



Aras Nehri havzasında lojistik regresyon yöntemiyle kayma ve akma tip heyelan duyarlılığı değerlendirmesi

Evaluation of slide and flow-type landslide susceptibility in the Aras River Basin via the logistic regression method

Mehmet Emin Cihangir^{a,b*} 

^a Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye.

^b İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, Katı Yer Bilimleri Anabilimdalı, İstanbul, Türkiye.

ORCID: M.E.C. 0000-0001-8881-5308

BİLGİ/INFO

Geliş/Received: 29.04.2024

Kabul/Accepted: 12.06.2024

Anahtar Kelimeler:

Aras nehri havzası

Heyelan duyarlılığı

Lojistik regresyon

Yamaç üniteleri

Keywords:

Aras river basin

Landslide susceptibility

Logistic regression

Slope units

*Sorumlu yazar/Corresponding author:

(M. E. Cihangir) m.e.cihangir@gmail.com

DOI: 10.17211/tcd.1475065



Atıf/Citation:

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>

ÖZ/ABSTRACT

Yamaç stabilitesinin bozulmasıyla gerçekleşen heyelanlar, oluşturdukları kayıplarla ülkemizdeki başlıca afetler arasında yer almaktadır. Türkiye’de heyelanın en fazla yoğunlaştığı ve iç içe geliştiği bölgelerden biri de Aras Nehri Havzasıdır. Bu havzanın yüzde 13’ü heyelanlı olup, bölgede yeniden aktif heyelanlar mekânsal süreklilik sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı da yüksek heyelan yoğunluğuna sahip bu alanda, heyelan duyarlılığını belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak fiziki bütünlük kapsamında heyelan yoğunluğuna göre çalışma alanının sınırları belirlenmiştir. Belirlenen çalışma alanında, kırmızı rölyef görüntü haritası ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü birlikteliği ile 3904 heyelan tespit edilmiştir. Bu heyelanlar akma ve kayma olarak iki ana tipte sınıflandırılmıştır. Ayrıca havza vektör tabanda yamaç ünitelerine ayrılmıştır. Havzada düzlük alanlar (ova, vadi tabanı ve yapısal düzlük) yamaç ünitelerinden çıkartılmıştır. Yamaç ünitelerine heyelan içerik bilgisi eklenmiştir. Her bir yamaç ünitesine ait eğim, yükselti, rölyef, yamaç profili, topoğrafik nemlilik gibi faktörlerin ortalama ve standart sapma değerlerinin yanı sıra litoloji bilgisi de yamaç duyarlılığında kullanılmıştır. Yamaçların duyarlılığı lojistik regresyon yöntemi ile tespit edilmiştir. Heyelanı kontrol eden faktör ve derecelerinin etkisi heyelan tipine göre değiştiğinden yamaç ünitelerinin heyelan duyarlılığı akma ve kaymalar için ayrı olarak belirlenmiştir. Ortalama AUC (doğru pozitif-yanlış pozitif) değerinde akmalarda 0,79, kaymalarda ise 0,76 başarı elde edilmiştir. Genel olarak çalışmada elde edilen sonuçlarda, (I) havzada heyelanın topoğrafik ve litolojik faktörler tarafından heyelan tipine göre farklı derecede kontrol edildiği (II) bu faktörlerin akma ve kayma için ayrı değerlendirilmesi ile oluşturulan heyelan duyarlılığının başarısının yüksek olduğu (III) farklı tip heyelan için oluşturulan duyarlılık haritaları bölgesel planlama için kullanıma sunulmuştur.

Landslides, occurring due to slope instability, rank among the primary disasters in our country with the losses they cause. One of the regions in Turkey where landslides are most concentrated and nested is the Aras river basin. 13% of this basin is prone to landslides, and reactivated landslides in the region ensure spatial persistence. This study aims to determine the landslide susceptibility of hillslopes in this area with high landslide density. For this purpose, the boundaries of the study area were first determined based on landslide density within the context of physical integrity. 3904 landslides were identified via Red Relief Image Maps and high-resolution satellite imagery in the study area. These landslides were classified into two main types: flow and slide. Additionally, the basin vector has been divided into slope units. Flat areas (plains, valley basins, and structural flats) have been excluded from the slope units in the basin. Landslide content information has been entered into the slope units. The average and standard deviation values, such as slope, elevation, relief, slope profile, topographic wetness, and lithology, for each slope unit were used in landslide susceptibility assessment. Landslide susceptibility was determined using the logistic regression method. The landslide susceptibility of slope units was determined separately for flows and slides because the effects of factors controlling landslides and their degrees vary according to the type of landslide. An average AUC value of 0.79 was achieved for flows, while for slides, a success of 0.76 was obtained.

In general, the results obtained in the study indicate that (I) landslides in the basin are controlled to varying degrees by topographic and lithological factors depending on the type of landslide, (II) the high success of landslide susceptibility achieved by separately evaluating these factors for flows and slides, and (III) susceptibility maps created for different types of landslides are usable for regional planning.

Extended Abstract

Introduction

Landslides cause numerous economic and social losses due to their catastrophic impact dependent on frequency, magnitude, and velocity. Catastrophic landslides are very common, especially in mountainous areas where the relief change is sharp. The risk of landslides increases due to the concentration of settlements in narrow areas in these regions. Therefore, landslide susceptibility studies that explain the spatial probability of landslides are vital for those living in these areas. From past to present, many researchers have prepared landslide susceptibility maps predicting where landslides may occur to mitigate potential risks in areas with high landslide density. (Brabb & Pampeyan, 1972; Gökçeoglu & Aksoy, 1996; Lee et al., 2003; Nefeslioglu et al., 2008). Researchers have generally employed two approaches, qualitative and quantitative, when creating landslide susceptibility maps (Atkinson & Massari, 1998; Brabb & Pampeyan, 1972; Ciurleo et al., 2016; Ercanoglu & Gökçeoglu, 2002; Gökçeoglu & Aksoy, 1996; Pachauri & Pant, 1992). Many researchers have applied the statistical approach of quantitative methods in the medium-scale area and achieved successful results (Carrara et al., 1991; Lee et al., 2004; Lee & Min, 2001; Malamud et al., 2004; Nandi & Shakoor, 2010; Santacana et al., 2003). Researchers have pointed out the importance of conducting a detailed analysis of factors controlling landslides when applying statistical models (Ercanoglu & Gökçeoglu, 2002; Guzzetti et al., 2005; Nefeslioglu et al., 2008; Reichenbach et al., 2018). Susceptibility, hazard and risk assessments created without understanding which factors controlling landslides do not have a solid basis, and the results obtained are inconsistent. Researchers have emphasized correctly selecting the parameters that affect landslides in susceptibility, hazard, and risk assessments (Guzzetti et al., 2008; Malamud et al., 2004; Samia et al., 2017; Van Westen et al., 2008). It is also important to accurately determine the relationship between the factors controlling and landslides. The reliability of this relationship depends on the quality of the landslide inventory (Asadi et al., 2024; Görüm, 2019; Guzzetti et al., 2012; Kirschbaum et al., 2009; Lei et al., 2019; Liu et al., 2024; Trigila et al., 2010).

When creating landslide inventories, Varnes (1978), WP/WLI (1994), Cruden and Varnes (1996) classifications, which are generally based on movement and material type, are preferred. An important issue in associating landslide inventory with susceptibility is the evaluation of susceptibility according to landslide type.

The logistic regression method is one of the most preferred statistical approaches because it is based on the relationship between the factor controlling landslides and the susceptibility model (Ayalew & Yamagishi, 2005; Bui et al., 2011; Gorsevski et al., 2000; Lombardo & Mai, 2018; Van Den Eeckhaut et al., 2006). In this approach, the presence-absence information of landslides is important. Moreover, the point where this information about landslide is obtained affects the success of susceptibility. Another consideration is the creation of landslide susceptibility models in the form of pixels or irregular vectors (Cihangir, 2022). However, considering basin, micro-basin, and slope units is a more accurate approach as it ensures geomorphological homogeneity in susceptibility studies (Guzzetti,

2005). Alvioli et al. (2016) and Alvioli et al. (2020) have recommended that evaluating landslides as slope units is more accurate due to their association with slope processes.

This study presents a landslide susceptibility model for risk mitigation in the Aras River basin, one of the most landslide-prone locations. The study relates the current landslide inventory with the factors controlling landslides. The correlation was achieved using the logistic regression method in machine learning. In this correlation, it was aimed to obtain more successful results by obtaining landslide information from the source point of the landslide. Additionally, the susceptibility model was created with slope units providing physical integrity. Thus, the usability of the obtained susceptibility map in terms of risk mitigation and regional planning was ensured.

Data and Method

Firstly, the landslide inventory was created with expert-based visual interpretation. At this stage, high resolution 10 m Sentinel 2 satellite images, 5 m and 10 m (from the 1:25,000 scale topographic map Digital Elevation Model (DEM)) were used. While creating the inventory, the Red Relief Image Map (RRIM) obtained using the DEM was used to distinguish the topographic signature of landslides. Landslides with spatial boundaries were classified into main types as flows and slides. Morphometric characteristics of landslides were utilized in this classification.

In the second stage, maps were created for factors controlling landslides, including slope, elevation, relief, slope profile, and topographic wetness index. In addition to these factor's mean and standard deviation, information on lithological units (Yilmaz et al., 1988) was transferred to the slope units. The slope units of the study area were determined by Alvioli et al. (2016) and Alvioli et al. (2020) using the "r.slopeunits v1.0" code presented in their study. This was implemented with GRASS GIS on the Linux operating system. Subsequently, presence-absence information obtained from landslide source points was incorporated into the slope units to create a data matrix.

The logistic regression algorithm was executed using Python code in the final stage. In this stage, the data matrix was standardized. Then, the data was split into training and testing sets. 20% of the data was extracted for testing purposes. The Receiver Operating Characteristic (ROC) curve was plotted, and the Area Under the Curve (AUC) value was calculated. The model has been used after it was run and validated (Şekil 2).

Results and Discussion

Although the Aras River basin is a mountainous region with high landslide density, records show only 18 landslide events between 1992 and 2016 (Gökçe et al., 2008). Additionally, the General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) of Turkey has identified 450 landslides in the study area. The number of landslides identified in this study is approximately 8.5 times greater than that.

Although differences exist among inventories due to factors such as currency, scale, and user knowledge (Guzzetti, 2005; Galli et al., 2008; Guzzetti et al., 2012), the disparity between

them is quite significant. It has been determined that 13% of the study area is prone to landslides, and they have been re-activated. Therefore, a susceptibility study that expresses the spatial probability of landslides in this area is crucial due to its high landslide risk. Selecting parameters associated with landslides regionally for susceptibility is more accurate than choosing them randomly (Van Den Eeckhaut vd., 2012; Loche vd., 2022). The relationship between landslide processes and the factors controlling landslides has been more accurately determined with the updated landslide inventory (Wieczorek, 1984; Malamud vd., 2004; Galli vd., 2008).

1. Giriş

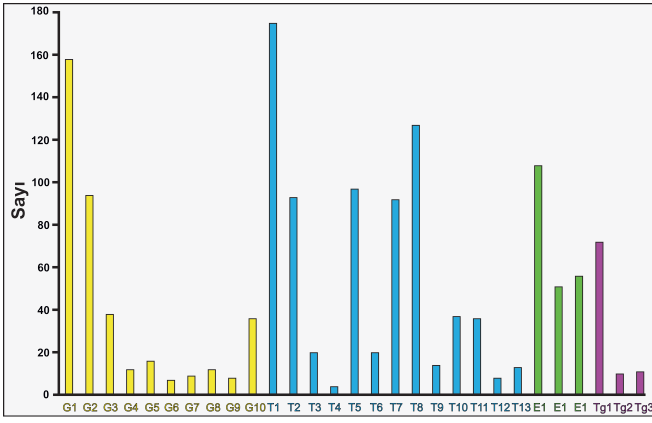
Heyelanlar frekans, büyüklük ve hıza bağlı oluşturdıkları katas-trofik etkiyle pek çok ekonomik ve sosyal kayıpların nedenidir. Özellikle rölöf geçişinin keskin olduğu dağlık kesimlerde katas-trofik heyelanlar çok fazladır. Bu tip dağlık alanlardaki yerleş-melerin, topoğrafyanın elverişli olduğu kısıtlı alanlarda aralıklı ve kümeler halinde olması, beşerî faktörlerin heyelana maruz kalma ihtimallerini artırmaktadır. Bu nedenle heyelanın mekân-sal olasılığını açıklayan duyarlılık çalışmaları bu kesimlerde ya-şayanlar için hayati önem taşımaktadır. Geçmişten günümüze pek çok araştırmacı tarafından heyelan yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde, oluşabilecek riskleri azaltmak için heyelan duyarlılık haritaları hazırlanmıştır (Brabb & Pampeyan, 1972; Gökceoglu & Aksoy, 1996; Lee vd., 2003; Nefeslioglu vd., 2008). Araştırmacılar duyarlılık haritalarını oluştururken nitel ve nicel olmak üzere temelde iki yaklaşım benimsemişlerdir (Brabb & Pampeyan, 1972; Pachauri & Pant, 1992; Gökceoglu & Aksoy, 1996; Atkinson & Massari, 1998; Ercanoglu & Gökceoglu, 2002; Ciurleo vd., 2016). Nicel yaklaşımlardan istatistiksel yaklaşımı, pek çok araştırmacı orta ölçek mekanlara uygulamış ve başarılı so-nuçlar elde etmiştir (Carrara vd., 1991; Lee & Min, 2001; San-tacana vd., 2003; Lee vd., 2004; Malamud vd., 2004; Nandi & Shakoor, 2010). Araştırmacılar istatistiksel modelleri uygularken heyelanı kontrol eden faktörlerin analizinin detaylı yapılması gerektiğine dikkat çekmiştir (Ercanoglu & Gökceoglu, 2002; Guzzetti vd., 2006; Nefeslioglu vd., 2008; Reichenbach vd., 2018). Hangi faktörlerin heyelanı kontrol ettiği anlaşılmadan oluşturulan duyarlılık, tehlike ve risk değerlendirmelerinin sağ-lam bir temeli olmadığı gibi elde edilen sonuçlar da tutarsızdır (Cihangir, 2022). Heyelanı etkileyen jeolojik, jeomorfolojik, to-poğrafik ve çevresel faktörlerin ne olduğu sorgulanmadan ya-pılan duyarlılık çalışmalarına literatürde sıkça rastlanılmaktadır. Araştırmacılar duyarlılık, tehlike ve risk değerlendirmelerinde heyelana etki eden parametrelerin doğru seçilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir (Malamud vd., 2004; Guzzetti vd., 2008; Van Westen vd., 2008; Samia vd., 2017). Bu nedenle heyelanı kont-rol eden unsurların heyelan ile ilişkisinin doğru belirlenmesi de bu açıdan önemlidir. Bu ilişkinin doğruluğu ise heyelan envan-terinin kalitesine bağlıdır (Kirschbaum vd., 2009; Trigila vd., 2010; Guzzetti vd., 2012; Görüm, 2019; Lei vd., 2019; Asadi vd., 2024; Liu vd., 2024). Uniformitarianizm ilkesinde belirtildiği üzere “günümüz geçmişin anahtarı” (Hutton, 1899) olduğu gibi geleceğin de anahtarıdır (Hay vd., 1997). Bu ilkedен hareketle geçmişteki heyelanları kapsayan heyelan envanterinin duyarlı-lıkta dikkate alınması önemlidir.

Heyelan envanteri oluştururken genel olarak hareket ve mal-zeme tipine bağlı şekillenen Varnes (1978), WP/WLI (1994), Cruden ve Varnes (1996) sınıflandırmaları jeolojik ve jeoteknik

açıdan pratiklik sağladığı için daha fazla tercih edilmektedir. Aynı zamanda heyelan envanteri belirli varsayımlar esas alına-rak oluşturulmaktadır (Guzzetti vd., 2012). Bunlar; (I) heyelanın topoğrafik imzasının heyelan tipi, zaman, aktivite, eğim açısı ve hızına göre değiştiği (Pašek, 1975; Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996; Dikau vd., 1997), (II) bu imzanın uydu görüntüsü, hava foto ve SYM üzerinden ayırt edildiği, (III) heyelanın fiziksel ve mekanik koşullar altında rastgele gerçekleşmediği varsayım-larıdır. Bu esaslar çerçevesinde oluşturulan heyelan envanteri-nin duyarlılıkla ilişkilendirilmesinde önemli bir husus, duyarlılığın heyelan tipi özelinde değerlendirilmesidir. Bunun nedenleri arasında topoğrafik ve litolojik koşulların heyelan ti-pine göre farklı derece de etki göstermesidir. Örneğin eğimin 45° fazla olduğu yamaçlarda, akma ve kaymadan ziyade düşme tipi heyelanlar daha sık görülmektedir (Cihangir, 2022). Bundan farklı olarak akmalara topoğrafik nemliliğin yüksek olduğu ya-maçlarda daha fazla rastlanılmaktadır (Cihangir vd., 2018).

Model oluştururken heyelanı kontrol eden faktör ilişkisi doğ-rudan temel aldığı, ilişki katsayısını uzmandan bağımsız değer-lendirdiği ve model test başarısı yüksek olduğu için en çok tercih edilen istatistiksel yaklaşımdan biri lojistik regresyondur (Gorsevski vd., 2000; Ayalew & Yamagishi, 2005; Van Den Eeck-haut vd., 2006; Bui vd., 2011; Lombardo & Mai, 2018). Heyela-nın varlık-yokluk bilgisine dayanan bu ve buna benzer yaklaşımlarda, heyelan bilgisinin alındığı noktanın duyarlılığın başarısını etkilediği bilinmelidir. Bu sebeple araştırmacılar çe-kirdek hücre örnekleme (Süzen & Doyuran, 2004), ana ayna zon üst kısım (Clerici vd., 2006), yeniden yapılandırılmış topo-ğrafya (Gorum vd., 2008), modifiye çekirdek hücre örnekleme stratejisi (Dagdelenler vd., 2016) gibi farklı yöntemlerle duyar-lılık değerlendirmelerinde heyelan bilgisini dahil ederek, bunun önemini vurgulamışlardır. Diğer bir husus heyelan duyarlılık modellerinin piksel veya düzensiz vektörler şeklinde oluşturul-masıdır (Cihangir, 2022). Araştırmacılar her iki tabanda da du-yarlılık oluşturulabilineceğini söylese de jeomorfolojik açıdan homojenlik sağladığı için havza, mikro havza ve yamaç ünitesi ele almak daha doğru bir yaklaşımdır (Guzzetti, 2005). Alvioli vd. (2016) ve Alvioli vd. (2020) yamaç aktivitesi olan heyelanın fiziksel bütünlük sağladığı için yamaç ünitesi olarak değerklen-dirilmesinin daha doğru olacağı konusunda tavsiyede bulun-muşlardır.

Genel olarak bu çalışma heyelanın en yoğun olduğu Aras nehri havzasında risk azaltmak için heyelan duyarlılık modeli sunmak-tadır. Çalışmada güncel heyelan envanteri ile heyelanı denet-leyen faktörler ilişkilendirilmektedir. Literatürde en çok kullanılan parametreler derlenmiştir (Şekil 1). Güncel heyelan envanteri ile bu parametreler değerlendirilmiştir. Çalışma alanın bölgesel özellikleri doğrultusunda yapılan kernel ve histogram analizleri heyelan ve etkili faktör ilişkisini ortaya koyarak doğru parametre seçimini sağlamıştır. Seçilen parametrenin farklı he-yelan tipinde etki derecesine göre ilişkilendirmesi lojistik reg-resyon ile makine öğrenmesinde sağlanmıştır. Bu ilişkilendirmede, heyelan bilgisi heyelanın kaynak noktasından alınarak daha başarılı sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda duyarlılık modeli, fiziki bütünlük sağlayan yamaç üniteleri ile oluşturulmuştur. Böylece elde edilen duyarlılık ha-ritasının risk azaltma ve bölgesel planlama açısından kolay kul-lanılabilirliği amaçlanmıştır.



Şekil 1. Heyelan duyarlılık, tehlike ve risk çalışmalarında kullanılan parametreler (litoloji (G1), yapısal çizgisellik (G2), yapısal jeoloji elemanları ve eğim arasındaki ilişki (G3), yeraltı suyu (G4), sediman kalınlığı (G5), süreksizlik yoğunluğu (G6), ayrışma derecesi (G7), toprak yapısı (G8), tabaka pozisyonu (G9), yüzey materyali (G10), eğim (T1), drenaj ağı ve yoğunluğu (T2), rölyef (T3), yüzey süreci (T4), yükselti (T5), ana veya detaylı jeomorfolojik ünite (T6), yamaç profili (T7), bakı (T8), yamaç uzunluğu (T9), akarsu güç indeksi (T10), topoğrafik nemlilik indeksi (T11), topoğrafik geçirgenlik indeksi (T12), topoğrafik pürüzlülük indeksi (T13), arazi kullanımı (E1), vejetasyon (E2), yol yoğunluk (E3), iklim (Tg1), Sismik (Tg2), Antropojenik (Tg3)) (2022 yılına kadar en az 20 atf alan uluslararası yayınlar arasından seçilen 200 çalışma).

Figure 1. Parameters used in landslide susceptibility (lithology (G1), structural lineations (G2), relationship between structural geological elements and slope (G3), groundwater (G4), sediment thickness (G5), discontinuity density (G6), weathering degree (G7), soil structure (G8), layer positions (G9), surface material (G10), slope (T1), drainage network and density (T2), relief (T3), surface process (T4), elevation (T5), main or detailed geomorphological unit (T6), slope curvature (T7), aspect (T8), slope length (T9), stream power index (T10), topographic wetness index (T11), topographic permeability index (T12), topographic roughness index (T13), landuse (E1), vegetation (E2), road density (E3), climatic (Tg1), seismic (Tg2), anthropogenic (Tg3)).

2. Veri ve Yöntem

2.1. Çalışma Sahasının Genel Özellikleri

Çalışma alanı 41°13'35,81"D-42°13'43,70"D ile 39°57'58,81"K-39°19'16,65"K koordinatları arasında ~3155 km² alan kaplamaktadır (Şekil 2). Aras nehri havzasının aşağı çıkışını oluşturan çalışma alanı içerisinde, Aras nehrine bağlı çok sayıda küçük sürekli, mevsimlik ve geçici akarsular bulunmaktadır. Bunun dışında havza içinde Mutlu mevki civarında Karasu çayı gibi daha büyük akarsu Aras nehrine dahil olmaktadır. Tekman ve Karayazı ilçe merkezi, havza içindeki en büyük yerleşmeleri oluşturmaktadır. Ortalama yükseltinin 2200 m olduğu dağlık ve engebeli bir bölgede bulunan çalışma alanında, Şahvet dağları 2922 m Kandil tepe ile Akdağları ise 2953 m Hoşalı dağı ile en yüksek zirveye sahiptir. Ortalama 11° yüksek eğim ve rölyefe sahip olan havzada kütle hareketleri mevcut topoğrafyanın şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır. Havzada Karasu çayının da içinden geçtiği Karasu ovasının dışında, havzanın kuzey sınırında Pasinler ovası bulunmaktadır. Havza içinde denüdasýona uğrayan yamaçlar, kuzey yönde akan Aras nehri ile bu ovaya malzeme taşımaktadır. İklim tipi olarak bölgede Köppen iklim sınıflandırması "Dsb" kışı şiddetli, yazı kurak ve serin alt tip etkilidir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Tekman ve Karayazı istasyonun bilgilerine göre bölgede Kasım-Nisan aylarında ortalama 7 gün kar yağışı etkili olmaktadır. Bu aylara ilişkin aylık ortalama kar kalınlığı, yaklaşık 80 cm ve karla örtülü gün sayısı

ise 19'dur. Ayrıca yıllık ortalama 450 mm yağmur yağışı gerçekleşmektedir. Tektonik olarak havza, Anatolid-Torid bloğu içerisinde yer almakta ve ofiyolit kuşağın bir kısmını içermektedir (Okay, 2008; Yıldırım & Parlak, 2008). Çalışma sahasının kuzey bölümü, Pasinler fay zone ile sınırlanmakta olup havzada Karayazı ve Karadağ doğrultu atımlı fayları da bulunmaktadır (Emre vd., 2013). Genel hâkim litoloji genç birimlerden yaşlıya doğru; Kuvaterner yaşlı alüvyonların yanı sıra konglomera-kumtaşı-çamurtaşı, bazalt-andezit, kireçtaşı, bazalt, kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı, bazalt-andezit-piroklastik, andezit, tuf, kumtaşı-çamurtaşı gibi Neojen yaşlı birimler havzanın büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu birimlerin dışında melanaj, peridotit-gabro, serpantinit, ofiyolitik kaya, peridotit gibi Kre-tase yaşlı birimler ve mermer, metavolkanik kaya gibi Mezozo-yik yaşlı birimlerde bulunmaktadır (Yılmaz vd., 1988).

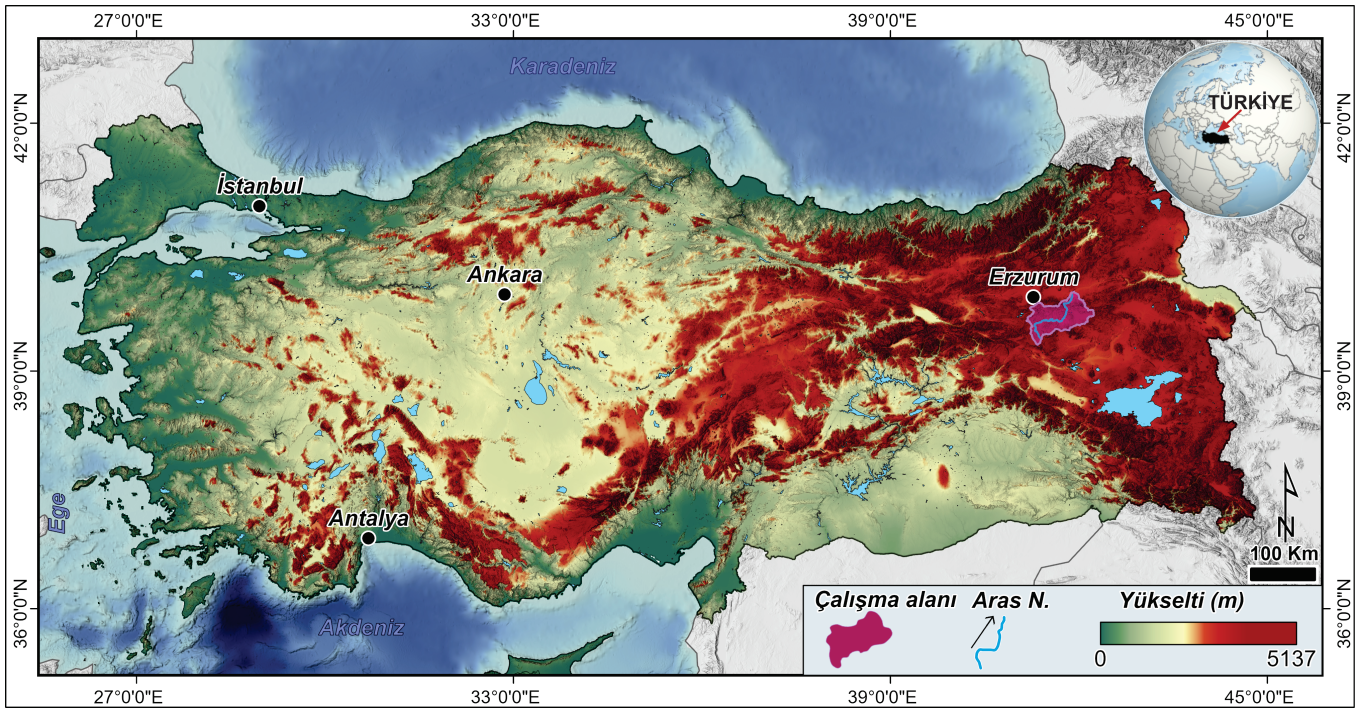
2.2. Materyal ve Metot

İlk aşamada heyelan envanteri, uzman esaslı görsel yorumlama ile oluşturulmuştur. Bu aşamada yüksek çözünürlüklü 10 m Sentinel 2 uydu görüntüsü, Harita Genel Müdürlüğü 5 m ve 1:25.000 ölçekli topoğrafya haritalarından oluşturulan 10 m sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır. Envanter oluşturma sürecinde heyelanın topoğrafik imzasını ayırt etmek için SYM ile elde edilen Kırmızı rölyef görüntü haritasından (ing. RRIM) faydalanılmıştır (Chiba vd., 2008; Chiba vd., 2019). Bu süreçte mekânsal sınırları belirlenen heyelanlar akma ve kayma olarak ana tiplerde sınıflandırılmıştır. Bu sınıflama esnasında heyelanların morfometrik özelliklerinden yararlanılmıştır.

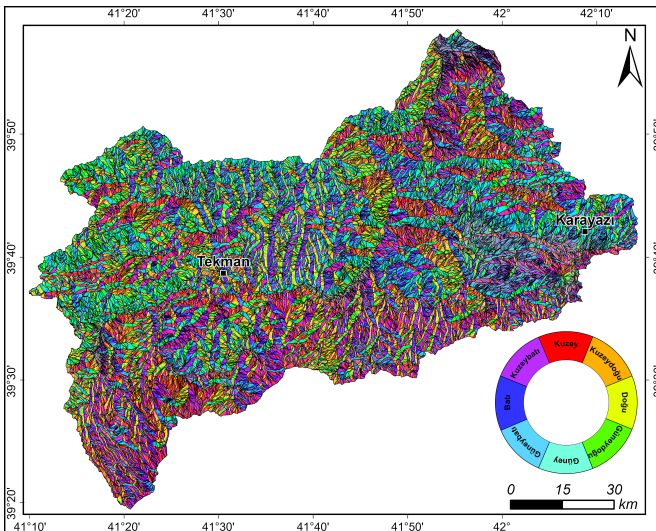
İkinci aşamada heyelanı kontrol eden faktörler bölgesel kernel ve histogram analizleri tespit edilmiştir. Heyelanı kontrol ettiği tespit edilen eğim, yükselti, rölyef, yamaç profili ve topoğrafik nemlilik indeksi faktörlerin haritaları oluşturulmuştur. Aras Nehri havzası yamaç ünitelerine ayrılmıştır (Şekil 3). Bu faktörlerin ortalama ve standart sapma değerlerinin yanı sıra litolojik birimlere ait bilgiler (Yılmaz vd., 1988) yamaç ünitelerine aktarılmıştır. Çalışma alanının yamaç üniteleri ise Alvioli vd. (2016) ve Alvioli vd. (2020)'nin çalışmalarında sunduğu "r.slopeunits v1.0" kodu kullanılarak linux işletim sisteminde GRASS GIS ile oluşturulmuştur. Sonrasında heyelan kaynak noktasından alınan varlık-yokluk bilgisi yamaç ünitelerine dahil edilerek veri matrisleri oluşturulmuştur. Ayrıca modelin başarısını negatif yönde etkilememesi için yamaç olmayan düzlükler (vadi tabanı, ova ve yapısal düzlükler) çıktı olarak model işleyişine dahil edilmemiştir.

Son aşamada model uygulamasında olasılık istatistiksel model olan lojistik regresyon tercih edilmiştir. Bu yöntem bağımlı bir değişken olan heyelan ile birden çok bağımsız değişken arasındaki neden-sonuç ilişkisini daha iyi kurduğu için tercih edilmiştir. Bu ilişkiyi pozitif veya negatif yönde kurabilir. Tahminde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki katsayı büyüklüğünü belirlemektedir. (Formül 1) Lojistik regresyon bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlere göre beklenen değerinin olasılık ifadesidir (Elmaci, 2016; Üzel, 2019).

Bu yöntemin mantığı heyelan için bakıldığında 0-1 ya da var-yok gibi ikili değişkenlerle ölçülen sonuçlarda, bir veya daha fazla bağımsız faktörün analiz edilmesine dayanır. Heyelan envanterinin detaylı hazırlanması bu bakımdan önemlidir. Burada heyelan bilgisini kaynak noktasından alınması ayrıca önemlidir.



Şekil 2. Çalışma alanı lokasyon haritası.
Figure 2. The study area location map.



Şekil 3. Çalışma alanına ait yamaç üniteleri.
Figure 3. The slope units of the study area.

Model uygulamasında heyelanlı yamaçlara “1” heyelan bulunmayan yamaçlara ise “0” bilgisi girilmesi ilişkinin kurulmasını sağlamaktadır.

Bağımlı değişken ikili olduğunda, dağılım y tek bir değere azalır. Olasılık denklemi (Formül 1);

$$P(y = 1) = p_i = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n)}} \quad (\text{Formül 1})$$

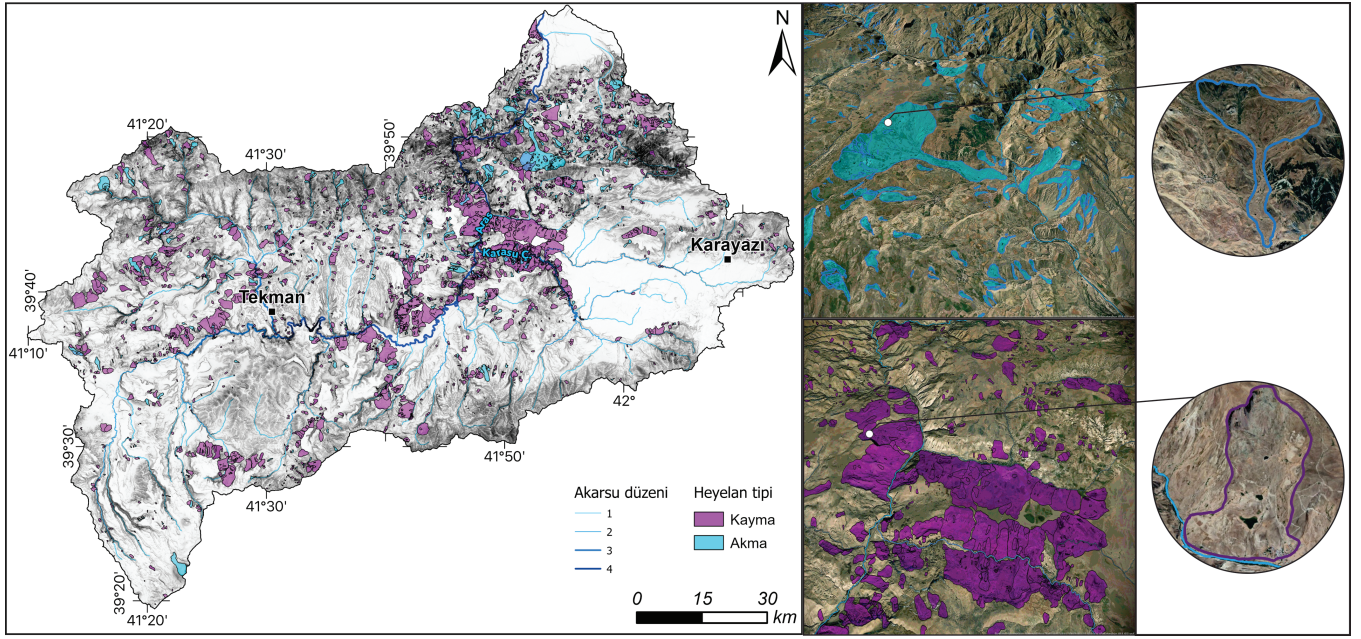
Diğer regresyon analizlerinde tahmin edilecek olan bağımlı değişkenin sürekli olması koşulu bulunurken, lojistik regresyon yönteminde tahmin edilecek olan bağımlı değişkenin sürekli olması koşulu bulunmaz (Elmacı, 2016; Üzel, 2019). Bağımlı değişken kesikli [0-1] değer alabilir. Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değişmektedir. $-\infty$ ile $+\infty$ arasında değerleri doğrusal olması için lojit dönüşüm kullanılır (Formül 2). 0–1 aralığındaki log olabilirlik değeri ba-

ğımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından tahmin edilme olasılığını göstermektedir.

$$\log = \frac{p}{1-p} \quad (\text{Formül 2})$$

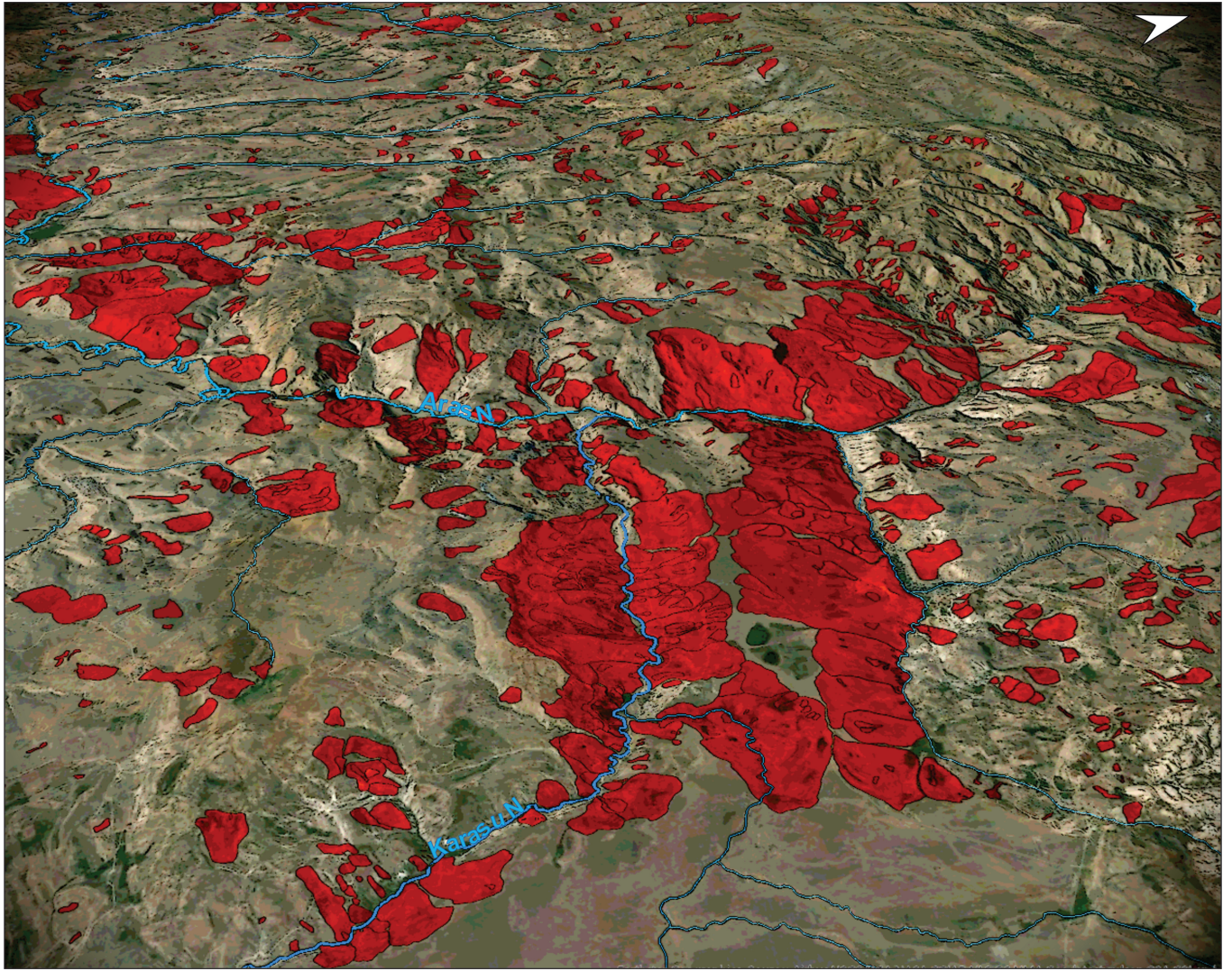
Akma ve kayma olarak iki ana tip heyelan için python makine öğrenmesi ile lojistik regresyon modeli kurulmuştur. Sonuçlar 5 sınıf olarak standart sapmaya göre çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere sınıflandırılmıştır. Sonrasında model başarısı ROC ve AUC değerleriyle test edilmiştir. Bu aşamada ROC eğrisi altındaki değer 0 ile 1 arasında değişmektedir. 1 değeri mükemmeli gösterirken, 0,5 değeri ise rastgele bir uyum olduğunu göstermektedir. Değerin 0,5-1 arasında olması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında farklı seviyede ilişki olduğuna işaret etmektedir.

Lojistik regresyon algoritması python kodu ile çalıştırılmıştır. Kod içerisinde “pandas”, “matplotlib.pyplot” ve “numpy” kütüphaneleri kullanılmıştır. Bu aşamada veri matrisi “from sklearn.preprocessing import StandardScaler” ile standartlaştırılmıştır. Daha sonra veriler öğrenme ve test verisi “from sklearn.model_selection import train_test_split” ile kümelendirilmiştir. Test olarak verinin %20’si ayıklanmıştır. Model “from sklearn.linear_model import LogisticRegression” ile uygulanmıştır. Model başarı ölçütünü belirlemek amacıyla Alıcı İşlem Karakteristiği (*ing. ROC*) eğrisinin çizilmesi ve Eğri Altındaki Alan (*ing. AUC*) değerleri “from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report” ve “sklearn.metrics import roc_curve, roc_auc_score” ile hesaplanmıştır. Modelde aşırı öğrenmenin (*ing. overfitting*) önüne geçmek için beş farklı tekrarda birbirinden bağımsız eğitim ve test verisinin oluşan model başarıları geçerlilik için incelenmiştir. İterasyonda minimum 0,65 ve maksimum 0,95 arasında ortalama değere sahip model geçerli kabul edildikten kullanımı sağlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 5. Heyelan tipleri.

Figure 5. The landslides types.



Şekil 6. İç içe gelişen heyelanlar.

Figure 6. Nested landslides.

maktadır. Daha düşük değerler ise ovalık alanlara yakın kesimlerde gözlenmektedir (Şekil 7D). Tüm heyelanlar bazında ortalama rölyef 320 m, en düşük 40 m ve en yüksek ise 731 m'dir. Genel olarak heyelanların rölyef medyanı 313 m değerlerindedir. Akma tipi heyelanlarda bu oran ortalama 362 m'dir. Akmalar en düşük 114 m ve en yüksek ise 673 m rölyef değerleri arasında gerçekleşmiştir. Akmaların rölyef medyan değeri ise 366 m'dir. Kaymalar, akmalara göre daha düşük rölyef ortalamasına sahiptir. Kaymalar en düşük 40 m ile en yüksek 695 m rölyef değerleri arasında gerçekleşmiştir. Kaymaların rölyef medyanı 330 m değerleridir (Şekil 8).

Havza içinde topoğrafik nemlilik indeksi 0-26 değerleri arasında değişmektedir. Ortalama değer, havza için 8,2'dir. Havzanın nemlilik değerinin medyanı 7 civarındadır. En nemli olan ova tabanları dışındaki nemli alanlar, havza içinde ana heyelanların

kaynak noktalarına karşılık gelmektedir (Şekil 7F). Genel olarak heyelanlar, 1-25 değerindeki nemli alanlarda görülmektedir. Tüm heyelanlar nemlilik açısından havza ile hemen hemen aynı özellikte olup, ortalama 7 değerindeki nemli alanlarda gerçekleşmiştir. Heyelan tipine göre nemli alanda gerçekleşme değerlerinde akmalar 23,1 kaymalar ise 25 değerlerine sahiptir.

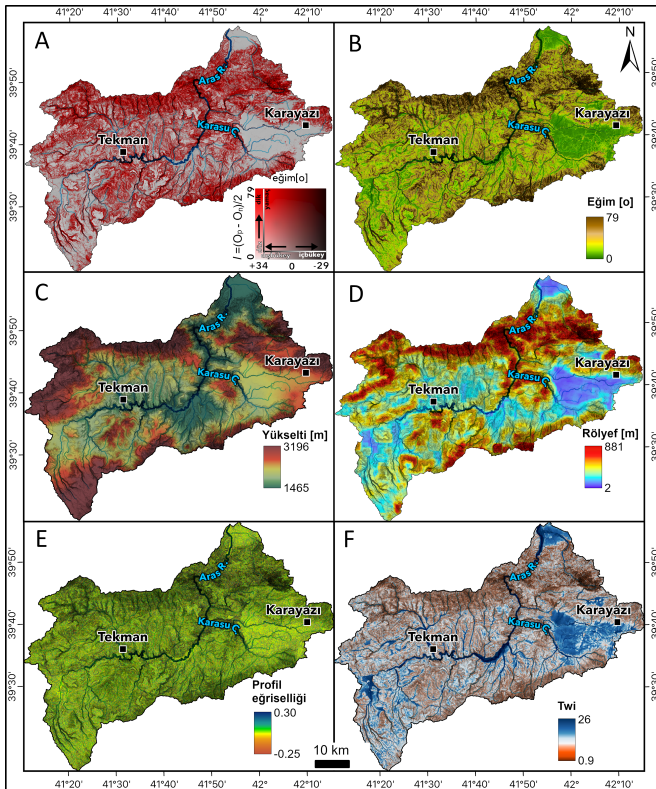
3.2.2. Litoloji

Heyelan malzemesi, kalınlığı, hareketi, yapı, doku, hidrojeolojisi, vizkozitesiyle akışkan davranışı gibi unsurların temelinde litoloji bulunmaktadır. Bu nedenle heyelanın hangi litolojik birimler içerisinde nasıl dağılım sergilediği önemlidir. Bu açıdan bakıldığında tüm heyelanların %23,3'ü Neojen yaşlı konglomera-kumtaşı-çamurtaşı birimlerinde meydana gelmiştir. Diğer birimlerde heyelan oranları ise Neojen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı %19,9, kireçtaşı %13, bazalt-andezit %8,3, bazalt-andezit-piroklastik kayaç %7,6, bazalt %5,7, kumtaşı-çamurtaşı %4,3 ve Kretase yaşlı melanjlara %6,7'dir. Ana tip bakımından akmaların yoğunlukla konglomera-kumtaşı-çamurtaşı (%28) ve kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimleri (%18) içerisinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Komplekslerde konglomera-kumtaşı-çamurtaşı (%27), kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı (%15) ve Kretase melanj (%14) birimlerinde ağırlıklı olarak gerçekleşmiştir. En fazla heyelan tipini barındıran kaymaların ise %22'si konglomera-kumtaşı-çamurtaşı, %21'si kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı ve %15'i ise kireçtaşı birimlerinde oluşmuştur (Şekil 9).

3.3. Duyarlılık Modeli

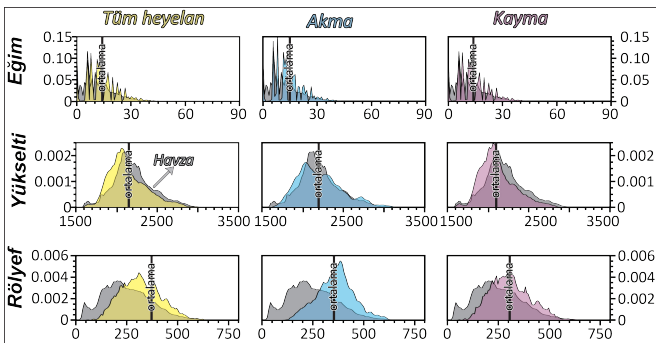
Heyelanı kontrol eden faktörler heyelan tipine göre farklı etkide bulunduğundan eğim, yükselti, rölyef, profil eğriliği, topoğrafik nemlilik indeksi ve litolojik faktörler modelde akma ve kaymalar için ayrı kullanılmıştır. Model performanslarında akma için 0,79 Alıcı İşlem Karakteristiği (ing. ROC) sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 10). Beş tekrarda birbirinden bağımsız eğitim ve test verisinin oluşturularak elde edildiği model başarısı geçerlilik için incelenmiştir. Akma duyarlılığının model başarısının 0,67-0,84 değerleri arasında değiştiği tespit edilmiştir. Modelin pozitif sınıf (1) doğru tahmin edilme oranı olan recall (1) değeri 0,78'dir. Ayrıca pozitif sınıf (1) tahminlerinin başarı oranı ve recall değerinin ortalamasını veren f1-score (1) değeri de 0,78'dir. 0-1 arasında değişen sonuçlar standart sapma sınıflarına çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır. Sonuçlara göre heyelanların yoğunluğu olduğu alanlarda yüksek duyarlılık çıktıları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Havzanın kuzey ve kuzeydoğusundaki akmaların yoğun olduğu yamaçların yüksek ve çok yüksek duyarlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Akma özelinde çok düşük ve düşük duyarlılığa sahip yamaçlar daha çok çalışma alanının batı kesiminde görülmektedir (Şekil 11).

Kaymalar için oluşturulan duyarlılık modelinde Alıcı İşlem Karakteristiğinin başarısının 0,75 olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10). Beş tekrarda birbirinden bağımsız eğitim ve test verisinin oluşturularak elde edildiği model başarısı incelenmiştir. Model başarısının 0,72-0,86 arasında değişmektedir. Kayma tipi duyarlılıkta recall (1) 0,78 ve f1 score (1) 0,75'tir. Duyarlılık çıktısında akmalarda olduğu gibi heyelanın yoğun olduğu havzanın kuzey ve kuzeydoğu bulunan yamaçların yüksek ve çok yüksek, havza batı ve güneybatı kesiminin ise çok düşük ve düşük duyarlılık gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 12).



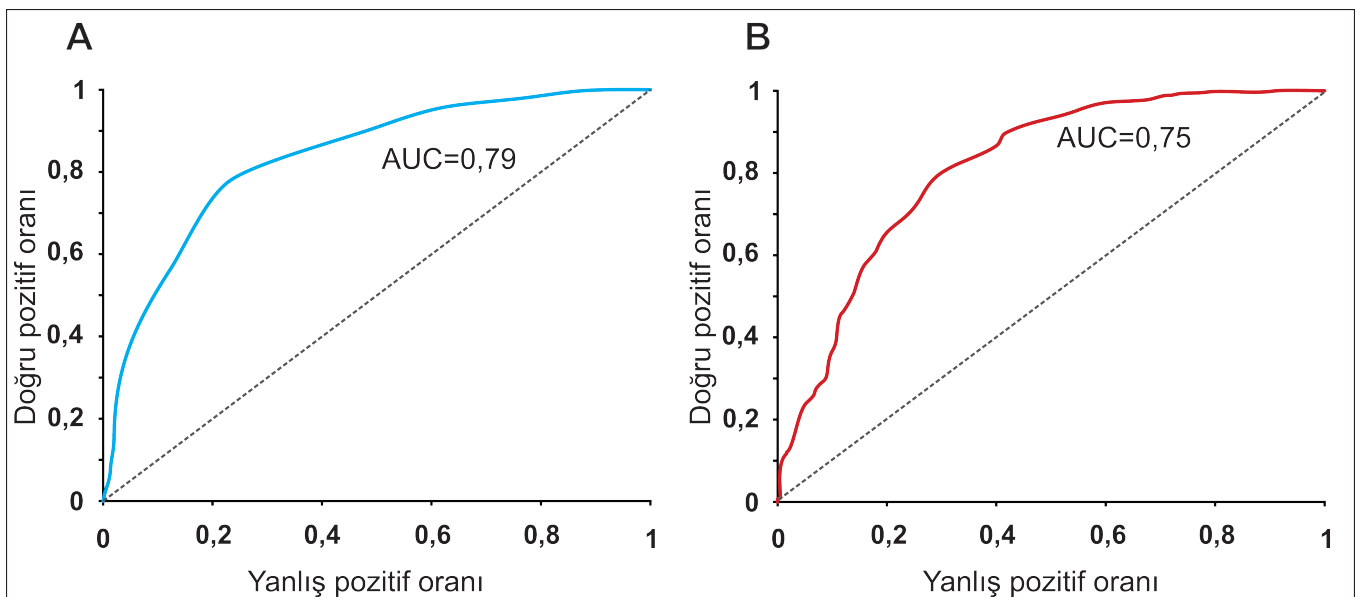
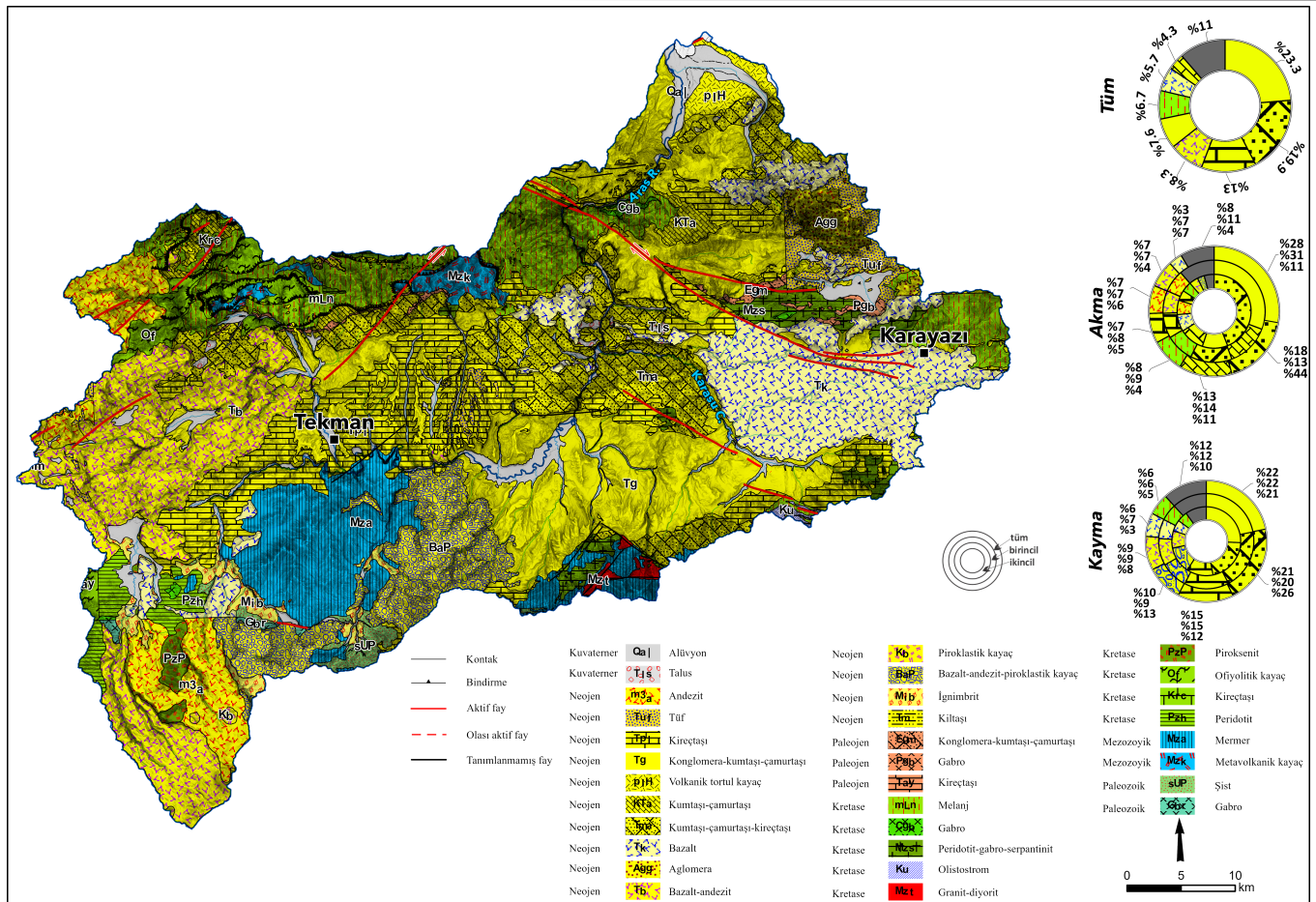
Şekil 7. Kırmızı Rölyef Görüntü Haritası (ing. RRIM) (A), Heyelana etki eden faktörler (eğim (B), yükselti (C), rölyef (D), profil eğriliği (E) ve topoğrafik nemlilik indeksi (F)) haritası.

Figure 7. The Red Relief Image Map (A) and the maps of factors controlling landslides (slope (B), elevation (C), relief (D), profile curvature (E) and topographic wetness index (F)).



Şekil 8. Heyelanı kontrol eden topoğrafik faktörlerin (eğim, yükseklik, rölyef) kernel olasılık dağılım kestirimleri.

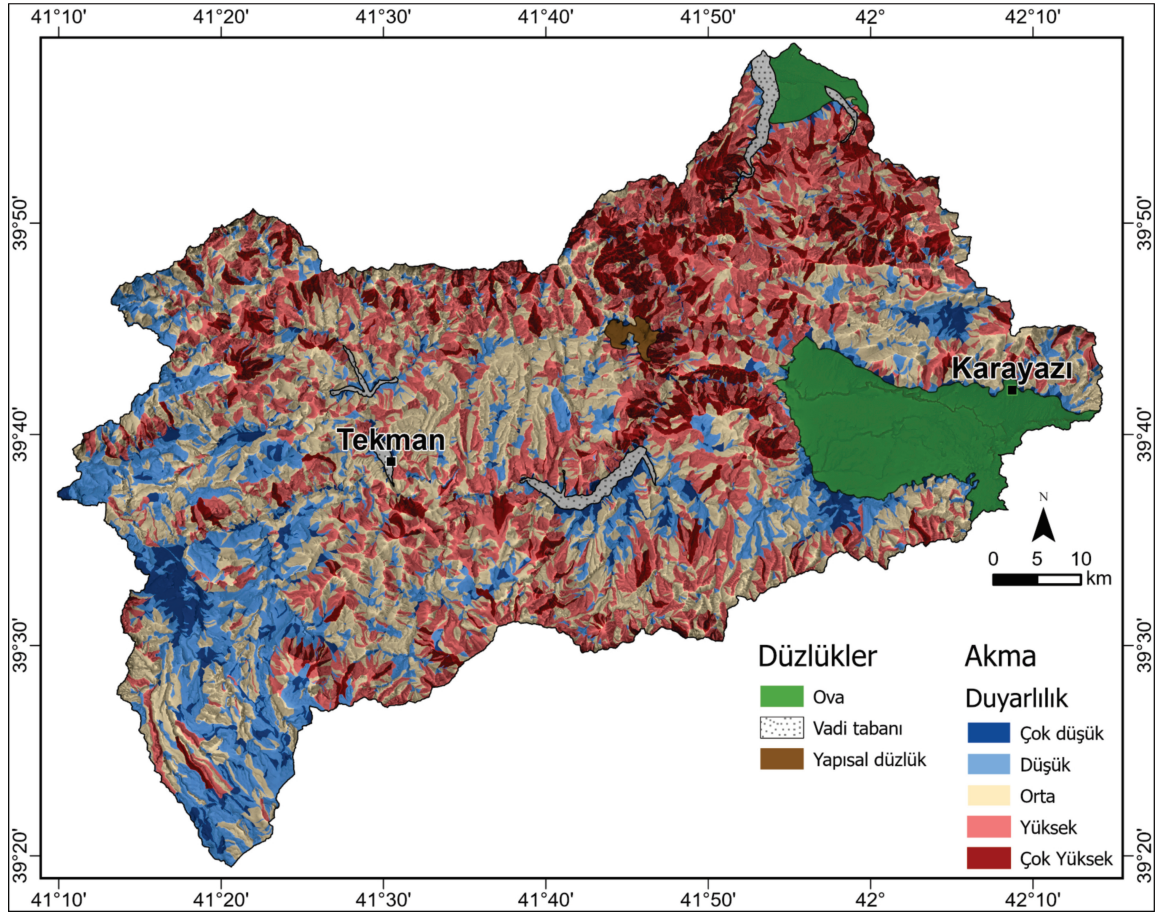
Figure 8. The kernel probability distribution estimations of topographic factors that controlling landslides (slope, elevation, relief).



4. Tartışma ve Sonuç

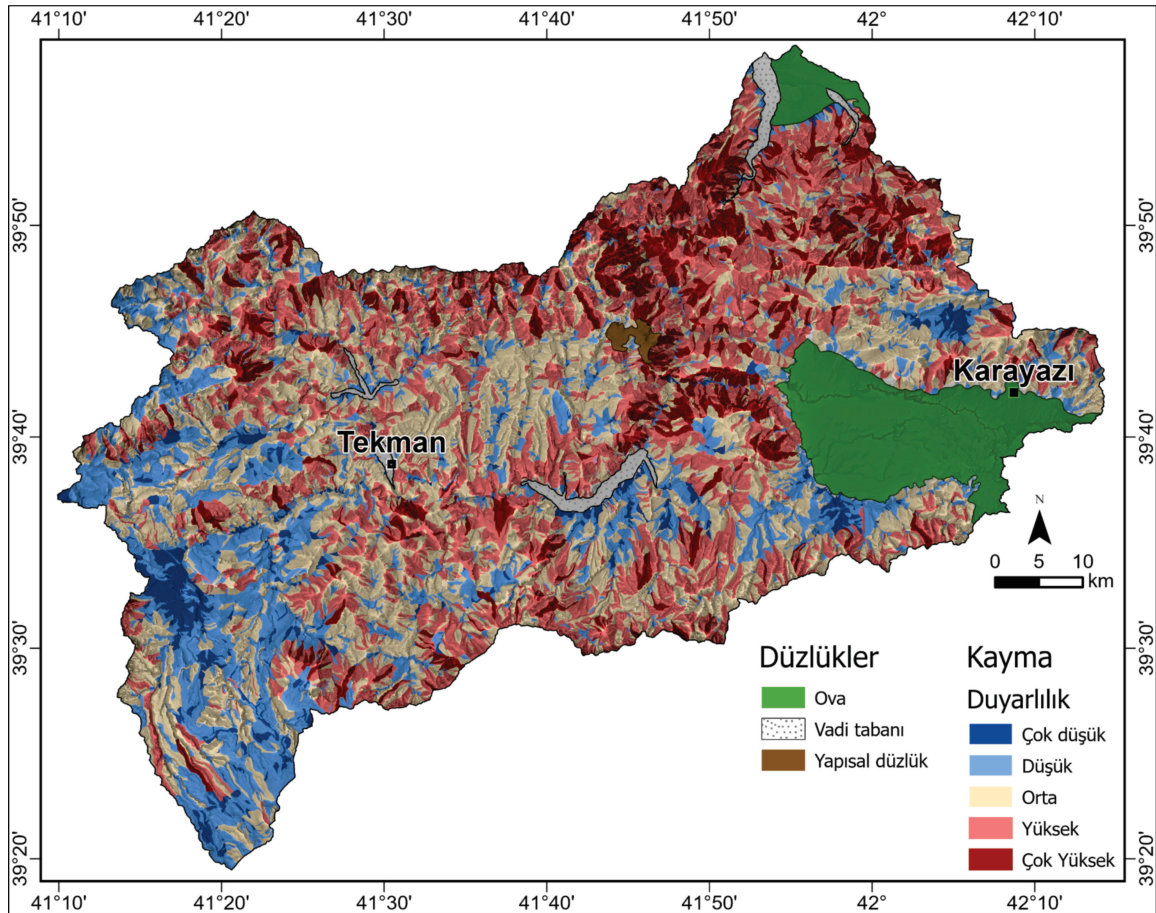
Aras Nehri havzasında heyelan yoğunluğu yüksek olmasına rağmen, 1992-2016 yılları arasında yalnızca 18 heyelan olayı kaydedilmiştir (Gökçe vd., 2008). Ayrıca, MTA'nın oluşturduğu 1:500.000 ölçekli Türkiye heyelan envanterinde çalışma alanında 450 heyelan tespit edilmiştir (Duman, 2009; Çan vd., 2013). Bu çalışmada belirlenen heyelan sayısı ise bunun yaklaşık 8,5 katıdır. Güncellik, ölçek ve kullanıcı bilgisi gibi envanterler

arasındaki farklılıklar (Guzzetti, 2005; Galli vd., 2008; Guzzetti vd., 2012) göz önüne alındığında bile, aradaki fark oldukça fazladır. Bu durum, heyelan envanterimizin detaylı ve güncel olduğunu göstermektedir. Envanter sonucuna göre havzanın %13'ü heyelanlıdır ve bu heyelanlar bölgede yeniden aktif hale gelmektedir. Dolayısıyla, riskin yüksek olduğu bu havzada, heyelanın mekânsal olasılığını ifade eden duyarlılık çalışması hayati önem taşımaktadır.



Şekil 11. Akma tipi heyelanların duyarlılık haritası.

Figure 11. The susceptibility map of flow type landslides.



Şekil 12. Kayma tipi heyelanların duyarlılık haritası.

Figure 12. The susceptibility map of slide type landslides.

Fakat duyarlılık çalışmasında bazı kritik noktalar vardır. Bunlardan en önemlisi parametre seçimidir. Literatürde, duyarlılıkta kullanılan parametrelerin rastgele kullanılmasından ziyade, bölgesel anlamda heyelan ile ilişkili faktörlere göre seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Van Den Eeckhaut vd., 2012; Loche vd., 2022). Nitekim birçok duyarlılık çalışmasında benzer faktörlerin aynı etki derecesi ile kullanıldığına (Şekil 1) sıkça rastlanmaktadır. Hem doğru parametrenin seçimi hem de heyelanı denetleyen süreçlerle heyelan ilişkisinin doğru belirlenmesinde envanter kalitesinin önemi büyüktür (Wieczorek, 1984; Malamud vd., 2004; Galli vd., 2008). Bu çalışmadaki güncel envanter, heyelan ile faktörler arasındaki ilişkinin kernel ve histogram analizleriyle daha doğru incelenmesine olanak sağlamıştır. Bu durum doğru parametre seçimine katkı sağlamıştır. Faktörlerin heyelanlarla oluşturdukları desenler, onların seçilmesinde önemli rol oynamıştır. Örneğin, bölgesel anlamda havzada heyelanı kontrol eden faktörlerin başında litolojinin geldiği görülmüştür. Litolojik olarak heyelanların %56,2'sini Neojen yaşlı konglomera-kumtaşı-çamurtaşı, kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı, kireçtaşı gibi sedimanter birimler ile bazalt-andezit, bazalt-andezit-piroklastik kayaç, bazalt gibi magmatik kayaçlar domine etmektedir. Bu sonuçlara göre, litolojik farklılıkların heyelan tipleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Topoğrafik faktörler açısından ise, akmalara ortalama eğim değerleri yüksektir. Eğim açısından bölgesel iklim tipi göz önüne alındığında, heyelanların %99'u regolit elverişli 45°'ye kadar eğimli topoğrafik ortamlarda gerçekleşmektedir. Ayrıca, heyelanların belirli rölyef değerleri arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunların dışında, akmalara bir kısmının kaymaların gövdelerinde ikincil heyelan olarak gerçekleştiği görülmüştür. Bunun nedeni, kaymaların topoğrafyada oluşturduğu göletlerin topoğrafik nemliliği artırmasıdır.

Genel olarak, çalışma bulguları heyelan tipinin topoğrafik ve litolojik olarak farklı desenler oluşturduğunu ve heyelanın belirtilen faktörler tarafından kontrol edildiğini, rastgele olmadığını göstermektedir. Bu sayede doğru parametre seçimi sağlanmıştır. Fakat bölgede heyelanlar yeniden aktif oldukça topoğrafik koşullar değişmekte ve bu değişim, topoğrafik koşullarla heyelan arasındaki ilişkiyi kurmada kısıtlılıklar oluşturmaktadır. Bu kısıtlılığın litoloji için daha az olduğunu söyleyebiliriz. Bunlara rağmen, faktörlerin nedenselliğine dayanarak bölge açısından ihtiyaç duyduğumuz duyarlılık modelini oluşturduk. Modelde lojistik regresyonu tercih ettik. Bu modeli tercih etmemizin sebebi, uygulanabilirlik ve esnekliğinin yanı sıra heyelan ve heyelana neden olan faktörler arasında ilişkiyi en iyi kuran yöntemlerden biri olmasıdır (Duman vd., 2006; Nefeslioglu vd., 2008; Falaschi vd., 2009; Bai vd., 2010; Lombardo vd., 2015). Makine öğrenmesi gibi günümüz yöntem ve araçlarındaki gelişim, modelin uygulanması sürecinde hataları en aza indirmiştir. Ayrıca, iterasyonlarla daha iyi başarılar elde edilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmada da heyelanın yoğun olduğu bölgedeki yamaçlarda uygulanan lojistik regresyon modeli başarılı sonuçlar vermiştir. Modelin başarısı iki ana tip heyelan duyarlılığı için %75'in üzerinde olup, model anlamlı kestirim sağlamıştır. Her iki ana tip duyarlılık sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, bu bölge özelinde farklı tipteki heyelanların iç içe gelişmesinden kaynaklanmaktadır. Duyarlılık için modellerin alt tip özelinde ele alınması gerektiğinin altını çizmekle birlikte, yamaç ünitesi olarak hazırlanmasının kullanılabilirlik ve basitlik sağladığını belirtmek isteriz.

Çıkar Çatışması/ Conflict of Interest: Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder. *The authors declare that there is no conflict of interest.*

Etik Kurulu Onayı/ Ethics Committee Approval: Bu çalışma için Etik Kurul Onay Belgesi gerekmemektedir. *Ethics Committee Approval is not required for this study.*

Teşekkür ve Katkı Belirtme/ Acknowledgements: Yazar, katkılarından dolayı hakemlere ve desteğinden ötürü Tolga Görüm'e teşekkürlerini sunar. *The author would like to thank the referees for their contributions and Tolga Görüm for his support.*

Kaynakça

- Alvioli, M., Guzzetti, F., & Marchesini, I. (2020). Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy. *Geomorphology*, 358, 107124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107124>
- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., Rossi, M., Ardizzone, F., Fiorucci, F., & Guzzetti, F. (2016). Automatic delineation of geomorphological slope units with r.slopeunits v1.0 and their optimization for landslide susceptibility modeling. *Geosci. Model Dev.*, 9(11), 3975-3991. doi:<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3975-2016>
- Asadi, A., Baise, L. G., Koch, M., Moaveni, B., Chatterjee, S., & Aimaity, Y. (2024). Pixel-based classification method for earthquake-induced landslide mapping using remotely sensed imagery, geospatial data and temporal change information. *Natural Hazards*, 120(6), 5163-5200. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-023-06399-8>
- Atkinson, P. M., & Massari, R. (1998). Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24(4), 373-385. doi:[https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00117-9)
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1), 15-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Bai, S.-B., Wang, J., Lü, G.-N., Zhou, P.-G., Hou, S.-S., & Xu, S.-N. (2010). GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), 23-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.025>
- Brabb, E. E., & Pampeyan, E. H. (1972). *Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California* [Report] (Publication No. 344). Miscellaneous Field Studies Map, Issue. U.S.G. Survey. <https://pubs.usgs.gov/publication/mf344>
- Bui, D. T., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59(3), 1413-1444. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-011-9844-2>
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(5), 427-445. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.3290160505>
- Chiba, T., Kaneta, S.-i., & Suzuki, Y. (2008). Red relief image

- map: new visualization method for three dimensional data. *The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B2), 1071-1076.
- Chiba, T., Kaneta, S. I., & Ohashi, M. (2019). Digital Terrain Representation Methods and Red Relief Image Map, A New Visualization Approach. *Proc. Int. Cartogr. Assoc.*, 2, 17. doi: <https://doi.org/10.5194/ica-proc-2-17-2019>
- Cihangir, M. E. (2022). Kayma tipi heyelanların farklı duyarlılık modellerinde kombinasyonu: Sakarya Havzası Yukarı Çığırı örneği. *Türk Coğrafya Dergisi* (80), 21-38. doi: <https://doi.org/10.17211/tcd.1065523>
- Cihangir, M. E., Görüm, T., & Nefeslioglu, H. A. (2018). Heyelan tetikleyici faktörlerine bağlı mekânsal hassasiyet değerlendirmesi. [Spatial sensitivity assessment based on landslide trigger factors]. *Türk Coğrafya Dergisi* (70), 133-142. doi: <https://doi.org/10.17211/tcd.410998>
- Ciurleo, M., Calvello, M., & Cascini, L. (2016). Susceptibility zoning of shallow landslides in fine grained soils by statistical methods. *Catena*, 139, 250-264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.017>
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., & Vescovi, P. (2006). A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50(7), 941-961. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0264-7>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. *Transportation research board special report* (247).
- 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
- Dagdelenler, G., Nefeslioglu, H. A., & Gokceoglu, C. (2016). Modification of seed cell sampling strategy for landslide susceptibility mapping: an application from the Eastern part of the Gallipoli Peninsula (Canakkale, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 575-590. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0759-0>
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M. L. (Eds.). (1997). *Landslide recognition: Identification, movement, and causes*. John Wiley & Sons.
- Duman, T. Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H. A., & Sonmez, H. (2006). Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*, 51(2), 241-256. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0322-1>
- Duman, T. Y., Olgun, Ş., Çan, T., Nefeslioglu, H.A., Hamzaçebi, S., Elmacı, H., Durmaz S. ve Çörekçioğlu, Ş.. (2009). *Türkiye Heyelan Envanteri Haritası-1:500.000 ölçekli Erzurum Paftası*. Ankara, MTA.
- Elmacı, H. (2016). *Ankara ili, Çubuk ve Kalecik ilçeleri ile Çankırı ili, Şabanözü ilçeleri arasının CBS tabanlı heyelan duyarlılık analizi* [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.
- 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, Özel Yayın Serisi, 30, 89.
- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology*, 41(6), 720-730. doi: <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0454-2>
- Falaschi, F., Giacomelli, F., Federici, P., Puccinelli, A., Avanzi, G. A., Pochini, A., & Ribolini, A. (2009). Logistic regression versus artificial neural networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy. *Natural Hazards*, 50(3), 551-569. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9356-5>
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3), 268-289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.023>
- Gorsevski, P. V., Gessler, P., & Foltz, R. B. (2000, September, 2 - 8). *Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS [Conference presentation abstract]*. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Banff, Alberta, Canada. https://www.researchgate.net/profile/Pece-Gorsevski/publication/313666224_Spatial_prediction_of_landslides_hazard_using_logistic_regression_and_GIS/links/615c6651c04f5909fd80792a/Spatial-prediction-of-landslides-hazard-using-logistic-regression-and-GIS.pdf
- Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., & Nefeslioglu, H. A. (2008). Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey). *Natural Hazards*, 46(3), 323-351. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9190-6>
- Gökceoglu, C., & Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44(1-4), 147-161. doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)81260-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)81260-4)
- Gökçe, O., Özden, Ş., & Demir, A. (2008). *Türkiye’de afetlerin mekânsal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri*. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü.
- Görüm, T. (2019). Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data. *Engineering Geology*, 258, 105155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105155>
- Guzzetti, F. (2005). *Landslide Hazard and Risk Assessment* [Unpublished doctoral dissertation]. University of Bonn.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P., & Rossi, M. (2008). Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 96(1), 105-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.07.015>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1), 42-66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1), 166-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.007>
- Hatchinson, J. (1988, September, 1). *Morphological and geo-technical parameters of landslides in relation to geology and hydrology [Conference presentation abstract]*. Proc.

- 1st. Int. Symp. on Landslides. Lausanne, Switzerland. <https://www.sciepub.com/reference/209037>
- Hay, W. W., DeConto, R. M., & Wold, C. N. (1997). Climate: Is the past the key to the future? *Geologische Rundschau*, 86(2), 471-491. doi:<https://doi.org/10.1007/s005310050155>
- Hutton, J. (1899). *Theory of the earth: With proofs and illustrations* (Vol. 111). Geological society.
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., & Lerner-Lam, A. (2009). Evaluation of a preliminary satellite-based landslide hazard algorithm using global landslide inventories. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(3), 673-686. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-9-673-2009>
- Lee, S., Choi, J., & Min, K. (2004). Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11), 2037-2052. doi:<https://doi.org/10.1080/01431160310001618734>
- Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40(9), 1095-1113. doi:<https://doi.org/10.1007/s002540100310>
- Lee, S., Ryu, J. H., Min, K., & Won, J. S. (2003). Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(12), 1361-1376. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.593>
- Lei, T., Zhang, Y., Lv, Z., Li, S., Liu, S., & Nandi, A. K. (2019). Landslide Inventory Mapping From Bitemporal Images Using Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(6), 982-986. doi:<https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2889307>
- Liu, X., Zhao, C., Yin, Y., Tomás, R., Zhang, J., Zhang, Q., Wei, Y., Wang, M., & Lopez-Sanchez, J. M. (2024). Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region: Deqin County, southern Tibet Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114030. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114030>
- Loche, M., Alvioli, M., Marchesini, I., Bakka, H., & Lombardo, L. (2022). Landslide susceptibility maps of Italy: Lesson learnt from dealing with multiple landslide types and the uneven spatial distribution of the national inventory. *Earth-Science Reviews*, 232, 104125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104125>
- Lombardo, L., Cama, M., Conoscenti, C., Märker, M., & Rotigliano, E. (2015). Binary logistic regression versus stochastic gradient boosted decision trees in assessing landslide susceptibility for multiple-occurring landslide events: application to the 2009 storm event in Messina (Sicily, southern Italy). *Natural Hazards*, 79(3), 1621-1648. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-015-1915-3>
- Lombardo, L., & Mai, P. M. (2018). Presenting logistic regression-based landslide susceptibility results. *Engineering Geology*, 244, 14-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.019>
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711. doi:<https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- Nandi, A., & Shakkor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, 110(1), 11-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.10.001>
- Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, 97(3), 171-191. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.004>
- Okay, A. I. (2008). Geology of Turkey: a synopsis. *Anschnitt*, 21, 19-42.
- Özpolat, E., Yıldırım, C., & Görüm, T. (2020). The Quaternary landforms of the Büyük Menderes Graben System: the southern Menderes Massif, western Anatolia, Turkey. *Journal of Maps*, 16(2), 405-419. doi:<https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1764874>
- Pachauri, A., & Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32(1-2), 81-100. doi:[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(92\)90020-Y](https://doi.org/10.1016/0013-7952(92)90020-Y)
- Pašek, J. (1975). Landslides inventory. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 12(1), 73-74.
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.039>
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., & Marturiá, J. (2003). A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30(3), 281-295. doi:<https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007169.28860.80>
- Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71(3), 303-321. doi:[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00143-1)
- Trigila, A., Iadanza, C., & Spizzichino, D. (2010). Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. *Landslides*, 7(4), 455-470. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-010-0213-0>
- Üzel, G. N. (2019). *Van ili heyelan duyarlılığının lojistik regresyon analizi ve frekans oranı yöntemiyle incelenmesi* [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., Malet, J. P., Montanarella, L., & Nadim, F. (2012). Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. *Landslides*, 9(3), 357-369. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-011-0299-z>
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghe, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76(3), 392-410. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.12.003>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerabil-

- ity assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3), 112-131.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Yıldırım, N., & Parlak, O. (2008). Tekman-Pasinler (Erzurum) arasında yüzeyleyen ofiyolitik birimlerin jeolojisi ve petrografik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 35-45.
- Yılmaz, A., Terlemez, İ., & Uysal, Ş. (1988). 1 : 100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi Erzurum- 147 paftası. Ankara, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a Detailed Landslide-Inventory Map for Hazard Evaluation and Reduction. *Environmental & Engineering Geoscience*, 21(3), 337-342.
doi:<https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxi.3.337>
- WP/WLI. (1994). A suggested method for describing the causes of a landslide. *Bull Int Assoc Eng Geol*, 50, 71-74.