

Akyayla Dağı'nın Heyelan Morfolojisi ve Heyelan Duyarlılığının CBS Tabanlı Frekans Oranı (FO) Yöntemi ile Analizi (Doğubayazıt / Ağrı)

Landslide Morphology and Susceptibility Analysis of Mount Akyayla Using GIS-Based Frequency Ratio Method (Doğubayazıt / Ağrı)

Hasan SAYIN¹ , Yahya ÖZTÜRK²

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Van

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Van

Geliş (Received): 22/05/2025 / Düzeltme (Revised): 29/06/2025 / Kabul (Accepted): 01/12/2025

ÖZ

Akyayla Dağı, Ağrı Dağı'nın güneyinde Ağrı ilinin Doğubayazıt ilçesinin sınırlarında kalan sedimanter kökenli dağlık bir ünitedir. Türkiye-İran sınırını oluşturan dağlık kütlede litolojik, topoğrafik, tektonik ve antropojenik süreçlerden dolayı heyelan gelişimleri oldukça yaygın şekilde görülmektedir. Kütlede 141 heyelan belirlenirken bunların 121'i aktif heyelan, 20'si ise paleoheyelan karakterindedir. Aktif heyelanların 40'ı akma karakterinde heyelan oluşumlarıdır. Dağlık kuşağın yakın çevresinin sismik anlamda oldukça aktif olması, fliş ve karasal kırıntılar gibi heyelana oldukça duyarlı litolojilerin varlığı, topoğrafik eğimin kuzeye doğru yüksek değerler sunması, gelişkin flüvyal drenaj ve antropojenik müdahaleler gibi parametreler heyelan morfolojisinden sorumlu temel etmenlerdir. Yaklaşık 325 km² alana sahip dağlık alanın topoğrafik peyzajının yaklaşık 44,15 km²'sinin heyelanlar tarafından şekillendirildiği hesaplanmıştır. Çalışmada, heyelana etki eden parametreler modelleme sürecine girdi değişkenleri olarak dâhil edilerek, Frekans Oranı (FO) yöntemi kullanılmış ve CBS tabanlı heyelan duyarlılık analizi ile sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma sonuçlarına göre çalışma alanının %9,5'i çok düşük, %22,8'i düşük, %35,7'si orta, %23,5'i yüksek ve %8,5'i çok yüksek heyelan duyarlılığı sınıfında yer almaktadır. Bölgedeki kültürel-doğal jeositlerin heyelan duyarlılığının yüksek-çok yüksek olduğu bölgelerde konumlandığı görülmektedir. Örneğin Nuh'un Gemisi, İshakpaşa Sarayı, Urartu Kalesi, Selçuklu Camii gibi turistik kaynak değerleri heyelan duyarlılığı yüksek bölgelerde bulunmaktadır. Bu ilişki, mekânsal planlama ve korumada heyelan duyarlılığının dikkate alınmasının gerekliliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, heyelan duyarlılığı, frekans oranı (FO) yöntemi, Akyayla Dağı

ABSTRACT

Mount Akyayla is located on the borders of Doğubayazıt district in Ağrı province, south of Mount Ağrı. Landslides are quite common in the mountainous mass forming the Türkiye-Iran border due to lithological, topographic, tectonic and anthropogenic processes. A total of 141 landslides were identified on the mountain, of which 121 are active landslides and 20 are paleo-landslides. Forty of the active landslides are flow-type landslide formations. The seismically-active mountain environment, the presence of highly landslide-susceptible lithologies such as flysch, high topographic slope values, fluvial drainage and anthropogenic interventions are the main factors responsible for landslide morphology. Approximately 44.15 km² of the topographic landscape of the mountainous area with an

area of 325 km² was calculated to be shaped by landslides. In the study, GIS-based landslide susceptibility analysis and classifications were carried out using the Frequency Ratio Method by determining the proxies for parameters causing landslides. According to the classification, landslide susceptibility is very low for 9.5% of the mass, low for 22.8%, moderate for 35.7%, high for 23.5% and very high for 8.5%. Cultural and natural geosites in the region are located in areas with high to very high landslide hazard. For example, touristic assets such as Noah's Ark, İshakpaşa Palace, Urartu Castle, and Selçuklu Mosque are located in areas with high landslide susceptibility. This indicates the necessity to consider landslide hazards during spatial planning and protection.

Keywords: Landslide, landslide susceptibility, frequency ratio (FR) method, Mount Akyayla

GİRİŞ

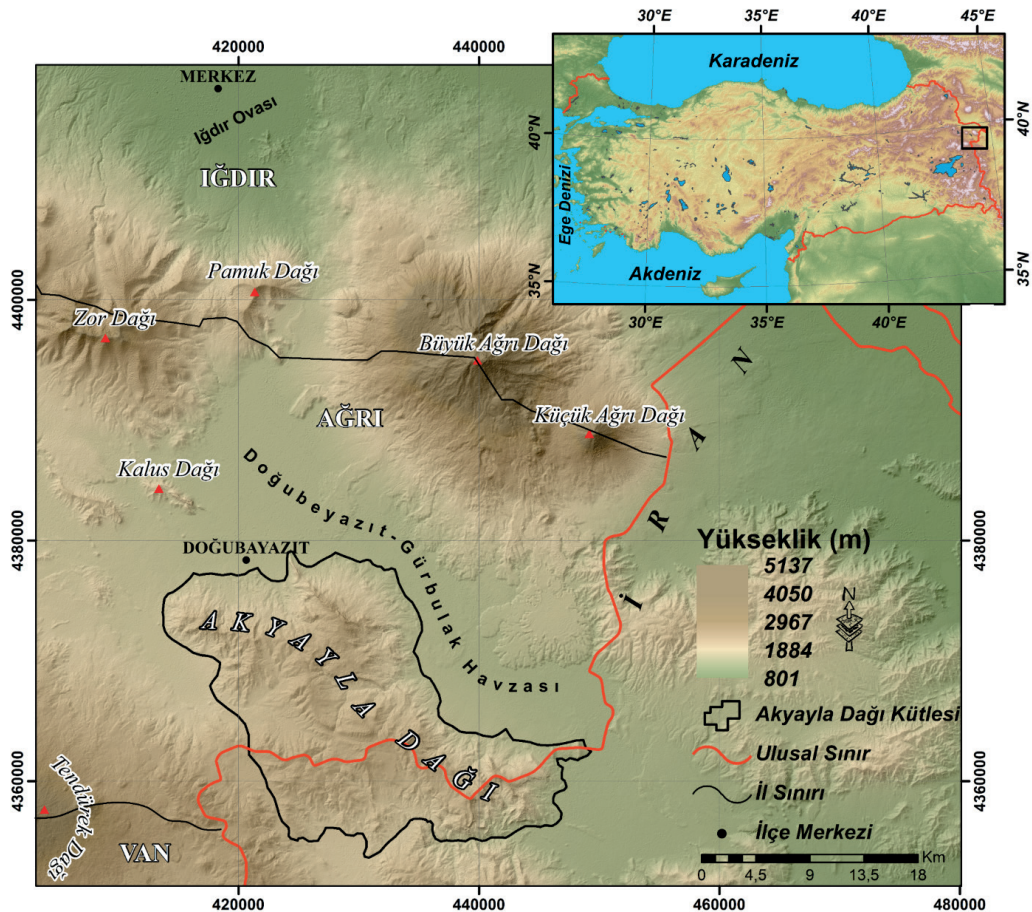
Yer yüzeyinin şekillenmesinde etkili jeomorfolojik sistemlerden biri olan heyelanlar, topoğrafik karakterin (Kasai ve Yamada, 2019; Dunham vd., 2022), iklimatik özelliklerin (Haque vd., 2019; Liu vd., 2024; Zhao vd., 2025), litolojik yapının (Safaei vd., 2012; Dağ vd., 2020), tektonik dinamiklerin (Görüm, 2016; Dölek vd., 2023; Köküm, 2021; Türkmen, 2024) ve antropojenik süreçlerin (Tian vd., 2025) iç içe geçmiş denetimi altında gelişirler. Bu kompleks etkiden dolayı heyelan gelişimlerinin salt belirli bir nedeni yoktur. Çoklu denetleyici mekanizmanın yönlendirmesiyle topoğrafya yüzeyini örten regolitin ya da regolitle birlikte anakaya bloklarının eğim aşağı aniden ya da yavaş hareketi heyelan morfolojisi için en karakteristik göstergelerdir (Lutgens vd., 2013). Bu nedenle heyelanlı alanlarda dalgalı topoğrafik peyzaj gelişirken heyelan yarası (aynası), topuk kısmı, gerilme çatlakları gibi yapısal/jeomorfik birimler de diğer tanıttan yapıları temsil eder (Erinç, 2001). Heyelan süreçleri morfolojik desen dışında bitki örtüsü, drenaj sistemleri ve beşerî yapılar üzerinde de etkisini gösterirken, makro heyelan hadiseleri birçok defa katastrofik fenomenlere dönüşmüştür (Ambraseys ve Melville, 1982; Schuster ve Flemming, 1986; Luino, 1999; Kilburn ve Petley, 2003; Öztürk, 2002; Fidan ve Görüm, 2020; Gürsoy vd., 2024). Ani ve büyük hacimli gelişmeleri yıkımcıl heyelanların temel nedeniyken heyelanların önlenememesi

planlamada önleyici mekanizmaların sağlanmasını gerektirmektedir (Deniz ve Sındır, 2001; Öztürk, 2002). Bu bağlamda heyelan envanterlerinin çıkarılması ve heyelana neden olan parametrelerin belirlenmesiyle duyarlılık analizlerinin yapılması son yıllarda oldukça popüler bir yaklaşımdır (Çellek vd., 2015; Sheng vd., 2022; Bozdoğan ve Canpolat, 2022; Cihangir, 2024; Abay vd., 2025). Bunlardan hareketle bu çalışmada da Doğu Anadolu Yüksek Platosu'nun (DAYP) doğusunda, Ağrı Dağı'nın güneyinde, Türkiye-İran sınırını oluşturan Akyayla Dağı'nın heyelan envanteri Çan vd. (2013) tarafından geliştirilen veri tabanının sanal erişim kaynağı olan <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/> adresine ve arazi çalışmalarına dayanarak belirlenmiş ve kütlelenin ülkemiz sınırları dahilinde kalan kesimi için frekans oranı (FO) yöntemi kullanılarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Diğer CBS tabanlı duyarlılık analizlerinin yanı sıra frekans oranı (FO) yönteminin daha yüksek doğrulukta sonuçlar verebileceğinden dolayı (Becer vd., 2017; Arca ve Kutoğlu, 2017; Öz ve Günek, 2021; Başara ve Şişman, 2022; Başalan ve Demir, 2022; Aydoğan ve Dağ, 2023; Dalkes ve Korkmaz, 2023; Yılmaz, 2023; Demirbilek ve Turoğlu, 2024; Öz, 2025) bu yöntem tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre heyelan duyarlılığının fazla olduğu bölgeler yorumlanmış ve olası heyelan gelişimlerinin yerel beşerî unsur ya da turistik sitlere etkisi değerlendirilmiştir. Literatür araştırmalarına göre kütle dahilinde bulunan ve Nuh'un Gemisi olarak adlandırılan Telçeker

Heyelanı'nın jeomorfolojik özelliklerine değinen araştırmalar mevcuttur (Güner, 1986, Avcı, 2001; Bayraktutan, 2019). Ayrıca Toprak ve Sunkar (2022), Ağrı ilinin doğal afetlerine yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında Doğubayazıt doğusunun (Akyayla Dağı) yoğun heyelanlı bölgelerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bunların dışında kütlelerin heyelan morfolojisine bütüncül açıdan yaklaşan herhangi bir çalışmanın gerçekleştirilmediği görülmektedir.

Akyayla Dağı, ülkemizin en doğusunda İran ile kuzey sınırımızı oluşturan dağlardan biridir. Dolayısıyla dağın büyük kısmı ülkemiz

toprakları dahilindeyken geriye kalan kısmı İran sınırlarına girmektedir (Şekil 1). Ülkemiz dahilindeki sınırları Ağrı ilinin Doğubayazıt ilçesinde bulunan dağın uzun eksenini kabaca KB-GD doğrultusunda uzanmaktadır ve en yüksek noktası 2543 m'dir. Dağın kuzeyli yamaçları tektonik deformasyonlarla ilişkili olarak yüksek eğimliyken güney yamaçlarda eğimin nispeten düşük olduğu görülür. Dağın kuzeyi Doğubayazıt-Gürbulak Havzası'nın (Şaroğlu, 1986) doğu segmentine karşılık gelirken bu havzanın kuzeyi ise Ağrı Dağı Volkanik kompleksi tarafından sınırlandırılmaktadır.



Şekil 1. Akyayla Dağı'nın bölgesel topoğrafik yapı içinde konumu.

Figure 1. Location of Mount Akyayla within the regional topographic setting.

VERİ VE YÖNTEM

Veri Temini ve Haritalama

Çalışmada Akyayla Dağı kütlesini kapsayan 1:25.000 ölçekli sayısal topoğrafya haritaları (i52d4, i52d3, j52a1, j52a2, j52b1, j52b2) kullanılarak 10 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli verisi (SYM) oluşturulmuş ve haritalama çalışmalarının bazıları bu veriye göre gerçekleştirilmiştir. Heyelan duyarlılık analizinde ise <https://earthexplorer.usgs.gov/> adresinden temin edilen 30x30 çözünürlüklü SYM kullanılmıştır. Kütlenin sınırı orografik yapıya göre çizilmiş ve kütlenin İran sınırlarında kalan kesiminde heyelan verisi olmadığı için dağın ülkemiz dahilindeki kesimi analizlere ve haritalandırmalara tabi tutulmuştur. Bölgenin jeolojik özellikleri için fay verisi Emre vd., (2013)'ten, litoloji verisi ise MTA 1:500.000 Ölçekli Van Paftası'ndan temin edilmiştir. Bunun yanında bölgesel sismisitenin anlaşılması adına tarihsel dönem deprem verisi <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/> adresinden indirilerek haritalandırılmıştır. Heyelan verileri ise <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/> adresinden ve arazi çalışması bulgularından derlenmiştir. Heyelan alanları poligonal alanlar olarak belirlendikten sonra haritalandırılmıştır. Ayrıca heyelanlara dair bazı morfometrik parametreler CBS ortamında hesaplanmış ve sonuçlar gül diyagramı ve korelasyon analizleri şeklinde çıktılarına dönüştürülmüştür. Arazi kullanım tipleri açık kaynaklı CORINE verisinden (<https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018?tab=download>) sağlanmıştır (Çizelge 1). Çalışmadaki iklimsel haritalamalar ise MGM Doğubayazıt Meteoroloji İstasyonu verisine göre üretilmiştir. Sıcaklık haritası için yükseldikçe her 200 m'de sıcaklığın 1 °C düşmesi formülü dikkate alınmıştır. Yağış haritası için yükseldikçe her 200 m'de yağışın 54 mm arttığı kuralına

dayanan Schreber formülüne (Dönmez, 1979) başvurulmuştur.

Çalışmada ayrıca heyelan ünitelerinin yüksek eğim koşullarından dolayı oldukça uzamış/ eliptik formda olduklarını doğrulayabilme adına dairesellik ve uzama oranı gibi morfometrik analizler (Denizman, 2003; Goudie, 2003; Basso vd., 2013; Öztürk, 2018) de gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle Akyayla Dağı'ndaki heyelanların gelişim ve evriminde yüksek eğim değerlerinin baskın rolü doğrulanmaya çalışılmıştır. Bu indisler çoğunlukla karstik kapalı depresyonların anlaşılması için kullanılsalar da (Çetinkaya vd., 2023; Seven vd., 2025) volkanizma ve buzullaşma denetimli farklı morfolojik sistemler için de değerlendirilmişlerdir (MacLachlan ve Eyles, 2013; Dóniz-Páez, 2015; Öztürk, 2018; Canpolat ve Turoğlu, 2019). Dairesellik analizine göre sonucun 1'e yaklaşması dairesel jeomorfik paternleri gösterirken, 1'den uzaklaşan değerler dairesel formdan uzak morfolojik yapıları temsil eden nicel bir veridir (Öztürk, 2018). Uzama oranına göre yapılan hesaplamada ise (uzun eksen/kısa eksen) genel olarak sonucun 1,21'den düşük olması dairesel; 1,21 ile 1,65 arası yarı dairesel; 1,65 ile 1,8 arası yarı eliptik; 1,8'den büyük değer ise eliptik (uzamış) geometrik formu karakterize eder (Basso vd., 2013). Çalışmadaki tüm haritalama işlemleri Arcmap 10.5 ve Arcmap 10.8 programında gerçekleştirilmiştir.

Frekans Oranı (FO) Yöntemi

Duyarlılık çalışmaları ve bu çalışmalarda netice olarak ortaya çıkan mekânsal duyarlılık haritaları, çeşitli afetlerin dağılımını anlamak ve mekânsal duyarlılığın derecesini elde etmek için gerçekleştirilen CBS tabanlı çalışmaların başında gelmektedir (Kaya vd., 2025).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan veri türleri ve kaynakları.

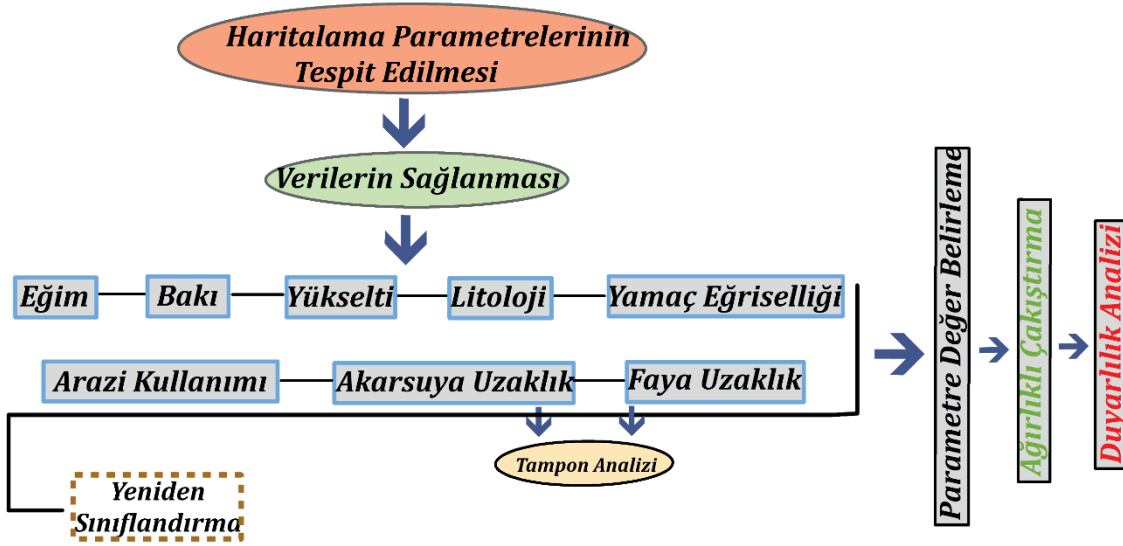
Table 1. Types and sources of data used in the study.

Veri Türü	Kaynak
Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)	1/25.000 ölçekli topoğrafya haritaları (i52d4, i52d3, j52a1, j52a2, j52b1, j52b2) https://earthexplorer.usgs.gov/
Jeoloji (litoloji ve fay)	Emre vd., (2013); MTA 1:500.000 Ölçekli Van Paftası
Drenaj Ağı, Bakı, Eğim, Yükseklik, Yamaç Eğriselliği	Sayısal yükseklik modeli (SYM) üzerinden, CBS ortamında farklı modüller
Arazi Kullanımı	https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018?tab=download
Heyelan Envanteri	https://yerbilimleri.mta.gov.tr/ ve arazi çalışmaları
Deprem Verileri	http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/
Klimatik Veriler	MGM, Doğubeyazıt Meteoroloji İstasyonu

Duyarlılık, afet olaylarına etki eden çevre koşulları, topoğrafya ve jeoloji gibi kriterlerin dikkate alınmasıyla, gelecekte söz konusu afetin tehdit edeceği sahaların rölatif tasnifi olarak tanımlanmıştır (Varnes, 1984; Aleotti ve Chowdhury, 1999; Van Westen vd., 2008). Bu tanım, gelişen veya gelişme ihtimali yüksek afetin alansal yayılım, büyüklük, yer ve mekânsal dağılım deseninin ortaya konmasını da kapsamaktadır (Kaya vd., 2025).

Genel olarak duyarlılık analizlerinde değerlendirilen yöntemler, niteliksel ve sayısal metotlar diye iki kategoriye ayrılmaktadır (Guzzetti vd., 1999). Niteliksel yöntemler, araştırmacıların arazi tecrübesine, bilgisel birikimine dayalıyken, sayısal yöntemler genel olarak CBS tabanlı verilerin işlenmesine bağlı süreçleri kapsamaktadır (Kaya vd., 2025). Özellikle doğal afetlere neden olan faktörlerin karmaşık etkilerini anlamak için tasarlanan bu metotlardan biri de Frekans Oranı (FO) Yöntemi'dir (Choi vd., 2012) ve yöntemin ulusal/uluslararası literatürde oldukça yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir (Li vd., 2017; Dağdelenler, 2020; Ullah ve Zhang, 2020; Kılıçoğlu, 2020; Karaman vd., 2022). Bu

metotta, değerlendirilecek afeti şekillendiren parametrelerin hepsi alt sınıflara ayrılmaktadır ve parametrelerin sınıflarında frekans oranı değerleri belirlenir. Sonuçta elde edilen parametrik harita çıktıları çakıştırılarak duyarlılık haritaları üretilir (Dağ ve Bulut, 2012). Elde edilen FO değerleri ve ilgili çıktılar, bölgesel heyelan duyarlılığının anlaşılmasını sağlarken, heyelan duyarlılığının mekânsal derecelendirilmesiyle afetin boyut ve kapsamının tahmini kolaylaşmaktadır. Duyarlılık analizlerinde heyelana neden olan süreçlerin doğru seçilmesi gerekmektedir, aksi takdirde analiz sonuçlarına göre yanlış duyarlılık çıktıların oluşacağı bilinmektedir (Samia vd., 2017; Cihangir, 2024). Bu nedenle Akyayla Dağı'nın heyelan duyarlılığı için de kütlede heyelana neden olan 8 temel parametre belirlenmiş ve analizlerde girdi parametresi olarak değerlendirilmiştir. Bu sekiz parametre dışında bazı sınırlı sayıda heyelan nedenleri bulunsada bu etmenler genel eğilimleri temsil etmedikleri için analiz kapsamına alınmamıştır. Kütlede heyelan duyarlılığı belirlenirken eğim, bakı, yükseklik, litoloji, yamaç eğriselliği, arazi kullanımı, akarsuya uzaklık ve faya uzaklık gibi kriterler dikkate alınmıştır (Şekil 2, Tablo 1).



Şekil 2. FO yöntemi için genelleştirilmiş iş akış şeması (Kaya vd., 2025'ten yeniden düzenlenerek).

Figure 2. Generalized workflow diagram for the frequency ratio method (modified from Kaya et al., 2025).

Doğruluk Analizi

Heyelan duyarlılık analizinin doğruluğu ROC (Alıcı İşletim karakteristiği) yöntemi ile değerlendirilmiştir. ROC sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. ROC analiziyle yanlış pozitif ve doğru pozitif oranları hesaplanarak ROC eğrisi oluşturulur. Yatay eksen yanlış pozitif oranı (1-özellik) ve dikey eksen doğru pozitif oranını (duyarlılık) temsil edecek şekilde her eşik için bir nokta işaretlenir ve bu noktalar birleştirilerek ROC eğrisi elde edilir (Mas vd., 2013). ROC eğrisi altında kalan alanın (AUC: Area Under the Curve) değeri 0,5 ila 1 arasında değişir. AUC değerinin 1 olması mükemmel uyumu, 0,5 olması ise rastgele uyumu gösterir. AUC değeri ne kadar büyükse uyum o kadar iyidir (Deng vd., 2017). AUC değer ölçeğine göre (Mandrekar, 2010) 0,70'in üzerindeki AUC değeri, iyi bir uyum gösterdiği ve yeterli olduğu anlamındadır. ROC eğrisi altında kalan alan, heyelan olması muhtemel olan alanlarla, heyelan olmaması

beklenen alanları ayırt edebilme başarısının en iyi göstergelerinden kabul edilmektedir (Chung ve Fabbri, 2003; Günini ve Öztürk, 2021). Buna göre mevcut heyelan envanteri alanlarına rastgele noktalar atılmış ve duyarlılık analizi için test verisi oluşturulmuştur. Oluşturulan ROC eğrisi üzerinde kalan ve değerin 1'e yaklaşması oranında modelin doğruluk oranı yükselir (Shirzadi, 2017). Bu çalışmada ROC yöntemi için verilerin %80'i eğitim, %20'si ise test verisi olarak ayrılmıştır.

DOĞAL ORTAM ÖZELLİKLERİ

Akyayla Dağı, DAYP doğusunda konumlanan ve bölgesel yaygın neovulkanik hareketlerden (Savcı, 1980; Şengör vd., 2003; Keskin, 2007) etkilenmeyen sedimanter kökenli bir yükselim karakterindedir (Şekil 3). Dağın uzun eksenı yaklaşık 40 km'dir ve KB-GD doğrultulu uzanım sunmaktadır. Akyayla Dağı tektonik deformasyon zonları

açısından farklı sistemlerin kesiştiği bir noktaya karşılık gelmektedir. Nitekim dağın kuzey ve kuzeydoğusu Doğubayazıt Fay Zonu (Şaroğlu, 1986; Emre vd., 2013; Çakar, 2023) tarafından denetlenmektedir. Dağın merkezi kesiminde ve kuzey kanatlarında bu zona ait fay kolları geçmektedir (Şekil 3). Dağın batısı ise Balıkgöl Fay Zonu tarafından sınırlandırılır ve denetlenir (Özgül vd., 1983; Şaroğlu, 1986; Emre vd., 2013; Mutlu, 2022; Nar, 2023). Her iki tektonik sistem, at kuyruğu fayı şeklinde gelişen tektonik bir zonun segmentleridir ve güneydoğu yönünde uzanarak İran topraklarında farklı adlarla tanımlanmış faylarla birleşmektedir (Karakhanian vd., 2002; Karakhanian vd., 2004).

Akyayla Dağı'nın kuzeyi neotektonik dönemle birlikte gelişen kabaca D-B eksenli senklinal sahalarından biri olan Doğubayazıt-Gürbulak Havzası'yla sınırlandırılır (Şaroğlu, 1986; Şaroğlu ve Yılmaz, 1986; Gürbüz ve Şaroğlu, 2019). Bu havza, Aras Dağları ve Ağrı Dağı volkanizması tarafından ikiye ayrılan paleo-Ağrı Havzası'nın (Gürbüz ve Şaroğlu, 2019) güney segmentini temsil eder ve günümüzde büyük bir tektono-sedimanter yapıya karşılık gelir. Havza, sonraki jeolojik süreçte Doğubayazıt sağ yanal fayının deformasyonundan dolayı çek-ayır havzaya evrilmiştir (Şaroğlu ve Yılmaz, 1986). Bu bağlamda Akyayla Dağı, paleo-Ağrı Havzası olarak belirtilen eski bir senklinalin deforme olmuş, kuzeye eğimli güney kanatları konumundadır.

Akyayla Dağı sedimanter kökenli olduğu için kütle dahilinde volkanik veya metamorfik birimlere rastlanmaz. Bunun yanında kütlede Üst Kretase ile Kuvaterner arasında değişen zaman aralığında farklı litolojik birimler yaygındır ve bunların başında Üst Kretase ofiyolitik melanji gelir (Şekil 3). Birim, Doğu Anadolu Yığılma Karmaşığı (Şengör vd., 2003) ürünüdür ve

topoğrafyada açık pembe, koyu kırmızı renk tonlarıyla belirgindir (Şekil 4, Fotoğraf 1 ve 2). Alt Miyosen karasal kırıntılıları ve neritik kireçtaşları ise kütledeki diğer yaygın litolojik birimleri temsil eder (Şekil 3).

2543 m yüksekliye sahip Akyayla Dağı'nın kuzeyi ile güneyi arasında asimetrik yamaç profili gelişmiştir (Şekil 4). Bunda dağın kuzey kanatlarının Doğubayazıt-Gürbulak Havzası'nın morfojenetik gelişimini de denetleyen tektonik hareketlerle deforme olması en temel neden olarak değerlendirilmektedir.

Kütle dahilinde herhangi bir meteoroloji istasyonu bulunmadığından dağın iklimik analizi literatüre ve Doğubayazıt Meteoroloji İstasyonu verilerine göre sağlanmıştır. Buna göre kütlede zirveye doğru sıcaklık değerlerinin 4 °C'ye kadar düştüğü (Şekil 5a), yağış miktarının ise 580 mm'ye dek çıktığı (Şekil 5b) görülmektedir. Bu nedenle Akyayla Dağı kütlede Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Dfb (ılık yaz, nemli karasal iklim) iklim karakteri görülmektedir (Taşoğlu vd., 2024).

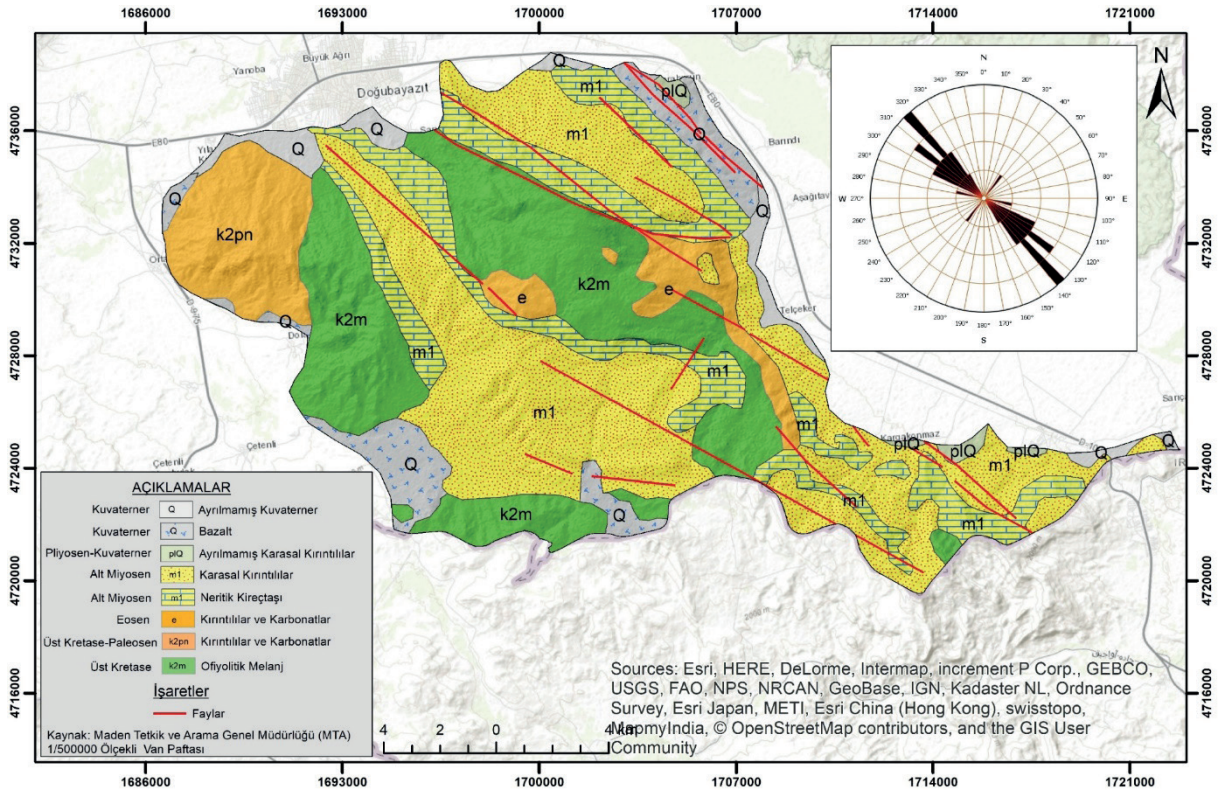
BULGULAR

Akyayla Dağı'nın Heyelan Envanteri ve Heyelan Morfolojisini Denetleyen Süreçler

Akyayla Dağı'nın heyelan gelişimi açısından elverişli petrografik karakter sunan karasal kırıntılılar ve ofiyolitik melanji gibi litolojilerce zengin olması (Şekil 3), dağın sismik anlamda aktif bir zonda bulunmasına bağlı olarak bölgesel deprenselliğin yoğun olması, yüksek yamaç eğimleri, yaygın flüvyal drenaj ağı ve antropojenik süreçler gibi parametrelerden dolayı çok sayıda irili/ufaklı heyelan olayı gelişmiştir (Şekil 6-7). Heyelanların özellikle K, KD ve D yamaçlarda gelişmesi ve büyük oranda K, KD yönüne ilerlemeleri, heyelan gelişmesi ve

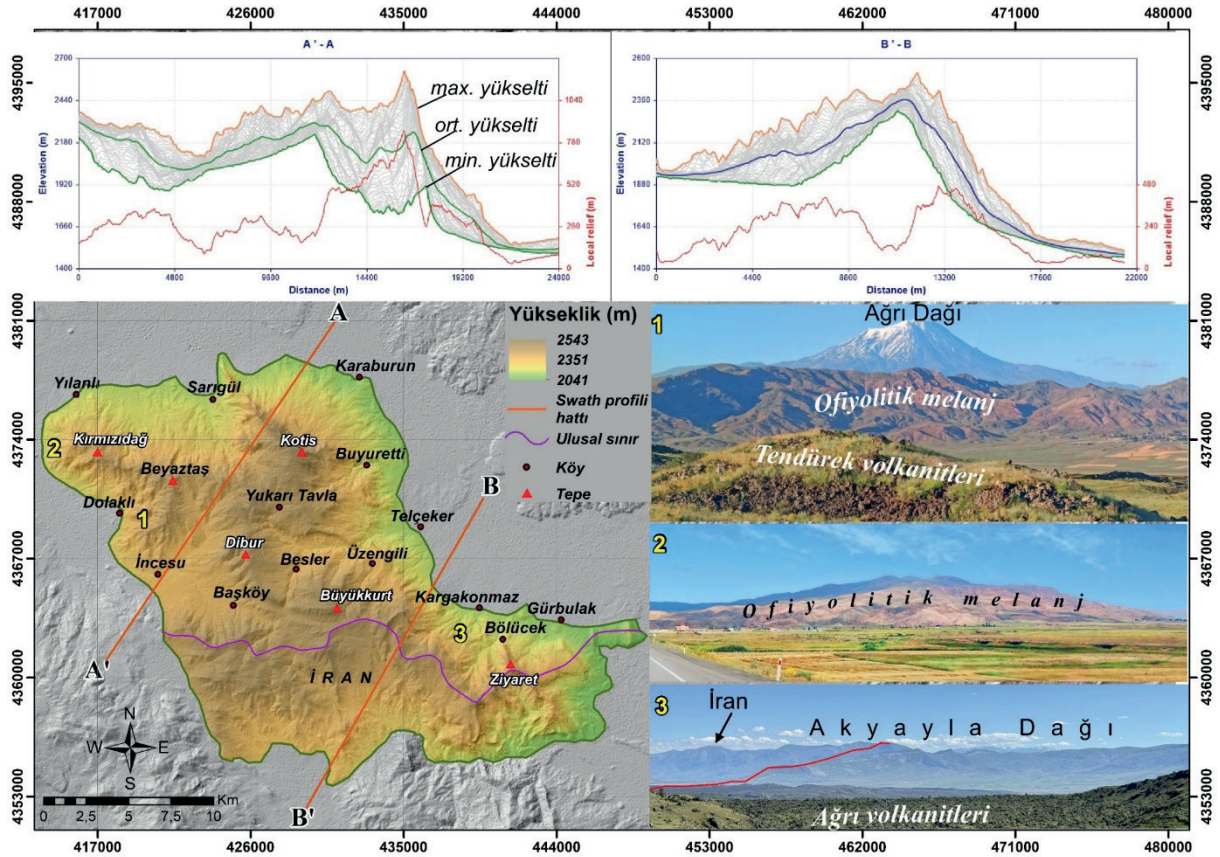
yönlendirilmesinde dağın eğim yönünün oldukça baskın olduğunu kanıtlamaktadır. Kütlede <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/> adresinden ve arazi çalışmalarından derlenen verilere göre 141 heyelan gelişmiştir (Şekil 6). Bunlardan 81'i aktif, 20'si ise paleo karakterli heyelanken 40 tanesinin akma tipinde gelişim sağladığı görülür. Yaklaşık 325 km²'lik kütle dahilinde

aktif heyelanlar 26,98 km², paleoheyelanlar 10,21 km², akma tip hareket alanları ise 6,96 km²'lik alana sahiptir. Bu veriler, kütlede yaklaşık 44,15 km²'sinin heyelanlı olduğunu, dolayısıyla dağın topoğrafik peyzajının yaklaşık %14'ünün heyelanlar tarafından şekillendiğini yansıtmaktadır.



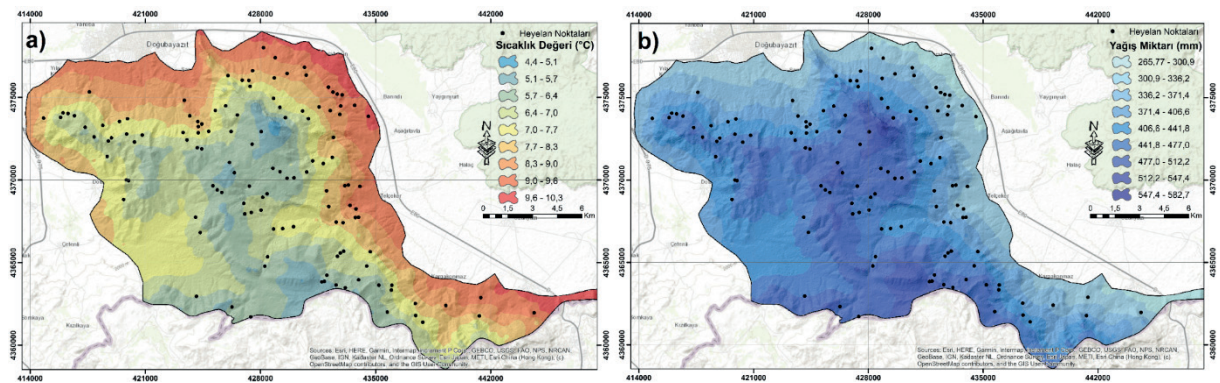
Şekil 3. Akyayla Dağı'nın jeoloji haritası (Fay verileri Emre vd., (2013)'ten; litoloji verileri ise MTA 1:500.000 Ölçekli Van Paftası'ndan alınmıştır. Gül diyagramı fayların uzun eksenlerini göstermektedir.)

Figure 3. Geological map of Mount Akyayla (Fault data are from Emre et al. (2013); lithological data are from MTA 1:500.000 Scale Van Map. The rose diagram shows the long axes of the faults).



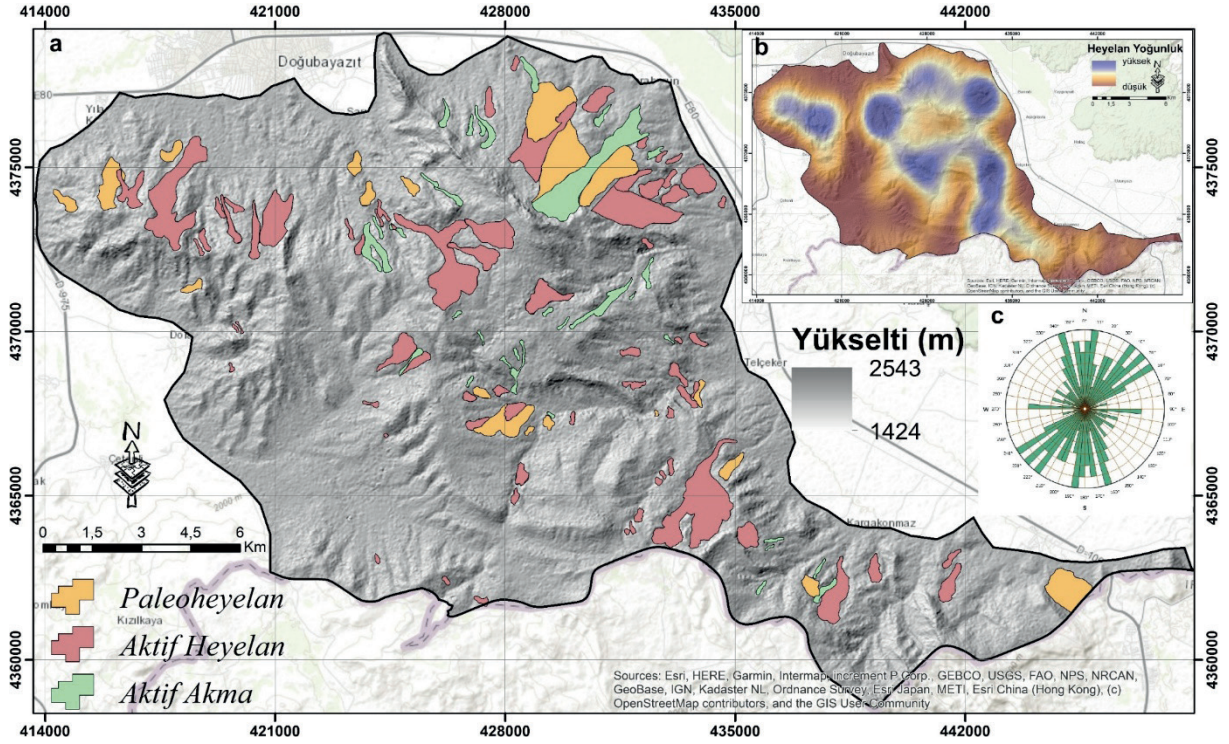
Şekil 4. Akyayla Dağı'nın topoğrafik yükseklik haritası ve örnek Swath profilleri.

Figure 4. Topographic elevation map of Mount Akyayla and sample Swath profiles.



Şekil 5. Akyayla Dağı kütlesinin; a) yıllık ortalama sıcaklık dağılımı haritası, b) yıllık toplam yağış miktarı dağılımı haritası (Kaynak: MGM).

Figure 5. a: Annual average temperature distribution map, b: Annual total precipitation distribution map for Mount Akyayla (Source: MGM).



Şekil 6. Akyayla Dağı'nda; a: heyelan türlerinin kütleye göre dağılımı, b: kütlede heyelanların yoğunluk haritası, c: kütledeki heyelanların hareket ettikleri yönler göre gül diyagramı.

Figure 6. a: Distribution of landslide types according to mass, b: density map of landslides, c: rose diagram of landslides according to the directions in which they move.

Topoğrafik özellikler

Topoğrafik özellikler, yüksekliğin artmasına ve eğim koşullarının değişmesine bağlı olarak dağların iklimatik özelliklerini modifiye eden bir parametredir. Eğim, yükseklik, bakı ve yamaç eğriselliği gibi farklı süreçleri kapsayan topoğrafyanın değişen koşulları heyelan morfolojisi üzerinde de kendini göstermektedir. Akyayla Dağı'nın en alçak kesimi, dağın kuzey yamaçta Doğubayazıt-Gürbulak Havzası ile birleştiği noktada yer alır. Buradan itibaren aniden artan yükseklik zirvede 2543 m'ye kadar çıkmaktadır. Kısa mesafede artan röliye, eğimli yamaç morfolojisiyle de birleşince gravite etkisinin şiddetlenmesine dolayısıyla heyelanların ince-uzun patern sunmalarına

neden olmaktadır (Şekil 6 ve 8). Nitekim dağın kuzey sektörlü yamaçlarında tektonik dislokasyonlardan dolayı eğim değerleri nispeten yüksektir. Topoğrafyanın bu karakteri bakı koşullarını da etkileyerek kuzeyli yamaçların daha nemli kalmasını sağlamıştır. Bu alanda göreceli düşük güneş radyasyonundan dolayı uzun dönemli nemlilik, regolit ve anakaya bloklarının hareketini kolaylaştırıcı bir parametreye dönüşmüştür. Bunların yanı sıra yamaç eğriselliği de heyelanların gelişim ve evrimini denetleyen bir diğer topoğrafik özelliktir (Çellek, 2024). Akyayla Dağı'nda özellikle iç büyük yamaçların heyelan aktivitesi açısından zengin olduğu görülmektedir. Bunda özellikle iç büyük yamaçlarda üst kotlarda kalın regolitin varlığı ve yüksek gravite etkilidir.



Şekil 7. a: Akyayla Dağı'nda "Nuh'un Gemisi" olarak bilinen heyelan ünitesinin drone görüntüsü, b: Akyayla Dağı'nda karışık tip akma yapısı sunan heyelanlı bölgede dalgalı topoğrafya ve arka planda dik şev oluşturan kireçtaşı, c ve d: kütlede aktif akmadan dolayı ağaç gövde ve köklerinde gelişen deformasyon (kanca yapısı) ve regolitte gerilme çatlağı örnekleri, e: dağda heyelan gelişimini tetikleyen Doğubayazıt Fay Zonu'na ait bir fay kolunun geliştirdiği fay aynası. Fay aynası, fayın yan al atımının yanında eğim atım bileşeni sergilemesiyle gelişmiştir, f: Akyayla Dağı'nda heyelanların sıklıkla geliştiği fliş litolojisinden görünüm.

Figure 7. a: Drone image of the landslide unit known as 'Noah's Ark' on Mount Akyayla, b: Undulating topography and limestone forming steep slopes in the background in the landslide area of Mount Akyayla, c and d: Deformation of tree trunks and roots (hook structure) and examples of stress cracking in soil due to active flow, e: Fault mirror developed by a fault branch of the Doğubayazıt Fault Zone that triggered landslide development in the mountain. The fault mirror was developed on a fault exhibiting an oblique thrust component in addition to lateral thrust. f: View of the flysch lithology where landslides frequently develop on Mount Akyayla.

Litoloji ve tektonizma

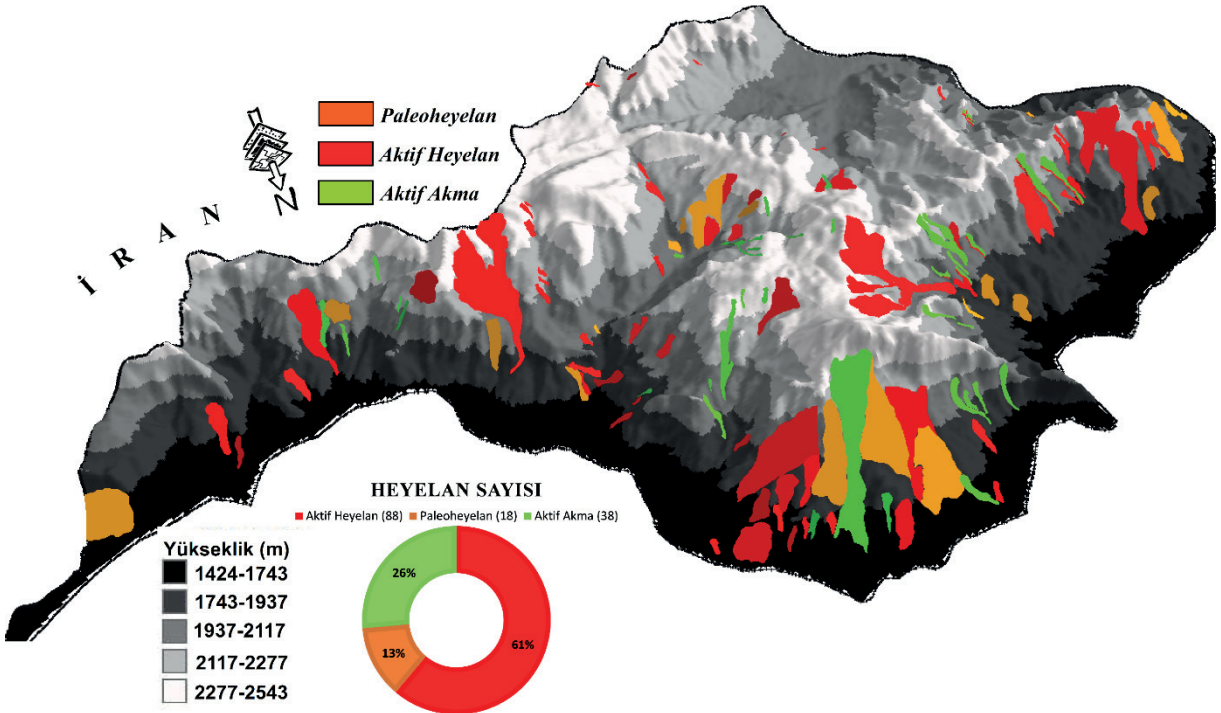
Kompleks bir mekanizmayla gelişen heyelanlar, bazı litolojik birimlerde daha karakteristik morfolojiler üretirler. Örneğin kumtaşı, kiltası ve marn gibi kayaç türleri heyelanlar açısından oldukça elverişli petrografik özelliklere sahiptirler. Nitekim bu tür kayaçlarda kil gibi geçirimsiz elemanlar oldukça kalın seviyeler oluşturabilir. Bu tür kayaçlarda sürtünme katsayısı düşüken

dayanıklılığın az olduğu görülür (Dölek vd., 2023). Akyayla Dağı'nda bulunan kayaç türlerinin çoğu (Şekil 3), heyelan oluşum ve gelişimi açısından elverişli petrografiye sahiptir. Örneğin çeşitli jeolojik yaştaki ofiyolitik birimler ve karasal kırıntılar dahilinde bulunan geçirimsiz özellikteki kil türleri, zemin sızdırmazlığını artırmaktadır. Burada özellikle fliş seviyelerinin varlığı (Şekil 7f) Anadolu'nun çoğu yerinde olduğu gibi (Taşdemiroğlu, 1970) heyelan

gelişimini tetikleyen baskın faktörlerdendir. Bölgedeki volkanik kökenli Ağrı, Tendürek ve Aras dağlarının Akyayla Dağı'ndan daha nemli iklimlere sahip olmasına ve bu dağlık bölgelerin daha geniş jeomorfik üniteler oluşturmalarına rağmen heyelan oluşumlarının bu dağlarda neredeyse hiç gelişmemesi litolojinin oldukça önemli olduğunu doğrular niteliktedir.

Akyayla Dağı'nda uygun petrografik karakterin yanı sıra bölgesel sismisitenin de yoğun olması heyelan gelişimini tetikleyen bir parametredir. Bölge, tektonik açıdan Balıkgöl ve Doğubayazıt fay zonlarının kontrolü altındadır. Bu faylar, yukarıda da ifade edildiği üzere sağ yanal atım özelliği gösteren ancak yer yer eğim atım bileşenine de sahiptir (Emre vd., 2013; Mutlu, 2022; Nar, 2023; Çakar, 2023). Bunun

yanında tarihsel ve aletsel dönem deprem kataloglarına göre bölgesel sismisite oldukça yoğundur. Nitekim Mutlu (2022) tarafından hazırlanan doktora tezinde bölgedeki depremlere yönelik kapsamlı bir veri tabanı sunulmuştur. Sismik hareketlilik heyelan gelişim dinamiğinin tetiklenmesine de neden olduğu için (Görüm vd., 2011; Avcı ve Sunkar, 2018; Köküm, 2021) bölgenin aletsel dönem depremleri haritalanarak deprem yoğunluğu haritası üretilmiştir (Şekil 9). Elde edilen bulgular özellikle dağın güneyinde konumlanan Balıkgöl Fay Zonu'nun sismik açıdan oldukça aktif olduğunu göstermektedir. Ayrıca benzer şekilde dağın kuzeydoğusu ve doğusunda da Doğubayazıt Fay Zonu'ndan dolayı yüksek sismik aktivitenin varlığı dikkati çeker.



Şekil 8. Akyayla Dağı'nda heyelanların 3D topoğrafya üzerinden görünüşleri.

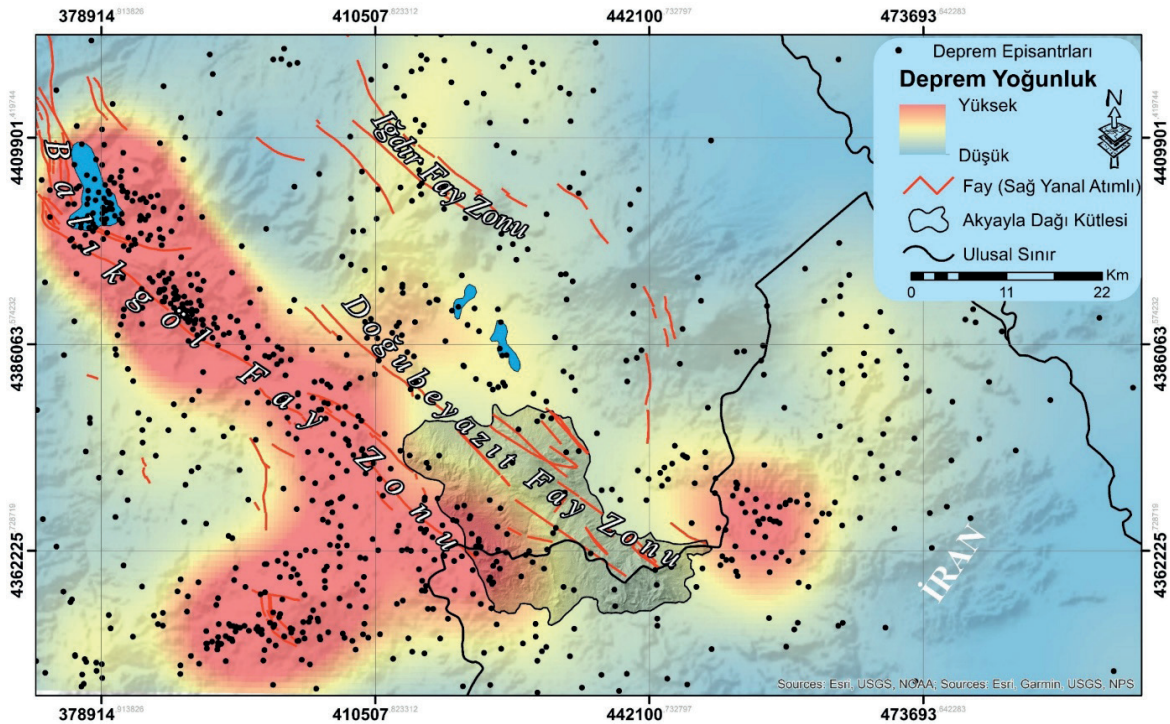
Figure 8. 3D topographic views of landslides on Mount Akyayla.

Bu parametre, dağın özellikle kuzey yamaçlarında duraysız karakterdeki kütlelerin titreşimlerle hareketlenerek heyelan gelişimine neden olabileceği şeklinde değerlendirilmektedir. Nitekim Ambraseys ve Melville (1982) tarafından oldukça katastrofik 1840 depreminin bölgede binlerce heyelan olayına neden olduğu aktarılmıştır. Benzer söylem, Akyayla Dağı'ndaki en önemli heyelan ünitelerden biri olan Telçeker Heyelanı için de ifade edilmiş ve heyelanın 1949 depremini takiben geliştiği aktarılmıştır (Bayraktutan, 2019). Şaroğlu ve Güner (1981) ve Öztürk (2020) Balıkgöl Fay Zonu'nun etki sahasında farklı heyelan gelişimlerinin olduğunu bildirmişlerdir. Tüm bunlar Akyayla Dağı'nda sismik aktivitenin heyelan gelişimi

açısından oldukça belirleyici bir olgu olduğunu doğrulamaktadır.

Drenaj sistemi

Flüvyal erozyonun özellikle yamaç stabilitesini bozmasından dolayı yamacın duraysızlaşan üst kesimlerindeki regolit, vadi tabanlarına doğru akabilmektedir. Heyelan gelişimi ile vadi morfolojisi arasındaki bu ilişki, flüvyal erozyonun kütle hareketlerinin morfojenizindeki etkisini yansıtır (Atalay, 1974-1977; Perinçek, 2016). Bu nedenle, vadi morfolojisinde akarsuların erozyon şiddetinin fazla olduğu kesimleri heyelan duyarlılığı açısından kritik bölgelerdir (Ercanoğlu, 2003; Ercanoğlu ve Avcı, 2024).



Şekil 9. Akyayla Dağı çevresindeki aktif faylar ve bölgesel sismisitenin yoğunluk haritası. (Faylar Emre vd., (2013)'ten, deprem verileri ise <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/> adresinden temin edilmiştir).

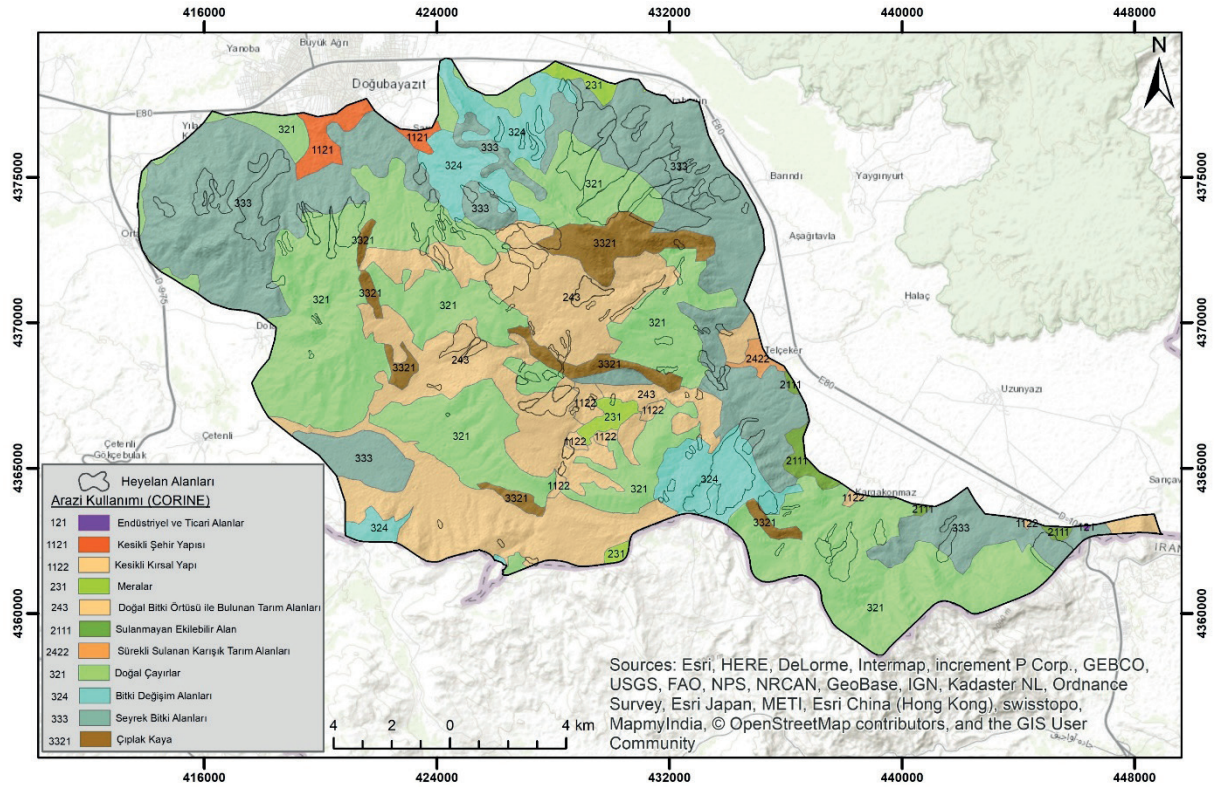
Figure 9. Active faults and regional seismicity intensity map around Mount Akyayla (Faults were obtained from Emre et al. (2013) and earthquake data were obtained from <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>).

Arazi kullanımı

meralarda aşırı otlatma sonucu toprak bağlayıcılığının azalması gibi rölyefin doğal peyzajına yönelik antropojenik müdahaleler heyelan gelişimi ve ilerlemesi açısından oldukça belirleyici bir faktördür (Lutgens vd., 2013). Akyayla Dağı kütlelerinde onlarca kırsal yerleşme bulunurken bu yerleşmelerin hemen hepsinde başta tarım ve hayvancılık olmak üzere toprağa dayalı ekonomik faaliyetler yaygındır (Kaya, 1996). Şekil 11’den de anlaşılacağı üzere kütlede tespit edilebilen heyelanların 75 tanesinin (heyelanların % 52’si) tarımsal amaçlı kullanılan arazi örtüsü birimlerinde geliştiği görülmektedir. Bununla birlikte kütlede ormanlık alanların bulunmaması da bölgede heyelan oluşumuna neden olan bir diğer faktördür (Şekil 11).



Figure 10. Distribution map of the drainage network according to landslide areas on Mount Akyayla.



Şekil 11. Akyayla Dağı'nın CORINE verisine göre arazi kullanım tiplerinin dağılımı.

Figure 11. Distribution of land use types on Mount Akyayla according to CORINE data.

FO Yöntemiyle Akyayla Dağı'nda Heyelan Duyarlılık Analizinde Kullanılan Parametreler

Çalışmada, kütlede heyelan gelişimine neden olan faktörler belirlendikten sonra nedenlerin sayısallaştırılmasıyla parametrik veriler üretilmiştir (Çizelge 2). Dağ genelinde heyelanların morfojenetik evrimini denetleyen başlıca parametreler; yükseklik, eğim, bakı, eğrisellik, faylara uzaklık, akarsuya uzaklık,

litoloji ve arazi kullanımıdır. Bunlara ait değerler belirlenerek haritalandırılmıştır (Şekil 20). Değerlendirmeye alınan bu 8 heyelan hazırlayıcı parametreye ait veriler FO yöntemiyle analize tabi tutulmuştur. Bu şekilde ilişkilendirme sağlanırken dağda geliştiği çeşitli veri kayıtlarıyla tespit edilen 141 heyelanın kapladığı alanlar baz alınmış ve duyarlılık söz konusu referanslara dair sayısallaştırılmış parametrelere göre hesaplanmıştır.

Sayın, Öztürk

Çizelge 2. Çalışmada FO yöntemi için ele alınan parametreler ile değerleri (HP: Heyelanlı piksel adedi, AP: Alandaki piksel adedi, FO: Frekans Oranı, NFO: Normalize Frekans Oranı).

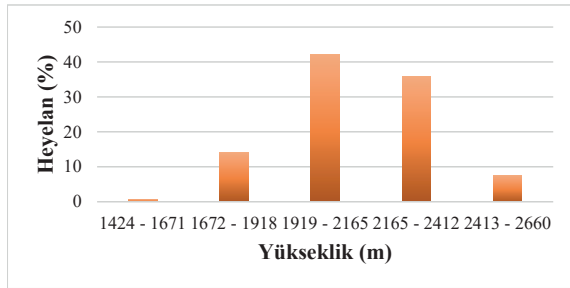
Table 2. Parameters considered for the FR method and their values (HP: Number of landslides, AP: Number of pixels in the area, FO: Frequency Ratio, NFO: Normalized frequency ratio).

Yükseklik	Sınıflar	AP	%	HP	%	FO	NFO
1	1424 - 1671	34628	10	181	1	0.058436233	0.03
2	1672 - 1918	83074	23	4462	14	0.600475773	0.29
3	1919 - 2165	108664	31	13438	42	1.382547289	0.66
4	2165 - 2412	116999	32	11402	36	1.089506769	0.52
5	2413 - 2660	12698	4	2366	7	2.083101652	1.00
Toplam		356063	100	31849	100		
Eğim							
1	0 - 8	94278	26	6179	19	0.732721407	0.44
2	9 - 14	117588	33	10500	33	0.998291426	0.60
3	15 - 21	87111	25	8340	26	1.07034577	0.64
4	22 - 31	44778	13	4996	16	1.247351299	0.75
5	32 - 70	12308	3	1834	6	1.665876837	1.00
Toplam		356063	100	31849	100		
Bakı							
1	Düz	66	0	3	0	0.50816923	0.37
2	K	65667	18	5836	18	0.993571563	0.72
3	KD	73373	21	9019	29	1.374210164	1.00
4	D	46702	13	4613	14	1.104279528	0.80
5	GD	29326	8	2421	8	0.922939015	0.67
6	G	26712	8	2000	6	0.837056235	0.61
7	GB	31241	9	2649	8	0.947955776	0.69
8	B	36688	10	2725	9	0.830373565	0.60
9	KB	46288	13	2583	8	0.623859849	0.45
Toplam		356063	100	31849	100		
Eğrisellik							
1	-10.2 - - 1.31	27074	8	2745	9	1.133498553	1.00
2	-1.32 - 0.60	191593	53	16621	52	0.969858905	0.86
3	0.61 - 15.4	137396	39	12483	39	1.015724498	0.90
Toplam		356063	100	31849	100		
Faylara Uzaklık							
1	200	40913	11	4723	15	1.290588127	0.98
2	400	38716	11	4548	14	1.313291159	1.00
3	800	69967	20	7837	26	1.252240194	0.95
4	1000	27350	8	2616	8	1.06932927	0.81
5	2000	82944	23	5822	18	0.784726414	0.60
6	4000	52057	15	3344	10	0.718154983	0.55
7	8000	44116	12	2959	9	0.749859474	0.57
Toplam		356063	100	31849	100		
Litoloji							
1	Ofiyolitik Melanj	88793	25	9529	30	1.199774544	0.83
2	Kırıntılılar ve Karbonatlar	43011	12	5567	17	1.447013981	1.00
3	Neritik Kireçtaşı	60826	17	6901	22	1.268392939	0.88
4	Karasal Kırıntılılar	126998	36	9667	30	0.850992794	0.59
5	Bazalt	22835	6	176	1	0.086167342	0.06
6	Ayrılmamış Kuvaterner	10961	3	0	0	0	0.00
7	Ayrılmamış Karasal Kırıntılılar	2639	1	9	0	0.038127134	0.03
Toplam		356063	100	31849	100		

Çizelge 2. Devamı.

Table 2. Continued.

Akarsulara Uzaklık							
1	200	133507	37	10885	34	0.911540935	0.55
2	400	105676	30	8394	26	0.888064233	0.54
3	800	102098	29	10805	34	1.183203149	0.72
4	1000	10741	3	1589	5	1.653982694	1.00
5	2000	3319	1	176	1	0.592866889	0.36
6	4000	739	0	0	0	0	0.00
Toplam		356080	100	31849	100		
Arazi Kullanımı							
1	Bitki Değişim Alanları	25530	7	2233	7	0.977842601	0.42
2	Seyrek Bitki Alanları	98657	28	6988	22	0.791873915	0.34
3	Meralar	3591	1	128	0	0.398497508	0.17
4	Doğal BÖ ile Bulunan Tarım	75201	21	6243	20	0.928112806	0.40
5	Çıplak Kaya	14665	4	3040	10	2.317515044	1.00
6	Kesikli Kırsal Yapı	3045	1	620	2	2.276331134	0.98
7	Endüstriyel ve Ticari Alanla	69	0	0	0	0	0.00
8	Doğal Çayırliklar	127738	36	12440	39	1.088757887	0.47
9	Sürekli Sulanan Karışık T	1059	0	0	0	0	0.00
10	Sulanmayan Ekilebilir Alan	2479	1	157	0	0.708034095	0.31
11	Kesikli Şehir Yapısı	4029	1	0	0	0	0.00
Toplam		356063	100	31849	100		

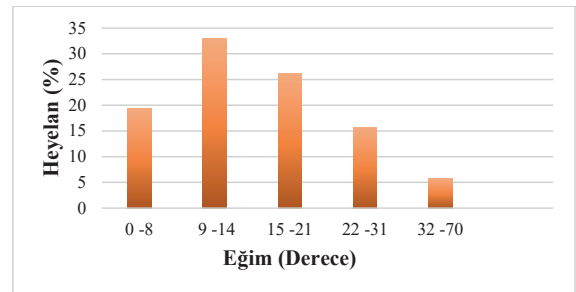


Şekil 12. Akyayla Dağı'nda yükseklik-heyelan ilişkisi grafiği.

Figure 12. Elevation-landslide relationship graph for Mount Akyayla.

Yükseklik: Akyayla Dağı'nda özellikle 1670 ile 2400 metre arasında heyelan olaylarının yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 12). Çalışma alanındaki heyelan-yükseklik ilişkisini belirlemek amacıyla alana ait sayısal yükseklik modeli (SYM) kullanılarak alanın yükseklik haritası üretilmiştir. Bu yükseklik aralığı ile heyelan

olaylarının gelişim frekansı arasında kuvvetli bir ilişki olmasa da söz konusu yükseklik aralığında nemlilik koşullarının heyelan oluşumlarını denetlediği düşünülmektedir.

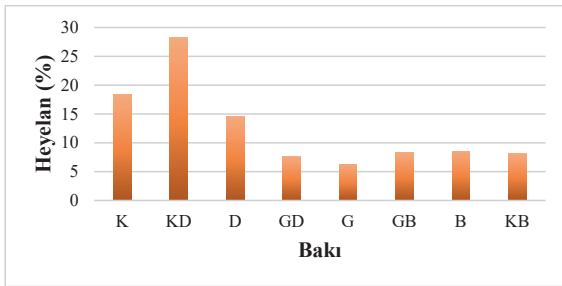


Şekil 13. Akyayla Dağı'nda eğim-heyelan ilişkisi grafiği.

Figure 13. Slope gradient-landslide relationship graph for Mount Akyayla.

Eğim: Kütlede özellikle 8–21 derece arasındaki eğim aralığında heyelan olaylarının

yoğunlaştığı görülmektedir. Bu eğim sınıfından düşük eğim gruplarında zayıf gravite etkisi, yüksek eğim aralıklarında ise heyelana sebebiyet veren nemliliğin yeterince derine inmeden ortamdaki yatay doğrultuda uzaklaşması gibi etmenler düşük heyelan yüzdesi nedenleri arasındadır (Şekil 13).



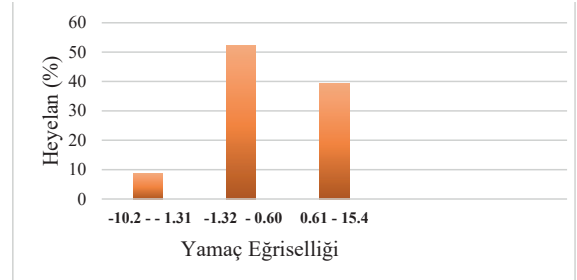
Şekil 14. Akyayla Dağı'nda bakı-heyelan ilişkisi grafiği.

Figure 14. Graph of the relationship between aspect and landslide for Mount Akyayla.

Bakı: Akyayla Dağı'nda tüm yönleri bakan heyelan oluşumlarına rastlansa da heyelanların çoğunun kuzeyli yamaçlarda toplandığı görülür (Şekil 14). Bunda en temel faktörler şüphesiz bu yönün Doğubayazıt Fayı'ndan dolayı deforme olarak yüksek eğimli yamaç profili sunması ve daha düşük güneş radyasyonundan dolayı daha nemli olmasıdır. Bunun yanında bu yamacın yukarıda anlatıldığı üzere paleosenklinalin güney kanatları olması da kuzeyli eğim özelliğinden sorumludur.

Yamaç Eğriselliği: Yamaç eğriselliği, yüzeysel hareketi ve yamaç boyunca taşınım sürecini belirlemektedir (Wilson and Gallant, 2000). İçbükey profil sunan yamaçlarda heyelanlı kütle nispeten daha hızlı harekete sahipken, dışbükeyli yamaçlarda bu durum daha zayıf görülür. Akyayla Dağı'nda eğrisellik analizine bakıldığında heyelan oluşumlarının iç bükey

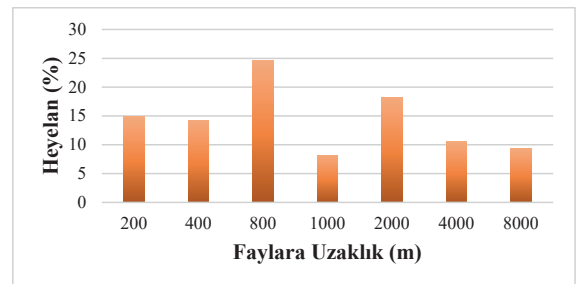
profil yamaçlarda toplandığı anlaşılmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Akyayla Dağı'nda yamaç eğriselliği-heyelan ilişkisi grafiği.

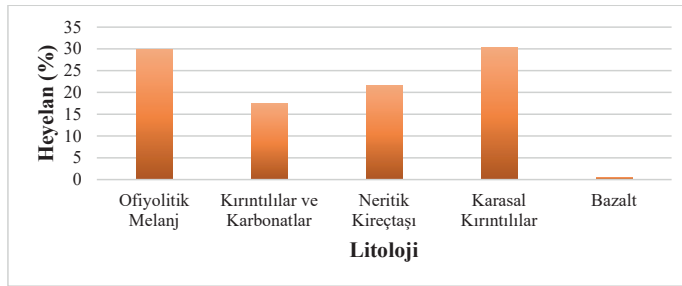
Figure 15. Slope curvature-landslide relationship graph for Mount Akyayla.

Faylara uzaklık: Akyayla Dağı ve yakın çevresi aktif tektonik açıdan bölgesel deformasyonun yoğun olduğu bir bölgede konumlandığı için sismik aktivitenin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu deformasyonların kaynağı tektonik sistemlerin jeolojik geçmiş boyunca meydana getirdiği sismisite kaynaklı titreşimlerdir. Bu deformasyonlar topoğrafik bozulmalara yol açarken yamaçların duraysızlaşmasına neden olmuş, dolayısıyla heyelanların gelişimini denetlemiştir. Nitekim heyelanların fayların geçtiği zonlara yakın olmaları bunu doğrular niteliktedir (Şekil 16).



Şekil 16. Akyayla Dağı'nda faylara yakınlık-heyelan ilişkisi grafiği.

Figure 16. Graph of proximity to faults and landslide relationship for Mount Akyayla.



Şekil 17. Akyayla Dağı'nda litoloji-heyelan ilişkisi grafiği.

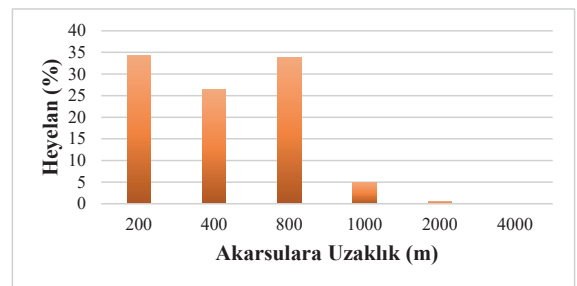
Figure 17. Graph of lithology-landslide relationship for Mount Akyayla.

Litoloji: Heyelan morfolojisinin gelişim ve yoğunluğunda önemli kriterlerden biri olan litolojik karakter, Akyayla Dağı'nda da etkisini göstermektedir. Nitekim kütlede farklı tür ve petrografide kayalar olmasına rağmen heyelanların çoğunun ofiyolitik melanj ve karasal kırıntılar üzerinde şekillendiği görülmektedir (Şekil 17). Bu kayaların bünyesinde bulunan kil gibi mineraller kayaların geçirgenliğini azaltmaktadır. Bununla birlikte kireçtaşı ve bazalt üzerinde de heyelanların görülmesi, direkt litolojinin kendisiyle değil, litoloji üzerinde görülen kalın kolüvyal örtü (regolit) ile ilişkilidir.

Akarsulara uzaklık: Akyayla Dağı'nda yaygın yüzeysel drenaj, flüvyal erozyonla yamaç stabilitesini bozan bir diğer parametredir. Özellikle vadi yamaçlarında ve toprak kesimlerde gelişen derine erozyon, kütlelerin eğim aşağı hareketlerini kontrol etmişlerdir. Heyelanların çoğunun ana drenaj kanallarına oldukça yakın olması bunu doğrulamaktadır (Şekil 18).

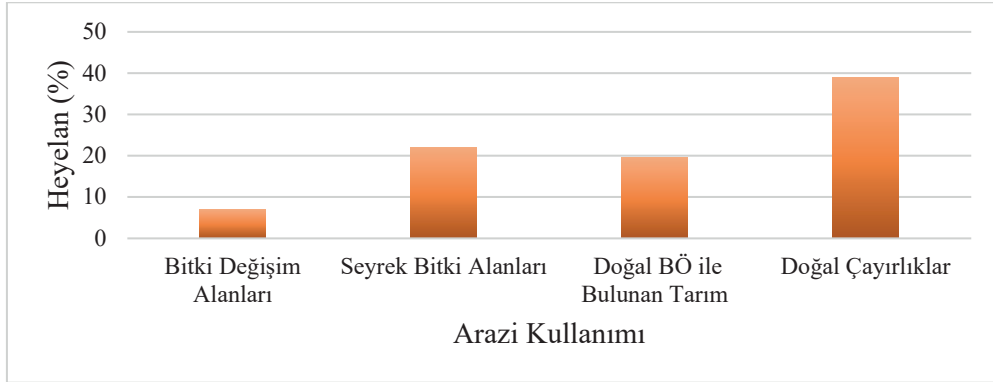
Arazi kullanımı: Akyayla Dağı'nda sismik ve litolojik özelliklerin yanı sıra heyelanların gelişimi sınırlı da olsa arazi kullanımı ile de ilişkilendirilebilir. Antropojenik müdahalelerle topoğrafyanın doğal dengesinin bozulması, hassas denge eşiğinde olan yamaçların

stabilitesini bozarak heyelan oluşumuna neden olabilir ya da mevcut heyelanları tetikleyebilir. Nitekim dağlık alanda heyelanların bazılarının insan faktörünün baskın olduğu arazi kullanım tiplerinde yoğunlaşması bunu yansıtmaktadır (Şekil 19). Bu bağlamda heyelanların yaklaşık %20'sinin tarım alanlarında, %7'sinin bitki değişim alanlarında bulunması (Şekil 19); bununla birlikte oransal olarak düşük olsa da bazı heyelanların mera, sulanmayan ekilebilir alan, kesikli kırsal yapı ve doğal bitki örtüsüyle karışık bulunan tarım alanı tiplerinde gelişmesi, heyelan morfojenizindeki antropojenik etkiye dair savımızı doğrulamaktadır.



Şekil 18. Akyayla Dağı'nda akarsulara yakınlık-heyelan ilişkisi grafiği.

Figure 18. Graph of proximity to rivers and landslides for Mount Akyayla.



Şekil 19. Akyayla Dağı'nda arazi kullanımı-heyelan ilişkisi grafiği.

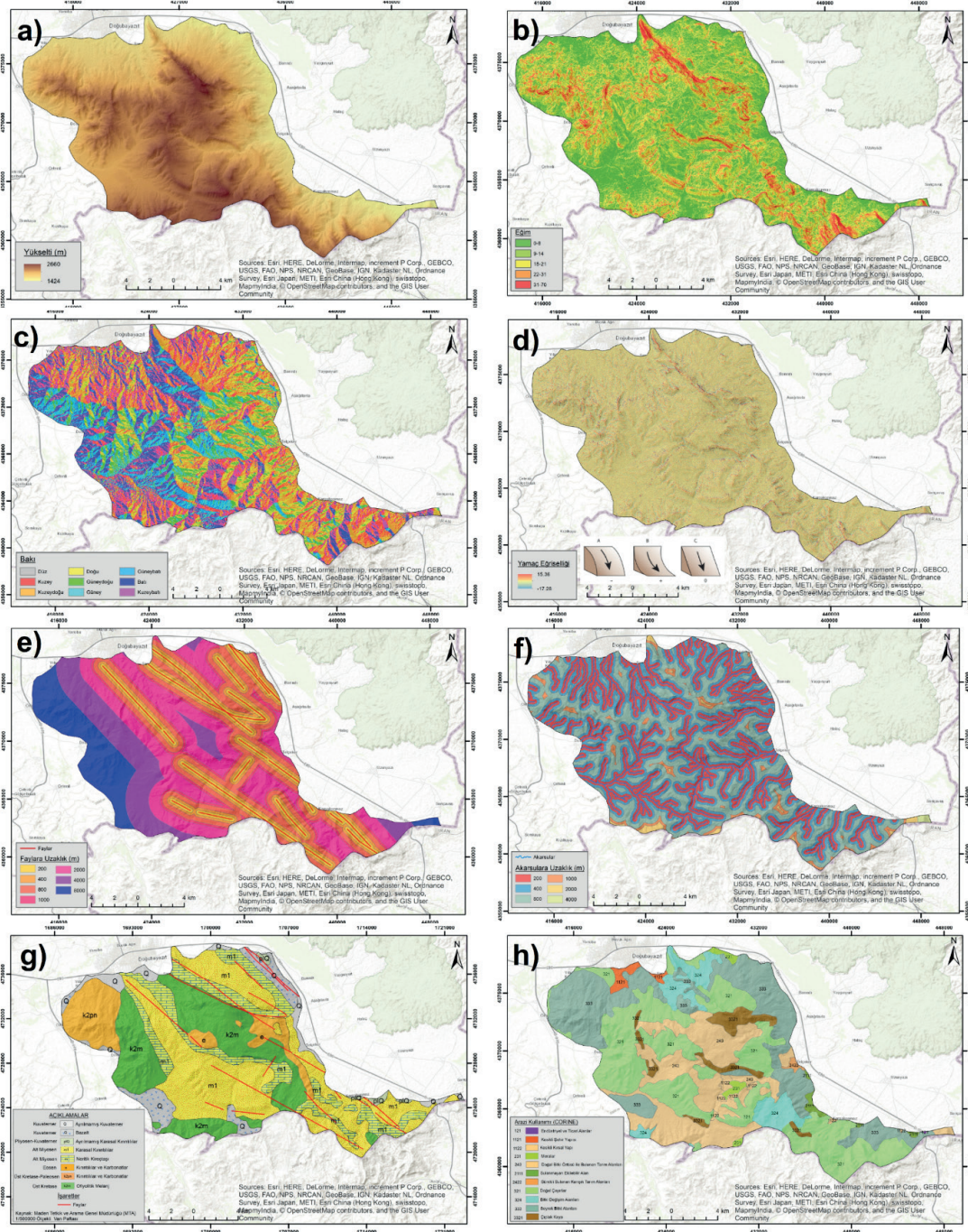
Figure 19. Land use-landslide relationship graph for Mount Akyayla.

TARTIŞMA / SONUÇ

Heyelan gibi kütle hareketleri birden fazla sürecin kompleks etkisiyle gelişmesine rağmen en temel süreçler tetikleyici mekanizmalar olan yağış (klimatik, meteorolojik) ve depremsellik (jeolojik, sismisite) olarak değerlendirilir (Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001). Akyayla Dağı, çevrelediği alçak havzalara göre daha nemli bir iklime sahip olsa da (Şekil 5) Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Dfb (ılık yaz, nemli karasal iklim) iklim karakterine sahiptir (Taşoğlu vd., 2024). İklimdeki bu kurak karakter, kütledeki heyelan morfolojisinin iklimik denetimli heyelanlardan ziyade sismisite denetimli heyelanlar olduğunu yansıtmaktadır. Nitekim bölge, DAYP dahilindeki aktif deformasyon sistemlerinden olan Balıkgöl ve Doğubayazıt fayları tarafından çevrelenir. Bu fayların tarihsel (Mutlu, 2022) ve aletsel dönemdeki (Şekil 9) yoğun depremselliği dağdaki heyelanları tetikleyen bir fenomendir. Dolayısıyla kütledeki heyelanların meteorolojik (klimatik) heyelanlardan ziyade jeolojik (sismisite) heyelanlar oldukları değerlendirilmektedir. Dağdaki en büyük ve bilindik heyelan ünitesi olan Telçeker Heyelanı'nın (Yılmaz, 1986;

Avcı, 2001) da depremle tetiklendiğinin ifade edilmesi (Bayraktutan vd., 2019) bu savımızı doğrular niteliktedir. Bununla birlikte bölgede kar erimeleri ve yağışa bağlı olarak regolitteki boşluklar dolmakta ve bu, regolit malzemedeki basıncın artmasına neden olmaktadır. Bu süreç yüksek gravite etkisiyle desteklenince regolitin kayma dayanım oranı düşmektedir (Nurdahan ve Tağa, 2022). Akyayla Dağı'nda özellikle kuzeyli yamaçlarda eğimin yüksek değerler sunması ise yüksek graviteyi sağlayan rölyefin temel sorumlusudur.

Bölgenin yüksek sismisitesi mevcut heyelanların büyümesine veya pasif karakterdeki heyelanların reaktive olmasına neden olabilir. Nitekim Görüm (2016), 2011 Van depremi sonucunda meydana gelen bazı heyelanların bu şekilde geliştiğini belirtmiştir. Benzer süreci Nurdahan ve Tağa (2022), aşırı yağışlarla ilişkilendirmiş ve heyelanların yeniden hareketlenmesinde iklimik sürecin önemine değinmiştir. Ancak, mevcut deprem (Şekil 9) ve yağış (Şekil 5) verilerine göre, Akyayla Dağı için iklimik özelliklerden ziyade sismik süreçlerin böylesi bir durumu ortaya çıkarabileceği değerlendirilmektedir.

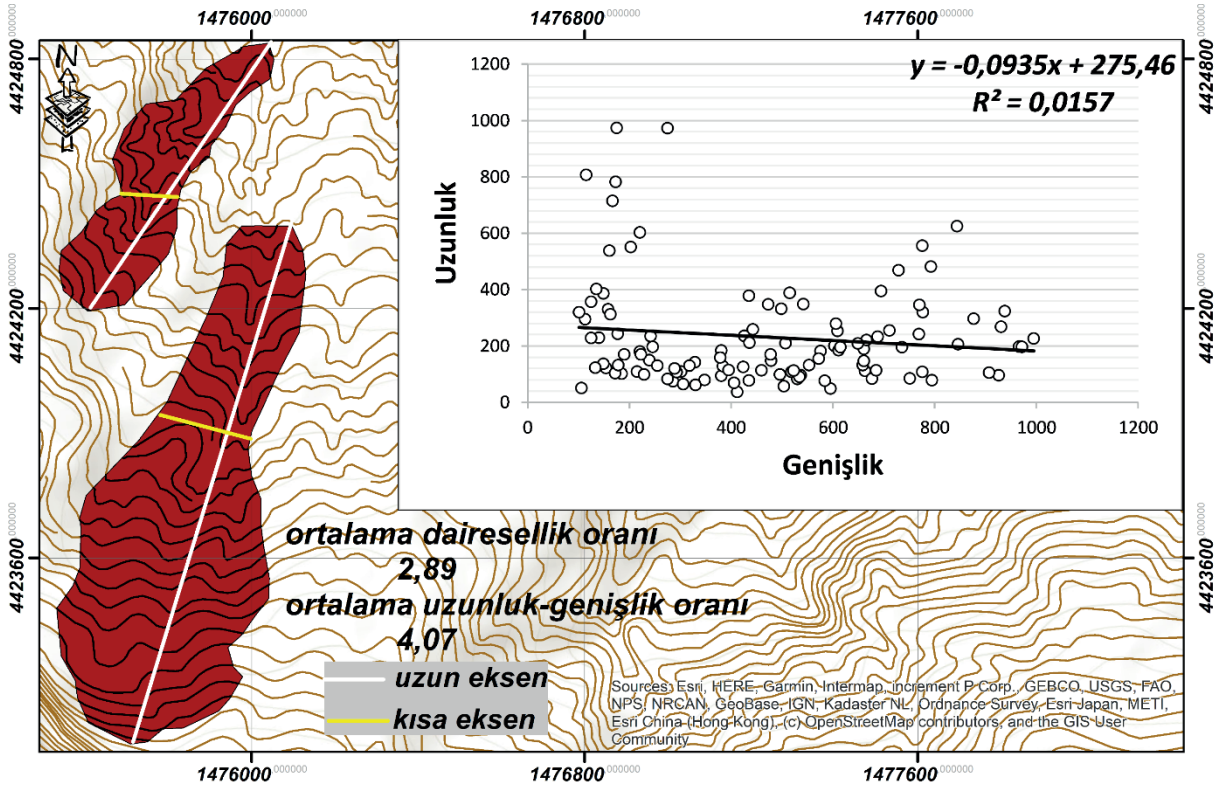


Şekil 20. Heyelan duyarlılık analizi için çalışmada ele alınan parametrelerin haritaları; a: yükseklik, b: eğim, c: bakı, d: eğrissellik, e: faylara uzaklık, f: akarsulara uzaklık, g: litoloji, h: arazi kullanımı.

Figure 20. Maps of parameters considered in the study for landslide susceptibility analysis; a: Lithology, b: Distance to faults, c: Elevation, d: Slope, e: Aspect, f: Slope curvature, g: Distance to rivers, and h: Land use.

Akyayla Dağı'nda çeşitli veri kaynaklarına göre tespit edilen heyelanların büyük kısmının oldukça uzamış ve dairesel yapıdan çok uzak formda olduğu görülmektedir (Şekil 6 ve 8). Bu geometrik karakter heyelan üniteleri için beklenen bir özellik olmakla birlikte bunun doğrulanması adına çalışmada dairesellik ve uzunluk oranı-genişlik oranı (Basso vd. 2013; Öztürk, 2018) gibi indislere başvurulmuştur. Toplam 141 heyelan için yapılan analiz sonucunda heyelanların ortalama dairesellik oranlarının 2,89, ortalama uzunluk-genişlik oranlarının ise 4,07 olduğu

belirlenmiştir (Şekil 21). Her iki değer de dairesel paternden oldukça uzak, uzamış-ince heyelan morfolojilerinin geliştiğini yansıtır. Dağdaki heyelanlarda uzunluğun artmasına bağlı olarak genişliğin azaldığı görülür (Şekil 21). Bu değer, salt morfolojik bir tanımlamanın ötesinde aynı zamanda dağdaki yüksek gravitenin etkisini de doğrulamaktadır. Özellikle kuzeyli yamaçlarda kuzeye doğru olan tabaka eğimleri, faya bağlı topoğrafik deformasyon gibi süreçler heyelan paternlerindeki dairesel olmayan geometrinin temel nedenleri arasındadır.

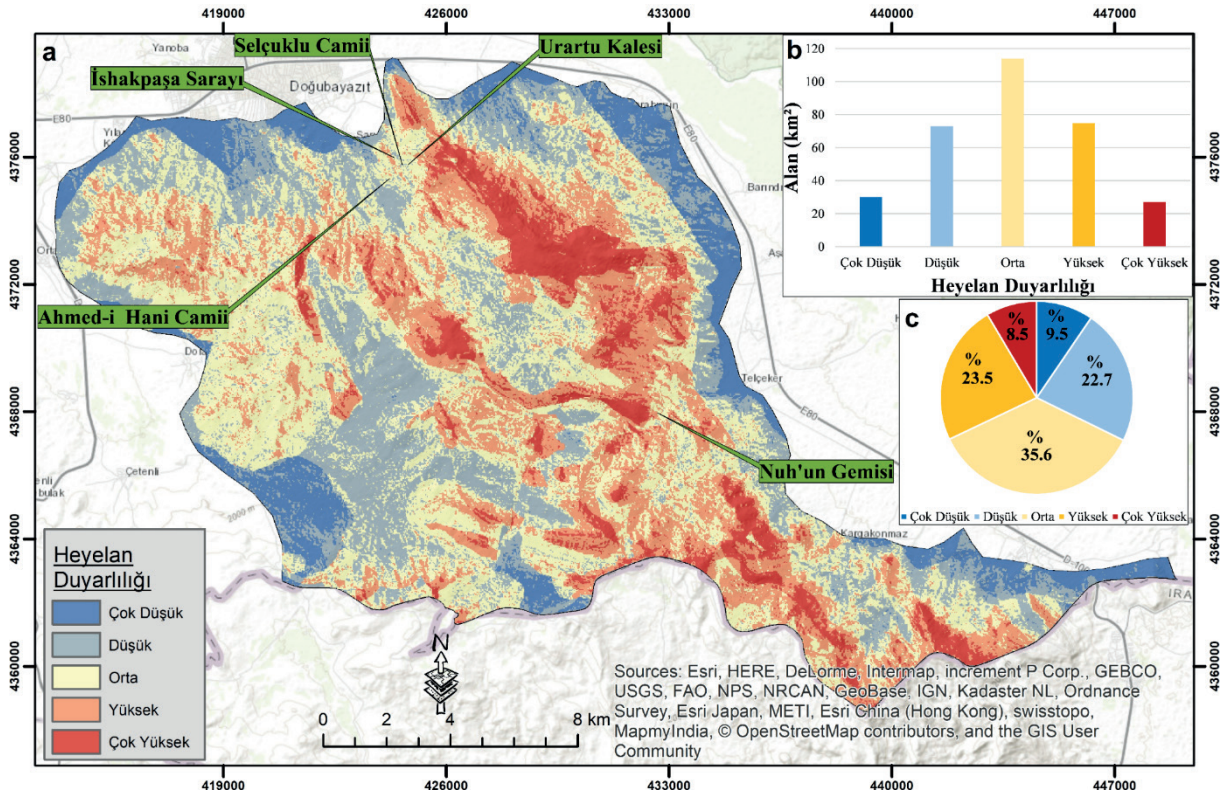


Şekil 21. Akyayla Dağı'nda örnek iki heyelan üzerinden indislerde kullanılan uzun eksen ve kısa eksenlerin görünümü ve kütlede heyelan uzunluğu ile genişliği arasındaki korelasyon ilişkisi.

Figure 21. View of the long axis and short axis used in the indices for two sample landslides on Mount Akyayla and the correlation relationship between landslide length and width.

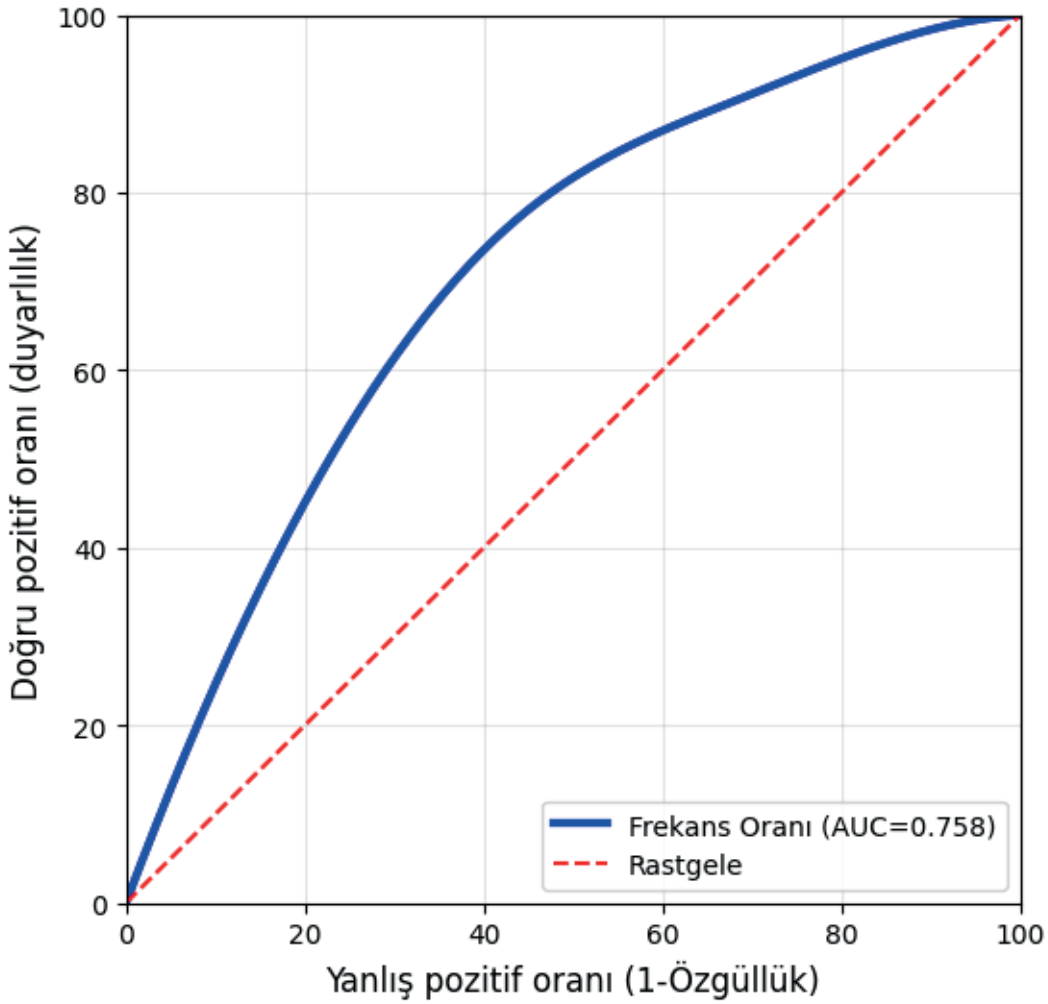
Akyayla Dağı'nın ülkemiz sınırları dahilinde kalan kesimi yaklaşık olarak 325 km²'dir. Dağlık kütlede görülen heyelan oluşumları toplamda yaklaşık 44,15 km² alan kaplamaktadır. Bu veri dağın topoğrafik peyzajının yaklaşık %13'ünün heyelanlar tarafından şekillendirildiğini göstermektedir. Heyelanlı bölgelerin sınıflandırılmasında ise; heyelan duyarlılığı çok düşük alanlar çalışma alanının %9,5'ni, düşük duyarlı alanlar %22,7'sini, orta seviye duyarlı alanlar %35,6'sını, yüksek duyarlı alanlar %23,5'ini ve çok yüksek duyarlı alanlar ise %8,5'ini oluşturmaktadır (Şekil 22).

Heyelan duyarlılık analizinin doğruluğu, Alıcı İşletim Karakteristiği (Receiver Operating Characteristic – ROC) eğrisi ve bu eğri altında kalan alan (Area Under Curve – AUC) değeri kullanılarak değerlendirilmiştir (Şekil 23). Yapılan analiz sonucunda, FO (Frekans Oranı) yöntemine göre oluşturulan modelin AUC değeri 0,758 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin yaklaşık %76 doğrulukla heyelan oluşum potansiyelini ayırt edebildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, modelin makul düzeyde bir ayırt ediciliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 22. a: Akyayla Dağı'nın FO yöntemine göre heyelan duyarlılık haritası. b: kütlede heyelan duyarlılık sınıflarının kapladığı alanlar (km²). c: kütlede heyelan duyarlılığı sınıflarının yüzdelik dağılımları.

Figure 22. a: Landslide susceptibility map for Mount Akyayla according to the frequency ratio method. b: Areas covered by landslide susceptibility classes in the mass (km²). c: Percentage distribution of landslide susceptibility classes in the mass.



Şekil 23. Akyayla Dağı için yapılan heyelan duyarlılık analizinin doğruluk analizi.

Figure 23. Accuracy of the landslide susceptibility analysis for Mount Akyayla.

Heyelan duyarlılığın özellikle yüksek ve çok yüksek olduğu alanlarda Nuh'un Gemisi, İshakpaşa Sarayı, tarihi Selçuklu Camii, Urartu Kalesi gibi kültürel kaynak değerine sahip öğelerin (Şekil 22 ve 24) yanında çok sayıda yerleşim ve ilişkili beşerî yapıların varlığı planlamada heyelan duyarlılığının analiz edilmesini gerekli kılmaktadır. Örneğin Nuh'un Gemisi olarak bilinen ve heyelan süreçleri tarafından geliştirilen (Yılmaz, 1986; Avcı, 2001)

morfolojik yapı, kendisini oluşturan heyelan süreçlerine bağlı deformasyon tehdidi altındadır. Aynı şekilde bölgenin en büyük turistik bölgesi olan İshakpaşa Sarayı ve çevresi de heyelan yoğunluğunun oldukça fazla olduğu bir bölgeye karşılık gelmektedir. Bölgede dönem dönem aşırı yağmurları takiben gelişen ve saraya giden yolların kapanmasına neden olan heyelanların varlığı bunu doğrulamaktadır. Ayrıca bir diğer heyelan türü olan kaya düşmelerinin de bölgede

oldukça yaygın olması mekânsal planlamada heyelanla ilişkili süreçlerin dikkate alınmasını gerektirir. Nitekim bu alanlar jeosit değerlerinin

yanı sıra her yıl binlerce yerli ve yabancı turisti ağırlamaktadır.



Şekil 24. Akyayla Dağı'nda heyelan duyarlılığının yüksek olduğu bölgelerdeki doğal ya da kültürel jeositler. a, b, c: Nuh'un Gemisi olarak bilinen ve yoğun şekilde turist ağırlayan heyelan bölgesi. d: Ön planda Selçuklu döneminden kalma tarihi camii ve arka planda ise Urartu dönemine ait kale surları, e ve f: Osmanlı Devleti döneminde inşa edilen İshakpaşa Sarayı.

Figure 24. Natural or cultural geosites in areas of high landslide susceptibility on Mount Akyayla. a, b, c: The landslide area known as Noah's Ark, which is a popular tourist attraction. d: The historical mosque from the Selçuk Empire in the foreground and fortress walls from the Urartian Empire in the background. e and f: İshakpaşa Palace built during the Ottoman Empire.

KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın ilk bulguları, 7. Uluslararası Ağrı Dağı ve Nuh'un Gemisi Sempozyumu'nda sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Yazarlar, makalenin akademik gelişimine katkıda bulunan editör kuruluna ve hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Abay, A., Mulugeta, A., & Mebrahtu, G. (2025). GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio Method: A Case Study From Adigrat-Mugulat Mountain Chains, Northern Ethiopia. *Scientific African*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02661>.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. N. (1999). Landslide hazard assessments: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 21-44.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P. (1982). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge University Press.
- Arca, D., & Kutoğlu, Ş. H., (2017). Frekans oranı metodu ile heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi. 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Türkiye.
- Atalay, İ. (1974-1977). Muş-Palu arasındaki murat vadisi boyunca oluşan kütle hareketleri. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi*, 20-21, 263-279.
- Avcı, M. (2001). Ağrı Dağı'nda karmaşık bir yer akması Nuh'un Gemisi. *Mavi Gezegen*, 4, 32-36.
- Avcı, V., & Sunkar, M. (2018). The relationship of landslides with lithological units and fault lines occurring on the East Anatolian Fault Zone, between Palu (Elâzığ) and Bingöl, Turkey. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 157 (157), 23-38. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.428277>
- Aydoğan, E., & Dağ, S. (2023). İstatistiksel yöntemlerle Yukarı Karasu Havzası'nın kuzeydoğu bölümünün (Erzurum) heyelan duyarlılık analizi, *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 64-82. <https://dx.doi.org/10.48123/rsgis.1202140>
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., & Pepe, M. (2013). Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Science*, 70, 2545-2559. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2297-z>
- Başalan, A. & Demir, G. (2022). İstatistiksel yöntemler uygulanarak Tokat il merkezinin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11 (3), 260-273.
- Başara, A. C., & Şişman, Y. (2022). Frekans oranı, kanıt ağırlığı ve lojistik regresyon yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11 (3), 647-660. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1065284>
- Bayraktutan, M. S. (2019). *Telçeker Heyelanı; Durupınar Sit Alanı jeofizik etüdü*, Doğubayazıt: Nuh'un Gemisi Projesi 1985- 87. Ağrı, 5. Ağrı Dağı ve Nuh'un Gemisi Sempozyumu Bildiriler Özeti Kitabı, 84-85.
- Becer, M. M., Çan, T. & Tekin, S. (2017). *Gümüşhacıköy (Amasya)- Osmancık (Çorum) dolaylarının frekans oranı yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi*, Ulusal Mühendislik Jeolojisi - Jeoteknik Sempozyumu, 12-14 Ekim 2017, ÇÜ, Adana.
- Bozdoğan, M., & Canpolat, E. (2022). Analitik hiyerarşi süreci (AHS) ile Delibekirli (Kırıkhan/Hatay) Havzası'nın kütle hareketleri duyarlılık analizi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 31(1), 33-53. <https://doi.org/10.51800/ecd.1054815>

- Canpolat, E., & Turoğlu, H. (2019). Isparta güneyi ve güneybatısındaki volkanik sahanın jeomorfolojik gelişiminin çizgisellik ve dairesellik analizleri ile yorumlanması. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (2), 23-36.
- Choi, J., Oh, H., Lee, H., Lee, C. & Lee, S. (2021). Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology*, (124), 12-23, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.011>.
- Chung, C.J.F. & Fabbri, A.G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2>
- Cihangir, M. E. (2024). Aras Nehri havzasında lojistik regresyon yöntemiyle kayma ve akma tip heyelan duyarlılığı değerlendirmesi. *Türk Coğrafya Dergisi* (85), 55-68. <https://doi.org/10.17211/tcd.1475065>
- Çakar, S. (2023). *Doğubayazıt Fayı'nın (Ağrı) Segmentasyonu ve Tektonik Jeomorfolojisi* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çan, T., Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çörekçioğlu, Ş., Karakaya-Gülmez, F., Elmacı, H., Hamzaçebi, S., & Emre, Ö. (2013, Kasım, 1-13). *Türkiye heyelan veri tabanı* [Konferans sunum özeti]. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye. https://obs.hkmo.org.tr/show-media/resimler/ekler/85a47f65233d5d0_ek.pdf
- Çellek, S. (2024). Effect of the curvature parameter and its classification on landslides. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 12 (1), 49-63. <https://doi.org/10.21923/jesd.1391818>
- Çellek, S., Bulut, F., & Ersoy, H. (2015). AHP yöntemi'nin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanımı ve uygulaması (Sinop ve yakın çevresi). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39 (2), 59-90. <https://doi.org/10.24232/jeoloji-muhendisligi-dergisi.295366>
- Çetinkaya, G., Şimşek, M. & Öztürk, M. Z. (2023). Doğu Toroslar'daki çözünme dolinlerinin morfolojik özellikleri. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 10, 20-33. <https://doi.org/10.46453/jader.1201290>.
- Dağ, S., & Bulut, F. (2012). Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına bir örnek: Çayeli (Rize, KD Türkiye). *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 36 (1), 35-62.
- Dağ, S., Akgün, A., Kaya, A., Alemdağ, S. & Boztancı, H.T. (2020). Medium scale earthflow susceptibility modelling by remote sensing and geographical information systems based multivariate statistics approach: an example from Northeastern Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79, 468, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09217-7>
- 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>
- Demirbilek, S. & Turoğlu, H. (2024) Frekans oranı yöntemi kullanılarak Arsuz Çayı Havzası heyelan duyarlılık analizi. *Jeomorfolojik Araştırmalar*

- Dergisi*, 13, 23-39. <https://doi.org/10.46453/jader.1496249>
- 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), 103. doi:10.3390/ijgi6040103
- Deniz, O., & Sındır, R. (2011). Çayırbaşı Heyelanı. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 7 (5) 82-97.
- Denizman, C. (2003). Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (1), 29–35.
- Dóniz-Páez, J. (2015). Volcanic geomorphological classification of the cinder cones of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Geomorphology*, 228, 432-447. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.004>
- Dölek, İ., Uzelli, T., Ege, İ., & Çelik, Ö. (2023). 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri ile oluşan kütle hareketlerine bir örnek: Tepehan Heyelanı. *Türk Coğrafya Dergisi*, (83), 73-86. <https://doi.org/10.17211/tcd.1307166>
- Dönmez, Y. (1979). *Umumi Klimatoloji ve İklim Çalışmaları*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayın No.2506, Coğrafya Enstitüsü Yayın No.102.
- Dunham, A. M., Kiser, E., Kargel, J. S., Haritashya, U. K., Watson, C. S., Shugar, D. H., et al. (2022). Topographic control on ground motions and landslides from the 2015 Gorkha earthquake. *Geophysical Research Letters*, 49, <https://doi.org/10.1029/2022GL098582>
- Emre, Ö., Duman, T. Y., Özalp, S., Elmaci, H., Olgun, Ş., & Şaroğlu, F. (2013). *Açıklamalı Türkiye Diri Fay Haritası, Ölçek 1: 1.250.000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Özel Yayın Serisi, 30, 89.
- Ercanoğlu, M., & Avcı, P. (2024). Heyelan duyarlılığı değerlendirmelerinde akarsulara uzaklık parametresinin kullanımına yönelik yeni bir yaklaşım. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(2), 594-614. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.1425508>
- Ercanoğlu, M. (2003). *Bulanık Mantık ve İstatistiksel Yöntemlerle Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi: Batı Karadeniz Bölgesi (Kumluca Güneyi-Yenice Kuzeyi)*, [Doktora Tezi]. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erinç S., (2001). *Jeomorfoloji Cilt I*, Der Yayınları.
- 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>
- Goudie, A. S. (2003). *Geomorphological Techniques*. London, UK: Allen & Unwin.
- Gökçeoğlu, C., & Ercanoğlu, M. (2001). Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 23, 189-207.
- Görüm, T. (2016). 23 Ekim 2011 Van depreminin tetiklediği heyelanlar. *Türk Coğrafya Dergisi* (66), 29-36. <https://doi.org/10.17211/tcd.69854>
- Görüm, T., Fan, X., van Westen, C.J., Huang, R., Xu, Q., Tang, C. & Wang, G., (2011). Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology* 133, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.030>
- 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, 181-216.

- Güner, Y. (1986). Nuh'un Gemisi Ağrı Dağı'nda mı? Gemi ile ilgili sanılan Doğubayazıt-Telçeker heyelanının jeomorfolojik evrimi. *Jeomorfoloji Dergisi*, (14), 27-37.
- Günini, N., Ü., & Öztürk, D. (2021). Van İli Heyelan Duyarlılığının Frekans Oranı Yöntemiyle Analizi, *Bursa Uludağ Üni. Mühendislik Fak. Dergisi* 20 (3), 865-884. Doi:10.17482/uumfd.969246
- Gürbüz, A. & Şaroğlu, F. (2019). *Right-lateral strike-slip faulting and related basin formations in the Turkish-Iranian Plateau*, Editor(s): Ali Farzipour Saein, Developments in Structural Geology and Tectonics, Elsevier, 3, 101-130. doi:10.1016/B978-0-12-815048-1.00007-X
- Gürsoy, H., Tatar, O., Mesci, B. L., Canbaz, O., Polat A., & Akpınar, Z. (2024). Bir heyelanın anatomisi: 17 Mart 2005 Kuzulu (Koyulhisar - Sivas, Türkiye) Heyelanı Örneğinde Temel Jeolojik Araştırmaların Öneminin Değerlendirilmesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 67(1), 51-70. <https://doi.org/10.25288/tjb.1373825>
- Haque, U., Silva, P. S., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen, P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J. & 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>.
- Karakhanian, A. S., Trifonov, V. G., Philip, H., Avagyan, A., Hessami, K., Jamali, F., Bayraktutan, M. S., Bagdassarian, H., Arakelian, S., Davtian, V. & Adilkhanyan, A. (2004). Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. *Tectonophysics*, 380, 3–4, 189-219, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.020>.
- Karakhanian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S., & Avagian, A. (2002). Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113 (1-2), 319-344. [https://doi.org/10.1016/S03770273\(01\)00264-5](https://doi.org/10.1016/S03770273(01)00264-5)
- 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. *Environ Sci Pollut Res.*, 29, 91285–91305. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21931-2>
- Kasai, M. & Yamada, T. (2019). Topographic effects on frequency-size distribution of landslides triggered by the Hokkaido Eastern Iburi Earthquake in 2018. *Earth Planets Space* 71, 89. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1069-8>
- Kaya, F. (1996). *Doğubeyazıt İlçe Merkezinin Coğrafi Etüdü* (Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Erzurum.
- Kaya, C., Öztürk, Y., Karataş, A., Sayın, H. & Balcıoğlu, Y. E. (2025). Ağrı Dağı Volkanik Kütlesi'nde lahar oluşumları ve lahar duyarlılığının CBS tabanlı analizi (Doğu Anadolu-Kuzeybatı İran). *Geomatik*, 10 (1), 15-33. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1508315>
- Keskin, M. (2007). *Eastern Anatolia: A hotspot in a collision zone without a mantle plume*, In: Foulger, G.R., and Jurdy, D.M., eds., Plates, plumes, and planetary processes: Geological Society of America Special Paper 430, 693–722. [https://doi.org/10.1130/2007.2430\(32\)](https://doi.org/10.1130/2007.2430(32))
- 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>

- Kilburn, C. R. J. & Petley, D.N. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 54, 21–32.
- Köküm, M. (2021). Landslides and lateral spreading triggered by the 24 January 2020 Sivrice earthquake (East Anatolian Fault). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 751-760. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.877544>
- Li, L., Lan, H., Guo, C. et al. (2017). A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment. *Landslides* 14, 727–741. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0771-x>
- Liu, S., Yin, K., Du, J. et al. (2024). Landslides triggered by the extreme rainfall on July 4, 2023, Wanzhou, China. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02296-8>
- Luino, F. (1999). The flood and landslide event of November 4-6 1994 in Piedmont Region (Northwestern Italy): Causes and related effects in Tanaro Valley. *Physical and Chemical Earth (A)*, 24 (2), 123-129.
- Lutgens, F. K., & TarBuck, E. J. (2013). *Genel Jeoloji Temel İlkeleri Kavramlar* (C. Helvacı, Çev.). Nobel Akademik Yayıncılık.
- MacLachlan, J. C. & Eyles, C. H. (2013). Quantitative geomorphological analysis of drumlins in the Peterborough drumlin field, Ontario, Canada. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95(2), 125-144, <https://doi.org/10.1111/geoa.12005>
- Mandrekar, J.N. (2010). Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5 (9), 1315-1316. doi:10.1097/JTO.0b013e3181ec173d
- Mas, J.F., Soares Filho, B., Pontius, R.G., Farfán Gutiérrez, M. & Rodrigues, H. (2013). A suite of tools for ROC analysis of spatial models, *ISPRS International Journal of GeoInformation*, 2(3), 869-887. doi:10.3390/ijgi2030869
- MGM. Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- MTA. 1:500.000 Ölçekli Van Paftası.
- Mutlu, S. (2022). *Balık Gölü Fay Zonu'nun Paleosismolojik Özellikleri ve Segmentasyonu* [Doktora Tezi]. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nurduhan, M., & Taga, H. (2023). Silifke-Mut (Mersin) karayolunda meydana gelen kargıcak heyelanının değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 46 (2), 139-156. <https://doi.org/10.24232/jmd.1230612>
- Öz, T. & Günek, H. (2021). Landslide susceptibility and settlement risk analysis of Solaklı Basın (Trabzon). *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 44, 396-412.
- Öz, T. (2025). Heyelan duyarlılığının analitik hiyerarşi süreci (AHS) ve Frekans Oranı (FR) ile belirlenmesi: Kürk Çayı Havzası (Elâzığ) örneği. *Fırat University Journal of Social Sciences*, 35(2), 467-485. <https://doi.org/10.18069/firsbed.1572408>
- Özgül, N., Seymen, İ. & Arpat, E. (1983). Horasan Narman Depreminin Makrosismik ve Tektonik Özellikleri. *Yeryuvarı ve İnsan*, 8 (3), 21-25.
- Öztürk, K. (2002). Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(2), 35-50.
- Öztürk, M. Z. (2018). Karstik kapalı depresyonların (dolinlerin) morfometrik analizleri. *Coğrafya Dergisi*, 36, 1-13. <https://doi.org/10.26650/JGEOG371149>
- Öztürk, Y. (2020). Aktif fayların tanımlanmasında jeomorfik belirteçlerin rolü: Balıkgöl Fay Zonu

- örneği. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi* (5), 101-117. <https://doi.org/10.46453/jader.771204>
- Perinçek, D. (2016). Çetin baraj gövdesi ve dolayının jeolojisi ve heyelan araştırması. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59 (2), 167-210. <https://doi.org/10.25288/tjb.298224>
- Safaei, M., Omar, H., Huat, B. K. & Yousof, Z. B. M. (2012). Relationship between Lithology Factor and landslide occurrence based on Information Value (IV) and Frequency Ratio (FR) approaches — Case study in North of Iran. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 79-90.
- Samia, J., Temme, A., Bregt, A., Wallinga, J., Guzzetti, F., Ardizzone, F., & Rossi, M. (2017). Characterization and quantification of path dependency in landslide susceptibility. *Geomorphology*, 292, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.039>
- Savcı, G. (1980). Doğu Anadolu volkanizmasının neotektonik önemi, *Yeryuvarı ve İnsan*, 46-49.
- Schuster, R. L. & Fleming, R. W. (1986). Economic losses and fatalities due to landslides. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 23(1), 11– 28.
- Seven, M., Öztürk, Y., Gürgöze, S., Ege, İ. & Tonbul, S. (2025). Engizek Dağı'nda karstik depresyonların jeomorfik özellikleri ve morfolojik gelişimleri (Kahramanmaraş, Doğu Toroslar). *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 68 (2), 259-286. <https://doi.org/10.25288/tjb.1647807>
- Sheng M, Zhou J, Chen X, Teng Y, Hong A & Liu G (2022) Landslide susceptibility prediction based on frequency ratio method and C5.0 decision tree model. *Front. Earth Sci.*, 10, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.918386>
- Shirzadi, A., Chapi, K., Shahabi, H., Solaimani, K., Kavian, A., & Ahmad, B. Bin. (2017). Rock fall susceptibility assessment along a mountainous road: an evaluation of bivariate statistic, analytical hierarchy process and frequency ratio. *Environmental Earth Sciences*, 76(4), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6471-6>
- Şaroğlu, F. & Güner, Y. (1981) Doğu Anadolu'nun jeomorfolojik gelişimine etki eden ögeler: jeomorfoloji, tektonik, volkanizma ilişkileri. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 24, 39-50.
- Şaroğlu, F. & Yılmaz, Y. (1986) Doğu Anadolu'da neotektonik dönemdeki jeolojik evrim ve havza modelleri. *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 107, 73-94.
- Şaroğlu, F. (1986). *Doğu Anadolu'nun neotektonik dönemde jeolojik ve yapısal evrimi* [Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi.
- Şengör, A. M. C., Özeren, S. Genç, T. & Zor, E. (2003). East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letters*, 30 (24), doi:10.1029/2003GL017858, 2003.
- Taşdemiroğlu, M. (1970). Türkiye' de kütle hareketleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 13 (2), 26 – 35.
- Tian, N., Lan, H., Li, L., Peng, J. Fu, B. & Clague, J. J. (2025). Human activities are intensifying the spatial variation of landslides in the Yellow River Basin, *Science Bulletin*, 70, 2, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.07.007>
- Toprak, A., & Sunkar, M. (2022). Ağrı ilinde meydana gelen doğal afetlerin mekânsal ve zamansal analizi. *Coğrafya Dergisi*. 44, 97-113. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2022-978387>
- Türkmen, S. (2024). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminde tetiklenen Değirmencik Heyelanı (Gaziantep – İslâhiye). *Geosound* (60), 1-21. <https://doi.org/10.70054/geosound.1525383>
- Ullah, K., Zhang, J. (2020). GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method:

- A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. *PLoS ONE* 15(3): e0229153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153>
- Vakov, A. (1996). Relationships between earthquake magnitude, source geometry and slip mechanism. *Tectonophysics*, 261 (1-3), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(96\)82672-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(96)82672-2)
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3), 112-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Varnes, D.J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, Commission of landslides of the IAEG, UNESCO, *Natural Hazards*, 3, 61.
- Wilson, J.P. & Gallant, J.C. 2000. Digital terrain analysis, Chapter 1. Terrain analysis: Principles and applications. New York.
- 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>
- Zhao, B., Zhang, L., Gu, X., Luo, W., Yu, Z., Yuan, L. (2025). How is the occurrence of rainfall-triggered landslides related to extreme rainfall? *Geomorphology*, 475. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109666>.
- <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/>
- <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>
- <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018?tab=download>
- <https://earthexplorer.usgs.gov/>