

Bayes Olasılık Modeli ve Frekans Oranı (FO) Yöntemi ile Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce) Heyelan Duyarlılık Analizi

Landslide Susceptibility Analysis of Esmahanım Stream Basin (Düzce) by Using Bayesian Probability Model and Frequency ratio (Fr) Method

Vedat Avcı^{1,2*} 

¹Bingöl Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 12000, Bingöl/Türkiye.

²Bingöl Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Doğal Afet Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 12000, Bingöl/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Vedat Avcı
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 içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmada heyelan duyarlılığı üzerinde etkili olan litoloji, yükselti, eğim, yamaç eğriselliği, baki, 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 istatistiklerle karşılaştırılmıştır. 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 öznel 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 Esmahanım Stream Basin by using Bayesian Probability Model and Frequency Ratio (FR) Method. Bordered by Düzce 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

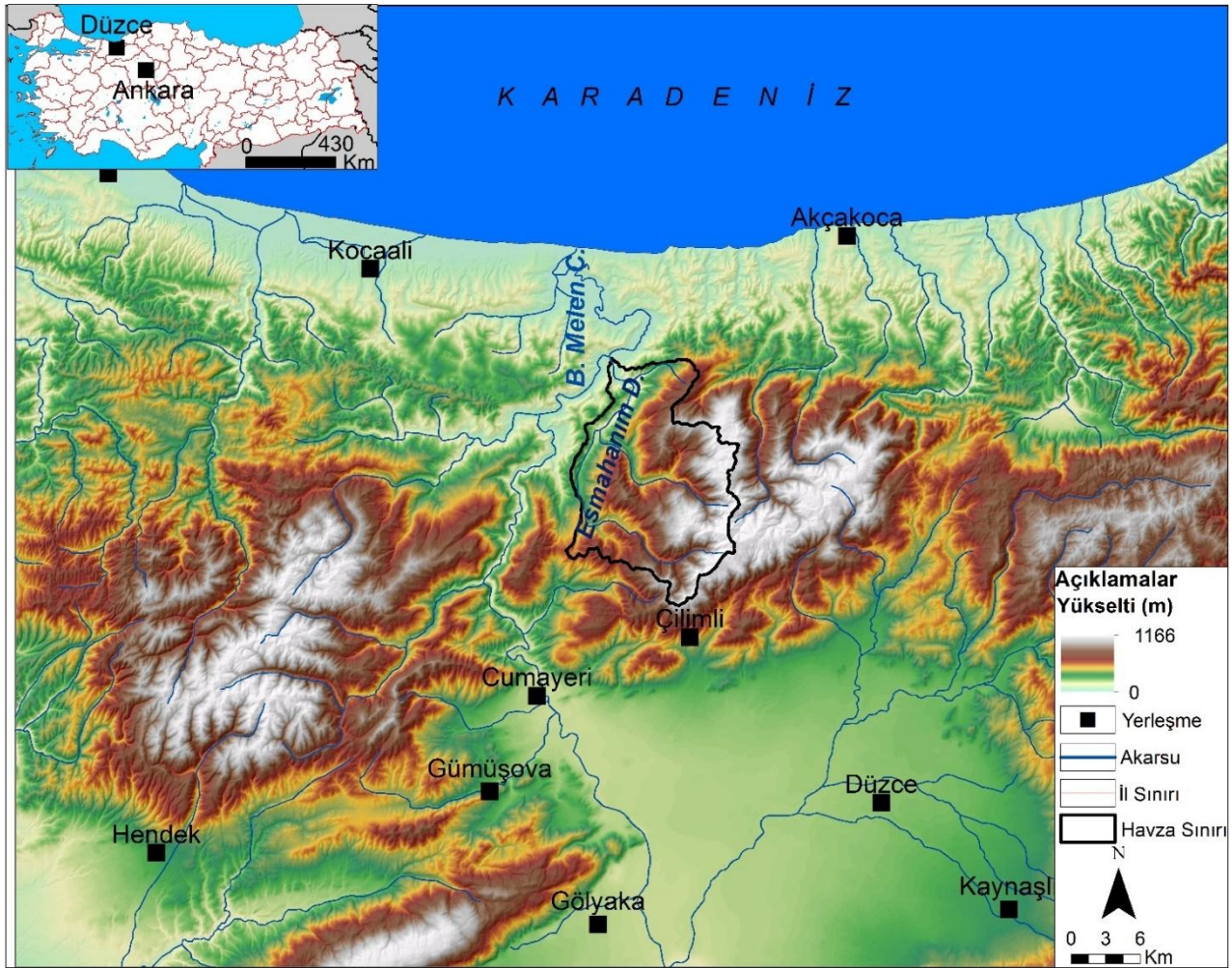
1. Giriş

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 zararlar 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 & Işcan, 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 & Kömüşçü, 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 sahalara 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 azaltılmasında, 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 katkıların 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 km² 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, çakıltası-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°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 Geostatistical 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 km² olup analizde kullanılan heyelanlar yaklaşık 2.6 km², kontrol heyelanları 1.4 km² 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, baki, 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, i) 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, Baki, 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).

$$W^+ = \ln \left[\frac{\frac{A1}{A1 + A2}}{\frac{A3}{A3 + A4}} \right] \quad (1)$$

$$W^- = \ln \left[\frac{\frac{A2}{A1 + A2}}{\frac{A4}{A3 + A4}} \right]$$

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 kontrastı (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).

$$C = W^+ - W^- \quad (2)$$

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):

$$FO = \frac{PLO}{PIF} \quad (3)$$

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).

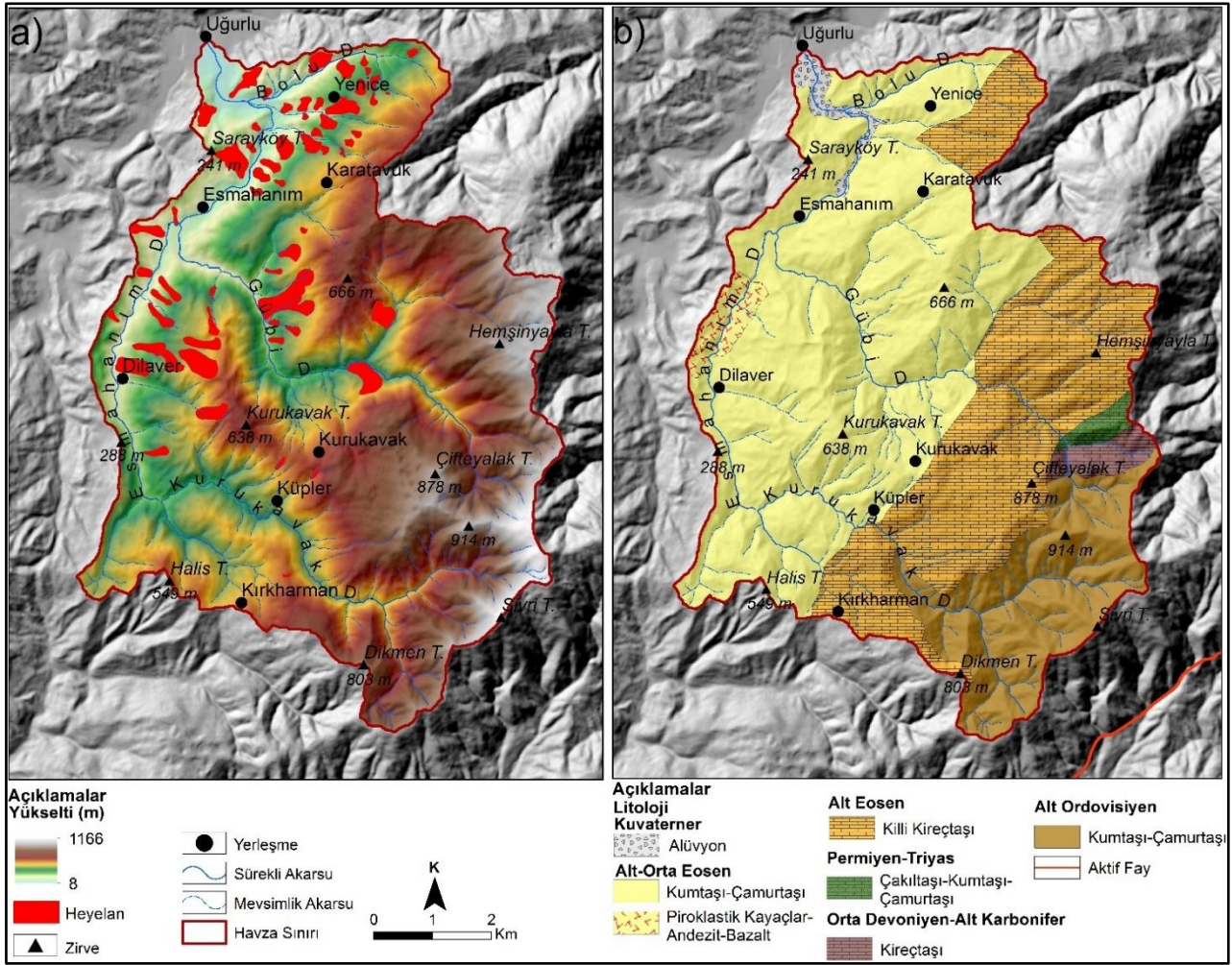
5-15 arasında değişen sınıf sayıları genel olarak ideal bir frekans dağılımı için uygun kabul edilen sınıf aralıklarıdır (Sharma & Gupta, 2017; Üzel Günini & Öztürk, 2021). Bu çalışmada da litolojik birimler dışındaki katmanlar doğal kırılım yöntemiyle 5 alt sınıfa ayrılmıştır. Yeniden sınıflandırılan 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 öznelite 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 Permien-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 Ordovisiyen kumtaşı-çamurtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Diğer birimlerin toplam alana oranı oldukça düşüktür (Şekil 3b).

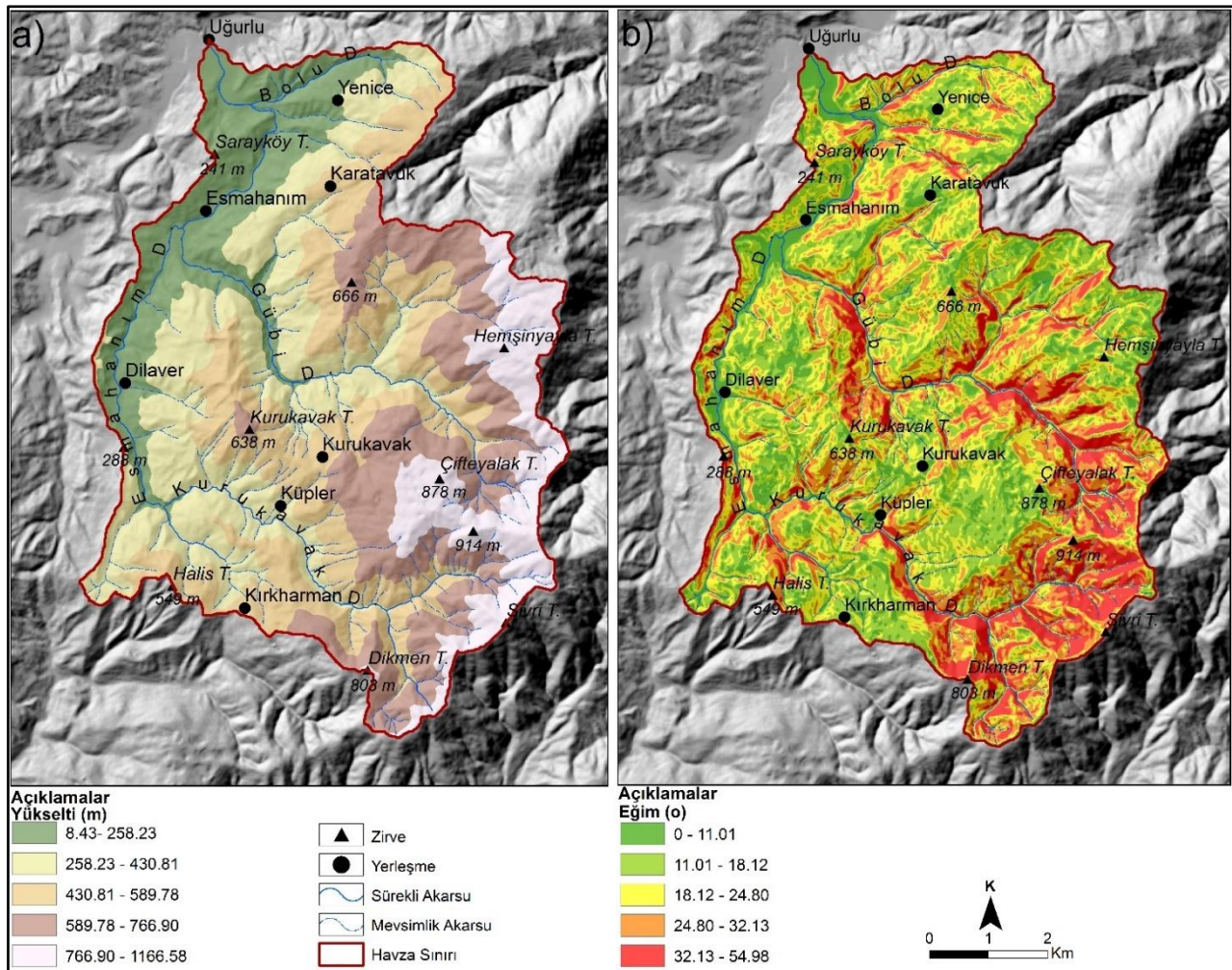


Şekil 3. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) heyelan envanteri (Duman vd., (2005) ile Google Earth Pro verisinden hazırlanmıştır) ve b) jeoloji haritası (Altun & Aksay, 2002a; Gedik & Aksay, 2002a; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2002; 2025; Pehlivan vd., 2002; Timur & Aksay, 2002; Emre vd., 2013)

3.2 Yükselti ve Eğim

Yükselti ve yükselti değişimi bir alanda heyelan oluşumuna neden olabilmektedir. Çünkü farklı yükseltelerde 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 şeklindedir (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.



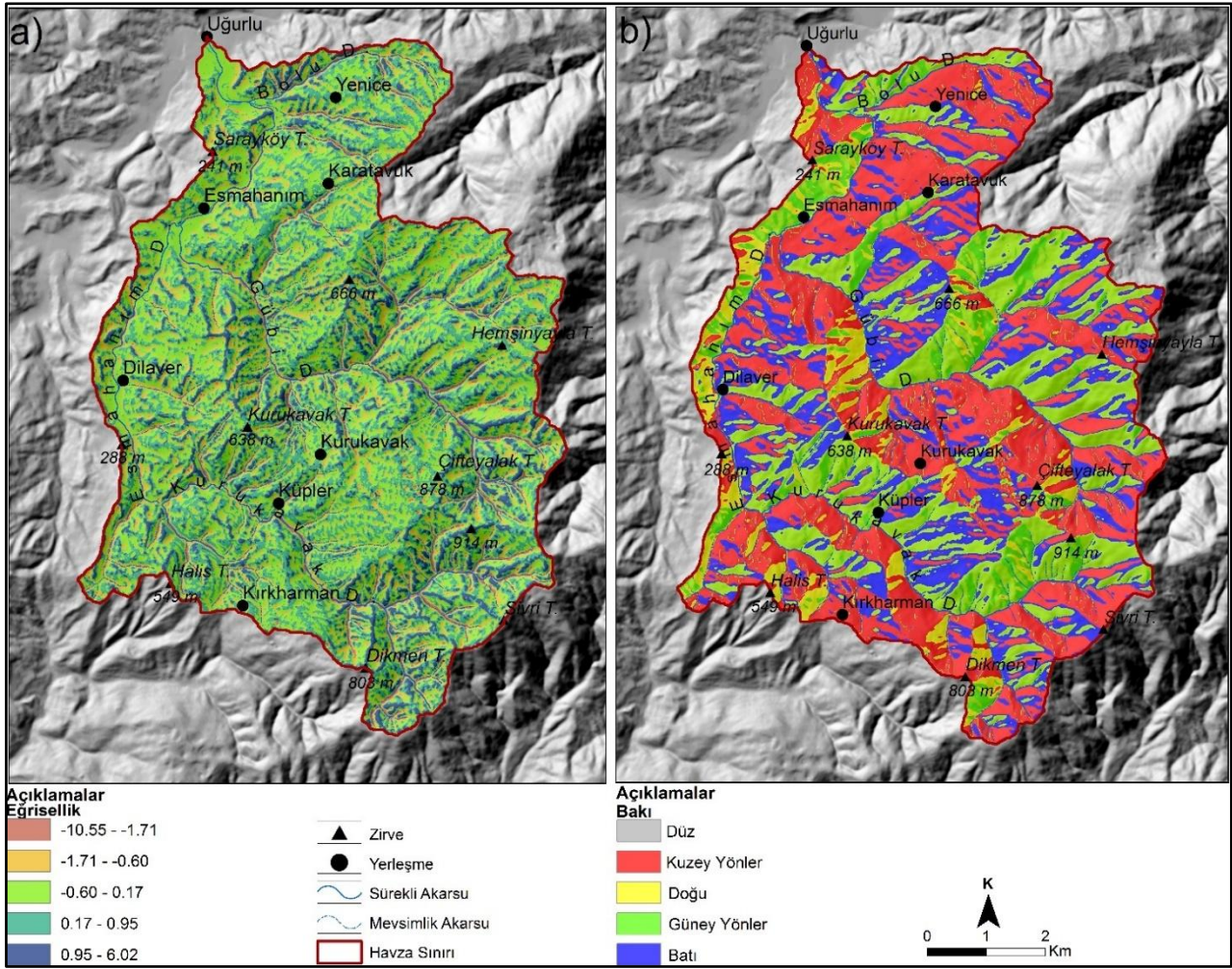
Şekil 4. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) yükselti basamakları ve b) eğim haritası

3.3 Yamaç Eğriselliği ve Bakı

Eğrilişlik, yamaç üzerinde su birikimini belirleyeceğinden heyelan oluşumu üzerinde etkili olmaktadır (Chen vd., 2017; Mengstie vd., 2024). SYM'den elde edilen yamaç eğrilişliği 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 eğrilişliği -10.55 ile 6.02 arasında değişmektedir. Yamaç eğrilişliği 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, geçirimsizlik 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)

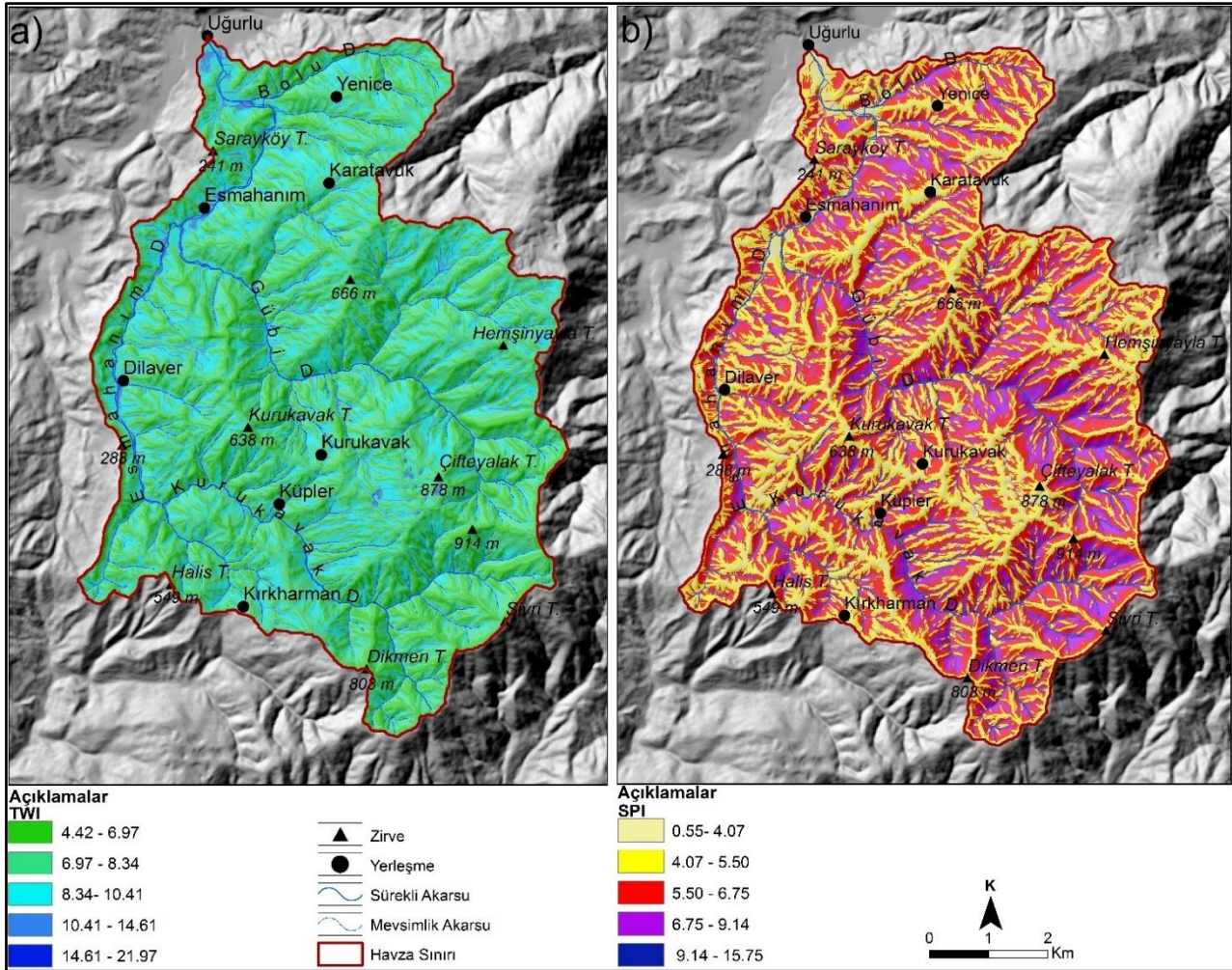
$$TWI = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta} \right) \quad (4)$$

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 şeklindedir (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).

$$SPI = As * \tan \beta \quad (5)$$

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).

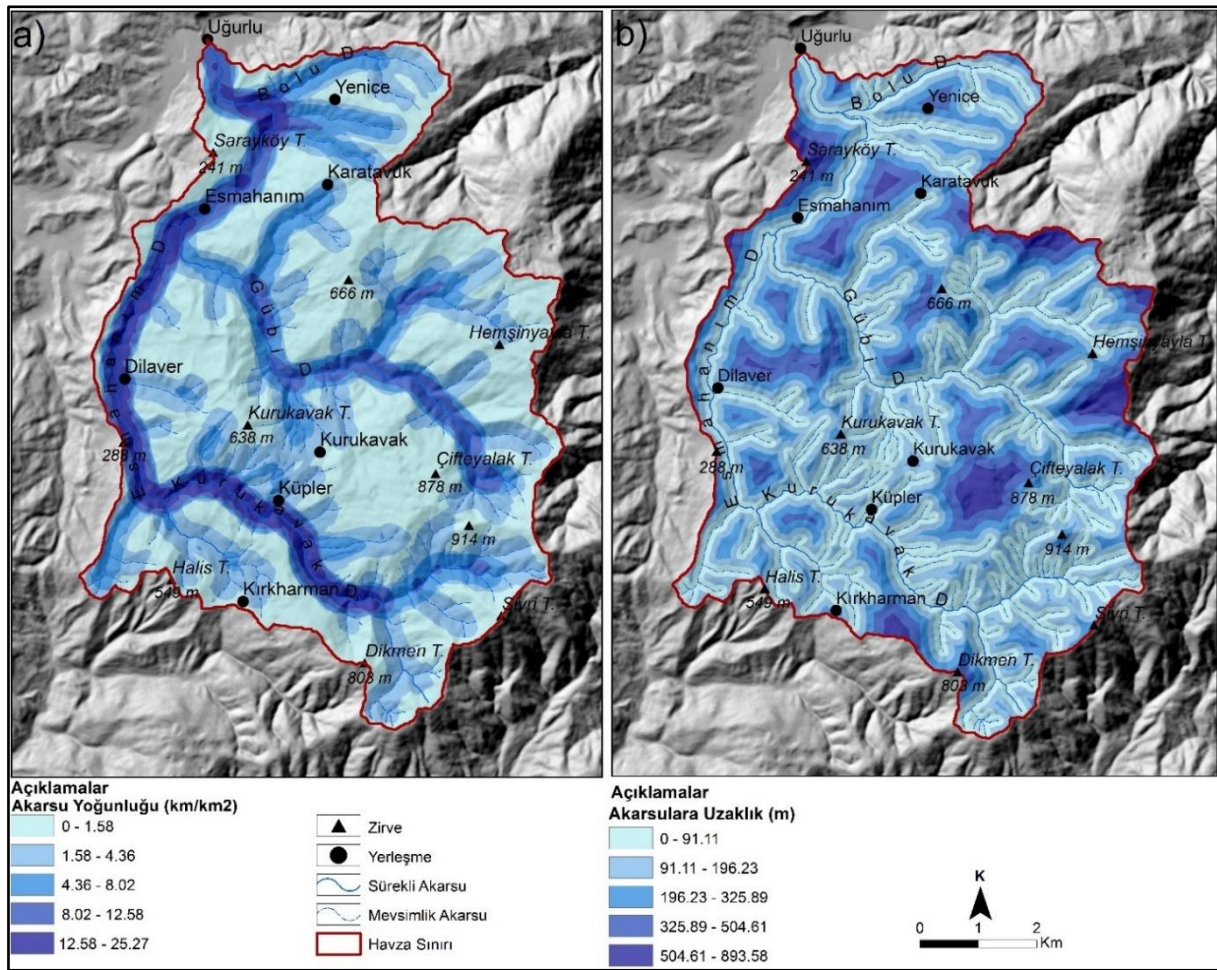


Şekil 6. Esmahanım Deresi Havzası’nın (Düzce); a) TWI ve b) SPI dağılışı haritası

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’dir. 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 & Avci, 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’dir. 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

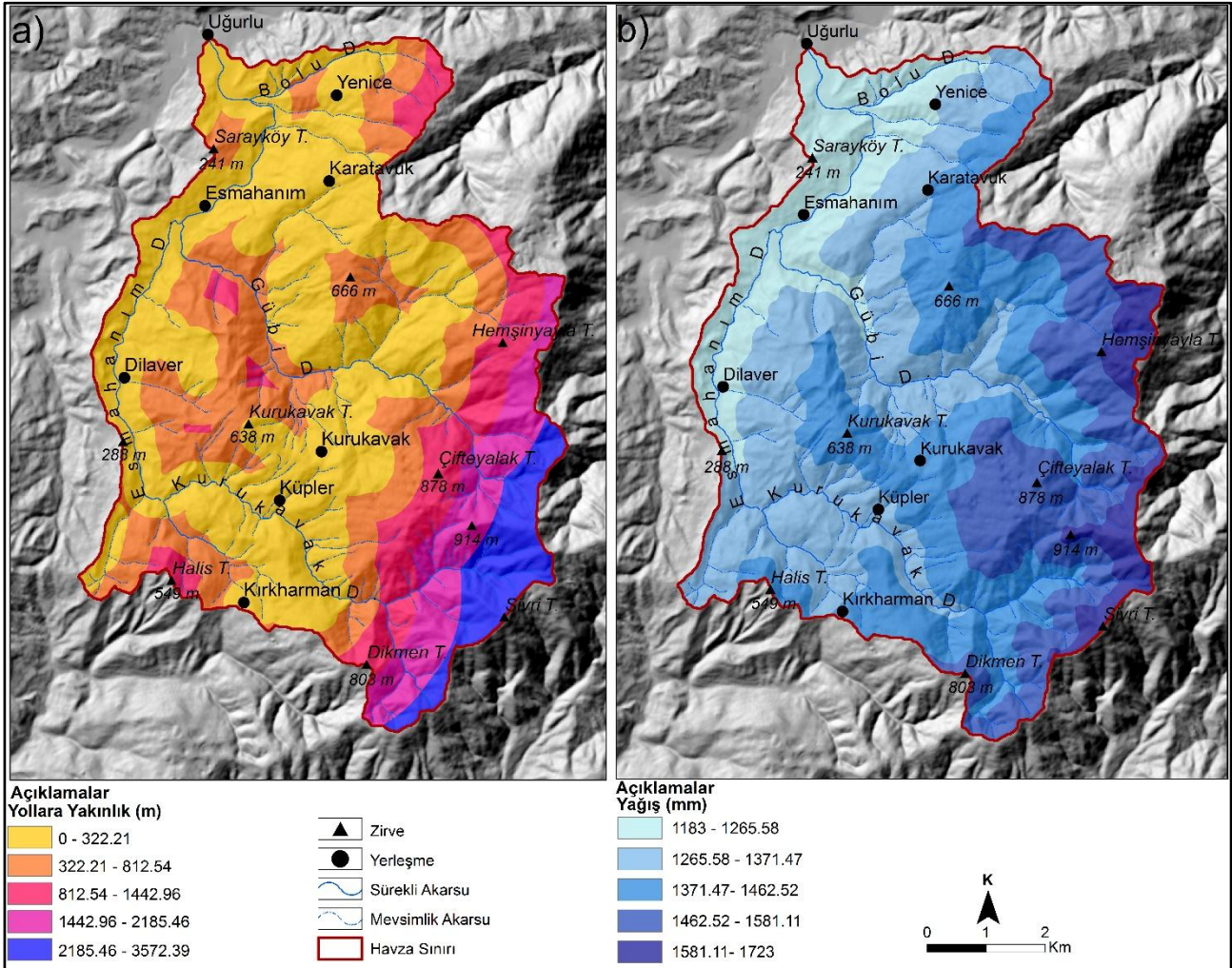
3.6 Yollara Yakınlık ve Yağış

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

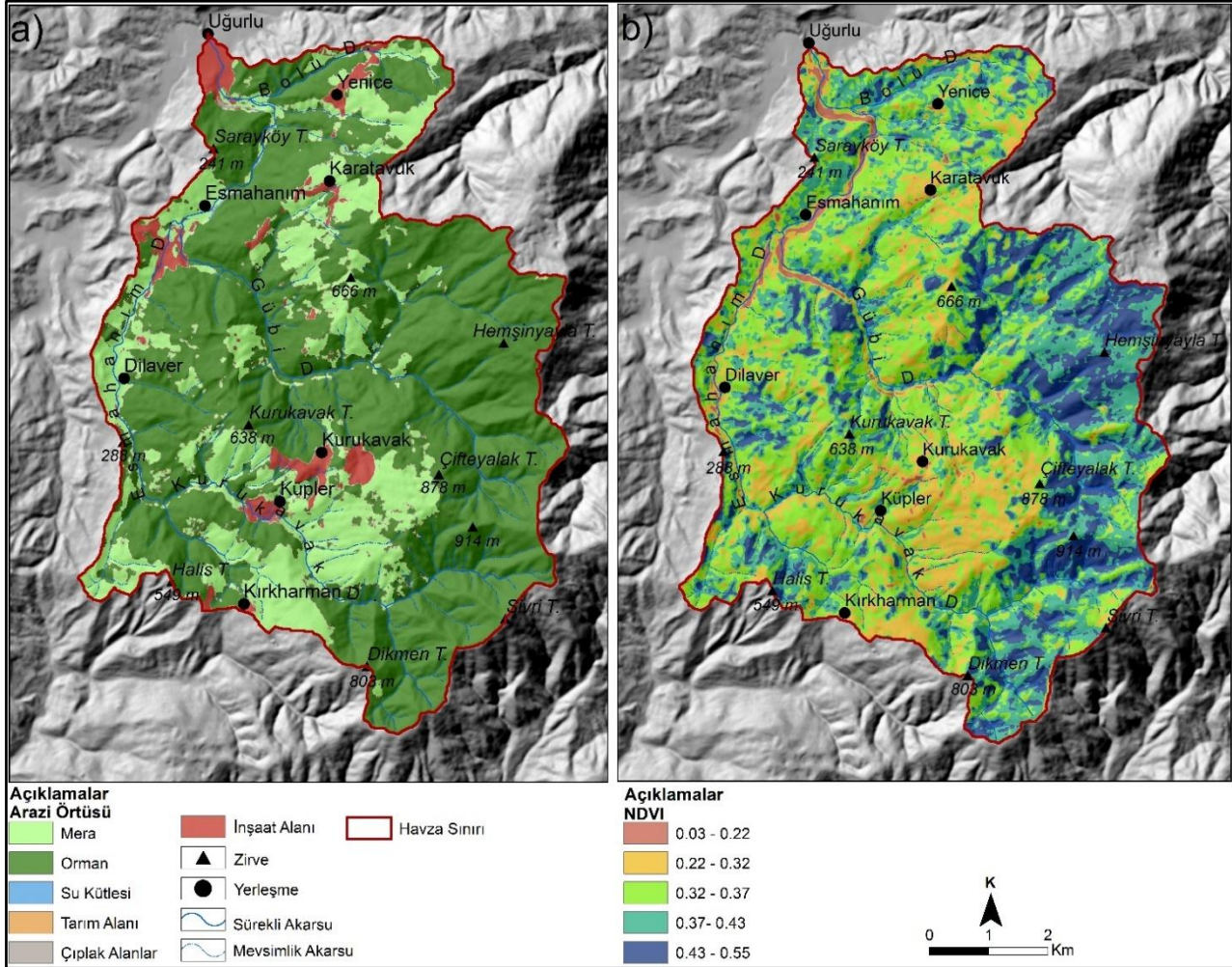
Arazi örtüsü, yamaç stabilitesinin dolaylı bir göstergesidir. Çorak ve seyrek bitki örtüsüyle kaplı alanlar ormanlardan daha fazla duraysızlık göstermektedir. Orta derecede eğimli tarım arazileri, tekrarlayan sulama süreçleri nedeniyle heyelanlara karşı duyarlı hale gelmektedir (Çevik & Topal, 2003; 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 kapallık 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.

$$NDVI = \text{Float} \frac{\text{Band5} - \text{Band4}}{\text{Band5} + \text{Band4}} \quad (\text{U.S. Geological Survey, 2024}) \quad (6)$$

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 kilaşı 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 değer 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

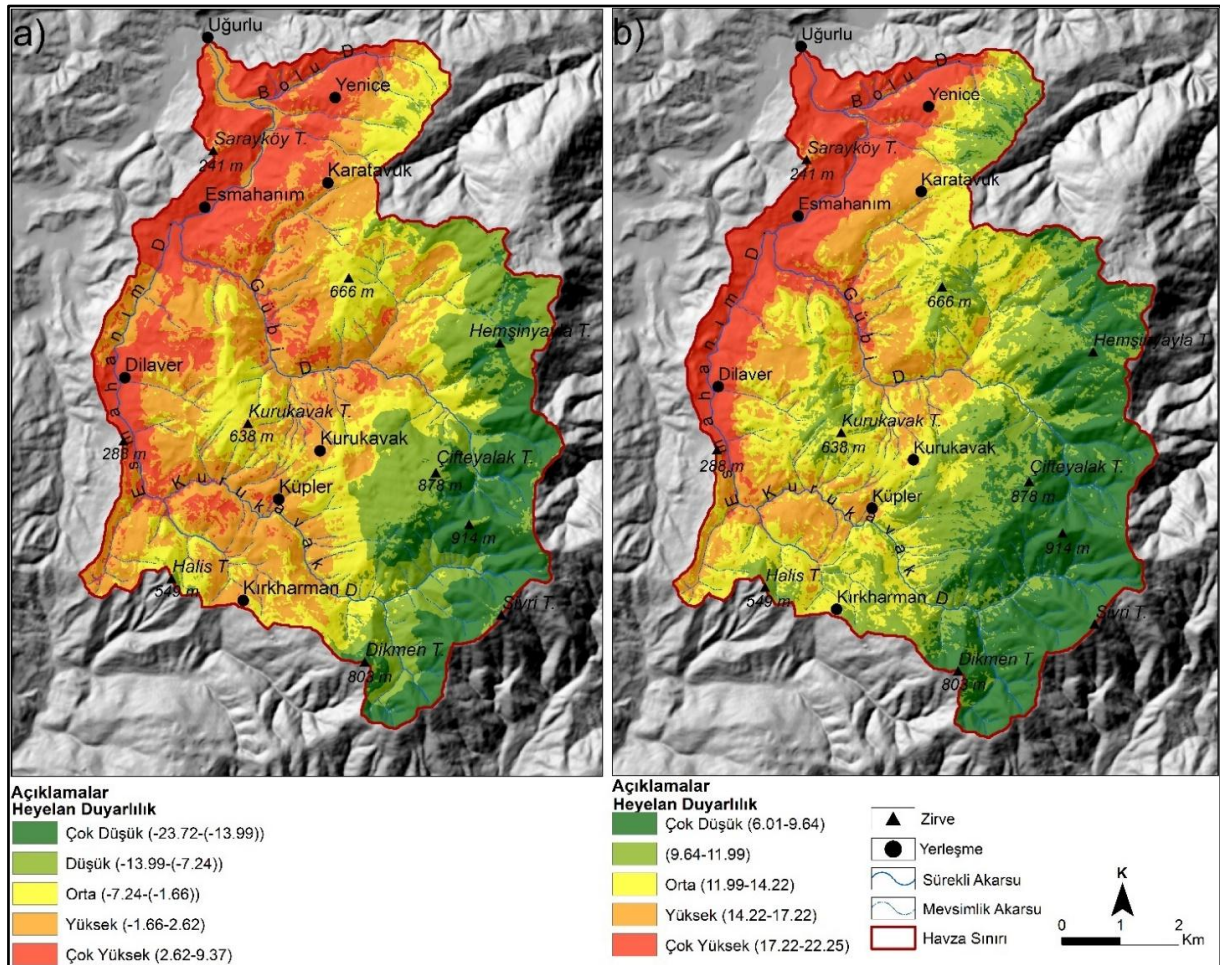
Parametreler	Alt Sınıflar	A1	A2	A3	A4	W+	W-	C	PLO	PIF	FO
Bakı	4	6829	19236	187502	403574	-0.19126	0.077777484	-0.269035	26.2	31.49	0.832
	5	1691	24374	71923	519153	-0.62892	0.06266954	-0.691594	6.4876	11.93	0.544
	Düz	0	26065	3	591073	0	5.0755E-06	0	0	5E-04	0
	Kuzey	11888	14177	242851	348225	0.104433	-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
TWI	Batı	4144	21921	122417	468659	-0.26442	0.05892084	-0.323341	15.899	20.51	0.775
	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.

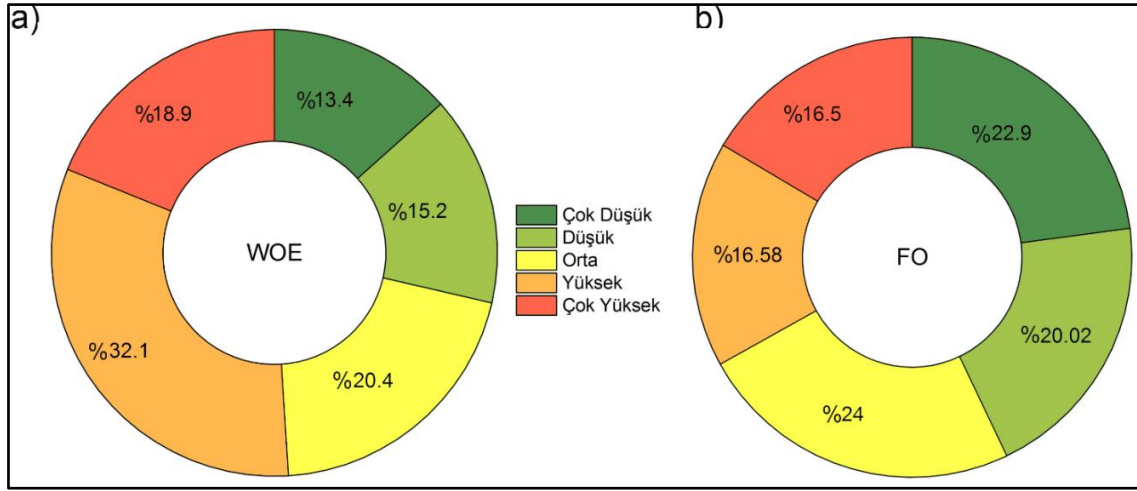
NDVI değerlerinin artması heyelan duyarlılığının artmasına neden olmuştur. Her iki modelde de arazi örtüsü duyarlılık arasında pozitif yönlü ilişki inşaat alanı ve çıplak alanlar için söz konusudur. FO yönteminde orman alanları ile duyarlılık arasında pozitif yönlü ilişki bulunmaktadır. Bu durum heyelanların daha sık meydana geldiği eğimli yamaçlarda bitki kök sistemlerinin gelişmesiyle 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).



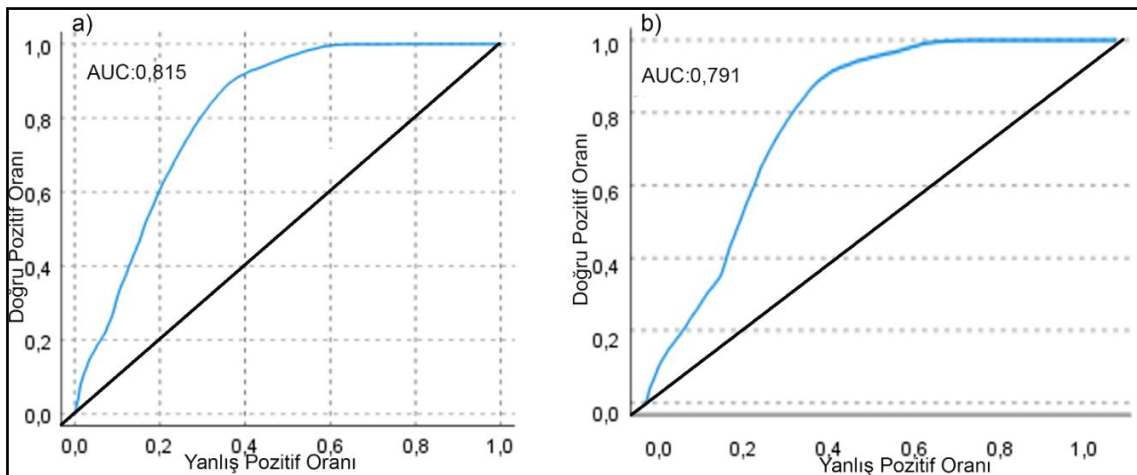
Şekil 10. Esmahanım Deresi Havzası'nın (Düzce); a) Bayes olasılık modeli (WoE) ve b) FO yöntemlerine göre hazırlanan heyelan duyarlılık haritaları

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 karşılaştırılmıştır. 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 ile 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 karşılaştırılmasıdır. 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 duyarlılık sınıfında yer almaktadır. Frekans oranı yöntemi ile hazırlanan haritada çok yüksek ve yüksek duyarlılık sınıfında 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 kırım yöntemi ile 5 sınıfa ayrılmıştır. Her iki yöntemde 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 sahalara, inşaat ve çıplak alanlar, yollara 0-322 m uzaklıkta olan sahalara ile heyelan duyarlılığı arasında güçlü ilişki saptanmıştır.

Her iki yöntemde göre hazırlanan haritaların doğruluk analizi için eğri altında kalan alan yöntemi ve duyarlılık sınıfları ile kontrol heyelanları karşılaştırılması yöntemi kullanılmıştır. AUC değeri Bayes olasılık modeli için 0,815, Frekans oranı için 0,791 olarak bulunmuştur. Kontrol heyelanları duyarlılık haritaları ile karşılaştırıldığında; 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>
- Akinci, 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.
- Akinci, 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.
- Akinci, H., Yavuz Özalp, A., & Temuçin Kılıçer, S. (2015). Coğrafi bilgi sistemleri ve AHP yöntemi kullanılarak planlı alanlarda heyelan duyarlılığının değerlendirilmesi: Artvin örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1–2), 40–53. <https://doi.org/10.21324/dacd.20952>
- Akinci, H., Doğan, S., & Kılıçoğlu, C. (2017). Landslide susceptibility mapping of Canik (Samsun) district using Bayesian probability and frequency ratio models. *Selcuk University Journal of Engineering Science and Technology*, 5(3), 283–299. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2017.89>
- Akinci, 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., Gugsu, 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 açınısalı 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=cfc67609de5f478eb7666240902d4d3d> 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 açinsamalı 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., & Kömüşçü, A. Ü. (2025). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı AHS yöntemi ile Erzincan–Sivas karayolu ve çevresinin heyelan duyarlılık analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(1), 89–103.
- 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>
- Jallay, 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., & Avci, 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>