öğretiminde Kullanımının Önemi ve Gerekliliği. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, *8*(1), 98–111.

Edelman, H., Rosén, L., Nyman, E., & Leskinen, P. (2023). Integrating aerial and 3D data into a data-driven decision-making workflow for nature-based stormwater solutions. *Buildings, 13*(12), Article 2983. https://doi.org/10.3390/buildings13122983

Fan, J., Dai, W., Wang, B., Li, J., Yao, J., & Chen, K. (2023). UAV-based terrain modeling in low-vegetation areas: A framework based on multiscale elevation variation coefficients. *Remote Sensing, 15*(14), Article 3569. https://doi.org/10.3390/rs15143569

Fărcaş, R., Naş, S., Rădulescu, M., Vereş, I., & Bondrea, M. (2023). The use of UAVs to obtain necessary information for flooding studies: The case study of Somes River, Floresti, Romania. *Applied Sciences, 13*(21), Article 11688. https://doi.org/10.3390/app132111688

Fidan, Ş., & Ulvi, A. (2022). Tarsus Aziz Pavlus Kilisesinin yersel lazer tarama teknikleri ile üç boyutlu modelinin oluşturularak sanal gerçekliğe hazırlamanın değerlendirilmesi. *Turkey Lidar Journal*, *4*(2), 60–70. https://doi.org/10.51946/melid.1206504

Ghadirian, P., & Bishop, I. D. (2008). Integration of augmented reality and GIS: A new approach to realistic landscape visualization. *Landscape and Urban Planning, 86*(3–4), 226–232.

GRAFİK101. (2024). *3DF Zephyr Fotogrametri – Fotograftan 3D Modele* [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=tU8S4j9BHrw

Grieves, M. W. (2019). Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. In S. Flumerfelt, K. G. Schwartz, D. Mavris & S. Briceno (Eds.), *Complex systems engineering: Theory and practice* (pp. 175–200). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Guo, X., & Yang, G. (2013). Animating prairie simulation with shell method in real time. *Journal of Software, 8*(12), 3166–3172.

Güzel, M. (2015). *Halüsinasyon Mekânları: Sanal-Gerçek Arasında Mimarlık* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi.

Honjo, T., & Lim, E. M. (2001). Visualization of landscape by VRML system. *Landscape and Urban Planning, 55*(3), 175–183.

Isokane, T., Okura, F., Ide, A., Matsushita, Y., & Yagi, Y. (2018, June 18–23). Probabilistic plant modeling via multi-view image-to-image translation. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA.

Jäger-Klein, C., Kodžoman, E., & Stampfer, L. (2023). Secondary data collection and heritage documentation: Case study of a remote documentation of Travnik's Varoška Mosque. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-2-2023*, 751–757.

Kahveci, A., & Sondaş, A. (2023). Eğitimde sanal gerçeklik teknolojisine genel bakış. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6*(1), 6–13. https://doi.org/10.53410/koufbd.1134394

Kalay, Y. E., Kvan, T., & Affleck, J. (2008). *New heritage: New media and cultural heritage*. Routledge.

Kaya, M., & Özlü, Z. K. (2022). Yanık nedeniyle tedavi gören hastalarda yenilikçi teknoloji: sanal gerçeklik. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, *31*(1), 46-51.

Kılınçoğlu, D. B. (2016). *Farklı insansız hava araçları ile elde edilen görüntülerin otomatik fotogrametrik yöntemlerle değerlendirilmesi ve doğruluk analizi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Kong, L., Chen, T., Kang, T., Chen, Q., & Zhang, D. (2023). An automatic and accurate method for marking ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16*, 278–290. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3224543

Kronig, S., Kronig, O., Vrooman, H., & Adrichem, L. (2022). Classification of skull shape deformities related to craniosynostosis on 3D photogrammetry. *Journal of Craniofacial Surgery, 34*(1), 312–317.

Küçükkara, M., Özacar, K., & Ortakcı, Y. (2024). Mimarlık öğrencilerinin sanal gerçeklik ortamında Safranbolu Tabakhanesi'nde rölöve alma deneyimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 36*(1), 35–47. https://doi.org/10.35234/fumbd.1322782

Külür, S. (2002). *Fotogrametri ders notları* (Basılmamış ders notları). İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Kurum, E., & Çabuk, A. (1998, 26–28 Kasım). *Peyzaj mimarlığında bilgisayardan yararlanma olanakları* [Bildiri sunumu]. Çevre Planlama ve Tasarımına Bütüncül Yaklaşım Sempozyumu, Ankara, Türkiye.

Lange, E. (2011). 99 volumes later: We can visualise. Now what? *Landscape and Urban Planning, 100*(4), 403–406.

Lerma, J. L., & Garcia, A. (2004, October 25–27). *3D city modelling and visualization of historic centers* [Workshop presentation]. International Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres, Lisbon, Portugal.

Livny, Y., Yan, F., Olson, M., Chen, B., Zhang, H., & El-Sana, J. (2010). Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds. *ACM Transactions on Graphics, 29*(6), Article 151. https://doi.org/10.1145/1866158.1866177

Li, Z., Wu, B., Liu, W., Chen, L., Li, H., Dong, J., … & Dong, J. (2022). Photogrammetric processing of Tianwen-1 HiRIC imagery for precision topographic mapping on Mars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60*, Article 4601916. https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3194081

Luo, J., Lei, Z., & Cao, L. (2020). Visual simulation method of runoff in landscape space based on UAV tilt photography. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, 249*, 363–373.

Marangoz, A. M. (2012). *Fotogrametri-II ders notları* [Ders notları]. Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.

Mengots, A. (2016). Review of digital tools for landscape architecture. *Scientific Journal of Latvia University of Agriculture: Landscape Architecture & Art, 8*(8), 72–77.

Mondino, E., Petris, S., Sarvia, F., Momo, E., Sussio, F., & Pari, P. (2022). Adoption of digital aerial photogrammetry in forest planning: A case study of Canavese Forestry Consortium, NW Italy with technical and economic issues. *Land, 11*(8), Article 1350. https://doi.org/10.3390/land11081350

Nishanbaev, I. (2020). A web repository for geolocated 3D digital cultural heritage models. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 16*, Article e00139. https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00139

O'Driscoll, J. (2018). Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles. *Journal of Archaeological Science: Reports, 22*, 32–44. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.010

Okura, F. (2022). 3D modeling and reconstruction of plants and trees: A cross-cutting review across computer graphics, vision, and plant phenotyping. *Breeding Science, 72*(1), 31–47.

Orland, B., Budthimedhee, K., & Uusitalo, J. (2001). Considering virtual worlds as representations of landscape realities and as tools for landscape planning. *Landscape and Urban Planning, 54*(1–4), 139–148.

Özeren, E., Tosunoğlu, E., Pekyürek, M., Seyhan, N., & Yılmaz, F. (2021). Virtual reality studies in education: Analysis of trends in current research. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 21*(2), 390–401.

Popescu, D., Ichim, L., & Stoican, F. (2017). Unmanned aerial vehicle systems for remote estimation of flooded areas based on complex image processing. *Sensors, 17*(3), Article 446. https://doi.org/10.3390/s17030446

Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, *54*, 376-384.

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... & Nee, A. Y. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, *58*, 3-21.

Sánchez, J., Franco, P., & Plata, A. (2022). Achieving universal accessibility through remote virtualization and digitization of complex archaeological features: A graphic and constructive study of the Columbarios of Mérida. *Remote Sensing, 14*(14), Article 3319. https://doi.org/10.3390/rs14143319

Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2003). *Understanding virtual reality*. Morgan Kauffman.

Szostak, R., Pietroń, M., Wachniew, P., Zimnoch, M., & Ćwiąkała, P. (2024). Estimation of small-stream water surface elevation using UAV photogrammetry and deep learning. *Remote Sensing, 16*(8), Article 1458. https://doi.org/10.3390/rs16081458

Şenol, H. İ., & Kaya, Y. (2019). İnternet tabanlı veri kullanımıyla yerleşim alanlarının modellenmesi: Çiftlikköy Kampüsü örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 1*(1), 11–16.

TİNT Mimarlık. (2021, 12 Temmuz). *Mimarlıkta sanal gerçeklik teknolojisi*. https://www.tintmimarlik.com/mimaride-sanal-gerceklik-teknolojisi/

Toprak, A. S. (2014). *Fotogrametrik tekniklerin insansız hava araçları ile mühendislik projelerinde kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering, 2011*, Article 154798. https://doi.org/10.1155/2011/154798

Ware, C. (2019). *Information visualization: Perception for design*. Morgan Kaufmann.

Uçar, E., & Ergün, B. (2004). Fotogrametride üç boyutlu şehir modelleme teknikleri ve CBS kullanımı. *Harita Dergisi, 132*, 48–56.

Uslu, A. (2021). Fotogrametri tekniğine dayalı üç boyutlu baskı uygulaması: Leblebi Anıtı örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi, 3*(2), 46–52.

Uysal, T. (2023). Üç boyutlu dijital imge üretim yöntemleri bağlamında fotogrametri. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi, 11*(82), 249–266.

Uzun, Ö. F. (2015). *Fotoğraf yardımı ile 3 boyutlu ağaç modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Varinlioğlu, G. (2020). Teos üzerinden dijital mirasta sanal gerçeklik uygulamalarını anlamak. *Megaron, 15*(1), 161–170.

Mırdan, O., & Yakar, M. (2017). Tarihi eserlerin İnsansız Hava Aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. *Geomatik*, *2*(3), 118-125.

Yıldırım, M. T. (2004). Mimari tasarımda biçimlendirme yaklaşımları ile bilgisayar yazılımları ilişkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19*(1), 59–71.

Yılmaz, A. A. (2011). *Peyzaj mimarlığında bilgisayar kullanımı* [Yüksek lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi

Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi eserlerin 3B modellenmesi ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8*(2), 1032–1043. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1011064.

Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12*(4), 1372–1384.

Yusuf, A. (2022). *Plant photogrametry – Reality Capture* [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=lcOslbIboYI

Zube, E. H., Simcox, D. E., & Law, C. S. (1987). Perceptual landscape simulations: History and prospect. *Landscape Journal, 6*(1), 62–80. https://doi.org/10.3368/lj.6.1.62