



Heyelan Duyarlılığının Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Frekans Oranı (FR) ile Belirlenmesi: Kürk Çayı Havzası (Elazığ) Örneği

Determination of Landslide Susceptibility by Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio: Kürk Stream Basin (Elazığ) Example

Turgay ÖZ¹

¹Arş.Gör.Dr, Fırat Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Elazığ, toz@firat.edu.tr, orcid.org/0000-0002-3749-4193

Araştırma Makalesi/Research Article

Makale Bilgisi

Geliş/Received:
23.10.2024
Kabul/Accepted:
25.03.2025

DOI:

10.18069/firatsbed.1572408

Anahtar Kelimeler

Frekans Oranı, Analitik Hiyerarşi, Heyelan Duyarlılığı, Heyelan Riski, Coğrafi Bilgi Sistemleri

Keywords

Frequency Ratio, Analytical Hierarchy, Landslide Susceptibility, Landslide Risk, Geographic Information Systems

ÖZ

Heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulması, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama Teknolojileri (UA) kullanılarak gerçekleştirilen önemli bir çalışmadır. Bu haritalar, riskli bölgelerin belirlenmesini ve afet yönetim planlarının geliştirilmesini sağlar. Çalışma alanı olarak seçilen Kürk Çayı Havzası, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAF) üzerinde yer almakta olup, bölgenin tektonik olarak aktif bir yapıya sahip olması heyelan riskini artırmaktadır. Ayrıca, litolojik çeşitlilik ve yüksek eğim oranları da heyelan oluşumunu tetikleyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Çalışmada heyelan duyarlılık haritaları 12 faktör kullanılarak Frekans Oranı (FR) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleri kullanılarak üretilmiş ve doğrulukları ROC eğrisi ile test edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, FR yöntemi, istatistiksel hesaplamaya dayalı daha objektif bir yaklaşım sunarak, AHS yöntemine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. FR yönteminin doğruluğu, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma hem istatistiksel hem de uzman temelli yöntemleri bir araya getirerek kapsamlı bir heyelan duyarlılık analizi sunmaktadır. Üretilen duyarlılık haritalarının, havza yönetimi, afet riskinin azaltılması ve sürdürülebilir arazi kullanımı gibi alanlarda önemli katkılar sağlayabileceği ortaya konulmuştur.

ABSTRACT

The creation of landslide susceptibility maps is an important study carried out using Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing Technologies (RST). These maps enable the determination of risky areas and the development of disaster management plans. The Kürk Stream Basin selected as the study area is located on the East Anatolian Fault Line, and the tectonically active structure of the region increases the risk of landslides. In addition, lithological diversity and high slope rates are among the important factors that trigger landslide formation. In the study, landslide susceptibility maps were produced using Frequency Ratio (FR) and Analytical Hierarchy Process (AHS) methods and their accuracy was tested with the ROC curve. According to the analysis results, the FR method provided a more objective approach based on statistical calculation and yielded more successful results compared to the AHS method. The accuracy of the FR method reveals that it is an effective method in the production of landslide susceptibility maps. In conclusion, this study offers a comprehensive landslide susceptibility analysis by combining both statistical and expert-based methods. It has been demonstrated that the produced susceptibility maps can make significant contributions to areas such as watershed management, disaster risk reduction and sustainable land use.

Atf/Citation: Öz, T. (2025). Heyelan Duyarlılığının Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Frekans Oranı (FR) ile Belirlenmesi: Kürk Çayı Havzası (Elazığ) Örneği. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 35, 2, 467-485

Sorumlu yazar/Corresponding author: Turgay OZ, toz@firat.edu.tr

1.Giriş

Heyelanlar, doğal faktörlerin (jeoloji, jeomorfoloji, eğim, iklim, bitki örtüsü) ve beşeri faktörlerin (arazi kullanımı, alt yapı çalışmaları, bina yapımı vb.) etkisiyle meydana gelen, hem can hem de mal kayıplarına yol açarak toplumları derinden etkileyen afet türlerindendir. Yapılan araştırmalar, heyelan olaylarının sıklıkla şiddetli yağışlar, depremler ve insan faaliyetleri gibi faktörlerle tetiklendiğini göstermektedir (Özdemir, 2008; Zhang & et al. 2019). Ayrıca bu olgu, arazi bozulmasına neden olmakta, toprak kayıplarına yol açmakta (Öz ve Günek, 2021) ve tapu-mülkiyet sorunlarına yol açmaktadır.

Heyelanların meydana gelme sıklığı ve etkileri, özellikle eğimli ve zayıf jeolojik yapıya sahip bölgelerde daha belirgin hale gelmektedir. Şiddetli yağışlar, depremler, arazi kullanım değişiklikleri ve insan müdahaleleri, bu tür olayların daha sık ve yıkıcı olmasına katkıda bulunur. Doğru bir heyelan duyarlılık analizi, risk altındaki bölgelerin belirlenmesi ve bu alanlarda alınacak önlemlerin planlanması açısından hayati önem taşımaktadır.

Her bölgedeki heyelan duyarlılık potansiyelinin belirlenmesi ve haritalandırılması, yağış miktarı, arazi kullanımı, jeolojik birimler, eğim derecesi, yola uzaklık, akarsulara uzaklık, faylara uzaklık gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Aydinoğlu ve Altürk 2022; Aghlmand, vd. 2020; Başalan, 2022; Çellek, vd. 2015; Chen & Chen, 2021; Das & Lepcha, 2019; El Jazouli et al. 2019). Bu bağlamda bu faktörleri belirlemek için en iyi yöntemi seçmek hala araştırmacıların temel konusudur. Coğrafi Bilgi Sistemi'nin (CBS) sürekli artan gelişimi heyelan duyarlılık bölgelerinin oluşturulmasını kolaylaştırmıştır.

Heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında çeşitli yöntemler kullanılır ve her yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlamaları vardır (Dalkes ve Korkmaz, 2023; Üzel ve Öztürk, 2021). En yaygın kullanılan yöntemlerden ikisi, Frekans Oranı (FR) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleridir (Başara ve Şişman, 2022; Ceylan Demirel ve Hastaoğlu, 2022; Dalkes ve Korkmaz, 2023). FR yöntemi, basitliği ve uygulanabilirliği nedeniyle tercih edilirken, AHS yöntemi ise uzman görüşlerini ve kriterlerin ağırlıklandırılmasını dahil etme yeteneğiyle öne çıkar (Ceylan Demirel ve Hastaoğlu, 2022; Üzel ve Öztürk, 2021).

FR yöntemi, geçmiş heyelan olaylarının mekansal dağılımını analiz ederek gelecekteki heyelanların olası yerlerini tahmin eder (Aydoğan ve Dağ, 2023; Pourghasemi et al, 2013; Öz ve Günek, 2021). Bu yöntemde, heyelan envanteri (Şekil 2) ve heyelan oluşumunu etkileyen faktörlere ait haritalar kullanılarak (Şekil 3) her bir faktörün alt sınıfları için frekans oranları hesaplanır (Dalkes ve Korkmaz, 2023; Üzel ve Öztürk, 2021). AHS yöntemi ise, karmaşık karar verme problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir çok kriterli karar verme yöntemidir (Berber ve Ceyran, 2023; Ceylan Demirel ve Hastaoğlu, 2022). Heyelan duyarlılık analizinde, AHS yöntemi kullanılarak, heyelan oluşumuna etki eden farklı faktörlerin (yükseklik, eğim, yağış vb) göreceli önemleri belirlenir ve bu faktörlere ağırlıklar atanır (Dalkes ve Korkmaz, 2023).

Her iki yöntemin de kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır (Dağdelenler, 2020). FR yönteminin uygulanması nispeten kolay olsa da, bu yöntem, faktörler arasındaki karmaşık etkileşimleri ve belirsizliklerin varlığını tam olarak ele alamayabilir (Aydoğan ve Dağ, 2023). AHS yöntemi ise, uzman görüşlerine dayalı subjektif değerlendirmeler içerebilir ve tutarlılık sorunları yaşanabilir. Bu nedenle, heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında, en uygun yöntemin seçimi, çalışmanın amacına, veriye erişebilirliğine ve bölgenin özelliklerine bağlıdır.

Bu çalışma da her iki yöntemin güçlü ve zayıf yönleri de göz önünde bulundurularak heyelana neden olan parametrelerin (yağış, tektonik hareketler, litoloji, arazi kullanımı, eğim, bakı vb.), (Şekil 3), Kürk Havzası içindeki etkisini incelemekte, analiz etmekte ve haritalandırmaktadır. Kürk Havzası, tektonik açıdan aktif bir havzadır. DAF'ın birkaç zon halinde bu havzayı kat ederek Hazar Gölüne doğru devam eder. DAF üzerinde yaşanan depremler tektonik açıdan halen aktif olduğunu gösterir ve bu sismik aktiviteler de heyelan riskini artıran başlıca unsurlardan biri olarak kabul edilir (Keefer, 1984; Xu, Qiang, 2022). Fay hattı boyunca meydana gelen gerilimler ve depremler, kütlelerin dengesini bozarak heyelanlara neden olabilecek ortamlar meydana getirir. DAF'ın bir bölümü Kürk Havzası içinden geçerek Hazar Gölü'ne doğru devam eder. Bölgede, zaman zaman yaşanan depremler ve ortaya çıkan enerji, heyelanların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Literatürde, Şengün vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Kürk Çayı Havzası'nın yaklaşık 10 km güneybatısında, DAF üzerinde meydana gelen Kabala heyelanını incelemiştir. Bu çalışma, DAF'ın heyelan oluşumu üzerindeki etkisini anlamak açısından dikkat çekici bir nitelik taşımaktadır. Kabala heyelanı, bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik yapısına dair önemli bilgiler sağlamış olup, Kürk Çayı Havzası'na olan yakınlığı nedeniyle bu havza için de dolaylı bir bağlam sunmaktadır. Bununla birlikte, Kürk Çayı Havzası özelinde

herhangi bir heyelan çalışmasının yapılmamış olması, bu alandaki önemli bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın amacı Kürk Havzası'nda sıklıkla meydana gelen heyelan olaylarına karşın havzasının heyelan duyarlılık haritalarını iki farklı yöntem ile üretmek ve yöntemlerin birbirine karşın üstünlüklerini test ederek model başarısını ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışmanın literature katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır.

- Kürk Çayı Havzasında geçmişte meydana gelen heyelanların dağılışı nasıldır?
- Havzada meydana gelen heyelanlar hangi faktörlerin etkisi altında gelişmiştir?
- Havza genelinde heyelana duyarlı alanların dağılışı nasıldır?
- Arazi kullanımı ile heyelana duyarlı alanların dağılışı arasında nasıl bir ilişki vardır?

2. Materyal ve Yöntem

Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan yöntemler, risk taşıyan alanlar da dikkate alınarak bölgedeki çevresel ve fiziki faktörlerin heyelan oluşumu üzerindeki etkisini inceler ve risk altındaki alanların tespit edilmesini sağlar. Literatürde, bu analizlerin gerçekleştirilmesinde FR ve AHS gibi çok sayıda yöntem geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Avcı, 2015; Avcı ve Sunkar, 2016; Dağdelenler, 2020; Üzel ve Öztürk, 2021; Aydınoglu ve Altürk, 2022; Chala, 2022; Berber ve Ceryan, 2023; Delkas ve Korkmaz, 2023). FO, farklı çevresel değişkenlerin geçmiş heyelan olaylarına olan katkısını istatistiksel olarak değerlendirirken (Lee ve Talib, 2005; Yalcin et al., 2011), AHS, uzman görüşlerine dayalı olarak faktörler arasındaki görece önem derecelerini karşılaştırmalı olarak belirlemektedir (Saaty, 1980). Bu yöntemler, heyelan risk haritalarının oluşturulmasında ve bölgesel risklerin önceliklendirilmesinde etkili sonuçlar vermiştir (Pradhan, 2010; Ayalew ve Yamagishi, 2005; Van Westen et al., 2008). Ayrıca, heyelan duyarlılığı çalışmaları, risk altındaki bölgelerin belirlenmesiyle birlikte, bu bölgelerdeki yerleşim ve arazi kullanım planlamalarına da öncülük etmektedir (Guzzetti et al., 2006).

FR, geçmiş heyelan olayları ile çevresel faktörler arasındaki ilişkileri istatistiksel olarak analiz eder ve her faktörün etkisini oranlayarak bir model oluşturur. AHS ise uzmanların deneyimlerine dayanarak bu faktörlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkilerini ağırlıklandırır. Bu iki yöntemin bir arada kullanılması, sayısal verileri objektif bir şekilde analiz ederken uzman bilgilerini de modelleme sürecine dâhil eder. AHS, faktörleri önem sırasına göre değerlendirirken, FR bu faktörlerin istatistiksel ilişkilerini ortaya koyar. Ayrıca, istatistiksel yöntemler, CBS ile uyum sağlayarak geniş alanlarda daha düşük maliyetle uygulanabilir. CBS entegrasyonu, heyelan duyarlılık haritalarının hızlı ve etkili bir şekilde oluşturulmasına olanak tanır, bu da bu yöntemlerin geniş çaplı analizlerde kullanılmasını yaygınlaştırır. Çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Çalışma alanının saha incelemesi ve heyelan envanter haritalarının çıkarılması
- Heyelana etki eden her bir faktör için veri setlerinin CBS analizleri ile hazırlanması
- FR ve AHS teknikleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi,
- Doğruluk analizleri yaparak duyarlılık haritalarının performans değerlendirmesinin yapılması

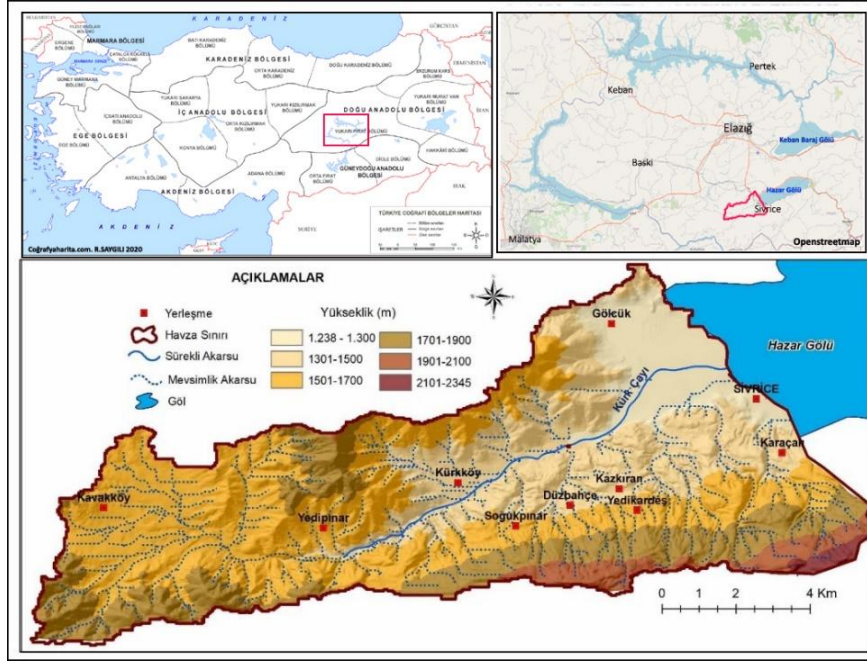
Çalışma kapsamında heyelana etki faktörlerin ağırlık oranları Coğrafi Bilgi Sistemi kullanılarak yapılmış AHS tekniği ise excel programı yardımıyla ikili karşılaştırma yapılmış ve çıkan ağırlık değerleri ise yine CBS yardımıyla heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Çalışmanın doğruluk analizlerinde ise SPSS programı kullanılmıştır. Bu amaçla daha önce heyelanlı sahaların % 30'luk kısmı doğruluk analizi için seçilmişti. Bu seçilen alanlara heyelanı temsil etmesi amacıyla 1 değeri heyelan olmayan alanlar için ise 0 değeri atanmış ve bu değerler esas alınarak ROC analizi yapılmıştır.

2.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri

Kürk Çayı Havzası, Doğu Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Fırat Bölümü'nde yer almakta olup, 89,20 km² yüz ölçümüne sahiptir (Şekil 1). Kürk Çayı, Kuşakçı Dağı'ndan doğarak Hazar Gölü'ne dökülmekte ve taşıdığı alüvyal malzemelerle geniş bir delta oluşturmaktadır. Çay, Hazarbaba ve Kuşakçı Dağları'ndan gelen yan kollarla beslenerek akış sürecinde çeşitli birikimler meydana getirmektedir (Şekil 1).

Havza, tektonik açıdan aktif bir bölgede yer almakta olup, Doğu Anadolu Fayı (DAF) havza içinden geçerek Hazar Gölü'ne doğru uzanmaktadır. Bu tektonik yapı, bölgede sık sık depremlere neden olarak heyelanları tetikleyici bir etken oluşturmaktadır. Tektonik hareketlilik, heyelan duyarlılığı açısından önemli bir faolup,

çalışma alanındaki risk analizlerinde dikkate alınmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının lokasyon haritası.

2.2. Çalışmada Kullanılan Veri Seti

Çalışma alanının coğrafi özellikleri ve uluslararası-ulusal literatür dikkate alınarak heyelan duyarlılık haritaları için kullanılabilir veri altlıkları belirlenmiştir. CBS teknikleri kullanılarak litoloji, yağış, yükselti, eğim, baki, arazi kullanımı, fay hattı, yol ve akarsu mesafesi, yamaç eğriselliği, topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) ve drenaj yoğunluğu olmak üzere 12 faktör belirlenmiştir. Faktörler, saha gözlemleri ve literatürde en yaygın kullanılan parametreler doğrultusunda seçilmiştir. Heyelan duyarlılığı analizlerinde, heyelan envanteri ve etkili faktörler kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

Heyelan Envanteri: Heyelan envanteri, geçmiş heyelan olaylarının yer, zaman, büyüklük ve tür gibi özelliklerinin kaydedildiği bir veri tabanıdır. CBS kullanılarak heyelanların konumu ve alan üzerindeki etkileri haritalanarak analiz edilmiştir. İnceleme alanına ait envanter, topoğrafik haritalar, uydu görüntüleri ve saha çalışmalarıyla oluşturulmuştur (Şekil 2). Kürk Çayı Havzası, heyelanların yanı sıra şiddetli oyuntu (Gully) erozyonu ile de karakterizedir. Bu nedenle, saha çalışmalarıyla heyelan alanları detaylı incelenerek haritaya aktarılmıştır. Heyelan envanteri, analiz için %70, doğrulama için %30 oranında bölümlendirilmiş olup, bu oranlar literatürde yeterli kabul edilmektedir (Wang et al., 2016; Deng et al., 2017; Anis et al., 2019).

Jeolojik Özellikler: İnceleme alanının genel jeolojik özellikleri Maden Tetkik Arama (MTA)'nın 1/25,000 ölçekli jeoloji paftalarından faydalanılarak belirlenmiş ve jeoloji haritası çizilmiştir (Şekil 3 (12)). İnceleme alanında birimler, yaşlıdan gence doğru sıralandığında Paleozoik yaşlı Pütürge Metamorfikleri, Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığı, Üst Kretase yaşlı Ofiyolitler, Orta Eosen yaşlı Maden Karmaşığı, Pliyo-Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve güncel alüvyonlardan oluşmaktadır (Tatar vd. 1995, Yılmaz, 2010), Şekil 3 (12)). İnceleme alanının en yaşlı birimini oluşturan Pütürge Metamorfikleri, büyük ölçüde karbonatlı kayaçların metamorfizmaya uğramasıyla oluşmuş olup, kalkışist ve rekristalize kireçtaşı gibi kayaçlar ile temsil edilmektedir (Tatar vd.1995; Yılmaz, 2010).

Yüksekova karmaşığı ise gabro, diyabaz, bazalt, andezit ve dasit gibi kayaç grubuyla temsil edilir ve DAF boyunca yüzeylenir (Tatar vd.1995). İnceleme alanının güneyinde geniş yayılım gösteren (Şekil 3 (12)) Orta Eosen yaşlı maden karmaşığı ise volkanik kayaçlar ve volkano tortul kayaçlarla temsil edilir (Yılmaz, 2010). Konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, bazaltik lavlar, andezit ve diyabaz daykaları karmaşığı temsil eden başlıca kayaç türleridir (Tatar vd.1995). Alüvyon ise kuvaterner yaşlı olup vadi tabanlarında görülmektedir. Kürk Çayı ve kolları aşındırıp taşıdığı alüvyal malzemeyi düşük dereceli eğime sahip aşağı çıkırda özelliklerde hazar

ve heyelan duyarlılığı analizlerinde önemli bir faktördür. Yamaç eğriselliği, eğimin çukur (konkav) veya tümsek (konveks) olup olmadığını belirler ve bu da su akışı ve kütle hareketi üzerinde doğrudan etkilidir. Profil eğrisellik haritasında pozitif değerler konkav yamaçları, negatif değerler ise konveks yamaçları gösterir (Wilson ve Gallant, 2000).

Bakı: Bakı faktörü, heyelan riskini etkileyen önemli bir faktördür. Bakının (eğim yönü) heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisi, topografyanın aldığı güneş ışığı, nem oranı, bitki örtüsü ve rüzgâr yönü gibi çevresel faktörleri doğrudan etkileyerek heyelan riskini değiştirebilir. Özellikle kuzey ve batı yönlü yamaçlar daha fazla nem tutar ve daha yavaş kurur, bu da heyelan riskini artırır. Buna karşın, güneye bakan eğimler daha fazla güneş ışığı alarak toprağın kurumasını hızlandırır ve heyelan riskini azaltır (Yılmaz ve Keskin 2012). Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında bakı faktörünün göz önünde bulundurulması, daha doğru risk değerlendirmeleri yapılmasını sağlar. Çalışma alanının bakı haritası sayısal arazi modeli kullanılarak çıkarılmıştır (Şekil 3 (3)). Havzanın % 48'i kuzey, % 27 güney, % 14 doğu, % 11 batı yönlü yamaçlara sahiptir.



Foto 1. Kürk Çayı Havzası heyelan örnekleri

Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI): Topoğrafik nemlilik indeksi, heyelan riskinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar çünkü suyun topraktaki hareketi ve parçaları, toprak stabilitesini doğrudan etkiler. Yüksek TWI değerleri, suyun yamaçta biriktiği ve alanı doygun hale geldiği alanları gösterir. Bu da yerel su basıncının ve zeminin kaymaya daha uygun hale gelmesine neden olur. İlk kez Beven ve Kirkby (1979) yılında ortaya atılan yöntem Barling (1992) tarafından geliştirilerek aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir. TWI Sayısal Arazi Modeli kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3 (11)).

$$TWI = \ln \frac{As}{\tan \beta}$$

Yola Olan Mesafe: Yol ağları yamaç stabilizesini bozmakta, doğal drenaj ağını değiştirmektedir. Bu durum heyelanları tetikleyen bir durumdur. İnceleme alanına ait yol verileri Google Earth kullanılarak oluşturulmuştur. Bu veriler daha sonra ArcGIS programı kullanılarak birbirine eşit uzaklıkta raster görüntüye dönüştürülmüştür. Ana yol doğu-batı yönlü uzanırken bu yola bağlantılı tali yollar ise Kürk Çayı üzerinde yapılmış olan köprü bağlantılarıyla ulaşılmaktadır (Şekil 3 (9)).

Drenaj Yoğunluğu (D_d): Drenaj yoğunluğu, bir havzanın akarsularca yarıлма oranını belirleyen bir ölçüttür. Bu kavram, havzanın içindeki su yollarının ne kadar sık ve yoğun bir şekilde dağıldığını ortaya koyar. Yüksek drenaj yoğunluğu, havzanın akarsular tarafından daha fazla bölündüğünü ve dolayısıyla su akışının daha etkili bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. Bu durum, suyun ve sedimentin üretiminde önemli bir rol oynar. D_d yoğunluğu toplam drenaj uzunluğunun havza alanına (km²) bölünmesiyle elde edilir. D_d eşitliğini Horton (1945) tarafından aşağıdaki formülle ifade edilmiştir (Şekil 3 (8)).

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

Fay Hattına Yakınlık: Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde fay hattına yakın olmanın önemi, özellikle yer hareketleri ve topoğrafik değişimlerin etkileri açısından kritik bir rol oynamaktadır. Fay hatları, yer kabuğundaki gerilme birikimlerinin serbest bırakıldığı alanlar olup, bu durum zemin yapısını zayıflatılabilir ve heyelan riskini artırabilir. D'Amato et al. (2016) çalışmasında, fay hattına yakın bölgelerin sismik aktivitenin etkisiyle daha yüksek heyelan duyarlılığı gösterdiğini belirtmiştir. Fay hattındaki hareketler, zemin stabilitesini olumsuz yönde etkileyerek toprak kaymalarını tetikleyebilir.

Akarsuya Yakınlık: Akarsular, yakın çevresindeki topografya ve zemin özelliklerini etkileyerek heyelan riskini artıran önemli bir faktördür. Schmidt ve Schrott (2007), akarsuların kenarındaki toprakların sürekli olarak su ile doygun hale gelmesi nedeniyle, bu alanların heyelan için daha duyarlı hale geldiğini belirtmektedir. Özellikle, akarsuların taşkınları, zemin stabilitesini azaltarak heyelanları tetikleyebilir. Bir başka çalışmada, Brodie ve Varnes (2008), akarsu yataklarındaki erozyonun, toprak yapısını zayıflatarak heyelan oluşumunu hızlandırdığını vurgulamıştır. Erozyon, toprak katmanlarının kaybına yol açarak, zemin dengesizliğini artırır ve bu durum, özellikle dik yamaçlarda heyelan riskini ciddi şekilde yükseltir.

2.3. Çalışmada Kullanılan Analizler

2.3.1. Frekans Oranı Yöntemi (FR)

Heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan yöntemlerden biri olan FR, bir bölgedeki heyelan olasılığını belirlemek amacıyla kullanılır. Bu yöntem, belirli çevresel faktörlerin (eğim, jeoloji, yağış, toprak türü vb.) heyelan oluşumuna etkisini değerlendirir. FR yönteminde, her bir faktör sınıfı için heyelan meydana gelen alanların yüzdesi hesaplanır ve bu yüzdelere, heyelan olmayan alanlarla karşılaştırılır. FR, faktör sınıfında heyelan meydana gelme olasılığını gösterir. Daha yüksek FR, faktörün heyelan riskine katkısının daha fazla olduğunu ifade eder.

FR, geçmiş heyelan konumları ile heyelana etki eden faktörler arasındaki korelasyonu analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda, heyelanı etkileyen her bir faktör farklı kategorilere ayrılmış ve her kategori için FR değerleri CBS fonksiyonları yardımıyla hesaplanmıştır. Her bir faktörün kategorilerindeki heyelan alanları analiz edilmiş ve bu veriler değerlendirilmiştir. Yöntem, potansiyel tehlike alanlarının belirlenmesi sürecinde, heyelanı etkileyen faktörlerin objektif bir şekilde ağırlıklandırılmasına olanak tanımaktadır. Yöntem piksel hesaplamasıyla yapılır ve geçmişte meydana gelen heyelan alanlarının her bir faktör için (yükselti, eğim, yağış vb.) piksel sayıları ortaya çıkarılır ve aşağıdaki eşitlikle frekans değerleri hesaplanmış olur.

$$FR = \frac{PLO}{PIF}$$

Burada PLO, heyelanı etkileyen bir faktörün her bir kategorisinde heyelan meydana gelme yüzdesini, PIF ise aynı faktörün her kategorisinin toplam içindeki yüzdesini ifade etmektedir. FR hesaplamalarında, PLO "A/B" şeklinde, PIF ise "C/D" şeklinde hesaplanmıştır. Örnek bir tabloda hesaplanan FR değerleri, 1'den büyük olduğunda güçlü bir korelasyonu, 1'den küçük olduğunda (örneğin 0,85'ten düşük değerlerde) ise zayıf bir korelasyonu göstermektedir (Erener ve Lacasse, 2007).

2.3.2. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

Heyelan duyarlılık değerlendirmesinde AHS, farklı faktörlerin etkisini karşılaştırarak ağırlıklandırma yapma imkânı sunduğu için oldukça önemli bir yöntemdir. AHS, karar vericilere hem nitel hem de nicel faktörleri sistematik olarak karşılaştırarak bu faktörlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkilerini belirleme olanağı sağlar. AHS, özellikle heyelan risk değerlendirmesinde kullanılan diğer yöntemlere göre daha esnek ve kapsamlıdır, çünkü karmaşık karar problemlerinde faktörler arasındaki hiyerarşik ilişkileri dikkate alır. Saaty (1980) tarafından geliştirilen bu yöntem, uzman görüşleriyle sayısal bir karşılaştırma yaparak her faktörün göreceli önemini belirlemekte kullanılır (Tablo 1).

İkili karşılaştırma, iki faktörün veya kriterin birbirleriyle karşılaştırılması anlamına gelir ve bu süreç, karar vericinin değerlendirmelerine dayanır (Öztürk ve Batuk, 2007). İkili karşılaştırmada uzman görüşü belirleyici olduğundan arazi çalışmasından elde edilen bulgular ve kapsamlı literatür çalışması AHS nin sağlıklı olması açısından önem arz eder.

Tablo 1. AHS tekniğinde kullanılan ikili karşılaştırma ölçeği (Saaty, 1980).

Önem Derecesi	Açıklama
1	Ölçütler eşit öneme sahip
3	1.ölçüt 2. ölçüte göre biraz daha önemli
5	1.ölçüt 2.ölçüte göre fazla önemli
7	1.ölçüt 2.ölçüte göre çok fazla önemli
9	1.ölçüt 2.ölçüte göre en kuvvetli (aşırı derecede fazla) öneme sahip

3.Bulgular

3.1.Analiz Sonuçları

3.1.1.Frekans Yöntemi (FR) Analiz Sonuçları

FR analizi için seçilen 12 faktör, kategorik olarak sınıflandırılmış ve her bir faktörün alt kategorileri için frekans oranları hesaplanmıştır. FR yöntemine göre, Tablo 2'deki frekans değerleri normalleştirilmiş, ardından elde edilen FR değerleri her bir faktör sınıfına atanmıştır. Frekans ağırlıkları çıkarıldıktan sonra her bir faktör ayrı yarı ağırlık değerlerine göre yeniden sınıflandırılarak heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur (Şekil 4). FR duyarlılık haritasına göre; havzanın % 21,62 (15,59 km²) düşük, % 38,44 (27,72 km²) orta, % 20, 31 (14,64 km²) yüksek, % 19, 63 (14,14 km²) çok yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir (Şekil 4). FR analiz sonuçları incelendiğinde şu sonuçlara ulaşılmıştır (Tablo 2).

Yükseklik (m): 1901-2100 metre aralığında FR = 4,5 en yüksek değeri göstermektedir. Bu durum, bu yükseklik aralığındaki alanların olayların meydana gelme sıklığı açısından yüksek risk taşıdığını ortaya koymaktadır. 1501-1700 metre ve 1701-1900 metre aralıklarında da dikkate değer frekans oranları gözlemlenmiştir (Tablo 2). Bu durum heyelan olaylarının havzada orta yüksekliğe sahip alanlarda yoğunlaştığını işaret etmektedir.

Eğim (Derece): 15-25 derece eğim aralığı, FR açısından yüksek bir değere sahiptir (FR = 1,27), (Tablo 2). Bu, olayların eğim derecesi arttıkça daha sık meydana geldiğini göstermektedir. 35-45 derece ve daha yüksek eğimlerde frekans oranının azalması, bu eğim aralıklarında olayların daha seyrek görüldüğünü göstermektedir.

Baki (Yön): Kuzeybatı (292.5-337.5 derece) ve Kuzeydoğu yönlerine bakan yamaçlarda FR yüksektir. Özellikle kuzeye bakan yamaçlarda olay sıklığının artışı gözlemlenmektedir (Tablo 2).

Litoloji: Gnays-Mika Şist ve Gabro gibi litolojik birimlerde yüksek frekans oranları kaydedilmiştir. Bu bulgu, bu kayalık türlerinin olay meydana gelme olasılığı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Levha Dayk Karmaşığı gibi jeolojik birimlerde de orta düzeyde FR, gözlemlenmiştir (Tablo 2). Bu birimlerin olayların dağılımında etkili olduğunu işaret eder.

Arazi Kullanımı: Bağ-bahçe alanları, en yüksek FR değerine (FR = 2,85) sahip olup, bu alanların olay meydana gelme sıklığı açısından riskli bölgeler olduğunu göstermektedir (Tablo 2). Tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlar bu bağlamda kritik risk faktörleri arasında yer almaktadır. Mera alanları da yüksek frekans oranına sahip olup, bu tür arazilerin olayların sıkça meydana geldiği bölgeler arasında olduğunu göstermektedir.

Akarsuya Uzaklık: 0-50 metre mesafedeki alanlar, FR açısından yüksek değerlere sahiptir (FR = 1.31), (Tablo 2, Şekil 3 (6)). Bu durum, akarsulara yakın bölgelerde olay meydana gelme riskinin arttığını ortaya koymaktadır.

Drenaj Yoğunluğu: Yüksek drenaj yoğunluğu olan alanlarda FR değeri de yüksektir (Tablo 2). Bu da drenaj yoğunluğunun olayların sıklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Fay Hattına Uzaklık (m): 0-500 metre mesafedeki bölgelerde kaydedilen yüksek FR değeri (FR = 2.16), fay hatlarına yakın alanların olay meydana gelme olasılığı açısından en yüksek risk taşıyan bölgeler olduğunu göstermektedir (Tablo 2). Fay hatları yüksek sismik aktivitelerin yaşandığı hatlardır. Bu tür alanlarda depremlerin yaşanması, zeminde gevşemelere, yer kaymalarına ve morfolojide değişimlere neden olduğundan heyelan yaşanma olasılığı artış gösterir.

Yola Uzaklık (m): 100-250 metre aralığında bulunan alanlar, FR değerinin arttığı (FR = 1,12) bölgelerdir (Tablo 2). Bu bulgu, yolların olay dağılımı üzerindeki etkisini vurgulamakta olup, özellikle yol yakınlarındaki alanların olay açısından daha riskli olabileceğini göstermektedir.

Yağış (mm): 800-900 mm aralığındaki yağış miktarı, en yüksek FR değeri (FR = 3,00) göstermektedir (Tablo 2). Bu durum, bu yağış seviyesindeki bölgelerde olay meydana gelme olasılığının önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır.

Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI): Orta TWI seviyelerine sahip bölgelerde FR yüksek bulunmuştur (Tablo 2). Bu sonuç, TWI düzeyinin olayların dağılımında belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Yamaç Eğriliği: Dış bükey yamaçlar, heyelan olaylarının daha sık meydana geldiği alanlar olarak öne

çıkılmaktadır (FR = 1,4). Buna karşılık, düz ve iç bükey yamaçlarda heyelan olay sıklığı nispeten daha düşük bulunmuştur (Tablo 2). Heyelan olaylarının meydana gelme olasılığını etkileyen faktörlerin FR yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda, özellikle yükseklik, eğim, litoloji, arazi kullanımı ve fay hattına yakınlık gibi unsurların olay sıklığını belirleyen kritik faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, özellikle doğal afetlerin (örneğin, heyelan, sel, deprem gibi) risk değerlendirmelerinde ve bölgesel risk yönetimi stratejilerinde önemli bir yer tutmaktadır.

Tablo 2. Heyelan etki faktörüne ait frekans oranları

FAKTÖR	KATEGORI	A	PLO (%)	C	PIF (%)	FRFRFO
Yükseklik (m)	1238-1300	-	-	93800	0,10	0
	1301-1500	1700	0,055	227182	0,25	0,22
	1501-1700	7592	0,24	357375	0,40	0,6
	1701-1900	15509	0,50	168069	0,18	2,77
	1901-2100	5800	0,18	36649	0,04	4,5
	2101-2345	-	0	7700	0	0
Eğim (Derece)	0-15	11392	0,37	480730	0,53	0,69
	15-25	12903	0,42	295372	0,33	1,27
	20-35	5494	0,17	102211	0,11	1,54
	35-45	807	0,02	11564	0,10	0,2
	45+	5	0,0001	898	0,001	0,1
Bakı	Düz (-1)	105	0,003	67784	0,07	0,04
	Kuzey (0-22,5)	4463	0,14	83116	0,09	1,55
	Kuzeydoğu (22,5-67,5)	2815	0,09	129369	0,14	0,64
	Doğu (67,5-112,5)	447	0,01	102881	0,11	0,09
	Güneydoğu (112,5-157,5)	73	0,002	98489	0,11	0,01
	Güney (157,5-202,5)	154	0,005	66685	0,07	0,07
	Güneybatı (202,5-247,5)	577	0,01	59992	0,06	0,16
	Batı (247,5-292,5)	4141	0,13	74553	0,08	1,62
	Kuzeybatı (292,5-337,5)	11575	0,37	133202	0,14	2,64
	Kuzey (337,5-360)	6251	0,20	74704	0,08	0,5
Litoloji	Alüvyon	0	0	89384	0,10	0
	Alüvyal Fan	4017	0,00003	103411	0,11	0
	Kum	0	0	26943	0,03	0
	Andesit	0	0	8594	0,009	0
	Levha Dayk	6322	0,20	239370	0,26	0,76
	Karmaşığı					
	Gabro	8689	0,28	154627	0,17	1,64
	Gnays-Mika Şist	4113	0,13	54688	0,06	2,16
	Yüksekova Karmaş.	0	0	88052	0,09	0
	Maden Karmaşığı	7252	0,23	125039	0,14	1,64
Arazi Kullanımı	Yerleşme	0	0	16590	0,018	0
	Bataklık	0	0	3486	0,003	0
	Sulu Tarım	218	0,007	85432	0,09	0,07
	Bağ-Bahçe	6243	0,20	70259	0,07	2,85
	Kuru Tarım	144	0,004	101136	0,11	0,03
	Çıplak Kavalık	738	0,02	11332	0,01	2,0
	Ağaçlandırma S.	41	0,001	83176	0,09	0,01
	Orman	0	0	21410	0,02	0
	Mera	22970	0,75	478270	0,53	1,41
	Kumluk ve Çıplak	251	0,008	21905	0,02	0,4
Akarsuya uzaklık (m)	0-50	11812	0,38	263560	0,29	1,31
	50-100	8614	0,28	203148	0,22	1,27
	100-150	5461	0,17	162414	0,18	0,94
	150-200	2416	0,07	112292	0,12	0,58
	200-250	1040	0,03	69922	0,07	0,42
	250+	745	0,02	75605	0,08	0,28

sahip olduğunu ifade etmektedir. Bataklık alanlar ve sulu tarım alanları da olay riski açısından önemli olmakla birlikte, bağ-bahçe ve kuru tarım alanları daha düşük ağırlıklarla değerlendirilmiştir. Bağ-Bahçe alanlarında sulu tarım yapılması ve toprağın işlenmesi heyelan oluşumuna zemin hazırlamaktadır.

Eğim (Derece): 0-15 derece eğim aralığı, en yüksek ağırlığa sahiptir (Tablo 4). Bu sonuç, düşük eğimli alanların heyelan olayı riskine daha fazla maruz kaldığını göstermektedir. 45 derece ve üzeri eğimlerde bu ağırlık değeri önemli ölçüde azalmaktadır (Tablo 4). Bu durum daha dik eğimlerde heyelan riskinin nispeten düşük olduğunu ifade eder.

Yükseklik (m): 1300 metre yüksekliği, en yüksek ağırlığa sahip aralık olarak değerlendirilmiştir (Tablo 4). Bu da bu yüksekliğin heyelan riskinde belirleyici bir faktör olduğunu gösterir. 2100 metre ve üzeri yüksekliklerde ağırlıklar belirgin şekilde düşmektedir (Ağırlık = 0,081 ve 0,033), bu da bu seviyelerde olay riskinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Bakı (Yön): Bakı faktörü, heyelan riski üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve AHS ile yapılan bu ikili karşılaştırma, kuzey ve kuzeydoğu yönlerinin heyelan riski açısından daha kritik bölgeler olduğunu göstermektedir (Tablo 4). Bu yönlerde, zemin doygunluğu ve nem artışıyla birlikte stabilitenin bozulması heyelanları tetikleyen faktörlerdir. Güney ve batı yönleri ise daha düşük risk taşımaktadır, çünkü bu bölgelerde güneşlenme ve kuruma süreçleri zemin stabilitesini olumlu yönde etkiler.

Litoloji: Alüvyal fan birimleri (Ağırlık = 0,234) ve kum yapıları (Ağırlık = 0,207), litoloji kategorileri arasında en yüksek ağırlıklarla değerlendirilmiştir (Tablo 4). Bu durum, bu jeolojik yapıların bulunduğu alanlarda heyelan meydana gelme riskinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Andesit ve gnays-mika şist gibi daha dayanıklı litolojilerde risk daha düşük görülmektedir.

Tablo 3. Ana kriterler için ikili karşılaştırma matrisi

KRİTERLER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	AĞIRLIK
Litoloji	1	2	2	3	4	4	5	4	5	5	7	8	0,207
Eğim		1	2	3	4	4	5	6	5	5	6	9	0,186
Eğim Şekli			1	2	3	4	4	5	5	4	6	9	0,146
Yağış				1	2	2	3	4	5	6	7	9	0,113
Bakı					1	2	3	4	5	5	6	9	0,095
Fay Hatlarına Yakınlık						1	3	4	5	5	4	9	0,083
Akarsu Uzaklık							1	2	2	3	4	5	0,048
Yola Uzaklık								1	2	2	2	3	0,035
Arazi Kullanımı									1	2	2	3	0,03
Drenaj Yoğunluk										1	2	2	0,025
Yükseklik											1	2	0,019
TWİ												1	0,013

Tutarlılık oranı: 0,080

Drenaj Yoğunluğu: Çok yüksek drenaj yoğunluğuna sahip bölgeler, en yüksek ağırlıkla değerlendirilmiştir (Ağırlık = 0,518). Bu durum, drenaj yoğunluğunun heyelan riskine olan doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Orta ve düşük drenaj yoğunluğu alanlarında risk daha düşük olup, bu faktörün olay üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir (Tablo 4).

Fay Hattına Yakınlık: 0-1000 metre mesafedeki bölgeler en yüksek ağırlıkla (Ağırlık = 0,487) değerlendirilmiş ve fay hatlarına yakın bölgelerin heyelan meydana gelme riskinin yüksek olduğu ortaya konmuştur. 1000-5000 metre aralığında bu ağırlık azalmakta, 15000 metre ve üzerinde ise risk önemli ölçüde düşmektedir (Tablo 4).

Yola Uzaklık: 0-100 metre mesafedeki bölgeler, heyelan riski açısından en yüksek ağırlık değeri ile değerlendirilmiştir (Ağırlık = 0,445). Bu bulgu, yolların yakınında bulunan bölgelerin olaylara daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Karayolundan uzaklaştıkça heyelan riski azalmaktadır (Tablo 4).

Yağış (mm): 900 mm ve üzeri yağış alan bölgeler, en yüksek ağırlığa sahip olup (Ağırlık = 0,582), yüksek yağış miktarlarının heyelan meydana gelme riskini artırdığına işaret etmektedir. 600 mm ve altındaki bölgelerde ise bu ağırlık belirgin şekilde azalmaktadır (Tablo 4).

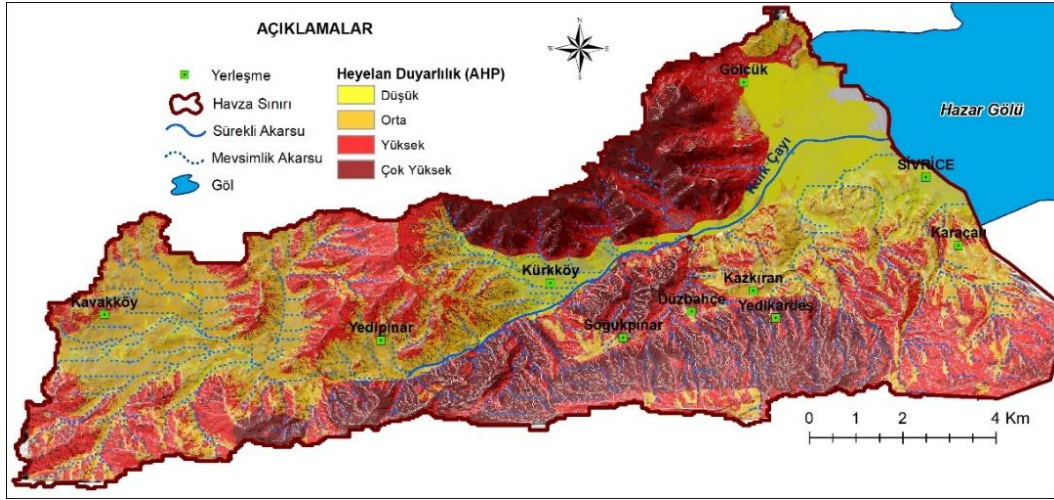
Topografik Nemlilik İndeksi (TWI): Çok yüksek TWI değerlerine sahip bölgeler en yüksek ağırlıkla değerlendirilmiştir (Tablo 4). Bu durum, yüksek nem oranının heyelan meydana gelme riskini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Düşük TWI değerlerine sahip bölgelerde ise risk daha azdır (Ağırlık = 0,056).

Yamaç Eğriliği: Dış bükey yamaçlar, en yüksek ağırlığa sahip yamaç tipidir (Tablo 4). Bu bulgu, dış bükey yamaçların heyelan riski açısından en kritik bölgeler olduğunu göstermektedir. İç bükey yamaçlar ise nispeten daha düşük bir ağırlıkla değerlendirilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Ana Kriterlere Ait Alt Sınıfların İkili Karşılaştırma Matrisi

Katmanlar											Ağırlık	
Akarsuya Yakınlık	1	2	3	4	5							
100 m		1	3	5	7						0,264	
150 m			1	3	4						0,129	
200 m				1	2						0,061	
250+ m					1						0,039	
Tutarlılık Oranı: 0,059												
Arazi Kullanımı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Yerleşme	1	2	3	4	5	6	8	9	8	8	0,288	
Bataklık		1	2	1	2	6	4	3	5	6	0,150	
Sulu Tarım			1	2	4	5	7	8	9	9	0,181	
Bağ-Bahçe				1	2	3	3	6	7	8	0,124	
Kuru Tarım					1	4	5	6	7	8	0,108	
Çıplak Kayalık						1	2	3	3	4	0,049	
Ağaçlandırma Sahası							1	1	3	2	0,033	
Orman								1	2	2	0,029	
Kumlul ve Çıplak Arazi									1		0,018	
Tutarlılık Oranı: 0,085												
Eğim (Derece)	1	2	3	4	5							
0-15	1	2	3	6	8						0,457	
15-25		1	2	6	3						0,269	
20-35			1	2	2						0,136	
35-45				1	2						0,076	
45+					1						0,062	
Tutarlılık Oranı:0,037												
Yükseklik (m)	1	2	3	4	5	6						
1300	1	2	3	4	5	9						0,388
1500		1	2	4	3	8						0,26
1700			1	2	2	5						0,148
1900				1	2	2						0,089
2100					1	4						0,081
2345						1						0,033
Tutarlılık Oranı:0,032												
Bakı	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ağırlık	
Düz (-1)	1	2	2	3	2	2	4	5	6	9	0,019	
Kuzey (0-22,5)		1	2	3	2	7	4	7	6	6	0,185	
Kuzeydoğu (22,5-67,5)			1	2	2	5	7	8	9	9	0,210	
Doğu (67,5-112,5)				1	2	2	3	6	7	8	0,120	
Güneydoğu (112,5-157,5)					1	4	4	6	3	7	0,114	
Güney (157,5-202,5)						1	2	3	3	2	0,056	
Güneybatı (202,5-247,5)							1	1	2	3	0,038	
Batı (247,5-292,5)								1	2	4	0,034	
Kuzeybatı (292,5-337,5)									1	1	0,190	
Kuzey (337,5-360)										1	0,270	
Tutarlılık Oranı:0,074												
Litoloji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ağırlık		
Alüvyon	1	1	1	3	2	3	3	5	6	0,184		
Alüvyal Fan		1	2	3	2	7	4	7	6	0,234		
Kum			1	2	2	6	6	8	9	0,207		

Andesit	1	2	2	3	2	6	0,106
Levha Dayk Karmaşığı		1	4	4	6	3	0,117
Gabro			1	2	3	3	0,055
Gnays-Mika Şist				1	1	2	0,04
Yüksekova Karmaşığı					1	2	0,033
Maden Karmaşığı						1	0,024
Tutarlılık Oranı:0,057							
Drenaj Yoğunluk	1	2	3	4	5		Ağırlık
Çok Yüksek	1	3	5	7	9		0,518
Yüksek		1	2	5	8		0,258
Orta			1	2	3		0,118
Düşük				1	2		0,066
Çok Düşük					1		0,04
Tutarlılık Oranı:0,035							
Fay Hattına Yakınlık (m)	1	2	3	4	5		Ağırlık
0-1000	1	2	5	7	9		0,487
1000-5000		1	2	5	8		0,28
5000-10000			1	2	4		0,129
10000-15000				1	2		0,066
15000+					1		0,038
Tutarlılık Oranı: 0,021							
Yola Uzaklık (m)	1	2	3	4	5		Ağırlık
0-50	1	2	3	7	9		0,445
50-100		1	2	7	9		0,315
100-200			1	2	3		0,136
200-250				1	2		0,064
250+					1		0,04
Tutarlılık Oranı:0,028							
Yağış (mm)	1	2	3	4			Ağırlık
900	1	3	5	8			0,582
800		1	2	5			0,24
700			1	2			0,117
600				1			0,06
Tutarlılık Oranı:0,018							
TWİ	1	2	3	4			Ağırlık
Çok Yüksek	1	3	6	9			0,605
Yüksek		1	2	7			0,231
Orta			1	5			0,108
Düşük				1			0,056
Tutarlılık Oranı:0,013							
Yamaç Eğriselliği	1	2	3				Ağırlık
Dış Bükey	1	5	8				0,750
Düz (-1)		1	3				0,162
İç Bükey			1				0,087
Tutarlılık Oranı: 0,58							



Şekil 5. Kürk Çayı Havzası heyelan duyarlılık haritası (AHS)

3.2. Doğruluk Analizi Sonuçları

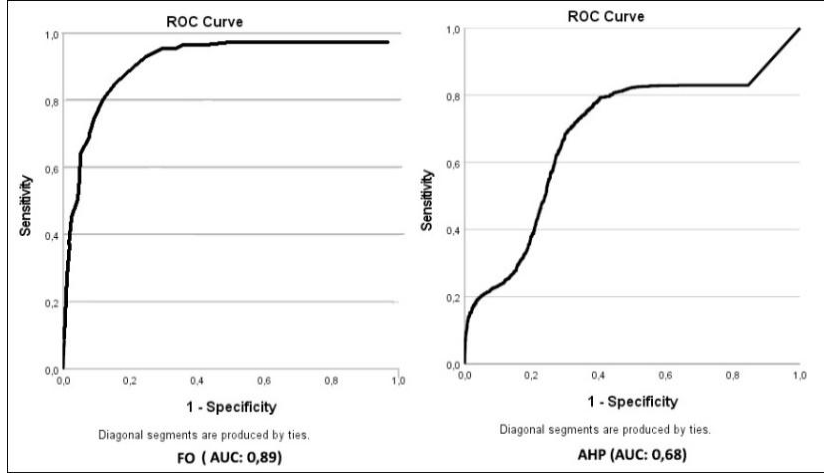
İnceleme sahasına ait heyelan duyarlılığı, her iki yöntemde hesaplanan ağırlık ve frekans oranı değerlerinin yeniden sınıflandırılması ve üst üste çakıştırılmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 4, 5). FR yöntemiyle oluşturulan heyelan duyarlılık haritasında (Şekil 4) düşük duyarlılıktaki alanlar %34,74, orta duyarlılıktaki alanlar %29,47, yüksek duyarlılıktaki alanlar %20,80 ve çok yüksek duyarlılıktaki alanlar ise %14 oranına karşılık gelmektedir. Yüksek ve çok yüksek duyarlılıktaki alanların toplam yüzdesi ise %34,8'dir. Bu oran, AHS yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Yapılan doğruluk analizi de bu bulguyu desteklemektedir (Şekil 6).

AHS yöntemiyle oluşturulan heyelan duyarlılık haritasında (Şekil 5), düşük duyarlılıktaki alanlar %12,35, orta duyarlılıkta olan alanlar %29, yüksek duyarlılıktaki alanlar %34, çok yüksek duyarlılıktaki alanlar ise %24,65 oranına karşılık gelmektedir. Yüksek ve çok yüksek duyarlılıktaki alanların toplamı ise %58,65'lik bir oranı oluşturmaktadır ve bu da havzanın heyelana karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir.

Heyelanların tahmini ve risk analizi, doğru sınıflandırma modelleri ile yapıldığında, bölgedeki tehlikelerin daha etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. Bu bağlamda, heyelan duyarlılığı analizinde kullanılan modellerin performansını değerlendirmek ve karşılaştırmak oldukça önemlidir. Model performansını değerlendirmede yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisidir. ROC eğrisi, bir sınıflandırma modelinin ne kadar başarılı olduğunu ölçmek için kullanılan grafiksel bir araçtır ve heyelan duyarlılığı analizlerinde önemli bir rol oynar.

ROC eğrileri, farklı eşik değerlerinde modelin hassasiyetini (susceptibility) – doğru pozitif oranı – ve modelin özgüllüğünü (specificity) – doğru negatif oranı – karşılaştıran bir grafik oluşturularak elde edilir. Bu grafik, modelin pozitif ve negatif sınıfları ne kadar doğru şekilde ayırt ettiğini grafik üzerinde görselleştirir (Daelo, 1993). Her bir model için yapılan ROC analizleri sonucunda AUC değerleri FR yöntemi için 0,89 AHS yöntemi için 0,68 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).

Kürk Çayı Havzası için yapılan doğrulama analizinde, FR yönteminin, AHS yöntemine göre daha doğru ve tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun en önemli nedeni, FR yönteminin insan faktöründen bağımsız, daha objektif sonuçlar ortaya koymasıdır. İki yöntemle oluşturulan heyelan duyarlılık haritaları karşılaştırıldığında, özellikle Kürk Çayı'nın güneyinde kalan bölgelerde büyük benzerliklerin olduğu görülmektedir (Şekil 4,5). Ancak, AHS yöntemi ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritasına (Şekil 5) göre Kürk Çayı'nın kuzeyinde, özellikle Kürk Köyü'nün kuzey ve kuzeydoğusunda yer alan dağlık alanların çok yüksek duyarlılıkta olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yaptığımız arazi çalışmaları bu bölgelerde heyelan olaylarının olmadığını göstermektedir. Bu durum, AHS yöntemi ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritasının doğruluğunu olumsuz yönde etkileyen bir faktör olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. FR ve AHS modelleri ROC analizi

4.Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma, Kürk Çayı Havzası'nda meydana gelen heyelanların dağılımını ve etki faktörlerini inceleyerek havzanın heyelan duyarlılık haritasını oluşturmayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda FR ve AHS yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kürk Çayı Havzası'nda geçmişte meydana gelen heyelanların dağılımı, topoğrafik haritalar, uydu görüntüleri ve saha çalışmalarıyla elde edilen veriler kullanılarak haritalandırılmıştır. Heyelan envanteri verileri, analizler için % 70 ve doğrulama için %30 bölümlenerek kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan 12 faktör (Şekil 3) birlikte değerlendirildiğinde gerek arazi çalışmalarında elde edilen veriler gerek FR ve AHS sonuçları karşılaştırıldığında yükseklik, eğim, litoloji, arazi kullanımı ve fay hattına yakınlığın heyelan oluşumunda etkisi diğer faktörlere göre görece daha fazladır.

Çalışma sonucunda elde edilen önemli bulgular şunlardır:

FR yöntemine göre, havzanın %21,62'si düşük, %38,44'ü orta, %20,31'i yüksek ve %19,63'ü çok yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir. AHS yöntemine göre, havzanın %12,35'i düşük, %29'u orta, %34'ü yüksek ve %24,65'i çok yüksek heyelan duyarlılığına sahiptir. FR yöntemi ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritası, AHS yöntemine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Model doğrulama analizleri için ROC eğrisi kullanılmış ve FR yönteminin AUC değerinin 0,89, AHS yönteminin ise 0,68 olduğu tespit edilmiştir. Yüksek AUC değeri, modelin daha doğru tahminler yaptığını gösterdiğinden, FR yönteminin heyelan duyarlılığını değerlendirmede daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Kürk Çayı Havzasında heyelan oluşumuna etki eden en önemli faktörlerin havza heyelan duyarlılığında etkisi şunlardır:

- **Yükseklik:** 1901-2100 metre arasındaki yükseltiler, heyelanlar için en riskli alanlardır.
- **Eğim:** 15-25 derece arasındaki eğimler, heyelan oluşumunu kolaylaştırmaktadır.
- **Litoloji:** Gnays-Mika Şist ve Gabro gibi litolojik birimler heyelanlara daha yatkındır.
- **Arazi Kullanımı:** Bağ-bahçe alanları, heyelan riski açısından en kritik bölgelerdir.
- **Fay Hattına Yakınlık:** Fay hattına yakınlık, heyelan riskini önemli ölçüde artırmaktadır.

FR analizine göre, bağ-bahçe alanları en yüksek FR değerine ($FR = 2,85$) sahiptir, bu da bu alanların heyelan riski açısından en kritik bölgeler olduğunu göstermektedir. Mera alanları da yüksek frekans oranına sahip olup, bu tür arazilerin heyelanların sıkça meydana geldiği bölgeler arasında olduğunu göstermektedir. AHS analizine göre, yerleşim alanları en yüksek ağırlığa sahip arazi kullanımı kategorisi olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, yerleşim alanlarının heyelan olayı meydana gelme riski açısından yüksek bir duyarlılığa sahip olduğunu ifade etmektedir. FR yöntemine göre havzanın %34,8'i, AHS yöntemine göre ise %58,65'i yüksek veya çok yüksek heyelan riski altındadır. Arazi çalışmaları, FR yöntemiyle elde edilen sonuçların AHS yöntemine göre daha gerçekçi olduğunu göstermiştir. Özellikle Kürk Köyü'nün kuzeyindeki dağlık alanlarda AHS yöntemi yüksek heyelan riski öngörmüş, ancak arazi çalışmaları bu bölgede heyelanlara rastlanmadığını göstermiştir.

Bu çalışma, Kürk Çayı Havzasında heyelan riskinin azaltılması ve gelecekteki arazi kullanım planlamaları için önemli bilgiler sağlamaktadır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritaları, yerel yönetimler ve karar vericiler tarafından riskli alanların belirlenmesi, yapılaşmanın kontrol altına alınması ve afet yönetimi planlarının oluşturulması gibi faaliyetlerde kullanılabilir.

Kaynaklar

- Aghlmand, M., Onur, M. İ. & Talacı, R. (2020). Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde Analitik Hiyerarşi yönteminin ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kullanımı. *European Journal of Science and Technology*, Nisan (Özel Sayı), 224-230. <https://doi.org/10.31590/ejosat.araconf28>
- Anis, Z., Wissem, G., Vali, V., Smida, H., & Essghaier, G. M. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. *Open Geosciences*, 11(1), 708–726. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0056>
- 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(1-2), 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Aydınoglu, A. Ç., & Altürk, G. (2022). Heyelan duyarlılık haritalarının istatistik ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak üretilmesi: Taşlıdere Havzası örneği (Rize). *Coğrafya Dergisi*, 43, 159–176. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2021-814561>
- Aydoğan, E., & Dağ, S. (2023). İstatistiksel Yöntemlerle Yukarı Karasu Havzası'nın Kuzeydoğu Bölümünün (Erzurum) Heyelan Duyarlılık Analizi. *Türk Uzaktan Algılama Ve CBS Dergisi*, 4(1), 64-82. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1202140>
- Avcı, V. (2015). Bingöl Çayı Havzası'nın (Bingöl) heyelan duyarlılık analizi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25(2), 1–26. <https://doi.org/10.18069/fusbed.66886>
- Barling, R. (1992). Saturation zones and ephemeral on arable land in southeastern Australia [Unpublished PhD dissertation]. University of Melbourne.
- 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>
- Başalan, A. (2022). İstatistiksel Yöntemler Uygulanarak Tokat İl Merkezinin Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(3), 260-273.
- Berber, S., & Ceryan, Ş. (2023). Güzelyalı-Lapseki (Çanakkale) arasındaki bölgenin heyelan duyarlılığının analitik hiyerarşi süreci yöntemiyle (AHS) değerlendirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 305–316. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.1208462>
- Beven, K., & Kirkby, M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69.
- Brodie, A. R., & Varnes, D. J. (2008). Riverbank erosion as a trigger for landslides. *Geomorphology*, 96(1-2), 1–10.
- Ceylan Demirel, Ş., & Hastaoğlu, K. Ö. (2022). CBS Tabanlı AHP Yöntemi Kullanılarak Oluşturulan Sivas Koyulhisar Heyelan Duyarlılık Haritalarının Güvenilirliğinin Araştırılması. *Afet Ve Risk Dergisi*, 5(2), 715-730. <https://doi.org/10.35341/afet.1071728>
- 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), 59-59. <https://doi.org/10.24232/jeoloji-muhendisligi-dergisi.295366>
- Çevik, E., & Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44(8), 949–962. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0838-6>
- Chala, T. (2022). GIS-based landslide susceptibility zonation mapping using frequency ratio and logistics regression models in the Dessie area, South Wello, Ethiopia. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1633474/v1>
- Chen, X., & Chen, W. (2021). Catena GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods. *Catena*, 196, 104833. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104833>
- D'Amato, M., & Orsini, F. (2016). The influence of seismic activity on landslide susceptibility: A case study in the Apennines. *Landslides*, 13(3), 457–471.

- 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>
- Das, G., & Lepcha, K. (2019). Application of logistic regression (LR) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Relli Khola river basin of Darjeeling Himalaya, India. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1499-8>
- 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. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040103>
- Daelo, J. (1993). Receiver operating characteristic laboratory (ROCLAB): Software for developing decision strategies that account for uncertainty. *2nd International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis*, 318–315.
- El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>
- Ercanoğlu, M., & Gökçeoğlu, 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. <https://doi.org/10.1007/s00254-001-0454-2>
- Erener, A., & Lacasse, S. (2007). Heyelan duyarlılık haritalamasında CBS kullanımı. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*. Trabzon.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., & Paola, R. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 115–131. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-115-2006>
- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56(3), 275–370.
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4), 406–421.
- Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40(9), 1095–1113. <https://doi.org/10.1007/s002540100310>
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982–990. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
- Öztürk, D., & Batuk, F. (2007). Çok sayıda kriter ile karar vermede kriter ağırlıkları. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 25(1), 86–98.
- Öz, T., & Günek, H. (2021). Solaklı Havzası'nın (Trabzon) Heyelan Duyarlılığı Ve Yerleşim Yeri Risk Analizi. *International Journal Of Geography And Geography Education*(44), 396-412. <https://doi.org/10.32003/İgge.931516>
- Özdemir, A. (2008). *Zemin Mekaniği ve Zemin Mühendisliğine Giriş*. Konya: İnci Matbaası.
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H. R., & Aghda, S.F. (2013) Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances, *Natural hazards*, 69(1), 749-779. doi:10.1007/s11069-013-0728-5
- Pourghasemi, R. H., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 162, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.022>
- Pradhan, B. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38(2), 301–320. <https://doi.org/10.1007/s12524-010-0020-z>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Schmidt, J., & Schrott, L. (2007). The influence of rivers on landslide occurrence in steep terrain. *Geomorphology*, 85(3–4), 328–342.
- Silalahi, F. E. S., Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>

- Sunkar, M., & Avcı, V. (2016). Şepker Çayı Aşağı Havzası'nın (Adıyaman Batısı) heyelan duyarlılık analizi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 26(2), 13–44. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.346901>
- Şengün, M. T., Şaman, B., & Karadeniz, E. (2019). Kalaba Yolu (Sivrice-Elazığ) heyelanı ve duyarlılık analizi. *1. Uluslararası Coğrafya Kongresi Bildiri Kitabı*.
- Tatar, Y., Turan, M., & Aksoy, E. (1995). Hazar Gölü Yakın Çevresinin jeolojisi ve göl'ün oluşumu. *I. Hazar Gölü ve Çevresi Sempozyumu*. Elazığ.
- Üzel, N., & Öztürk, D. (2021). Van ili heyelan duyarlılığının frekans oranı yöntemiyle analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 865–884. <https://doi.org/10.17482/uumfd.969246>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Wang, Q., Li, W., Xing, M., Wu, Y., Pei, Y., Yang, D., & Bai, H. (2016). Landslide susceptibility mapping at Gongliu County, China using artificial neural network and weight of evidence models. *Geosciences Journal*, 20(5), 705–718. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0003-3>
- Wilson, J., & Gallant, J. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley.
- Yalçın, A., Reis, S., Aydınoglu, A. C., & Yomralioğlu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274–287.
- Yılmaz, H. (2010). Kürk Çayı Havzasının uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak erozyon riskinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü]. Elazığ.
- Yılmaz, I., & Keskin, I. (2012). Determination of landslide susceptibility using fuzzy logic—A case study in Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0382-2>
- Zhang, J., van Westen, C. J., Tanyas, H., Mavrouli, O., Ge, Y., Bajrachary, S., Gurung, D. R., Dhital, M. R., & Khanal, N. R. (2019). How size and trigger matter: Analyzing rainfall- and earthquake-triggered landslide inventories and their causal relation in the Koshi River basin, central Himalaya. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 1789–1805. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1789-2019>

İnternet Adresleri

URL 1. <https://www.eea.europa.eu/tr/help/sikca-sorulan-sorular/corine-arazi-ortusu-nedir>

Etik, Beyan ve Açıklamalar

1. Etik Kurul izni ile ilgili;
☒ Bu çalışmanın yazar/yazarları, Etik Kurul İznine gerek olmadığını beyan etmektedir.
 2. Bu çalışmanın yazar/yazarları, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduklarını kabul etmektedir.
 3. Bu çalışmanın yazar/yazarları kullanmış oldukları resim, şekil, fotoğraf ve benzeri belgelerin kullanımında tüm sorumlulukları kabul etmektedir.
 4. Bu çalışmanın benzerlik raporu bulunmaktadır.
-

