

**VERİYE DAYALI HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ
ÜRETİMİNDE SİSMİK ETKİ KULLANIMINA İLİŞKİN BİR
ÇALIŞMA**

**A STUDY ON THE USE OF SEISMIC IMPACT IN THE
PRODUCTION OF DATA-DRIVEN LANDSLIDE
SUSCEPTIBILITY MAPS**

Esmâ GÜNEYSU BUDAK

Doç. Dr. Gülseren DAĞDELENLER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

VERİYE DAYALI HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ ÜRETİMİNDE SİSMİK ETKİ KULLANIMINA İLİŞKİN BİR ÇALIŞMA

Esmâ GÜNEYSU BUDAK

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gülseren DAĞDELENLER

Haziran 2025, 83 sayfa

Heyelanların ve heyelana duyarlı alanların gerçekçi bir şekilde haritalanması, bu afetlerin insan yaşamı üzerindeki doğrudan ve dolaylı olumsuz etkilerinin kontrol altına alınabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, heyelan envanterinin oluşturulması ve envanter haritalarının hazırlanması dinamik bir süreci ifade eder. Özellikle aşırı yağış veya deprem gibi olaylar sonrasında meydana gelen yeni heyelanların düzenli olarak haritalanması, ulusal düzeyde yürütülen zarar azaltma çalışmalarının etkin bir şekilde yönetilmesi açısından zorunludur. Heyelan envanter haritalarında yer alan varlık (1) ve yokluk (0) bilgileri, heyelan duyarlılık haritalarının

oluşturulmasında kullanılan modelleme araçlarına çıktı olarak sunulurken; bu modellemelerde kullanılan girdiler, jeolojik, topografik ve çevresel hazırlayıcı parametreler ile aşırı yağış ve deprem gibi tetikleyici faktörleri kapsamaktadır. Ancak mevcut birçok heyelan envanterinde tetikleyici parametrelere dair bilgi eksikliği dikkat çekmektedir. Depremselliği yüksek ve aynı zamanda yoğun yağış alan bölgelerde, orta ve büyük ölçekli depremlerin tekrarlanma periyodlarının aşırı yağışlara kıyasla daha kısa olduğu dikkate alındığında, depremlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisinin mevcut duyarlılık haritalarına ne ölçüde yansıtılabildiği tartışmaya açıktır.

Pseudostatik ve statik analizlerde elde edilen güvenlik katsayıları oranı olan azalım oranı (rf), şev açısı ve senaryo depreme ait etkin yatay ivme değerleri ile ilişkilendirilebilmektedir. Buna rağmen, literatürde bu ilişkiden faydalanarak bilinen yöntemlerle üretilen bir heyelan duyarlılık haritasına sismik etkinin doğrudan entegre edildiği bir çalışma yer almamaktadır. Mevcut yaklaşımlar genellikle sismik etkinin her koşulda duyarlılığı artırıcı etki yapacağı varsayımına dayanmakta ve bu nedenle sismik etkiler sonuç haritasına doğrudan uygulanmaktadır. Ancak bu çalışmada, bu yaklaşım yerine sismik etkinin bir girdi parametresi olarak değerlendirilmesi benimsenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda, her şev açısı için anlamlı sonuçlar üretebilecek şekilde sismik etki denklemleri yeniden düzenlenmiş ve “Modifiye Azalım Oranı” (MRF) tanımlanmıştır. Örnek çalışma alanında, sismik etkinin dikkate alınmadığı (DUY1) durumun yanı sıra, $M_w=6,5$ (DUY2) ve $M_w=7,5$ (DUY3) büyüklüğündeki senaryo depremleri için MRF'nin girdi olarak kullanıldığı heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. DUY1, DUY2 ve DUY3 için hesaplanan eğri altında kalan alan (AUC) değerleri sırasıyla 0,620, 0,638 ve 0,641 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, tüm duyarlılık haritalarının kabul edilebilir doğruluk seviyesine sahip olduğunu göstermekte; bununla birlikte, en yüksek performansın DUY3 senaryosuna ait duyarlılık haritasında gözlemlendiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan duyarlılık haritaları, sismik etki, modifiye azalım oranı, eğri altında kalan alan (AUC), Frekans Oranı (FR)

ABSTRACT

A STUDY ON THE USE OF SEISMIC IMPACT IN THE PRODUCTION OF DATA-DRIVEN LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPS

Esmā GÜNEYSU BUDAK

Master of Science, Department of Geological Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Gülseren DAĞDELENLER

June 2025, 83 pages

Realistic mapping of landslides and landslide-prone areas is of great importance for mitigating the direct and indirect negative impacts of these hazards on human life. In this context, the preparation of landslide inventories and the generation of inventory maps represent a dynamic and ongoing process. Regular mapping of newly occurring landslides, particularly those triggered by extreme rainfall or earthquakes, is essential for the effective management of nationwide disaster risk reduction efforts. The presence (1) and absence (0) information in landslide inventory maps serve as outputs in modeling tools used to produce landslide susceptibility maps, while the input parameters typically include geological, topographical, and environmental preparatory factors, as well as triggering parameters such as extreme rainfall and earthquakes. However, many existing landslide inventories often lack sufficient data regarding triggering factors. In regions such as

Turkey, where seismic activity is high and heavy rainfall is also common, the fact that moderate to large earthquakes generally have shorter recurrence intervals than extreme rainfall events raises the question of whether the influence of earthquakes on susceptibility is adequately reflected in current susceptibility maps.

The reduction factor (rf), defined as the ratio between pseudostatic and static safety factors, can be expressed in relation to slope angle and the peak horizontal ground acceleration (PGA) of a given earthquake scenario. Nevertheless, there is no existing study in the literature in which a landslide susceptibility map generated by conventional methods is directly integrated with seismic influence using this relationship. Existing approaches often assume that seismic effects invariably increase landslide susceptibility, and thus apply these effects directly to the final susceptibility map. In contrast, this study adopts a novel approach by incorporating seismic effects as an input parameter rather than applying them post hoc to the result map.

To this end, seismic effect equations were reformulated to yield meaningful values for all slope angles, leading to the definition of the Modified Reduction Factor (MRF). In the selected study area, landslide susceptibility maps were produced for three cases: without considering seismic effects (DUY1), and with earthquake scenarios of $M_w=6.5$ (DUY2) and $M_w=7.5$ (DUY3), where MRF was used as an input parameter. The area under the curve (AUC) values for DUY1, DUY2, and DUY3 were found to be 0.620, 0.638, and 0.641, respectively. These results indicate that all three susceptibility maps exhibit acceptable levels of accuracy; however, the map corresponding to the DUY3 scenario demonstrates the best overall performance.

Keywords: Landslide susceptibility maps, seismic impact, modified reduction ratio, area under curve (AUC), Frequency Ratio (FR)

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca bilgisi ve desteğiyle yolumu aydınlatan, her zaman anlayışla yaklaşan, kıymetli danışmanım Doç. Dr. Gülseren DAĞDELENLER, bilgi ve deneyimleriyle çalışmama katkı sunan değerli hocalarım Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU'na ve Prof. Dr. Harun SÖNMEZ'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Onların rehberlikleri ve yapıcı yaklaşımları, bu sürecin verimli ve keyifli ilerlemesinde büyük rol oynamıştır.

Eğitim sürecim boyunca bana gerekli izinleri vererek akademik gelişimime destek olan, lider duruşuyla her zaman örnek aldığım kıymetli Genel Müdürüm Sayın Afire SEVER'e kalpten teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım.

Tez sürecimde bilgi ve emeğiyle yanımda olan, alanındaki yetkinliğiyle her zaman destek veren değerli arkadaşım Erdem GÜR'e teşekkür ederim.

Ömrüm boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiren, cesaret verici sözleri ve sonsuz inançlarıyla dualarımı esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bu zorlu ve emek dolu süreci anlamlı ve katlanabilir kılan en büyük gücüm; sabrı, sevgisi ve desteğiyle beni her koşulda seven, motive eden; azmi, çalışkanlığı ve başarılarıyla bana her zaman ilham veren eşim, aşkım Mehmet Emin BUDAK'a en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Bu yolculuk, senin anlayışın, fedakârlığın, çalışkanlığın ve sunduğun imkânlarla güzelleşti.

Evimizin neşesi, kıymetlimiz, biricik oğlumuz Rafet Mete BUDAK... Senin varlığınla büyüdük, olgunlaştık. Biliyorum ki sen, büyüdüğünde yalnız bizim değil; bilgeliğin, yüreğin ve duruşunla Türk milletinin de gururu, yarının kutlu istikbalinde söz sahibi bir umut ışığı olacaksın.

Son olarak özverili çalışmalarıyla, bilime katkı sağlamış ve özellikle kaynakçada isimleri açıkça belirtilen bilim insanlarına teşekkürlerimi sunarım. Bilgiye duyulan saygının ve akademik emeğin bilincinde olarak, bilimin ilerleyişinin temel taşlarını oluşturan siz bilim insanlarına minnettarım.

Esma GÜNEYSU BUDAK

Haziran 2025, ANKARA

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL TANITIMI	4
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
3.1. Heyelan Duyarlılık Haritalamasına Yönelik Yapılan Önceki Çalışmalar	11
3.2. Sismik Etkilerin Heyelan Duyarlılığına Etkisine Yönelik Yapılan Önceki Çalışmalar	20
3.3. Heyelan Duyarlılık Modellemesinde Harita Performanslarının Değerlendirilmesine İlişkin Önceki Çalışmalar.....	27
4. ÇALIŞMA ALANININ HEYELAN ENVANTERİ VE VERİ TABANININ OLUŞTURULMASI.....	37
4.1. Heyelan Envanterinin Oluşturulması.....	37
4.2. Veri Tabanının Oluşturulması.....	40
5. ÇALIŞMA ALANINA AİT HEYELAN DUYARLILIK ANALİZLERİNDE KULLANILAN PARAMETRELER.....	41
5.1. Topoğrafik Yükseklik.....	42
5.2. Yamaç Eğimi	43
5.3. Yamaç Yönelimi (Bakı).....	44
5.4. Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)	45
5.5. Litoloji	47
5.6. Arazi Kullanımı	49
6. ÇALIŞMA ALANININ HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ	50
6.1. Frekans Oranı (Frequency Ratio) Yönteminin Kullanımı	50

6.2. Sismik Etkinin Dikkate Alınmadığı Koşulda FR Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Analizi ..	52
6.3. Sismik Etkinin Dikkate Alındığı Koşulda FR Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Analizi	54
6.4. Sismik Etkinin Dahil Edildiği ve Edilmediği Koşulda Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi.....	65
7. ÇALIŞMA ALANINA AİT HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ PERFORMANS ANALİZLERİ	67
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
9. KAYNAKLAR.....	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2020 yılında meydana gelen afet olaylarının dağılımı (AFAD, 2020).....	1
Şekil 2.1. Çalışma alanının lokasyon haritası.	5
Şekil 2.3. Ovacık ve yakın çevresinin diri fay haritası (AFAD, 2023).....	10
Şekil 3.1. MTA Yerbilimleri Harita Görüntüleyici Portal'ından yararlanılarak oluşturulan çalışma alanına ait envanter haritası (MTA, 2005).....	39
Şekil 4.1. Çalışma alanında eğitim (train) ve sınama (test) verilerinin mekânsal dağılımı.	40
Şekil 5.1. Çalışma alanına ait topoğrafik yükseklik haritası.....	43
Şekil 5.2. Çalışma alanına ait yamaç eğimi haritası.	44
Şekil 5.3. Çalışma alanına ait yamaç yönelimi (bakı) haritası.....	45
Şekil 5.4. Çalışma alanına ait topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) haritası.	47
Şekil 5.5 (a) Çalışma alanına ait litoloji haritası (b) Litolojik birimlerin çalışma alanının içerisindeki % dağılımı.	48
Şekil 6.1. Sismik etkinin dikkate alınmadığı FR yöntemi kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalaması (DUY1) akış diyagramı.	53
Şekil 6.2. Daş (2008) tarafından yapılan çalışmaya göre drene ve doygun şev koşullarında dairesel kayma ve sonsuz şev modeli için farklı yatay ivme değerlerinde şev eğimi ile statik duruma göre güvenlik katsayısındaki azalım oranı ilişkileri.	55
Şekil 6.3. Daş (2008) tarafından sismik etkinin de dikkate alınarak heyelan duyarlılık haritası oluşturulmasına yönelik önerilen yaklaşımın kullanımının şematik gösterimi.	57
Şekil 6.4. Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada Kelkit vadisinde bir alandaki heyelan duyarlılık çalışmasında üretilen heyelan duyarlılık haritalarındaki heyelanlı piksellere karşılık duyarlılık değeri grafikleri, (a) bilinen yaklaşımla üretilen heyelan duyarlılık haritası, (b) $M_w=5,5$ ve (c) $M_w=7,5$ deprem senaryoları için üretilen sismik etkinin de dikkate alındığı heyelan duyarlılık haritaları.	59
Şekil 6.6. $M_w=6,5$ için oluşturulan a_{max} haritası.	62
Şekil 6.7. $M_w=7,5$ için oluşturulan a_{max} haritası.	63
Şekil 6.9. $M_w=7,5$ için üretilmiş MRF haritası.	64
Şekil 6.10. Çalışma alanına ait heyelan duyarlılık haritası (DUY1).....	66

Şekil 6.11. Çalışma alanına ait $M_w=6,5$ büyüklük için heyelan duyarlılık haritası (DUY2).....	66
Şekil 6.12. Çalışma alanına ait $M_w=7,5$ büyüklük için heyelan duyarlılık haritası (DUY3).....	67
Şekil 7.1. DUY1, DUY2 ve DUY3 için çizilen ROC eğrileri.	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Herbir parametreye ait hesaplanan FR değerleri (sismik etki dahil değil).....	53
Çizelge 2. Daş ve ark. (2013)'ün önerdiği eşitlikle hesaplanan d_{sismik} değerleri.....	61
Çizelge 3. MRF eşitliği kullanılarak hesaplanan MRF değerleri.....	63
Çizelge 4. $M_w=6,5$ için üretilen MRF haritasının FR değerleri.....	65
Çizelge 5. $M_w=7,5$ için üretilen MRF haritasının FR değerleri.....	65
Çizelge 6. DUY 1, DUY2 ve DUY3 için ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) değerleri.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

AFAD: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

AHP: Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process)

a_{\max} : Maksimum İvme

ANFIS: Uyarlanabilir Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)

ANN: Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)

AUC: Eğri Altında Kalan Alan (Area Under the Curve)

BF: Rastgele Orman (Random Forest)

BRT: Güçlendirilmiş Regresyon Ağaçları (Boosted Regression Trees)

CART: Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları (Classification and Regression Trees)

CBS: Coğrafi Bilgi Sistemi

CNN: Konvolüsyonel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network)

CP: Koşullu Olasılık (Conditional Probability)

DNN: Derin Sinir Ağı (Deep Neural Network)

DUY1: Sismik etkinin dikkate alınmadığı FR yöntemi kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalaması

DUY2 ve DUY3: Sismik etkilerin dikkate alındığı FR yöntemi kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalaması

EBF: Kanıta Dayalı İnanç Fonksiyonu (Evidential Belief Function)

EM-DAT: Acil Durum Olayları Veri Tabanı (Emergency Events Database)

FDA: Fisher Ayırma Analizi (Fisher Discriminant Analysis)

FIS: Bulanık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System)

FMF: Bulanık Üyelik Fonksiyonu (Fuzzy Membership Function)

FoS: Güvenlik Katsayısı (Factor of Safety)

FR: Frekans Oranı (Frequency Ratio)

GAM: Genelleştirilmiş Katkı Modeli (Generalized Additive Model)

GLM: Genelleştirilmiş Doğrusal Model (Generalized Linear Model)

INFORM: Risk Yönetimi Endeksi (Index for Risk Management)

IoE: Entropi indeksi (Index of Entropy)

IV: Bilgi Değeri (Information Value)

KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu

kh: Yatay Sismik Katsayı

LR: Lojistik Regresyon

LSM: Heyelan Duyarlılık Haritalaması (Landslide Susceptibility Mapping)

MAE: Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)

M-AHP: Modifiye edilmiş Analitik Hiyerarşi Süreci (Modified Analytic Hierarchy Process)

MAPE: Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error)

MARS: Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (Multivariate Adaptive Regression Splines)

MCDA: Çok Kriterli Karar Analizi (Multi-Criteria Decision Analysis)

MLP: Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron)

MRF: Modifiye Azalım Oranı

MSE: Ortalama Kare Hatası (Mean Square Error)

MTA: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü

Mw: Moment Büyüklüğü (Moment Magnitude)

NB: Naif Bayes (Naive Bayes)

NDVI: Normalize Edilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index)

PGA: En Yüksek Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)

PSHA: Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (Probabilistic Seismic Hazard Analysis)

QDA: İkinci Dereceden Ayırıcı Analiz (Quadratic Discriminant Analysis)

RBF: Radyal Tabanlı Fonksiyon (Radial Basis Function)

rf: Azalım oranı

RMSE: KareKök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)

ROC: Alıcı İşletim Karakteristiği (Receiver Operating Characteristic)

SPI: Akarsu Güç İndeksi (Stream Power Index)

SVM: Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine)

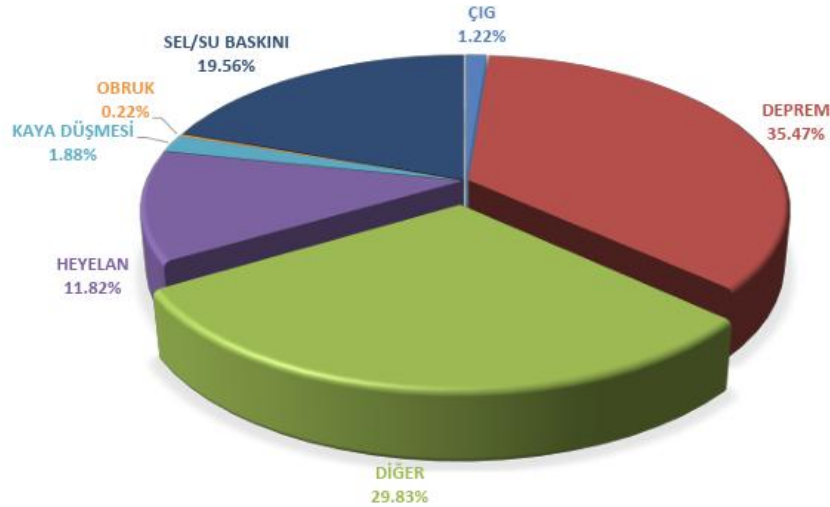
TWI: Topografik Nemlilik İndeksi (Topographic Wetness Index)

USGS: Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey)

WoE: Kanıt Ağırlığı (Weight of Evidence)

1. GİRİŞ

Afetler hem insan yaşamını hem de sosyoekonomik sistemleri tehdit eden, etkileri geniş kapsamlı olaylardır. Küresel ölçekte afet kaynaklı can kayıplarının ve ekonomik zararların artış göstermesi, afet risk yönetimi süreçlerini ülkeler için stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Son 20 yılda, dünyada afetler nedeniyle 1,5 milyondan fazla insan yaşamını yitirmiştir (Yurgiden, 2024). Bu çerçevede, afetlerin türü, sıklığı ve etkileri dikkate alınarak bölgesel risk analizlerinin yapılması, afet öncesi risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Heyelanlar, bu afetler arasında hem yaygınlık hem de yıkıcılık açısından dikkat çeken yer hareketleri olup; topoğrafik eğim, zemin özellikleri, suyun varlığı, bitki örtüsü, yoğun yağışlar ve depremler gibi çok sayıda faktörün etkileşimiyle meydana gelen kompleks olaylardır. EM-DAT verilerine göre 2000–2025 yılları arasında dünya genelinde 389 büyük ölçekli heyelan meydana gelmiş ve bu afet sonucunda 17.245 kişi hayatını kaybetmiştir (EM-DAT, 2025). Türkiye’de ise heyelanlar, %27 oranla en çok zarara neden olan ikinci afet türü olarak kayda geçmiştir (AFAD, 2018). Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi, yıllık ortalama 23 heyelan ile bu afetin en sık görüldüğü coğrafi alanlardan biridir. Trabzon, Rize, Erzurum ve Giresun illeri, en çok heyelan olayına maruz kalan iller arasında yer almaktadır (AFAD, 2018). AFAD (2020) 2020 yılında Türkiye’de meydana gelen doğa kaynaklı olay istatistiklerine bakıldığında, heyelanlar %11,82’lik bir yüzdeyle depremler ve sel baskınlarından sonra üçüncü sırada yer almaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. 2020 yılında meydana gelen afet olaylarının dağılımı (AFAD, 2020)

Heyelanların etkileri yalnızca can kaybı ile sınırlı kalmayıp, konut kayıpları, altyapı bozulmaları ve arazi kullanımı üzerinde uzun vadeli olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. 1950–2004 yılları arasında Türkiye’de yaklaşık 4.000 heyelan olayı yaşanmış; bu süreçte 65.000 konut zarar görmüş ve 167.787 konutun yeri değiştirilmiştir (Görüm ve Fidan, 2021; AFAD, 2018). Bu tür veriler, heyelanların hem kırsal hem de kentsel alanlarda afet yönetimi kapsamında öncelikli olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. INFORM Küresel Risk Endeksi 2025 raporuna göre Türkiye’nin risk puanı 5,5 olarak hesaplanmış ve ülke, “yüksek risk” kategorisinde 32. sırada yer almıştır (INFORM, 2025). Dolayısıyla, heyelan olma olasılığı altındaki bölgelerde mikro-bölgeleme, duyarlılık haritalaması ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, afetin etkilerini azaltmak açısından büyük önem taşımaktadır. Heyelanlar, yalnızca yüksek eğim ve suya doymuş zeminler gibi fiziksel koşullarla değil; deprem, şiddetli yağış, litolojik yapı ve antropojenik müdahaleler gibi birçok faktörün etkileşimiyle oluşmaktadır. Bu nedenle heyelan duyarlılığına ilişkin değerlendirmeler, çok parametrelili analizler çerçevesinde yürütülmelidir.

Ulusal verilerin yanı sıra uluslararası veriler de heyelanların küresel ölçekte önemli etkiler yarattığını göstermektedir. ABD’de her yıl yaklaşık 25–50 kişi heyelanlar nedeniyle hayatını kaybetmekte ve bu olayların ülkeye ekonomik maliyeti yılda 1 milyar doların üzerindedir (USGS, 2020). USGS (2020)’nin raporlarına göre, 1919 yılında Endonezya’da Kalut Yanardağı’nın patlaması sonucu oluşan heyelanlarda 5.114 kişi; 1933 yılında Çin’in Sinçuan bölgesinde yaşanan deprem sonrası oluşan toprak kaymalarında 6.800 kişi; 1939’da Japonya’da meydana gelen Rokko Dağı heyelanlarında ise 505 kişi hayatını kaybetmiş ve 130.000 bina zarar görmüştür. EM-DAT (2025) verilerine göre, 2000–2025 yılları arasında toplam 16.209 afetin 389’u heyelan kaynaklı olup, bu olaylarda 17.245 kişi yaşamını yitirmiştir.

Son yıllarda, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan yöntemler, özellikle coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknolojileriyle büyük bir gelişim göstermiştir. Bu haritalar, heyelana duyarlı bölgelerin belirlenmesine olanak sağlayarak arazi kullanım planlaması, altyapı geliştirme ve mühendislik uygulamalarında karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Ancak, haritaların doğruluğunu artırmak ve heyelan duyarlılığını daha doğru şekilde tahmin edebilmek için çevresel ve sismik parametrelerin entegrasyonu büyük önem arz etmektedir. Tien Bui ve arkadaşlarına (2018) göre, depremler yer yüzeyinde ivme değişiklikleri yaratarak zemin dengesini bozmakta ve heyelan duyarlılığını artırmaktadır. Bu nedenle, sismik etkinin analizlerde

dikkate alınması, özellikle aktif fay hatlarının bulunduğu bölgelerde duyarlılık analizlerinin doğruluğunu artırmaktadır. Literatürde, heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri ile Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP- Analytic Hierarchy Process) gibi yöntemlerin etkin bir şekilde kullanıldığı ifade edilmektedir. Ayrıca, Frekans Oranı (FR) gibi iki değişkenli istatistiksel analizler ile Lojistik Regresyon (LR), faktör analizi ve diskriminant analizi gibi çok değişkenli istatistiksel yöntemlerin heyelan duyarlılık çalışmalarında yaygın şekilde tercih edildiği belirtilmektedir. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık analizlerinde FR yönteminin seçilme nedeni; her bir faktör sınıfının geçmiş heyelanlarla olan ilişkisini istatistiksel olarak değerlendirebilmesi, uygulama kolaylığı ve farklı parametrelerle entegrasyon kabiliyetine sahip olmasıdır.

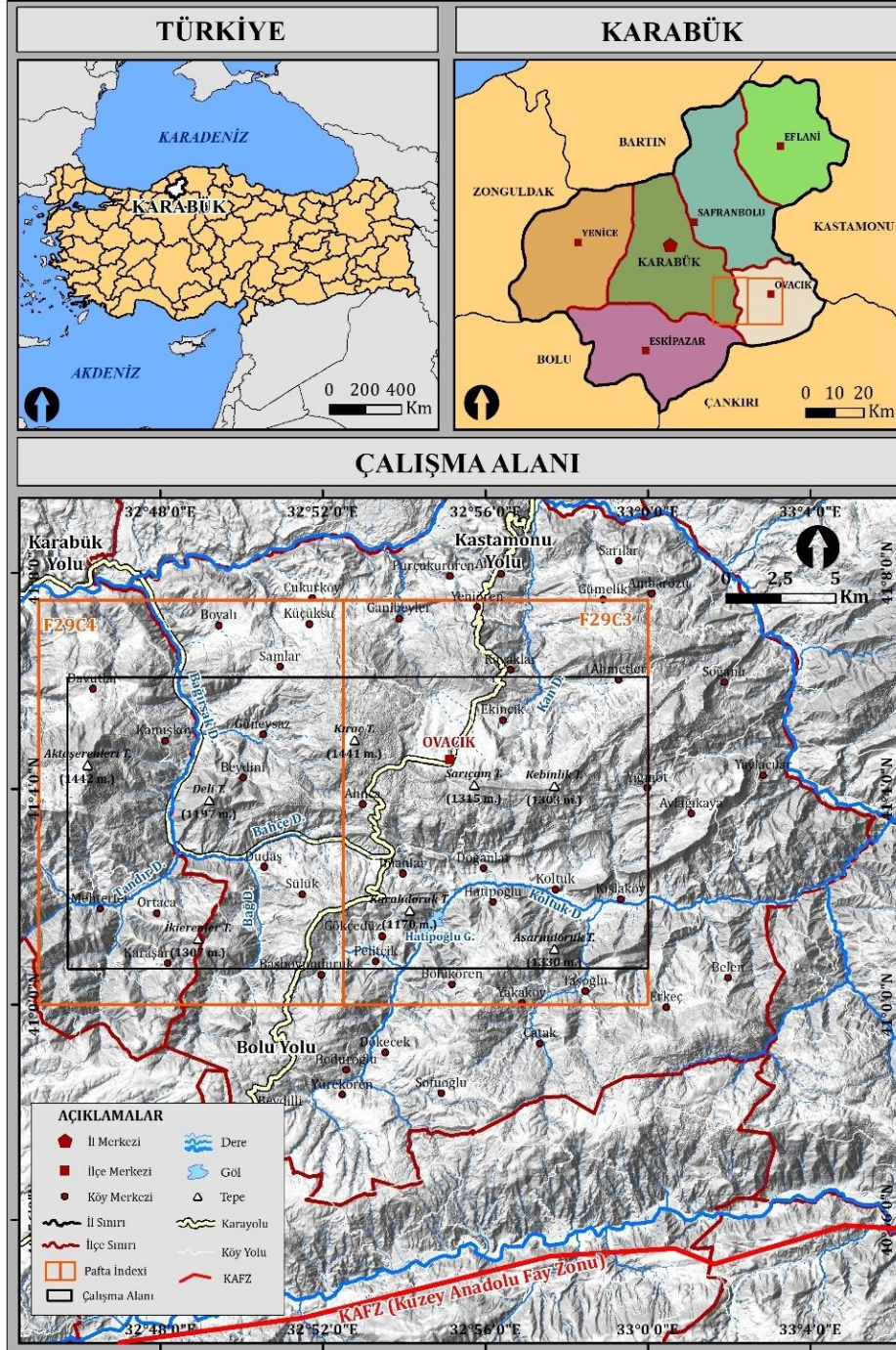
Heyelanlar depremler (sismik etki) ve şiddetli yağışlarla tetiklenebilmektedirler (Aleotti ve Chowdhury, 1999). Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan heyelan envanterlerinde çoğu kez deprem (sismik etki) veya şiddetli yağış gibi heyelanın tetikleyici faktörü bilgisi bulunmamaktadır. Daş (2008) ve Daş ve ark. (2013) yatay yer ivmesi özelinde deprem büyüklüğüne bağlı olarak tekrarlanma periyodlarıyla birlikte heyelan tehlike analizlerinde kullanılmasına karşın, sismik etkinin heyelan duyarlılık haritalarının üretimindeki kullanımının tartışmaya açık olduğunu belirtmişlerdir. Buna gerekçe olarak, hipotetik olarak aynı güvenlik katsayısına sahip iki farklı eğime sahip şev modelinin aynı sismik katsayı altında güvenlik katsayılarının farklı oranlarda azalmasını ileri sürmüşlerdir. Araştırmacılar kütleli (daireli) ve sonsuz şev modellerini esas alarak şev eğimine bağlı bir düzeltme (indirgeme) faktörü (rf) geliştirmişler ve bu düzeltme faktörünü geleneksel yöntemlerle üretilen sonuç heyelan duyarlılık haritasına uygulamışlardır. Bu yaklaşım ilk bakışta mantıklı görünse de eğim açısındaki değişime bağlı olarak sismik düzeltme faktörünün (rf) etkisi farklı derecelerde ortaya çıkmakta ve her bir parametrenin heyelan duyarlılığını aynı oranda artırıcı etkiye sahip olduğu varsayılmaktadır. Ancak bu varsayım, Daş ve ark. (2013) tarafından önerilen yaklaşımın kuramsal olarak hatalı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, veriye dayalı yaklaşımlar kullanarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi sürecinde, Daş (2008) ve Daş ve ark. (2013) tarafından önerilen yaklaşımdaki kuramsal hatayı yeniden ele alarak düzeltmek ve sismik etkiyi bir heyelan hazırlayıcı parametre olarak değerlendirip modelin duyarlılık analizine entegre etmektir. Bu doğrultuda, seçilen çalışma alanına

ait heyelan duyarlılık haritası oluşturulacak ve sismik etkinin model doğruluğu üzerindeki etkisi analiz edilecektir. Elde edilecek bulgular, sismik etkinin duyarlılık analizlerine entegrasyonunun model performansına olan katkısını ortaya koyarak, afet yönetimi ve arazi kullanım planlaması gibi alanlarda bilimsel bir temel sağlamayı amaçlamaktadır. Modelleme sürecinde, sismik etkinin dahil edilmesinin duyarlılık haritası performansındaki değişimi, istatistiksel doğrulama yöntemlerinden ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi ile değerlendirilecektir. Bu kapsamda, ROC eğrisi altında kalan alan (AUC-Area Under the Curve) değeri kullanılarak modelin ayırt edicilik gücü sayısal olarak belirlenecektir.

2. ÇALIŞMA ALANININ GENEL TANITIMI

Çalışma alanı, Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Karabük ili sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 2.1). Söz konusu alanın seçilmesinin temel nedeni, daha önceden de değinildiği gibi, sismik etkinin incelenmesi adına, ülkemizdeki en önemli fay zonlarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonuna (KAFZ) yakın konumda bulunması ile heyelanların bölge içinde önemli bir yayılım göstermesidir (Can ve ark., 2019). Karabük ilinin Ovacık ilçesi ve civarında 200 km²'lik bir alansal yayılıma sahip olan alanda en önemli yükselti 1441 m ile Kıraç Tepe'dir. Çalışma alanında topoğrafik yükseklik farkı yaklaşık 1000 m civarında olup (453 m-1441m), yarı dağlık topoğrafik ve morfolojik özellikler sergilenmektedir (Şekil 2.1). Çalışma alanı, yamaç eğimlerinin yer yer 45°'ye vardığı, ancak çoğunlukla orta-az ve düşük eğimlerin bulunduğu alanlarla temsil edilmektedir. Ovacık ilçesinin yanı sıra, Kamışköy, Davutlar, Hatipoğlu gibi kırsal yerleşimin egemen olduğu bölgede, yer yer meşe, gürgen, karaçam ve kayın ormanlık alanları ile tarımsal amaçlar doğrultusunda kullanılan alanlar da mevcuttur. Bölgedeki ana akarsular Koltuk ve Bağırsak Dere olup, ana akarsular ve kolları, dentritik drenaj ağı oluşturmaktadır.



Şekil 2.1. Çalışma alanının lokasyon haritası.

Çalışma alanında gözlenen jeolojik birimler, litolojik bileşimleri, stratigrafik ilişkileri ve yayılım alanları açısından farklılıklar göstermektedir (Şekil 2.2). Timur ve Aksay (2002) tarafından hazırlanan genel jeoloji haritasına göre, çalışma alanı sınırları içinde toplam dokuz farklı litostratigrafik birim yer almaktadır (Şekil 2.2). Bu litolojik birimler sırasıyla; Ulus Formasyonu

(Ku), Abant Formasyonu (KTab), Kışlaköy Formasyonu (Tek), Safranbolu Formasyonu (Tes), Çeçen Üyesi (Tekaç), Karabük Formasyonu (Teka), Soğanlı Formasyonu (Teso), Akçapınar Formasyonu (Tea) ve Alüvyon (Qal) olarak tanımlanmıştır. Stratigrafik dizilimde Alt Kretase yaşlı Ulus Formasyonu en yaşlı birimi temsil ederken, bunu sırasıyla Üst Paleosen–Alt Eosen yaşlı Kışlaköy Formasyonu, Alt–Orta Eosen yaşlı Safranbolu ve Karabük Formasyonları izlemektedir. En genç birimler ise Kuvaterner yaşlı Alüvyonlardır. Bu birimlerin özellikleri aşağıda ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Ulus Formasyonu (Ku): çalışma alanının yaklaşık yarısını kaplayan Ulus Formasyonu, ilk olarak Ketin ve Gümüş (1963) tarafından "Çağlayan Formasyonu" olarak tanımlanmış, ancak daha sonra Akyol ve arkadaşları tarafından "Ulus Formasyonu" olarak yeniden adlandırılmıştır. Formasyon; şeyl, kiltası, marn ve kireçtaşı gibi yerinde çökelmiş ince taneli sedimanlar ile kumtaşı, kireçtaşı ve konglomera gibi türbiditik özellik taşıyan çökel kayaların ardalanmasından oluşur. Alt Kretase yaşlı olan formasyon, doğu-batı yönünde uzanmakta olup, özellikle çalışma alanının güney kesimlerinde yoğunluk kazanmakta ve Bağırsak Deresi yönünde eğim göstermektedir. Kalınlığı yaklaşık 2000 metreye ulaşan bu birim, fosil içeriği bakımından oldukça fakirdir. Üstten, Kışlaköy ve Safranbolu Formasyonları tarafından aşıl uyumsuzlukla örtülmektedir (Timur ve Aksay, 2002).

Safranbolu Formasyonu (Tes): Alt-Orta Eosen yaşlı olan Safranbolu Formasyonu; nummulitli kireçtaşı ve marn litolojilerinden oluşur. Formasyon, Safranbolu ilçesi çevresinde geniş bir yayılım göstermektedir. Stratigrafik olarak, altta çok ince bir konglomera-kumtaşı seviyesiyle başlamakta; üst bölümlerde ise karbonatlı kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve masif kireçtaşı seviyeleri ile devam etmektedir. Genellikle orta kalınlıkta tabakalanma sunan formasyonda, havzanın güney kesiminde doğu-batı doğrultulu resifal kireçtaşı seviyeleri yaygındır. Formasyon, kuzeyde Ulus Formasyonu üzerine aşıl uyumsuzlukla oturmakta, güneyde ise Kışlaköy Formasyonu ile uyumlu bir şekilde örtülmektedir. Kalınlığı 50 ila 500 metre arasında değişmektedir (Timur ve Aksay, 2002).

Karabük Formasyonu (Teka): Alt-Orta Eosen yaşlı Karabük Formasyonu, çalışma alanında özellikle Ovacık merkez çevresinde yüzeylenmektedir. Litolojik olarak alt seviyelerde marn, orta seviyelerde kumtaşı ve marn ardalanması, üst seviyelerde ise tamamen kumtaşı ile temsil edilir. Gri ve yeşilimsi gri renklere sahip olan birim, orta ile kalın tabakalıdır. Kumtaşları iyi boylanmış ve gevşek çimentoludur. Stratigrafik olarak Safranbolu Formasyonu üzerine gelir. Havzanın

kuzeyinde yaklaşık 1500 metreye, güneyde ise 450 metreye kadar ulaşan kalınlıklar sergiler. Ovacık merkez ve İmamlar-Doğanlar köyleri civarında iki ana senklinal eksen tanımlanmakta olup, bu iki senklinalin arasında yer alan Kışlaköy Formasyonu ise doğu-batı yönlü bir antiklinal yapı sunmaktadır (Timur ve Aksay, 2002).

Çeçen Formasyonu (Tekaç): Karabük Formasyonu'nun stratigrafik bir alt birimi olarak tanımlanmakta olup, kırmızı renkli karasal çökellerden oluşan karmaşık bir litolojik bileşime sahiptir. Formasyon; çakıltası, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşının ardalanmalı istifinden meydana gelmektedir (Timur ve Aksay, 2002). Genellikle düşük konsolidasyon seviyesine sahip olması nedeniyle, bölgesel ölçekte sıklıkla kütle hareketlerine, özellikle de heyelanlara neden olmaktadır. Formasyondaki çakıllı ve kumlu seviyelerde taneler iyi yuvarlaklaşmış olmakla birlikte, boylanma genellikle zayıftır. Bu durum, yüksek enerjili akarsu ortamlarında gerçekleşen taşınım süreçlerinin bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır. Litolojinin genel özellikleri, alüvyal yelpazeler ve mevsimsel akarsular gibi karasal çökme ortamlarına işaret eder. Bu nedenle, formasyon içerisinde herhangi bir biyolojik iz ya da fosil bulgusuna rastlanmamaktadır (Sinanoğlu, 2012).

Kışlaköy Formasyonu (Tek): Kışlaköy Formasyonu, Karabük-Safranbolu Tersiyer havzasının tabanını oluşturan ve Üst Paleosen–Alt Eosen yaşlı olan birimdir. Litolojik bileşimi; konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, marn, kiltası, silttaşı ve kireçtaşından oluşmaktadır. Çalışma alanının yaklaşık yarısını kaplayan bu formasyon, Ovacık ilçesinin batısında, Mıcık ve Alizaim köyleri arasında yüzeylenmektedir. Konglomera seviyeleri genellikle tane destekli, kötü boylanmış, sıkı tutturulmuş ve orta-kalın tabakalıdır. Üst kesimlerinde kırmızı renkli kumtaşı, konglomera ve çamurtaşı ardalanması yaygındır. Kalınlığı yerel değişkenlik göstermekle birlikte ortalama 1500 metre civarındadır. Alt seviyeler, hızlı akarsu akıntılarıyla taşınan malzemelerin tektonik olarak çöken bir alanda birikmesiyle oluşmuş alüvyon yelpazesi çökellerini temsil eder (Timur ve Aksay, 2002).

Abant Formasyonu (Ktab): Bu birim, litolojik olarak bloklu konglomera, kumtaşı, silttaşı ve marn ile temsil edilmekte olup, sarımsı gri, kahverengimsi, kırmızı, morumsu gri ve yeşilimsi gri gibi değişken renk tonlarına sahiptir. Sedimenter istifte hem olistostromal nitelikteki birimler hem de düzgün tabakalanma gösteren filiş dizileri, karasal ile sığ denizel ortamlar arasında gelişen kırıntılı-karbonatlı fasiyeslerle birlikte bulunur (Günaydın, 2007). Olistostromal seviyeler, çeşitli boyut, köken ve yaşlara sahip bloklar içeren türbiditik birimler, moloz akıntıları sonucu biriken

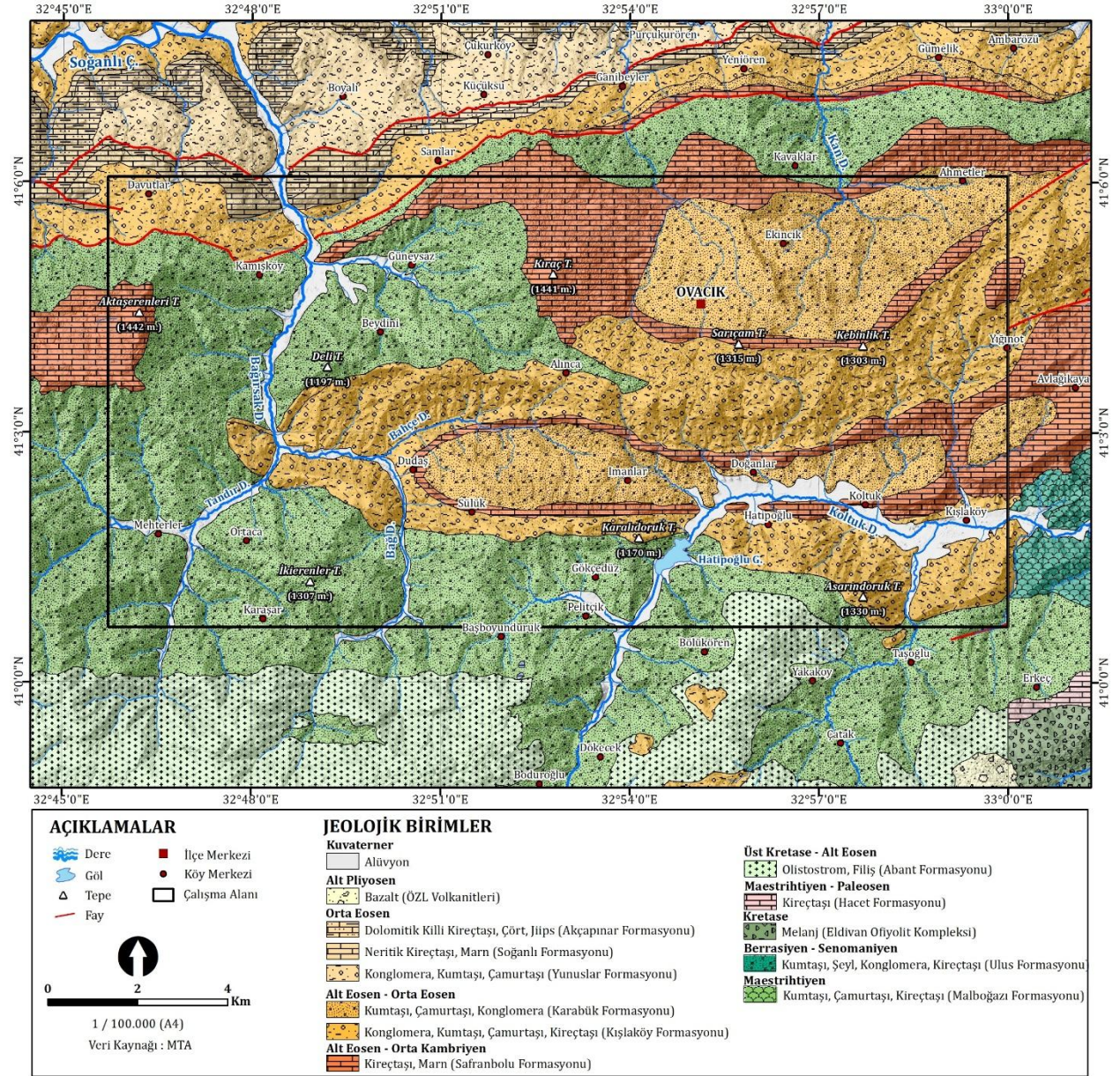
çökeller ile birlikte pelajik çamurtaşı, mikrit ve marn seviyeleriyle tanımlanır. Bu zonlarda belirgin olarak alacalı renklenmeler görülür. Olistolitler arasında granit, gabro, amfibolit, serpantin, volkanik kayalar ve çeşitli metamorfik birimlere ait bloklar yer almaktadır (Sevin ve Aksay, 2002; AFAD, 2021). Yapılan stratigrafik ve paleontolojik değerlendirmeler doğrultusunda, bu karmaşık litolojik yapıya sahip birimin Üst Kampaniyen ile Alt Eosen arasındaki bir zaman diliminde çökelmiş olduğu kabul edilmektedir (Günaydın, 2007; Sevin ve Aksay, 2002).

Soğanlı Formasyonu (Teso): Tamamen kireçtaşı litolojisinden oluşan, Orta Eosen dönemine tarihlenen önemli bir karbonat istifidir. Sarı, turuncu ve gri tonlarında gözlenen bu birim, kalın tabakalı masif yapılarıyla dikkat çeker. Alt seviyelerde tabaka kalınlığı genellikle 10–40 cm arasında değişmekteyken, üst seviyelerde 3–5 metreye kadar ulaşabilen kalınlıkta kütleler oluşturur (Sinanoğlu, 2012). Formasyonda yaygın olarak büyük ve küçük açılı çapraz katmanlanmalar izlenmekte, tabakalar arasında yer yer ince killi düzeyler görülmektedir. Alt kesimlerde detritik bileşenli kireçtaşları hakimken, stratigrafik olarak yukarı çıkıldıkça bu geçiş mikritik kireçtaşlarına doğru olur. Bu durum, çökme ortamındaki enerjinin zamanla azalmasına işaret eder. Mikritik yapıdaki kireçtaşlarında taneler yoğun şekilde çimentolanmıştır ve bu, yüksek derecede kompaksiyon ve erken diyajenez süreçlerini yansıtmaktadır (Yergök ve ark., 1987). Soğanlı Formasyonu, altta yer alan Karabük Formasyonu'nun Çerçen Üyesi üzerinde konkordan bir şekilde yer alır. Biyostratigrafik açıdan değerlendirildiğinde, formasyon içerisinde gözlemlenen Nummulites sp., Alveolina, Eorupertia sp., mercan, ostrakodlar (Ostracoda), dastrapodlar ve lamellibrans fosilleri, bu birimin Lütisiyen (Orta Eosen) yaşlı olduğunu doğrulamaktadır (Sinanoğlu, 2012; Timur ve Aksay, 2002; Yergök ve ark., 1987).

Akçapınar Formasyonu (Tea): Açık beyazdan sarımsı griye kadar değişen renklerde görülen, killi kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve yer yer çört bantlarının eşlik ettiği karbonatlı bir istif olarak tanımlanmaktadır. Bu birim, altta yer alan Soğanlı Formasyonu üzerinde konkordanslı bir şekilde yer almakta olup, istifin doğruya doğru kalınlığının azaldığı gözlemlenmektedir. Ortalama kalınlığı 150 ila 200 metre arasında değişmektedir. Birim içerisinde yapılan incelemelerde herhangi bir fosil bulgusuna rastlanmamıştır. Bununla birlikte, stratigrafik konumu ve bölgesel korelasyonlara dayanarak Akçapınar Formasyonu'nun Orta Eosen yaşlı olduğu değerlendirilmiştir. Litolojik bileşimi ve çökme özellikleri, karbonat platformlarına bağlı olarak gelişen sığ denizel bir ortamı

işaret etmektedir. Çört bantlarının varlığı, dönemsel olarak silisli çökeltmelerin etkili olduğunu göstermektedir (Timur ve Aksay, 2002).

Alüvyonlar (Qal): Çalışma alanında sınırlı yayılım gösteren Kuvaterner yaşlı alüvyonlar, genellikle Kuruçay ve Mehterler Dereleri çevresinde, kuzeybatı-güneydoğu yönelimli olarak izlenmektedir. Bu genç çökeller, çoğunlukla yüzeysel akarsuların taşıdığı malzemelerden oluşmakta ve ikinci derece karayollarına yakın alanlarda yer almaktadır.



Şekil 2.2. Çalışma alanına ait basitleştirilmiş jeoloji haritası (Timur ve Aksay, 2002).

Çalışma alanının sismotektonik konumu değerlendirildiğinde, bölgenin Türkiye'nin en aktif tektonik kuşaklarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) etkisi altında yer aldığı görülmektedir. Doğu-batı doğrultulu uzanımıyla, Anadolu Levhası ile Avrasya Levhası arasındaki sağ yanal doğrultu atımlı hareketleri yansıtan bu fay zonu, bölgenin başlıca sismotektonik yapı unsurudur. AFAD (2023) tarafından yayımlanan Türkiye Diri Fay Haritası'na göre, Ovacık ve yakın çevresi, Holosen yaşlı ve yüzey faylanması üretmiş aktif faylara oldukça yakın bir konumda bulunmaktadır (Şekil 2.3). Harita verileri incelendiğinde, Ovacık ve çevresinde kaydedilen tarihsel ve aletsel dönem depremlerinin büyük çoğunluğunun Mw 5,0 ile 6,9 aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, bölgeye yakın konumlarda geçmişte Mw 7,0 ve üzeri büyüklükte depremlerin meydana geldiği de çeşitli çalışmalarda belgelenmiştir (Özalp ve ark., 2016; AFAD, 2023). Bu durum, bölgenin Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'na bağlı olarak gelişen aktif tektonik süreçlerin doğrudan etkisi altında olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Ovacık ve yakın çevresinin diri fay haritası (AFAD, 2023).

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. Heyelan Duyarlılık Haritalamasına Yönelik Yapılan Önceki Çalışmalar

Heyelan duyarlılık haritalaması, belirli bir bölgedeki arazilerin heyelan meydana gelme olasılıklarını görelî olarak sınıflandıran ve mekânsal olarak gösteren bir yöntemdir. Bu haritalar, gelecekte meydana gelebilecek heyelanların yerlerini tahmin etmek için geçmişte gerçekleşen heyelan olaylarıyla birlikte jeolojik, jeomorfolojik, hidrolojik, toprak, arazi kullanım ve iklim gibi çevresel değişkenlerin analizine dayanır. Duyarlılık haritalaması, heyelan tehlikesi ve riski çalışmalarının ilk aşamasını oluşturmakla birlikte, afet yönetimi, arazi kullanım planlaması ve mühendislik projeleri açısından kritik öneme sahiptir (Guzzetti ve ark., 2005). Heyelan duyarlılığı, genellikle Lojistik Regresyon (Yılmaz, 2010; Ercanoğlu ve Temiz, 2011; Dagdelenler ve ark., 2016; Pourghasemi ve Rossi, 2017; Hong ve ark., 2018; Berber ve ark., 2025), Frekans Oranı (Pradhan ve Lee, 2010; Yalcin ve ark., 2011; Chen ve ark., 2017; Dagdelenler, 2020; Sonker ve Tripathi, 2022; Barman ve Das, 2024; Gulbet ve Getahun, 2024; Abay ve ark., 2025), Kanıt Ağırlığı (Feizizadeh ve Blaschke, 2014; Pourghasemi ve Rahmati, 2018; Khosravi ve ark., 2020; Zhao ve ark., 2021) yöntemi gibi istatistiksel, Karar Ağaçları (Kavzoglu ve ark., 2015; Hong ve ark., 2019) Destek Vektör Makineleri (Tien Bui ve ark., 2016; Youssef ve ark., 2016; Hong ve ark., 2017; Yılmaz ve Keskin, 2009) Yapay Sinir Ağları (Yılmaz, 2010; Pradhan, 2013; Park ve ark., 2013; Shahabi ve Hashim, 2015; Can ve ark., 2019), Rasgele Orman (Random Forest) (Pham ve ark., 2016; Chen ve ark., 2018; Wang ve ark., 2020) gibi makine öğrenmesi temelli veri madenciliği yöntemleri veya Analitik Hiyerarşi Süreci (Hasekiogulları ve Ercanoğlu, 2012; Nefeslioglu ve ark., 2013; Wu ve ark., 2016; He ve ark., 2019; Cengiz ve Ercanoğlu, 2022; Das ve ark., 2022; Aksoy, 2023; Zhou ve ark., 2023) yaklaşımları kullanılarak değerlendirilir. Bu yöntemlerde, önce geçmiş heyelan envanter haritaları oluşturulur, ardından bu heyelanların oluşumunda etkili olan faktörlerle (örneğin eğim, litoloji, arazi kullanımını, yağış, akarsu yoğunluğu vb.) mekânsal analizler yapılır. Bu analizler sonucunda, çalışma alanı farklı heyelan duyarlılığı sınıflarına (düşük, orta, yüksek gibi) ayrılır (Pourghasemi ve ark., 2012).

Görüldüğü üzere, heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında kullanılan yöntemler; istatistiksel tekniklerden (Lojistik Regresyon, Frekans Oranı, Kanıt Ağırlığı vb.) makine öğrenmesi temelli

veri madenciliği yaklaşımlarına (Karar Ağaçları, Destek Vektör Makineleri (SVM), Yapay Sinir Ağları, Rastgele Orman vb.) ve çok kriterli karar verme tekniklerine (özellikle AHP) kadar çeşitlilik göstermektedir. Bu kapsamda, aşağıda her bir yönteme ilişkin, yukarıda referansları verilen literatür çalışmalarına kısaca yer verilerek bir özet sunulmuştur.

Pourghasemi ve Rossi (2017), İran'ın Mazandaran Eyaleti'nin batısında heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak amacıyla Genelleştirilmiş Doğrusal Model, Genelleştirilmiş Eklemlenmiş Model ve M-AHP (Değiştirilmiş Analitik Hiyerarşi Süreci) modellerini kullanmıştır. Çalışmada 153 heyelan olayı tespit edilmiş, bunların %70'i model eğitimi, %30'u ise model doğrulaması için ayrılmıştır. Koşullandırıcı faktörler olarak litoloji, arazi kullanımı, nehir, yol ve fay uzaklıkları, eğim, eğim yönü, yükseklik, TWI, plan ve profil eğriliği gibi değişkenler kullanılmıştır. Çalışmalarında dört farklı duyarlılık haritası üretilmiştir. AUC değerlerine göre M-AHP modeli (%82,77 doğrulama) diğer modellerden daha yüksek doğruluk göstermiştir ve en başarılı yöntem olarak öne çıkmıştır.

Ercanoglu ve Temiz (2011), Batı Karadeniz Bölgesi'nde yaptıkları çalışmalarında, Lojistik Regresyon ve Bulanık Mantık yaklaşımlarını kullanarak heyelan duyarlılık haritaları üretmişlerdir. Çalışmada 96 adet heyelandan oluşan heyelan envanteri ile altı adet heyelan hazırlayıcı parametre değerlendirmeye alınmıştır. Bulanık Mantık yaklaşımı kullanılarak CBS ortamında toplam 18 harita üretilmiş, modellerin performansı ROC eğrisi ve kosinüs genlik yöntemi ile değerlendirilmiştir. Elde ettikleri veriler AUC değeri 0,975 olan bulanık gama operatörüyle üretilen haritanın en yüksek duyarlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, araştırmacılar Lojistik Regresyon, Bulanık Mantık yöntemleri ile üretilen haritaların da tatmin edici düzeyde başarı sağladığı belirlemişlerdir.

Dagdelenler ve ark. (2016), heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde örnekleme stratejilerinin etkisini incelemek amacıyla kök hücre (seed cell) ve heyelan alanı yaklaşımlarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Çalışma alanı olarak Türkiye'nin Gelibolu Yarımadası'nın doğu kesimi seçilmiş, her iki yöntemle üretilen heyelan duyarlılık haritalarının performansı ROC-AUC analizi ile değerlendirilmiştir. Kök hücre yaklaşımının performansını analiz etmek amacıyla 25 m, 50 m, 75 m ve 100 m olmak üzere dört farklı tampon mesafesi; ayrıca 10 m, 12,5 m ve 25 m olmak üzere üç farklı mekânsal çözünürlük kullanılmıştır. Araştırmacıları elde ettiği veriler 50 m tampon

mesafesi için üretilen haritalarda AUC değerinin en yüksek seviyeye (0,790–0,792) ulaştığını göstermiştir.

Hong ve ark. (2018), Karar Ağacı tabanlı dört farklı analiz yöntemiyle (JDT, AdaBoost, Bagging ve Rotation Forest) Çin'in Jiangxi Eyaleti'ndeki Guangchang bölgesinde heyelan duyarlılık haritalamasının modelleme performansını araştırmıştır. Çalışma alanı içerisinde toplam 237 heyelanın olduğu bir envanter kullanılmıştır. Heyelan verisi %70 eğitim ve %30 doğrulama seti olarak ayrılmış; eğim, bakı, yükseklik, TWI, akarsu güç indeksi (SPI), sediman taşıma indeksi (STI), eğrilik türleri, litoloji, çeşitli uzaklık parametreleri, arazi kullanımı, NDVI (Normalize Edilmiş Fark Bitki İndeksi) ve yağış gibi 15 hazırlayıcı parametre analize dâhil edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu dört farklı modelle heyelan duyarlılık haritaları üretilmiş ve performansları ROC-AUC analiziyle değerlendirilmiştir.

Yalcin ve ark. (2011), Trabzon ili örneğinde yaptıkları heyelan duyarlılık haritalamasında, CBS ve uzaktan algılama verileri kullanılarak FR, AHP, İstatistiksel İndeks, Ağırlık Faktörü ve LR olmak üzere beş farklı yöntem kullanmışlar ve bu yöntemlerle ürettikleri haritaların performanslarını karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda Ağırlık Faktörü yönteminin diğer modellere kıyasla daha yüksek başarı sağladığı belirlenmiştir.

Yılmaz ve Keskin (2009) tarafından yapılan bu çalışma, Türkiye'nin Giresun ili Şebinkarahisar ilçesine bağlı Avutmuş bölgesinde, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi amacıyla FR ve Stabilité İndeks Haritalama yöntemlerini kullanarak istatistiksel ve fiziksel tabanlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Heyelan envanterine dayanarak drenaj sistemlerine, faylara ve yollara uzaklık; eğim, bakı, yükseklik, TWI ve bitki örtüsü gibi hazırlayıcı parametreler değerlendirilmiştir. Modelin doğrulama sonuçlarına göre, FR yöntemi ile üretilen harita daha gerçekçi sonuçlar sunmuş ve böylece en başarılı model olarak belirlenmiştir.

Hasekiogulları ve Ercanogulları (2012) çalışmalarında, Batı Karadeniz'deki Yenice bölgesinde heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmak için AHP yöntemini kullanmışlardır. Çalışma alanı yaklaşık 567 km² olup, envanterde 101 heyelan yer almaktadır. Duyarlılık analizlerinde kullanılmak üzere 13 parametre (eğim, bakı, plan eğriliği, topoğrafik yükseklik, bitki örtüsü indeksi, arazi kullanımı, drenaja uzaklık, yollara uzaklık, yapısal elemanlara uzaklık, sırtlara uzaklık, akarsu gücü indeksi, sediman taşıma indeksi ve TWI) seçilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen duyarlılık haritalarının performansları AUC değerleri ile belirlenmiştir. Çalışma

alanının %46,8'i çok düşük ve düşük, %15,0'ı orta, %38,2'si ise çok yüksek ve yüksek heyelan duyarlılığına sahip olduğu görülmüştür.

Pourghasemi ve ark. (2012) çalışmalarında, İran Haraz bölgesindeki heyelan alanlarını belirlemek ve zararlarını azaltmak amacıyla Bulanık Mantık ve AHP modellerini kullanılmışlardır. 78 heyelandan 55'i çalışmada kullanılmış, geri kalan 23 heyelan ise modelin doğrulanması için ayrılmıştır. Çalışmada heyelan duyarlılık haritaları, 12 adet hazırlayıcı parametre ile oluşturulan veri seti kullanılarak bulanık mantık ve AHP yöntemleri ile üretilmiştir. Sonuç olarak, bulanık mantık yönteminin ROC-AUC değeri %89,7, AHP modelinin ise %81,1 olarak hesaplanmış ve bulanık mantık yöntemi daha başarılı bir performans sergilediği vurgulanmıştır.

Nefeslioglu ve ark. (2013) çalışmasında, heyelan duyarlılık hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan AHP yöntemine yeni bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım, geleneksel AHP'nin zayıflıklarını en aza indirmeyi amaçlayan Değiştirilmiş AHP (M-AHP) olarak adlandırılmıştır. M-AHP yöntemi, karşılaştırma matrisi ve ağırlık vektörü için tutarlılık oranını 0,10'un altında tutarak, doğal tehlike, kaynak yönetimi ve doğa koruma gibi alanlarda araştırmacılara kolaylıklar sağlamaktadır.

Ozdemir ve Altural (2013), Türkiye'nin güneybatısında yer alan Sultan Dağları'nda 90 heyelan örneği kullanarak FR, Kanıt Ağırlıkları (WoE) ve LR yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirerek heyelan duyarlılık haritaları oluşturmuştur. Çalışmada 18 hazırlayıcı parametre (jeoloji, bağıl geçirgenlik, arazi kullanımı, yağış, yükseklik, eğim, bakı, eğrilik türleri, TWI, SPI, STI, drenaj uzaklığı, fay uzaklığı, drenaj yoğunluğu, fay yoğunluğu, kaynak yoğunluğu) dikkate alınmıştır. Model performansları ROC-AUC değeri ile değerlendirilmiş ve sırasıyla FR için 0,976, LR için 0,952 ve WoE için 0,937 olarak bulunmuştur. Sonuçlar, özellikle Frekans Oranı yönteminin basitliği, uygulama kolaylığı ve yüksek doğruluk performansı sayesinde çalışma alanında en etkili model olduğunu ortaya koymuştur.

Pradhan (2013) çalışmasında, Malezya'daki Penang Tepesi bölgesinde heyelan duyarlılık haritalaması için Karar Ağacı, SVM ve Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi yöntemlerini değerlendirmiş ve çalışma alanına ait 113 adet heyelan haritalamıştır. Bu çalışma sonucunda Karar Ağacı, Destek Vektör Makinesi ve Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi modelleri kullanılarak toplamda 15 adet heyelan duyarlılık haritası üretilmiş ve performansları ROC-AUC değeri ile hesaplanmıştır. ROC analizleri sonucuna göre, model-1 Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi

78,61 ile Karar Ağacı 77,97 ve SVM 75,07 yöntemlerinden daha yüksek performansa sahip olmuştur.

Feizizadeh ve Blaschke (2014), İran'daki Izeh Nehri havzasında heyelan duyarlılığını belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada, Bulanık Üyelik Fonksiyonları (FMF) ile Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemlerinin birleşimine dayanan, CBS destekli çok kriterli karar analizi (MCDA) yöntemini geliştirmişlerdir. Çalışmada toplam 9 hazırlayıcı parametre değerlendirilmiş ve kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Bulanık Küme Teorisi ile AHP'nin entegrasyonunun duyarlılık haritalarının doğruluğunu artırdığını ve yüksek güvenilirlik sağladığını ortaya koymuştur. Üretilen haritalarda mevcut heyelanların %53'ünün "çok yüksek" ve %31'inin "yüksek" duyarlılık sınıflarına girdiği vurgulanmıştır.

Shahabi ve Hashim (2015), İran'ın güneybatısındaki Zab Havzası'nda gerçekleştirdikleri çalışmada, uzaktan algılama ve CBS verilerini kullanarak heyelan duyarlılık haritaları üretmişlerdir. Bu amaçla FR, LR ve Bulanık Mantık olmak üzere üç farklı model uygulayarak çalışma alanında eğim, bakı, yükseklik, litoloji, NDVI, arazi örtüsü, yağış, faya uzaklık, drenaja uzaklık ve yola uzaklık olmak üzere 10 adet heyelan hazırlayıcı parametreyi değerlendirilmişlerdir. Modelin doğrulama sonuçlarına göre, LR modeli %96 ile en yüksek doğruluğa sahipken, Bulanık Mantık %95, FR yöntemi ise %94 doğruluk göstermiştir.

Tien Bui ve arkadaşları (2016), Vietnam'daki Son La Hidroelektrik Havzası'nda sığ heyelan duyarlılığını modellemek amacıyla gelişmiş makine öğrenmesi ve istatistiksel yöntemlerin performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada toplam 12 heyelan hazırlayıcı parametre kullanılmış ve heyelan envanteri verileri %70 eğitim, %30 doğrulama seti olarak rastgele ayrılmıştır. Araştırmada Çok Katmanlı Algılayıcı Sinir Ağları (MLP), Destek Vektör Makineleri (SVM), Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları (RBF), Çekirdek Lojistik Regresyon ve Lojistik Model Ağaçları olmak üzere beş farklı model uygulanmıştır. Modellerin başarıları ROC eğrisi, Kappa indeksi ve çeşitli istatistiksel performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek doğruluk oranı %90,2 ile çok katmanlı algılayıcı sinir ağı modelinde gözlenmiş olup, bunu sırasıyla %88,7 ile SVM, %87,9 ile çekirdek lojistik regresyon, %87,1 ile radyal tabanlı fonksiyon ağları ve %86,1 ile lojistik model ağaçları takip etmiştir.

Pham ve ark. (2016) çalışmasında, Hindistan'ın Uttarakhand bölgesinde heyelan duyarlılığı değerlendirmesi için SVM, LR, Fisher'in Doğrusal Ayırım Analizi, Bayes Ağı ve Naïve Bayes olmak üzere beş farklı makine öğrenme yöntemi uygulamışlardır. Modellerin performansı, ROC-AUC değeri ile değerlendirilmiş ve tüm yöntemler yüksek başarı göstermiştir (AUC = 0,910–0,950). En iyi performans, AUC = 0,950 ile SVM modelinde gözlemlenmiş; bunu sırasıyla LR (0,922), Fisher'in Doğrusal Ayırım Analizi (0,921), Bayes Ağı (0,915) ve Naïve Bayes (0,910) modelleri takip etmiştir.

Pradhan ve Kim (2016), Kore'nin kuzeydoğusunda yer alan Deokjeok-ri Deresi bölgesinde heyelan duyarlılığını incelemişlerdir. Çalışmada, analiz yöntemi olarak Mekânsal Çok Kriterli Değerlendirme (MCDM) Modeli ile Sığ Heyelan Kararlılığı Deterministik Modeli kullanılmıştır. MCDM modeli için topoğrafik, hidrolojik, toprak, orman ve jeolojik parametreler girdi katmanı olarak değerlendirilirken; Sığ Heyelan Kararlılığı Deterministik Modeli'nde eğim, topoğrafik nemlilik indeksi ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) girdi katmanı olarak kullanılmıştır. Her iki modelin ürettiği duyarlılık haritaları üç farklı sınıfa ayrılmış ve modellerin doğrulukları ROC-AUC değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Youssef ve ark. (2016) çalışmalarında, Suudi Arabistan'ın güneybatısındaki Asir Bölgesi'nde yer alan Wadi Itwad'da FR, Kanıt Ağırlıkları (WoE), Entropi İndeksi (IoE) ve Dempster-Shafer yöntemlerini kullanarak heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesini amaçlamaktadır. Çalışmalarında toplam 326 heyelan lokasyonu belirlenmiş ve %75'i model eğitimi, %25'i doğrulama için kullanılmıştır. Heyelan envanteri ile beraber yükseklik, eğim, topoğrafik nemlilik indeksi, eğrilik, bakı, çizgisellik, yol ve akarsu uzaklığı, litoloji, yağış ve NDVI gibi hazırlayıcı parametre de değerlendirilmiştir. ROC eğrileri ve AUC değerleriyle modelin performansı değerlendirilerek, tahmin oranları sırasıyla FR (%95), Kanıt Ağırlıkları (%95,2), Entropi İndeksi (%94,6) ve Dempster-Shafer (%93,4) olarak bulunmuştur.

Chen ve arkadaşları (2017), Çin'in Hanyuan ilçesinde heyelan duyarlılığını analiz etmek amacıyla Frekans Oranı yöntemi ile entegre edilen Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi, Genelleştirilmiş Katkı Modeli ve Destek Vektör Makineleri (SVM) olmak üzere üç farklı yöntem kullanarak duyarlılık haritaları üretmişlerdir. Modelleme sürecinde, eğim, bakı, yükseklik, Topografik Nemlilik İndeksi (TWI), düzlem ve profil eğriliği, nehirlere, faylara ve yollara uzaklık, arazi kullanımı, NDVI ve litoloji olmak üzere toplam 12 hazırlayıcı parametre değerlendirilmiştir.

ROC eğrisi ile yapılan doğrulama sonuçlarına göre, en yüksek tahmin başarısı %87,5 ile SVM modeline ait olurken, Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi ve Genelleştirilmiş Katkı Modeli sırasıyla %85,1 ve %84,6 doğruluk oranları sergilemiştir.

Hong ve ark. (2017) Çin'in Xing Guo İlçesi'nde heyelan duyarlılığı haritası üretmek amacıyla eğim, bakı, yükseklik, TWI, SPI, STI, toprak, litoloji, NDVI, arazi kullanımı, yağış, yol, nehir ve fay uzaklığı ile düzlem ve profil eğriliği olmak üzere toplamda 16 adet heyelan hazırlayıcı parametre kullanılarak analizlerde Coğrafi Ağırlıklı Regresyon Modeli (Geographically Weighted Regression) modeli kullanılmıştır. Coğrafi Ağırlıklı Regresyon Modeli'nin yanında LR ve SVM yöntemleri ile de analizler yapılmış ve bu modeller birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuç duyarlılık haritaları arasında Coğrafi Ağırlıklı Regresyon Modeli, en yüksek doğruluk oranı (0,819) ve tahmin başarısı (0,789) ile en iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Pourghasemi ve Rahmati (2018), İran'ın Ghaemshahr bölgesinde heyelan duyarlılığını modellemek amacıyla on farklı makine öğrenimi algoritmasını karşılaştırmalı olarak uygulamışlardır. Kullandıkları yöntemler arasında Yapay Sinir Ağları (ANN), Güçlendirilmiş Regresyon Ağacı (BRT), Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları (CART), Genelleştirilmiş Doğrusal Model (GLM), Genelleştirilmiş Katkı Modeli (GAM), Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS), Naif Bayes (NB), İkinci Dereceden Ayırıcı Analiz (QDA), Rastgele Orman (RF) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) yer almaktadır. Bu modellerin performansları, alan altındaki eğri (AUC) değerleri ile değerlendirilmiş ve AUC değerlerinin %62,4 ile %83,7 arasında değiştiği belirlenmiştir. Rastgele Orman, %83,7 ile en yüksek başarıyı gösterirken, onu %80,7 ile Güçlendirilmiş Regresyon Ağacı takip etmiştir. Bu sonuçlar, özellikle Rastgele Orman ve Güçlendirilmiş Regresyon Ağacı algoritmalarının heyelan duyarlılık modellemesinde yüksek performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Can ve arkadaşları (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Karabük ilinin güneydoğusundaki Ovacık bölgesi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, söz konusu alana ait heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemi kullanılarak geliştirilen farklı eğitim algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma alanında toplam 196 adet heyelan belirlenmiş olup, analizlerde yükseklik, eğim, bakı, topoğrafik nemlilik indeksi, litoloji ve bitki örtüsü indeksi gibi hazırlayıcı parametrelerden yararlanılmıştır. Yapay Sinir Ağı yapısı olarak hem tek hem de çift gizli katmanlı

iki farklı mimari kullanılmış ve her biri için dört farklı eğitim algoritması (Batch back-propagation, Quick propagation, Conjugate Gradient Descent- CGD ve Levenberg–Marquardt) uygulanarak toplamda sekiz farklı duyarlılık haritası üretilmiştir. ROC analizi sonuçlarına göre, CGD1 modeli en yüksek AUC (0,817) değerlerine ulaşarak en başarılı performansı sergilemiştir.

Das ve ark. (2022)'nin yaptıkları çalışmada, Kalimpong bölgesindeki heyelan duyarlılık haritalamasını AHP yöntemi kullanarak oluşturmuşlardır. Araştırmacılar 15 adet heyelan hazırlayıcı faktör (eğim, çizgisellik, drenaj yoğunluğu, arazi kullanımı, vb.) kullanılarak oluşturdukları modelde, Pearson korelasyon katsayısı ve varyans şişirme faktörleriyle faktörler arasındaki ilişkiyi analiz etmişler ve elde ettikleri sonuçlara göre başarı oranı eğrisi (SRC) yöntemiyle %79,5 doğrulukla en yüksek performansa sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Hong ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, Çin'in Youfang bölgesinde heyelan duyarlılığını Naïve Bayes, Çok Katmanlı Algılayıcı, Çekirdek Lojistik Regresyon ve J48-Bagging olmak üzere dört farklı yapay zekâ modeli kullanılarak değerlendirmişler ve karşılaştırmışlardır. Heyelan hazırlayıcı parametre olarak eğim, bakı, yükseklik, plan eğriliği, profil eğriliği, SPI, TWI, STI, arazi kullanımı, litoloji, faylara olan uzaklık, yollara olan uzaklık, nehirlere olan uzaklık ve yağış parametrelerini dikkate alarak duyarlılık analizlerini FR yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, Çok Katmanlı Algılayıcı modelinin diğer üç model (Naïve Bayes, Çekirdek Lojistik Regresyon, J48-Bagging) arasında en makul sonuçları verdiğini göstermiştir.

Cengiz ve Ercanoğlu (2022) çalışmalarında, geleneksel AHP yöntemini kullanarak heyelan duyarlılık haritası oluşturmayı amaçlamışlardır. Muğla'nın Seydikemer ilçesinde gerçekleştirilen bu çalışmada bulanık ilişkiler ve bulanık matrisler kavramlarını kullanarak heyelan duyarlılık haritalamasında uygulanabilen, FR-AHP adı verilen yeni bir veri odaklı analitik hiyerarşi yöntemi önerilmiştir. Bu önerilen yöntem ve Bulanık Geometrik Ortalama ve Bulanık Kapsam Analizi yöntemlerini kullanarak heyelan duyarlılık analizleri sonucu 3 farklı harita üretmişler ve bu sonuç haritalarının performanslarını AUC yaklaşımı ile karşılaştırmışlardır. Bulanık Kapsam Analizi, Bulanık Geometrik Ortalama ve FR-AHP haritalarının AUC değerleri sırasıyla 0,813, 0,806 ve 0,802 olarak hesaplanmıştır.

Sonker ve Tripathi (2022)'nin yaptıkları çalışmada, Kuzeydoğu Himalayalar'da yer alan ve yoğun yağış, tektonik hareketler ile insan faaliyetlerinin etkisinde kalan Sikkim bölgesinde, FR yöntemi ile heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Haritalama sonucunda bölgenin %11,88'i çok yüksek,

%15,75'i yüksek, %25,88'i orta, %25,30'u düşük ve %21,19'u çok düşük heyelan duyarlı olarak sınıflandırılmıştır. Modelin başarısını ROC eğrisi altında kalan alanın (AUC) %87,8 olmasıyla değerlendirmişlerdir.

Türkiye'nin kuzeybatısındaki Marmara Bölgesi'nde, ormanlık alanlar ve sanayi bölgelerinin iç içe geçtiği alanlarda heyelan duyarlılık haritası oluşturmayı amaçlayan Aksoy (2023), duyarlılık analizlerinde AHP yöntemini kullanarak, litoloji, eğim, eğrilik, yağış, bakı, faylara mesafe, akarsulara mesafe, yollara mesafe, arazi kullanımı, toprak, yükseklik ve NDVI gibi 12 farklı parametre kullanmıştır. Araştırmacı, heyelan duyarlılık haritasının performans analizini, ROC analizi ile yapmış ve sonuç olarak da haritanın AUC değerini 0,809 olarak hesaplamıştır. Orman yapısı açısından, ağaç topluluğu yapısı, gelişim aşaması, taç kapanışı ve orman yaşı olmak üzere 4 adet ana parametre belirlenmiş, bu parametreler, CBS kullanılarak heyelan duyarlılık haritasına girdi parametresi olarak dahil etmişlerdir. Araştırmacı, sonuçların heyelan duyarlılığının, birden fazla ağaç türüne sahip, olgun, gelişim aşamasında ve taç kapanışı %41-%70 arasında olan ormanlarda en düşük olduğunu gösterdiğini vurgulamıştır.

Barman ve Das (2024), Hindistan'ın Mizoram eyaletine bağlı Aizawl bölgesinde heyelan duyarlılık haritaları üretmek amacıyla Frekans Oranı (FR) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada, eğim, yükselti, bakı, eğrilik, topoğrafik nemlilik ve pürüzlülük indeksleri, yağış erozyon faktörü, jeoloji, arazi kullanımı, NDVI ve yola uzaklık gibi 12 hazırlayıcı parametre, heyelan envanteriyle birlikte değerlendirilmiştir. Parametre sınıflandırmalarında dört farklı CBS tabanlı yöntem karşılaştırılmış; en iyi sonuçlar, Ortalama-Standart Sapma Sınıflandırması ile elde edilmiştir. Üretilen duyarlılık haritalarının doğruluğu ROC-AUC analiziyle test edilmiş ve tüm yöntemlerin benzer performans gösterdiği, ancak söz konusu sınıflandırma yönteminin en yüksek başarıyı sağladığı belirlenmiştir.

Berber ve ark. (2025), Çanakkale'nin Lapseki-Güzelyalı arasındaki bölgede heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulması amacıyla LR, Yapay Sinir Ağı ve SVM yöntemlerini karşılaştırmalı olarak uygulamıştır. Heyelan koşullandırma faktörleri olarak topoğrafik yükseklik, litoloji, eğim, arazi kullanımı, bakı, eğrilik, akarsulara uzaklık, TWI ve NDVI olmak üzere dokuz parametre seçilmiştir. Parametrelerin alt sınıfları için FR değerleri hesaplanarak model girdisi olarak kullanılmıştır. Modellerin performansı AUC (ROC eğrisi altında kalan alan), doğruluk, kesinlik, Kappa indeksi ve F1-skoru gibi istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar

sonucunda Yapay Sinir Ağı yöntemi, LR ve SVM'ye kıyasla daha yüksek başarı göstermiş ve en güvenilir model olarak öne çıkmıştır.

Gulbet ve Getahun (2024) Etiyopya'nın merkezinde yer alan Kebels bölgesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, 175 adet heyelana ait envantere dayanarak FR ve AHP yöntemleri karşılaştırılmıştır. Model başarıları ROC-AUC değeri ile değerlendirilmiş; AHP yöntemi için %84,5, FR yöntemi için %73 değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar, AHP yönteminin bu çalışma alanı özelinde daha başarılı bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Abay ve ark. (2025) çalışmalarında, FR yöntemiyle heyelan duyarlılık haritaları üretmeyi amaçlamışlardır. Google Earth üzerinden elde edilen 283 heyelan verisi kullanılarak, 7 adet hazırlayıcı parametre (eğim, bakı, yükselti, litoloji, drenaja uzaklık, arazi kullanımı/örtüsü ve çizgiselliğe uzaklık) değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda özellikle eğim ($>35^\circ$), litoloji, drenaja uzaklık (0–150 m), çizgiselliğe uzaklık (0–400 m), yükseklik (>3030 m) ve çıplak araziler heyelan oluşumunda etkili parametreler olarak öne çıkmıştır. Araştırmacılar oluşturdukları duyarlılık haritasına göre çalışma alanının %11,7'si düşük, %47,68'i orta, %30,83'ü yüksek ve %9,79'u çok yüksek duyarlılık sınıfında yer aldığını belirtmişlerdir.

3.2. Sismik Etkilerin Heyelan Duyarlılığına Etkisine Yönelik Yapılan Önceki Çalışmalar

Heyelan duyarlılığı analizlerinde, sismik etkiler de önemli bir parametre olarak yer almaktadır. Depremler, özellikle sismik olarak aktif bölgelerde heyelanları tetikleyebilecek birincil faktörlerden biridir. Sismik etkinin heyelan duyarlılık modellemesi üzerindeki etkisi, özellikle deprem kaynaklı yamaç dengesizliği ve zemin davranışındaki değişimlere bağlı olarak kritik öneme sahiptir. Ancak mevcut literatürde, heyelan duyarlılık modellerine sismik etkinin entegrasyonu sınırlı düzeyde incelenmiş; çoğu çalışma sadece morfometrik, litolojik ve hidrolojik değişkenlere odaklanmıştır. Bu çalışma, sismik etkinin mekânsal duyarlılık analizlerine katkısını değerlendirmeyi amaçlamakta olup, konuya ilişkin teknik literatürde yer alan ve bu kapsamla örtüşen seçilmiş çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Parise ve Jibson (2000) yaptıkları çalışmada 17 Ocak 1994 Northridge depremi ($M_w=6,7$) sonrasında Santa Susana'da toplam 1502 tekil heyelan ve 60 heyelan kompleksi tespit etmişlerdir. Heyelanlar çoğunlukla Geç Miyosen–Pleistosen yaşlı, zayıf çimentolanmış tortul birimlerde gelişmiş; bunların büyük kısmı sığ, düzensiz kaya ve moloz düşmeleri/kaymaları şeklindedir.

Çalışmada, jeolojik birimlerin sismik heyelanlara karşı duyarlılıklarını değerlendirmek amacıyla iki sayısal indeks (duyarlılık indeksi ve frekans indeksi) hesaplamışlardır. Bu indekslere göre birimler, çok yüksek ($>2.5\%$ veya >30 ls/km²), yüksek (1.0–2.5% veya 10–30 ls/km²), orta (0.5–1.0% veya 3–10 ls/km²) ve düşük ($<0.5\%$ ve <3 ls/km²) duyarlılık kategorilerine ayrılmıştır.

Del Gaudio ve ark. (2003), depremlerin tetiklediği heyelanların bölgesel ölçekte oluşturduğu tehlikelerin değerlendirilmesine yönelik yeni bir yöntem önererek, zamansal faktörün sismik heyelan tehlikesi analizine nasıl entegre edilebileceğini göstermişlerdir. Bu yöntemde, Newmark modeline dayalı olarak sismik kayma potansiyeli, Arias İvmesi kullanılarak nicel hale getirilmiş ve farklı büyüklükteki sismik ivmelerin belirli bir zaman aralığında gerçekleşme olasılıkları hesaplanmıştır. Daha sonra, sismik ivmenin belirli bir heyelan tetikleme olasılığına yol açacağı kritik ivme değeri (ac), amprik ilişkiler aracılığıyla tahmin edilmiştir. Güney İtalya'daki Daunia bölgesinde yapılan bu uygulamada, zaman faktörünün eklenmesinin tehlike dağılımını anlamlı şekilde değiştirdiğini ve deprenselliğin heyelan tetikleyici etkisinin daha doğru değerlendirilmesini sağladığını ortaya koymuştur.

Del Gaudio ve Wasowski (2004), yaptıkları çalışmada, Newmark modeline dayalı olasılıksal bir yöntemi Irpinia bölgesine uygulayarak, şev akmaları ve kaya düşmeleri için kritik ivme (ac) haritaları oluşturmuşlardır. Belirli bir zaman aralığında heyelan riskini düşük tutmak için 0,05–0,08 g aralığında ac değerlerinin yeterli olabileceğini göstermişlerdir. Ancak, bölgede bu değerlerin altında ac'ye sahip birçok yamaç bulunduğu ve bu yamaçların zayıf sismik sarsıntılarla bile kayabileceği sonucuna varmışlar ve çalışmada zamana bağlı sismik heyelan tehlikesinin değerlendirilmesinde bu yaklaşımın önemini vurgulamışlardır.

Agnesi ve ark. (2005), Cerda (İtalya) bölgesinde 6 Eylül 2002'de gerçekleşen bir depremin ardından yaklaşık bir saat sonra meydana gelen heyelanı çok disiplinli verilerle inceleyerek jeolojik, jeomorfolojik, GPS, VES ve gaz ölçümlerine dayanan analizlerde, çevrede benzer koşullara rağmen sadece bu alanda kütle hareketi gözlenmesinin nedeni araştırmışlardır. Yapılan değerlendirmeler, yüzey kırıklarının haritalanmasını, yer altı yapısının belirlenmesini ve gaz çıkışlarının yüzeysel kaynaklı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda, heyelanın depremlerle tetiklenen, daha önce oluşmuş bir kütle hareketinin kısmi yeniden aktivasyonu olduğu anlaşılmıştır.

Nicoletti (2005) yaptığı çalışmada güneydoğu Sicilya’da deprem kaynaklı heyelanların mekânsal dağılımının, bölgedeki tarihsel deprensellik ile örtüşmediğini ortaya koymuştur. Özellikle doğu kesim tarihsel olarak daha aktif sismik geçmişe sahip olmasına rağmen, heyelanların batı kesimde daha yoğun görülmesi dikkat çekicidir. Çalışmada bu durumun, ya doğuda meydana gelen depremlerin batıyı etkilemesiyle ya da batı kesimde geçmişte belgelenmemiş, büyük ancak seyrek gerçekleşen depremlerle açıklanıp açıklanamayacağı araştırılmıştır. Yapılan istatistiksel değerlendirmeler, kayaçların litolojik ve yapısal özellikleri ile yamaç morfolojisinin bu farklılığı tek başına ya da birlikte açıklayamayacağını göstermiş ve bu nedenle, batı kesimdeki yoğun heyelanların, tarihsel kayıtlara geçmemiş ancak yüksek magnitüdü ve düşük tekrar aralıklı yerel depremlerle ilişkili olabileceği sonucuna varılmıştır.

Meunier ve ark. (2008), büyük depremlerin episentral bölgelerinde heyelan yoğunluğunun, yer hareketinin en büyük yer ivmesiyle ilişkilendiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, özellikle dağ sırtlarındaki topoğrafik etkilerin, sismik dalgaların yayılmasını nasıl değiştirdiği ve bu etkilerin heyelanların konumunu nasıl etkilediği incelemiştir. Northridge (Kaliforniya), Chi-Chi (Tayvan) ve Finisterre Dağları (Papua Yeni Gine) gibi bölgelerde yapılan analizler sonucunda, heyelanların genellikle dağ sırtlarında yoğunlaştığını ve bu alanlardaki heyelan duyarlılığının yüksek olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmanın, topoğrafik etkilerin depremlerle tetiklenen heyelanların oluşumunu belirlemede önemli bir faktör olduğunu vurgulamışlar ve ayrıca, dağ sırtları boyunca S dalgalarının güçlenmesinin, zirve ivme artışlarına yol açtığı ve bu durumun heyelanların yönelimini etkilediğini belirtmişlerdir.

Peng ve ark. (2009), Tayvan’ın Mt. Baishiya bölgesinde, 1999 Chi-Chi depremiyle tetiklenen heyelanlar için topoğrafik amplifikasyon faktörlerini hesaplamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında NewMark’ın yer değiştirme yöntemini kullanarak, heyelan kaynağı ve kayma alanlarını tahmin etmişler ve bu tahmin edilen tehlike bölgesinin yaklaşık %29’luk bir alanı kapsadığı, bu alanda gerçek heyelan alanlarının %47’sinden %54’üne kadar bir tahmin doğruluğu sağlandığı ancak sadece topoğrafik etkilerin dikkate alındığı prosedürdeki iyileşmenin sınırlı kaldığını ve tahmin oranının çok az artarak %47’den %50’ye çıktığını belirlemişlerdir.

Pareek ve ark. (2010), Garhwal Himalaya bölgesindeki heyelan duyarlılık haritalarını hazırlarken, depremlerin heyelanlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, Chamoli depremi örneği kullanılarak, depremin heyelan duyarlılık haritasındaki etkileri vurgulamışlardır. Pre- ve post-

deprem haritaları karşılaştırıldığında, orta duyarlı bölgelerinin yüksek ve çok yüksek bölgelere bölgelerine kaydığı, depremin heyelanların oluşumunda önemli bir etken olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, toplam heyelanların %62,65'inin, Chamoli depremiyle ilişkili VIII. şiddet bölgesinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, özellikle deprem riski taşıyan bölgelerde, sismik faktörlerin heyelan duyarlılık haritalarına dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Rapolla ve ark. (2010), sismik bölgelerde heyelan duyarlılığını değerlendirmek için kaya türü, eğim açısı ve MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) şiddeti gibi üç temel faktörü kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, heyelan duyarlılığını belirlerken yerel yıllık yağış, sabit bir mevsimsel paterne sahip olduğu için burada bir parametre olarak dikkate almışlardır. Araştırmacılar kullandıkları yöntemle bu üç faktörün her birinin "önem yüzdesi" olarak hesaplanmasıyla bölgenin sismik heyelan duyarlılığını ortaya koymuşlardır. Ischia adasında yapılan analizler sonucunda, tarihi deprem kaynaklı heyelanların gerçekleştiği alanlarla en yüksek duyarlılık gösteren bölgeler arasında güçlü bir uyum sağlandığını göstermiş, yöntemin sismik etkilere dayalı duyarlılık haritalaması için etkili bir araç olabileceğini ortaya koymuştur.

Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada, heyelan duyarlılık haritalarının üretiminde sismik aktivitenin etkisi incelenmiş ve bu etkiyi daha doğru yansıtabilmek adına yeni bir yöntem önerilmiştir. Literatürde yaygın olarak kabul gören görüşe göre, yağış ve depremler heyelanların başlıca tetikleyici faktörleridir. Ancak, heyelan envanterlerinde her bir olay için tetikleyici faktörü belirlemek çoğu zaman mümkün olmadığından, duyarlılık haritaları genellikle bu ayırım yapılmaksızın oluşturulmaktadır. Bu durum, özellikle hem yağış hem de sismik aktivitenin birlikte etkili olduğu bölgelerde, haritaların temsiliyetini azaltmaktadır. Çalışmada, Türkiye'nin kuzeydoğusundaki Kelkit Vadisi örnek bölge olarak seçilmiş ve dairesel kayma ile sonsuz eğim modelleri temelinde çeşitli pseudostatik stabilite analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları, düşük eğimli alanların sismik etkiler altında daha yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgulardan hareketle, senaryo depremleri (Mw 5,5 ve 7,5) dikkate alınarak yatay yer ivmesine dayalı basit bir yöntem geliştirilmiş ve konvansiyonel duyarlılık haritalarına uygulanmıştır. Yöntem sonucunda, haritaların heyelan öngörü performansı önemli ölçüde artmış, özellikle yüksek duyarlılık gösteren alanların oranı ve ROC-AUC değerleri anlamlı düzeyde iyileşmiştir. Çalışma, farklı tetikleyici faktörlerin ayrı ayrı dikkate alınıp, birleştirilerek daha kapsamlı ve güvenilir

heyelan duyarlılık haritalarının üretilebileceğini göstermesi açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Pareek ve ark. (2013) çalışmalarında, Garhwal Himalayaları'ndaki sismik olayların heyelanlara etkisini incelemiştir. Araştırma, pre- ve post-deprem dönemlerine ait Heyelan Duyarlılık Zonlama (LSZ) haritaları kullanarak, heyelanların sadece statik faktörlerden değil, aynı zamanda sismik faktörlerden de etkilendiğini ortaya koymuştur. DInSAR tekniği kullanılarak deprem sonrası kayma yer değiştirme paternleri incelenmiş, ancak SAR görüntülerinin yüksek geometrik ve zamansal dekorrelasyon nedeniyle bu yöntemin sınırlı kullanımı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, deprem sonrası toplam 164 yeni heyelan meydana gelirken, bu heyelanların çoğu yer değiştirmesi 60 mm veya daha düşük alanlarda yoğunlaştığını belirlemiştir.

Dağlık bölgelerdeki sığ heyelanların duyarlılığını değerlendirmek için mevcut heyelan envanterleri, uzaktan algılama verileri ve jeoteknik senaryoları kullanarak genel bir yaklaşım geliştiren Hess ve ark. (2017) çalışmalarında, ağaç kökleriyle yapılan destekleme, yer basıncı sınır kuvvetleri ve pseudo-statistiksel sismik ivme etkileri entegre eden üç boyutlu bir denge modeli kullanmışlardır. Bu yöntem heyelan envanterinden toprak zemin dayanımının geri hesaplanması, heyelan boyutu-piksellik boyut ilişkilerine dair duyarlılık analizleri ve lidar çıplak topoğrafya SYM'leri kullanarak çeşitli kök, su ve sismik koşulları dikkate alarak peyzaj veya altyapı için sığ heyelan duyarlılığının belirlenmesini içermektedir. Hess ve ark. (2017) envanterdeki heyelan noktaları ile heyelan olmayan bölgelerdeki rastgele noktalar arasındaki dağılımı kullanarak, önerilen yöntem, Oregon Sahil Sıra Dağları'nda 150 km²'lik bir alanda, su yüksekliği oranı 0,5 olduğunda, yüksek heyelan duyarlılığına sahip bölgeler ile gözlemlenen sığ heyelanlar arasında anlamlı bir korelasyon gösterdiğini vurgulamışlardır.

Cao ve ark. (2019) çalışmalarında, deprem kaynaklı heyelanlara eğilimli Wenchuan, Lushan ve Jiuzhaigou bölgelerinde, LR ve Rastgele Orman (RF) modelleri kullanarak heyelan duyarlılık haritaları oluşturmuşlardır. RF modelinin, LR modeline göre daha yüksek doğruluk ve mekânsal genelleme yeteneğine sahip olduğu, Wenchuan ve Lushan'da sırasıyla AUC değerlerinin 0,946 ve 0,969 olduğu bulunmuştur. Jiuzhaigou'da ise modelin doğruluğu 0,704'e düşmüş, bu da turizm gibi insan faaliyetlerinin heyelan duyarlılığını artırabileceğini göstermiştir.

Shrestha ve Kang (2019) tarafından yapılan çalışmalarında, 25 Nisan 2015'te meydana gelen Gorkha depremi (Mw 7,8) sonrası, Nepal Himalaya'sındaki merkezî bölgede çok sayıda heyelan

tetiklediğini ve bu depremden tetiklediği heyelanlara ait heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak için maksimum entropi modelini kullanmışlardır. Toplamda 690 heyelan noktası arasında, 50%'si harita oluşturma amacıyla, geri kalan 50%'si ise doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Sonuç olarak elde edilen harita, alıcı-işlem eğrisi (ROC) yöntemi ile doğrulanmış ve genel doğruluk oranı %86,1 olarak bulunmuştur. Doğrulama verileri kullanılarak, AUC %91,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda araştırmacılar heyelanların en yoğun olduğu bölgelerin, özellikle kırılma yüzeyine yakın alanlar ve yüksek sarsıntı etkisi altında kalan zeminler olduğunu ortaya koymuşlar ve bu çalışmanın Nepal Himalaya bölgesinde deprem kaynaklı heyelanların duyarlılık haritalarının oluşturulmasında önemli bir katkı sağladığını vurgulamışlardır.

Kumar ve arkadaşları (2021), hem depremlerin hem de aşırı yağışların birlikte tetikleyici olarak rol oynadığı yamaç kaymalarına yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğuna dikkat çekmiş ve bu konunun özellikle iklim değişikliğinin etkisiyle daha da kritik hâle geldiğini vurgulamıştır. Çalışmada, Romanya'nın güneybatısındaki Karpatlar bölgesinde geçmiş depremler sonrasında meydana gelen yağış kaynaklı heyelanlar incelenmiştir. Statik koşullar altında eğim deformasyonları 0,4–4 metre arasında ve güvenlik katsayısı (FoS) 1,17–1,32 aralığında hesaplanırken, sismik koşullarda yer değiştirmelerin 8–60 metreye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Yer altı suyu seviyesindeki yükselmenin güvenlik katsayısını belirgin biçimde düşürdüğü, zemin hareketliliği ve yüzey deformasyonlarının ise heyelan riskini artırdığı görülmüştür. Ayrıca, aşırı yağışların tetiklediği moloz akıntılarının 9–26 metre yüksekliğe ulaştığı ve 2,1–3,0 m/s hızlarla hareket ettiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, çoklu tetikleyici etkilerin heyelan süreçleri üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.

Zhao ve ark. (2021), 28 Eylül 2018 tarihinde Endonezya'nın Sulawesi eyaletinde meydana gelen 7,5 büyüklüğündeki Palu depreminin tetiklediği heyelanları incelemişlerdir. Elde edilen bulgular, deprem sonucunda 8 adet büyük ölçekli akma (flow-type) ve en az 7063 eş-sismik (co-seismic) heyelanın meydana geldiğini göstermiştir. Heyelanların toplam etki alanı 29,7 km² olup, en yüksek heyelan yoğunluğu 96 heyelan/km² olarak kaydedilmiştir. Çalışmada, litolojinin (kaya türünün) heyelanların mekânsal dağılımını belirlemede önemli bir faktör olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca heyelan hareketliliği, düşey yükseklik ile yatay mesafe oranı (H/L) ile değerlendirilmiş ve ortalama H/L değeri 0,56 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, depreme bağlı büyük ölçekli zemin akmalarının sismik tehlike değerlendirmelerinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Yang ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, 5 Eylül 2022 tarihinde Çin'in Luding İlçesi'nde meydana gelen Mw 6,6 büyüklüğündeki depremle bağlantılı olarak oluşan 6233 heyelanı içeren geniş bir heyelan envanteri sunmuşlardır. Bu çalışmada, deprem kaynaklı heyelanların dağılımı ve kontrol faktörleri incelenmiş, özellikle epicentral mesafe ile ilişkilendirilmiş, heyelan yoğunlukları dikkate alınmıştır. Heyelan yoğunluğunun maksimum olduğu bölge, makro-epicentral mesafeye bağlı olarak belirlenmiş ve heyelan alanı ile sayısal yoğunluğunun mesafe arttıkça azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada, deprem sonrası heyelan yoğunluk haritalarının hazırlanmasında kullanılabilecek, yoğunluk azalım ilişkisine dayalı hızlı ve etkili bir yöntem önerilmiştir.

He ve ark. (2024) çalışmalarında sismik heyelan duyarlılık haritalarının doğruluğunu artırmak amacıyla, dokuz farklı makine öğrenimi yöntemi ile GeoDetector aracı entegre edilmiştir. 2013 Minxian depremine dayanan 2317 heyelan örneği kullanılarak, faktör optimizasyonu için gereksiz veriler Recursive Feature Elimination tekniğiyle temizlenmiştir. Araştırmacılar optimizasyon sonrası, model doğruluğunu AUC değerleri ile değerlendirilmişler ve Rastgele Orman yöntemi kullanılarak yapılan model için AUC'nin 0,989'dan 0,992'ye yükseldiği, SVM modelinde ise %8,37'lik bir artış gözlemlemişlerdir.

Liu ve ark. (2024) sismik heyelan duyarlılık değerlendirme modellerinin genellikle tarihi örnek veriler üzerine kurulduğunu belirterek, çalışmalarında, 2008 Ms 8,0 Wenchuan depremi kaynaklı heyelan verilerinden oluşturulan bir sismik heyelan duyarlılık değerlendirme modelini 2022 Ms 6,8 Luding depremi bölgesinde uygulamışlardır. Luding bölgesinde uygulanan bu modelin AUC değerinin 0,889 olduğunu belirterek bu değer de yüksek doğruluk seviyesini işaret ettiğini vurgulamışlardır. Araştırmacılar elde edilen sonuçların Wenchuan deprem verilerine dayalı duyarlılık değerlendirme modelinin Luding deprem bölgesine güvenle uygulanabileceğini ve modellerin uygulandığı bölge ile tarihsel verilerin kullanıldığı bölge arasındaki çevresel benzerlik testleri ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Gupta ve Satyam (2024), eşzamanlı (co-seismic) heyelan duyarlılık haritalarında kullanılan sismik tehlike haritalarının etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, Olasılıksal Sismik Tehlike Değerlendirmesi (PSHA) tabanlı ve senaryo tabanlı en büyük yer ivmesi (PGA) haritaları, modifiye Newmark yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Modelde kayaç eklemlerinin kayma dayanımı dikkate alınmış ve belirsizlikler Latin hiperküp örnekleme ile Monte Carlo simülasyonları aracılığıyla analiz edilmiştir. Model performansı F1 skoru, Kappa katsayısı ve

AUC-ROC gibi istatistiksel ölçütlerle değerlendirilmiş ve sonuçlar, PSHA tabanlı PGA haritalarının senaryo tabanlı haritalara kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymuştur.

Zhang ve ark. (2024), depremler tarafından tetiklenen heyelanların dağlık bölgelerdeki önemli risklerini ele almak için derin öğrenme modellerinin doğruluğunu artırmaya yönelik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Luding ilçesinde tarihsel veriler, uzaktan algılama görüntüleri ve saha incelemeleri kullanılarak toplam 502 heyelana ait Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), eğim, yön, profil eğriliği, plan eğriliği, topoğrafik konum indeksi (TPI), litoloji, yol, fay, nehir, deprem kaynağı ve arazi kullanımını gibi toplamda on iki parametre içeren bir veri seti oluşturmuşlardır. Araştırmacılar çalışmalarında dört derin öğrenme modelini (Çok katmanlı Algılayıcı Sinir Ağı-Multilayer Perceptron Neural Network, Derin Sinir Ağı- Deep Neural Network, Evrişimli Sinir Ağı-Convolutional Neural Network ve Kapılı Tekrarlayan Birim-Gated Recurrent Unit) çalışma alanına uygulamışlardır. Deep Neural Network modelinin en yüksek performansı gösterdiği ve 0,947 AUC değeriyle en iyi sonuçları elde ettiği, ardından Convolutional Neural Network ve Gated Recurrent Unit modellerinin sırasıyla 0,942 ve 0,916 AUC değerleriyle geldiği, Multilayer Perceptron Neural Network modelinin ise 0,911 AUC değeriyle sonuçlandığı belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda araştırmacılar, Deep Neural Network modelinin oluşturduğu duyarlılık haritasının, yüksek heyelan duyarlı alanları, özellikle Dadu Nehri, çevredeki kasabalar ve ulaşım ağlarıyla uyumlu bir şekilde olduğunu vurgulamışlardır.

Cheng ve ark. (2025) kuzeybatı Yunnan bölgesindeki sismik tehlikeleri inceledikleri çalışmalarında, bölgedeki aktif fayların heyelanlara yol açma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Yeni geliştirdikleri sismik tehlike modelinde, fay geometrisi ve kayma oranları gibi faktörleri dikkate alarak çoklu segment kırılmalarının risklerini analiz etmişlerdir. Model, Zhongdian fayını kıran ve düşük kayma oranlarına sahip segmentlerin bulunduğu bir yapı önermektedir. Ayrıca, geliştirilen probabilistik modelle hesaplanan en büyük yer ivmesi (PGA) değerlerinin Çin'in mevcut zonlama haritasından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

3.3. Heyelan Duyarlılık Modellemesinde Harita Performanslarının Değerlendirilmesine İlişkin Önceki Çalışmalar

Heyelan duyarlılık modellemelerinde harita performanslarının değerlendirilmesi, model doğruluğunu belirlemek ve en uygun modelleme yöntemini seçmek açısından kritik bir aşamadır.

Modelin performansının değerlendirmesi hem oluşturulan farklı modellerin birbirleriyle hem de modelde kullanılan veri setlerindeki parametrelerin ya da bağımsız değişkenlerin birbirleriyle karşılaştırılmasına olanak sağlar (Begueria, 2006). Begueria (2006)'da yaptığı çalışmada doğrulama indekslerini eřik değerinden bağımsız (ROC Eęrisi ve AUC) (Das ve ark., 2010; Ercanoglu ve Temiz, 2011; Pradhan ve ark. 2010; Yilmaz, 2010; Oh ve Pradhan, 2011; Sezer ve ark., 2011; Akgun, 2012; Akgun ve ark., 2012; Pradhan ve Kim, 2016; Dagdelenler ve ark., 2016; Dagdelenler, 2020; Ercanoglu ve Temiz, 2021; Cengiz ve Ercanoglu, 2022; Zhao ve ark., 2022; Tezel ve Akgun, 2024), eřik değerine bağımlı (Kappa indeksi ve hata matrisi) (Marjanović ve ark., 2011; Baeza ve ark., 2016; Tien Bui ve ark., 2018; Park ve Kim, 2019; Kalantar ve ark., 2020; Orhan ve ark., 2020; Sarfraz ve ark., 2022) ve diğer doğrulama indeksleri (KareKök Ortalama Kare Hatası, RMSE) ve Doęru Sınıflandırma Yüzdesi (Bai ve ark., 2010; Frattini ve ark., 2010; Vahidnia ve ark., 2010; Nefeslioglu ve ark., 2012; Song ve ark., 2012; Tien Bui ve ark., 2018; Azarafza ve ark., 2021; Feng ve ark., 2025) olmak üzere 3 grupta incelenmiştir. Bu kapsamda, model performans değerlendirmesinde kullanılan indeksler doğrultusunda, yukarıda referansları verilen literatür çalışmaları özetlenerek aşağıda sunulmuştur.

Das ve ark. (2010), Hindistan'ın Himalaya bölgesinde yer alan heyelan riski yüksek bir otoyol güzergâhında, lojistik regresyon temelli CBS destekli bir heyelan duyarlılık haritası üretmiş ve bu haritayı jeoteknik tabanlı Eğime Dayalı Stabilite Olasılığı Sınıflandırması yöntemiyle karşılaştırmıştır. LR modeli ROC eğrisiyle %83 doğruluk oranı sergilerken, Eğime Dayalı Stabilite Olasılığı Sınıflandırması yönteminde yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıflarının %72'si mevcut heyelanlarla örtüşmüştür. Mekânsal karşılaştırma sonucunda, LR ile yüksek duyarlılıkta tanımlanan alanların %90'ının Eğime Dayalı Stabilite Olasılığı Sınıflandırması yöntemiyle de yüksek duyarlılıkta tanımlandığı görülmüştür; ancak tersine, Eğime Dayalı Stabilite Olasılığı Sınıflandırması ile yüksek riskli olarak sınıflandırılan alanların sadece %34'ü LR tarafından aynı şekilde belirlenmiştir.

Bai ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, Çin'in Üç Boğaz Barajı bölgesindeki Zhongxian–Shizhu segmentinde heyelan duyarlılık haritası, LR yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada, uydu görüntüleri, tematik haritalar, jeolojik haritalar ve topoğrafik haritalardan elde edilen veriler kullanılmıştır. LR ile heyelan duyarlılığı için istatistiksel ilişkiler geliştirilmiş ve sürekli değişkenler kullanılarak model uygulanmıştır. Harita sonuçlarına göre, çalışma alanının

%2,8'i çok yüksek duyarlılık, %18,2'si çok düşük, düşük, orta ve yüksek duyarlılık bölgelerine ayrılmıştır. Harita doğrulama sonuçları, doğruluk oranının %81,4 ve Karekök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error, RMSE) değerinin 0,392 olduğunu göstermektedir.

Frattini ve ark. (2010) çalışmasında, heyelan duyarlılık modellerinin risk yönetimi ve arazi kullanım planlamasında güvenilir şekilde kullanılabilmesi için performans değerlendirmesinin gerekliliği vurgulamış ve çeşitli değerlendirme yöntemleri karşılaştırmışlardır. Duyarlılık modellerinin doğruluk değerlendirmesinin de ROC ve başarı oranı eğrilerinin eşik bağımsız yapıları sayesinde modellerin karşılaştırılmasında daha güvenilir olduğunun ifade etmişlerdir. Ancak bu yöntemlerin yanlış sınıflandırma sonucu doğabilecek ekonomik ve sosyal maliyetleri dikkate almadığına dikkat çekmişlerdir.

Pradhan ve ark. (2010), Malezya'daki tropikal yamaç arazilerinde yer alan Cameron Highlands bölgesinde, ağırlıklandırılmış kanıtlar (Weights-of-Evidence) modeliyle heyelan duyarlılığı haritalaması yapmışlardır. Çalışmada, yedi heyelan koşullandırıcı parametre içeren mekânsal bir veri tabanı oluşturulmuş, topoğrafya, jeoloji, toprak, arazi örtüsü ve çizgisel yapılar gibi veriler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama yöntemleriyle analiz edilmiştir. Dokuz farklı faktör kombinasyonu test edilmiş ve Model 5'in, %97 doğruluk oranıyla en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür. Çalışmada özellikle plan eğriliği, akarsulara ve çizgisel yapılara uzaklık, litoloji ve arazi örtüsü önemli belirleyici parametreler olarak öne çıkmıştır.

Vahidnia ve ark. (2010) çalışmasında, İran'ın Mazandaran Eyaleti'nde iklim, yağış, jeoloji ve jeomorfolojik özellikler nedeniyle yaygın olarak görülen heyelanların oluşturduğu tehlikeleri değerlendirmek amacıyla nicel ve nitel yöntemlerin avantajlarını birleştiren dolaylı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu kapsamda, uzman bilgisini modellemek için Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) kullanılmış ve Yapay Sinir Ağı (ANN) yöntemleri uygulanmıştır. Girdi olarak fiziksel arazi özellikleri ve heyelan envanter haritaları kullanılarak, ANN geliştirilmiş bir geri yayılım algoritmasıyla eğitilmiştir. Yöntem çalışma alanına uygulanmış ve Mazandaran bölgesine ait dört sınıflı bir heyelan duyarlılık haritası üretilmiştir. Elde edilen modelin genel doğruluğu %90,5 olarak belirlenmiştir.

Yılmaz (2010), Sivas-Koyulhisar bölgesinde Koşullu Olasılık (CP), Yapay Sinir Ağları (ANN), LR ve SVM gibi CBS tabanlı heyelan duyarlılık haritalama yöntemlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Sayısal yükseklik modeli ve çeşitli jeomorfolojik, çevresel ve yapısal faktörler

kullanılarak duyarlılık haritaları üretilmiş ve doğruluk analizleri yapılmıştır. Yapay Sinir Ağları modeli en yüksek AUC değerine sahip olmakla birlikte, tüm yöntemlerin benzer doğruluklar sunduğu, ayrıca Koşullu Olasılık yönteminin hem basitliği hem de CBS ile uyumluluğu sayesinde pratik uygulamalarda avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Ercanoğlu ve Temiz (2011), Batı Karadeniz Bölgesi'nde 570.625 km²'lik bir alanda heyelan duyarlılığını değerlendirmek amacıyla LR ve Bulanık Mantık temelli iki nicel yöntemi karşılaştırmalı olarak kullanmıştır. Çalışmada, altı parametre (eğim, yükselti, bakı, jeoloji, arazi kullanımı ve akarsuya uzaklık) dikkate alınarak, 96 heyelanı içeren detaylı bir envanter oluşturulmuş ve toplam 18 duyarlılık haritası üretilmiştir. Haritaların doğruluğu ROC eğrisi ve kosinüs genlik yöntemi ile değerlendirilmiş, en başarılı sonuç %0,975 düzeyinde bulanık gamma operatörü ile elde edilmiş, buna karşılık bulanık “ve”, “veya” ve cebirsel toplam gibi operatörlerin zayıf performans gösterdiği belirlenmiştir.

Marjanović ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada, makine öğrenmesi yöntemlerinin heyelan duyarlılık haritalaması alanındaki mekânsal modelleme problemlerine uygulanabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla, heyelan duyarlılığı sınıflandırma problemi olarak ele alınmış; jeolojik, morfolojik ve çevresel gibi çeşitli etkenlerle birlikte, referans olarak bir heyelan envanter haritası kullanılarak sınıflandırma kuralları geliştirilmiştir. Çalışmada, Karar Ağaçları, SVM ve LR yöntemleri olmak üzere üç farklı makine öğrenme algoritması karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, SVM algoritması diğer yöntemleri geride bırakarak en iyi performansı göstermiştir. Bu nedenle, SVM yöntemi, yaygın olarak kullanılan bilgiye dayalı bir yöntem olan AHP yöntemi ile karşılaştırılmış ve heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. SVM sınıflandırıcısı, AHP yöntemine kıyasla κ indeksi, ROC eğrisi altındaki alan (AUC) ve kararlı alan sınıfındaki yalancı pozitif oranı gibi tüm değerlendirme ölçütlerinde daha yüksek başarı sağlamıştır.

Oh ve Pradhan (2011), CBS ortamında Uyarlanabilir Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanarak heyelan duyarlılık haritalaması yapmıştır. Çalışmada, hava fotoğrafları ve arazi çalışmalarıyla belirlenen heyelanlar ile yedi çevresel faktör kullanılarak Uyarlanabilir Bulanık Çıkarım Sistemi modeli oluşturulmuş ve farklı üyelik fonksiyonları denenmiştir. ROC eğrisiyle yapılan doğrulamada, en iyi modellerin %84,39 doğrulukla güvenilir sonuçlar sunduğu ve

Uyarlamalı Bulanık Çıkarım Sistemi yönteminin bölgesel heyelan duyarlılığı analizlerinde etkili bir araç olduğu belirtilmiştir.

Sezer ve ark. (2011) çalışmalarında, Malezya'nın Klang Vadisi bölgesinde uzaktan algılama verileri ve CBS kullanılarak heyelan duyarlılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, heyelan konumları hava fotoğrafları ve uydu görüntülerinin yorumlanmasıyla belirlenmiş, sahadan elde edilen verilerle doğrulama yapılmıştır. Çalışmada, yükseklik, eğim, plan eğriliği, drenaj uzaklığı, fay uzaklığı, toprak türü ve NDVI gibi yedi adet heyelan hazırlayıcı parametre kullanılmıştır. Bu veriler, ANFIS yöntemiyle analiz edilerek beş farklı duyarlılık modeli oluşturulmuştur. Elde edilen duyarlılık haritalarının doğruluğu, arazide tespit edilen heyelanlarla karşılaştırılarak ve ROC eğrileri yardımıyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tüm parametrelerin dahil edildiği Model 5'in %98 AUC değeriyle en yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu göstermiştir.

Akgun (2012) çalışmasında, Türkiye'nin batısındaki İzmir kenti ve çevresinde heyelan duyarlılığı haritalarının oluşturulmasında LR, Çok Kriterli Karar Analizi (MCDA) ve Olasılık Oranı (likelihood ratio) yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, litoloji, eğim, bakı, fay hatları, akarsular ve yollar gibi parametreler kullanılarak her üç yöntemle ayrı ayrı duyarlılık haritaları üretilmiş ve bu haritalar doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Heyelan verileri model eğitimi ve doğrulama olmak üzere iki gruba ayrılmış; doğrulama süreci için ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) değeri kullanılmıştır. Elde edilen AUC değerleri sırasıyla LR için 0,810, Olasılık Oranı için 0,764 ve Çok Kriterli Karar Analizi için 0,710 olarak bulunmuş; bu sonuçlar doğrultusunda, LR yöntemi en yüksek doğruluk oranını sağlamıştır.

Akgun ve ark. (2012) tarafından yürütülen bu çalışmada, Kuzey Türkiye'de yer alan Sinop ili ve çevresinde, tamamen uzman görüşüne dayalı bir yöntemle heyelan duyarlılık haritalaması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, MATLAB ortamında geliştirilen "MamLand" adlı kullanıcı dostu bir yazılım kullanılmış ve Mamdani tipi Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada topoğrafik, jeolojik ve çevresel özellikleri temsil eden yedi adet koşullayıcı parametre kullanılmıştır. Heyelan envanteri olarak 351 heyelan olayı içeren bir veri seti oluşturulmuş, ancak bu envanter verileri modelin kurulumu sırasında kullanılmamış; model tamamen uzman değerlendirmelerine ve koşullayıcı parametrelere bağlı şekilde oluşturulmuştur. Mamdani tipi Bulanık Çıkarım Sistemi ile elde edilen duyarlılık skorları CBS ortamına aktarılmış

ve bu skorlar kullanılarak bölgenin heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Haritanın başarısı, ROC eğrisi analizi ile heyelan envanteri verileri kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen AUC değeri de 0,855 olarak hesaplanmıştır.

Nefeslioglu ve ark. (2012), Türkiye'nin Batı Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Kelemen havzasında Terra ASTER L3A verisinin heyelan duyarlılık haritalamasındaki potansiyelini değerlendirmiştir. Çalışmada, Terra ASTER L3A SYM ve geleneksel topoğrafik veriler karşılaştırılmış, her iki kaynaktan elde edilen birinci ve ikinci türev veriler ile farklı heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Analizler, her iki SYM arasında güçlü bir korelasyon olduğunu; ancak türev derecesi arttıkça bu korelasyonun azaldığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, her iki veri kaynağı kullanılarak elde edilen modellerin doğruluk oranları ve mekânsal performans istatistikleri oldukça yüksek ve birbirine yakın bulunmuş, bu da Terra ASTER verisinin heyelan duyarlılık modellemesinde güvenle kullanılabileceğini göstermiştir.

Baeza ve ark. (2016) tarafından yürütülen bu çalışmada, İspanya'nın Doğu Pireneler bölgesinde hazırlanan heyelan duyarlılık haritaları farklı sınıflandırma yöntemleriyle karşılaştırılmış ve doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çeyrekler, doğal aralık, eşit aralık ve heyelan yüzdesi gibi yaygın sınıflandırma teknikleri kullanılarak üretilen beş farklı duyarlılık haritası değerlendirilmiştir. Haritalar arasındaki mekânsal benzerlik ve farklılıklar Spearman korelasyonu, kappa indeksi, faktör analizi, kümeleme analizi ve heyelan yoğunluğu indeksleri aracılığıyla analiz edilmiştir. Sonuçlar, kappa indeksinin haritalar arası uyumu değerlendirmede Spearman korelasyonuna göre daha güvenilir olduğunu göstermiştir.

Pradhan ve Kim (2016) çalışmalarında, Seul-Umyeon Dağı'nda Kanıta Dayalı İnanç Fonksiyonu (Evidential Belief Function, EBF) modeliyle heyelan duyarlılığı haritalaması yapmışlardır. Kanıta Dayalı İnanç Fonksiyonu modelinin başarısı ROC eğrisi ile değerlendirilmiş ve modelin ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) değeri %88,1 (predictive accuracy), başarı oranı %74,3 (success rate) olarak raporlanmıştır. Karşılaştırma amacıyla kullanılan FR yöntemiyle yapılan modelin AUC değeri ise %85,9, başarı oranı değeri ise %72,1 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Kanıta Dayalı İnanç Fonksiyonu modelinin FR modeline kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.

Dagdelenler ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, heyelan duyarlılık haritalamalarında kullanılan örnekleme stratejilerinin etkisi incelenmiş ve özellikle kök hücre (seed cell) yöntemi üzerinde

durularak bu stratejiye bir modifikasyon önerilmiştir. Çalışma, Çanakkale ili Gelibolu Yarımadası'nın doğu kısmında gerçekleştirilmiş ve kök hücresi ile heyelan alanı örnekleme stratejileri karşılaştırılmıştır. Kök hücre yöntemi için farklı mekansal çözünürlüklerde ve tampon mesafelerinde rastgele örnekleme oluşturulmuştur. Farklı çözünürlük ve tampon mesafelerine göre yapılan duyarlılık analizlerinde, her iki strateji ile üretilen heyelan duyarlılık haritaları, ROC eğrisi altındaki alan (AUC) değeri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, orta ölçekli heyelan duyarlılık analizlerinde kök hücre yöntemi için en uygun tampon mesafenin yaklaşık 50 m olduğunu göstermiştir.

Tien Bui ve ark. (2018) tarafından yapılan bu çalışmada, tropikal bölgelerde nadiren uygulanan AIRSAR verisi ile CBS tabanlı heyelan duyarlılık haritalamasının birleşik kullanımına odaklanılmış ve Malezya'nın Cameron Highlands bölgesinde SVM ve Entropi İndeksi (IoE) yöntemlerinin karşılaştırılması ve doğrulanması amaçlanmıştır. Çalışmada, on adet heyelan belirleyici faktör ve AIRSAR, WorldView-1 ile SPOT 5 uydu görüntülerinden tespit edilen gözlemsel heyelanlar kullanılarak bir mekânsal veri tabanı oluşturulmuştur. Toplamda 92 heyelan konumu içeren bu veri seti %80 eğitim (74 heyelan) ve %20 doğrulama (18 heyelan) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Gözlemlenen ve tespit edilen heyelanlar arasındaki fark, karekök ortalama kare hatası (RMSE) ile analiz edilmiş ve %16,3'lük düşük bir hata oranı ile sonuçların kabul edilebilir düzeyde olduğu gösterilmiştir. Doğrulama sürecinde çeşitli istatistiksel ölçütler ve ROC-AUC kullanılmıştır. Bu süreç sonunda SVM modelinin duyarlılık (%88,9), özgüllük (%77,8), doğruluk (%83,3), Kappa (0,663) ve AUC (%84,5) değerleriyle Entropi İndeksi (IoE) modeline kıyasla daha başarılı performans gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak, AIRSAR verisi ile tespit edilen heyelanlara uygulanan SVM modelinin tropikal bölgelerde heyelan duyarlılık analizleri için umut vadeden bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Park ve Kim (2019) tarafından yapılan bu çalışmada, Güney Kore'nin Woomyeon Dağı'nda heyelan duyarlılığı Rasgele Orman (RF) ve Boosted Regression Tree (BRT) modelleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada toplam 140 heyelan noktası belirlenmiş, bunlardan 98'i model eğitimi için rastgele seçilmiş ve geri kalan 42'si modelin doğrulama sürecinde kullanılmıştır. Modeller, alıcı işletim karakteristiği eğrisi ve istatistiksel göstergeler kullanılarak değerlendirilmiş ve Rasgele Orman modelinin BRT modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Rasgele Orman modeli, genel doğruluk, spesifiklik ve kappa indeksi açısından BRT modelinden daha

yüksek performans sergilemiş ve 0,865'lik bir tahmin oranı elde etmiştir, bu oran BRT modeli için ise 0,851 olmuştur. Bu bulgular, üretilen heyelan duyarlılık haritalarının, çalışma alanındaki heyelan dağılımını tahmin etmede güvenilir olduğunu ve bu haritaların, risk azaltma stratejilerinin belirlenmesi ve arazi kullanımı planlamasında faydalı olabileceğini göstermektedir.

Dagdelenler (2020) yaptığı çalışmada seçilen çalışma alanında Chebyshev teoremi ve tüm heyelan kütlesi içerisindeki piksel sayma tekniği olma üzere iki farklı örneklem tekniği kullanarak alana ait heyelan duyarlılığını değerlendirmiştir. Her iki örneklem tekniği kullanılarak yapılan duyarlılık analizlerinde literatürde sıklıkla kullanılan FR yöntemi kullanılmış ve iki farklı harita üretilmiştir. Duyarlılık haritalarının performansı ise ROC-AUC yöntemine göre değerlendirilmiş ve AUC değerleri sırasıyla Chebyshev teoremi için 0,78 ve tüm heyelan kütledeki piksel sayılarına göre yapılan örneklem tekniği için ise 0,72 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre, üretilen her iki duyarlılık haritasının da kabul edilebilir düzeyde olduğu ve Chebyshev teoremi ile örneklem yapılarak üretilen duyarlılık haritasının performansının, diğer örneklem yöntemine göre nispeten daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Kalantar ve ark. (2020) tarafından yapılan bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritalaması kapsamında denetimli makine öğrenimi ve topluluk (ensemble) öğrenme yöntemlerinin potansiyeli araştırılmıştır. Araştırmada öncelikle, Fisher Ayırma Analizi (FDA) algoritması eğitilmiş ve yaygın olarak kullanılan GLM, BRT ve RF yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra, bu dört yöntemin birleştirilmesiyle bir topluluk modeli oluşturulmuş ve performansları değerlendirilmiştir. Modellerin eğitilmesinde 227 heyelan konumunu içeren bir heyelan envanter haritasından elde edilen 13 adet hazırlayıcı parametre kullanılmıştır. Performans değerlendirmelerinde, True Skill Statistic (TSS), ROC eğrisi ve Kappa indeksi dikkate alınmıştır. Orhan ve ark. (2020) tarafından yapılan bu çalışmanın temel amacı, beş farklı makine öğrenmesi tekniği kullanarak heyelan duyarlılık haritalarını üreterek bunları birbirleriyle karşılaştırmaktır. Bu yöntemler, yapay sinir ağı (ANN), LR destek vektör makineleri (SVM), Rasgele Orman ve sınıflandırma ve regresyon ağacı (CART) olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı, Türkiye'de en fazla heyelan olayının meydana geldiği Arhavi-Kabisre nehir havzası olarak seçilmiştir. Yapılan bu çalışmada toplamda 252 heyelan tespit edilerek bir heyelan envanteri oluşturulmuş ve ardından, heyelan duyarlılık haritası oluşturmak için 11 heyelan hazırlayıcı faktör dikkate alınmıştır. Bu kullanılan beş farklı makine öğrenmesi tekniğinin performansını karşılaştırmak ve doğrulamak

için alıcı işletme karakteristiği (ROC), duyarlılık, özgüllük, doğruluk ve Kappa indeksi gibi değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır.

Zhao ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, heyelan duyarlılık haritalaması için Çok Katmanlı Algılayıcı, Konvolüsyonel Sinir Ağı, Kapalı Tekrar Birimi ve Çok Ölçekli Konvolüsyonel Sinir Ağı olmak üzere dört farklı sinir ağı modeli karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, Çin'in Gansu bölgesindeki Lanzhou şehrinde 8 adet heyelan ile ilişkili parametreler ve tarihi heyelan verileri kullanılarak, modellerin eğitim ve doğrulama veri setleri %70-%30 oranında ayrılarak model oluşturulmuştur. Modellerin performansı, karışıklık matrisi, Kappa indeksi, F1 puanı gibi istatistiksel göstergeler ile değerlendirilmiş ve ayrıca alıcı işletim karakteristikleri (ROC) ve Hassasiyet-Duyarlılık (Precision-Recall, PR) eğrileri çizilmiştir. Sonuçlar, Çok Ölçekli Konvolüsyonel Sinir Ağı modelinin en iyi performansı sergilediğini ve en yüksek Recall (99,93%), Kappa (0,96) ve F1 puanı (0,98) değerlerine ulaştığını göstermiştir. Çalışma, komşuluk özelliklerini dikkate alan Konvolüsyonel Sinir Ağı ve Çok Ölçekli Konvolüsyonel Sinir Ağı gibi modellerin, sıralı özellikleri dikkate alan Çok Katmanlı Algılayıcı ve Kapalı Tekrar Birimi modellerine göre daha iyi performans gösterdiğini vurgulamaktadır.

Azarafza ve ark. (2021) çalışmalarında, İran'ın Isfahan bölgesinde heyelan duyarlılık haritalarını oluşturmak için derin evrişimli sinir ağı (CNN-DNN) modeli geliştirmişlerdir. Model, tarihsel heyelan verileri, saha kayıtları, uydu görüntüleri ile jeomorfolojik, jeolojik, çevresel ve insan kaynaklı faktörler kullanılarak eğitilmiş ve %80 eğitim, %20 test verisi ile doğrulanmıştır. CNN-DNN modeli, destek vektör makineleri (SVM), lojistik regresyon, Naive Bayes, çok katmanlı algılayıcı ve karar ağaçları gibi diğer makine öğrenmesi yöntemleriyle karşılaştırılmış ve en yüksek doğruluk oranına (%90,9 AUC) ulaşmıştır. Model, Isfahan'da Zagros sırtına bağlı olarak özellikle batı ve güneybatı bölgelerde yüksek heyelan duyarlılığını başarılı şekilde göstermiştir. Bu sonuçlar, heyelan risk yönetimi ve arazi kullanımı planlamasında önemli katkılar sağlamaktadır.

Sarfraz ve arkadaşları (2022), Muzaffarabad bölgesindeki ana yol koridorları boyunca heyelan duyarlılığını entegre coğrafi veri yaklaşımları kullanarak karşılaştırmalı şekilde analiz etmişlerdir. Üç ana yol koridorunda heyelan envanteri oluşturulmuş ve on bir heyelan hazırlayıcı faktör değerlendirilmiştir. Bu parametreler kullanılarak, Kanıt Ağırlığı (WoE), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), Lojistik Regresyon (LR) ve Rastgele Orman (RF) yöntemleriyle heyelan duyarlılık

modelleri geliştirilmiştir. Modellerin performansları, ROC-AUC, genel doğruluk, Kappa indeksi, F1 skoru, Ortalama Mutlak Hata ve Kök Ortalama Kare Hata gibi istatistiksel ölçütlerle karşılaştırılmıştır. Neelum yolu için WoE, AHP, LR ve RF yöntemlerinin AUC değerleri sırasıyla 0,86, 0,82, 0,91 ve 0,97; Jhelum Valley yolunda 0,83, 0,81, 0,93 ve 0,95; Kohala yolunda ise 0,89, 0,88, 0,89 ve 0,92 olarak bulunmuştur. Sonuçlar, makine öğrenmesi tabanlı yöntemler (RF ve LR) ile oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının, WoE ve AHP gibi geleneksel tekniklere kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığını göstermiştir.

Tezel ve Akgun (2024) çalışmalarında, Trabzon'un Beşikdüzü ilçesinde sığ heyelan duyarlılık haritalarının üretimi için istatistiksel (LR), makine öğrenmesi (RF) ve fizik tabanlı (Shalstab) yaklaşımlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. 2000–2018 yıllarına ait heyelan envanteri, saha çalışmaları ve Google Earth görüntüleri ile oluşturulmuştur. Analizlerde 10 m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli ve 1:25.000 ölçekli dijital jeoloji haritasından elde edilen eğim, baki, topoğrafik nemlilik indeksi, akarsu enerji indeksi, plan ve profil eğriliği gibi parametreler kullanılmıştır. Fiziksel model için zemin birim ağırlığı ve kayma dayanımı gibi jeoteknik veriler de saha örnekleri ile belirlenmiştir. Üç modelin doğrulukları ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) yöntemiyle değerlendirilmiş; RF modeli %99, LR modeli %97 ve Shalstab modeli %93 AUC değeri ile başarılı sonuçlar vermiştir.

Feng ve ark. (2025) yaptıkları çalışmada Bakhtegan Havzası, güneybatı İran'da heyelan duyarlılık haritalaması yapmak için Konvolüsyonel Sinir Ağı (CNN) modelini uygulamışlardır. 235 adet heyelan konumu ve saha anketleriyle doğrulanan uzaktan algılama verileri kullanılarak kapsamlı bir heyelan envanteri ile model eğiterek heyelanları başarıyla tahmin etmiş ve %95,76 doğruluk ve %95,11 duyarlılıkla geleneksel sınıflandırma yöntemlerini geride bırakmıştır. Modelin hata metrikleri, ortalama mutlak hata (MAE) 0,11864, ortalama kare hata (MSE) 0,18796 ve karekök ortalama kare hatası (RMSE) 0,18632 olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar elde edilen sonuçların Bakhtegan Havzası'nın kuzey ve kuzeydoğu bölgelerinin yüksek heyelan duyarlılığına sahip olduğunu gösterdiğini ve derin öğrenme ve özellikle Konvolüsyonel Sinir Ağı modellerinin heyelan duyarlılık değerlendirmesi için güçlü ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğunu vurgulamışlardır.

4. ÇALIŞMA ALANININ HEYELAN ENVANTERİ VE VERİ TABANININ OLUŞTURULMASI

4.1. Heyelan Envanterinin Oluşturulması

Heyelan duyarlılığı, tehlikesi ve riski analizlerinin bilimsel temellere dayalı olarak yürütülebilmesi, büyük ölçüde güvenilir, eksiksiz ve temsili bir heyelan envanterinin varlığına bağlıdır. Söz konusu envanter, hem modelleme sürecinde kullanılacak veri setlerinin doğruluğunu hem de analiz sonuçlarının güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, heyelan envanteri oluşturma süreci, mekânsal modellemeye yönelik çalışmalarda kritik bir ön adım niteliği taşımaktadır.

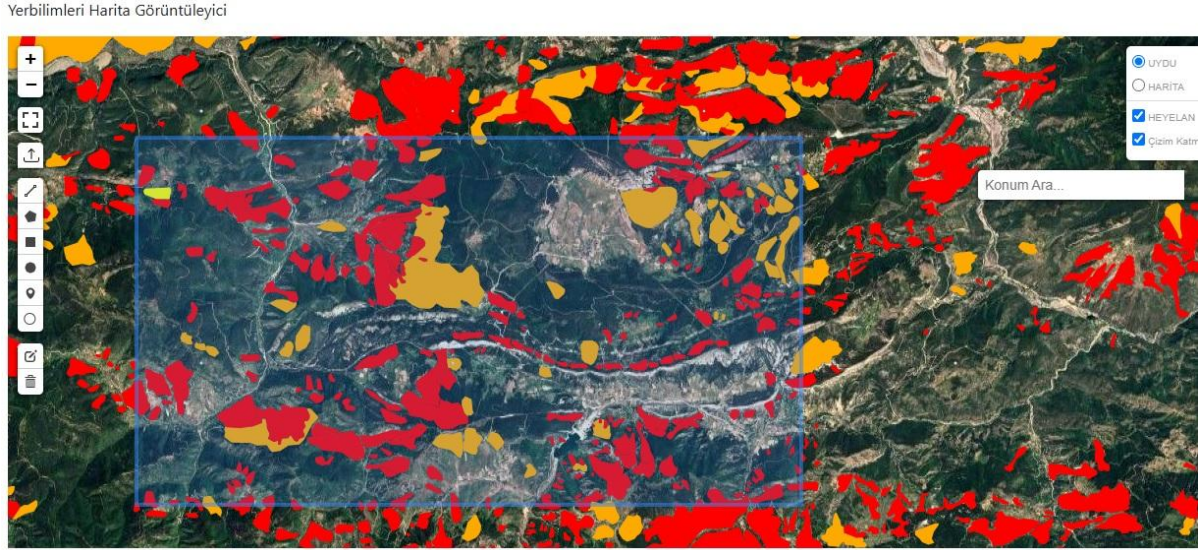
Heyelan envanterlerinin hazırlanmasında literatürde iki temel yöntem öne çıkmaktadır: nokta temelli (point-based) ve poligon temelli (polygon-based) envanter yaklaşımları. Nokta temelli yöntemlerde, her bir heyelan olayının belirli bir koordinatla temsil edilmesi esas alınırken; poligon temelli yöntemlerde ise heyelanların sınırları detaylı biçimde çizilerek alansal olarak tanımlanır. Her iki yöntemin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları bulunsa da, özellikle istatistiksel ve makine öğrenimi temelli analizlerde nokta temelli yaklaşımların daha yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir (Guzzetti et al., 2012; Reichenbach et al., 2018). Bunun temel nedenleri arasında, nokta temelli verilerin daha hızlı ve kolay elde edilebilir olması, yüksek çözünürlüklü arazi verileriyle daha uyumlu çalışması ve hesaplama süreçlerinde basitlik sağlaması yer almaktadır.

Bu çalışmada da, literatürde yaygın kabul gören metodolojik yaklaşımlar doğrultusunda, nokta temelli bir heyelan envanteri oluşturulmuş ve bu amaçla çalışma alanında tespit edilen heyelanlı bölgelerden rastgele örnekleme dayalı bir strateji benimsenmiştir. Rastgele örnekleme, mekânsal önyargının (spatial bias) minimize edilmesi, verinin dağılımında homojenlik sağlanması ve modelin farklı mekânlara genellenebilirliğinin artırılması gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Böylece modelleme sürecinde kullanılacak heyelan noktaları, temsili bir biçimde elde edilerek, oluşturulacak duyarlılık modellerinin doğruluk ve geçerliliği güçlendirilmiştir. Heyelanlı alanların belirlenmesinde temel veri kaynağı olarak, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 2005 yılında yayımlanan 1/500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası

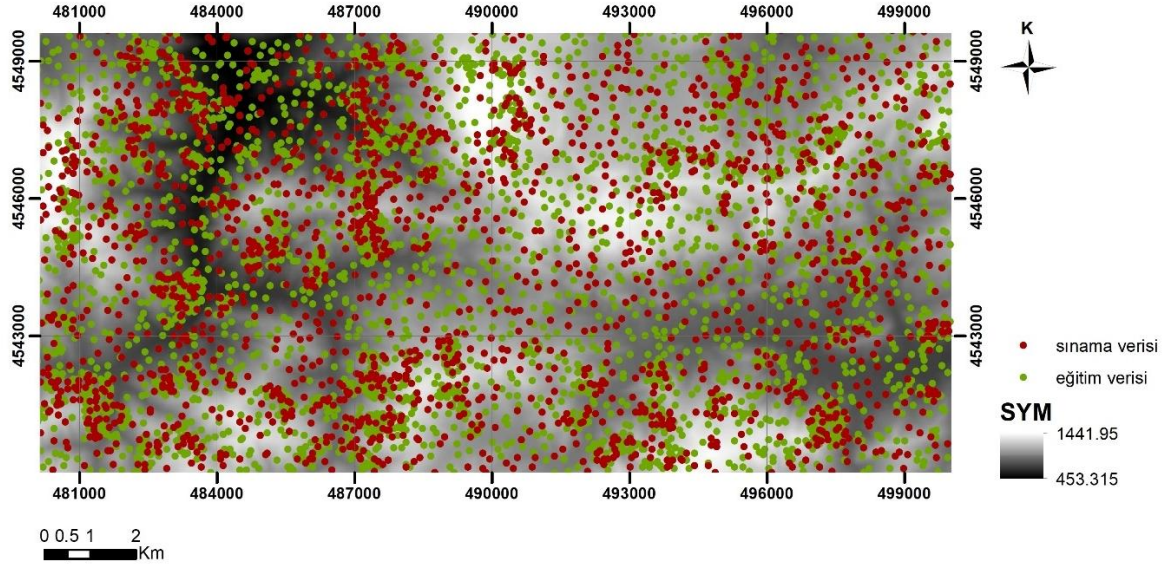
kullanılmıştır (MTA, 2005). Söz konusu harita, büyük ölçekte hazırlanmış olması nedeniyle ayrıntı düzeyi açısından sınırlı olmakla birlikte, çalışma alanı içerisinde heyelanların genel dağılımını görmek ve örnekleme sürecinde ön bilgi edinmek açısından uygun bir temel teşkil etmiştir. Bu veriler ışığında, heyelanlı ve heyelansız alanlara ait mekânsal veriler raster formatta yapılandırılmış ve modelleme sürecinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Bir sonraki aşamada MTA Yerbilimleri Harita Görüntüleyici Portal'ından yararlanılarak, çalışma alanına ilişkin heyelanlı alanlar daha detaylı olarak belirlenmiş ve envanter haritası elde edilmiştir (Şekil 3.1) (MTA, 2005). Çalışma kapsamında herhangi bir saha çalışması yapılamadığından, heyelan türlerine göre bir ayırım yapılamamakla birlikte, Yerbilimleri Harita Görüntüleyici Portal'ndaki değerlendirmeler (turuncu renk: eski heyelan; kırmızı renk: aktif heyelan) ve bölgede Can ve ark. (2019)'un yaptığı çalışma dikkate alınarak, kütleli (daireli) toprak kayması şeklinde geliştiği şeklinde bir yorum yapılabilir (MTA, 2005; Can ve ark., 2019). Elde edilen heyelan envanteri verileri, ilk olarak Google Earth yazılımı aracılığıyla konumsal doğrulama sürecinden geçirilmiştir. Bu kapsamda, her bir heyelan noktasının coğrafi koordinatları görsel olarak değerlendirilmiş, hem heyelanlı (etiket: 1) hem de heyelansız (etiket: 0) alanlar titizlikle belirlenmiştir. Bu aşama, veri setinin doğruluğunun artırılması ve coğrafi konumların gerçek arazi koşullarıyla uyumlu olduğunun teyit edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Google Earth gibi yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri sunan platformların kullanımı, özellikle görsel yorumlamaya dayalı ön doğrulama çalışmalarında, saha verisinin bulunmadığı veya sınırlı olduğu durumlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Devam eden süreçte, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında çalışma alanı içerisinde rastgele dağıtılmış şekilde 7000 adet nokta verisi oluşturulmuştur. Bu noktalardan 5000 adedi eğitim (train) veri seti, 2000 adedi ise sınamaya (test) veri seti olarak ayrılmıştır (Bkz. Şekil 4.1). Eğitim ve test veri setlerinin ayrı tutulması, modelin hem öğrenme sürecinde hem de bağımsız doğrulama aşamasında daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretmesini sağlamaktadır. Böylelikle, modelin yalnızca öğrenilen veriler üzerinde değil, daha önce görmediği veriler üzerinde de başarılı olup olmadığı değerlendirilebilmektedir.

Eğitim veri seti olarak tanımlanan 5000 adet nokta, dengeli sınıflandırma yaklaşımı benimsenerek yapılandırılmıştır. Bu doğrultuda, 2500 nokta heyelanlı alanlardan, kalan 2500 nokta ise heyelan gözlenmemiş alanlardan seçilmiştir. Bu dengeleme işlemi, modelin herhangi bir sınıfa karşı önyargı geliştirmesini önlemek ve sınıflar arasında dengeli bir öğrenme süreci yürütmek adına

önemlidir. Eğitim veri seti, heyelan duyarlılık analizlerinin gerçekleştirilmesinde temel veri tabanını oluşturmuş ve modelin parametrelerinin optimize edilmesinde kullanılmıştır. Öte yandan, test (sınama) veri seti olarak ayrılan 2000 adet nokta, modelin eğitimi sürecine hiçbir şekilde dahil edilmemiştir. Bu veri seti yalnızca modelleme sürecinin sonunda, üretilen heyelan duyarlılık haritalarının performans analizleri için kullanılmıştır. Modelin öngörü gücünün değerlendirilmesinde doğruluk (accuracy), hassasiyet (precision), duyarlılık (recall), F1 skoru ve AUC-ROC eğrisi gibi çeşitli istatistiksel performans metrikleri bu test veri seti üzerinden hesaplanmıştır. Sonuç olarak, hem eğitim hem de test verilerinin dengeli, rastgele ve mekânsal olarak dağıtılmış biçimde oluşturulması, heyelan duyarlılık modellemesinin hem güvenilirliğini hem de genellenebilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. Şekil 5'te görüldüğü üzere, bu verilerin Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üzerinden elde edilen gölgelendirilmiş rölyef haritası üzerinde gösterimi, noktasal verilerin coğrafi dağılımının görsel olarak izlenmesine ve model giriş verilerinin mekânsal homojenliğinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.1. MTA Yerbilimleri Harita Görüntüleyici Portal'ından yararlanılarak oluşturulan çalışma alanına ait envanter haritası (MTA, 2005).



Şekil 4.1. Çalışma alanında eğitim (train) ve sınama (test) verilerinin mekânsal dağılımı.

4.2. Veri Tabanının Oluşturulması

Parametrik girdiler, çalışmanın bir sonraki bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmakla birlikte, bu aşamada, önceki bölümde açıklanan heyelanlı ve heyelansız nokta verileriyle olan mekânsal ilişkileri çerçevesinde ön değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Parametre seçimi, güncel literatür doğrultusunda, heyelan oluşumunu etkileyen temel jeomorfolojik, hidrolojik, jeolojik ve antropojenik faktörler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan bağımsız değişkenler (girdiler) şu şekildedir: yamaç eğimi (slope), yamaç yönelimi (aspect), topoğrafik yükseklik (elevation), topoğrafik nemlilik indeksi (Topographic Wetness Index - TWI), litoloji ve arazi kullanımı (land use/land cover).

Söz konusu parametreler, heyelan duyarlılık modellemelerinde sıklıkla kullanılan ve mekânsal değişkenlik gösteren değişkenler olup, çok sayıda çalışmada (örneğin; Guzzetti et al., 2006; Reichenbach et al., 2018; Lee & Pradhan, 2007) etkili faktörler olarak tanımlanmıştır. Parametrelerin tamamı, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında analiz edilmek üzere uygun veri formatlarına dönüştürülmüş ve heyelan envanter verileriyle karşılaştırılarak, nokta bazlı bir parametrik veri tabanı oluşturulmuştur. Parametrelerden litoloji ve arazi kullanımı, nitel (kategorik) veri sınıfında yer almakta olup, bu parametreler çalışma alanına ait mevcut tematik haritalar (jeoloji haritası ve meşçere haritası vb.) kullanılarak türetilmiştir. Diğer parametreler olan

yamaç eğimi, yamaç yönelimi, topoğrafik yükseklik ve TWI ise sürekli (sayısal) veri niteliğinde olup, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerinden türetilmiştir. Bu analizlerde, 30 m × 30 m mekânsal çözünürlüğe sahip raster veriler kullanılmış ve her bir raster pikselinin değeri, ilgili parametre için sayısal bir girdi olarak değerlendirilmiştir. Parametrik verilerin heyelan ve heyelansız nokta verileriyle karşılaştırılması sonucunda, her bir nokta için altı parametreye ait değerler içeren çok değişkenli bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı, hem modelleme sürecinin temel girdisini oluşturmuş hem de model performansının değerlendirilebilmesi açısından bütüncül bir analiz yapılmasına imkân tanımıştır. Her bir parametreye ilişkin olarak oluşturulan CBS tabanlı tematik haritalar, parametrelerin mekânsal dağılımlarını ve değişim örüntülerini görsel olarak ortaya koymak amacıyla haritalanmış; bu haritalardan elde edilen temel istatistiksel veriler ise, izleyen bölümde detaylı grafikler ve tablolar eşliğinde sunulmuştur. Bu analizler sayesinde, her bir parametrenin heyelan oluşumu üzerindeki potansiyel etkisi istatistiksel olarak değerlendirilebilmiştir.

5. ÇALIŞMA ALANINA AİT HEYELAN DUYARLILIK ANALİZLERİNDE KULLANILAN PARAMETRELER

Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde hangi parametrelerin kullanılacağına dair evrensel bir standart bulunmamaktadır. Bunun temel nedeni, heyelanların çok faktörlü bir yapıya sahip olması ve farklı bölgelerde farklı tetikleyici ile kontrol edici etkenlerin etkili olabilmesidir (Guzzetti ve ark., 1999; Fell ve ark., 2008). AFAD tarafından 2015 yılında yayımlanan “Bütünleşik Tehlike Haritalarının Hazırlanması Heyelan-Kaya Düşmesi Temel Kılavuzu” kapsamında, 2004-2014 yılları arasında literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalarda kullanılan parametreler ile bunların kullanım sıklıkları analiz edilmiştir (AFAD, 2015). Yapılan değerlendirme sonucunda, literatürde en yaygın olarak kullanılan parametrelerin yamaç eğimi, litoloji ve arazi kullanımı olduğu belirlenmiştir. Heyelanların oluşum mekanizmalarında yerel jeolojik, topoğrafik, iklimsel ve antropojenik koşullar belirleyici rol oynamaktadır. Bu durum, duyarlılık analizlerinde kullanılan parametrelerin bölgeden bölgeye farklılık göstermesine yol açmaktadır. Genel olarak, heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan hazırlayıcı parametreler; jeolojik, topoğrafik ve çevresel olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır (Aleotti ve Chowdhury, 1999). Sağlıklı ve güvenilir bir duyarlılık değerlendirmesi yapabilmek için, bu üç

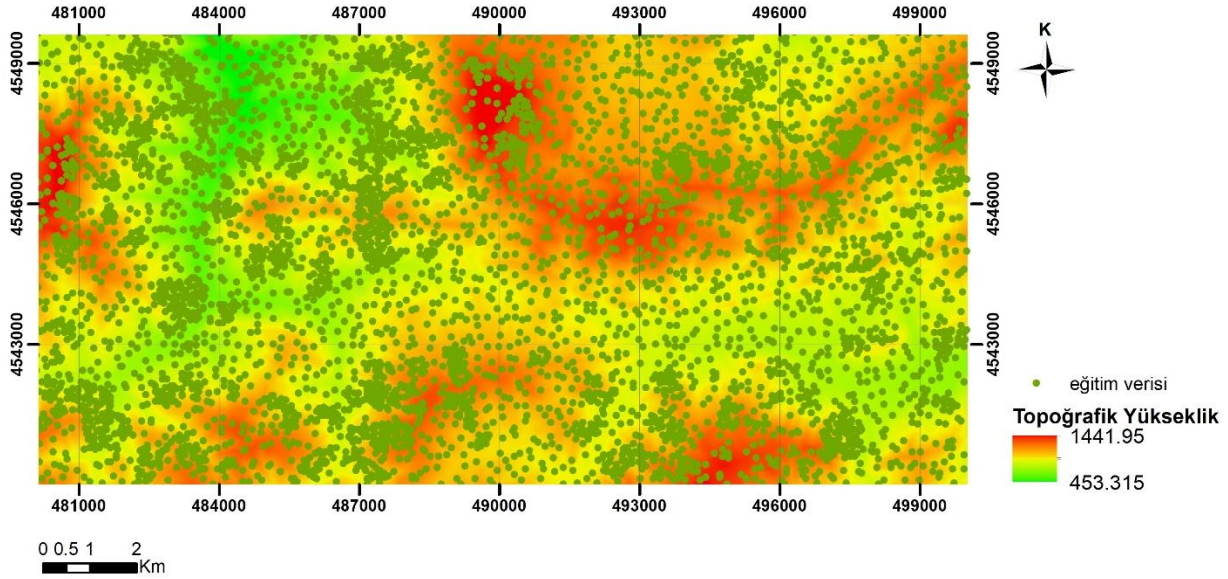
kategoriden en az bir parametrenin analizlere dahil edilmesi önerilmektedir (AFAD, 2015). Bu çalışma kapsamında da söz konusu öneriler dikkate alınarak, çalışma alanına yönelik heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılmak üzere toplam altı parametre seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan topoğrafik parametreler, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verilerinden türetilmiştir. Bu parametreler; topoğrafik yükseklik, yamaç eğimi, bakı (yamaç yönelimi) ve TWI olarak dört başlık altında toplanmaktadır. Aşağıdaki bölümlerde her bir parametreye ilişkin detaylı açıklamalara yer verilmiş; tanımlayıcı istatistiksel analizleri yapılmış ve çalışma alanına ait tematik haritalar oluşturularak mekânsal dağılımları görselleştirilmiştir.

5.1. Topoğrafik Yükseklik

Topoğrafik yükseklik, heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ve arazi morfolojisinin genel yapısını yansıtan temel hazırlayıcı faktörlerden biridir. Bu parametre, alanın deniz seviyesine göre mutlak yüksekliğini ifade etmekle birlikte; eğim, akış yönü, suyun toplanma potansiyeli, bitki örtüsü dağılımı ve toprak gelişimi gibi pek çok çevresel unsur üzerinde dolaylı etkiler oluşturur. Yüksek topoğrafik alanlarda potansiyel enerjinin artmasıyla birlikte kütle hareketlerinin oluşma olasılığı da artmakta, düşük kotlu alanlarda ise farklı jeomorfolojik süreçler baskın hâle gelebilmektedir. Literatürde topoğrafik yüksekliğin, heyelanların mekânsal dağılımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olduğu çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Ayalew ve Yamagishi, 2005; Youssef ve ark., 2015). Ayrıca topoğrafik yükseklik, erozyon süreçleri ile yüzeysel bozunmayı yönlendiren ve dolayısıyla toprak özelliklerini belirleyen bir faktör olarak da değerlendirilmiştir (Dai ve Lee, 2002; Ayalew ve ark., 2005). Gokceoglu ve Ercanoglu (2001) ise göreceli yüksekliğin, özellikle yağış ve sismik aktivite gibi dış tetikleyicilerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulayarak, bu parametrenin heyelan oluşumundaki rolünün daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini önermektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada topoğrafik yükseklik hem doğrudan hem de dolaylı etkileri nedeniyle heyelan duyarlılığını etkileyen temel morfometrik değişkenlerden biri olarak dikkate alınmıştır.

Çalışma alanındaki topoğrafik yükseklik değerleri 453,3 metre ile 1441,9 metre arasında değişmektedir (Şekil 5.1). Alanda yükseklik dağılımı incelendiğinde, ortalama yüksekliğin yaklaşık 1010,5 metre civarında olduğu belirlenmiştir. Heyelanların ise genellikle daha alçak kotlarda meydana geldiği açıkça gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük rakımlı bölgelerde yeraltı su

seviyesi, toprak birikimi ve insan faaliyetlerinin daha yoğun olması gibi faktörlerle ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, çalışmada elde edilen bulgular, topoğrafik yüksekliğin heyelan oluşumu üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



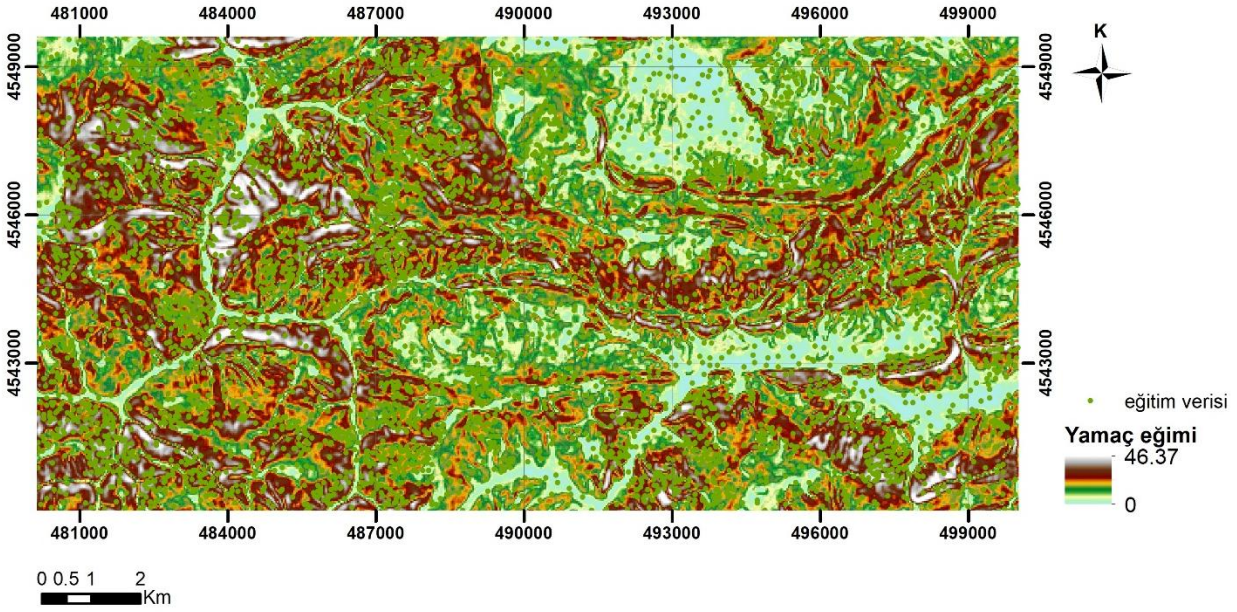
Şekil 5.1. Çalışma alanına ait topoğrafik yükseklik haritası.

5.2. Yamaç Eğimi

Bu çalışmada dikkate alınan ikinci parametre yamaç eğimidir. Yamaç eğimi, heyelan oluşumunu etkileyen temel topoğrafik faktörlerden biri olup, heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında sıklıkla kullanılan morfometrik bir parametredir. Arazi eğiminin artmasıyla birlikte yerçekimine bağlı olarak yüzeysel gerilme ve zemin dengesizliği artmakta, bu da heyelan oluşma olasılığını yükseltmektedir (Günther ve ark., 2014; Youssef ve ark., 2016; Wang ve ark., 2020). Bununla birlikte, düşük eğimli alanlarda da zayıf zemin koşulları, yüksek su içeriği ya da insan kaynaklı müdahaleler gibi faktörlerin etkisiyle heyelanların meydana gelebileceği belirtilmiştir (Chen ve ark., 2017; Zhao ve ark., 2021). Bu nedenle, eğim parametresi heyelan duyarlılık analizlerinde kritik bir bileşen olmakla birlikte, diğer jeolojik ve çevresel değişkenlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada kullanılan yamaç eğimi haritası, Sayısal Yükseklik Modeli verileri temel alınarak ArcMap 10.8.1 yazılımı ile oluşturulmuştur (Şekil 5.2). Yapılan analizlere göre, çalışma

alanındaki eğim değerleri 0° ile $46,37^\circ$ arasında değişmekte olup, ortalama eğim yaklaşık 15° olarak hesaplanmıştır. Eğim, arazide yerçekimi etkisiyle meydana gelen yüzey akışı, suyun birikimi ve kütle hareketlerinin tetiklenmesinde doğrudan rol oynayan temel topoğrafik değişkenlerden biridir. Özellikle eğimin orta ve yüksek seviyelerde olduğu bölgelerde, zeminin dengesinin bozulma olasılığı artmakta ve bu durum heyelan oluşumunu daha olası hâle getirmektedir. Bu nedenle, eğim değişimleri heyelan duyarlılık analizlerinde dikkate alınması gereken kritik bir etkidir.



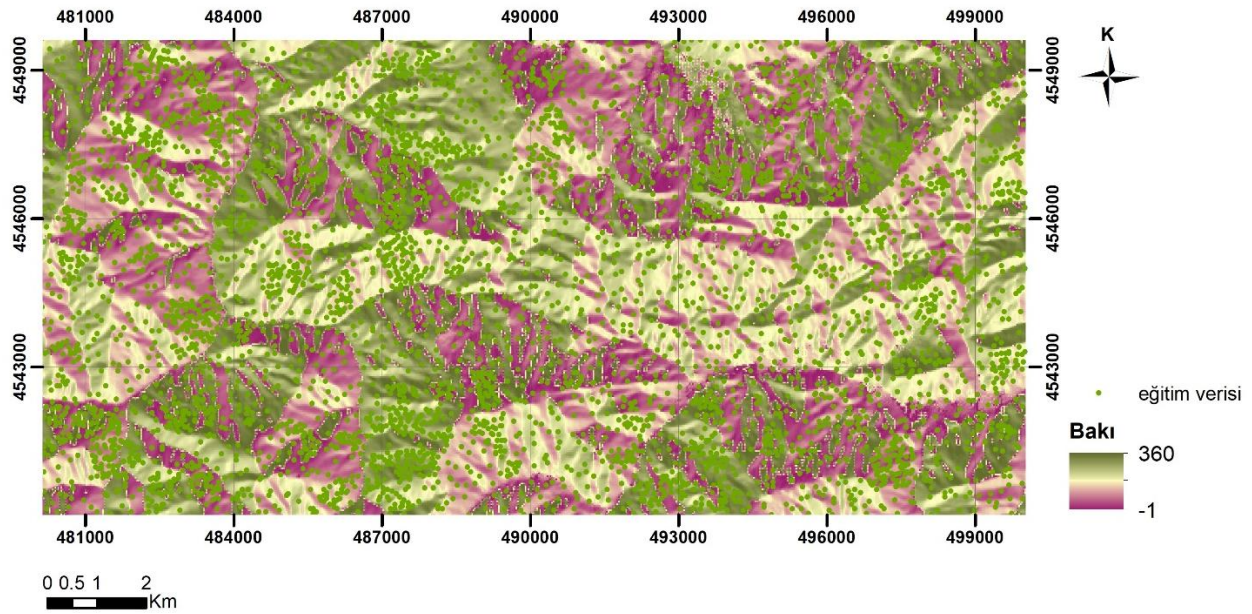
Şekil 5.2. Çalışma alanına ait yamaç eğimi haritası.

5.3. Yamaç Yönelimi (Bakı)

Bakı, bir yamaç yüzeyinin coğrafi yönelimini ifade eden ve güneşlenme süresi, toprak nemi, buharlaşma, bitki örtüsü gelişimi gibi çevresel faktörler üzerinde etkili olan önemli bir morfometrik parametredir. Bu özellikleri nedeniyle bakı, heyelan duyarlılık haritalama çalışmalarında sıklıkla değerlendirilen yardımcı değişkenlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde yapılan bazı çalışmalar, özellikle güney ve güneybatıya bakan yamaçlarda, güneşlenme süresinin artmasıyla zemin kuruması ve ayrışmanın hızlanması sonucu heyelanlara karşı duyarlılığın arttığını belirtmiştir (Çellek ve ark., 2020; Wang ve ark., 2016). Öte yandan, kuzeye bakan yamaçlarda daha fazla toprak nemi birikmesi, düşük buharlaşma ve daha kalın

toprak örtüsü gibi nedenlerle de heyelan oluşumunun mümkün olduğu ifade edilmiştir (Yılmaz, 2010; Chen ve ark., 2020). Bu bağlamda, bakı yöneliminin tek başına belirleyici bir faktör olmamakla birlikte, diğer topoğrafik ve iklimsel etkenlerle birlikte heyelan potansiyelini etkileyebileceği kabul edilmektedir.

Çalışma alanına ait yamaç yönelimi (bakı) haritası, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verileri kullanılarak ArcMap 10.8.1 yazılımı ile üretilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, heyelanların büyük ölçüde güneydoğuya bakan yamaçlarda meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Çalışma alanına ait yamaç yönelimi (bakı) haritası.

5.4. Topoğrafik Nemlilik İndeksi (TWI)

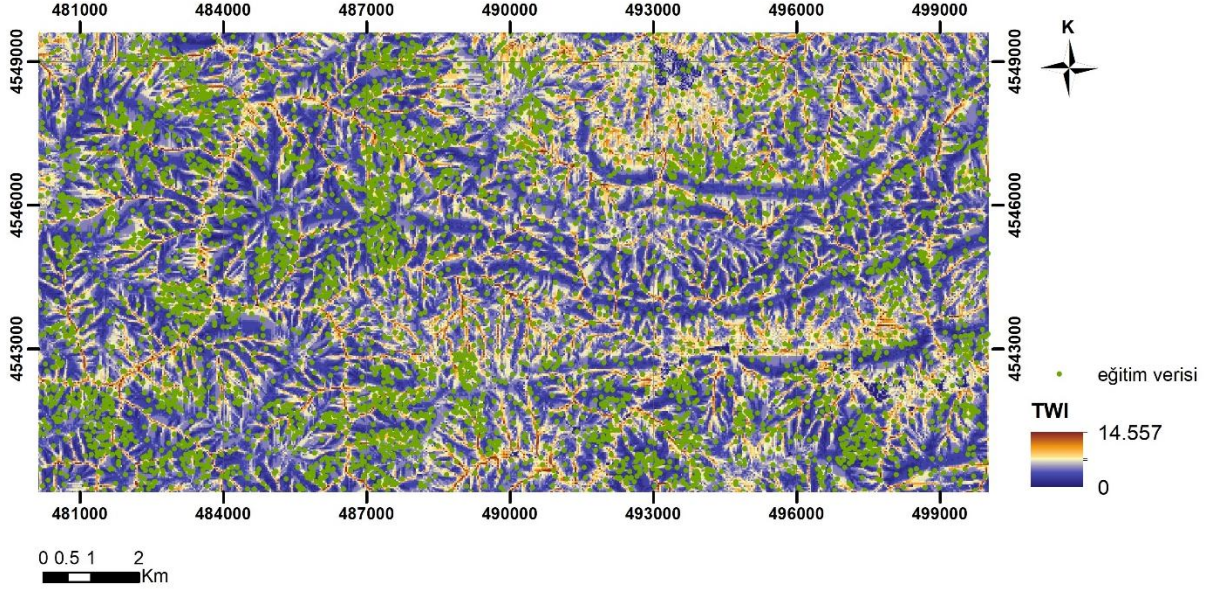
Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), bir arazideki su birikimi potansiyelini ve yüzey akışının topografya ile ilişkisini belirlemek amacıyla kullanılan önemli bir jeomorfometrik göstergedir. Bu indeks, eğim ve akış birikimi gibi topoğrafik özelliklere dayanarak, belirli bir noktada toprak nemliliğinin göreceli derecesini tahmin etmeye yarar. İlk olarak Beven ve Kirkby (1979) tarafından tanımlanan TWI, daha sonra Moore ve ark. (1991) tarafından geliştirilen formülle yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Eş. 1).

$$TWI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \quad \text{Eş. 1}$$

Bu formülde a , belirli bir hücreye yukarı havzadan gelen özgül akış alanını (m^2/m) ve β , bu hücrenin yerel eğimini (radyan cinsinden) temsil etmektedir. TWI değeri arttıkça, ilgili alanda yüzey suyu birikimi ve toprak nemi potansiyeli de artmakta; bu durum, özellikle sığ heyelanların oluşum riski açısından kritik hale gelmektedir (Moore ve ark., 1991; Beven, 1997).

Toprak nemi, yamaç stabilitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle geçirimsiz ya da yarı geçirimsiz zeminlerde, suyun toprakta birikmesi kayma düzlemi boyunca gözenek suyu basıncını artırarak duyarlılığı azaltabilir (Van Westen ve ark., 2003). Bu nedenle TWI, heyelan duyarlılık analizlerinde sıklıkla kullanılan parametrelerden biri haline gelmiştir. Gomez ve Kavzoglu (2005), yaptıkları çalışmada TWI'yi, toprak su içeriğinin dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirmiş ve sığ heyelanlar için anlamlı sonuçlar elde etmişlerdir. Benzer şekilde, Ercanoğlu (2005), TWI'nin su akışının alandaki dağılımını analiz etmek için kullanıldığını belirtmiştir. Gorsevski ve Jankowski (2008), TWI ile akma türü heyelanlar arasındaki ilişkiyi incelemiş; teorik olarak bu tür heyelanların yüksek TWI değerlerinde yoğunlaşması beklenirken, analiz sonuçlarında daha çok orta seviye TWI değerlerine sahip alanlarda görüldüğünü rapor etmişlerdir. Bu durum, TWI ile heyelan türleri arasındaki ilişkinin yalnızca su birikimiyle değil, aynı zamanda eğim, litoloji ve toprak özellikleri gibi diğer faktörlerle de şekillendiğini göstermektedir.

Topoğrafik nemlilik indeksi haritası, ArcMap 10.8.1 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 5.4). Bu kapsamda, analizler Sayısal Yükseklik Modeli'nden (SYM) türetilen topoğrafik veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elde edilen harita analizlerine göre, TWI değerleri 0 ile 1456 arasında değişim göstermektedir. Bu değer aralığı, topoğrafyanın nem tutma kapasitesinin düşükten yükseğe doğru çeşitlilik arz ettiğini ortaya koymaktadır.

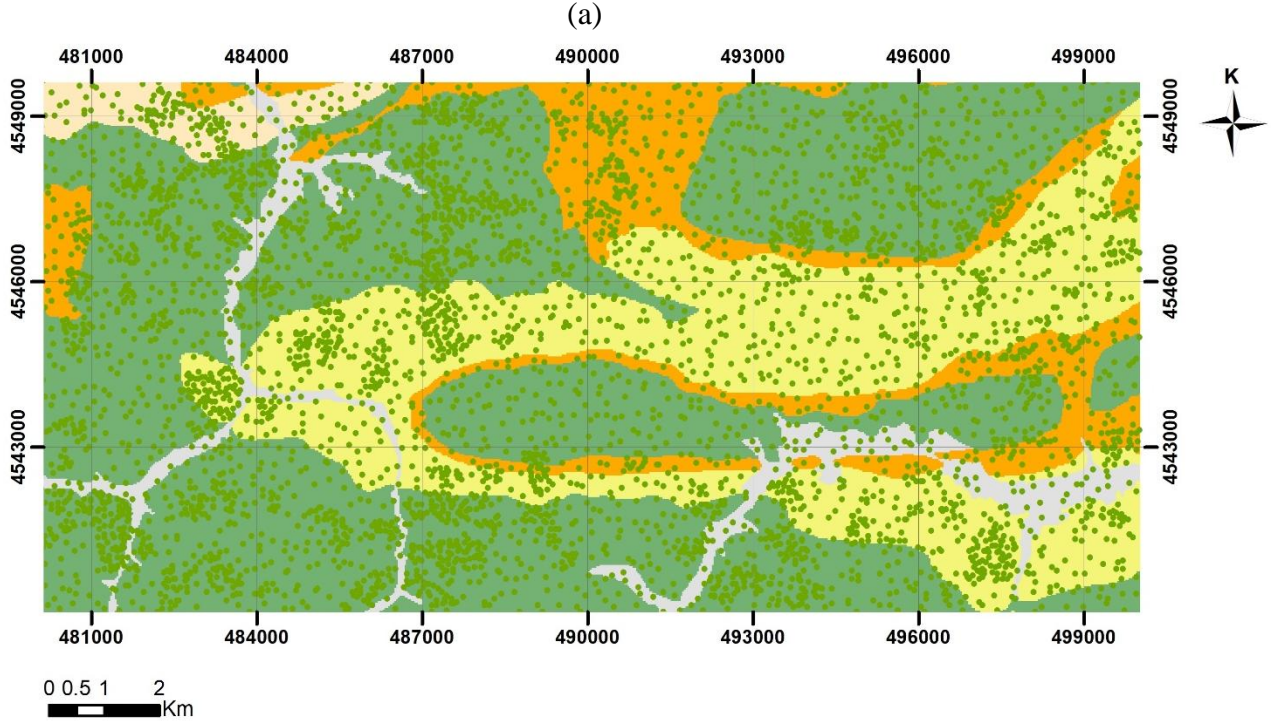


Şekil 5.4. Çalışma alanına ait topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) haritası.

5.5. Litoloji

Litoloji, heyelan duyarlılık haritalamasında temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Farklı litolojik birimler; dayanım, geçirgenlik, ayrışma derecesi ve çatlaklılık gibi zemin ve kaya kütlesi özelliklerinde belirgin farklılıklar gösterdiğinden, yamaç duyarlılığı üzerinde doğrudan etkilidir (Baeza ve Corominas, 2001). Özellikle zayıf dayanımlı ve kolay ayrışabilen litolojiler, heyelanların oluşumuna daha elverişli koşullar sunmaktadır. Bu nedenle litolojik özelliklerin detaylı şekilde değerlendirilmesi, heyelan duyarlılık analizlerinin doğruluğunu artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır (Guzzetti ve ark., 2005; Ayalew & Yamagishi, 2005).

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün (MTA, 2002) hazırladığı genel jeoloji haritasına göre çalışma alanında toplam dokuz farklı formasyon tanımlanmıştır (bkz. Şekil 2.2). Ancak bu birimlerden bazıları, baskın litolojik birimlerin alt seviyelerini temsil ettiğinden, litostratigrafik açıdan beş ana formasyon altında gruplandırılmıştır. Çalışma sahasında gözlemlenen litolojik birimler şunlardır: Ulus Formasyonu (Ku), Kışlaköy Formasyonu (Tek), Safranbolu Formasyonu (Tes), Çeçen Üyesi (Tekaç) ve Alüvyon (Qal). Söz konusu birimlerin çalışma alanındaki yüzey dağılımlarına bakıldığında, Ulus Formasyonu (Ku) %57,2'lik bir yüzde ile en geniş yayılıma sahip litolojik birim olarak öne çıkmaktadır. Bunu, %24'lük Kışlaköy Formasyonu (Tek) takip etmektedir (Şekil 5.5).

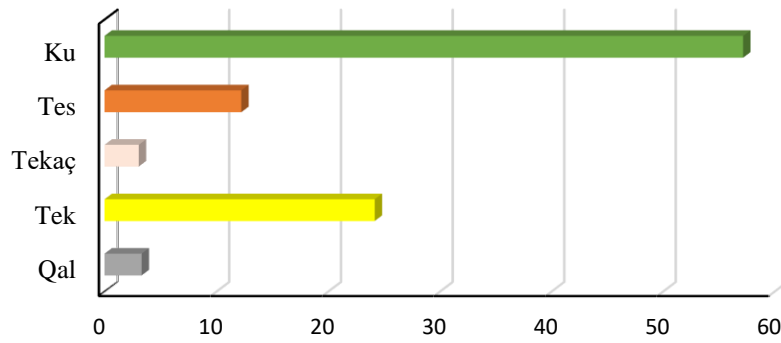


Açıklamalar

- eğitim verisi
- Qal-alüvyon (Kuvaterner)
- Tek-konglomera,kumtaşı,çamurtaşı,kumtaşı (Üst Paleosen-Alt Eosen)
- Tekaç-kumtaşı,silttaşı,çamurtaşı,konglomera (Alt-Orta Eosen)
- Tes-kireçtaşı,marn (Alt-Orta Eosen)
- Ku-kumtaşı,şeyl,konglomera,kireçtaşı (Alt Kretase)

(b)

% Alansal dağılım

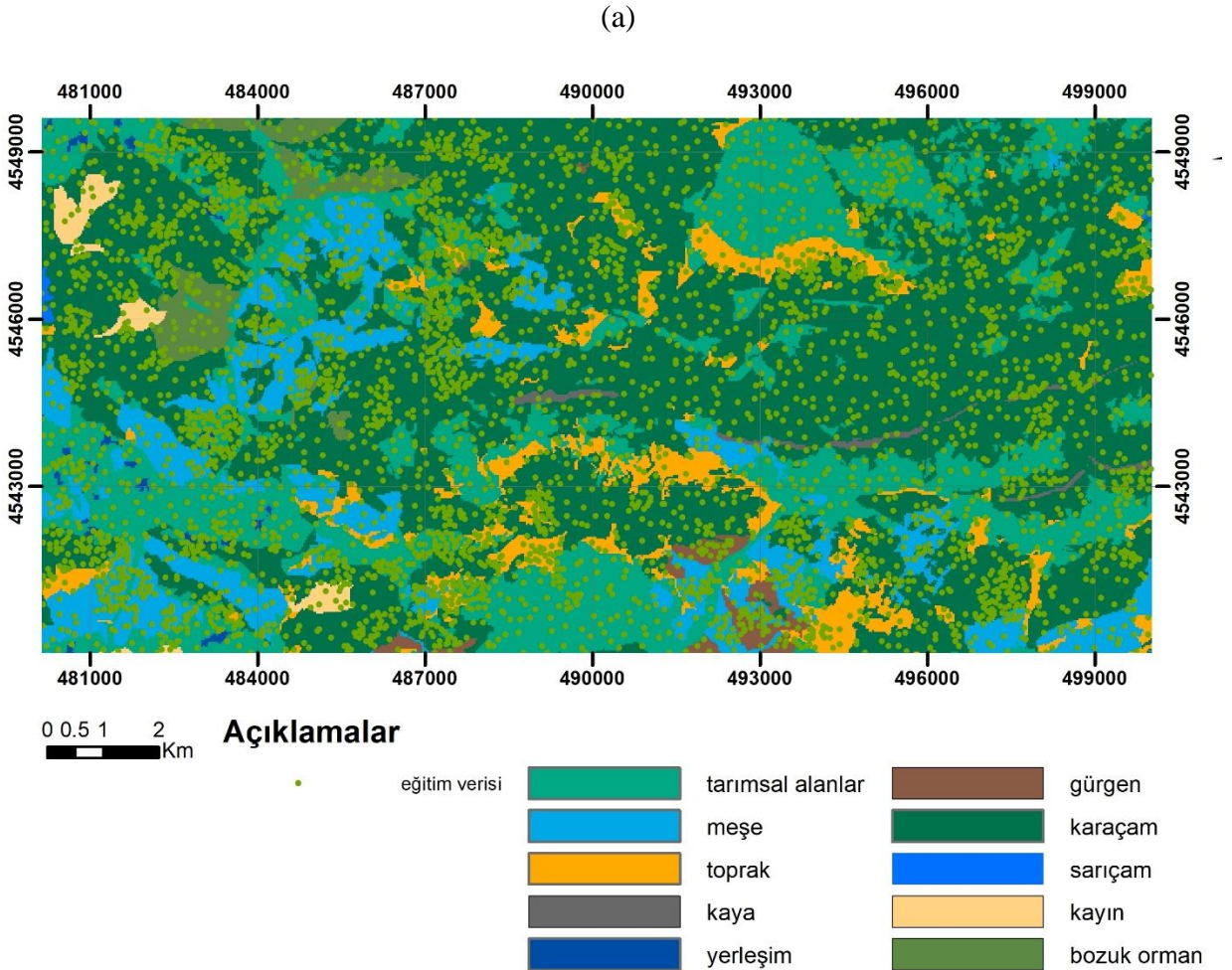


Şekil 5.5 (a) Çalışma alanına ait litoloji haritası (b) Litolojik birimlerin çalışma alanının içerisindeki % dağılımı.

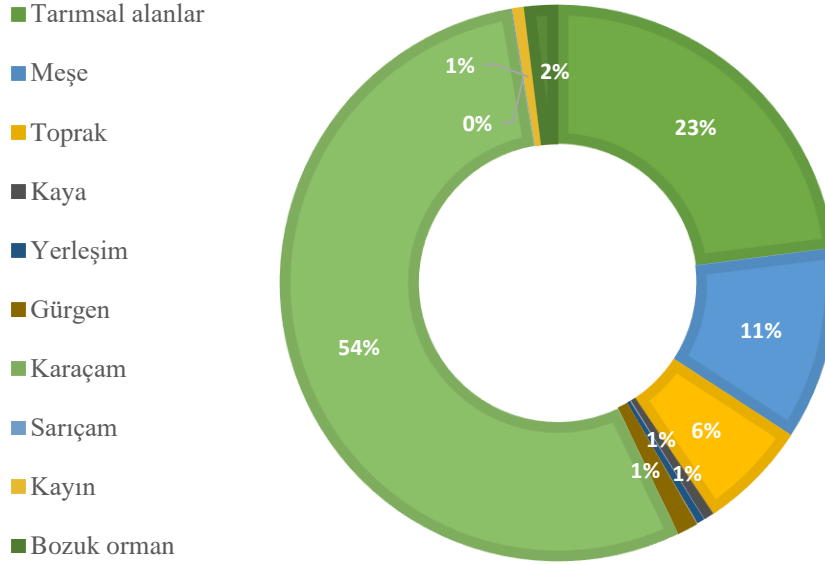
5.6. Arazi Kullanımı

Bu çalışma kapsamında, çalışma alanına ait arazi kullanım durumu analiz edilmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda arazi kullanım parametresi 10 farklı sınıfa ayrılarak detaylı bir şekilde sınıflandırılmıştır. Söz konusu sınıflandırma süreci, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı analizlerin gerçekleştirildiği ArcMap 10.8.1 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Arazi kullanım haritasının oluşturulmasında kullanılan temel veri seti ise, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından ArcGIS altyapısıyla geliştirilen e-harita uygulamasında yer alan ve Türkiye genelindeki orman varlığını detaylı şekilde gösteren Türkiye Meşcere Haritası'ndan temin edilmiştir (OGM, 2025).

Çalışma alanına ait arazi kullanım haritası incelendiğinde, bölgenin önemli bir kısmını (%54) karaçam kaplamaktadır. Bunu %23 oranıyla tarımsal alanlar takip etmektedir (Şekil 5.6)



(b)



Şekil 5.6 (a) Çalışma alanına ait arazi kullanım haritası (OGM, 2025) (b) Arazi kullanımının çalışma alanının içerisindeki % dağılımı.

6. ÇALIŞMA ALANININ HEYELAN DUYARLILIK DEĞERLENDİRMESİ

6.1. Frekans Oranı (FR) Yönteminin Kullanımı

Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan yöntemler genel olarak üç ana gruba ayrılmaktadır: deterministik, istatistiksel ve makine öğrenimi temelli teknikler. Her bir yöntem, farklı veri setleri ve analiz teknikleri ile heyelan olasılığını değerlendirmeyi amaçlar. İstatistiksel yaklaşımlar, geçmiş heyelan olayları ile çevresel faktörler arasındaki ilişkileri ortaya koyarak analiz yapar. Lojistik Regresyon (Logistic Regression, LR), Frekans Oranı (Frequency Ratio, FR), Kanıt Ağırlığı (Weights of Evidence, WoE) ve Bilgi Değeri (Information Value, IV) gibi modeller, istatistiksel yöntemler arasında en yaygın kullanılanlardır. Bu teknikler, heyelan duyarlılığını belirlemek için yamaç eğimi, jeolojik yapı, yağış miktarı gibi çeşitli çevresel faktörleri bir arada değerlendirir (Lee ve Pradhan, 2007; Ayalew ve Yamagishi, 2005). İstatistiksel yöntemlerin en

önemli avantajı geniş alanlarda uygulanabilir olmalarıdır; ancak doğrulukları kullanılan veri setinin kalitesi ve güvenilirliğine doğrudan bağlıdır.

Heyelan duyarlılık haritalama çalışmaları arazi kullanım planlaması, afet yönetimi ve mühendislik projeleri için önem arz etmektedir. Literatürde heyelan duyarlılık analizlerinde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır ve bunlardan en yaygın kullanılan yöntem Frekans Oranı (FR) yöntemidir. Bu yöntemin daha çok tercih edilmesindeki temel amaç, özellikle karmaşık istatistiksel modellere göre uygulamasının kolay olması ve sonuçlarının kolay yorumlanabilmesidir (Lee ve Pradhan, 2007). Ayrıca FR yönteminden elde edilen sonuçlar Lojistik Regresyon (LR), Makine Öğrenimi (ML), Kanıt Ağırlığı (Weights-Of-Evidence-Woe) gibi daha gelişmiş yöntemlerle karşılaştırıldığında neredeyse aynı doğruluk sunduğu görülmüştür (Pradhan, 2010).

Her bir parametre sınıfı için Frekans Oranı (FR) değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$FR = \frac{\frac{N_{ip}}{N_{lp}}}{\frac{N_i}{N}} = a/b \quad (\text{Eş.1})$$

Bu eşitlikte:

- FR: Frekans Oranını,
- N: Çalışma sahasındaki toplam piksel sayısını,
- Ni: Parametrenin ilgili alt sınıfına ait toplam piksel sayısını,
- Nip: Parametre alt sınıfına ait ve heyelanla çakışan piksel sayısını (heyelanlı piksel sayısı),
- Nlp: Tüm heyelanlı piksel sayısını ifade etmektedir.

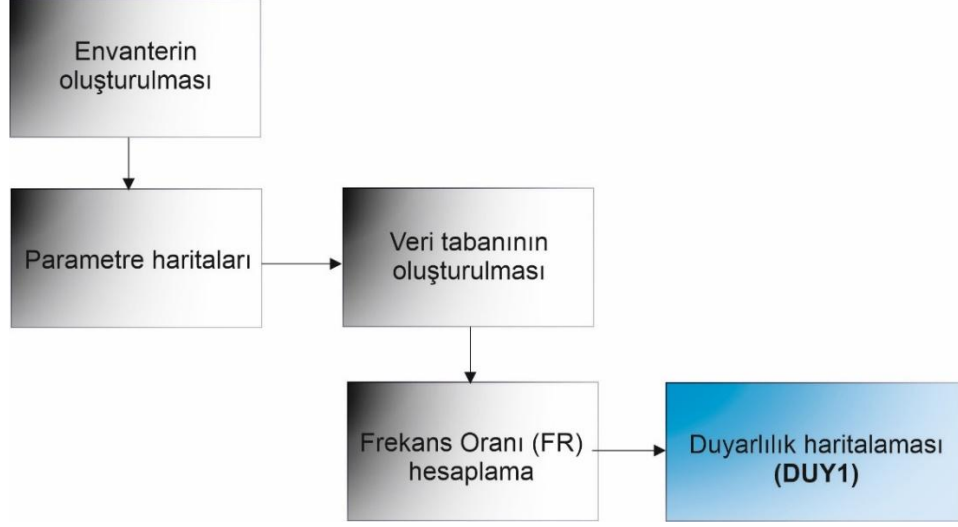
Bu eşitlik yardımıyla her bir parametre sınıfı için Frekans Oranı değeri hesaplanmaktadır. FR değeri 1'den büyükse, ilgili sınıfın heyelan gelişimi üzerinde pozitif bir etkisi olduğu, 1'e eşitse etkisinin nötr olduğu, 1'den küçükse etkisinin negatif olduğu yorumu yapılabilir (Fayez ve ark., 2018). Elde edilen FR değerleri, tüm parametreler için hesaplandıktan sonra birleştirilerek heyelan duyarlılık haritası oluşturulur. Üretilen bu duyarlılık haritası, çalışma alanının heyelan gelişimine ne derece duyarlı olduğunu mekânsal olarak ortaya koymakta ve arazi planlamasında karar vericilere önemli bilgiler sağlamaktadır.

6.2. Sismik Etkinin Dikkate Alınmadığı Koşulda FR Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Analizi

Bu çalışmanın ilgili bölümünde, sismik etkinin çalışma alanındaki heyelan duyarlılığı üzerine herhangi bir etkisinin bulunmadığı durumu temsil eden modelleme süreci, Şekil 6.1’de akış diyagramı şeklinde sunulmuştur. Bu senaryoya göre, Frekans Oranı (Frequency Ratio - FR) değerlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle, çalışmada kullanılan ve sismik etkinin dahil edilmediği modelde dikkate alınan altı adet morfolojik ve çevresel parametreye ait sınıflandırılmış alt gruplar oluşturulmuştur. Bu sınıflandırma süreci, her bir parametrenin farklı jeomorfolojik ve çevresel koşulları yansıtacak şekilde alt kategorilere ayrılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Parametrelerin alt gruplarının belirlenmesinin ardından, her bir alt gruba denk gelen heyelanlı piksel sayısı (N_{ip}) ile o alt gruptaki toplam piksel sayısı (N_i), Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında detaylı analizler aracılığıyla tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler temel alınarak, her bir alt grup için öncelikle **a katsayısı** hesaplanmıştır; bu katsayı, ilgili alt gruptaki heyelanlı piksel sayısının (N_{ip}), çalışma alanındaki toplam heyelanlı piksel sayısına (N_{ip}) oranlanmasıyla elde edilmiştir. Benzer şekilde, **b katsayısı** ise, alt gruptaki toplam piksel sayısının (N_i), çalışma alanındaki toplam piksel sayısına (N) oranlanmasıyla belirlenmiştir.

Bu iki katsayının birbirine oranlanması sonucunda, her bir parametrenin alt grubu için Frekans Oranı (FR) değeri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Hesaplanan FR değerleri, ait oldukları parametre sınıflarına atanarak CBS ortamında parametrik katmanlara işlenmiştir. Ardından, bu parametre katmanları CBS ortamında üst üste bindirilerek (çakıştırılarak) toplam duyarlılık değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu toplam değerler, çalışma alanına ait sismik etkinin göz önünde bulundurulmadığı durumu yansıtan heyelan duyarlılık haritasının (DUY1) oluşturulmasında kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Sismik etkinin dikkate alınmadığı FR yöntemi kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalaması (DUY1) akış diyagramı.

Çizelge 1. Herbir parametreye ait hesaplanan FR değerleri (sismik etki dahil değil).

Topoğrafik Yükseklik (m)	Heyelanlı piksel sayısı (Nip)	Toplam piksel sayısı (Ni)	Frekans Oranı (FR)
450-650	0	138	0,000
650-850	485	829	1,170
850-1050	1091	2016	1,082
1050-1250	737	1613	0,914
1250-1450	487	404	0,926
Yamaç eğimi (°)			
0-5	0	262	0
5-15	789	1795	0,879
15-25	1106	1948	1,135
25-35	563	916	1,229
35-45	42	79	1,063
Yamaç yönelimi (bakı)			
K	228	398	1,146
KD	380	741	1,025
D	385	687	1,121
GD	337	632	1,066
G	302	621	0,973
GB	248	548	0,905
B	233	513	0,908
KB	387	770	1,005
Düz (-1)	0	90	0

Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI)			
<3	0	10	0
3-6	1260	2537	0,993
6-9	1148	2211	1,038
9-12	80	172	0,930
>12	12	70	0,343
Litoloji			
Qal	0	166	0
Tek	590	1209	0,976
Tekaç	75	153	0,980
Tes	199	612	0,650
Ku	1636	2860	1,144
Arazi Kullanımı			
tarımsal alan	602	1150	1,045
meşe	305	560	1,089
toprak	163	319	1,022
kaya	0	30	0
yerleşim	0	23	0
gürgen	15	62	0,484
karaçam	1370	2721	1,007
sarıçam	0	4	0
kayın	12	35	0,685
bozuk orman	33	96	0,687

6.3. Sismik Etkinin Dikkate Alındığı Koşulda FR Yöntemi ile Heyelan Duyarlılık Analizi

Kuvvet ve/veya moment dengesini çözümlen çok sayıdaki limit denge analiz yönteminde potansiyel kayma yüzeyinin geometrisinden ve konumundan bağımsız olarak her durumda güvenlik katsayısını azaltıcı yatay sismik katsayı (k_h) dikkate alınmaktadır. Ancak limit denge analizlerinin geniş sahaların heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılması gerek pratik açıdan ve gerekse veri temini açısından mümkün değildir.

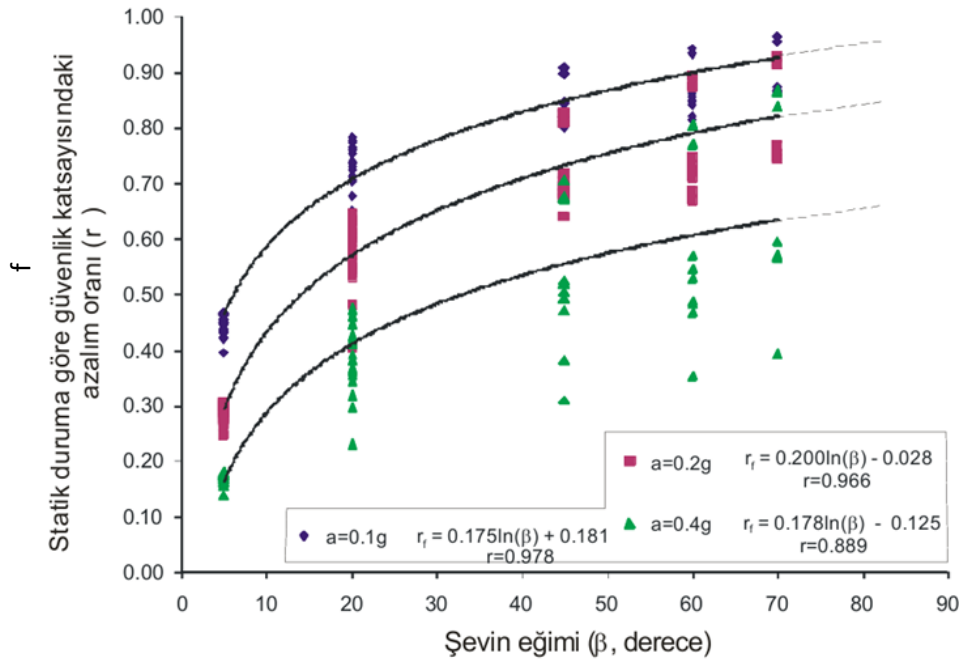
Tezin önceki bölümlerinde de sunulduğu üzere, heyelan duyarlılık haritasının temel veri tabanı heyelan envanteridir. Diğer taraftan, heyelanları hazırlayıcı çok sayıda parametre değerlendirmelere dahil edilirken, sismik etki dolaylı olarak çoğu kez aktif faylara yakınlık gibi parametrik yaklaşımlarla heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Daş (2008) ve Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda ise çok sayıda limit denge analizleri

yapılarak yatay sismik katsayının (kh) duyarlılık üzerindeki etkisi araştırılarak, heyelan duyarlılığı haritalamasına dahil edilmeye çalışılmıştır.

Daş (2008) ve Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda yatay ivmenin farklı değerleri ile farklı şev yükseklik ve açıları için kütleli (daireli) ve sonsuz şev modeli için kayma analizlerinin yapılmış ve son aşamada hepsi birleştirilerek değerlendirilmiştir (Şekil 6.2).

Bu araştırmacıların çok sayıda yaptıkları şev duyarlılığı analizlerde amaç bölgesel heyelan haritalamalarına yönelik olarak sismik etkiye yönelik hassas bir değerlendirme aracı geliştirmekten ziyade yatay sismik katsayının şevin geometrisine özellikle eğimine bağlı olarak genel etki derecesinin açıklanmasına yöneliktir. Diğer bir ifadeyle, güvenlik katsayısı üzerinde hassas bir değerlendirmeden ziyade, sismik etki altında şev duyarlılığının genel davranışının şev eğimine göre açıklanmasına yöneliktir.

Daş (2008) ve Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalardaki hipotetik şev modellerinin duyarlılık analizlerinden elde edilen çıkarıma göre, statik durumda aynı güvenlik katsayısına sahip iki farklı eğime sahip şev modeline sismik katsayısının uygulanmasıyla şev eğiminin daha düşük olduğu modelde statik duruma göre güvenlik katsayısı daha fazla azalmaktadır.



Şekil 6.2. Daş (2008) tarafından yapılan çalışmaya göre drene ve doygun şev koşullarında daireli kayma ve sonsuz şev modeli için farklı yatay ivme değerlerinde şev eğimi ile statik duruma göre güvenlik katsayısındaki azalım oranı ilişkileri.

Daş ve ark. (2013) genel yapısı $r_f = A \ln(\beta) + B$ şeklindeki logaritmik ilişkilerdeki A katsayısının değerlerinin birbirine benzer olması nedeniyle ortalama $A=0,18$ değerini eşitliğin genellemesinde kullanmışlardır. B katsayısında ise yatay ivmenin değerine bağlı olarak bir eşitlik üretmişlerdir. Araştırmacıların genellemeye yönelik olarak şev eğimi ve yatay ivmeye bağlı olarak statik duruma göre azalım oranının (r_f) belirlenmesi için aşağıdaki eşitlikleri üretmişlerdir.

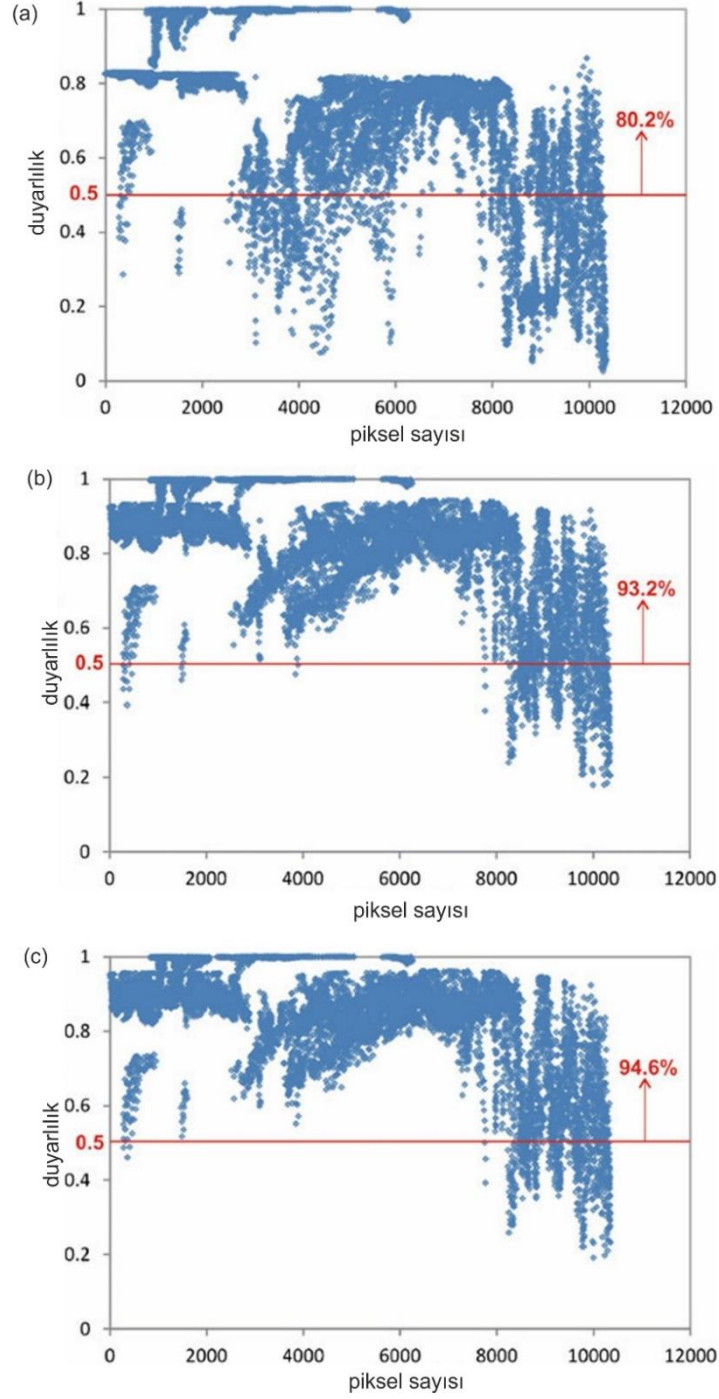
$$r_f = 0.18 \ln(\beta) + B \quad (\text{Eş. 2})$$

$$B = (0.707a^{-0.21}) - 1 \quad (\text{Eş.3})$$

- ✓ Burada b şevin açısı (yamaç eğimi), a ise senaryo depreme ait yatay ivme değeridir. Daş (2008) heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasına envanter haritalarındaki sismik etkiye bağlı belirsizlikten dolayı, sismik etkinin yeterince duyarlılık haritalarına yansıtılmadığı çıkarımlarına bağlı olarak yer ivmesinin ve yamaç eğiminin girdi parametresi olarak kullanıldığı Eş. 2 ve Eş. 3 azalım oranı (r_f) kavramının duyarlılık haritalarında kullanımına ilişkin izlenecek yolu şematik gösterim olarak Şekil 6.3'te, uygulama aşamalarını ise aşağıdaki gibi özetlemişlerdir:
- ✓ Duyarlılık analiz yöntemlerinden (LR, FR, Yapay Sinir Ağları vb.) uygun bir hesaplama aracı kullanılarak envanterden itibaren heyelan duyarlılık haritası hazırlanır.
- ✓ Çalışma alanının deprenselliğine bağlı olarak etkin yatay yer ivmesi değeri belirlenir.
- ✓ Etkin yatay yer ivmesi ve eğim haritası kullanılarak, statik duruma göre azalım katsayısı haritası oluşturulur.
- ✓ Statik duruma göre azalım (r_f) haritası ve heyelan duyarlılık (d) haritasının $d_{\text{sismik}} = 1 - (1 - d)r_f$ ilişkisinde değerlendirilmesiyle elde edilen harita üzerindeki en küçük değer 0 ve en büyük değer 1 olacak şekilde normalize edilir ve senaryo deprem anındaki heyelan duyarlılık haritasına ulaşılır.

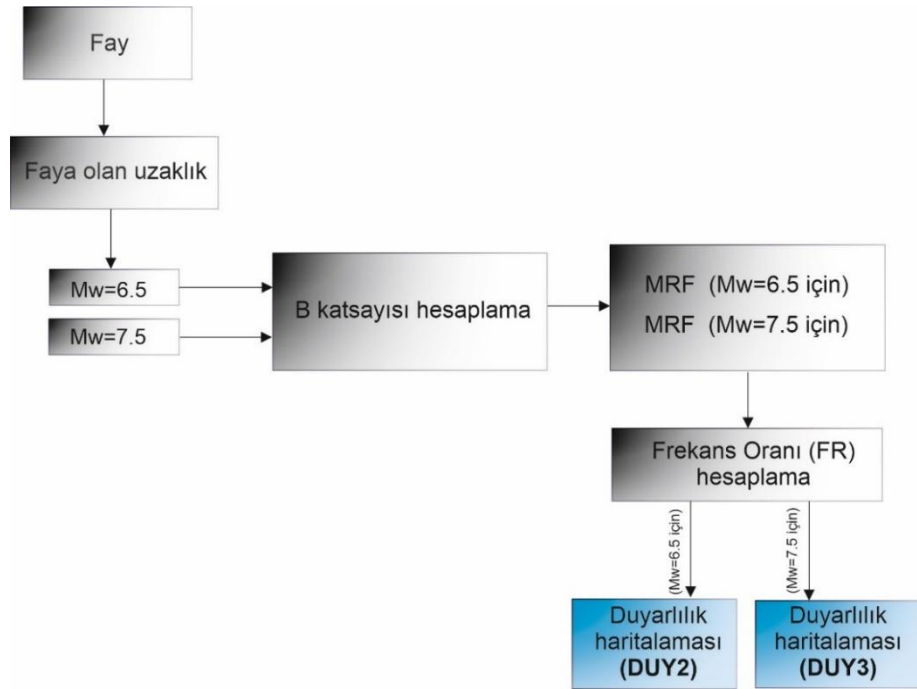
gibi bazı yaklaşımlar girdi parametresi olarak kullanılsa da aktif fayların deprem üretme potansiyellerinin birbirinden farklı olması nedeniyle, yalnızca aktif faylara uzaklığın kullanılmasının yetersiz kalabileceği ifade edilebilir.

Statik duruma göre pseudostatik şev duyarlılığı analizlerinde genellikle güvenlik katsayısı azalmaktadır. Güvenlik katsayısını dolaylı olarak heyelan duyarlılığının bir yansıması olarak kabul eden bu araştırmacılar, senaryo depremleri için en büyük yatay ivmenin heyelan duyarlılık haritalarının üretiminde kullanımı üzerinde durmuşlardır. Bu kapsamda, şevin eğimine bağlı bir düzeltme faktörü geliştirerek, bu düzeltme faktörünü geleneksel yöntemlerle üretilen heyelan duyarlılık haritasına etki ettirmişlerdir. Sonuç üretme açısından bu yaklaşım ilk bakışta mantıksal olarak anlamlı görünmekle birlikte, sismik düzeltme faktörünün eğim değişimine bağlı olarak farklı etki derecelerine sahip olmasına rağmen, her durumda duyarlılığı artırıcı yöndeki etkisi nedeniyle Daş ve ark. (2013) tarafından önerilen yaklaşım kuramsal açıdan hatalıdır. Bu uygulamanın yanıltıcı yönünün temel nedeni, bilinen yöntemlerle üretilen heyelan duyarlılık haritasına, amax ve şev eğimine bağlı bir çarpanla her zaman duyarlılığı artırıcı yönde bir düşünsel kurgu getirilmesidir. Daha açık bir ifadeyle, bu kurgu, bilinen yöntemlerle üretilen heyelan duyarlılık haritasına kıyasla mevcut heyelanları kestirim performansını artırmakta ve bu durum, Daş ve ark. (2013) tarafından yayımlanan çalışmada da açıkça görülmektedir. Nitekim, Kelkit Vadisi'nde seçilmiş bir alanda, önerilen yöntemle sismik etki dahil edilerek üretilen heyelan duyarlılık haritasında, sismik etkinin dikkate alınmadığı durumda heyelan duyarlılık değeri 0,5'in üzerinde olan heyelanlı piksel oranı %80,2 iken, bu oran $M_w=5,5$ ve $M_w=7,5$ büyüklüğündeki senaryo depremleri için sırasıyla %93,2 ve %94,6'ya çıkmaktadır (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Daş ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada Kelkit vadisinde bir alandaki heyelan duyarlılık çalışmasında üretilen heyelan duyarlılık haritalarındaki heyelanlı piksellere karşılık duyarlılık değeri grafikleri, (a) bilinen yaklaşımla üretilen heyelan duyarlılık haritası, (b) $M_w=5,5$ ve (c) $M_w=7,5$ deprem senaryoları için üretilen sismik etkinin de dikkate alındığı heyelan duyarlılık haritaları.

Depremler, heyelan oluşumunu tetikleyen önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, sismik etkinin heyelan duyarlılık haritalamasında dikkate alınması, bilimsel olarak temellendirilmiş ve gerekçelendirilebilir bir yaklaşımdır. Ancak, depremlerin heyelan oluşumuna etkisi yalnızca varlığıyla sınırlı olmayıp, büyük ölçüde şev eğimi gibi topoğrafik koşullar ile birlikte, dinamik bir parametre olan en büyük yer ivme (PGA) gibi sismik etkilerle ilişkilidir. Bu bağlamda, güvenlik katsayısında meydana gelen azalmalar üzerinden duyarlılığın dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilen bu etki, heyelan duyarlılık haritalarına entegre edilmesi açısından anlaşılabilir ve akılcı bir gerekçeye dayanmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu etkinin yalnızca sonuç haritasına müdahale eden bir düzeltme faktörü şeklinde değil, diğer hazırlayıcı faktörlerde olduğu gibi, doğrudan bir girdi parametresi olarak değerlendirilmesinin de önemli olduğu düşünülmektedir. Bu yaklaşım, sismik etkinin heyelan oluşumu üzerindeki rolünü daha nesnel ve analiz edilebilir bir biçimde modelleme imkânı sunmaktadır. Bu yönüyle bu tez çalışması da sismik etkinin heyelan duyarlılık modellemelerinde girdi parametresi olarak kullanımı üzerine odaklanmakta ve bu bağlamda geliştirilen yöntemsel yaklaşımların etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda aşağıda $M_w=6,5$ ve $M_w=7,5$ büyüklüğündeki deprem senaryoları için yapılan heyelan duyarlılık analiz aşamaları akış diyagramı şeklinde verilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Sismik etkilerin dikkate alındığı FR yöntemi kullanılarak oluşturulan heyelan duyarlılık haritalaması (DUY2 ve DUY3) akış diyagramı.

Bu aşamada, çalışma alanına yakın konumda olan KAFZ'nun (bkz. Şekil 2.3) olası etkileri dikkate alınarak, çalışma alanı için ilk aşamada faya uzaklık parametresi CBS ortamında (her bir piksele olan dik uzaklık) oluşturulmuştur. Buradaki temel unsur en büyük yer ivmesinin belirlenmesi olup, Daş ve ark. (2013)'nin de çalışmalarında dikkate aldıkları Akkar ve Bommer (2010) görgül azalım ilişkisinden yararlanılmıştır:

$$\log(PSA) = b_1 + b_2M + b_3M^2 + (b_4 + b_5M)\log\sqrt{R_{jb}^2 + b_6^2} + b_7S_s + b_8S_A + b_9F_N + b_{10}F_R + \sigma \quad \text{Eş.4}$$

Bu eşitlikte, S_A , S_s yumuşak ve sert zeminler için 1 değerini alır – diğer durumlarda 0'dır. F_N, F_R normal ve ters faylar için 1'dir diğer durumlarda 0 alınır. R_{jb} faya olan uzaklık km cinsinden, M ise moment büyüklüğü olarak ifade edilir. PSA ise pseudo spektral ivmedir (sıfır periyotta PGA'ya eşittir, yani $PSA = PGA$). $b_1=1,04159$, $b_2=0,91333$, $b_3=-0,08140$, $b_4=-2,92728$, $b_5=0,28120$, $b_6=7,86638$, $b_7=0,08753$, $b_8=0,01527$, $b_9=-0,04189$ ve $\sigma_1=0,2610$, $\sigma_2=0,0994$ alındığı durumda standart sapması $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ olarak belirlenir.

Çalışmada, söz konusu faydan kaynaklanması olası $M_w= 7,5$ ve $M_w= 6,5$ büyüklüğünde iki deprem senaryosu ve faya olan uzaklıklardan yararlanılarak, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de sunulan a_{max} haritaları üretilmiştir. Bu aşamadan sonra, Daş ve ark. (2013)'ün önerdiği B katsayısı aynı kalmak koşuluyla, MRF (Modifiye rf) değeri önerilerek, sismik etkinin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisi, doğrudan ortaya konulmuştur. Zira, buradaki temel gerekçe, duyarlılık açısından (örn.: 0,8) bir piksel düşünüldüğünde, Daş ve ark. (2013)'ün eşitlikleri için $a_{max}=0,4$ g için dikkate alınırsa Çizelge 2'deki değerler elde edilmektedir:

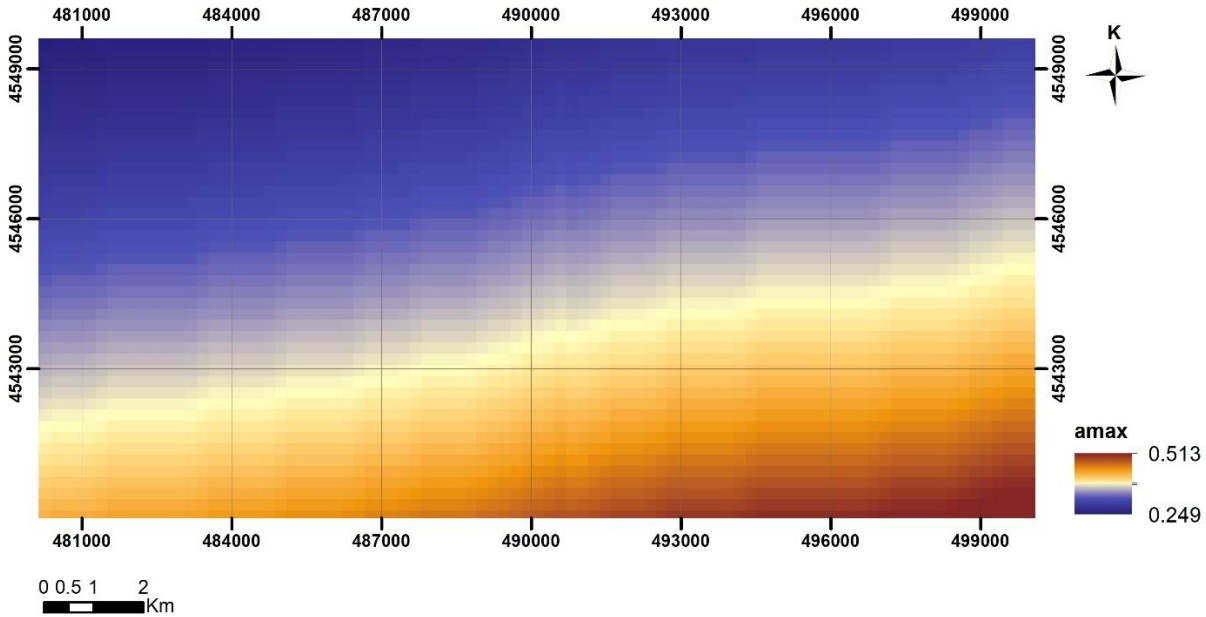
Çizelge 2. Daş ve ark. (2013)'ün önerdiği eşitlikle hesaplanan d_{sismik} değerleri.

Yamaç Eğimi (°)	rf	d_{sismik}
5	0,146	0,9708
10	0,270	0,946
20	0,395	0,921
40	0,520	0,896

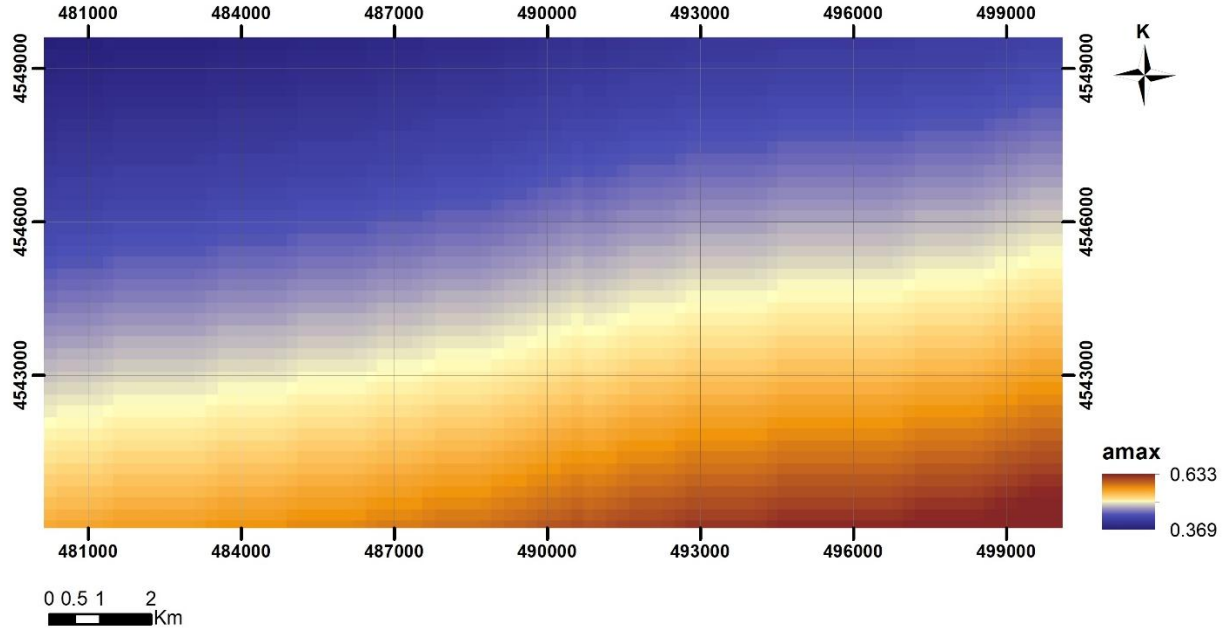
Bu eşitliğin, mevcut duyarlılığı koruma ve/veya arttırmama eğiliminde olduğu ortaya çıkmakta, bu durum da tutucu sonuçların elde edilmesine yol açmaktadır. Zira, yamaç eğimi yükseldikçe, sismik etkinin yatay bileşeninin düşme eğiliminde olması, diğer bir deyişle bu etkinin azalma eğiliminde olması beklenmelidir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında rf katsayısı modifiye edilerek MRF adı altında doğrudan sismik duyarlılığı ifade edecek ve Daş ve ark. (2013)'ün önerdikleri eşitliklerdeki eksiklikleri giderecek şekilde aşağıdaki eşitlikle hesaplanıp, analizlerde kullanılabilir (Eş 5).

$$MRF=(0,78*e^{-0,01*\text{eğim}})-B$$

Eş. 5



Şekil 6.6. Mw=6,5 için oluşturulan amax haritası.



Şekil 6.7. Mw=7,5 için oluşturulan a_{max} haritası.

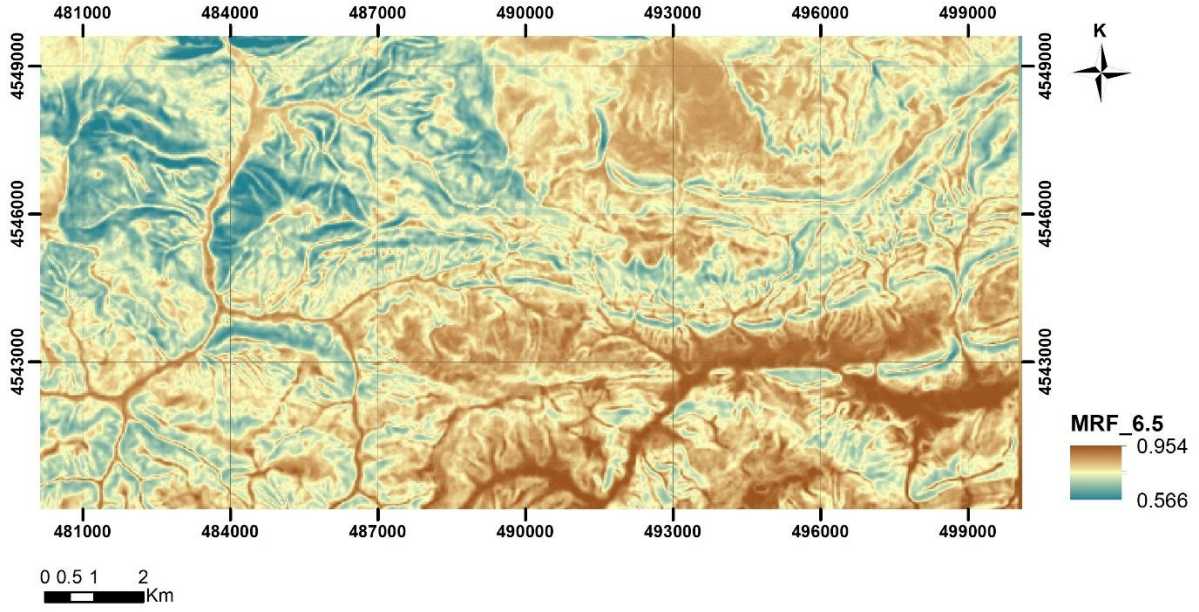
Bu çalışmada önerilen MRF eşitliği (bkz. Eş. 5) kullanılarak, Çizelge 2’de dikkate alınan değerler hesaplandığında, Çizelge 3’te sunulan değerler elde edilmektedir.

Çizelge 3. MRF eşitliği kullanılarak hesaplanan MRF değerleri

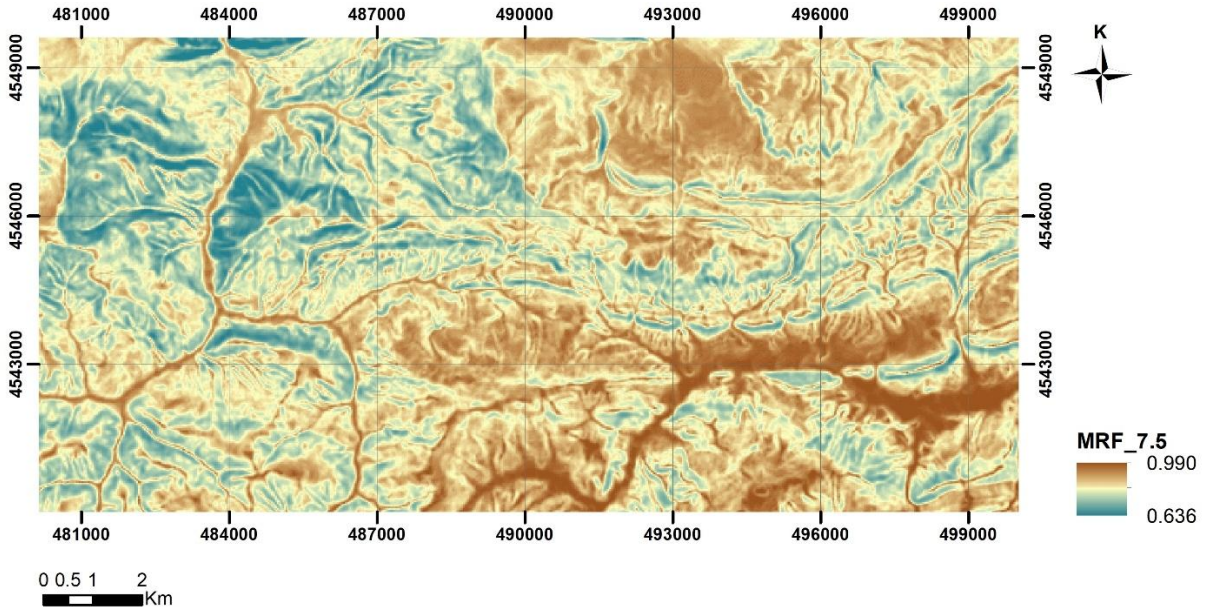
Yamaç Eğimi ($^{\circ}$)	MRF (duyarlılık)
5	0,95
10	0,91
20	0,85
40	0,73

Ayrıca, Daş ve ark. (2013) eşitliği 5 derecenin altında çalışmamakla birlikte, bu çalışmada önerilen eşitlik tüm yamaç eğimi değerleri için kullanılabilmekte ve tanımsızlık da ortadan kalkmaktadır. Bu şekilde izlenen yaklaşımlarla MRF, klasik heyelan duyarlılık analizlerinde bir parametre gibi düşünülerek öncelikle MRF haritaları Mw= 6,5 ve Mw= 7,5 deprem senaryoları için üretilmiştir. (Şekil 6.8 ve Şekil 6.9). Bu aşamadan sonra, MRF haritaları da diğer parametre haritaları gibi FR

hesaplamalarına tabi tutulmuş ve her bir alt sınıf için FR değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4 ve Çizelge 5).



Şekil 6.8. $M_w=6,5$ için üretilmiş MRF haritası.



Şekil 6.9. $M_w=7,5$ için üretilmiş MRF haritası.

Çizelge 4. Mw=6,5 için üretilen MRF haritasının FR değerleri.

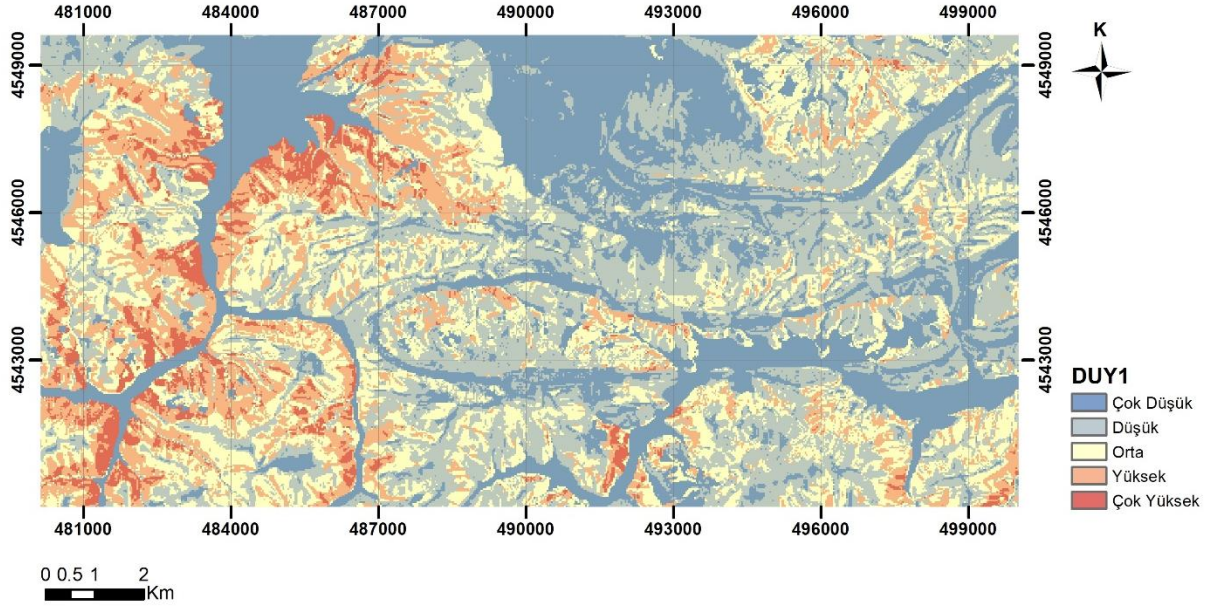
MRF (Mw=6,5)	Heyelanlı piksel sayısı (Nip)	Toplam piksel sayısı (Ni)	Frekans Oranı (FR)
0,5-0,6	0	3	0
0,6-0,7	270	493	1,095
0,7-0,8	1531	2735	1,119
0,8-0,9	692	1668	0,829
0,9-1	7	101	0,138

Çizelge 5. Mw=7,5 için üretilen MRF haritasının FR değerleri.

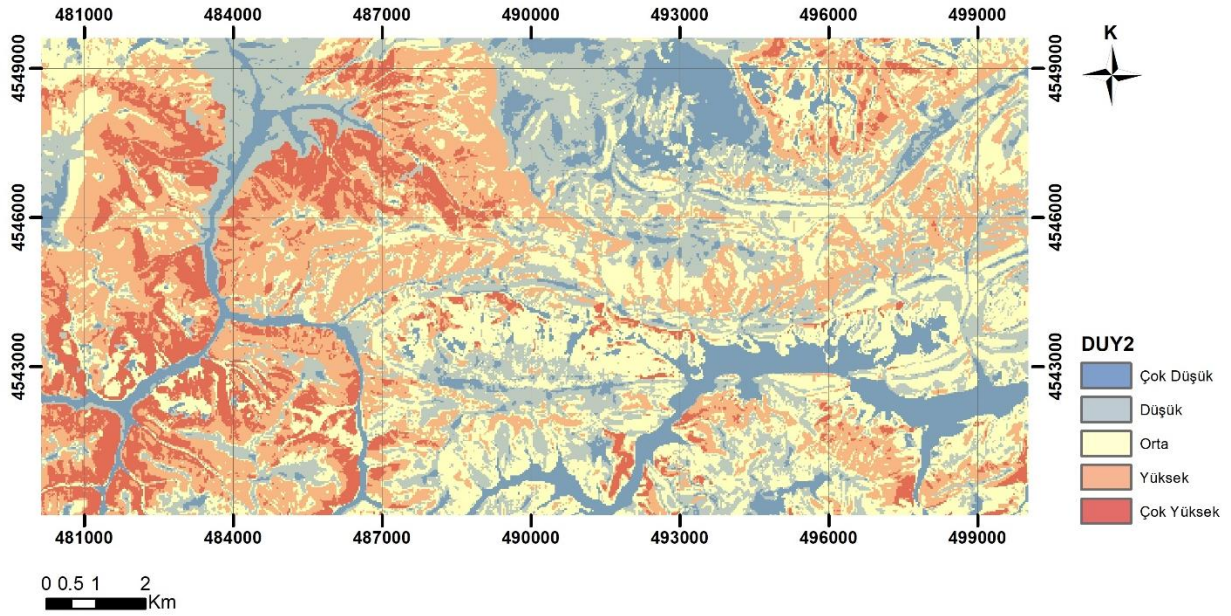
MRF (Mw=7,5)	Heyelanlı piksel sayısı (Nip)	Toplam piksel sayısı (Ni)	Frekans Oranı (FR)
0,6-0,7	20	45	0,889
0,7-0,8	845	1471	1,149
0,8-0,9	1535	2984	1,029
0,9-1	100	500	0,400

6.4. Sismik Etkinin Dahil Edildiği ve Edilmediği Koşulda Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi

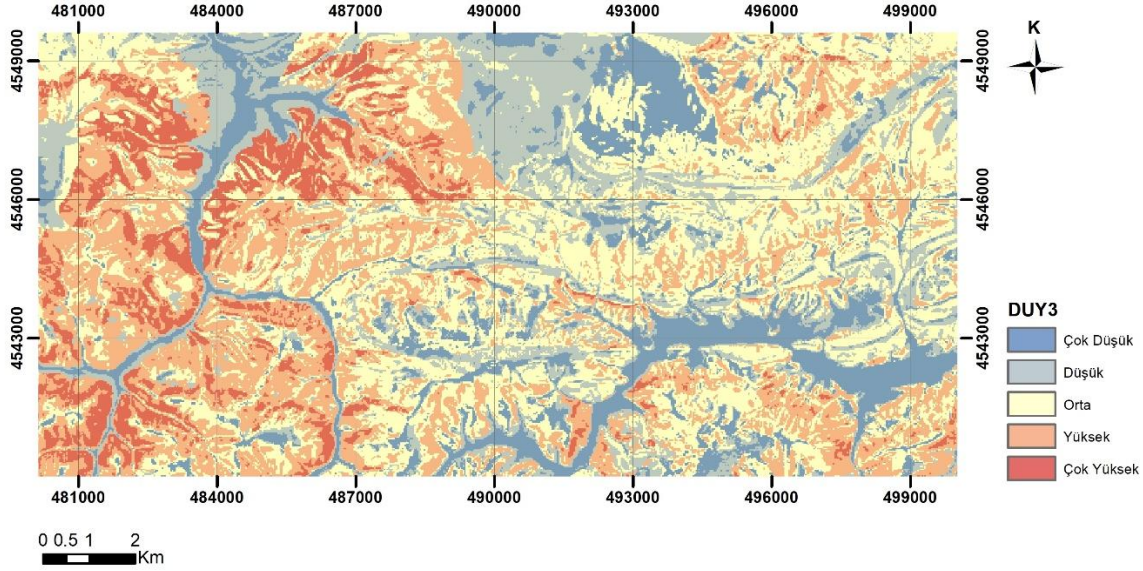
Çalışma alanına ilişkin heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde, her bir parametre ve alt grupları için hesaplanan FR değerleri ilgili sınıflara atanmış, aritmetiksel olarak toplanarak duyarlılık haritaları elde edilmiş, en son aşamada ise [0-1] aralığında normalize edilerek “çok düşük” ve “çok yüksek” sınıfları arasında değişen 5 sınıfa ayrılarak, Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de sunulmuştur.



Şekil 6.10. Çalışma alanına ait heyelan duyarlılık haritası (DUY1).



Şekil 6.11. Çalışma alanına ait Mw=6,5 büyüklük için heyelan duyarlılık haritası (DUY2).



Şekil 6.12. Çalışma alanına ait Mw=7,5 büyüklük için heyelan duyarlılık haritası (DUY3).

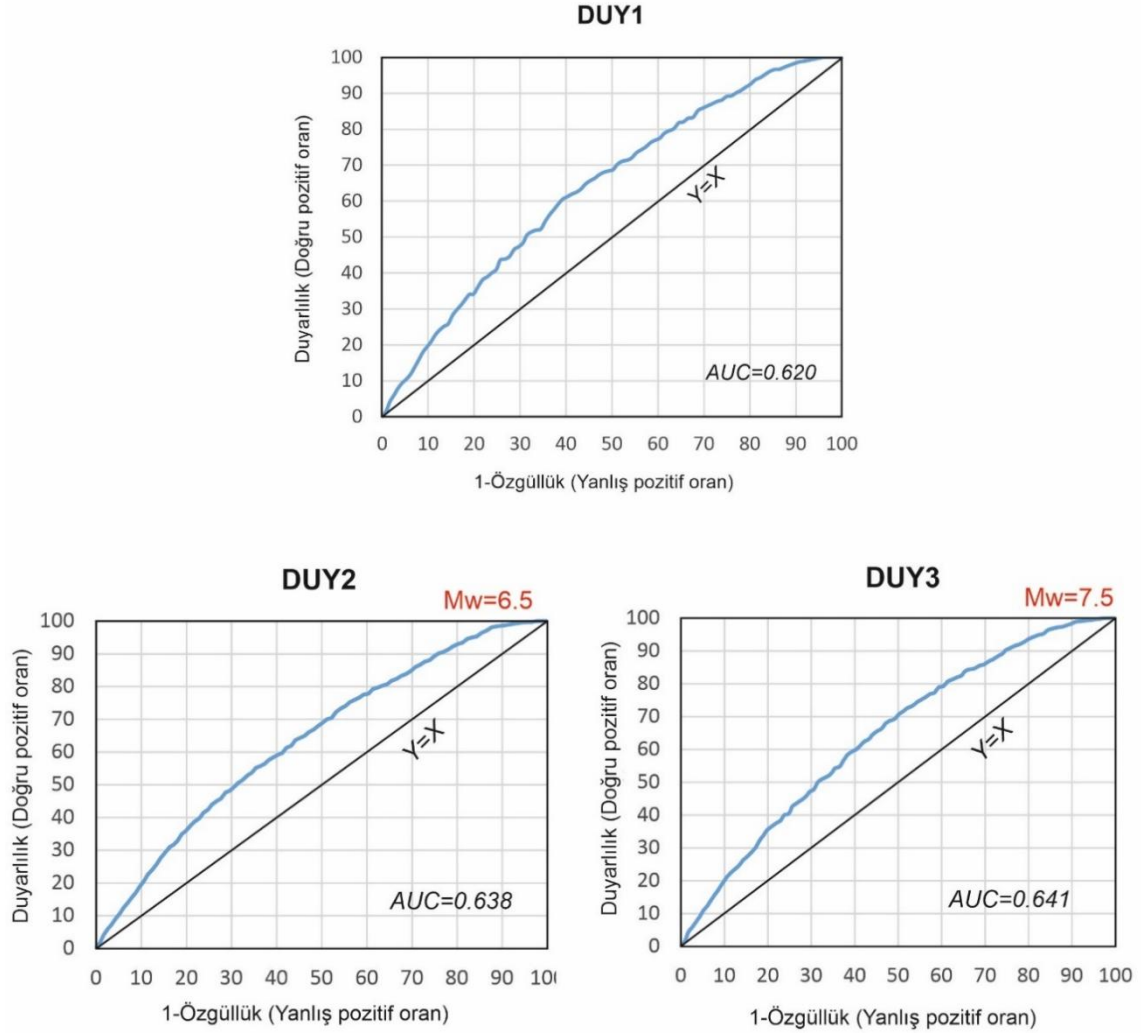
7. ÇALIŞMA ALANINA AİT HEYELAN DUYARLILIK HARİTALARININ PERFORMANS ANALİZLERİ

Bu tez çalışmasında üretilen heyelan duyarlılık haritalarının doğruluk düzeyi ve sınıflandırma başarımı, ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi ve bu eğrinin altındaki alan (AUC–Area Under the Curve) değeri kullanılarak değerlendirilmiştir. AUC, bir modelin, bir olayın gerçekleşme olasılığına ilişkin doğru sınıflandırma yeteneğini sayısal olarak ortaya koyan ve yaygın biçimde tercih edilen bir istatistiksel ölçüttür. Bu yöntem, modelin hem duyarlılığını (true positive rate) hem de özgülüğünü (false positive rate) dikkate alarak genel ayırt edicilik performansını ifade eder (Yeşilnacar ve Topal, 2005; Nandi ve Shakoor, 2010; Yılmaz, 2010; Hong ve ark., 2019; Reichenbach ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2022).

ROC eğrisi, sınıflandırma modellerinin ayırt edici performansını değerlendirmede sıkça kullanılan istatistiksel bir araçtır. Bu eğri, farklı eşik değerleri altında elde edilen doğru pozitif oranı (True Positive Rate – TPR) ile yanlış pozitif oranı (False Positive Rate– FPR) arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösterir (Fawcett, 2006; Hanley ve McNeil, 1982). ROC eğrisi üzerindeki her bir nokta, modelin belirli bir eşik değeri için pozitif ve negatif sınıfları ne ölçüde ayırt edebildiğini temsil

eder (Beguería, 2006). Yüksek TPR değerleri genellikle artan FPR ile birlikte ortaya çıkar; bu durum, modelin duyarlılığı yükselirken hata yapma olasılığının da arttığını göstermektedir (Zhou ve ark., 2011). ROC eğrisinin sol üst köşeye yakın seyretmesi, modelin yüksek bir ayırt etme kabiliyetine sahip olduğunu gösterirken; eğrinin köşegen doğrultusunda (yani [0,0] ile [1,1] arasındaki çizgi boyunca) ilerlemesi, modelin sınıflar arasında rastgele bir tahmin yaptığını ifade eder (Fawcett, 2006; Zweig ve Campbell, 1993). Bu bağlamda, ROC eğrisi altında kalan alan, yani AUC (Area Under the Curve), modelin tüm eşik değerleri dikkate alındığında genel sınıflandırma performansını özetleyen önemli bir göstergedir. AUC değeri teorik olarak 0,5 ile 1,0 arasında değişir; 0,5 değeri modelin ayırt edici bir güce sahip olmadığını, 1,0'a yakın değerler ise sınıfların yüksek doğrulukla ayrıldığını ifade eder (Bradley, 1997; Hanley ve McNeil, 1982). Son yıllarda yapılan çalışmalar da AUC'nin, özellikle afet riski modelleme çalışmaları (örneğin heyelan duyarlılığı haritalaması) başta olmak üzere birçok uygulamada model başarımının nesnel olarak değerlendirilmesi için tercih edildiğini ortaya koymaktadır (Hong ve ark., 2019; Reichenbach ve ark., 2018; Zhao ve ark., 2022). Bu nedenle, AUC değeri, farklı modellerin karşılaştırmalı analizlerinde güvenilir bir kriter olarak kullanılmaktadır.

ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) yöntemini çalışma alanında uygulamak amacıyla, heyelan olan ve heyelan olmayan alanlardan rastgele seçilen pikseller kullanılarak hazırlanmış temsil edici 2000 adet noktasal veriden oluşan sına veri seti kullanılmıştır. Bu çalışmada, ROC eğrilerini çizmek ve AUC değerlerini belirlemek amacıyla R programlama dili kullanılmıştır. Yapılan ROC eğrisi analiz sonuçlarına göre, AUC değerleri FR yöntemi kullanılarak üretilen DUY1, DUY2 ve DUY3 duyarlılık haritaları için sırasıyla 0,620, 0,638 ve 0,641 olarak belirlenmiştir (Şekil 7.1 ve Çizelge 6).



Şekil 7.1. DUY1, DUY2 ve DUY3 için çizilen ROC eğrileri.

Çizelge 6. DUY 1, DUY2 ve DUY3 için ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) değerleri.

ROC Eğrisi Altında Kalan Alan (AUC)	
DUY1	0,620
DUY2	0,638
DUY3	0,641

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Klasik olarak heyelan duyarlılık haritaları, ancak yüksek kaliteli heyelan envanteri kullanılarak hazırlanabilir. Ancak, iyi belgelenmiş kayıtlar bulunmadığında, envanterdeki her bir heyelan için yağış veya sismisite (deprensellik) gibi tetikleyici faktörlerin belirlenmesi oldukça zordur. Yağış ve sismik aktiviteler heyelanlar için tetikleyici faktörler olarak kabul edilir ve genellikle tehlike değerlendirmelerinde kullanılır. Bu çalışmada, geleneksel yöntemlerle hazırlanmış heyelan duyarlılık haritalarına sismik etkinin dahil edilmesinin olası etkilerini ortaya koymak ve bu etkinin haritalar üzerindeki değişimini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak çalışma alanına ait mevcut envanter verisi ve yaygın olarak kullanılan altı hazırlayıcı parametre kullanılarak, klasik Frekans Oranı (FR) yöntemi ile sismik etkinin dışlandığı DUY1 modeli oluşturulmuştur. Ardından, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)'ndan kaynaklanabilecek $M_w=6,5$ ve $M_w=7,5$ büyüklüğündeki iki olası deprem senaryosuna dayalı olarak, modifiye edilmiş azalım fonksiyonu (MRF) aracılığıyla sismik etki parametresi geliştirilmiş ve aynı yöntemle DUY2 ve DUY3 modelleri elde edilmiştir. Burada kullanılan MRF formülü, Daş ve ark. (2013) tarafından önerilen yaklaşımın sınırlarını genişleterek, tüm eğim sınıflarını kapsayan ve tanımsızlık sorunlarını ortadan kaldıran yeni bir versiyon olarak literatüre katkı sağlamaktadır. Bu parametre, sismik tehlikenin mekânsal dağılımını yansıtan sürekli bir veri katmanı olarak değerlendirilmiş ve duyarlılık analizinde bir model girdisi olarak kullanılmıştır.

Üç modelin karşılaştırmalı performans analizi, ROC eğrisi ve AUC (Area Under Curve) değerleri ile gerçekleştirilmiş; DUY1, DUY2 ve DUY3 modelleri için sırasıyla 0,620, 0,638 ve 0,641 değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, klasik yöntemle elde edilen modelin kabul edilebilir bir performans sunduğunu; ancak sismik etki parametresinin modele dahil edilmesiyle doğruluk oranında belirgin bir artış sağlandığını göstermektedir. Özellikle $M_w=7,5$ büyüklüğündeki senaryo altında oluşturulan DUY3 modelinin, en yüksek AUC değerine sahip olması, sismik etkinin heyelan oluşumu üzerindeki etkisinin modelleme sürecine entegre edilmesinin doğruluk açısından olumlu sonuçlar doğurduğunu kanıtlamaktadır. Bu bulgular, sismik aktivitenin sadece tehlike analizlerinde değil, duyarlılık haritalama çalışmalarında da dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir.

Ancak, her ne kadar sismik etkinin modele dahil edilmesi başarıyı artırmış olsa da, elde edilen AUC değerlerinin genel anlamda orta seviyede kalması, modelin kesin doğrulukla heyelanları öngörebilme gücünün sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında, heyelan envanterinde yer alan kayıtların güncelliği, mekânsal doğruluğu ve bütünlüğüyle ilgili eksiklikler ile kullanılan parametrelerin çözünürlük açısından yetersizliği sayılabilir. Ayrıca, çalışmada tercih edilen noktasal örnekleme yöntemi, veri elde etmede pratiklik sağlasa da, özellikle litolojik çeşitliliği yüksek, topoğrafik olarak karmaşık ve heterojen yapıdaki alanlarda temsiliyeti sınırlı kalmaktadır. Bu da modelin, heyelan oluşumunu etkileyen süreçleri tam olarak öğrenememesine ve doğruluk oranlarının teorik beklentilerin altında kalmasına neden olmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, sismik etkinin heyelan duyarlılığı modellerine başarıyla entegre edilebileceğini göstermiş ve bu bağlamda literatüre yeni bir metodolojik yaklaşım kazandırmıştır. MRF parametresinin, geleneksel yöntemlerle üretilen modellere doğrudan entegre edilebilir olması, sismik etkilerin daha bütüncül ve dinamik bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, heyelan duyarlılık modellemelerinin başarısı büyük ölçüde veri kalitesine ve örnekleme stratejilerine bağlıdır. Gelecek çalışmalarda, alan bazlı örnekleme stratejilerinin değerlendirilmesi, çok zamanlı ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılarak envanter güncellemelerinin yapılması ve parametre sayısının artırılarak mekânsal ilişkilerin daha derinlemesine analiz edilmesi önerilmektedir. Böylece, daha güçlü, güvenilir ve alan yönetiminde etkin bir şekilde kullanılabilir heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulması mümkün olabilecektir.

9. KAYNAKLAR

Abay, A., Mulugeta, A., & Mebrahtu, G. (2025). GIS-based landslide susceptibility mapping using Frequency ratio method: A case study from Adigrat-Mugulat mountain chains, northern Ethiopia. *Scientific African*, 28, e02661.

AFAD (2015). *Kütle hareketleri temel kılavuzu*. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/3469/xfiles/kutle-hareketleri-temel-kilavuz_tr.pdf

AFAD (2018). *AFAD 2018 Afet istatistikleri*. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. <https://www.afad.gov.tr/afet-istatistikleri>

AFAD (2020). *2020 yılı doğa kaynaklı olay istatistikleri* [PDF]. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/e_Kutuphane/Istatistikler/2020yilidogakaynakliolayistatistikleri.pdf

AFAD (2023) Türkiye Diri Fay Haritası ve Sismik Aktivite Verileri. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr>

Agnesi, V., Camarda, M., Conoscenti, C., Di Maggio, C., Diliberto, I. S., Madonia, P., & Rotigliano, E. (2005). A multidisciplinary approach to the evaluation of the mechanism that triggered the Cerda landslide (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 65(1-2), 101-116.

Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. *Landslides*, 9(1), 93-106.

Akgun, A., Sezer, E. A., Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Pradhan, B. (2012). An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Computers & Geosciences*, 38(1), 23-34.

Akkar, S., & Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206.

Aksoy, H. (2023). Determination of landslide susceptibility with Analytic Hierarchy Process (AHP) and the role of forest ecosystem services on landslide susceptibility. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12), 1525.

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>

- Arca, D. & Keskin Çıtıröğlü, H. (2023). GIS-Based Evaluation of Disaster and Emergency Assembly Areas with AHP in Local Scale. In: Kaygusuz, K. (ed.), *21. Yüzyılda Mühendislikte Çağdaş Araştırma Uygulamaları Üzerine Disiplinler Arası Çalışmalar III*. Özgür Yayınları. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub130.c603>
- 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>
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., & Kanno, T. (2005). Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering geology*, 81(4), 432-445.
- Azarafza, M., Azarafza, M., Akgün, H., Atkinson, P. M., & Derakhshani, R. (2021). Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific reports*, 11(1), 24112.
- Baeza, C., & Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(12), 1251-1263.
- Baeza, C., Lantada, N., & Amorim, S. (2016). Statistical and spatial analysis of landslide susceptibility maps with different classification systems. *Environmental Earth Sciences*, 75(19), 1318.
- 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.
- Barman, J., & Das, J. (2024). Assessing classification system for landslide susceptibility using frequency ratio, analytical hierarchical process and geospatial technology mapping in Aizawl district, NE India. *Advances in Space Research*, 74(3), 1197-1224.
- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37, 315-329.
- Berber, S., Ceryan, S., & Ercanoglu, M. (2025). Comprehensive Landslide Hazard Assessment Using Spatial, Temporal and Size Probabilities Combined with Landslide Density Analysis in Çanakkale (NW Türkiye). *Advances in Space Research*.
- Beven, K. (1997). TOPMODEL: a critique. *Hydrological processes*, 11(9), 1069-1085.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.

- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 30(7), 1145–1159.
- Can, A., Dagdelenler, G., Ercanoglu, M., & Sonmez, H. (2019). Landslide susceptibility mapping at Ovacık-Karabük (Turkey) using different artificial neural network models: comparison of training algorithms. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 89-102.
- Cao, J., Zhang, Z., Wang, C., Liu, J., & Zhang, L. (2019). Susceptibility assessment of landslides triggered by earthquakes in the Western Sichuan Plateau. *Catena*, 175, 63-76.
- Cengiz, L. D., & Ercanoglu, M. (2022). A novel data-driven approach to pairwise comparisons in AHP using fuzzy relations and matrices for landslide susceptibility assessments. *Environmental Earth Sciences*, 81(7), 222.
- Chen, W., Hong, H., & Wang, J. (2020). A comparative study of landslide susceptibility mapping using logistic regression, frequency ratio and gradient boosting decision tree models in the Wanzhou district of the Three Gorges Reservoir, China. *Remote Sensing*, 12(1), 102.
- Chen, W., Pourghasemi, H. R., Panahi, M., Kornejady, A., Wang, J., Xie, X., & Cao, S. (2017). Spatial prediction of landslide susceptibility using an adaptive neuro-fuzzy inference system combined with frequency ratio, generalized additive model, and support vector machine techniques. *Geomorphology*, 297, 69-85.
- Chen, W., Xie, X., Peng, J., Shahabi, H., Hong, H., Bui, D. T., ... & Zhu, A. X. (2018). GIS-based landslide susceptibility evaluation using a novel hybrid integration approach of bivariate statistical based random forest method. *Catena*, 164, 135-149.
- Cheng, J., Xu, C., Xu, X., Zhang, S., & Zhu, P. (2025). Modeling seismic hazard and landslide occurrence probabilities in northwestern Yunnan, China: exploring complex fault systems with multi-segment rupturing in a block rotational tectonic zone. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 857-877.
- Çellek, S., Eker, R., & Avcı, M. (2020). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy process: A case study from Kahramanmaraş, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 79(15), 1–18.
- Dagdelenler, G. (2020). Comparison of the landslide susceptibility maps using two different sampling techniques with the frequency ratio (Fr) method. *Jeoloji Muhendisligi Dergisi*, 44(1), 19-38.
- Dagdelenler, G., Nefeslioğlu, H., 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. 10.1007/s10064-015-0759-0.

- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A., & Hack, R. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114(4), 627-637.
- Das, S., Sarkar, S., & Kanungo, D. P. (2022). GIS-based landslide susceptibility zonation mapping using the analytic hierarchy process (AHP) method in parts of Kalimpong Region of Darjeeling Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(4), 234.
- Daş, H. O., Sonmez, H., Gokceoglu, C., & Nefeslioglu, H. A. (2013). Influence of seismic acceleration on landslide susceptibility maps: a case study from NE Turkey (the Kelkit Valley). *Landslides*, 10, 433-454.
- Daş, H. Ö. (2008). *Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında yer ivmesinin etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği ABD). <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Del Gaudio, V., & Wasowski, J. (2004). Time probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard in Irpinia (Southern Italy). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(12), 915-928.
- Del Gaudio, V., Pierri, P., & Wasowski, J. (2003). An approach to time-probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(2), 557-569.
- EM-DAT (2025). *The International Disaster Database*, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Retrieved May 6, 2025, from <https://public.emdat.be/>
- Ercanoglu, M. (2005). Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6), 979-992.
- Ercanoglu, M., Temiz, F.A. (2011). Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environ Earth Sci* 64, 949–964. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0912-4>
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874.
- Fayez, L., Pazhman, D., Pham, B. T., Dholakia, M. B., Solanki, H. A., Khalid, M., & Prakash, I. (2018). Application of frequency ratio model for the development of landslide susceptibility mapping at part of Uttarakhand State, India. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(9), 6846-6854.

- Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2014). An uncertainty and sensitivity analysis approach for GIS-based multicriteria landslide susceptibility mapping. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(3), 610-638.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. Z., & JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, 102(3-4), 85-98.
- Feng, L., Zhang, M., Mao, Y., Liu, H., Yang, C., Dong, Y., & Nanekaran, Y. A. (2025). Convolutional neural network-based deep learning for landslide susceptibility mapping in the Bakhtegan watershed. *Scientific Reports*, 15(1), 13250.
- Frattoni, P., Crosta, G., & Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering geology*, 111(1-4), 62-72.
- Gokceoglu, C., & Ercanoglu, M. (2001). Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Yerbilimleri*, 22(23), 189-206.
- Gomez, H., & Kavzoglu, T., 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela, *Engineering Geology*, 78, 11-27
- Gorsevski, P. V., & Jankowski, P. (2008). Discerning landslide susceptibility using rough sets. *Computers, environment and urban systems*, 32(1), 53-65.
- Görüm, T., Fidan, S. (2021). Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides* 18, 1691–1705. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01580-7>
- Gulbet, E., & Getahun, B. (2024). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio and analytical hierarchy process method in Awabel Woreda, Ethiopia. *Quaternary Science Advances*, 16, 100246.
- Gupta, K., & Satyam, N. (2024). Integrating real-time sensor data for improved hydrogeotechnical modelling in landslide early warning in Western Himalaya. *Engineering Geology*, 338, 107630.
- Guzzetti, F., Carrara, M., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* (in press).
- 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(1-2), 42-66.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, (2005), Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, *Geomorphology*, Volume 72, Issues 1–4, Pages 272-299, ISSN 0169-555X, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>.

Günaydın, O. (2007). *Aktif faylar üzerinde stres dağılımının Casagrande yöntemiyle belirlenmesi; Kuzey Anadolu Fay Sistemi Gerede (Bolu) segmenti* [Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı].

Günther, A., Reichenbach, P., & van Westen, C. J. (2014). A global view on the relationship between landslide occurrence and terrain slope. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(9), 2545–2561.

Hanley, J. A., & McNeil, B. J. (1982). The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 143(1), 29–36.

Hasekiogulları, G. D., & Ercanoglu, M. (2012). A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, 63, 1157-1179.

He, H., Wang, W., Wang, Z., Li, S., & Chen, J. (2024). Enhancing seismic landslide susceptibility analysis for sustainable disaster risk management through machine learning. *Sustainability*, 16(9), 3828.

He, Q., Shahabi, H., Shirzadi, A., Li, S., Chen, W., Wang, N., ... & Ahmad, B. B. (2019). Landslide spatial modelling using novel bivariate statistical based Naïve Bayes, RBF Classifier, and RBF Network machine learning algorithms. *Science of the total environment*, 663, 1-15.

Hess, D. M., Leshchinsky, B. A., Bunn, M., Benjamin Mason, H., & Olsen, M. J. (2017). A simplified three-dimensional shallow landslide susceptibility framework considering topography and seismicity. *Landslides*, 14, 1677-1697.

Hong, H., Liu, J., & Zhu, A. X. (2019). *Landslide susceptibility evaluating using artificial intelligence method in the Youfang district (China)*. *Environ Earth Sci* 78: 488.

Hong, H., Liu, J., Bui, D. T., Pradhan, B., Acharya, T. D., Pham, B. T., ... & Ahmad, B. B. (2018). Landslide susceptibility mapping using J48 Decision Tree with AdaBoost, Bagging and Rotation Forest ensembles in the Guangchang area (China). *Catena*, 163, 399-413.

Hong, H., Pradhan, B., Sameen, M. I., Chen, W., & Xu, C. (2017). Spatial prediction of rotational landslide using geographically weighted regression, logistic regression, and support vector machine models in Xing Guo area (China). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1997-2022.

INFORM (2025). *INFORM Risk Index: Global, open-source risk assessment for humanitarian crises and disasters*. European Commission. <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index>.

Kalantar, B., Ueda, N., Saeidi, V., Ahmadi, K., Halin, A. A., & Shabani, F. (2020). Landslide susceptibility mapping: Machine and ensemble learning based on remote sensing big data. *Remote Sensing*, 12(11), 1737.

Kavzoglu, T., Sahin, E. K., & Colkesen, I. (2015). Selecting optimal conditioning factors in shallow translational landslide susceptibility mapping using genetic algorithm. *Engineering Geology*, *192*, 101-112.

Ketin, İ. ve Gümüş, A., 1963, Sinop-Ayancık arasında III. Bölgeye dahil sahaların jeolojisi, TPAO Raporu, No:288, (yayımlanmamış), 37 s.

Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S. D., Saco, P. M., Bui, D. T., & Lee, S. (2020). Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. *Journal of Hydrology*, *591*, 125552.

Kumar, V., Cauchie, L., Mreyen, A. S., Micu, M., & Havenith, H. B. (2021). Evaluating landslide response in a seismic and rainfall regime: a case study from the SE Carpathians, Romania. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(12), 3767-3788.

Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, *4*(1), 33-41.

Liu, X., Yang, X., Yuan, R., Xu, R., & Liu, C. (2024). Seismic landslide susceptibility evaluation model based on historical data and its application to areas with similar environmental settings. *Frontiers in Earth Science*, *12*, 1419851.

Marjanović, M., Kovačević, M., Bajat, B., & Voženilek, V. (2011). Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering Geology*, *123*(3), 225-234.

Meunier, P., Hovius, N., & Haines, J. A. (2008). Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, *275*(3-4), 221-232.

Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, *5*(1), 3-30.

MTA (2002), Maden Tetkik Arama Müdürlüğü, “1/100.000 ölçekli jeoloji haritası F-29, pafta ve raporu”.

MTA (2005), Maden Tetkik Arama Müdürlüğü, “1/500.000 ölçekli Türkiye Heyelan Envanteri Haritası”. <https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>

Nandi, A., & Shakoor, A. (2010). A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, *110*(1-2), 11-20.

Nefeslioglu, H. A., San, B. T., Gokceoglu, C., & Duman, T. Y. (2012). An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, *14*(1), 40-60.

Nefeslioglu, H. A., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., & Ayas, Z. (2013). A modified analytical hierarchy process (M-AHP) approach for decision support systems in natural hazard assessments. *Computers & Geosciences*, *59*, 1-8.

Nicoletti, P. G. (2005). Inconsistent patterns of historical seismicity and earthquake-triggered landsliding in southeastern Sicily: an alarm bell?. *Geomorphology*, *65*(3-4), 257-278.

OGM (2025), T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, *CBS Vatandaş Portalı, Türkiye Meşcere Haritası*. <https://cbs.ogm.gov.tr/vatandas/>

Oh, H. J., & Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & geosciences*, *37*(9), 1264-1276.

Orhan, O., Yakar, M., & Ekercin, S. (2020). An application on sinkhole susceptibility mapping by integrating remote sensing and geographic information systems. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*, 1-17.

Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, *64*, 180-197.

Özalp, S., Selim, H. H., & Ertek, T. A. (2016). Türkiye ve yakın çevresindeki yıkıcı depremler kataloğu (1900–2015). MTA Rapor No: 11902, Ankara.

Pareek, N., Pal, S., Sharma, M. L., & Arora, M. K. (2013). Study of effect of seismic displacements on landslide susceptibility zonation (LSZ) in Garhwal Himalayan region of India using GIS and remote sensing techniques. *Computers & Geosciences*, *61*, 50-63.

Pareek, N., Sharma, M.L. & Arora, M.K. (2010). Impact of seismic factors on landslide susceptibility zonation: a case study in part of Indian Himalayas. *Landslides* *7*, 191–201 <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0192-1>.

Parise, M., & Jibson, R. W. (2000). A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering geology*, *58*(3-4), 251-270.

Park, H. J., Lee, J. H., & Woo, I. K. (2013). Assessment of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a GIS-based probabilistic approach. *Engineering Geology*, *161*, 1-15.

Park, S., & Kim, J. (2019). Landslide susceptibility mapping based on random forest and boosted regression tree models, and a comparison of their performance. *Applied Sciences*, *9*(5), 942.

- Peng, W. F., Wang, C. L., Chen, S. T., & Lee, S. T. (2009). Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method. *Computers & Geosciences*, 35(5), 946-966.
- Pham, B. T., Pradhan, B., Bui, D. T., Prakash, I., & Dholakia, M. B. (2016). A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: A case study of Uttarakhand area (India). *Environmental modelling & software*, 84, 240-250.
- Pourghasemi, H. R., & Rahmati, O. (2018). Prediction of the landslide susceptibility: which algorithm, which precision?. *Catena*, 162, 177-192.
- Pourghasemi, H. R., & Rossi, M. (2017). Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1), 609-633.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63, 965-996.
- Pradhan, A. M. S., & Kim, Y. T. (2016). Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. *Catena*, 140, 125-139.
- Pradhan, B. (2010). Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 38, 301-320.
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51, 350-365.
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia. *Landslides*, 7(1), 13-30.
- Pradhan, B., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., & Buchroithner, M. F. (2010). Landslide susceptibility mapping by neuro-fuzzy approach in a landslide-prone area (Cameron Highlands, Malaysia). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12), 4164-4177.
- Rapolla, A., Paoletti, V., & Secomandi, M. (2010). Seismically-induced landslide susceptibility evaluation: application of a new procedure to the island of Ischia, Campania Region, Southern Italy. *Engineering Geology*, 114(1-2), 10-25.
- 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.

- Sarfraz, Y., Basharat, M., Riaz, M. T., Akram, M. S., Xu, C., Ahmed, K. S., ... & Thuy Linh, N. T. (2022). Application of statistical and machine learning techniques for landslide susceptibility mapping in the Himalayan road corridors. *Open Geosciences*, 14(1), 1606-1635.
- Sevin, M. & Aksay, A., (2002), Bolu-G 28 Paftası 1:100 000 Ölçekli Jeoloji Haritası. MTA Raporları, Rap. No: 35, s. 25.
- Sezer, E. A., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2011). Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8208-8219.
- Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific reports*, 5(1), 9899.
- Shahabi, H., Hashim, M., & Ahmad, B. B. (2015). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73, 8647-8668.
- Shrestha, S., & Kang, T. S. (2019). Assessment of seismically-induced landslide susceptibility after the 2015 Gorkha earthquake, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 1829-1842.
- Sinanoğlu, D. (2012). *Safranbolu Havzası (Karabük) Eosen yaşlı çökellerin foraminifer biyostratigrafisi* [Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Song, Y., Gong, J., Gao, S., Wang, D., Cui, T., Li, Y., & Wei, B. (2012). Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: A case study in Beichuan, China. *Computers & Geosciences*, 42, 189-199.
- Sonker, I., & Tripathi, J. N. (2022). Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. *Quaternary Science Advances*, 8, 100067.
- Tezel, K., & Akgun, A. (2024). Comparing shallow landslide susceptibility maps in Northeastern Türkiye (Beşikdüzü, Trabzon): a multivariate statistical, machine learning, and physical data-based analysis. *Environmental Earth Sciences*, 83(10), 335.
- Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W., ... & Tian, Y. (2018). Landslide detection and susceptibility mapping by airsar data using support vector machine and index of entropy models in cameron highlands, malaysia. *Remote Sensing*, 10(10), 1527.
- Tien Bui, D., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, 13, 361-378.

Timur E., Aksay A. (2002). Türkiye Jeoloji Haritaları Zonguldak F29 Paftası. *MTA Yayınları*, No.3, Ankara.

USGS. (2020). *How many deaths result from landslides each year?* U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/faqs/how-many-deaths-result-landslides-each-year>

Vahidnia, M. H., Alesheikh, A. A., Alimohammadi, A., & Hosseinali, F. (2010). A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 36(9), 1101-1114.

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30, 399-419.

Wang, J., Niu, R., & Wang, L. (2016). Landslide susceptibility mapping using information value and logistic regression models in the mountainous area of Yingxiu, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1–17.

Wang, Y., Sun, D., Wen, H., Zhang, H., Zhang, F. (2020). Comparison of Random Forest Model and Frequency Ratio Model for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Yunyang County (Chongqing, China). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 4206.

Wu, Y., Li, W., Wang, Q., Liu, Q., Yang, D., Xing, M., ... & Yan, S. (2016). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-16.

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.

Yang, Z., Pang, B., Dong, W., & Li, D. (2023). Spatial pattern and intensity mapping of coseismic landslides triggered by the 2022 Luding earthquake in China. *Remote Sensing*, 15(5), 1323.

Yergök, A. F., Akman, Ü., İplikçi, E., Karabalık, N. N., Armağan, F., Erdoğan, K., Kaymakçı, H., Çetinkaya, A., Keskin, İ., Mengi, H., & Umut, M. (1987). *Batı Karadeniz Bölgesi jeolojisi* (Yayın No. 207). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etütler Dairesi.

Yeşilnacar, E. ve Topal, T., 2005, Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural Networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79, 251-266.

Yilmaz, I. (2010). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125–1138.

Yilmaz, I., & Keskin, I. (2009). GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 459-471.

- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Al-Katheeri, M. M. (2016). Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13, 839-856.
- Youssef, A. M., Pradhan, B., & Maerz, N. H. (2015). Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 73, 3745–3761. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3662-1>
- Yurgiden, H. (2024). Dünya’da ve Türkiye’de afet ekonomisi ve afet sigortacılığı üzerine bir değerlendirme. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 15(1)-Deprem Özel Sayısı-, 150-175.
- Zhang, L., Zeng, T., Wang, L., & Li, L. (2024). Advancing seismic landslide susceptibility modeling: a comparative evaluation of deep learning models through particle swarm optimization. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3547-3566.
- Zhao, B., Zhang, L., & Chen, Y. (2021). Assessment of shallow landslide susceptibility in low-slope terrain using random forest and GIS. *Catena*, 198, 105023.
- Zhao, B., Zhu, J., Hu, Y., Liu, Q., & Liu, Y. (2022). Mapping landslide sensitivity based on machine learning: A case study in Ankang City, Shaanxi Province, China. *Geofluids*, 2022(1), 2058442.
- Zhao, G. F., Li, Y., & Jiang, B. (2020). Coupling DDA and 4D-LSM through contact theory for rock cutting. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 570, No. 2, p. 022054). IOP Publishing.
- Zhou, X. H., Obuchowski, N. A., & McClish, D. K. (2011). *Statistical methods in diagnostic medicine* (2nd ed.). Wiley.
- Zhou, Y., Hussain, M. A., & Chen, Z. (2023). Landslide susceptibility mapping with feature fusion transformer and machine learning classifiers incorporating displacement velocity along Karakoram highway. *Geocarto International*, 38(1), 2292752.
- Zweig, M. H., & Campbell, G. (1993). Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical chemistry*, 39(4), 561-577.