



AFAD

T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI
AFET VE ACİL DURUM
YÖNETİMİ BAŞKANLIĞI

Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü
Marmara Afet Risklerini Azaltma Daire Başkanlığı



MARAP

MARMARA BÖLGESİ AFET RİSK AZALTMA PLANI Projesi

İş Paketi No: İP-4-B

**Haritalama: HEYELAN TEHLİKE-RİSK
Analizleri Sonuç Raporu**



ULUSAL COĞRAFI
BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
İNNOVASYON UYGULAMA
ve ARAŞTIRMA MERKEZİ

<http://marap.afad.gov.tr>
2026-07-01 © AFAD

AFAD | MARAP

MARMARA BÖLGESİ HEYELAN TEHLİKE-RISK ANALİZLERİ

İP-4 Sonuç Raporu • Özet İnfografik

CBS tabanlı duyarlılık, hidro-meteorolojik tehlike ve göreceli risk değerlendirilmesi

1 AMAÇ VE KAPSAM

- Marmara Bölgesi'nde heyelan duyarlılığı, tehlikesi ve göreceli riskinin bölgesel ölçekte ortaya konulması
- Nüfus, yapı stoku, ulaşım altyapısı ve tarım arazileri üzerindeki potansiyel etkilerin değerlendirilmesi
- Karar destek, önceliklendirme ve risk azaltma planlamasına altlık üretilmesi

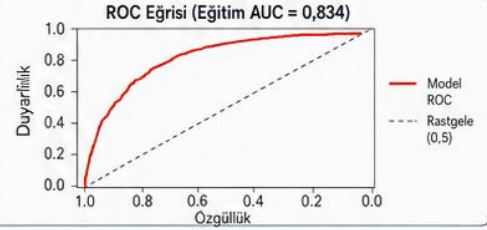
2 ANALİTİK ÇERÇEVE



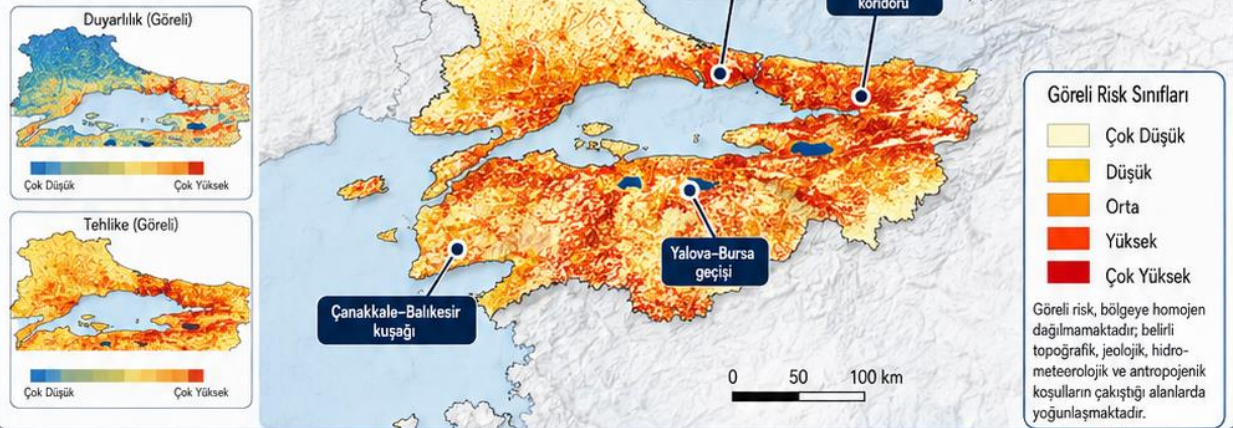
TEMEL VERİ VE MODEL

Örneklem:	5.041 nokta
2.467 heyelan / 2.574 kontrol	
Piksel çözünürlüğü:	50 m
Çalışma alanı:	Marmara Bölgesi

4 MODEL PERFORMANSI



GÖRELİ RISK HARİTASI (50 YIL SENARYOSU)



ÖNE ÇIKAN BULGULAR

- Yüksek ve çok yüksek tehlike/risk alanları kümelenmiş yapıdadır.
- Risk yalnızca eğimle açıklanamaz; tetikleyici yağış ve insan müdahalesi belirleyicidir.
- İstanbul ve yoğun kentsel koridorlarda antropojenik etkiler güçlüdür.
- Haritalar göreceli önceliklendirme ürünleridir; doğrudan kayıp/hasar tahmini değildir.

KRİTİK SAYISAL SONUÇLAR

- Çok yüksek tehlike sınıfında **1.646** heyelan
- Bölgesel ortalamanın yaklaşık **3,4 katı** yoğunluk
- En yüksek riskli %10 hücre, alanın yalnızca **%5,86'sı** içinde; nüfusun **%81,1'i** ve bina kat alanının **%72,1'i** bu dilimde

YÖNETİM ÖNCELİKLERİ

- Yüksek ve çok yüksek riskli alanların öncelikli saha etüdü ve risk azaltma uygulamaları
- İstanbul ve yoğun kentsel koridorlar için özel şev / kazı-dolgu / drenaj denetimi
- Heyelan envanterinin olay-tabanlı hasar ve kayıp verileriyle zenginleştirilmesi
- Deprem tetikleyicisi ve iklim değişikliği senaryolarının modele eklenmesi
- Katmanların AYDES / ŞESİM / MARAP karar destek altyapısına aktarılması

SINIRLAR VE YORUM ÇERÇEVESİ

- Kınlanlık bu aşamada V=1 varsayımıyla ele alınmıştır.
- Risk haritası mutlak kayıp, can kaybı veya yıllık olasılık haritası değildir.
- Deprem tetikleyicisi ve daha ayrıntılı olay verileri gelecekte modeli güçlendirecektir.

Kaynak: MARAP İP-4 Heyelan Raporu, Temmuz 2026

Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı Projesi

YÖNETİCİ ÖZETİ

Bu rapor, Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı (MARAP) kapsamında, bölgedeki heyelan tehlikesinin ve bu tehlikenin nüfus, yapı stoku, ulaşım altyapısı ve tarım arazileri üzerindeki muhtemel sonuçlarının bütünsel biçimde değerlendirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma, heyelan olgusunu birbirini tamamlayan üç aşamada ele almaktadır: birinci aşamada zemin ve çevresel koşullara bağlı göreceli heyelan duyarlılığı, ikinci aşamada hidro-meteorolojik tetikleyici koşullar altında göreceli heyelan tehlikesi ve üçüncü aşamada tehlike ile risk altındaki unsurların mekânsal birlikteliğini temsil eden göreceli heyelan riski modellenmiştir. Temel yaklaşım; güncel istatistiksel ve mekânsal yöntemleri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı veri katmanlarıyla birleştirerek, MARAP karar destek mekanizmalarına doğrudan aktarılabilecek, tekrarlanabilir ve denetlenebilir bölgesel göstergeler üretmektir.

Çalışmanın en önemli sonucu, Marmara Bölgesi'nde heyelan riskinin yalnızca yamaç eğimi veya faya yakınlıkla açıklanamayacağı; duyarlılığın, hidro-meteorolojik tetikleyici koşulların ve risk altındaki unsurların mekânsal dağılımının birlikte değerlendirilmesi gerektiğidir. Model sonuçları, göreceli riskin çalışma alanının tamamına yayılmadığını, aksine sınırlı fakat yoğun alanlarda toplandığını göstermektedir: en yüksek göreceli riskli %10'luk hücre dilimi çalışma alanının yalnızca %5,86'sına karşılık gelmesine rağmen bölge nüfusunun %81,1'ini ve toplam bina kat alanının %72,1'ini barındırmaktadır. Bu yoğunlaşma, İstanbul başta olmak üzere yoğun nüfuslu ve hızla dönüşen kentsel koridorlarda belirginleşmekte; heyelan riskinin Marmara'da yalnızca doğal değil, güçlü biçimde antropojenik olarak da beslendiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bölgesel risk azaltma politikaları, kaynakları bu sınırlı fakat yüksek yoğunluklu alanlara öncelikli biçimde yönlendirebilecek bir mekânsal önceliklendirme mantığıyla kurgulanmalıdır.

Marmara Bölgesi, dik yamaçlar, litolojik zayıflık zonları, yoğun yağışlı kıyı kuşakları ve aktif tektonik yapı gibi doğal etmenleri; yüksek nüfus yoğunluğu, hızlı arazi dönüşümü, yoğun inşaat ve altyapı yatırımları ile kontrolsüz şev müdahaleleri gibi antropojenik süreçlerle birlikte barındırmaktadır. Tarihî kayıtlar bu kritikliği doğrulamaktadır: bölge, 1929–2019 döneminde 84 ölümcül heyelan olayı ile Türkiye'deki ölümcül olayların yaklaşık %21,6'sını üretmiş; 1997–2024 döneminde 321 olay ile Karadeniz'den sonra en yüksek olay sayısına sahip ikinci bölge olmuştur. İstanbul, tek başına 180 kayıtlı olayla il bazında en yüksek heyelan frekansına sahiptir. Türkiye genelinde insan kaynaklı tetiklenen ölümcül heyelanların yaklaşık %35'inin yalnızca Marmara'da kaydedilmiş olması, bölgede afet üretiminin kentleşme, inşaat, altyapı ve şev müdahaleleriyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle heyelan, Marmara için yalnızca kırsal yamaçların değil; metropol çevresi, ulaşım koridorları ve hızla dönüşen yerleşim alanlarının da doğrudan bir planlama kısıtıdır.

Görelî heyelan duyarlılığı, doğrusal olmayan çevresel ilişkileri modelleme kapasitesi nedeniyle Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) ile üretilmiştir. Model, R yazılımındaki mgcv paketi kullanılarak kurulmuş; eğim, topografik nemlilik, yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık, litoloji ve arazi örtüsü/kullanımı değişkenlerinin heyelan oluşumundaki birlikte etkisi değerlendirilmiştir. Modelin ayırt etme başarımı, eğitim verisinde ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) 0,834; rastgele 5 katlı çapraz doğrulamada $0,826 \pm 0,021$; mekânsal blok çapraz doğrulamada ise 0,783 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, duyarlılık modelinin bölgesel ölçekte güçlü bir ayırt etme kapasitesine sahip olduğunu; bununla birlikte mekânsal genellenebilirlik ve artık mekânsal otokorelasyon açısından dikkatli yorumlanması gerektiğini göstermektedir.

Görelî tehlike indeksi, duyarlılık katmanının hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenle birleştirilmesiyle üretilmiştir. Bu kapsamda 1990–2025 dönemine ait ERA5-Land günlük verilerinden yıllık maksimum tetikleyici serileri üretilmiş; RAIN_1d, RAIN_3d, RAIN_7d ve EWI_7d tetikleyicileri için bölgesel Q95 eşikleri ile Gumbel–Moment Yöntemi (MOM) tabanlı aşılma olasılıkları hesaplanmıştır. Aday tehlike ürünleri arasında, en yüksek başarı oranı AUC değerini (SR-AUC = 0,8374) üreten ve zamansal doğrulamada en tutarlı sinyali veren 3 günlük kümülatif yağmur senaryosu (H_RAIN_3d, 50 yıl) nihai ana ürün olarak seçilmiştir. Bu üründe en yüksek tehlike sınıfı 1.646 heyelanı yakalamış ve bu sınıftaki görelî heyelan yoğunlaşması bölgesel ortalamanın yaklaşık 3,4 katı olarak hesaplanmıştır. Elde edilen “çok yüksek tehlike” sınıfı, mutlak olarak heyelan gerçekleşeceği anlamına gelmez; çalışma alanı içindeki en yüksek görelî tehlike dilimini ifade eder.

Görelî risk yüzeyleri, tehlike katmanının; nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanlarından eşit ağırlıkla oluşturulan bileşik unsur indeksiyle hücre bazında birleştirilmesiyle üretilmiştir. Tehlike katmanı heyelan şiddeti içermediğinden kırılma maksimum değeri ($V = 1$) ve risk altındaki unsurların mekânsal-zamansal bulunma olasılığı $P(T | X_j) = 1$ kabul edilmiş; böylece risk denklemi $R = H \times C$ biçiminde düzenlenmiştir. Birincil risk ürünü, nihai tehlike ürünüyle uyumlu olarak Risk_RAIN_3d_50yr şeklinde belirlenmiştir. Riskin mekânsal yoğunlaşması belirgindir: en yüksek görelî riskli %1’lik dilim çalışma alanının yalnızca %0,59’ünü oluşturmasına rağmen bölge nüfusunun %29,5’ini kapsamaktadır. Tanısal değerlendirmeler, birincil senaryoda risk indeksindeki değişkenliğin yaklaşık %83’ünün tehlike bileşeninden kaynaklandığını; alternatif ağırlıklandırma şemaları bileşik unsur indeksini değiştirse de nihai risk sıralamasının büyük ölçüde korunduğunu göstermiştir. Bu nedenle görelî risk sıralaması, tehlike bileşeninin baskınlığı sayesinde ağırlık tercihlerine karşı görece dayanıklıdır.

Üretilen duyarlılık, tehlike ve risk haritaları, Marmara Bölgesi için bölgesel ölçekli karar destek amacıyla geliştirilmiş görelî önceliklendirme ürünleridir. Risk haritası; yıllık heyelan olasılığı, beklenen can kaybı, hasarlı bina sayısı veya parasal zarar tahmini değildir. Sonuçlar, tehlike ile risk altındaki unsurların mekânsal olarak birlikte yoğunlaştığı alanları karşılaştırmalı biçimde gösteren görelî bir indeks olarak

yorumlanmalıdır. Analiz, hidro-meteorolojik tetikleyici bileşene odaklanmakta; deprem, ani insan müdahaleleri ve büyük altyapı projeleri gibi tetikleyiciler modelin doğrudan dinamik bileşeni olarak ele alınmamaktadır. Kırılganlığın maksimum değerle temsil edilmesi, tehlike katmanının şiddet içermemesi, ERA5-Land verisinin mekânsal çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlikler ve risk düzeyinde doğrudan doğrulama için mekânsal kayıp verilerinin bulunmaması, sonuçların bu sınırlar içinde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Düşük ve çok düşük sınıflar da mutlak güvenli alanlar olarak değil, göreceli olarak daha düşük öncelikli alanlar olarak yorumlanmalıdır.

Rapor sonuçları, Marmara Bölgesi için beş temel yönetim önceliğine işaret etmektedir.

- **Birinci öncelik**, yüksek ve çok yüksek göreceli tehlike ile risk sınıflarının yoğunlaştığı alanların önceliklendirilmesidir. Bu alanlar, ayrıntılı saha etüdü, jeoteknik inceleme, planlama denetimi ve risk azaltma uygulamaları bakımından ilk sırada ele alınmalıdır.
- **İkinci öncelik**, İstanbul ve yoğun kentsel koridorlar için özel bir yaklaşım geliştirilmesidir. Bölgede heyelan üretiminin güçlü biçimde antropojenik olması nedeniyle, şev ve kazı-dolgu müdahalelerinin denetimi, imar-yapılaşma kararlarının duyarlılık ve tehlike haritalarıyla ilişkilendirilmesi ve drenaj tasarımı bu alanlarda kritik önem taşımaktadır.
- **Üçüncü öncelik**, heyelan envanterinin zenginleştirilmesidir. Olay tarihi, başlangıç zonu, alan, hacim, hareket tipi ve tetikleyici bilgisini içeren; ayrıca etkilenen unsurları konumlandıran olay-tabanlı hasar ve kayıp verileri, hem tehlike eşiklerinin daha güçlü test edilmesini hem de risk indeksinin doğrudan doğrulanmasını mümkün kılacaktır.
- **Dördüncü öncelik**, modelin çoklu tetikleyici çerçevesine genişletilmesidir. Marmara'nın sismik koşulları dikkate alındığında deprem tetikleyicisinin ayrı bir bileşen olarak değerlendirilmesi; uzun vadede ise iklim değişikliği projeksiyonlarının hidro-meteorolojik tehlike analizine entegre edilmesi, geleceğe dönük planlama açısından önemlidir.
- **Beşinci öncelik**, üretilen katmanların kurumsal karar destek altyapısına aktarılmasıdır. Nihai duyarlılık, tehlike ve risk haritaları standart lejant, metadada ve veri formatlarıyla MARAP karar destek sistemine, AYDES ve ŞESİM bileşenlerine entegre edilmeli; haritalar yatırım, denetim ve inceleme önceliklerinin belirlenmesinde kullanılmalı, ancak parsel veya yapı ölçeğindeki kararlar için tek başına yeterli kabul edilmemelidir.

Raporun bütünlük mesajı açıktır: Marmara Bölgesi'nde heyelan tehlikesi ve göreceli risk homojen dağılmamakta; yüksek değerler belirli topoğrafik, jeolojik, antropojenik ve hidro-meteorolojik koşulların risk altındaki unsurlarla çakıştığı sınırlı

alanlarda yoğunlaşmaktadır. Bu yoğunlaşma, risk azaltma çabalarının dar fakat yüksek etkili alanlara odaklanmasına olanak tanımaktadır.

Çalışma, heyelan duyarlılığının, tehlikesinin ve görelî riskinin CBS tabanlı, tekrarlanabilir ve denetlenebilir biçimde modellenmesine yönelik güçlü bir çerçeve sunmakta; üretilen haritalar bölgesel önceliklerin belirlenmesine, ayrıntılı inceleme alanlarının seçilmesine ve kurumsal karar destek süreçlerinin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlayacak niteliktedir.

Rapor, sonuçların kesin bir olay veya kayıp tahmini olarak değil; uzun vadeli planlama, yatırım önceliklendirmesi, arazi kullanım denetimi ve kritik altyapı güvenliği bakımından bilimsel bir karar destek altyapısı olarak kullanılmasını gerektirmektedir. En etkili yaklaşım, olay sonrası müdahaleyle sınırlı kalmayan; heyelan öncesinde duyarlı alanlardaki yapılaşmayı, şev müdahalelerini ve maruziyeti sistematik biçimde azaltan uzun vadeli ve ölçülebilir bir risk azaltma programı olacaktır.

Arz olunur.

Temmuz 2026, İstanbul

ÖZET

Bu çalışma, Marmara Bölgesi'nde heyelan duyarlılığı, hidro-meteorolojik tehlike ve görel riskin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı, tekrarlanabilir ve denetlenebilir biçimde modellenmesini amaçlamaktadır. Analiz, birbirini tamamlayan üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada görel heyelan duyarlılığı, doğrusal olmayan çevresel ilişkileri temsil edebilen Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) ile üretilmiş; eğim, topografik nemlilik, yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık, litoloji ve arazi örtüsü/kullanımı değişkenleri birlikte değerlendirilmiştir. Model, eğitim verisinde 0,834; rastgele beş katlı çapraz doğrulamada $0,826 \pm 0,021$ ve mekânsal blok çapraz doğrulamada 0,783 AUC değeriyle güçlü bir ayırt etme kapasitesi göstermiştir. İkinci aşamada, 1990–2025 dönemine ait ERA5-Land verilerinden türetilen yıllık maksimum tetikleyici serileri bölgesel Q95 eşikleri ve Gumbel–Moment Yöntemi (MOM) uç değer modellemesiyle değerlendirilmiş; en yüksek başarı oranını (SR-AUC = 0,8374) veren üç günlük kümülatif yağmur senaryosu (H_RAIN_3d, 50 yıl) nihai tehlike ürünü olarak seçilmiştir. Üçüncü aşamada görel tehlike yüzeyi; nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanlarından eşit ağırlıkla oluşturulan bileşik unsur indeksiyle birleştirilerek Risk_RAIN_3d_50yr görel risk ürünü elde edilmiştir.

Sonuçlar, görel riskin çalışma alanının tamamına yayılmadığını, sınırlı fakat yoğun alanlarda toplandığını göstermektedir: en yüksek görel riskli %10'luk hücre dilimi, alanın yalnızca %5,86'sına karşılık gelmesine rağmen bölge nüfusunun %81,1'ini ve toplam bina kat alanının %72,1'ini barındırmaktadır. Tanısal değerlendirmeler, risk sıralamasının büyük ölçüde tehlike bileşeni tarafından yönlendirildiğini (değişkenliğin $\approx$ %83'ü) ve ağırlıklandırma tercihlerine karşı görece dayanıklı olduğunu ortaya koymuştur. Üretilen duyarlılık, tehlike ve risk haritaları; mutlak olay ya da kayıp tahmini değil, Marmara Bölgesi içindeki mekânsal öncelikleri gösteren görel karar destek katmanları olarak yorumlanmalı ve MARAP kapsamında ayrıntılı inceleme, planlama denetimi ve risk azaltma önceliklerinin belirlenmesinde kullanılmalıdır.

Bu çalışmanın hazırlanmasında katkı sunan başta **AFAD**-Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü- Marmara Afet Risklerini Azaltma Daire Başkanlığı olmak üzere, MARAP proje çalışanlarına, bu rapor özelinde **Prof. Dr. Tolga Görüm, Dr. Öğr. Üyesi Seçkin Fidan'a**, İstanbul Teknik Üniversitesi proje ekibine, Ulusal Coğrafi Bilgi Teknolojileri İnovasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne, veri sağlayan kurumlara ve teknik analiz-haritalama süreçlerinde görev alan tüm akademik ve teknik personele teşekkür ederiz. Çalışmanın Marmara Bölgesi'nin deprem afetlerine karşı daha dirençli, güvenli ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmasına katkı sağlamasını temenni ederiz.

Prof. Dr. Tahsin YOMRALIOĞLU

MARAP Proje Yöneticisi,
İstanbul Teknik Üniversitesi, Proje Ekibi a.
Temmuz 2026, İstanbul

İÇİNDEKİLER

YÖNETİCİ ÖZETİ	3
ÖZET.....	7
Şekil Listesi	10
Tablo Listesi	10
Kısaltmalar	11
1 GİRİŞ	12
1.1 Raporun Kapsam ve İçeriği	13
2 BÖLÜM 1 — AFET TÜRÜ TANIMLAMASI	15
2.1 Oluşum Mekanizmaları ve Tetikleyici Faktörler	16
2.2 Türkiye'de Heyelan Tehlikesi.....	17
2.3 Marmara Bölgesi ve İstanbul'da Heyelan Tehlikesi.....	19
3 BÖLÜM 2 — DUYARLILIK VE TEHLİKE HESAPLAMA TEORİK ÇERÇEVESİ	20
3.1 Duyarlılık, Tehlike ve Risk Kavramsal Çerçevesi	20
3.2 Duyarlılık Analizi: Genelleştirilmiş Ekleme Model (GAM)	22
3.3 Tehlike Analizi: Gumbel Tabanlı Yağış Tetikleyici Çerçevesi	23
3.4 Belirsizlik Yönetimi ve İstatistiksel Hata Payları	25
4 BÖLÜM 3 — GEREKLİ CBS/GIS VERİ SETLERİ	27
4.1 Temel Veri Katmanları	27
4.2 Her Veri Seti İçin Teknik Bilgiler.....	29
4.2.1 Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Veri Seti	29
4.2.2 Hidro-Meteorolojik Veri Seti.....	29
4.2.3 Diğer Raster Girdileri	30
4.2.4 Risk altındaki unsur veri setleri	31
4.2.5 Model çıktısı ile veri setleri arasındaki ilişki	32
5 BÖLÜM 4 — CBS TABANLI TEKNİK İŞ AKIŞI.....	33
5.1 Veri hazırlık aşaması.....	33
5.2 Duyarlılık Analiz Adımları ve Sonuçları.....	35
5.3 Eşik Analizi ve Sınıflandırma Performansı	37

5.4	Sürekli Değişkenlerin Doğrusal Olmayan Etkileri	38
5.5	Kategorik Değişkenlerin Etkisi.....	41
5.6	Tehlike Analiz Adımları ve Sonuçları	43
5.7	Gumbel Parametrelerinin Mekânsal Dağılımı	46
5.8	Tetikleyici Olasılık Senaryoları	47
5.9	Bütünleşik Model Seçim Gerekçesi.....	49
5.10	Risk Altındaki Unsurların Hazırlanması	49
5.11	Normalizasyon ve Bileşik Unsur İndeksinin Oluşturulması.....	50
5.12	Risk Hesabı ve Tetikleyici Senaryoları	51
5.13	Tanısal Değerlendirmeler	52
5.14	Riskin Mekânsal Yoğunlaşması	53
5.15	Doğrulama Yaklaşımı ve Sınırları	54
5.16	Nihai Duyarlılık, Tehlike ve Risk Haritalarının Üretimi ve Yorumu.....	55
6	BÖLÜM 5 — SONUÇLAR VE TEKNİK ÖNERİLER.....	59
6.1	Bölgesel Öncelik Seviyesi ve Bulguların Değerlendirmesi.....	59
6.2	Çalışmanın Kapsamı ve Yorum Çerçevesi.....	60
6.3	Veri ve Analiz Geliştirme İhtiyaçları.....	61
6.4	Teknik ve Kurumsal Öneriler	62
7	BÖLÜM 6 — RİSK AZALTMA POLİTİKA VE STRATEJİLERİ	63
7.1	Risk Haritasının Mekânsal Deseni ve Politikaya Esası	63
7.2	Bölgesel Politika ve Stratejiler	64
7.3	İl Bazlı Politika ve Öncelikler	65
7.4	Yağış Tetikleyicili Erken Uyarı ve İzleme Yaklaşımı.....	66
7.5	Uygulama Yol Haritası	66
7.6	Bütünleşik Marmara Risk Azaltma Planına Katkı	67
8	GENEL SONUÇLAR	68
9	KAYNAKLAR.....	71
10	EKLER	74

Şekil Listesi

Şekil 3-1 Çalışma iş akışı: Duyarlılık, tehlike ve risk analizi süreci.....	22
Şekil 5-1 Sürekli değişkenler için Spearman korelasyon katsayıları.	34
Şekil 5-2 GAM modeli için ROC eğrisi (AUC = 0,834).	36
Şekil 5-3 Gözlenen heyelan var/yok sınıflarına göre GAM modelinin tahmin ettiği heyelan olasılıklarının dağılımı. Kesikli çizgi, Youden indeksine göre belirlenen optimum sınıflandırma eşiğini göstermektedir.	38
Şekil 5-4 Sürekli değişkenlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki kısmi etkileri.....	41
Şekil 5-5 Arazi örtüsü/kullanımı ve litoloji sınıflarının GAM modelindeki kategorik etkileri. Noktalar sınıf bazlı tahmini etkileri, yatay hata çubukları belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Dikey kesikli çizgi referans düzeyi ifade etmektedir....	42
Şekil 5-6 RAIN_3d için Gumbel konum (μ) ve ölçek (σ) parametrelerinin mekânsal dağılımı.	47
Şekil 5-7 GAM tabanlı görelî heyelan duyarlılık haritası.	56
Şekil 5-8 Görelî heyelan tehlike haritası (3-gün / 50 yıl senaryosu).	57
Şekil 5-9 Görelî heyelan risk haritası (3-gün / 50 yıl senaryosu).	57

Tablo Listesi

Tablo 4-1 MARAP heyelan duyarlılık-tehlike analizinde kullanılan değişkenler ve anlamları	28
Tablo 4-2 Duyarlılık modelinde kullanılan veri seti tanımı.	29
Tablo 4-3 Hidro-meteorolojik veri seti ve tehlike analizindeki.....	30
Tablo 5-1 GAM heyelan duyarlılık modelinin uyum, doğrulama ve mekânsal hata yapısı göstergeleri.	35
Tablo 5-2 GAM modelindeki sürekli değişken etkilerinin istatistiksel anlamlılığı ve yorumu.	40
Tablo 5-3 Tehlike analizinde kullanılan hidro-meteorolojik tetikleyiciler ve bölgesel Q95 eşikleri.....	45
Tablo 5-4 Gumbel-MOM ekstrem değer modeli özet sonuçları.	45
Tablo 5-5 Aday tehlike ürünlerinin mekânsal doğrulama sonuçları.....	46
Tablo 5-6 Nihai H_RAIN_3d 50-yıl tehlike ürünü için sınıf bazlı lift analizi.	46
Tablo 5-7 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.....	48
Tablo 5-8 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.....	49

Tablo 5-9 Dört tetikleyici senaryosu için risk istatistikleri. Sarı satır birincil ürünü göstermektedir.	52
Tablo 5-10 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.	58

Kısaltmalar

Kısaltma	Açılım
AMAX	Yıllık Maksimum Seriler (Annual Maximum)
AUC	Eğri Altında Kalan Alan (Area Under the Curve)
AYDES	Afet Yönetim ve Karar Destek Sistemi
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CORINE	Çevresel Bilginin Koordinasyonu (Coordination of Information on the Environment) arazi örtüsü/kullanımı veri tabanı
CV	Çapraz Doğrulama (Cross-Validation)
EM-DAT	Acil Durum Olayları Veri Tabanı (Emergency Events Database)
ERA5-Land	ECMWF Yeniden Analiz v5 – Kara Bileşeni (ECMWF Reanalysis v5 – Land)
EWI_7d	Etkin Su Girdisi – 7 Günlük (Effective Water Input; yağmur ve kar erimesi birleşik tetikleyicisi)
GAM	Genelleştirilmiş Ekleme(li) Model (Generalized Additive Model)
GIS	Coğrafi Bilgi Sistemi (Geographic Information System)
GLM	Genelleştirilmiş Doğrusal Model (Generalized Linear Model)
H_RAIN_1d/3d/7d	İlgili Kümülatif Yağış Tetikleyicisine Dayalı Görelî Heyelan Tehlike İndeksi
KAF	Kuzey Anadolu Fay (Zonu)
MARAP	Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MOM	Moment Yöntemi (Method of Moments)
P_T	Tetikleyici Eşiğinin (senaryo içinde) Aşılma Olasılığı
Q95	%95'inci Yüzdelik Değer (bölgesel yağış eşiği)
RAIN_1d/3d/7d	1, 3 ve 7 Günlük Kümülatif Yağış Tetikleyicisi
Risk_RAIN_3d_50yr	Birincil Görelî Risk Ürünü (3 günlük yağış, 50 yıllık senaryo)
ROC	Alıcı İşletim Karakteristiği (Receiver Operating Characteristic)
R²	Belirlilik Katsayısı (düzeltilmiş R ²)
SLS	GAM Tabanlı Görelî Heyelan Duyarlılık İndeksi (Landslide Susceptibility)
SR-AUC	Başarı Oranı Eğrisi Altında Kalan Alan (Success Rate AUC)
ŞESİM	MARAP İzleme ve Karar Destek Bileşeni
TPI	Topoğrafik Konum İndeksi (Topographic Position Index)
TRI	Arazi Pürüzlülük İndeksi (Terrain Ruggedness Index)
TWI	Topoğrafik Nemlilik İndeksi (Topographic Wetness Index)
VRM	Vektörel Engebelilik Ölçütü (Vector Ruggedness Measure)

1 GİRİŞ *

Raporun Amacı

Bu teknik raporun temel amacı, Marmara Bölgesi özelinde heyelan afet türünün bilimsel, veri temelli ve mekânsal analizle uyumlu bir çerçevede tanımlanması; duyarlılık, tehlike ve risk bileşenlerinin güncel istatistiksel ve mekânsal yöntemler kullanılarak modellenmesi; elde edilen çıktıların ise MARAP kapsamında geliştirilen karar destek mekanizmalarına doğrudan entegre edilebilecek nitelikte sunulmasıdır. Bu doğrultuda rapor, heyelan süreçlerinin yalnızca kavramsal olarak açıklanmasını değil, aynı zamanda coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı veri katmanları, raster tabanlı analizler, istatistiksel modelleme yaklaşımları, risk altındaki unsurların değerlendirilmesi ve senaryo üretimine dayalı uygulamalı bir değerlendirme sistematığının ortaya konmasını hedeflemektedir.

Rapor kapsamında benimsenen yaklaşım, heyelanların mekânsal ve zamansal bileşenlerini birbirinden ayırarak fakat birbirini tamamlayan bir bütün içinde değerlendirmektedir. İlk aşamada, topoğrafik, hidro-meteorolojik, jeolojik ve antropojenik değişkenler yardımıyla heyelan duyarlılığı modellenmektedir. İkinci aşamada ise yağış ve yağmur–kar erimesi temelli tetikleyici olasılıklar ile bu duyarlılık çıktısı birleştirilerek tehlike değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Üçüncü aşamada, heyelan tehlikesi; nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazileri gibi risk altındaki unsurlardan oluşturulan bileşik unsur indeksi ile birleştirilerek göreceli heyelan risk indeksi üretilmektedir. Böylece çalışma, “heyelan nerede olabilir?” sorusunu yanıtlayan statik bir duyarlılık analizinin ötesine geçmekte; “belirli bir zaman senaryosunda ve belirli bir tetikleyici koşul altında göreceli tehlike düzeyi nasıl değişmektedir?” ve “bu tehlike hangi unsurlarla örtüşmekte, göreceli risk nerelerde yoğunlaşmaktadır?” sorularına yanıt üreten bütünlüklü bir analiz çerçevesi sunmaktadır.

Bu raporun bir diğer amacı, heyelan afet türüne ilişkin değerlendirme sürecini ulusal ve uluslararası metodolojik yaklaşımlarla uyumlu biçimde belgelemektir. Bu kapsamda, duyarlılık analizinde Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) gibi güncel istatistiksel yöntemlerden; tehlike analizinde Gumbel uç değer dağılımı gibi hidro-meteorolojik olayların olasılıksal temsiliinde yaygın kabul gören yaklaşımlardan yararlanılmaktadır. Risk analizinde ise göreceli tehlike indeksi ile risk altındaki unsurların bileşik indeksinin piksel bazında birleştirilmesine dayanan indeks tabanlı bölgesel değerlendirme yaklaşımı benimsenmektedir. Risk altındaki unsurlar ortak bir mekânsal çözünürlüğe taşınmakta, normalize edilmekte ve ağırlıklı doğrusal birleşim yöntemiyle bütünleştirilmektedir.

* Bu rapor, **Prof. Dr. Tolga Görüm (İTÜ)** ve **Dr. Öğr. Üyesi Seçkin Fidan** tarafından düzenlenmiştir.

Görel risk indeksi, tehlike katmanının heyelan şiddeti içermemesi nedeniyle kırılabilirlik ve mekânsal-zamansal bulunma olasılığına ilişkin açık varsayımlar altında hesaplanmaktadır. Böylece rapor, yalnızca proje içi uygulama belgesi olmanın ötesinde, bilimsel dayanağı açık, tekrarlanabilir ve denetlenebilir bir teknik referans metni niteliği kazanmaktadır.

Rapor ayrıca, MARAP'ın karar destek, veri modeli ve uygulama bileşenleri için temel altlık üretme işlevi görmektedir. Bu çerçevede burada sunulan kavramsal tanımlar, veri seti gereksinimleri, mekânsal analiz iş akışları, duyarlılık ve tehlike model çıktıları, risk altındaki unsurların bileşik indeksi ve senaryo temelli görel risk yüzeyleri; MARAP veri modeli ile ŞESİM ve AYDES entegrasyonlarında doğrudan kullanılacak bir teknik altyapı sağlamaktadır. Üretilen çıktılar aynı zamanda ilerleyen dönemlerde geliştirilebilecek şiddet tabanlı kırılabilirlik, dinamik nüfus maruziyeti, ekonomik kayıp ve ayrıntılı yerel risk analizleri için ortak bir mekânsal referans oluşturmaktadır. Başka bir ifadeyle bu rapor, heyelan afet türüne ilişkin bilgi üretim sürecini standartlaştıran, karar destek sistemine aktarılabilir formatta yapılandırılan ve bölgesel afet risk azaltma planlamasına girdi sunan ana referans dokümandır.

Sonuç olarak heyelan afeti, duyarlılık, tehlike ve risk bileşenleri üzerinden ölçülebilir, modellenilebilir, karşılaştırılabilir ve karar süreçlerine aktarılabilir hâle getiren bütüncül bir teknik çerçeve oluşturmaktır. Bu yönüyle rapor, Marmara Bölgesi'nde heyelan duyarlılığı, görel tehlikesi ve görel riskinin değerlendirilmesine ilişkin bilimsel yöntemi kurumsal uygulama diliyle birleştiren, stratejik ve operasyonel değeri yüksek bir temel belge işlevi üstlenmektedir.

1.1 Raporun Kapsam ve İçeriği

Bu rapor, Marmara Bölgesi'nde heyelan duyarlılığı, tehlikesi ve riskinin bilimsel, teknik ve uygulamaya dönük boyutlarıyla değerlendirilebilmesi amacıyla birbirini tamamlayan altı ana bölümden oluşacak şekilde kurgulanmıştır. Bölümlendirme yaklaşımında temel hedef, heyelan süreçlerinin kavramsal olarak tanımlanmasından başlayarak veri setlerinin teknik özelliklerinin ortaya konulması, CBS tabanlı analiz iş akışının açıklanması, duyarlılık ve tehlike model çıktılarının değerlendirilmesi, risk altındaki unsurların analiz edilmesi, görel risk yüzeylerinin üretilmesi ve karar destek süreçlerine entegre edilebilecek teknik önerilerin geliştirilmesine kadar uzanan bütüncül bir yapı kurmaktır. Bu çerçevede her bölüm, yalnızca kendi başına bilgi sunan bağımsız bir içerik alanı olarak değil, aynı zamanda sonraki analiz aşamalarını besleyen ve raporun genel metodolojik bütünlüğünü destekleyen bir bileşen olarak tasarlanmıştır.

Raporun ilk bölümü, heyelan afet türünün tanımlanmasına ayrılmıştır. Bu bölümde heyelanın akademik ve teorik tanımı, oluşum mekanizmaları, hazırlayıcı ve tetikleyici faktörleri, temel sınıflandırma sistemleri ile Türkiye ve Marmara Bölgesi bağlamındaki genel tehlike profili ele alınmıştır. Böylece çalışmanın afet türü

özelindeki bilimsel temeli kurulmuş; heyelan süreçlerinin afet yönetimi, bölgesel planlama ve risk azaltma çalışmaları açısından neden kritik olduğu açıklanmıştır. Ayrıca heyelanların ulusal risk yönetimi ve bölgesel afet azaltma planlaması içindeki yeri, mevcut literatür ve ulusal ölçekli bulgular ışığında değerlendirilmiştir.

İkinci bölüm, duyarlılık, tehlike ve risk kavramlarının kuramsal ayrımını ve bu raporda nasıl ele alındığını ortaya koyan teorik çerçeveyi içermektedir. Bu bölümde heyelan duyarlılık analizinde kullanılan Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) yaklaşımının mantığı, doğrusal olmayan ilişkileri modelleme kapasitesi ve seçilme gerekçesi açıklanmıştır. Tehlike analizinde ise ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden türetilen yıllık maksimum yağış ve yağmur–kar erimesi serileri, bölgesel eşik yaklaşımı ve Gumbel dağılım parametreleri Moment Yöntemi (Method of Moments, MOM) tabanlı uç değer modelleme çerçevesi kapsamında tanımlanmıştır. Risk analizinde ise göreceli tehlike indeksi ile risk altındaki unsurların bileşik indeksinin hücre temelinde birleştirilmesine dayanan indeks tabanlı bölgesel değerlendirme yaklaşımı açıklanmıştır. Kırılganlığın maksimum değerle temsil edilmesi ve risk altındaki unsurların mekânsal-zamansal bulunma olasılığına ilişkin varsayımlar da bu kuramsal çerçeve içinde tanımlanmıştır. Aynı bölümde belirsizlik yönetimi, çapraz doğrulama, mekânsal genellenebilirlik, zamansal doğrulama ve model çıktılarının göreceli tehlike indeksi ve göreceli risk indeksi olarak yorumlanmasına ilişkin temel ilkeler verilmiştir.

Üçüncü bölüm, analizlerde kullanılan veri setlerinin sistematik biçimde tanımlandığı veri altyapısı bölümüdür. Bu kısımda topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, hidro-meteorolojik, arazi örtüsü/kullanımı ve antropojenik veri katmanları; veri kaynakları, dönemleri, çözünürlükleri, formatları ve fiziksel anlamları ile birlikte sunulmuştur. Duyarlılık modelinde kullanılan hücre temelli heyelan var/yok örneklem veri seti ile tehlike analizinde kullanılan ERA5-Land hidro-meteorolojik veri setleri bu bölümde açıklanmıştır. Risk analizi kapsamında kullanılan nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazileri katmanlarının kaynakları, temel özellikleri ve risk altındaki unsurları temsil etme biçimleri de aynı veri altyapısının bir parçası olarak ele alınmıştır. Ayrıca raster katmanların ortak analiz izgarasına uyumlaştırılması, sürekli ve kategorik değişkenlerin model yapısına hazırlanması, sınıf kodlarının korunması, nüfusun dasimetrik olarak dağıtılması, vektör verilerinin raster verilere dönüştürülmesi ve veri temelli sınırlılıkların nasıl yönetildiği bu bölümde özetlenmiştir.

Dördüncü bölüm, raporun uygulamalı ve teknik omurgasını oluşturan CBS tabanlı modelleme iş akışına ayrılmıştır. Bu bölümde veri hazırlık aşaması, raster uyumlaştırma, değişken üretimi, örneklem oluşturma, GAM tabanlı duyarlılık modelinin kurulumu, model performans değerlendirmeleri, ERA5-Land verilerinden tetikleyici serilerin üretilmesi, Gumbel-MOM parametrelerinin hesaplanması, senaryo tabanlı aşılma olasılıklarının belirlenmesi ve nihai göreceli heyelan tehlike indeksinin oluşturulması adım adım açıklanmıştır. Buna ek olarak, bağımsız heyelan envanteriyle yapılan mekânsal doğrulama ve tarihi bilinen heyelan olaylarıyla

gerçekleştirilen zamansal doğrulama sonuçları da bu teknik akış içinde değerlendirilmiştir. Risk analizinin teknik iş akışı kapsamında ise risk altındaki unsur katmanlarının ortak 50 m analiz ızgarasına taşınması, normalizasyonu, eşit ağırlıklı doğrusal birleşimle bileşik unsur indeksinin oluşturulması ve bu indeksin farklı tehlike senaryolarıyla birleştirilerek göreceli risk yüzeylerinin üretilmesi açıklanmıştır. Böylece rapor, yalnızca sonuçları sunan bir belge değil, aynı zamanda tekrarlanabilir ve denetlenebilir bir teknik uygulama metni niteliği kazanmıştır.

Beşinci bölüm, heyelan risk analizine ayrılmıştır. Bu bölümde risk altındaki unsurlardan oluşturulan bileşik unsur indeksi, dört hidro-meteorolojik tehlike senaryosuna göre üretilen göreceli risk yüzeyleri ve birincil RAIN_3d risk senaryosu değerlendirilmiştir. Ayrıca risk altındaki unsur katmanları arasındaki olası çift sayım, tehlike ve unsur bileşenlerinin risk indeksi üzerindeki göreceli etkileri, arazi örtüsünün iki farklı analiz aşamasında kullanılmasından kaynaklanabilecek döngüsel bağımlılık ve alternatif ağırlıklandırma şemalarının sonuçlar üzerindeki etkisi tanısal analizlerle sınanmıştır. Riskin nüfus, bina kat alanı, ulaşım altyapısı ve tarım arazileri üzerinde hangi alanlarda yoğunlaştığı, yüksek risk dilimlerinde bulunan unsurların miktarlarıyla birlikte ortaya konulmuştur.

Altıncı ve son bölüm, elde edilen bulguların sentezlendiği, bölgesel önceliklerin tartışıldığı ve uygulamaya dönük teknik önerilerin geliştirildiği değerlendirme bölümüdür. Bu kısımda duyarlılık, tehlike ve risk model sonuçları birlikte yorumlanmış; hangi alanların yüksek göreceli tehlike ve risk gösterdiği, hangi tetikleyici değişkenlerin model performansında öne çıktığı ve hangi çıktıların karar destek süreçlerinde öncelikli kullanılabileceği tartışılmıştır. Ayrıca modelin sınırlılıkları, ERA5-Land verisinin mekânsal çözünürlüğünden kaynaklanan belirsizlikler, bölgesel eşik yaklaşımının kısıtları, Gumbel-MOM varsayımı, zamansal doğrulama sonuçlarının yorumu, maksimum kırılma varsayımı, risk altındaki unsurların ağırlıklandırılması, nüfus ve bina katmanları arasındaki yapısal ilişki ve göreceli risk indeksinin yorum sınırları ile gelecekte ihtiyaç duyulan ek analizler sistematik biçimde sunulmuştur. Böylece rapor, mevcut durumu belgeleyen teknik bir çıktı olmanın yanında, MARAP kapsamında heyelan risk azaltma önceliklerinin belirlenmesine, karar destek sistemlerinin geliştirilmesine ve ileride yürütülecek ayrıntılı kırılma, dinamik maruziyet ve ekonomik kayıp analizlerine girdi sağlayan stratejik bir karar destek dokümanı işlevi görmektedir.

2 BÖLÜM 1 — AFET TÜRÜ TANIMLAMASI

Heyelanlar, küresel ölçekte önemli can kayıplarına ve çevresel hasara neden olan en yaygın jeolojik tehlikelerden biridir (Kirschbaum vd., 2015; Froude ve Petley 2018; Fidan vd., 2024). 2004–2019 döneminde yılda ortalama 4.500 kişi heyelanlar nedeniyle yaşamını yitirmiş (Froude ve Petley, 2018); yıllık ekonomik kayıplar ise 20 milyar ABD doları düzeyinde gerçekleşmiştir (Klose vd., 2016). Artan insan baskısı ve buna bağlı olarak gelişen şehirleşme ve arazi örtüsü değişimi, özellikle dağlık

alanlardaki heyelan ve ölümlerin en kritik belirleyicilerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Ozturk vd., 2022; Fidan vd., 2026).

Genel bir tanım olarak heyelan, kaya, toprak, moloz veya bunların kombinasyonundan oluşan yamaç materyalinin, yerçekimi etkisi altında eğim boyunca hareket etmesiyle karakterize edilen bir kütle hareketi sürecidir. Klasik literatürde bu süreç, Varnes (1978) ile Cruden ve Varnes (1996) tarafından geliştirilen çerçeve içinde tanımlanmış; daha sonra Hungr vd. (2014) tarafından modern jeoteknik ve malzeme davranışı temelli bir sınıflandırma ile güncellenmiştir. Bu çerçevede heyelanlar, yalnızca tekil bir “doğal olay” olarak değil; hareket türü, malzeme bileşimi, yenilme geometrisi, su içeriği ve hız gibi birden fazla fiziksel özelliğin birleşimiyle tanımlanan karmaşık yamaç yenilmesi süreçleri olarak değerlendirilir. Mevcut Marmara raporu da bu klasik yaklaşımı esas almakta ve heyelanı, düşme, devrilme, kayma, yayılma ve akma gibi farklı mekanizmaları kapsayan üst bir şemsiye kavram olarak konumlandırmaktadır.

2.1 Oluşum Mekanizmaları ve Tetikleyici Faktörler

Heyelanlar genellikle depremler (Görüm vd., 2011; Tanyaş vd., 2017), yağış (Baum vd., 2010), kar erimesi (Aslan vd., 2025) ve çeşitli insan kaynaklı bozulmalar (Dille vd., 2022; Froude ve Petley, 2018) tarafından tetiklenir. Bu bakımdan, jeolojik, jeomorfolojik ve çevresel bileşenlerden oluşan "hazırlayıcı koşullar" ile hidro-meteorolojik, sismik veya antropojenik nitelikli "tetikleyici faktörlerin" karmaşık etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir (Hungr vd., 2014). Bir yamacın stabilitesi, bu dinamik faktörlerin denge halini bozmasıyla ortadan kalkmakta ve kütle hareketi süreci başlamaktadır. Hazırlayıcı koşullar; eğim, litoloji, ayrışma derecesi, yapısal süreksizlikler, drenaj özellikleri, toprak kalınlığı ve topoğrafik rölyef gibi görece yavaş değişen parametreleri içerir. Tetikleyici faktörler ise bu sistemi eşik davranışına iten dinamik süreçlerdir. En yaygın doğal tetikleyici yağıştır. Yağış, gözenek suyu basıncını artırarak efektif gerilmeyi düşürür ve şev duraylılığını zayıflatır. Bunun yanında kar erimesi, deprem, kıyı ya da akarsu aşındırması ve bazı durumlarda volkanik etkinlik de heyelanı tetikleyebilir. Bununla birlikte, yol açma, şev topuğunun kazılması, dolgu yükleri, madencilik, ormansızlaşma, yanlış drenaj uygulamaları ve plansız kentleşme gibi insan müdahaleleri, özellikle kırılgan yamaç sistemlerinde heyelanın hem oluşma olasılığını hem de yıkıcılığını artırmaktadır.

Heyelanın bu çok bileşenli yapısı, onu diğer afet türleriyle güçlü biçimde ilişkilendirir. Örneğin, depremle eş zamanlı olarak eski heyelanlar, şiddetli yüzey akışı veya kar erimesi nedeniyle yeniden harekete geçerek geniş çaplı moloz akıntılarına yol açabilir. Bu tür tehlike zincirleri, heyelan barajlarının oluşumu ve çökmesini de içerebilir. Bu da nehir yataklarını değiştirerek sel ve yamaç oyulması riskini artırır ve bu durum, ilk depremin üzerinden uzun zaman geçtikten sonra bile yeni heyelanları tetikleyebilir. Bu uzun süreli tehlike zincirleri, şiddetli depremlerin ardından yüzlerce yıl sürebilen yüksek hasar potansiyeline yol açabilir (Görüm vd., 2025). Bunun yanında heyelanlar, bir doğal olayın endüstriyel tesisler, ulaşım

koridorları, enerji hatları, doğalgaz altyapısı veya atık depolama alanları üzerinde tetiklediği teknolojik ikincil etkiler bağlamında da önem taşır. İklim değişikliği bağlamında ise aşırı yağışların sıklığı ve şiddetindeki değişimler (Gariano ve Guzzetti 2016), özellikle insan müdahalesiyle kırılganlaştırılmış yamaçlarda heyelan tehlikesini artırabilecek üst ölçekli bir baskı olarak değerlendirilmelidir (Guns ve Vanacker 2014; Ozturk vd., 2022). Dolayısıyla heyelanlar, jeolojik ve iklimsel tetikleyiciler ile arazi kullanım baskısının kesişiminde yer alan tipik bir bileşik afet sürecidir.

2.2 Türkiye'de Heyelan Tehlikesi

Küresel afet sistemi içindeki yeri açısından heyelanların değerlendirilmesinde başvurulacak temel referans kaynaklardan biri EM-DAT (Emergency Events Database)'tir. EM-DAT, doğal ve teknolojik afetleri 1900'den günümüze ülke bazında standartlaştırılmış biçimde derleyen küresel bir veri tabanıdır. 2024 itibarıyla 26.700'den fazla afet kaydı içermekte, kayıtların yaklaşık üçte ikisi doğal afetlerden oluşmakta ve veriler afet türü, alt türü, tarih, yer ve insani/ekonomik etkiler gibi standart alanlar altında sunulmaktadır. Veri tabanına bir olayın girebilmesi için en az 10 ölüm, en az 100 etkilenen kişi, uluslararası yardım çağrısı veya olağanüstü hâl ilanı gibi eşiklerden en az birinin sağlanması gerekir. Bu yapı, heyelanların küresel afet yönetimi bağlamında izlenmesini mümkün kılmakla birlikte, özellikle düşük can kayıplı ya da yerel ölçekte kalan çok sayıdaki olayın veri tabanında temsil edilmemesi riskini de beraberinde getirir. Bu nedenle EM-DAT, heyelanların küresel görünürlüğünü ve afet yönetimi bağlamını anlamak için önemli bir çerçeve sunmakla birlikte, Türkiye ve Marmara gibi belirli alanlar için ulusal envanterler, olay-tarih odaklı veri tabanları ve yerel kayıtlarla birlikte okunması gereken eleştirel bir kaynaktır.

EM-DAT kayıtlarında Türkiye için listelenen heyelan örnekleri de bu afetin tarihsel önemini ortaya koymaktadır. Veri tabanında yer alan örnek olaylar arasında 1976 yılında Ordu ilinde 40 ölümlü sonuçlanan olay, yine 1976 yılında Türkiye için konumu ayrıntılandırılmamış 27 ölümlü bir kayıt, 1980'de Kayseri ili Ayvazhacı köyünde 40 ölüm, 1988'de Trabzon ili Maçka ilçesi Çatak yerleşmesinde 64 ölüm, 1995'te Denizli-Senirkent bağlantılı kayıta 74 ölüm, 2001'de Rize ili Çamlıhemşin-Çayeli-Ardeşen ilçelerinde 9 ölüm, 2005'te Sivas ili Koyulhisar ilçesi Sugözü köyünde 15 ölüm, 2010'da Rize ili Gündoğdu beldesinde 13 ölüm ve 2018'de Tekirdağ-Sarılar köyünde 24 ölüm dikkat çekmektedir. Bu kayıtlar, ölümcül heyelanların Türkiye'de yalnızca tek bir bölgeye değil, Karadeniz'den İç Anadolu'ya ve Marmara'ya uzanan geniş bir coğrafyada görülebildiğini; ancak özellikle yağış, topoğrafya ve insan baskısının çakıştığı alanlarda daha ağır sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Veri tabanına giriş kriterileri dikkate alındığında, burada yer alan olayların daha çok yüksek etkili ve kamuoyu görünürlüğü yüksek olaylar olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Türkiye ölçeğinde heyelanların ulusal afet profili içindeki ağırlığı, yalnızca olay sayılarıyla değil, etkilenen nüfus ve yerleşim büyüklüğü ile de anlaşılmaktadır. AFAD kaynaklı çalışmalara göre, ülkemizde 1950–2008 yılları arasında kaydedilen 13.494 heyelan ve 2.956 kaya düşmesi olayı toplam 78.767 kişiyi ve 7.175 yerleşim birimini etkilemiştir. Bu değerler, ilgili afet türlerinin toplam etkilenen kişi sayısının %27,63'üne ve etkilenen yerleşim birimlerinin %20,07'sine karşılık gelmektedir (Gökçe vd., 2008).

Tarihsel örnekler ve zarar örüntüleri, heyelanların Türkiye'de neden yüksek öncelikli bir afet türü olduğunu daha da açık biçimde ortaya koymaktadır. Nitekim ülkenin farklı bölgelerinde 1929, 1962, 1964, 1968, 1980, 1988, 1990, 1995, 2005 ve 2010 yıllarında meydana gelen heyelanlar sonucunda yüzden fazla insanın yaşamını yitirdiği ve ciddi ekonomik kayıpların ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu ağır olaylara örnek olarak, doğal faktörlere bağlı biçimde 23 Haziran 1988'de Trabzon'un Maçka ilçesine bağlı Çatak yerleşmesinde 64, 13 Temmuz 1995'te Isparta ilinin Senirkent ilçesinde 74, 17 Mart 2005'te Sivas ili Koyulhisar ilçesine bağlı Sugözü köyünde 15 ve 26 Ağustos 2010'da Rize ili Gündoğdu beldesinde 13 kişinin yaşamını yitirdiği olaylar verilebilir. Buna karşılık antropojenik tetiklenmenin çarpıcı örneklerinden biri, 10 Şubat 2011'de Kahramanmaraş ili Afşin ilçesindeki Çöllolar açık ocak işletmesinde 10 kişinin ölümüyle sonuçlanan heyelandır (Fidan ve Görüm, 2020). Bu örnekler birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye'de heyelanların hem doğal süreçler hem de insan müdahaleleri aracılığıyla ölümcül sonuçlar üretebildiğini, dolayısıyla afet yönetimi açısından tek boyutlu değil, çok boyutlu bir değerlendirme gerektirdiği açıkça anlaşılmaktadır.

Türkiye'nin Avrupa bağlamındaki konumu da heyelanların ulusal önem düzeyini desteklemektedir. Haque vd. (2016) tarafından 1995–2014 döneminde 27 Avrupa ülkesini kapsayan çalışmaya göre, bu dönemde meydana gelen toplam 476 ölümcül heyelan sonucunda 1.370 kişi yaşamını yitirmiştir. Aynı çalışmada, yaklaşık 40 olayın neden olduğu 335 ölüm ile Türkiye'nin Avrupa ülkeleri arasında ilk sırada yer aldığı gösterilmiştir. Bu bulgu, Türkiye'nin yalnızca ulusal ölçekte değil, Avrupa bağlamında da yüksek etkili heyelan coğrafyalarından biri olduğunu ve risk azaltma stratejilerinde bu afet türüne ayrı bir önem verilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Türkiye, ortalama yükseltisinin yüksek olması, aktif tektonik rejimi, engebeli topoğrafyası ve değişken iklim özellikleri nedeniyle heyelan duyarlılığı yüksek bir ülkedir. Bu nedenle heyelanlar, ülke genelinde yalnızca kırsal dağlık sahalarla sınırlı olmayan; yerleşim, altyapı ve ulaşım sistemleri üzerinde doğrudan etki üretebilen kritik bir afet türü olarak kabul edilmektedir. Türkiye Ölümcül Heyelan Veri Tabanı'na göre 1929–2019 döneminde 389 ölümcül heyelan olayında toplam 1.343 kişi yaşamını yitirmiştir. Buna göre, yılda ortalama 4 ölümcül olay ve yaklaşık 15 ölüme neden olmaktadır. Bu bakımdan heyelanlar, Türkiye'de depremlerden sonra en fazla can kaybı ve ekonomik zarara yol açan afet türlerinden biri olarak ön plana çıkmaktadır. (Görüm ve Fidan 2021).

2.3 Marmara Bölgesi ve İstanbul'da Heyelan Tehlikesi

Bu genel ulusal çerçeveden Marmara Bölgesi ölçeğine inildiğinde, heyelanların neden özellikle bu bölge için kritik olduğu daha net görünür hale gelmektedir. Marmara'yı heyelan açısından özel kılan unsur, yalnızca doğal ortam koşulları değildir. Bölge, aynı zamanda yüksek nüfus yoğunluğu, hızlı arazi dönüşümü, yoğun ulaşım ve altyapı yatırımları, sanayi baskısı ve yaygın kentsel büyüme gibi antropojenik süreçleri; ayrıca yer yer dik yamaçlar, litolojik zayıflık zonları, yoğun yağışlı kıyı kuşakları ve aktif tektonik kontrol gibi doğal etmenleri birlikte barındırmaktadır (Fidan ve Görüm 2020; Najatishendi vd., 2026). Bu nedenle Marmara'daki heyelan tehlikesi, Doğu Karadeniz'de gözlenen klasik yağış kaynaklı dağılım deseninden kısmen ayrılmaktadır. Özellikle İstanbul ve yakın çevresinde insan eliyle değiştirilen yamaç geometrisi ve kontrolsüz şev müdahaleleriyle daha karmaşık bir nitelik kazanmaktadır.

Bu özgül bölgesel yapı, tarihsel kayıtlarla da desteklenmektedir. Mevcut rapor çerçevesinde de belirtildiği gibi Marmara Bölgesi, 1929–2019 döneminde 84 ölümcül heyelan olayı ile Türkiye'deki toplam ölümcül olayların %21,6'sını üretmiştir (Fidan ve Görüm 2020). Daha güncel kayıtlar ise 1997–2024 döneminde 321 olay ile Marmara'nın Karadeniz'den sonra en yüksek olay sayısına sahip ikinci bölge olduğunu göstermektedir. İstanbul'un tek başına 180 kayıtlı olay ile il bazında en yüksek heyelan frekansına sahip merkez olarak öne çıkması, bölgesel tehlikenin yalnızca doğal değil, güçlü biçimde antropojenik olarak da beslendiğini göstermektedir (Avcıoğlu vd., 2025; Najatishendi vd., 2026). Ayrıca Türkiye genelinde insan kaynaklı tetiklenen ölümcül heyelanların %35'inin yalnızca Marmara Bölgesi'nde kaydedilmiş olması, bu coğrafyada afet üretiminin kentleşme, inşaat, altyapı ve şev müdahaleleri ile doğrudan ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 2000'li yıllardan itibaren hız kazanan kentsel dönüşüm projeleri, mega projeler, yoğun inşaat faaliyetleri ve kentin kuzeyindeki madencilik operasyonları da bu artış eğilimini destekleyen temel süreçler arasında yer almaktadır.

Marmara'daki heyelanların tipik etkileri ve zarar örüntüsü, heyelanların neden yüksek öncelikli bir afet türü olarak ele alınması gerektiğini daha da netleştirmektedir. Bölgedeki olaylarda, Doğu Karadeniz'deki büyük ölçekli ve hızlı gelişen akmalara kıyasla olay başına düşen ölüm sayısı bazı durumlarda daha düşük olabilmektedir. Ancak, Marmara'da heyelanların çok daha yoğun nüfus, daha fazla yapı stoku, daha karmaşık altyapı ve daha yüksek ekonomik birikim üzerinde etkili olması, toplam riski farklı bir düzleme taşımaktadır. Bu nedenle Marmara'da heyelan zararı çoğu zaman yalnızca doğrudan can kaybı ile sınırlı kalmamaktadır. Ulaşım ağlarında kesinti, şev ve istinat yapılarında hasar, enerji ve su altyapısında bozulma, bina güvenliğinde azalma ve ikincil ekonomik kayıplar gibi çok katmanlı sonuçlar üretmektedir.

Bütün bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, heyelanların ulusal risk yönetimi açısından önem düzeyinin yüksek olduğu açıktır. Türkiye'de heyelanlar yalnızca

dağlık kırsal alanların sorunu değildir. Metropol çevresi, ulaşım koridorları, baraj havzaları, sanayi alanları ve hızla dönüşen yerleşim alanları için de doğrudan bir planlama kısıtı oluşturmaktadır. Bu nedenle heyelanların yönetimi, salt olay sonrası müdahale ile sınırlı tutulamaz; arazi kullanım kararları, yerleşim yönlendirmesi, şev mühendisliği, drenaj tasarımı, yapılaşma denetimi, kritik altyapı koruması ve erken uyarı sistemlerinin birlikte ele alındığı çok ölçekli bir risk azaltma yaklaşımını gerektirir. MARAP bağlamında üretilecek duyarlılık ve tehlike haritalarının önemi de burada ortaya çıkmaktadır: bu haritalar, heyelanı soyut bir doğal tehlike olarak değil, karar destek sistemlerine aktarılabilir, CBS tabanlı ve operasyonel bir afet bileşeni olarak tanımlamaktadır. Bu yönüyle heyelan için geliştirilen iki aşamalı yaklaşım, tehlike–maruziyet–zarar görülebilirlik zinciri üzerinden ilerleyen risk hesaplama mantığının Marmara Bölgesi'ne uygulanabilir teknik altlığını oluşturmaktadır.

Sonuç olarak heyelan, Marmara Bölgesi için yalnızca yamaçlarda gelişen bir jeomorfolojik süreç değil; iklim, topoğrafya, litoloji, tektonik yapı, arazi kullanımı, kentleşme baskısı ve altyapı yoğunluğunun kesişiminde gelişen çok boyutlu bir afet türüdür. Marmara'da heyelanı kritik yapan temel unsur, olayın yalnızca doğal çevrede değil, yoğun insan etkisi altındaki kırılgan alanlarda gerçekleşmesidir. Bu durum, heyelan olaylarını MARAP kapsamında yüksek öncelikli, veri temelli ve mekânsal olarak modellenmesi zorunlu bir afet türü haline getirmektedir.

3 BÖLÜM 2 — DUYARLILIK VE TEHLİKE HESAPLAMA TEORİK ÇERÇEVESİ

3.1 Duyarlılık, Tehlike ve Risk Kavramsal Çerçevesi

Heyelanların neden olduğu zararlarının azaltılmasına yönelik çalışmalarında, doğru mühendislik önlemlerinin alınması ve arazi kullanım planlarının yapılabilmesi için analiz sürecinin hiyerarşik bir düzende ilerlemesi esastır. Literatürde sıklıkla birbirinin yerine kullanılsa da "duyarlılık", "tehlike" ve "risk" kavramları, sürecin farklı boyutlarını tanımlayan ve birbirini tamamlayan ardışık analiz aşamalarıdır (Varnes, 1984; van Westen vd., 2006; Corominas vd., 2014).

Duyarlılık (Susceptibility): Bir bölgedeki yamaçların mevcut jeolojik, jeomorfolojik ve çevresel koşullar altında heyelan üretme potansiyelini ifade eder. "Heyelan nerede olabilir?" sorusuna yanıt arar; heyelanların mekânsal olabilirliği olarak tanımlanır.

Tehlike (Hazard): Belirli bir alanda ve belirli bir zaman aralığında bir heyelanın meydana gelme olasılığıdır. Tehlike analizi, duyarlılık kavramına zaman boyutunun eklenmiş halidir. Tehlike analizlerinde, duyarlılık parametrelerine ek olarak yağış verileri, deprem ivme kayıtları veya antropojenik değişimler gibi tetikleyici (dinamik) faktörler sürece dahil edilir.

Risk: Tehlikenin risk altındaki unsurlar, maruziyet ve kırılganlık koşullarıyla etkileşimi sonucunda ortaya çıkabilecek kayıpları ifade eder. Bu aşama “Heyelan meydana gelirse kimi ve neyi etkiler?” ve “potansiyel sonuçların görece düzeyi nedir?” sorularına yanıt arar. Corominas vd. (2014) tarafından önerilen genel heyelan risk denklemi aşağıdaki gibidir:

$$R = P(M_i) \times P(X_j / M_i) \times P(T / X_j) \times V_{ij} \times C$$

Burada $P(M_i) \times P(X_j / M_i)$ tehlike bileşenini; $P(T / X_j)$, risk altındaki unsurun heyelan meydana geldiği sırada ilgili konumda bulunma olasılığını; V_{ij} , unsurun belirli büyüklük ve şiddetteki heyelana karşı kırılganlığını; C ise risk altındaki unsurun miktarını veya değerini temsil etmektedir.

Bu rapor, söz konusu analiz bütünüdür. duyarlılık, tehlike ve risk aşamalarını Marmara Bölgesi için bütünleşik biçimde ele almaktadır. İlk aşamada görece heyelan duyarlılığı, ikinci aşamada hidro-meteorolojik tetikleyici koşullar altında görece tehlike indeksi, üçüncü aşamada ise tehlike ile risk altındaki unsurların mekânsal birlikteliğini temsil eden görece risk indeksi üretilmiştir.

Bu kapsamda benimsenen operasyonel tehlike tanımı aşağıdaki gibidir:

$$H = S_{LS} \times P_T$$

Bu ifade, duyarlılık bileşeni ile hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenin çarpılarak görece heyelan tehlike indeksinin üretildiğini göstermektedir. Burada; S_{LS} , GAM tabanlı görece heyelan duyarlılığını; P_T ise seçilen hidro-meteorolojik tetikleyici eşiğinin belirli bir senaryo içinde en az bir kez aşılma olasılığını temsil etmektedir. Bu yaklaşım, Varnes (1984) tarafından ortaya konulan klasik zonlama mantığı ve yağış-tabanlı hazard çerçeveleri ile uyumludur.

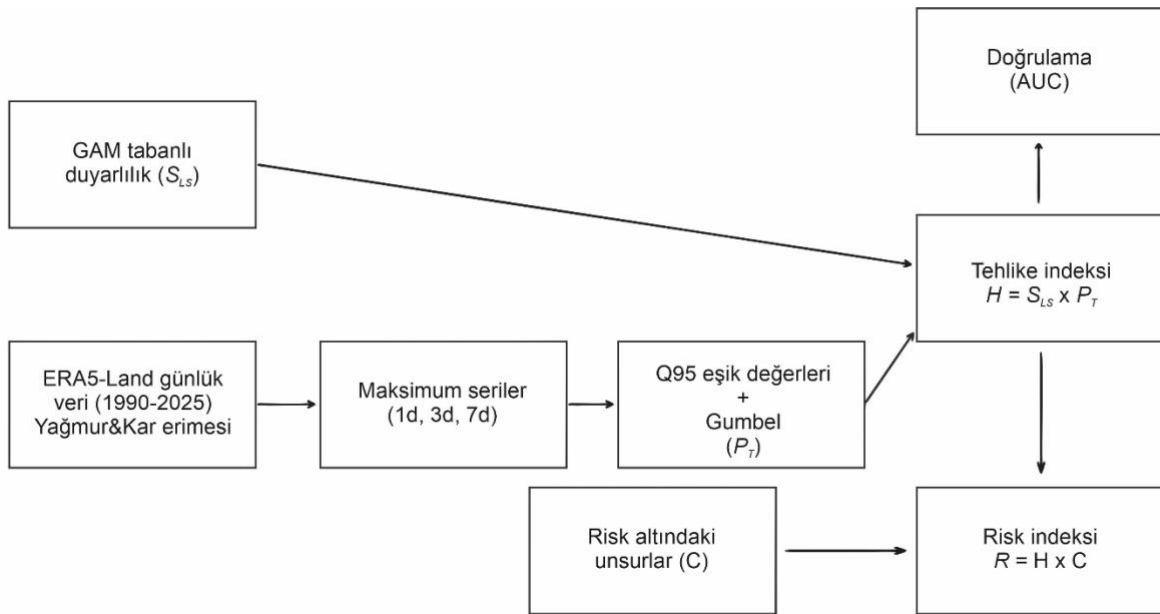
Risk analizinde kullanılan tehlike katmanı heyelan şiddetini içermeyişinden, fiziksel kırılganlık eğrilerinin uygulanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle kırılganlık maksimum değer olan $V = 1$ olarak kabul edilmiştir. Bina, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi gibi statik unsurlar için mekânsal-zamansal bulunma olasılığı $P(T / X_j) = 1$ alınmış; nüfus için de ikamet nüfusuna dayalı veri yapısı nedeniyle aynı varsayım uygulanmıştır. Bu iki kabul altında genel risk denklemi aşağıdaki gibidir:

$$R = H \times C$$

Burada R , görece heyelan risk indeksini; H , görece heyelan tehlike indeksini; C ise nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanlarının normalize edilerek eşit ağırlıkla birleştirilmesinden elde edilen bileşik unsur indeksini

temsil etmektedir. Bu çarpımsal yapı, yalnızca tehlike ile risk altındaki unsurların aynı hücrede bulunduğu alanlarda risk değeri üretmektedir.

Üretilen çıktı, yıllık heyelan olasılığı, beklenen can kaybı veya parasal zarar tahmini değildir. Sonuçlar, Marmara Bölgesi içinde tehlike ile risk altındaki unsurların mekânsal olarak örtüştüğü alanları karşılaştırmalı biçimde gösteren göreceli bir risk indeksi olarak yorumlanmalıdır. Risk raporunda da $P(T/X_i) = 1$ ve $V = 1$ varsayımları altında denklemin $R = H \times C$ şeklinde düzenlendiği ve çıktının mutlak kayıp değil göreceli risk dağılımı olduğu açıkça belirtilmiştir. Çalışmanın bütününe ait iş akışı Şekil 3-1’de özetlenmiştir.



Şekil 3-1 Çalışma iş akışı: Duyarlılık, tehlike ve risk analizi süreci.

3.2 Duyarlılık Analizi: Genelleştirilmiş Ekleme Model (GAM)

Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi aşamasında, karmaşık süreçleri modelleme yeteneği ve istatistiksel esnekliği nedeniyle Genelleştirilmiş Ekleme Model (Generalized Additive Model, GAM) yaklaşımı benimsenmiştir. GAM, yaygın olarak kullanılan Genelleştirilmiş Doğrusal Modelin (GLM) daha esnek ve yarı-parametrik (semi-parametric) bir uzantısıdır (Wood, 2017; Lombardo vd., 2020; Moreno vd., 2023). Geleneksel GLM yöntemleri, bağımlı değişken (heyelan varlığı/yokluğu) ile bağımsız değişkenler (eğim, litoloji vb.) arasında katı bir "doğrusal ilişki" varsayımına dayanır. Ancak doğal süreçlerde heyelan oluşumu ile çevresel faktörler arasındaki etkileşimler genellikle doğrusal değildir. Örneğin, yamaç eğimi arttıkça kayma gerilmesi ve dolayısıyla heyelan olasılığı artış gösterir. Ancak, eğimin belirli bir eşiği aştığı çok dik kaya yüzeylerinde malzeme birikimi gerçekleşemediği için olasılık tekrar düşüş eğilimine girer.

GAM, bu tür karmaşık ilişkileri yönetebilmek için tahmin edici değişkenlerin etkisini sabit katsayılar yerine, verinin kendi iç yapısından öğrenilen "düzleştirme

fonksiyonları" toplamı ile modeller (Moreno vd., 2023). Bu mimari, modelin verideki doğrusal olmayan paternleri yüksek doğrulukla yakalamasını sağlarken, aynı zamanda istatistiksel modellerin sunduğu yorumlanabilirlik avantajını korur. Bu çalışmada modelleme süreci, R istatistik yazılımı ortamında geliştirilen mgcv paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Wood, 2017).

İkili yanıt değişkeni için logit bağ fonksiyonu kullanılan nihai binom GAM formülü, bir pikselde heyelan olma olasılığını göstermek üzere aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \text{logit}[P(\text{heyelan})] = & s(\text{eğim}) + s(\text{TWI}) + s(\text{yıllık yağış}) + \\ & s(\text{faya uzaklık}) + s(\text{yola uzaklık}) + s(\text{akarsuya uzaklık}) + \\ & \text{arazi örtüsü} + \text{litoloji} \end{aligned}$$

Model performansı, ROC eğrisi altında kalan alan (AUC), duyarlılık, seçicilik, Kappa katsayısı, açıklanan sapma ve düzeltilmiş R^2 ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. AUC değeri, modelin heyelan varlığı ve yokluğu sınıflarını ayırt etme kapasitesini özetleyen temel performans göstergesi olarak dikkate alınmıştır (Fawcett, 2006). Yüksek AUC değeri, modelin sınıflandırma başarısının daha güçlü olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, modelin yalnızca örneklem içi başarısını değil, aynı zamanda mekânsal genellenebilirliğini de sınamak amacıyla 5 katlı rastgele çapraz doğrulama ile mekânsal blok tabanlı çapraz doğrulama prosedürleri birlikte uygulanmıştır.

3.3 Tehlike Analizi: Gumbel Tabanlı Yağış Tetikleyici Çerçevesi

Tehlike aşamasında yağış, Marmara Bölgesi için en yaygın ve ölçülebilir tetikleyici olarak kabul edilmiştir. Yıllık maksimum yağış değerleri istatistikte uç değerler olarak değerlendirilir. Bu tür serilerin olasılıksal modellenmesinde Gumbel dağılımı uzun süredir hidroloji ve ekstrem yağış analizlerinde yaygın olarak kullanılan temel yaklaşımlardan biridir (Gumbel, 1958). Türkiye’de de yağış temelli heyelan tehlikesi ve eşik analizlerinde bu yaklaşımın kullanıldığı bilinmektedir (Nefeslioglu ve Gorum, 2020).

Tehlike analizinde yağış ve yağmur–kar erimesi kaynaklı su girdisi, Marmara Bölgesi’nde heyelanları tetikleyebilecek temel hidro-meteorolojik süreçler olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda 1990–2025 dönemine ait günlük ERA5-Land verileri kullanılarak kısa ve orta süreli tetikleyici seriler üretilmiştir. Analizde 1 günlük yağmur (RAIN_1d), 3 günlük kümülatif yağmur (RAIN_3d), 7 günlük kümülatif yağmur (RAIN_7d) ve 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik etkili su girdisi (EWI_7d) değerlendirilmiştir. Her tetikleyici için yıllık maksimum değerler hesaplanmış ve 36 yıllık maksimum seriler oluşturulmuştur.

Bu değişkenlerden uç değer modellemesine girdi oluşturmak amacıyla yıllık maksimum seriler (AMAX; Annual Maximum) türetilmiştir. AMAX, her pikselde ilgili

hidro-meteorolojik tetikleyicinin bir yıl içinde ulaştığı en yüksek değeri ifade eder. Örneğin AMAX_RAIN_3d, her yıl için hesaplanan en yüksek 3 günlük kümülatif yağmur değerlerinden oluşmaktadır. Böylece 1990–2025 dönemi için her pikselde 36 yıllık yıllık maksimum seriler elde edilmiş ve bu seriler Gumbel-MOM uç değer modellemesine girdi olarak kullanılmıştır.

Yıllık maksimum hidro-meteorolojik değerler, istatistiksel olarak uç değer serileri niteliğindedir. Bu nedenle her pikseldeki yıllık maksimum serilere Gumbel dağılımı uygulanmıştır. Gumbel dağılımı, hidroloji ve ekstrem yağış analizlerinde yaygın olarak kullanılan iki parametrelili bir uç değer dağılımıdır. Bu çalışmada dağılım parametreleri Momentler Yöntemi (Method of Moments, MOM) ile hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, büyük raster veri setleri üzerinde kapalı form parametre tahmini sağlaması ve tüm çalışma alanında tutarlı biçimde uygulanabilmesi nedeniyle tercih edilmiştir.

Gumbel dağılımının ölçek parametresi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\sigma = s \times \sqrt{6} / \pi$$

Burada σ Gumbel ölçek parametresini, s ise her piksel için hesaplanan 36 yıllık maksimum serinin standart sapmasını ifade etmektedir.

Gumbel dağılımının konum parametresi ise şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\mu = \bar{x} - 0,5772 \times \sigma$$

Burada μ Gumbel konum parametresini, $\bar{x}$ yıllık maksimum serinin ortalamasını, σ ölçek parametresini göstermektedir. 0,5772 katsayısı Euler–Mascheroni sabitidir ve Gumbel dağılımının teorik beklenen değer ilişkisinden kaynaklanmaktadır. Konum parametresi tipik yıllık maksimum düzeyi, ölçek parametresi ise uç değerlerin değişkenliğini temsil etmektedir.

Tetikleyici aşılma olasılığı, her tetikleyici için tanımlanan bölgesel eşik değerinin belirli bir senaryo içinde en az bir kez aşılma olasılığı olarak hesaplanmıştır. Öncelikle seçilen eşik değeri için Gumbel kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılmıştır:

Gumbel kümülatif dağılım fonksiyonu:

$$F(xc) = \exp\{-\exp[-(xc - \mu) / \sigma]\}$$

Burada x_c , ilgili tetikleyici için tanımlanan bölgesel eşik değerini; μ ve σ ise piksel bazlı Gumbel parametrelerini göstermektedir. $F(x_c)$, bir yılda ilgili eşğin aşılma olasılığını ifade eder.

Buna bağlı olarak N yıllık senaryo ufkunda eşğin en az bir kez aşılma olasılığı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

N yıllık senaryo ufkunda aşılma olasılığı:

$$P_T = 1 - [F(x_c)]^N$$

Bu formülde P_T , seçilen tetikleyici eşğinin N yıl içinde en az bir kez aşılma olasılığıdır. Çalışmada 5, 10 ve 50 yıllık senaryolar değerlendirilmiş ve nihai tehlike haritası için 50 yıllık senaryo esas alınmıştır. Bu değerler dönüş periyodu doğrudan yorumu olarak değil, belirli bir planlama dönemi içinde hidro-meteorolojik eşğin aşılma olasılığı olarak değerlendirilmiştir.

Tetikleyici eşikleri, her piksel için ayrı ayrı değil, çalışma alanı ortalaması alınmış yıllık maksimum serilerin 95. yüzdilik değerine (Q95) göre bölgesel sabit eşik olarak tanımlanmıştır. Bu tercih, Marmara Bölgesi içinde farklı piksellerin aynı hidro-meteorolojik ekstrem referansına göre karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle kullanılan eşikler, yerel heyelan başlama eşikleri olarak değil, bölgesel ölçekte karşılaştırılabilir hidro-meteorolojik ekstrem referans değerleri olarak yorumlanmıştır.

Son aşamada, piksel bazlı tetikleyici aşılma olasılığı yüzeyleri, GAM tabanlı görelî heyelan duyarlılık katmanı ile birleştirilmiştir. Böylece nihai çıktı, duyarlılık koşulları ile hidro-meteorolojik tetikleyici koşulların birlikte değerlendirildiği görelî heyelan tehlike indeksi olarak üretilmiştir.

3.4 Belirsizlik Yönetimi ve İstatistiksel Hata Payları

Bu çalışmada belirsizlik, duyarlılık ve tehlike analizlerinin farklı aşamalarında ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Duyarlılık analizinde belirsizlik öncelikle modelin tahmin performansı, alt örneklemeler üzerindeki kararlılığı ve mekânsal genellenebilirliği üzerinden ele alınmıştır. Bu kapsamda modelin eğitim verisindeki AUC değeri 0,834 olarak hesaplanmış ve rastgele 5 katlı çapraz doğrulamada ortalama AUC değeri $0,826 \pm 0,021$ olarak elde edilmiştir. Eğitim ve çapraz doğrulama sonuçlarının birbirine yakın olması, modelin eğitim verisine aşırı uyum göstermediğini ve genel olarak kararlı bir sınıflandırma performansı sunduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, mekânsal blok çapraz doğrulamada (*spatial block cross-validation*) AUC değerinin 0,783'e düşmesi, modelin coğrafi olarak ayrılmış alanlara aktarıldığında belirli ölçüde performans kaybı yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, heyelan verilerinin mekânsal kümelenme eğilimi ve çevresel değişkenlerin mekânsal otokorelasyon yapısı dikkate alındığında beklenen bir sonuçtur. Ayrıca

model artıklarında hesaplanan Moran's I değerinin pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı olması, artık mekânsal otokorelasyonun tamamen giderilemediğini göstermektedir. Bu nedenle duyarlılık modeli, güçlü bir ayırt etme kapasitesine sahip olmakla birlikte, sonuçları mekânsal genellenebilirlik ve artık otokorelasyon sınırlılıklarıyla birlikte yorumlanmıştır.

Duyarlılık modelindeki değişken etkilerine ilişkin belirsizlik, GAM modelinde yer alan doğrusal olmayan değişken etkilerinin güven aralıkları, parametrik katsayıların standart hataları ve kategorik değişkenlerdeki sınıf örneklem büyüklükleri üzerinden değerlendirilmiştir. Özellikle düşük örneklemlili arazi örtüsü/kullanımı ve litoloji sınıflarında katsayıların güven aralıkları genişleyebildiğinden, bu sınıflara ait sonuçlar güçlü süreç yorumu üretmekten çok tamamlayıcı istatistiksel bulgu olarak ele alınmıştır. Bu yaklaşım, modelin yalnızca anlamlılık değerlerine dayalı değil, aynı zamanda tahmin kararlılığı ve veri desteği dikkate alınarak yorumlanmasını sağlamıştır.

Tehlike analizinde başlıca belirsizlik kaynakları ERA5-Land hidro-meteorolojik verisinin mekânsal çözünürlüğü, yıllık maksimum serilerin uzunluğu, Gumbel-MOM parametre kestirimi, bölgesel eşik yaklaşımı ve tetikleyici bileşenin duyarlılık katmanı ile birleştirilmesinden kaynaklanmaktadır. ERA5-Land verisi, bölgesel ölçekte tutarlı ve sürekli bir hidro-meteorolojik veri altyapısı sunmakla birlikte, yerel ve kısa süreli yağış şiddetlerini noktasal ölçüm hassasiyetinde temsil etmez. Bu nedenle tehlike çıktıları, yerel yağış eşiğine dayalı mutlak tetiklenme olasılıkları olarak değil, bölgesel ölçekte karşılaştırılabilir göreceli hidro-meteorolojik tetikleyici koşullarını yansıtan katmanlar olarak değerlendirilmiştir.

Uç değer analizinde her piksel için 1990–2025 dönemini kapsayan 36 yıllık maksimum seriler kullanılmıştır. Bu uzunluk, bölgesel ölçekli senaryo tabanlı tehlike haritalaması için işlevsel olmakla birlikte, uç değer parametrelerinin belirsizliğini tamamen ortadan kaldırmaz. Bu nedenle Gumbel dağılımı Momentler Yöntemi ile uygulanmış; dağılım seçimi, tüm çalışma alanında tutarlı, tekrarlanabilir ve hesaplama açısından kararlı bir çerçeve sağlamak amacıyla yapılmıştır. Eşikler ise her piksel için ayrı ayrı değil, çalışma alanı ortalamalı yıllık maksimum serilerin 95. yüzdeleri değerine göre bölgesel sabit eşik olarak tanımlanmıştır. Bu tercih, mekânsal karşılaştırılabilirliği güçlendirmektedir.

Zamansal doğrulama aşamasında ise tarihi bilinen 663 heyelan olayı kullanılarak hidro-meteorolojik tetikleyici serilerin olay yıllarıyla uyumu değerlendirilmiştir. Bu analiz, özellikle 3 günlük kümülatif yağmur (RAIN_3d) değişkeninin diğer tetikleyicilere göre daha güçlü ve tutarlı bir sinyal verdiğini göstermiştir. Bununla birlikte, tarihli olayların tüm heyelan envanterini ne ölçüde temsil ettiği, ERA5-Land verisinin yerel yağış şiddetlerini ne kadar yakalayabildiği ve olay olmayan yıl sayısının sınırlı olması gibi faktörler, zamansal doğrulama sonuçlarının dikkatli yorumlanmasını gerektirmektedir. Bu nedenle zamansal doğrulama, nihai tehlike modelini destekleyen tamamlayıcı bir kanıt olarak

değerlendirilmiş ve tek başına kesin tetikleyici eşik kalibrasyonu olarak yorumlanmamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada belirsizlik yalnızca istatistiksel hata payı olarak değil; veri çözünürlüğü, örneklem yapısı, model genellenebilirliği, kategorik sınıf dengesi, uç değer parametre kestirimi, bölgesel eşik seçimi ve zamansal doğrulama kapasitesiyle birlikte ele alınmıştır. Bu yaklaşım, üretilen duyarlılık ve tehlike haritalarının karar destek süreçlerinde kullanılabilirliğini artırmakta ve aynı zamanda çıktıların mutlak olasılık haritası değil, göreceli önceliklendirme ve tehlike değerlendirme katmanı olarak yorumlanmasını sağlamaktadır.

4 BÖLÜM 3 — GEREKLİ CBS/GIS VERİ SETLERİ

4.1 Temel Veri Katmanları

Heyelan duyarlılık ve tehlike analizinde kullanılan veri katmanları; topoğrafik-jeomorfolojik, jeolojik/yapısal, hidro-klimatik, antropojenik ve tetikleyici değişkenler olmak üzere beş ana grupta değerlendirilmiştir. Bu sınıflama, değişkenlerin yalnızca veri türlerine göre değil, heyelan oluşum sürecindeki işlevlerine göre de ayrıştırılmasını amaçlamaktadır. Duyarlılık modelinde kullanılan değişkenler, yamaçların mekânsal olarak heyelan üretme potansiyelini açıklayan hazırlayıcı koşulları temsil ederken; tehlike aşamasında kullanılan tetikleyici değişkenler, belirli yağış eşiklerinin zaman içinde aşılma olasılığını tanımlamaktadır. Çalışmada kullanılan değişkenlerin listesi, analiz aşaması ve fiziksel anlamları Tablo 4-1’de özetlenmiştir.

Heyelan duyarlılık ve tehlike analizinde kullanılan veri katmanları; topoğrafik-jeomorfolojik, jeolojik/yapısal, hidro-klimatik, antropojenik ve tetikleyici değişkenler olmak üzere beş ana grupta değerlendirilmiştir. Risk analizinde kullanılan nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi verileri ise risk altındaki unsur katmanları olarak ayrı bir veri grubu altında ele alınmıştır. Bu sınıflama, değişkenlerin yalnızca veri türlerine göre değil, heyelan oluşum sürecindeki işlevlerine göre de ayrıştırılmasını amaçlamaktadır. Duyarlılık modelinde kullanılan değişkenler, yamaçların mekânsal olarak heyelan üretme potansiyelini açıklayan hazırlayıcı koşulları temsil ederken; tehlike aşamasında kullanılan tetikleyici değişkenler, belirli yağış eşiklerinin zaman içinde aşılma olasılığını tanımlamaktadır. Risk altındaki unsur katmanları ise heyelan tehlikesinden etkilenebilecek nüfusun, yapı stoğunun, ulaşım altyapısının ve tarım arazilerinin mekânsal dağılımını temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan değişkenlerin listesi, analiz aşaması ve fiziksel anlamları Tablo 4-1’de özetlenmiştir.

Tablo 4-1 MARAP heyelan duyarlılık-tehlike analizinde kullanılan değişkenler ve anlamları

Kategori	Değişken	Fiziksel Anlamı
Topoğrafik / Jeomorfolojik	Eğim	Eğim (°). Yerçekimi etkisiyle oluşan kayma gerilmesini ve şev duraylılığını doğrudan kontrol eden temel topoğrafik parametredir.
	TWI	Topografik nemlilik indeksi. Suyun yamaç yüzeyinde toplanma, yüzey altına sızma ve yerel doyumluk oluşturma eğilimini temsil eder.
Jeolojik	Litoloji	Jeolojik/kayaç birim sınıfı. Kayaç türü, dayanım, ayrışma direnci, geçirimsizlik ve süreksizlik özellikleri gibi heyelan duyarlılığını etkileyen jeolojik koşulları temsil eder.
	Faya uzaklık	Faya en yakın mesafe (m). Tektonik deformasyon zonlarını, kırık-çatlak yoğunluğunu, yapısal zayıflık alanlarını ve kaya kütlesi dayanımındaki mekânsal farklılıkları dolaylı olarak yansıtır.
Hidro-Meteorolojik	ERA5-Land yıllık toplam yağış	ERA5-Land günlük toplam yağış verilerinden türetilen yıllık toplam yağış miktarı (mm). Bölgenin uzun dönemli hidro-klimatik koşullarını, ortalama su girdisini ve yamaç sistemlerinin genel nemlilik/doyumluk potansiyelini temsil eder. Duyarlılık modelinde iklimsel arka plan değişkeni olarak kullanılmıştır.
Hidrografik	Akarsuya uzaklık	Akarsuya en yakın mesafe (m). Akarsu topuk aşındırması, drenaj yakınlığı, yerel doyumluk ve yamaç tabanı stabilitesindeki değişimlerin mekânsal göstergesidir.
Antropojenik	Yola uzaklık	Yola en yakın mesafe (m). Yol yapımına bağlı kazı, dolgu, şev geometrisi değişimi, drenaj düzeninin bozulması ve insan kaynaklı yamaç müdahalesinin mekânsal etkisini temsil eder.
	Arazi örtüsü/kullanımı	CORINE Level 2 arazi örtüsü/kullanımı sınıfı. Doğal bitki örtüsü, tarım alanları, kentsel alanlar, endüstriyel alanlar ve diğer insan etkili yüzey özelliklerini birlikte temsil eder.
Hidro-meteorolojik / Tetikleyici	ERA5-Land yağış ve kar erimesi türevleri	1990–2025 dönemine ait günlük ERA5-Land verilerinden türetilen kısa ve orta süreli yağmur birikimi ile yağmur–kar erimesi birleşik su girdisini temsil eder. Bu değişken grubu, ani yağış, birkaç günlük yağış birikimi, zemin doyumluğu ve kar erimesine bağlı ek sıvı su girdisinin heyelan tehlikesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır.

4.2 Her Veri Seti İçin Teknik Bilgiler

Bu çalışmada kullanılan veri setleri, duyarlılık ve tehlike analizlerinin farklı gereksinimlerine hizmet edecek biçimde yapılandırılmıştır. Duyarlılık analizinde, heyelan var/yok bilgisini topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, arazi örtüsü ve antropojenik değişkenlerle ilişkilendiren hücre temelli bir örneklem veri seti kullanılmıştır. Tehlike analizinde ise 1990–2025 dönemini kapsayan ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden türetilen yağış, kar yağışı ve kar erimesi bileşenleri esas alınmıştır. Bu verilerden kısa ve orta süreli yağmur birikimi ile yağmur–kar erimesi kaynaklı etkili su girdisini temsil eden yıllık maksimum tetikleyici serileri üretilmiştir. Risk analizinde ise nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanları kullanılmış ve bu katmanlar ortak bir bileşik unsur indeksinin oluşturulmasına uygun biçimde hazırlanmıştır. Buna ek olarak, topoğrafik, jeolojik, hidro-meteorolojik ve antropojenik raster katmanlar ile risk altındaki unsur verileri, ortak bir analiz ızgarasına uyumlaştırılarak model girdisi haline getirilmiştir.

4.2.1 Heyelan Envanteri ve Duyarlılık Veri Seti

Duyarlılık modeli, heyelanlı ve heyelansız hücrelerin yaklaşık dengeli biçimde örneklediği toplam 5.041 nokta üzerinden kurulmuştur. Bu örneklemin 2.467'si heyelanlı hücre ($y = 1$), 2.574'ü ise heyelan olmayan hücre ($y = 0$) olarak tanımlanmıştır. Yaklaşık dengeli örneklem yapısı, modelin yalnızca çoğunluk sınıfına yönelmesini sınırlandırmış ve AUC, sensitivity/gerçek pozitif oranı, özgüllük (specificity) ve dengeli doğruluk (balanced accuracy) gibi performans ölçütlerinin daha güvenilir biçimde yorumlanmasına katkı sağlamıştır.

Çalışma alanı Marmara Bölgesi'ni kapsamakta olup duyarlılık veri seti, ortak analiz ızgarasına uyumlaştırılmış raster katmanlardan türetilmiştir. Topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, arazi örtüsü/kullanımı ve antropojenik değişkenler, heyelan var/yok bilgisiyle aynı hücre temelli örneklem yapısında birleştirilmiştir. Analizde kullanılan raster katmanlar 50 m mekânsal çözünürlükte değerlendirilmiştir (Tablo 4-2).

Tablo 4-2 Duyarlılık modelinde kullanılan veri seti tanımı.

Kategori	Değer
Toplam örnek sayısı (n)	5.041
Heyelan noktası ($y = 1$)	2.467 (%48,9)
Heyelan olmayan nokta ($y = 0$)	2.574 (%51,1)
Piksel çözünürlüğü	50 m
Çalışma alanı	Marmara Bölgesi

4.2.2 Hidro-Meteorolojik Veri Seti

Tehlike analizinde, 1990–2025 dönemini kapsayan günlük ERA5-Land hidro-meteorolojik verileri kullanılmıştır. Veri seti; toplam yağış, yağmur, kar yağışı ve kar

erimesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Günlük yağmur verisi, sıvı yağış girdisini; kar yağışı ve kar erimesi verileri ise özellikle yüksek kotlu ve kar etkisinin görüldüğü alanlarda zemine ulaşan ek su girdisini temsil etmektedir. Bu veri yapısı, yalnızca ortalama hidro-klimatik koşulları değil, heyelanları tetikleyebilecek kısa ve orta süreli ekstrem su girdilerini de değerlendirmeye olanak sağlamıştır (Tablo 4-3).

Duyarlılık modelinde ERA5-Land günlük toplam yağış verilerinden türetilen yıllık toplam yağış değişkeni, bölgenin uzun dönemli hidro-klimatik arka plan koşullarını temsil etmek üzere kullanılmıştır. Tehlike modelinde ise günlük yağmur ve kar erimesi verilerinden yıllık maksimum tetikleyici serileri üretilmiştir. Bu kapsamda 1 günlük, 3 günlük ve 7 günlük yağmur birikimleri ile 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik su girdisi değerlendirilmiştir. Böylece kısa süreli şiddetli yağış, birkaç günlük yağış birikimi, zemin doygunluğu ve kar erimesine bağlı ek sıvı su girdisinin heyelan tehlikesi üzerindeki rolü birlikte ele alınmıştır.

Tehlike modeli çıktıları, noktasal yağış ölçümüne dayalı yerel eşik haritaları olarak değil, bölgesel ölçekte karşılaştırılabilir göreceli hidro-meteorolojik tetikleyici koşullarını temsil eden katmanlar olarak yorumlanmıştır.

Tablo 4-3 Hidro-meteorolojik veri seti ve tehlike analizindeki

Veri seti / değişken grubu	Dönem	Zamansal çözünürlük	Analizdeki kullanımı
ERA5-Land toplam yağış	1990–2025	Günlük	Yıllık toplam yağış değişkeninin türetilmesi; duyarlılık modelinde hidro-klimatik arka plan koşulu
ERA5-Land yağmur	1990–2025	Günlük	1, 3 ve 7 günlük yağmur birikimlerinden yıllık maksimum tetikleyici serilerinin üretilmesi
ERA5-Land kar yağışı	1990–2025	Günlük	Yağmur–kar ayrımının yapılması ve kar etkili alanların değerlendirilmesi
ERA5-Land kar erimesi	1990–2025	Günlük	Kar erimesine bağlı ek sıvı su girdisinin ve yağmur–kar erimesi birleşik tetikleyici göstergesinin hesaplanması
Türetilmiş yıllık maksimum seriler	1990–2025	Yıllık maksimum	Kısa ve orta süreli hidro-meteorolojik tetikleyici koşulların tehlike modeline aktarılması

4.2.3 Diğer Raster Girdileri

Duyarlılık modelinde kullanılan çevresel raster girdiler, Marmara Bölgesi için ortak analiz gridine uyumlaştırılmış hücre tabanlı veri katmanlarından oluşmaktadır. Sürekli değişkenler arasında eğim, topografik nemlilik indeksi (TWI), ERA5-Land verilerinden türetilen yıllık toplam yağış, faya uzaklık, akarsuya uzaklık ve yola uzaklık yer almaktadır. Kategorik değişkenler ise litoloji ve CORINE Level 2 arazi örtüsü/kullanımı sınıfı olarak modele dahil edilmiştir.

Tüm raster katmanlar, duyarlılık modeli için kullanılan 50 m çözünürlüklü analiz gridine göre yeniden örneklenmiş ve aynı hücre yapısında birleştirilmiştir. Böylece heyelan var/yok bilgisi ile topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, arazi örtüsü ve antropojenik değişkenler aynı mekânsal referans içinde değerlendirilmiştir. Sürekli değişkenlerde hücre boyutu, çalışma alanı sınırı, grid hizalaması ve projeksiyon tutarlılığı sağlanmış; kategorik katmanlarda ise sınıf kodlarının model eğitiminde kullanılan sınıf seviyeleriyle uyumlu olmasına dikkat edilmiştir.

Bu uyumlaştırma işlemi özellikle litoloji ve arazi örtüsü/kullanımı verileri için kritik önemdedir. Çünkü kategorik sınıf kodlarının eğitim veri setindeki kodlarla farklılaşması, tahmin aşamasında hatalı sınıf eşleşmesine ve yanlış duyarlılık değerlerinin üretilmesine yol açabilir. Bu nedenle tüm raster girdiler, model değişken adları ve sınıf kodlarıyla uyumlu olacak şekilde standardize edilmiş veri katmanları olarak kullanılmıştır.

Risk analizinde kullanılan karayolu ve arazi örtüsü/kullanımı verileri, duyarlılık modelindeki benzer değişkenlerden kavramsal ve işlevsel olarak ayrılmaktadır. Duyarlılık modelinde yola uzaklık, yol yapımı ve yamaç müdahalelerinin heyelan oluşum koşulları üzerindeki etkisini temsil ederken; risk analizinde karayolu katmanı, her hücrede bulunan yol uzunluğunu ve tehlikeye maruz ulaşım altyapısını göstermektedir. Benzer şekilde arazi örtüsü/kullanımı duyarlılık modelinde çevresel ve antropojenik koşulları açıklayan kategorik bir değişken olarak kullanılırken; risk analizinde CORINE Level 2 verisinden türetilen tarım arazisi katmanı, risk altındaki ekonomik ve tarımsal varlıkların mekânsal dağılımını temsil etmektedir.

4.2.4 Risk altındaki unsur veri setleri

Risk analizinde kullanılan risk altındaki unsurlar; nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi olmak üzere beş veri katmanından oluşmaktadır. Bu katmanlar farklı veri kaynaklarından ve farklı geometrik yapılardan elde edildiği için, risk hesabı öncesinde tehlike modeliyle aynı mekânsal referansa ve yaklaşık 50 m çözünürlüklü ortak analiz ızgarasına dönüştürülmüştür.

Nüfus katmanı, Türkiye İstatistik Kurumunun 2024 yılı 1 km çözünürlüklü nüfus gridinden türetilmiştir. Nüfusun 1 km hücreler içinde homojen dağıldığının kabul edilmesi, yerleşim bulunmayan dik yamaçlara ve doğal alanlara gerçek dışı nüfus dağılımına neden olabileceğinden, değerler bina kat alanına orantılı dasimetrik dağıtım yöntemiyle 50 m hücrelere aktarılmıştır (Garcia vd., 2016). Bu işlem sonucunda çalışma alanı içinde toplam 26.357.070 kişi dağıtılmış ve kaynak toplam ile raster toplam arasındaki korunum farkı %0,0000 olarak hesaplanmıştır.

Bina (Yapı) katmanı, Mekânsal Adres Kayıt Sistemi kaynaklı bina verilerinden oluşturulmuştur. Her bina için taban alanı ile zemin üstü kat sayısının çarpılmasıyla bina kat alanı hesaplanmıştır. Küçük yapılar merkez noktasına dayalı, analiz hücresinden büyük yapılar ise poligon kapsama oranına dayalı hibrit rasterizasyon yaklaşımıyla işlenmiştir. Raster katmanda toplam 1.912,1 km² bina kat alanı temsil edilmiştir.

Karayolu ve demiryolu verileri çizgi geometrisinden raster yapıya dönüştürülmüş ve her 50 m hücre içinde bulunan gerçek hat uzunluğu metre cinsinden hesaplanmıştır. Çalışma alanı içinde toplam 41.415,9 km karayolu ve 2.296,5 km demiryolu risk altındaki unsur olarak değerlendirilmiştir.

Tarım arazisi katmanı, CORINE Level 2 arazi örtüsü/kullanımı verisinden seçilen tarımsal ve ekonomik faaliyet sınıflarından türetilmiştir. Seçilen sınıflar ortak analiz izgarasına alan ortalaması yaklaşımıyla aktarılmış ve her hücrede söz konusu kullanımların kapladığı alan oranını gösteren 0–1 aralığında sürekli bir yüzey elde edilmiştir. Kentsel doku, nüfus ve bina katmanlarıyla tekrara neden olmaması amacıyla; orman ve diğer doğal örtü sınıfları ise bu çalışmada risk altındaki ekonomik varlık olarak değerlendirilmediği için katmana dâhil edilmemiştir.

Risk altındaki unsur katmanları doğrudan karşılaştırılabilir birimlere sahip değildir. Nüfus kişi, bina kat alanı metrekaare, ulaşım katmanları metre ve tarım arazisi alan oranı cinsinden temsil edilmektedir. Bu nedenle söz konusu katmanlar risk hesabı öncesinde normalize edilmiş ve eşit ağırlıklı doğrusal birleşim yoluyla bileşik unsur indeksine dönüştürülmüştür. Normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemleri Bölüm 4'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

4.2.5 Model çıktısı ile veri setleri arasındaki ilişki

Bu veri setleri birlikte değerlendirildiğinde, modelleme süreci **üç** tamamlayıcı bileşen üzerinden yapılandırılmıştır. İlk aşamada, hücre bazında heyelan var/yok bilgisi ile topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, arazi örtüsü/kullanımı ve antropojenik değişkenler arasında istatistiksel ilişki kurulmuş; bu ilişki sonucunda göreceli heyelan duyarlılık katmanı (S_L) üretilmiştir. Bu katman, çalışma alanı içinde heyelan oluşumuna elverişli zemin ve çevresel koşulların mekânsal dağılımını temsil etmektedir.

İkinci aşamada, ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden türetilen yıllık maksimum yağmur ve yağmur–kar erimesi serileri kullanılarak tetikleyici bileşen değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kısa ve orta süreli yağış birikimi ile etkili su girdisini temsil eden hidro-meteorolojik göstergelerden senaryo tabanlı aşılma olasılıkları (P_T) hesaplanmıştır. Böylece model, yalnızca heyelanın nerede meydana gelebileceğini değil, aynı zamanda hidro-meteorolojik tetikleyici koşulların göreceli tehlike düzeyini nasıl değiştirdiğini de değerlendirebilecek bir yapıya kavuşturulmuştur.

Nihai tehlike çıktısı, duyarlılık bileşeni ile hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenin birlikte değerlendirilmesiyle üretilen göreceli heyelan tehlike indeksidir. Bu çıktı mutlak heyelan olasılığı olarak değil, Marmara Bölgesi içinde yüksek duyarlılık ve yüksek tetikleyici koşulların örtüştüğü alanları önceliklendiren bir karar destek katmanı olarak yorumlanmalıdır.

Üçüncü aşamada, nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanları normalize edilerek eşit ağırlıklı doğrusal birleşim yöntemiyle bileşik unsur

indeksi (C) oluşturulmuştur. Bileşik unsur indeksi, çalışma alanı içindeki nüfusun, yapı stoğunun, ulaşım altyapısının ve tarım arazilerinin görelî mekânsal yoğunluğunu temsil etmektedir.

Görelî heyelan risk indeksi, tehlike indeksi ile bileşik unsur indeksinin hücre bazında çarpılmasıyla hesaplanmıştır:

$$R = H \times C$$

Bu yapı, tehlikenin yüksek olduğu ancak risk altında herhangi bir unsurun bulunmadığı hücrelerde risk değerinin sıfır olmasını; tehlike ile risk altındaki unsurların aynı konumda örtüştüğü hücrelerde ise görelî risk değerinin yükselmesini sağlamaktadır. Dört hidro-meteorolojik tehlike senaryosu için ayrı risk yüzeyleri üretilmiş ve birincil risk ürünü olarak RAIN_3d 50 yıllık senaryosu esas alınmıştır.

Üretilen risk çıktıları mutlak can kaybı, ekonomik zarar veya yıllık kayıp olasılığı olarak yorumlanmamalıdır. Risk indeksi, Marmara Bölgesi içinde tehlike ile risk altındaki unsurların mekânsal olarak çakıştığı alanları karşılaştırmalı biçimde gösteren görelî bir karar destek katmanıdır. Risk çıktısının güvenilirliği bileşen bazında değerlendirilmiş ve tehlike katmanı bağımsız heyelan envanteriyle doğrulanmış, risk altındaki unsur katmanlarında ise veri korunum ve tutarlılık kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Risk düzeyinde doğrudan doğrulama, mekânsal olarak konumlandırılmış hasar, ekonomik kayıp veya can kaybı verisi bulunmadığı için uygulanmamıştır.

5 BÖLÜM 4 — CBS TABANLI TEKNİK İŞ AKIŞI

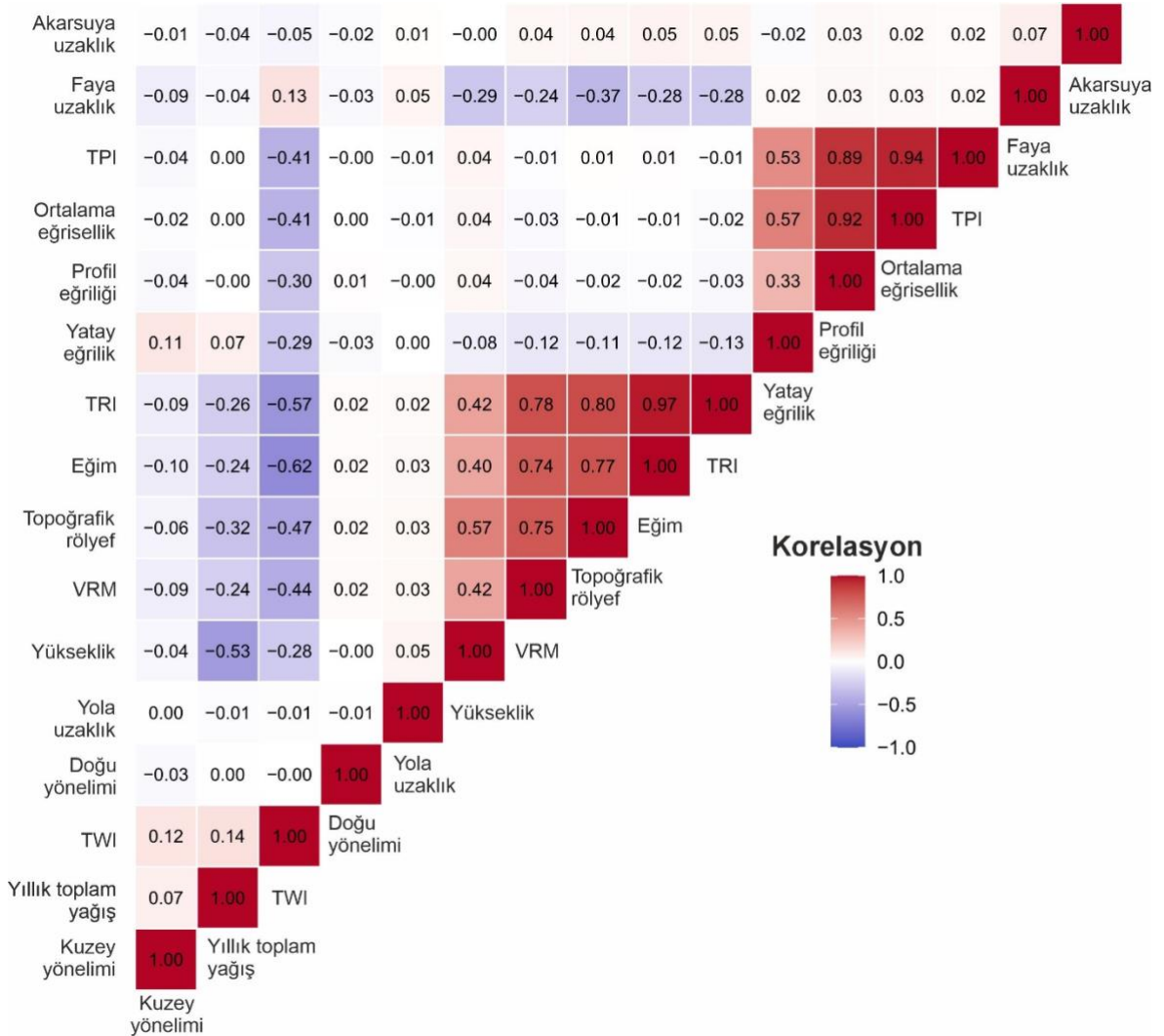
5.1 Veri hazırlık aşaması

Veri hazırlık aşamasında, duyarlılık analizinde kullanılan sürekli değişkenler arasındaki tekrar eden bilgi içeriğini belirlemek amacıyla Spearman korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Korelasyon matrisi, özellikle eğim, arazi pürüzlülük indeksi (Terrain Ruggedness Index, TRI), topoğrafik rölyef ve vektörel engebellik ölçütü (Vector Ruggedness Measure, VRM) arasında yüksek düzeyli bağıllık; ayrıca topoğrafik konum indeksi (Topographic Position Index, TPI), ortalama eğrisellik ve profil eğriselliği arasında güçlü örtüşme olduğunu göstermiştir. Bu durum, bazı topoğrafik türevlerin aynı morfometrik sinyali tekrar ettiğine işaret etmektedir. Dolayısıyla aynı süreci temsil eden değişkenlerin tamamı birlikte modele dahil edilmemiş; daha açıklayıcı, daha kararlı ve daha yorumlanabilir bir değişken seti tercih edilmiştir (Şekil 5-1).

Bu değerlendirme sonucunda duyarlılık modelinde eğim, topoğrafik nemlilik indeksi (TWI), yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık, akarsuya uzaklık, arazi örtüsü/kullanımı sınıfı ve litoloji değişkenleri kullanılmıştır. Bu seçim hem çoklu bağlantı sorununu azaltmış hem de modelin daha yalın ve yorumlanabilir bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır. Başka bir ifadeyle, veri hazırlık aşamasında yapılan bu

eleme süreci yalnızca teknik bir ön işlem değil; model kararlılığı, tahmin güvenilirliği ve sonuçların fiziksel olarak yorumlanabilirliği açısından belirleyici bir metodolojik adımdır.

Risk analizi için kullanılan nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanları ise duyarlılık modelinin açıklayıcı değişkenlerinden ayrı bir veri akışı içinde hazırlanmıştır. Bu katmanlar tehlike modelinde kullanılan ortak 50 m analiz ızgarasına uyumlaştırılmış; hücre boyutu, mekânsal kapsam, projeksiyon, grid hizalaması ve çalışma alanı maskesi bakımından tutarlı hâle getirilmiştir. Risk altındaki unsur katmanları GAM modeline açıklayıcı değişken olarak dâhil edilmemiş, daha sonraki aşamada bileşik unsur indeksinin (C) oluşturulmasında kullanılmıştır. Kaynak verilerden raster yapıya dönüşüm sırasında nüfus, bina kat alanı ve ulaşım ağlarının toplam miktarlarının korunumu ayrıca kontrol edilmiştir.



Şekil 5-1 Sürekli değişkenler için Spearman korelasyon katsayıları.

5.2 Duyarlılık Analiz Adımları ve Sonuçları

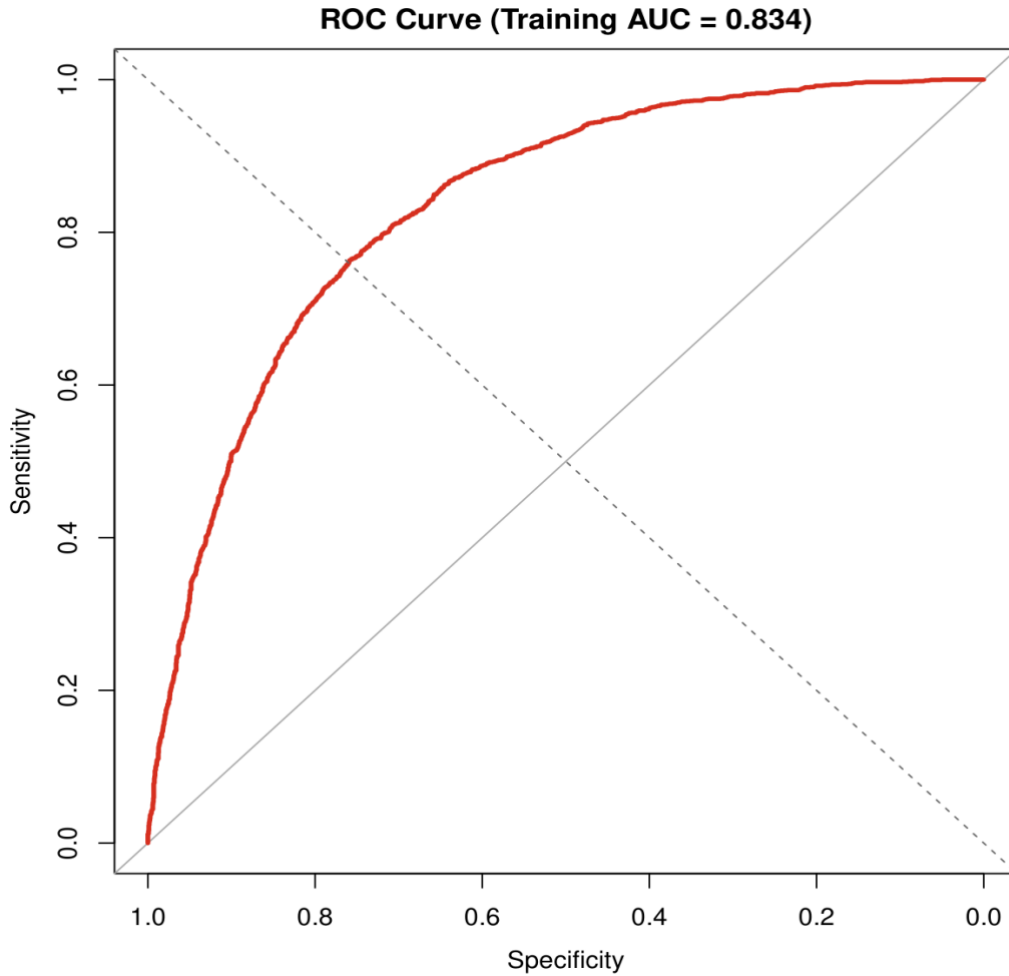
Nihai Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM), eğitim verisi üzerinde ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) bakımından 0,834 değerine ulaşmıştır (Şekil 5-2). Modelin genellenebilirliğini değerlendirmek amacıyla uygulanan 5 katlı rastgele çapraz doğrulama sonucunda ortalama AUC değeri 0,826, standart sapması ise 0,021 olarak hesaplanmıştır. Modelin mekânsal genellenebilirliğini daha muhafazakâr biçimde değerlendirmek amacıyla uygulanan mekânsal blok çapraz doğrulama sonucunda ise AUC değeri 0,783 olarak elde edilmiştir (Şekil 5-2). Modelin uyum, doğrulama ve mekânsal hata yapısı göstergeleri Tablo 5-1’de verilmiştir.

Tablo 5-1 GAM heyelan duyarlılık modelinin uyum, doğrulama ve mekânsal hata yapısı göstergeleri.

Metrik	Değer	Yorum
Eğitim AUC’si (Training AUC)	0,834	Eğitim verisinde güçlü ayırt etme kapasitesi göstermektedir.
5 katlı çapraz doğrulama AUC’si (5-fold CV AUC)	0,826 ± 0,021	Rastgele çapraz doğrulamada model performansının kararlı olduğunu göstermektedir.
Mekânsal blok çapraz doğrulama AUC’si (Spatial block CV AUC)	0,783	Mekânsal bağımlılık dikkate alındığında daha gerçekçi ve muhafazakâr performans değeridir.
Youden eşiği (Youden threshold)	0,532	Heyelan var/yok sınıflandırması için duyarlılık ve özgüllüğü birlikte dengeleyen eşiktir.
Gerçek pozitif oranı (Sensitivity)	0,764	Heyelan var sınıfının doğru yakalanma oranını göstermektedir.
Özgüllük / gerçek negatif oranı (Specificity)	0,758	Heyelan olmayan sınıfın doğru ayırt edilme oranını göstermektedir.
Dengeli doğruluk (Balanced accuracy)	0,761	Heyelan var ve heyelan yok sınıflarındaki başarının dengeli ortalamasını göstermektedir.
Cohen kappa katsayısı (Cohen’s κ)	0,522	Gözlenen ve tahmin edilen sınıflar arasında orta düzey uyuma işaret etmektedir.
Açıklanan sapma (Deviance explained)	%27,6	İkili heyelan var/yok modeli için makul düzeyde açıklayıcılık sağlamaktadır.
Düzeltilmiş R ² (Adjusted R ²)	0,332	Model uyumunu özetleyen tamamlayıcı bir göstergedir.
Artık Moran’s I değeri (Residual Moran’s I)	0,077 (p < 0,001)	Model artıklarında düşük fakat istatistiksel olarak anlamlı mekânsal otokorelasyon kaldığını göstermektedir.

Eğitim verisi AUC değeri ile rastgele çapraz doğrulama AUC değerleri arasındaki farkın sınırlı olması, modelin eğitim verisine aşırı uyum göstermediğini ve öğrenilen dağılımın farklı veri alt kümelerinde büyük ölçüde korunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, mekânsal blok çapraz doğrulama sonucunda AUC değerinin 0,783 düzeyine düşmesi beklenen ve önemli bir bulgudur. Çünkü bu yöntemde gözlemler rastgele değil, coğrafi bloklar halinde eğitim ve test kümelerine ayrılmakta; böylece modelin mekânsal olarak yakın gözlemler arasındaki benzerlikten kaynaklanabilecek iyimser performans etkisi azaltılmaktadır. Bu nedenle mekânsal blok çapraz doğrulama sonucu, modelin coğrafi olarak ayrılmış alanlara aktarılabilirliğini daha gerçekçi biçimde temsil etmektedir.

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, GAM tabanlı duyarlılık modelinin genel ayırt etme kapasitesinin güçlü olduğu, ancak model performansının mekânsal bağımlılık ve coğrafi genellenebilirlik koşulları altında kısmen azaldığı görülmektedir. Bu nedenle duyarlılık çıktısı, yüksek performanslı bir göreceli duyarlılık katmanı olarak kullanılabilir. Ancak, nihai yorumlarda mekânsal genellenebilirlik sınırlılığı ve artık mekânsal otokorelasyon olasılığı dikkate alınmalıdır.



Şekil 5-2 GAM modeli için ROC eğrisi (AUC = 0,834).

5.3 Eşik Analizi ve Sınıflandırma Performansı

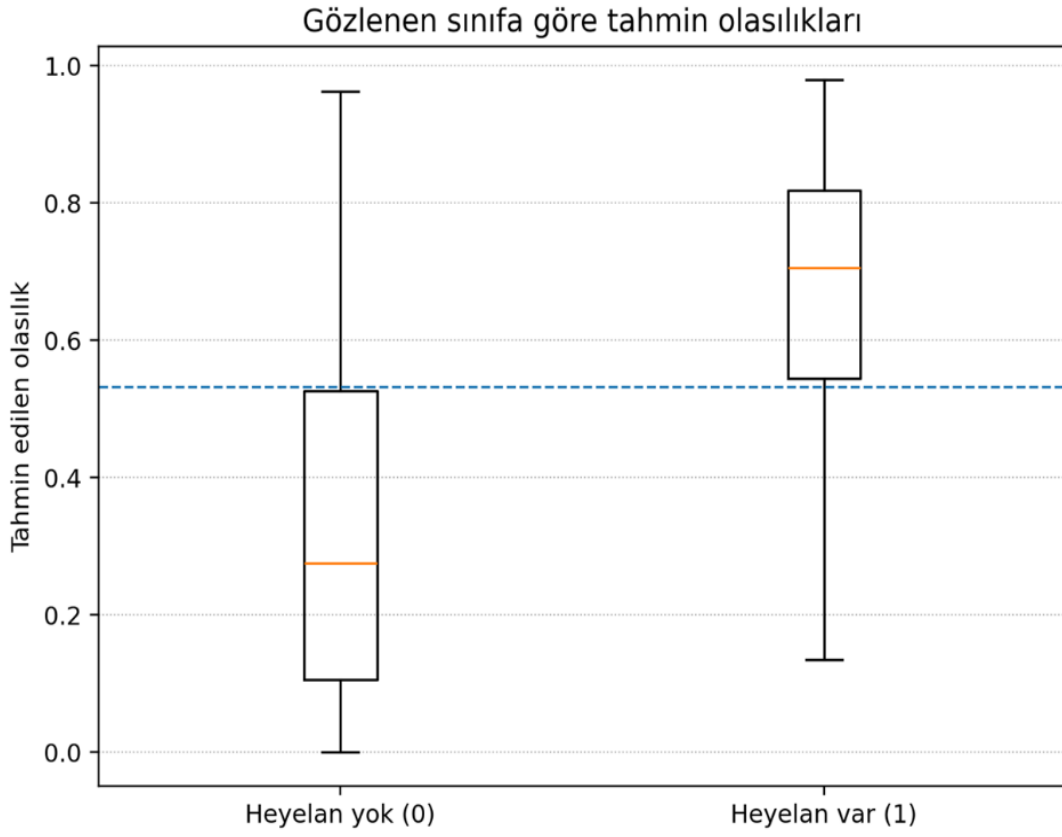
Eşik analizi kapsamında, Youden indeksine göre optimum sınıflandırma eşiği 0,532 olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri, heyelan var ve heyelan yok sınıflarının birlikte en dengeli biçimde ayrılmasını amaçlamaktadır. Belirlenen eşik altında modelin gerçek pozitif oranı (*sensitivity*) 0,764, özgüllük değeri (*specificity*) 0,758, genel doğruluğu (*accuracy*) 0,761 ve dengeli doğruluğu (*balanced accuracy*) 0,761 olarak hesaplanmıştır. Pozitif tahmin değeri (*positive predictive value*) 0,752, negatif tahmin değeri (*negative predictive value*) ise 0,770'tir. Cohen kappa katsayısının 0,522 olması, gözlenen ve tahmin edilen sınıflar arasında orta düzeyde bir uyuma işaret etmektedir (Tablo 4).

Bu sonuçlar, modelin yalnızca heyelanlı hücreleri yakalamaya odaklanan tek taraflı bir sınıflandırma davranışı göstermediğini; heyelan var ve heyelan yok sınıflarını birbirine yakın başarı düzeyleriyle ayırabildiğini göstermektedir. Gerçek pozitif oranı ile özgüllük değerlerinin birbirine yakın olması, modelin yanlış negatif ve yanlış pozitif tahminler arasında görece dengeli bir yapı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, duyarlılık haritasının hem yüksek duyarlı alanların belirlenmesi hem de göreceli olarak daha düşük duyarlılığa sahip alanların ayrıştırılması açısından kullanılabilirliğini güçlendirmektedir.

Eşik analizi sonuçlarını desteklemek amacıyla, modelin heyelan var ve heyelan yok sınıfları için ürettiği tahmin olasılıkları ayrıca karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Bu değerlendirme, gözlenen sınıflar arasındaki olasılık ayrımı açısından da yorumlanmasına olanak sağlamaktadır.

Şekil 5-3, heyelan var sınıfına ait tahmin olasılıkları genel olarak daha yüksek değerlere yoğunlaşırken, heyelan yok sınıfına ait tahmin olasılıkları daha düşük değerlerde toplanmaktadır. Heyelan var sınıfında medyan tahmin olasılığının Youden eşiğinin üzerinde, heyelan yok sınıfında ise bu eşiğin altında kalması, modelin iki sınıfı genel olarak ayırt edebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte iki dağılım arasındaki örtüşme, modelin belirli düzeyde yanlış pozitif ve yanlış negatif tahminler ürettiğini de ortaya koymaktadır.

Bu sonuç, GAM çıktısının heyelan duyarlılık düzeyini gösteren sürekli bir olasılık yüzeyi olarak yorumlanması gerektiğini desteklemektedir. Dolayısıyla eşik değeri sınıflandırma performansını değerlendirmek için yararlı olmakla birlikte, nihai duyarlılık haritasının yorumlanmasında olasılık değerlerinin mekânsal sürekliliği ve göreceli büyüklüğü esas alınmalıdır.



Şekil 5-3 Gözlenen heyelan var/yok sınıflarına göre GAM modelinin tahmin ettiği heyelan olasılıklarının dağılımı. Kesikli çizgi, Youden indeksine göre belirlenen optimum sınıflandırma eşikini göstermektedir.

5.4 Sürekli Değişkenlerin Doğrusal Olmayan Etkileri

Nihai GAM modelinde yer alan altı sürekli değişkenin tamamı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu değişkenler; eğim, topografik nemlilik indeksi, yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık ve akarsuya uzaklıktır. GAM yaklaşımı, bu değişkenlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkilerini doğrusal bir ilişkiye zorlamadan, değişken değerleri boyunca kısmi etki eğrileri üzerinden değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Şekil 5-4'te verilen kısmi etki grafikleri logit ölçeğinde yorumlanmalıdır. Sıfır çizgisinin üzerindeki değerler ilgili değişken aralığında heyelan olasılığına pozitif, altındaki değerler ise negatif katkıyı göstermektedir.

Modelde en güçlü ve en belirgin doğrusal olmayan etki eğim değişkeninde görülmüştür ($edf = 6,31$; $\chi^2 = 415,53$; $p < 0,001$). Eğim değişkeninin ki-kare değeri, faya uzaklık ($\chi^2 = 100,82$), yola uzaklık ($\chi^2 = 84,33$) ve yıllık toplam yağış ($\chi^2 = 46,11$) gibi diğer sürekli değişkenlerden belirgin biçimde yüksektir (Tablo 5-2). Bu sonuç, eğimin modeldeki en baskın topoğrafik kontrol olduğunu göstermektedir. Kısmi etki eğrisi, düşük eğim değerlerinde heyelan olasılığına negatif katkı verirken, eğim arttıkça hızla yükselmekte ve orta-yüksek eğim aralığında en güçlü pozitif etkiye ulaşmaktadır. Çok yüksek eğim değerlerindeki zayıflama ise bu alanların daha az

temsil edilmesi ve güven aralığının genişlemesiyle birlikte değerlendirilmelidir. Bu nedenle bulgu, “çok dik yamaçlar daha güvenlidir” şeklinde değil; heyelan duyarlılığının düşük eğimlerden orta-yüksek eğimlere doğru belirgin biçimde arttığı şeklinde yorumlanmalıdır.

Topografik nemlilik indeksi (TWI), modelde istatistiksel olarak anlamlı ve orta düzeyde doğrusal olmayan bir etki göstermektedir ($edf = 3,46$; $\chi^2 = 25,66$; $p < 0,001$). Kısmi etki eğrisi, düşük TWI değerlerinde negatif katkı, düşük-orta TWI aralığında artan katkı ve yüksek TWI değerlerinde yeniden zayıflayan bir etki yapısı ortaya koymaktadır (Tablo 5-2). Bu bulgu, TWI'nin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisinin basit ve tek yönlü bir artış ilişkisiyle açıklanamayacağını; drenaj koşulları, yamaç konumu ve yerel nemlilik birikimiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

ERA5-Land verilerinden türetilen yıllık toplam yağış değişkeni modelde istatistiksel olarak anlamlıdır ($edf = 3,66$; $\chi^2 = 46,11$; $p < 0,001$). Bununla birlikte, kısmi etki eğrisinin genliği eğim ($\chi^2 = 415,53$), faya uzaklık ($\chi^2 = 100,82$) ve yola uzaklık ($\chi^2 = 84,33$) değişkenlerine kıyasla daha sınırlıdır (Tablo 5-2). Bu durum, yıllık toplam yağışın duyarlılık modelinde anlamlı bir hidro-klimatik arka plan değişkeni olduğunu, ancak tek başına en baskın ayrıştırıcı faktör olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Kısmi etki eğrisi, belirli yağış aralıklarında heyelan olasılığına katkının arttığını, daha yüksek yağış değerlerinde ise bu etkinin zayıfladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, yağış etkisinin Marmara Bölgesi'nde topoğrafik, jeolojik ve antropojenik koşullarla birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hale geldiğini göstermektedir.

Faya uzaklık değişkeni modelde güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir etki üretmiştir ($edf = 3,29$; $\chi^2 = 100,82$; $p < 0,001$). Ki-kare değeri bakımından eğim değişkeninden sonra en güçlü sürekli değişkenlerden biridir (Tablo 5-2). Kısmi etki eğrisi, faylara yakın alanlarda heyelan duyarlılığına katkının daha yüksek olduğunu, faya uzaklık arttıkça bu katkının düzenli biçimde azaldığını göstermektedir. Bu nedenle faya uzaklık, modelde jeolojik ve yapısal zayıflık koşullarını temsil eden önemli bir değişken olarak değerlendirilmiştir.

Yola uzaklık değişkeni de modelde istatistiksel olarak çok güçlü bir etkiye sahiptir ($edf = 0,99$; $\chi^2 = 84,33$; $p < 0,001$). Etkin serbestlik derecesinin yaklaşık 1 olması, bu değişkenin etkisinin doğrusal olmayan karmaşık bir yapıdan çok, yaklaşık doğrusal ve düzenli bir azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır (Tablo 5-2). Kısmi etki eğrisi, yola yakın alanlarda heyelan duyarlılığına katkının daha yüksek olduğunu, yoldan uzaklaştıkça bu etkinin azaldığını göstermektedir. Bu sonuç, yol yapımına bağlı şev kazıları, dolgu uygulamaları, drenaj düzeninin bozulması ve yamaç geometrisinin değiştirilmesi gibi insan kaynaklı müdahalelerin heyelan duyarlılığı üzerindeki etkisiyle uyumludur.

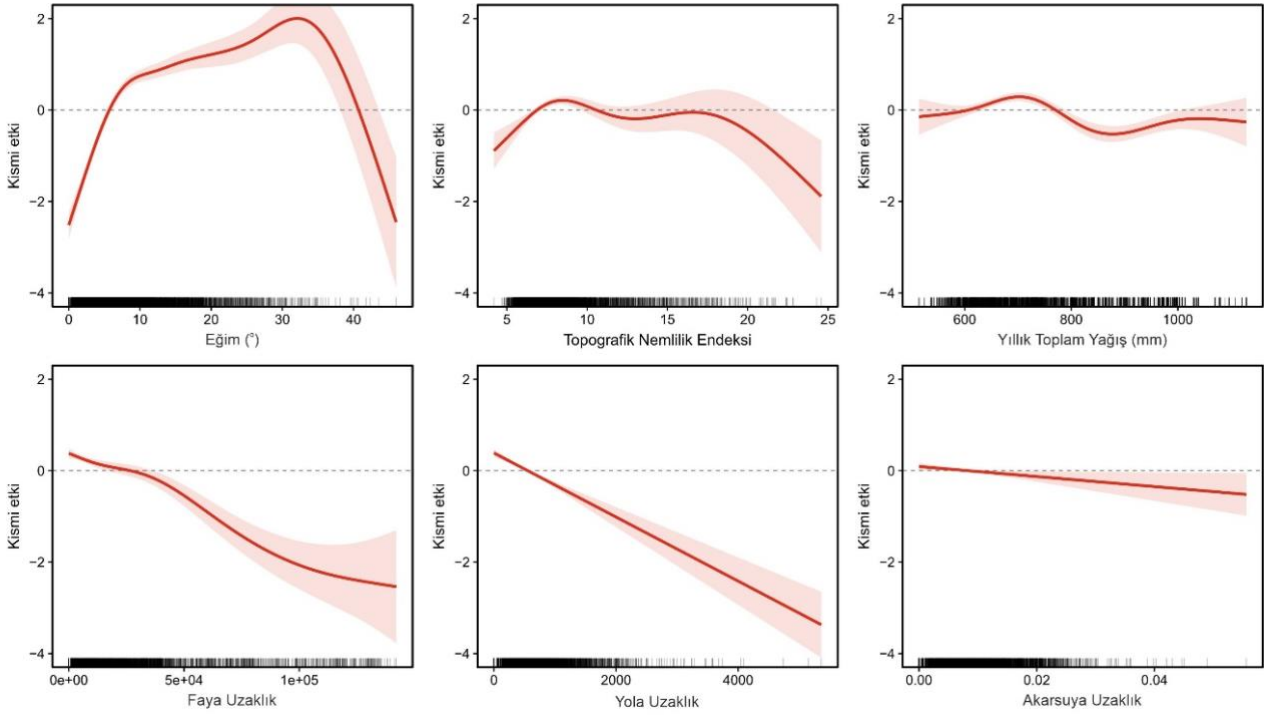
Akarsuya uzaklık değişkeni istatistiksel olarak anlamlı olmakla birlikte, sürekli değişkenler arasında en zayıf etkiye sahiptir ($edf = 0,83$; $\chi^2 = 4,88$; $p = 0,015$). Etkin

serbestlik derecesinin 1'in altında kalması ve kısmi etki eğrisinin düşük genlikli olması, bu değişkenin modelde sınırlı bir katkı sunduğunu göstermektedir (Tablo 5-2). Akarsuya uzaklık; drenaj yakınlığı, topuk aşındırması ve yerel doygunluk koşulları açısından süreç temelli olarak anlamlıdır. Ancak, bu modelde ana belirleyici değişkenler arasında değil, ikincil bir hidro-jeomorfolojik kontrol olarak değerlendirilmelidir.

Sürekli değişkenler birlikte değerlendirildiğinde, Marmara Bölgesi'nde heyelan duyarlılığının basit doğrusal ilişkilerle açıklanamayacağı görülmektedir. Eğim, faya uzaklık ve yola uzaklık modelde en güçlü ve süreçle en uyumlu etkileri üretirken; TWI ve ERA5-Land yıllık toplam yağış daha karmaşık ve orta düzeyde katkılar sunmaktadır. Akarsuya uzaklık ise istatistiksel olarak anlamlı olmakla birlikte düşük genlikli ve ikincil bir hidro-jeomorfolojik kontrol niteliğindedir (Şekil 5-4). Bu yapı, GAM yaklaşımının değişken değerleri boyunca farklılaşan doğrusal olmayan etki biçimlerini yakalama avantajını ortaya koymaktadır.

Tablo 5-2 GAM modelindeki sürekli değişken etkilerinin istatistiksel anlamlılığı ve yorumu.

Değişken	edf	Ki-kare (χ^2)	p-değeri	Önem düzeyi	Açıklama
Eğim	6,31	416	< 0,001	Yüksek	En güçlü ve en doğrusal olmayan etki.
TWI	3,46	25,66	< 0,001	Yüksek	Orta düzey, eşikli/nemlilik ilişkisi.
Yıllık yağış	3,65	46,11	< 0,001	Yüksek	Anlamlı ama sınırlı genlikli etki.
Faya uzaklık	3,29	101	< 0,001	Yüksek	Faya yakınlıkla artan duyarlılık.
Yola uzaklık	0,990	84,33	< 0,001	Yüksek	Yola yakınlıkla artan duyarlılık; neredeyse doğrusal.
Akarsuya uzaklık	0,830	4,88	0,015	Düşük	Zayıf fakat istatistiksel olarak anlamlı etki.



Şekil 5-4 Sürekli değişkenlerin heyelan duyarlılığı üzerindeki kısmi etkileri.

Şekildeki eğriler GAM modelinden elde edilen kısmi etkileri, gölgeli alanlar yaklaşık güven aralıklarını, yatay kesikli çizgi ise sıfır etki düzeyini göstermektedir. Y eksenini logit ölçeğindedir; sıfırın üzerindeki değerler heyelan olasılığına pozitif, altındaki değerler negatif katkıyı ifade etmektedir.

5.5 Kategorik Değişkenlerin Etkisi

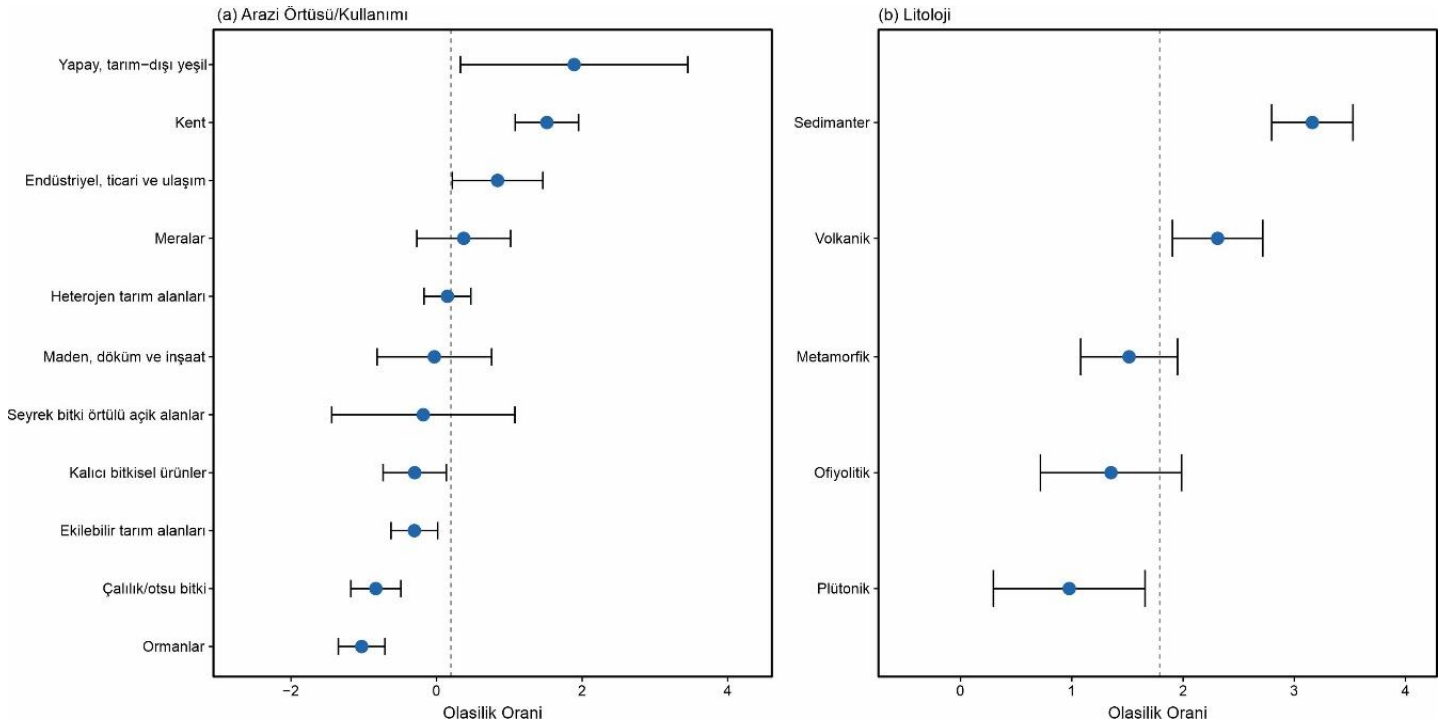
Kategorik değişkenlerin etkisi, arazi örtüsü/kullanımı ve litoloji sınıfları üzerinden değerlendirilmiştir (Şekil 5-5). Şekilde verilen noktalar her sınıf için modelden elde edilen tahmini etkiyi, yatay hata çubukları ise bu tahminlere ait belirsizlik aralığını göstermektedir. Dikey kesikli çizgi, yorum için kullanılan referans düzeyi temsil etmektedir. Bu nedenle sınıf etkileri, yalnızca nokta tahminlerine göre değil, hata aralıklarının referans düzeye göre konumu dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Arazi örtüsü/kullanımı sınıfları arasında en yüksek pozitif etki, yapay, tarım dışı yeşil alanlar, kent alanları ve endüstriyel, ticari ve ulaşım alanlarında görülmektedir. Bu sınıfların referans düzeyin üzerinde yer alması, insan etkisiyle dönüştürülmüş veya yapay yüzey niteliği taşıyan alanların modelde daha yüksek heyelan duyarlılığı ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, yüzey örtüsünün değiştirilmesi, drenaj düzeninin bozulması, kazı-dolgu faaliyetleri ve yamaç geometrisine yapılan müdahaleler gibi antropojenik süreçlerle uyumludur (Şekil 5-5-a).

Buna karşılık ormanlar ve çalılık/otsu bitki örtüsü sınıfları, şeklin alt bölümünde ve referans düzeyin belirgin biçimde altında konumlanmaktadır. Bu durum, bu

sınıfların modelde daha düşük göreceli heyelan duyarlılığı ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Ekilebilir tarım alanları ve kalıcı bitkisel ürünler de benzer şekilde negatif yönde etki üretmektedir. Bu sonuçlar, doğal veya yarı-doğal bitki örtüsünün bulunduğu alanların, modelde yapay ve yoğun insan etkisi altındaki sınıflara kıyasla daha düşük duyarlılık değerleriyle temsil edildiğini göstermektedir (Şekil 5-5-a).

Meralar, heterojen tarım alanları, maden, döküm ve inşaat alanları ile seyrek bitki örtülü açık alanlar ise daha ara konumda yer almakta ve bazı sınıflarda hata aralıkları referans düzeye yaklaşmaktadır (Şekil 5-5-a).



Şekil 5-5 Arazi örtüsü/kullanımı ve litoloji sınıflarının GAM modelindeki kategorik etkileri. Noktalar sınıf bazlı tahmini etkileri, yatay hata çubukları belirsizlik aralıklarını göstermektedir. Dikey kesik çizgi referans düzeyi ifade etmektedir.

Litoloji değişkeninde arazi örtüsüne kıyasla daha net bir ayrışma görülmektedir. Sedimanter birimler, modelde en yüksek pozitif etkiyi göstermekte ve diğer litolojik sınıflardan belirgin biçimde ayrılmaktadır. Bu sonuç, sedimanter kayaların heyelan duyarlılığı açısından daha elverişli koşullar sunabileceğini göstermektedir. Volkanik birimler de pozitif yönde etki üretmekte ve heyelan duyarlılığı ile ilişkili ikinci önemli litolojik grup olarak öne çıkmaktadır (Şekil 5-5-b).

Buna karşılık plütonik, ofiyolitik ve metamorfik birimler daha düşük etki düzeylerinde konumlanmaktadır. Bu sınıflarda hata aralıkları dikkate alındığında, sedimanter ve volkanik birimlerdeki kadar güçlü ve belirgin bir pozitif ayrışma görülmemektedir. Bu nedenle litoloji sonuçları içinde en güvenilir ve süreçle en uyumlu yorum, sedimanter ve volkanik birimlerin daha yüksek duyarlılık üretmesi üzerinden kurulmalıdır (Şekil 5-5-b).

Genel olarak değerlendirildiğinde, kategorik değişkenler içinde litoloji daha net ve süreçle daha doğrudan ilişkilendirilebilir bir ayrışma sunmaktadır. Arazi örtüsü/kullanımı ise özellikle yapay ve insan etkisi altındaki alanlar ile orman/çalılık gibi daha doğal örtü sınıfları arasında belirgin bir karşıtlık göstermektedir. Bununla birlikte arazi örtüsü sınıfları, sınıf içi heterojenlik ve bazı kategorilerdeki belirsizlik nedeniyle litolojiye kıyasla daha temkinli yorumlanmalıdır.

CORINE Level 2 arazi örtüsü/kullanımı verisi, çalışmanın duyarlılık ve risk aşamalarında kavramsal olarak farklı iki işlevle kullanılmıştır. Duyarlılık modelinde arazi örtüsü/kullanımı, orman, tarım, yerleşim ve endüstriyel yüzeyler gibi sınıfların heyelan oluşum koşullarıyla ilişkisini açıklayan kategorik bir değişkendir. Risk analizinde ise aynı veri kaynağından seçilen tarımsal kullanım sınıfları, heyelandan etkilenebilecek tarım arazilerini temsil eden bir risk altındaki unsur katmanına dönüştürülmüştür. Bu kapsamda kentsel doku, nüfus ve bina katmanlarıyla tekrar oluşturmaması amacıyla, orman ve diğer doğal örtü sınıfları ise risk altındaki tarımsal veya ekonomik varlık tanımına dâhil edilmediği için kapsam dışında bırakılmıştır.

Arazi örtüsü/kullanımı verisinin iki analiz aşamasında kullanılması, duyarlılık değişkeni ile risk altındaki unsur katmanı arasında olası bir döngüsel bağımlılık oluşturabileceğinden, bu etkinin büyüklüğü risk analizinin tanısal değerlendirmeleri kapsamında ayrıca sınanmıştır. Dolayısıyla arazi örtüsünün duyarlılık modelindeki etkisi ile tarım arazisinin risk analizindeki katkısı birbirinden ayrı yorumlanmış; iki kullanım arasındaki olası etkileşim tanısal analiz sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir.

5.6 Tehlike Analiz Adımları ve Sonuçları

Tehlike analizi, GAM tabanlı heyelan duyarlılık katmanı ile ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden türetilen tetikleyici bileşenin birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır. Bu aşamada amaç, yalnızca heyelan oluşumuna elverişli alanları değil, aynı zamanda belirli bir senaryo içinde hidro-meteorolojik ekstrem koşulların göreceli olarak daha yüksek olduğu alanları da dikkate alan bir tehlike indeksi üretmektir.

Tehlike analizinde 1990–2025 dönemini kapsayan günlük ERA5-Land verileri kullanılmıştır. Günlük yağmur, kar yağışı ve kar erimesi bileşenlerinden kısa ve orta süreli tetikleyici göstergeler üretilmiştir. Bu kapsamda dört ana tetikleyici değerlendirilmiştir: 1 günlük yağmur (*RAIN_1d*), 3 günlük kümülatif yağmur (*RAIN_3d*), 7 günlük kümülatif yağmur (*RAIN_7d*) ve 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik etkili su girdisi (*EWI_7d*). Her piksel için bu tetikleyicilere ait 36 yıllık maksimum seriler oluşturulmuş ve uç değer modellemesine girdi olarak kullanılmıştır.

Her tetikleyici için çalışma alanı ortalaması alınmış yıllık maksimum serilerin 95. yüzdelik değeri bölgesel eşik olarak tanımlanmıştır. Bu eşikler, yerel heyelan başlama eşikleri olarak değil, Marmara Bölgesi genelinde karşılaştırılabilir hidro-meteorolojik ekstrem referans değerleri olarak kullanılmıştır. Buna göre Q95 eşikleri RAIN_1d için 43,78 mm/gün, RAIN_3d için 71,07 mm/3 gün, RAIN_7d için 89,87 mm/7 gün ve EWI_7d için 98,66 mm/7 gün olarak hesaplanmıştır (Tablo 5-3).

Uç değer modellemesinde her pikseldeki yıllık maksimum serilere Gumbel dağılımı uygulanmıştır. Parametreler Momentler Yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu tercih, 36 yıllık maksimum seriler üzerinde tüm çalışma alanında tutarlı, tekrarlanabilir ve hesaplama açısından kararlı bir modelleme çerçevesi sağlamaktadır. Gumbel-MOM sonuçları, zaman penceresi uzadıkça konum ve ölçek parametrelerinin arttığını göstermektedir. Örneğin RAIN_1d için ortalama konum parametresi 28,79 ve ölçek parametresi 8,68 iken; RAIN_3d için bu değerler sırasıyla 46,84 ve 13,27'dir. EWI_7d, yağmur ve kar erimesi katkısını birlikte içerdiği için en yüksek ortalama konum parametresine sahiptir (Tablo 5-4).

Gumbel parametreleri ve bölgesel Q95 eşikleri kullanılarak her piksel için seçilen senaryo ufunda ilgili tetikleyici eşığının en az bir kez aşılma olasılığı hesaplanmıştır. Çalışmada 5, 10 ve 50 yıllık senaryo ufukları değerlendirilmiştir. Nihai tehlike ürünü için 50 yıllık senaryo esas alınmıştır. Bu değerler dönüş periyodunun doğrudan heyelan olasılığına çevrilmiş hali olarak değil, belirli bir planlama dönemi içinde hidro-meteorolojik eşığın aşılma olasılığı olarak yorumlanmıştır.

Tehlike indeksi, GAM tabanlı görelî duyarlılık katmanı ile hidro-meteorolojik tetikleyici aşılma olasılığı katmanının birlikte değerlendirilmesiyle üretilmiştir. Bu kapsamda dört aday 50 yıllık tehlike ürünü oluşturulmuştur: H_RAIN_1d, H_RAIN_3d, H_RAIN_7d ve H_EWI_7d. Bu ürünler, bağımsız heyelan envanteri kullanılarak başarı oranı AUC'si (SR-AUC), en yüksek tehlike sınıfındaki görelî heyelan yoğunlaşma oranı (lift değeri) ve üst %20'lik tehlike diliminde yakalanan heyelan oranı üzerinden karşılaştırılmıştır (Tablo 5-5).

Mekânsal doğrulama sonuçları, tetikleyici bileşenleri içeren tehlike ürünleri arasında en yüksek SR-AUC değeri H_RAIN_3d modelinde elde edilmiştir. H_RAIN_3d için SR-AUC değeri 0,837 olup, yalnızca duyarlılık katmanına göre düşüş oldukça sınırlıdır. Bu sonuç, 3 günlük kümülatif yağmur bileşeninin duyarlılık modelinin güçlü mekânsal sıralama kapasitesini büyük ölçüde koruyarak hidro-meteorolojik tetikleyici bilgisini modele entegre ettiğini göstermektedir (Tablo 5-5).

Sınıf bazlı lift analizleri de nihai ürünün yüksek tehlike sınıflarında heyelanları yoğunlaştırabildiğini göstermektedir. H_RAIN_3d ürünüde en yüksek tehlike sınıfı olan Sınıf 5, 1.646 heyelanı içermekte ve 3,41 lift değeri üretmektedir. Bu değer, üst %20'lik tehlike dilimindeki heyelan yoğunluğunun bölgesel ortalamanın yaklaşık 3,4 katı olduğunu göstermektedir (Tablo 5-6).

Bu sonuçlara göre, 50 yıllık senaryo için nihai ana tehlike ürünü H_RAIN_3d olarak belirlenmiştir. Bu seçim, H_RAIN_3d'nin tüm aday tehlike ürünleri içinde en yüksek SR-AUC değerini üretmesine dayanmaktadır. H_EWI_7d ürünü ise Sınıf 5 lift değeri ve üst %20 yakalama oranı bakımından en yüksek performansı göstermektedir. Bu nedenle H_EWI_7d ana ürün olarak değil, yağmur ve kar erimesi birleşik etkisini temsil eden tamamlayıcı bir senaryo olarak değerlendirilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Marmara Bölgesi için 3 günlük kümülatif yağmur birikimi, görelî heyelan tehlikesinin mekânsal sıralanmasında en dengeli hidro-meteorolojik tetikleyici olarak öne çıkmaktadır. H_RAIN_3d ürünü, duyarlılık modelinin güçlü mekânsal ayırt etme kapasitesini korurken, 50 yıllık hidro-meteorolojik ekstrem senaryo bilgisini modele entegre etmektedir. Bu nedenle nihai tehlike haritası, “50 yıllık heyelan olasılığı haritası” olarak değil, “50 yıllık 3 günlük yağmur tetikleyici senaryosu altında görelî heyelan tehlike indeksi” olarak yorumlanmalıdır.

Tablo 5-3 Tehlike analizinde kullanılan hidro-meteorolojik tetikleyiciler ve bölgesel Q95 eşikleri.

Tetikleyici	Tanım	Birim	Seri ort.	Q95 eşik	Süreç yorumu
RAIN_1d	1 günlük yağış	mm/day	33,80	43,78	Kısa süreli ve ani yağış etkisini temsil eder.
RAIN_3d	3 günlük kümülatif yağış	mm/3days	54,52	71,07	Kısa–orta süreli yağış birikimi ve gecikmeli yamaç tepkisini temsil eder.
RAIN_7d	7 günlük kümülatif yağış	mm/7days	73,18	89,87	Daha uzun süreli ıslanma ve bölgesel doymunluk koşullarını temsil eder.
EWI_7d	7 günlük yağış + kar erimesi	mm/7days	80,13	98,66	Zemine ulaşan birleşik sıvı su girdisini temsil eder.

Tablo 5-4 Gumbel-MOM ekstrem değer modeli özet sonuçları.

Tetikleyici	Geçerli piksel	Gumbel (%)	Ortalama μ	Ortalama σ	5-yıl seviyesi	10-yıl seviyesi	50-yıl seviyesi
RAIN_1d	27773620	100	28,79	8,68	41,81	48,33	62,66
RAIN_3d	27773620	100	46,84	13,27	66,74	76,69	98,60
RAIN_7d	27773620	100	64,27	15,36	87,31	98,83	124
EWI_7d	27027179	100	71,00	15,82	94,73	107	133

Tablo 5-5 Aday tehlike ürünlerinin mekânsal doğrulama sonuçları.

Model	Senaryo yılı	SR-AUC	S_{LS} 'ye göre ΔAUC	Sınıf 5 lift	Üst %20 yakalama (%)
Heyelan duyarlılık (S_{LS})	-	0,847	0,000	3,51	70,2
H_RAIN_1d	50 yıl	0,791	-0,056	3,33	66,7
H_RAIN_3d	50 yıl	0,837	-0,010	3,41	68,2
H_RAIN_7d	50 yıl	0,786	-0,061	3,36	67,1
H_EWI_7d	50 yıl	0,823	-0,025	3,56	71,2

Tablo 5-6 Nihai H_RAIN_3d 50-yıl tehlike ürünü için sınıf bazlı lift analizi.

Sınıf	Piksel sayısı	Heyelan sayısı	Yoğunluk	Lift
1	5.554.724	112	2,02e-05	0,232
2	5.554.725	94	1,69e-05	0,195
3	5.554.724	157	2,83e-05	0,325
4	5.554.723	404	7,27e-05	0,837
5	5.554.724	1.646	2,96e-04	3,41

Tehlike analizi sonucunda üretilen dört farklı 50 yıllık göreceli tehlike yüzeyi, risk analizinin tehlike bileşenini oluşturmuştur. Risk altındaki unsurlar tehlike senaryosuna göre değişmediğinden, her tehlike yüzeyi aynı bileşik unsur indeksiyle ayrı ayrı birleştirilmiş ve dört karşılaştırmalı göreceli risk ürünü elde edilmiştir.

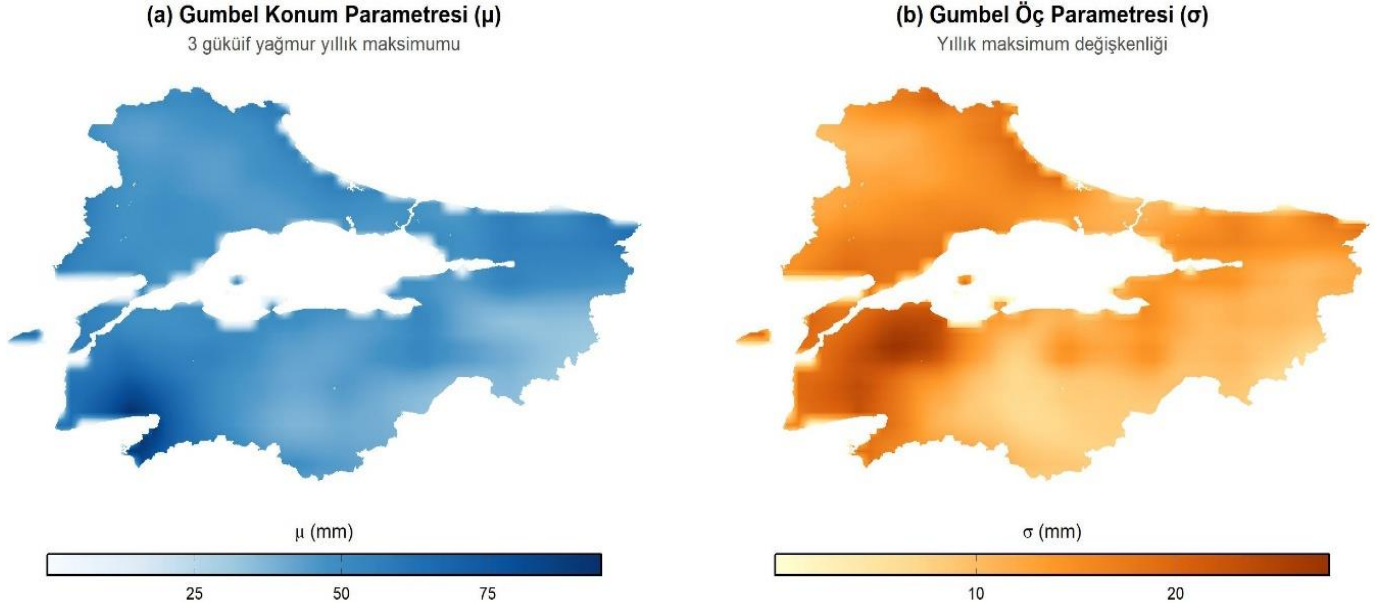
5.7 Gumbel Parametrelerinin Mekânsal Dağılımı

Gumbel dağılımına ait konum (μ) ve ölçek (σ) parametreleri, her tetikleyici için piksel bazında hesaplanarak Marmara Bölgesi'ndeki hidro-meteorolojik ekstrem koşulların mekânsal değişkenliğini temsil eden ara ürünler olarak elde edilmiştir. Bu parametreler, çalışma alanının tamamında sürekli yüzeyler üzerinden yürütülmesini mümkün kılmaktadır. Konum parametresi (μ), ilgili tetikleyici için tipik yıllık maksimum düzeyi; ölçek parametresi (σ) ise uç değerlerin değişkenliğini temsil etmektedir (Şekil 5-6).

Gumbel-MOM özet sonuçları, tetikleyici süresi uzadıkça hem konum hem de ölçek parametrelerinin arttığını göstermektedir. Buna göre ortalama μ değeri RAIN_1d için 28,79, RAIN_3d için 46,84, RAIN_7d için 64,27 ve EWİ_7d için 71,00 olarak hesaplanmıştır. Ortalama σ değerleri ise sırasıyla 8,68, 13,27, 15,36 ve 15,82'dir (Tablo 5-4). Bu dağılım, kısa süreli tek günlük yağışlara kıyasla çok günlük yağış ve birleşik etkili su girdisi serilerinin hem daha yüksek tipik maksimumlar hem de daha geniş bir ekstrem değişkenlik ürettiğini göstermektedir.

Bu parametre yüzeyleri, tetikleyici aşılma olasılıklarının piksel bazında hesaplanmasında doğrudan kullanılmış ve nihai göreceli heyelan tehlike indeksinin

hidro-meteorolojik bileşenini oluşturmuştur. Dolayısıyla μ ve σ rasterları, nihai tehlike haritası kadar doğrudan yorumlanan çıktılar olmamakla birlikte, modelin mekânsal olarak değişen ekstrem yağış rejimini temsil eden temel ara ürünler olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 5-6 RAIN_3d için Gumbel konum (μ) ve ölçek (σ) parametrelerinin mekânsal dağılımı.

5.8 Tetikleyici Olasılık Senaryoları

Tehlike analizi kapsamında, hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenin farklı süre ve senaryoları altındaki etkisini değerlendirmek amacıyla tetikleyici olasılık senaryoları oluşturulmuştur. Bu çalışmada, her tetikleyici için çalışma alanı ortalamalı yıllık maksimum serilerin 95. yüzdelerine dayanan bölgesel Q95 eşikleri kullanılmıştır. Böylece tetikleyici olasılıkları, Marmara Bölgesi için ortak ve karşılaştırılabilir bir hidro-meteorolojik ekstrem referans düzeyi üzerinden hesaplanmıştır.

Senaryo üretimi dört ana tetikleyici üzerinden yürütülmüştür: 1 günlük yağmur ($RAIN_{1d}$), 3 günlük kümülatif yağmur ($RAIN_{3d}$), 7 günlük kümülatif yağmur ($RAIN_{7d}$) ve 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik etkili su girdisi (EWI_{7d}). Her tetikleyici için 5, 10 ve 50 yıllık senaryolar değerlendirilmiştir (Tablo 5-7). Bu kapsamda toplam 12 tetikleyici olasılık senaryosu üretilmiştir. Senaryo uzadıkça, ilgili Q95 eşığının en az bir kez aşılma olasılığı artmaktadır. Buna karşılık tetikleyiciler arasındaki farklar, yalnızca senaryo süresinden değil, her tetikleyicinin yıllık maksimum serisinin büyüklüğü, değişkenliği ve Gumbel parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada 5 ve 10 yıllık senaryolar kısa ve orta vadeli karşılaştırma amacıyla değerlendirilmiştir. Nihai tehlike haritası için 50 yıllık senaryo esas alınmıştır. 50 yıllık senaryo, bölgesel afet azaltma, planlama ve önceliklendirme çalışmaları açısından daha uzun dönemli hidro-meteorolojik ekstrem koşulların etkisini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Ancak bu değer doğrudan “50 yılda heyelan olma olasılığı” olarak yorumlanmamalıdır. Burada hesaplanan değer, ilgili hidro-meteorolojik tetikleyici eşiğinin 50 yıllık senaryo içinde en az bir kez aşılma olasılığıdır.

Tablo 5-7 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.

Tetikleyici	Q95 eşiği	Senaryo	Süreç yorumu	Modeldeki rolü
RAIN_1d	43,78 mm/gün	5, 10, 50 yıl	Kısa süreli ve ani yağış etkisi	Aday tetikleyici senaryosu
RAIN_3d	71,07 mm/gün	5, 10, 50 yıl	Kısa-orta süreli yağış birikimi ve gecikmeli yamaç tepkisi	Nihai ana tehlike ürünü için seçilen tetikleyici
RAIN_7d	89,87 mm/gün	5, 10, 50 yıl	Daha uzun süreli ıslanma ve bölgesel doygunluk koşulları	Aday tetikleyici senaryosu
EWI_7d	98,66 mm/gün	5, 10, 50 yıl	Yağmur ve kar erimesi kaynaklı birleşik sıvı su girdisi	Tamamlayıcı / karşılaştırmalı senaryo

Üretilen tetikleyici olasılık katmanları, GAM tabanlı göreceli heyelan duyarlılık katmanı ile birleştirilerek aday göreceli tehlike ürünlerine dönüştürülmüştür. Bu kapsamda 50 yıllık senaryo için H_RAIN_1d, H_RAIN_3d, H_RAIN_7d ve H_EWI_7d ürünleri karşılaştırılmıştır. Aday ürünlerin bağımsız heyelan envanteriyle yapılan mekânsal doğrulaması, H_RAIN_3d ürününün en yüksek başarı oranı AUC değerini verdiğini göstermiştir. Ayrıca tarihi bilinen heyelanlarla yapılan zamansal doğrulama da RAIN_3d değişkeninin diğer tetikleyicilere göre daha tutarlı bir sinyal ürettiğini ortaya koymuştur.

Bu nedenle, nihai tehlike haritası için 50 yıllık RAIN_3d senaryosu esas alınmıştır. Bu seçim, RAIN_3d'nin tüm metriklerde mutlak olarak en yüksek değeri üretmesinden değil, genel mekânsal sıralama başarısı ve zamansal doğrulama tutarlılığı bakımından en dengeli tetikleyici olması nedeniyle yapılmıştır. EWI_7d ise en yüksek tehlike sınıfındaki yoğunlaşma performansı bakımından güçlü bir tamamlayıcı senaryo olarak değerlendirilmiştir.

Risk analizi 50 yıllık planlama senaryosu için yürütülmüştür. Bu kapsamda H_RAIN_1d, H_RAIN_3d, H_RAIN_7d ve H_EWI_7d göreceli tehlike çıktılarının her biri, aynı bileşik unsur indeksiyle birleştirilmiştir.

5.9 Bütünleşik Model Seçim Gerekçesi

Sonuçlar değerlendirildiğinde, **H_RAIN_3d 50-yıl** ürününün nihai ana tehlike haritası olarak seçilmesi en dengeli ve savunulabilir karar olarak öne çıkmaktadır. Mekânsal doğrulamada H_RAIN_3d, tetikleyici bileşen içeren aday tehlike ürünleri arasında en yüksek başarı oranı AUC değerini üretmiştir. Zamansal doğrulamada ise RAIN_3d değişkeni, tarihi bilinen heyelan olayları için en yüksek Q95 aşım oranını, en yüksek yıllık maksimum seriler (AMAX) ve en güçlü istatistiksel sinyali vermiştir. Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı Tablo 5-8’de özetlenmiştir.

Tablo 5-8 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.

Kriter	H_RAIN_3d
SR-AUC	0,8374 (en iyi H ürünü)
Sınıf 5 lift	3,411
Üst %20 yakalama	%68,2
Tarihli olay Q95 aşımı	%24,3 (en yüksek)
AMAX oranı	1,516 (en yüksek)

H_RAIN_3d 50-yıl ürününün birincil tehlike çıktısı olarak seçilmesi, risk analizindeki birincil senaryoyu da belirlemiştir. Buna göre Risk_RAIN_3d_50yr çıktısı ana görel risk ürünü olarak değerlendirilmiş ve diğer üç risk yüzeyi tetikleyici seçimine bağlı mekânsal farklılıkların ve sonuçların dayanıklılığının incelenmesi amacıyla karşılaştırmalı senaryolar olarak korunmuştur.

5.10 Risk Altındaki Unsurların Hazırlanması

Risk analizi, görel tehlike yüzeyleri ile heyelandan etkilenebilecek unsurların mekânsal dağılımının aynı analiz izgarasında birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu kapsamda nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi olmak üzere beş risk altındaki unsur katmanı kullanılmıştır. Katmanların tamamı tehlike modeliyle aynı yaklaşık 50 m çözünürlüklü referans izgaraya aktarılmıştır.

Nüfus verisi, Türkiye İstatistik Kurumunun 2024 yılı 1 km çözünürlüklü nüfus gridinden türetilmiştir. Nüfusun 1 km hücrelerin tamamına eşit biçimde dağıtılması, yerleşim bulunmayan doğal alanlara ve yüksek tehlikeli yamaçlara gerçek dışı nüfus dağılımına neden olabileceğinden, bina kat alanına orantılı dasimetrik dağıtım uygulanmıştır. Bina bulunmayan sınırlı sayıdaki nüfuslu hücrede ise nüfus geçerli alt hücrelere eşit olarak dağıtılmıştır. İşlem sonucunda çalışma alanı içinde 26.357.070 kişi temsil edilmiş ve dağıtılabilir nüfusun toplamı korunmuştur.

Yapı stoğu, Mekânsal Adres Kayıt Sistemi kaynaklı bina verilerinden oluşturulmuştur. Bina büyüklüğünü taban alanından daha iyi temsil edebilmek amacıyla her bina için taban alanı ile zemin üstü kat sayısının çarpımından kat alanı hesaplanmıştır. Hücre boyutundan küçük yapılar merkez noktasına, daha büyük

yapılar ise hücre içindeki kapsama oranlarına göre dönüştürülmüştür. Böylece büyük yapıların toplam kat alanının tek bir hücrede gerçek dışı biçimde yoğunlaşması önlenmiştir.

Karayolu ve demiryolu katmanları için her hücre içinde kalan gerçek hat uzunluğu metre cinsinden hesaplanmıştır. Karayolu ve demiryolunun ayrı katmanlar hâlinde tutulması, ulaşım altyapısının sektörel olarak ayrı ayrı değerlendirilebilmesini sağlamıştır. Yol sınıfı veya trafik hacmine bağlı ağırlıklandırma uygulanmamış ve yeterli ve karşılaştırılabilir trafik verisi bulunmadığından bütün yol kesimleri mevcut uzunlukları üzerinden değerlendirilmiştir.

Tarım arazisi katmanı, CORINE Level 2 arazi örtüsü/kullanımı verisinden seçilen tarımsal ve ekonomik kullanım sınıflarından türetilmiştir. Kentsel doku, nüfus ve bina katmanlarıyla tekrar yaratmaması amacıyla; orman ve diğer doğal örtü sınıfları ise risk altındaki tarımsal veya ekonomik varlık kapsamında değerlendirilmediği için katmana dâhil edilmemiştir. Seçilen sınıflar referans ızgaraya alan oranı yöntemiyle aktarılmış ve her hücre için 0 ile 1 arasında tarım arazisi oranı elde edilmiştir.

5.11 Normalizasyon ve Bileşik Unsur İndeksinin Oluşturulması

Risk altındaki unsur katmanları kişi, metrekare, metre ve alan oranı gibi farklı birimlerde ölçüldüğünden doğrudan birleştirilememektedir. Ayrıca nüfus, bina ve ulaşım katmanları aşırı sağa çarpık ve sıfır değerlerin baskın olduğu dağılımlar göstermektedir. Ham minimum–maksimum normalizasyonunun aykırı değerler nedeniyle bilgi kaybına yol açmasını önlemek amacıyla üç aşamalı bir dönüşüm uygulanmıştır.

İlk olarak nüfus, bina kat alanı, karayolu ve demiryolu değerlerine $\log(1+x)$ dönüşümü uygulanarak dağılımlardaki çarpıklık azaltılmıştır. İkinci aşamada yalnızca sıfırdan büyük hücreler üzerinden hesaplanan 99. yüzdelik değer üst sınır olarak kullanılmış ve bu değer üzerindeki gözlemler kırılmıştır. Son aşamada değerler 0–1 aralığına yeniden ölçeklenmiştir. Tarım arazisi katmanı zaten 0–1 arasında bir alan oranı taşıdığından bu katmana logaritmik dönüşüm uygulanmamıştır.

Normalize edilmiş beş katman, ağırlıklı doğrusal birleşim yöntemiyle tek bir bileşik unsur indeksine dönüştürülmüştür (Malczewski, 2000):

$$C = \sum_{i=1}^5 w_i x_i$$

Burada x_i , normalize edilmiş risk altındaki unsur katmanını; w_i ise ilgili katmanın ağırlığını göstermektedir. Katmanların heyelan kayıplarına göreli katkısını ampirik olarak farklılaştırabilecek sistematik kayıp verisi bulunmadığından her

katmana eşit ağırlık verilmiştir ($w = 0,20$). Eşit ağırlıklandırma, bileşik göstergelerin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım olmakla birlikte, aynı zamanda yöntemsel bir tercih ve örtük bir değer yargısıdır (OECD vd., 2008; Greco vd., 2019).

Elde edilen bileşik unsur indeksi C , çalışma alanındaki nüfus, yapı stoğu, ulaşım altyapısı ve tarım arazilerinin göreceli mekânsal yoğunluğunu temsil etmektedir. İndeks 0 ile 0,955 arasında değişmekte, ortalama değeri 0,121 olmakta ve çalışma alanının %58,55'inde sıfırdan büyük değer almaktadır.

5.12 Risk Hesabı ve Tetikleyici Senaryoları

Risk analizi, Corominas vd. (2014) tarafından tanımlanan genel risk çerçevesinin indeks tabanlı bölgesel değerlendirme yaklaşımına göre yürütülmüştür. Tehlike katmanı heyelan şiddetini, hızını, akış derinliğini veya etki basıncını içermediğinden fiziksel kırılma eğrilerinin uygulanması mümkün olmamıştır. Bu nedenle kırılma maksimum değeri olan $V = 1$ olarak kabul edilmiştir (Caleca vd., 2024). Statik unsurlar için mekânsal-zamansal bulunma olasılığı tanım gereği 1 alınmış ve gün içi nüfus hareketliliğine ilişkin veri bulunmadığından aynı kabul nüfus katmanı için de uygulanmıştır.

Bu varsayımlar altında göreceli risk indeksi aşağıdaki biçimde hesaplanmıştır:

$$R = H \times C$$

Burada R , göreceli heyelan risk indeksini; H , ilgili hidro-meteorolojik senaryoya ait göreceli tehlike indeksini; C ise risk altındaki unsurların bileşik indeksini göstermektedir. Çarpımsal yapı, tehlike düzeyi yüksek olsa dahi risk altında unsur bulunmayan hücrelerde risk değerinin sıfır olmasını sağlamaktadır.

Dört 50 yıllık tehlike yüzeyi için ayrı risk ürünleri oluşturulmuştur:

- Risk_RAIN_1d_50yr.tif — 1 günlük yağmur senaryosu
- Risk_RAIN_3d_50yr.tif — 3 günlük kümülatif yağmur senaryosu
- Risk_RAIN_7d_50yr.tif — 7 günlük kümülatif yağmur senaryosu
- Risk_EWI_7d_50yr.tif — 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik su girdisi senaryosu

Birincil risk ürünü olarak Risk_RAIN_3d_50yr seçilmiştir. Bu tercih, RAIN_3d senaryosunun tehlike doğrulamasında en yüksek SR-AUC değerini üretmesine dayanmaktadır. Risk yüzeyleri sürekli raster olarak bırakılmış ve hesaplama aşamasında sınıflandırılmamıştır. Senaryolar farklı dağılımlara göre ayrı ayrı sınıflandırıldığında karşılaştırılabilirlik bozulacağından, görselleştirme yapılması durumunda bütün risk ürünlerinde ortak ve sabit sınıf eşikleri kullanılmalıdır.

Dört risk senaryosu birbirine oldukça yakın mekânsal sıralamalar üretmiştir. Maruz alanlarda hesaplanan Spearman korelasyonları 0,981 ile 0,995 arasında değişmektedir. En yüksek benzerlik RAIN_3d ile RAIN_7d, en düşük benzerlik ise RAIN_1d ile EWI_7d senaryoları arasında belirlenmiştir. Bu bulgu, tetikleyici seçiminin tehlike doğrulama performansını etkilemesine karşın, 50 yıllık senaryo ufkunda risk azaltma önceliklerinin genel mekânsal sıralamasını büyük ölçüde değiştirmediklerini göstermektedir.

Dört 50 yıllık tehlike yüzeyi için ayrı risk ürünleri oluşturulmuştur: Risk_RAIN_1d_50yr, Risk_RAIN_3d_50yr, Risk_RAIN_7d_50yr ve Risk_EWI_7d_50yr. Her risk yüzeyi, ilgili hidro-meteorolojik tehlike senaryosunun aynı bileşik unsur indeksiyle hücre bazında birleştirilmesiyle üretilmiştir. Dört senaryoya ait ortalama tehlike, ortalama risk ve maksimum risk değerleri Tablo 5-9'da sunulmuştur.

Tablo 5-9 Dört tetikleyici senaryosu için risk istatistikleri. Sarı satır birincil ürünü göstermektedir.

Senaryo	Risk rasteri	Ort. tehlike	Ort. risk	Maks. risk
RAIN_1d	Risk_RAIN_1d_50yr.tif	0,3058	0,0407	0,7370
RAIN_3d	Risk_RAIN_3d_50yr.tif	0,2946	0,0394	0,7352
RAIN_7d	Risk_RAIN_7d_50yr.tif	0,3009	0,0401	0,7353
EWI_7d	Risk_EWI_7d_50yr.tif	0,3001	0,0402	0,7318

5.13 Tanısal Değerlendirmeler

Bileşik indeks yaklaşımının olası zayıflıkları; çift sayım, bileşen baskınlığı, döngüsel bağımlılık ve ağırlık seçimine duyarlılık bakımından sistematik olarak sınanmıştır. Tanısal hesaplamalar yalnızca bileşik unsur indeksinin sıfırdan büyük olduğu hücrelerde gerçekleştirilmiştir. Sıfır hücrelerin analize katılması, bütün senaryolarda aynı sıfır değerlerini üreterek korelasyonları yapay biçimde yükselteceğinden uygun görülmemiştir. Nüfus katmanı bina kat alanına göre dasimetrik olarak dağıtıldığı için bu iki katman arasında beklenen yapısal bir ilişki belirlenmiştir. Maruz alanlarda nüfus ile bina kat alanı arasındaki Pearson korelasyonu 0,879, Spearman korelasyonu ise 0,944'tür. Bu sonuç, eşit ağırlıklı bileşik indekste kısmi tekrar bulunduğunu göstermektedir. Buna karşılık diğer unsur çiftleri arasındaki ilişkiler zayıf veya negatif düzeyde kalmıştır. Tarım arazisi katmanının yerleşim ve ulaşım katmanlarından farklı bir mekânsal bilgi sağladığı görülmüştür.

Risk indeksindeki değişkenliğin hangi bileşenden kaynaklandığını belirlemek amacıyla logaritmik varyans ayrıştırması uygulanmıştır. Birincil RAIN_3d

senaryosunda değişkenliğin %83,1'i tehlike bileşeninden, %13,6'sı bileşik unsur indeksinden, %3,3'ü ise iki bileşen arasındaki kovaryanstan kaynaklanmıştır. Tehlike bileşeni ortalama değerine sabitlendiğinde özgün risk sıralamasıyla korelasyonun 0,312'ye düşmesi, riskin mekânsal sıralamasında tehlikenin belirleyici bileşen olduğunu göstermektedir.

CORINE verisinin hem duyarlılık modelinde açıklayıcı değişken hem de risk analizinde tarım arazisi katmanının kaynağı olarak kullanılmasından doğabilecek döngüsel bağımlılık ayrıca incelenmiştir. Tarım arazisi hücrelerindeki ortalama tehlike değeri diğer alanlardan yaklaşık %8,9 yüksek bulunmuş, ancak tarım arazisi ile tehlike arasındaki Spearman korelasyonu 0,037 düzeyinde kalmıştır. Bu sonuç, iki kullanım arasında sınırlı bir etkileşim bulunduğunu, ancak bu etkinin risk desenini belirgin biçimde yönlendirmediğini göstermektedir.

Eşit ağırlık yaklaşımının sonuçlar üzerindeki etkisi, bileşik göstergeler için önerilen belirsizlik ve hassasiyet analizi yaklaşımı doğrultusunda dört alternatif ağırlıklandırma şeması kullanılarak sınanmıştır (Saisana vd., 2005). Alternatif ağırlıklar bileşik unsur indeksini belirgin biçimde değiştirmiştir. Temel ve alternatif indeksler arasındaki Spearman korelasyonu 0,735'e kadar düşmüştür. Buna karşılık nihai risk sıralaması bütün alternatiflerde 0,960'ın üzerinde kalmıştır. Dolayısıyla bileşik unsur indeksi tek başına yorumlandığında ağırlık tercihinin hassas, nihai risk indeksi ise tehlike bileşeninin baskınlığı nedeniyle görece dayanıklıdır.

5.14 Riskin Mekânsal Yoğunlaşması

Risk analizi sonucunda yüksek göreceli risk değerlerinin çalışma alanının sınırlı bir bölümünde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Birincil RAIN_3d senaryosunda, risk değeri sıfırdan büyük hücreler üzerinden tanımlanan en yüksek %10'luk risk dilimi çalışma alanının yalnızca %5,86'sını oluşturmaktadır. Buna karşın bu alanlar bölge nüfusunun %81,1'ini, toplam bina kat alanının %72,1'ini ve karayolu uzunluğunun %30,3'ünü barındırmaktadır.

En yüksek %5'lik risk dilimi çalışma alanının %2,93'ünü kaplamakta ve nüfusun %74,4'ünü içermektedir. En yüksek %1'lik risk dilimi ise çalışma alanının yalnızca %0,59'una karşılık gelmesine rağmen nüfusun %29,5'ini ve bina kat alanının %24,6'sını kapsamaktadır. Bu dağılım, risk azaltma ve ayrıntılı inceleme çalışmalarının mekânsal olarak sınırlı fakat yüksek yoğunluklu alanlara yönlendirilebileceğini göstermektedir.

Bu oranlar mutlak tehlike veya mutlak kayıp oranı olarak yorumlanmamalıdır. "Bölge nüfusunun %81,1'i yüksek risk altındadır" ifadesi yerine, "çalışma alanının %5,86'sını oluşturan en yüksek göreceli riskli hücreler bölge nüfusunun %81,1'ini barındırmaktadır" ifadesi kullanılmalıdır.

5.15 Doğrulama Yaklaşımı ve Sınırları

Doğrulama stratejisi, risk denklemini oluşturan bileşenlerin farklı nitelikler taşıdığı dikkate alınarak bileşen bazlı biçimde tasarlanmıştır. Tehlike bileşeni istatistiksel bir tahmin modeli, risk altındaki unsurlar ölçülmüş sayım ve envanter verileri, kırılganlık açık bir varsayım, ağırlıklar ise yöntemsel bir tercihtir. Bu nedenle bütün bileşenlere aynı doğrulama prosedürünün uygulanması yöntemsel olarak uygun değildir.

Tehlike bileşeni, GAM modelinin geliştirilmesinde kullanılmayan bağımsız heyelan envanteriyle sınanmıştır. Birincil RAIN_3d tehlike senaryosu için SR-AUC değeri 0,837 olarak hesaplanmıştır. Risk indeksindeki değişkenliğin yaklaşık %83'ünün tehlike bileşeninden kaynaklandığı dikkate alındığında, tehlike modelinin bağımsız doğrulaması risk çıktısının güvenilirliği açısından temel kanıt oluşturmaktadır.

Risk altındaki unsur katmanları istatistiksel tahminler değil, sayım ve envanter verileridir. Bu nedenle söz konusu katmanlarda bağımsız model doğrulaması yerine kaynak verideki toplam miktarın raster dönüşümü sonrasında korunup korunmadığı kontrol edilmiştir. Nüfusta korunum farkı %0,0000, bina kat alanında %1,7, karayolunda %0,6 ve demiryolunda %0,0 olarak belirlenmiştir. Bina ve karayolu katmanlarındaki farklar rasterizasyon hatasından değil, çalışma alanı maskesinin dışında kalan unsurlardan kaynaklanmaktadır.

Risk indeksi, doğrulanmış tehlike modeli ile ölçülmüş unsur verilerinin çarpımından oluşan deterministik bir dönüşümdür ve ayrıca kalibre edilmiş serbest bir parametre içermemektedir. Bununla birlikte risk düzeyinde doğrudan bağımsız doğrulama, mekânsal olarak konumlandırılmış hasar, ekonomik zarar veya can kaybı verisi gerektirmektedir. Marmara Bölgesi için bu nitelikte sistematik kayıp verileri bulunmadığından risk çıktısı doğrudan doğrulanmamıştır.

Elde bulunan genel heyelan envanteri risk doğrulaması için uygun değildir. Bu envanter, olayların nüfusu, yapıları veya altyapıyı etkileyip etkilemediğini ayırt etmeden yalnızca heyelan konumlarını kaydetmektedir. Unsur bulunmayan bir yamaçta gerçekleşen gerçek heyelanın risk indeksinde sıfır değer alması model hatası değil, risk tanımının doğal sonucudur. Bu nedenle genel heyelan envanteriyle yapılacak doğrudan karşılaştırma, tehlike ve risk kavramlarını birbirine karıştıracaktır.

Ölümlü heyelan envanteri, mekânsal hasar tespit kayıtları, sigorta kayıpları veya etkilenen unsurları içeren olay tabanlı envanterler temin edildiğinde risk indeksi doğrudan doğrulanabilecektir. Bu veriler aynı zamanda $V=1$ varsayımının kaldırılmasına ve unsur türlerine özgü kırılganlık ilişkilerinin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

5.16 Nihai Duyarlılık, Tehlike ve Risk Haritalarının Üretimi ve Yorumu

Çalışmanın son aşamasında, duyarlılık ve tehlike analizlerinden elde edilen mekânsal çıktılar ile risk altındaki unsurların bileşik indeksi ve göreceli risk sonuçları, karar destek süreçlerinde daha işlevsel kullanılabilmesi amacıyla tematik haritalara dönüştürülmüştür. Bu kapsamda dört temel çıktı grubu üretilmiştir: GAM tabanlı göreceli heyelan duyarlılık haritası (S_{LS}), 50 yıllık RAIN_3d senaryosuna dayalı göreceli heyelan tehlike haritası, risk altındaki unsurların bileşik indeks haritası (C) ve dört hidro-meteorolojik tetikleyici senaryosuna ait göreceli heyelan risk haritaları. Birincil risk ürünü Risk_RAIN_3d_50yr olarak belirlenmiştir.

Nihai heyelan duyarlılık haritası, GAM modeliyle üretilen sürekli duyarlılık yüzeyinin sınıflandırılmasıyla elde edilmiştir. Bu harita, Marmara Bölgesi'nde topoğrafik, jeolojik, hidro-klimatik, hidrografik, arazi örtüsü/kullanımı ve antropojenik koşullar altında heyelan oluşumuna göreceli olarak daha elverişli alanları göstermektedir. Çok yüksek duyarlılık sınıfı, modelin heyelan oluşumu açısından en elverişli çevresel koşulları tanımladığı alanları; çok düşük duyarlılık sınıfı ise göreceli olarak daha düşük duyarlılığa sahip alanları temsil etmektedir. Bu nedenle duyarlılık haritası, bölge içinde heyelana yatkın alanların mekânsal dağılımını gösteren temel zemin koşulu katmanı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5-7).

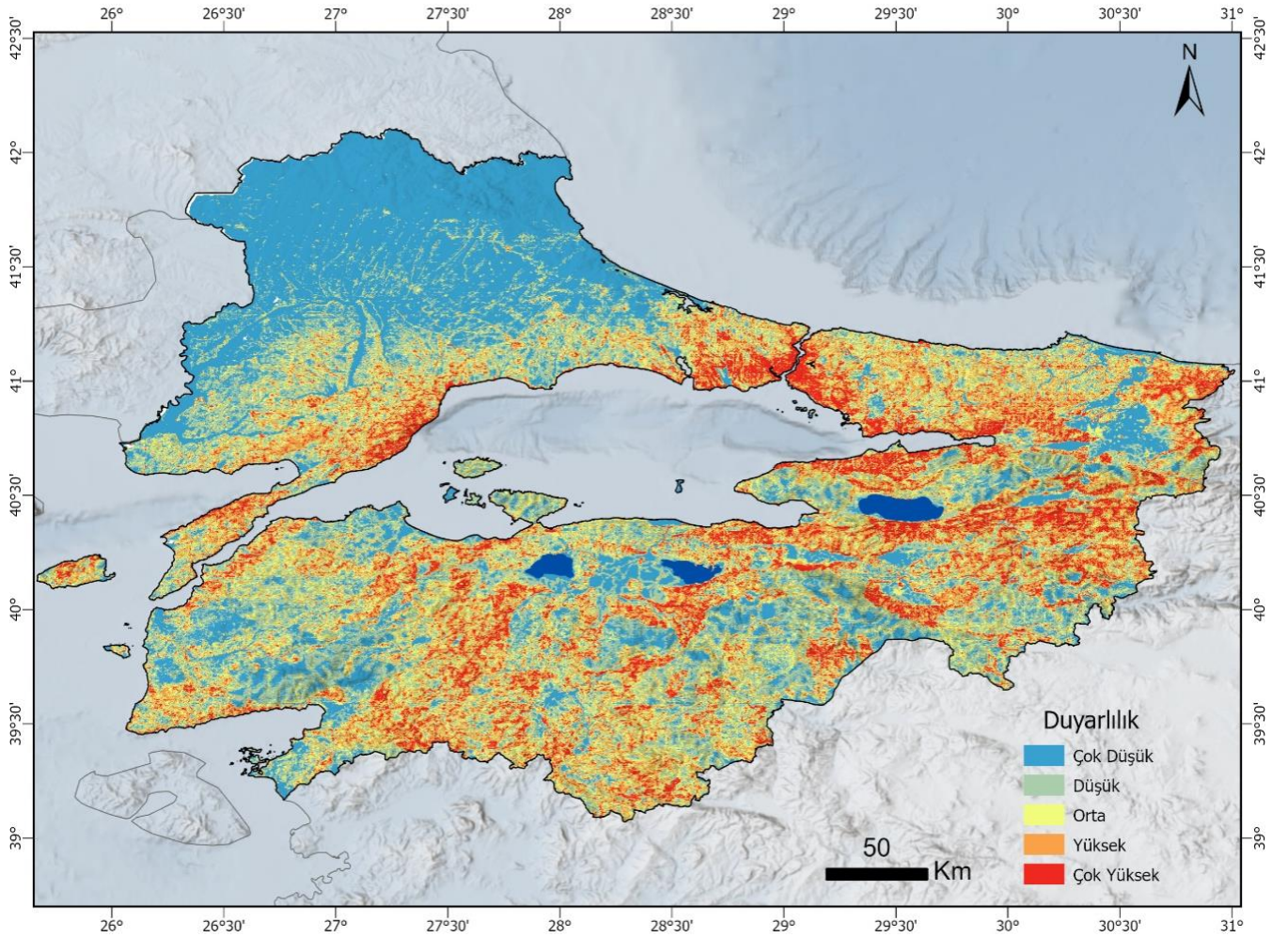
Nihai heyelan tehlike haritası ise duyarlılık katmanının hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenle birlikte değerlendirilmesi sonucunda üretilmiştir. Bu kapsamda nihai uygulama ürünü olarak H_RAIN_3d 50-yıl göreceli heyelan tehlike haritası kullanılmıştır. Bu harita, GAM tabanlı duyarlılık katmanı ile 3 günlük kümülatif yağmur tetikleyicisinin 50 yıllık senaryoda hesaplanan aşılma olasılığı bileşeninin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur. Dolayısıyla tehlike haritası, yalnızca bir alanın heyelana yatkınlığını değil, aynı zamanda hidro-meteorolojik ekstrem koşullar altında göreceli tehlike düzeyinin nasıl değiştiğini de yansıtmaktadır (Şekil 5-8).

Hem duyarlılık hem de tehlike haritaları, Marmara Bölgesi içinde göreceli önceliklendirme yapılmasına olanak sağlayan karar destek katmanlarıdır. Bu nedenle “çok yüksek tehlike” sınıfı, belirli bir pikselde mutlak olarak heyelan gerçekleşeceği anlamına gelmez; duyarlılık ve tetikleyici koşulların birlikte değerlendirildiği model çıktısında, çalışma alanı içindeki en yüksek göreceli tehlike dilimini ifade eder.

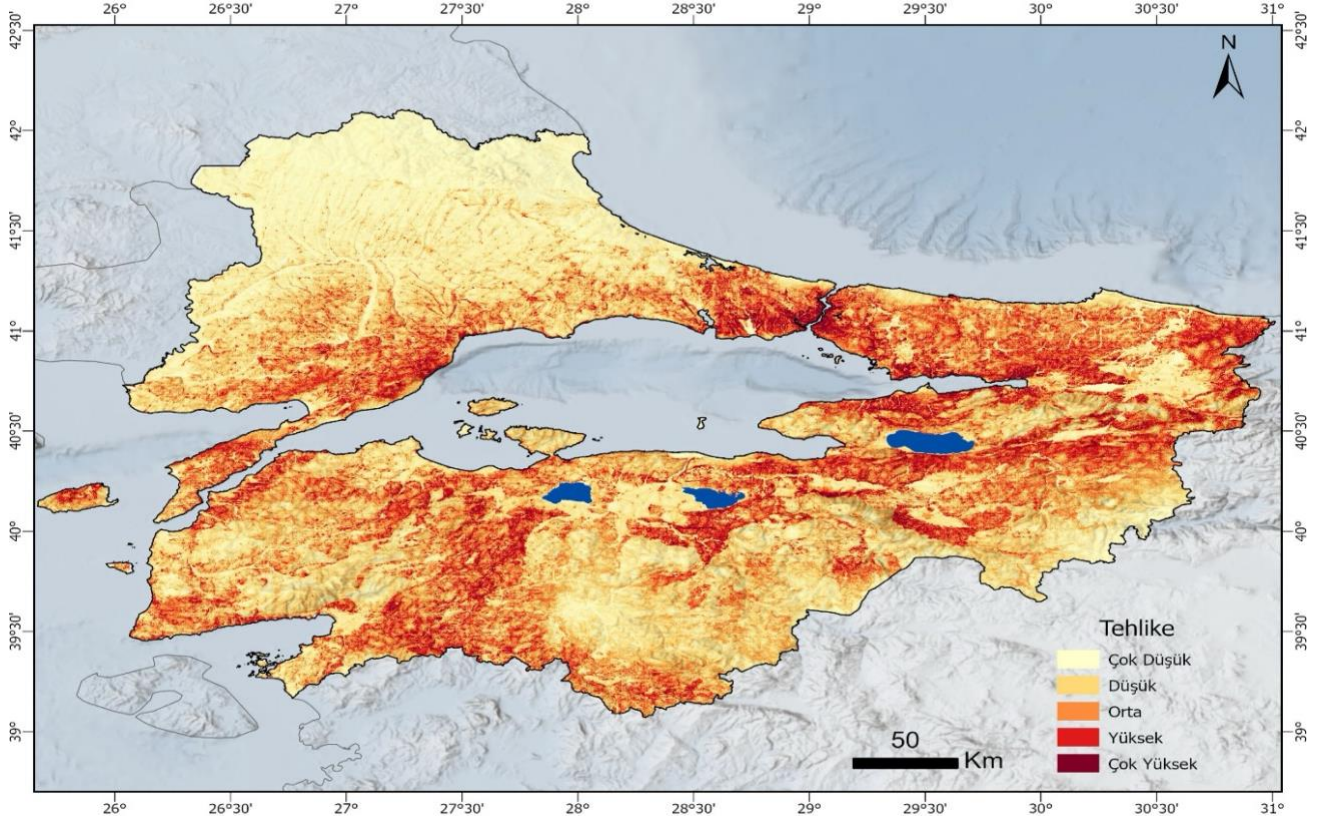
Duyarlılık ve tehlike haritalarının birlikte sunulması, iki çıktı arasındaki kavramsal farkın açık biçimde görülmesini sağlamaktadır. Duyarlılık haritası, heyelan oluşumuna elverişli zemin ve çevresel koşulları temsil ederken; tehlike haritası bu duyarlılık desenini 50 yıllık 3 günlük yağmur tetikleyici senaryosu ile yeniden ağırlıklandırmaktadır. Bu nedenle tehlike haritası, planlama, önceliklendirme, ayrıntılı etüt, arazi kullanım denetimi ve afet risk azaltma çalışmaları için daha uygulama odaklı bir çıktı niteliği taşımaktadır (Tablo 5-10).

Bileşik unsur indeksi haritası; nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanlarının normalize edilerek eşit ağırlıkla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Harita, heyelan tehlikesinden etkilenebilecek unsurların Marmara Bölgesi içindeki göreceli mekânsal yoğunluğunu göstermektedir. Yüksek değerler özellikle nüfus, yapı stoğu ve ulaşım altyapısının aynı hücrelerde yoğunlaştığı kentsel alanlarda ortaya çıkarken, tarım arazileri daha geniş fakat daha düşük bileşik değerli bir mekânsal desen oluşturmaktadır.

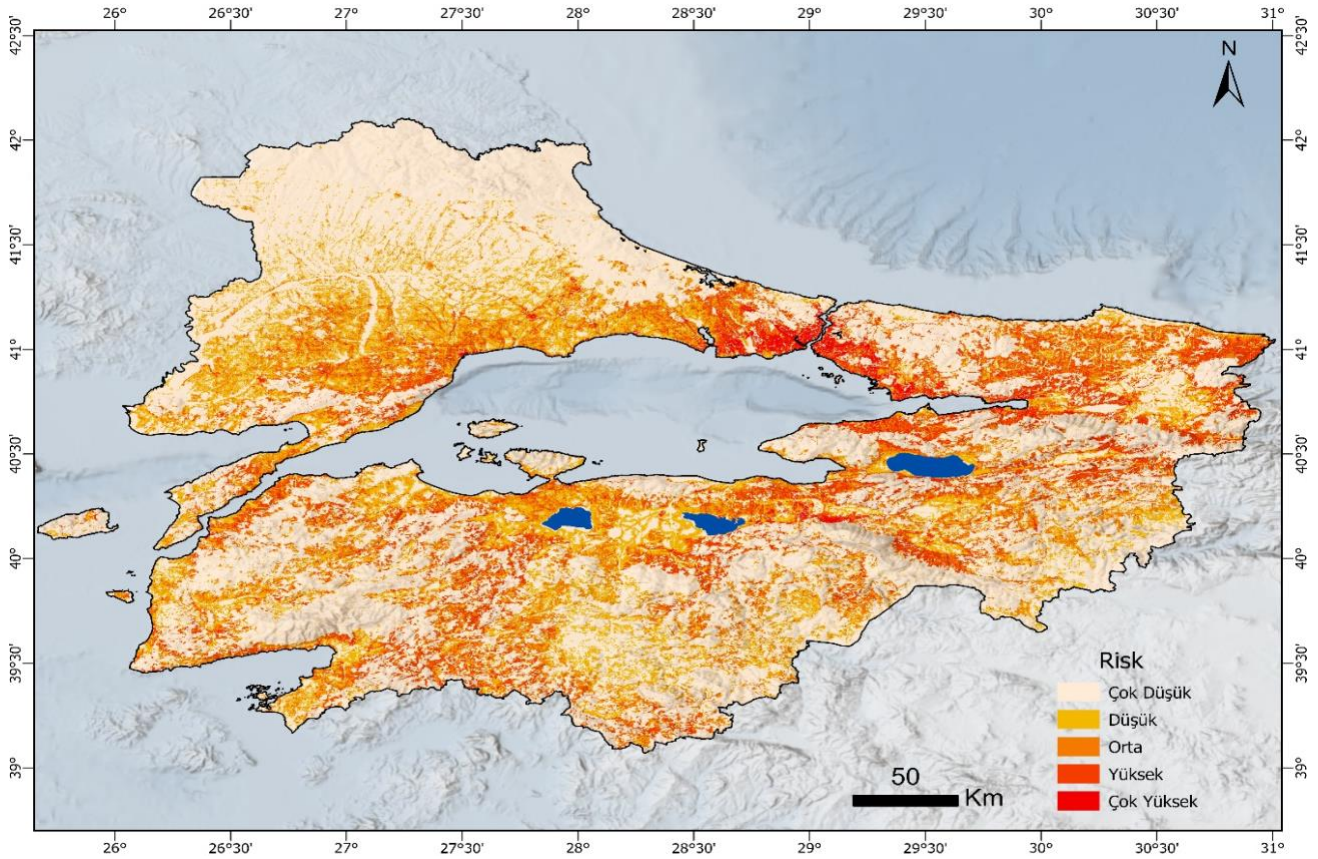
Nihai göreceli heyelan risk haritası, 50 yıllık RAIN_3d tehlike yüzeyi ile risk altındaki unsurların bileşik indeksinin hücre bazında çarpılmasıyla oluşturulmuştur. Bu harita, tehlike ile risk altındaki unsurların aynı konumda yoğunlaştığı alanları önceliklendirmektedir. Yüksek göreceli risk değerleri hem göreceli tehlike düzeyinin hem de nüfus, yapı stoğu, ulaşım altyapısı ve tarım arazilerinden oluşan bileşik unsur indeksinin çalışma alanındaki diğer hücrelere kıyasla yüksek olduğu alanları temsil etmektedir (Şekil 5-9).



Şekil 5-7 GAM tabanlı göreceli heyelan duyarlılık haritası.



Şekil 5-8 Göreli heyelan tehlike haritası (3-gün / 50 yıl senaryosu).



Şekil 5-9 Göreli heyelan risk haritası (3-gün / 50 yıl senaryosu).

Tablo 5-10 Tetikleyici olasılık senaryolarının genel yapısı.

Harita çıktısı	Kaynak model / veri	Temel yorum	Kullanım amacı
Heyelan duyarlılık haritası	GAM tabanlı S_{LS} duyarlılık yüzeyi	Heyelan oluşumuna elverişli zemin ve çevresel koşulların göreceli dağılımını gösterir.	Duyarlılık temelli önceliklendirme ve zemin koşulu değerlendirmesi
Heyelan tehlike haritası	HRAIN_3d_50yr göreceli tehlike indeksi ($H = S_{LS} \times P_T$)	Duyarlılık ile 3 günlük yağmur tetikleyici bileşeninin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen göreceli tehlike düzeyini gösterir.	Tehlike temelli planlama, önceliklendirme ve risk analizlerine girdi üretimi
Göreceli heyelan risk haritası	Risk_RAIN_3d_50yr, $R = H \times C$	Göreceli tehlike ile risk altındaki unsurların birlikte yoğunlaştığı alanları gösterir.	Risk azaltma önceliklendirmesi, ayrıntılı inceleme alanlarının belirlenmesi ve karar destek süreçlerine girdi sağlanması

Bu yaklaşım, sürekli model çıktılarının teknik içeriğini korurken, sonuçların MARAP kapsamında yürütülecek risk azaltma, önceliklendirme ve karar destek çalışmalarında kullanılabilecek okunabilir katmanlara dönüştürülmesini sağlamaktadır. Özellikle yüksek ve çok yüksek göreceli tehlike ve risk sınıfları, ayrıntılı inceleme, saha doğrulaması ve risk azaltma uygulamalarında öncelikli değerlendirme alanları olarak ele alınmalıdır. Buna karşılık düşük ve çok düşük sınıflar, göreceli olarak daha düşük öncelikli alanları temsil etmekle birlikte, yerel ölçekte ayrıntılı mühendislik ve saha koşulları dikkate alınmadan mutlak güvenli alanlar olarak yorumlanmamalıdır.

Risk haritaları da mutlak can kaybı, ekonomik zarar veya yıllık kayıp olasılığı olarak değerlendirilmemeli; Marmara Bölgesi içindeki göreceli mekânsal öncelikleri gösteren karar destek ürünleri olarak kullanılmalıdır. Bu nedenle haritaların yorumlanmasında, üretildikleri çözünürlük ve veri ölçeği gözetilmeli; bölgesel ölçekte anlamlı olan sınıf farklılıklarının parsel veya yapı ölçeğinde doğrudan karar gerekçesi olarak kullanılmasından kaçınılmalıdır. Yerel ölçekte alınacak kararların, jeoteknik etüt, saha gözlemi ve güncel envanter verileriyle desteklenmesi; harita çıktılarının ise bu ayrıntılı çalışmaların nerelerde önceliklendirileceğini belirleyen bir ön eleme aracı olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

6 BÖLÜM 5 — SONUÇLAR VE TEKNİK ÖNERİLER

6.1 Bölgesel Öncelik Seviyesi ve Bulguların Değerlendirmesi

Bu çalışma, Marmara Bölgesi için heyelan duyarlılığı, hidro-meteorolojik heyelan tehlikesi ve görelî heyelan riskini birbirini tamamlayan üç aşamada değerlendirmiştir. İlk aşamada, Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) kullanılarak görelî heyelan duyarlılık yüzeyi üretilmiştir. Model sonuçları, heyelanların mekânsal dağılışında eğim, topografik nemlilik, yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık, litoloji ve arazi örtüsü/kullanımı değişkenlerinin birlikte rol oynadığını göstermiştir. Eğitim AUC değerinin 0,834, rastgele 5 katlı çapraz doğrulama AUC değerinin 0,826 ± 0,021 ve mekânsal blok çapraz doğrulama AUC değerinin 0,783 olması, duyarlılık modelinin bölgesel ölçekte güçlü bir ayırt etme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

İkinci aşamada, 1990–2025 dönemine ait ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden türetilen yıllık maksimum tetikleyici serileri kullanılarak görelî tehlike indeksi üretilmiştir. Bu kapsamda RAIN_1d, RAIN_3d, RAIN_7d ve EW_7d tetikleyicileri değerlendirilmiş; her biri için bölgesel Q95 eşikleri ve Gumbel-MOM tabanlı aşılma olasılıkları hesaplanmıştır. Aday tehlike ürünleri arasında H_RAIN_3d 50-yıl ürünü, tetikleyici bileşen içeren haritalar içinde en yüksek başarı oranı AUC değerini üretmiştir (SR-AUC = 0,8374). Bu sonuç, 3 günlük kümülatif yağmur bileşeninin Marmara Bölgesi'nde görelî heyelan tehlikesinin mekânsal sıralanmasında en dengeli hidro-meteorolojik tetikleyici olduğunu göstermektedir.

Üçüncü aşamada, görelî tehlike yüzeyleri nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanlarından oluşturulan bileşik unsur indeksiyle birleştirilerek görelî heyelan risk yüzeyleri üretilmiştir. Risk analizi, kırılganlığın maksimum değer olan $V = 1$ ve risk altındaki unsurların mekânsal-zamansal bulunma olasılığının $P(T / X_j) = 1$ kabul edildiği $R = H \times C$ yaklaşımına dayanmaktadır. Birincil risk ürünü, nihai tehlike ürünüyle uyumlu olarak Risk_RAIN_3d_50yr şeklinde belirlenmiştir.

Bölgesel önceliklendirme sonuçları, görelî riskin çalışma alanının sınırlı bir bölümünde belirgin biçimde yoğunlaştığını göstermektedir. Risk değeri sıfırdan büyük hücreler içinde en yüksek %10'luk dilimi oluşturan hücreler, çalışma alanının %5,86'sına karşılık gelmesine rağmen bölge nüfusunun %81,1'ini ve toplam bina kat alanının %72,1'ini barındırmaktadır. En yüksek %1'lik görelî risk dilimi ise çalışma alanının yalnızca %0,59'unu oluşturmakta ve bölge nüfusunun %29,5'ini kapsamaktadır. Bu sonuçlar, nüfusun belirtilen oranlarının mutlak olarak "yüksek risk altında" bulunduğunu değil, risk altındaki unsurların en yüksek görelî risk değerlerine sahip sınırlı alanlarda yoğunlaştığını göstermektedir.

Tanısal değerlendirmeler, birincil senaryoda risk indeksindeki değişkenliğin yaklaşık %83'ünün tehlike bileşeninden kaynaklandığını göstermiştir. Alternatif

ağırlıklandırma şemaları bileşik unsur indeksini belirgin biçimde değiştirebilmekle birlikte, nihai risk sıralaması bütün alternatiflerde yüksek ölçüde korunmuştur. Bu nedenle bileşik unsur indeksi ağırlık tercihine duyarlı, nihai göreceli risk sıralaması ise tehlike bileşeninin baskınlığı nedeniyle görece dayanıklı bir yapı göstermektedir.

Bölgesel önceliklendirme açısından, yüksek ve çok yüksek duyarlılık/tehlike sınıfları ile yüksek göreceli risk değerlerinin yoğunlaştığı alanlar, MARAP kapsamında ayrıntılı inceleme, saha kontrolü ve risk azaltma uygulamalarında öncelikli değerlendirme alanları olarak ele alınmalıdır. Bu alanlar, hem zemin ve çevresel koşullar bakımından heyelana elverişli veya hidro-meteorolojik tetikleyici koşullar altında göreceli tehlike düzeyi yüksek, hem de nüfus, yapı stoğu, ulaşım altyapısı ve tarım arazilerinin yoğunlaştığı alanları temsil etmektedir. Buna karşılık düşük ve çok düşük sınıflar mutlak güvenli alanlar olarak değil, çalışma alanı içinde göreceli olarak daha düşük öncelikli alanlar olarak yorumlanmalıdır.

6.2 Çalışmanın Kapsamı ve Yorum Çerçevesi

Bu raporda üretilen duyarlılık, tehlike ve risk çıktıları, Marmara Bölgesi için bölgesel ölçekli karar destek amacıyla geliştirilmiştir. Duyarlılık haritası, heyelan oluşumuna elverişli zemin ve çevresel koşulların göreceli dağılımını gösterirken; tehlike haritası bu duyarlılık bilgisini ERA5-Land tabanlı hidro-meteorolojik tetikleyici bileşenle birlikte değerlendirmektedir. Bu nedenle tehlike haritası, 50 yıllık 3 günlük yağmur tetikleyici senaryosu altında göreceli heyelan tehlike indeksi olarak yorumlanmalıdır.

Risk haritası ise 50 yıllık RAIN_3d göreceli tehlike indeksi ile risk altındaki unsurların bileşik indeksinin hücre bazında birleştirilmesini göstermektedir. Bu çıktı, yıllık heyelan olasılığı, beklenen can kaybı, hasarlı bina sayısı veya parasal zarar tahmini değildir. Risk haritası, tehlike ile risk altındaki unsurların Marmara Bölgesi içinde mekânsal olarak birlikte yoğunlaştığı alanları karşılaştırmalı biçimde gösteren göreceli bir risk indeksidir.

Çalışma, hidro-meteorolojik tetikleyici bileşene odaklanmaktadır. Deprem, ani insan müdahaleleri, kazı-dolgu faaliyetlerinin zaman içindeki değişimi veya büyük altyapı projeleri gibi diğer potansiyel tetikleyiciler bu modelin doğrudan dinamik bileşeni olarak değerlendirilmemiştir. Ancak yola uzaklık, arazi örtüsü/kullanımı ve benzeri değişkenler aracılığıyla insan etkisinin mekânsal izleri duyarlılık modeline dahil edilmiştir.

Risk analizinde kullanılan tehlike katmanı heyelan şiddeti, hızı, hacmi, akış derinliği veya etki basıncı içermediğinden, unsur türlerine özgü fiziksel kırılma eğrileri uygulanamamıştır. Bu nedenle kırılma maksimum değer olan $V = 1$ olarak kabul edilmiştir. Statik unsurlar için mekânsal-zamansal bulunma olasılığı 1 alınmış; nüfus için de gün içi hareketliliği gösteren veri bulunmadığından aynı varsayım kullanılmıştır. Bu kabuller, risk sonuçlarının olası kayıpları hesaplayan nicel bir

tahmin değil, bölgesel görelî önceliklendirme ürünü olarak yorumlanmasını gerektirmektedir.

Üretilen haritalar, hangi alanlarda daha ayrıntılı inceleme, saha kontrolü, planlama denetimi veya risk azaltma önlemi gerektiğini gösteren bölgesel karar destek katmanları olarak değerlendirilmelidir. Bu yönüyle çalışma, MARAP kapsamında duyarlılık, tehlike ve risk azaltma önceliklerinin birlikte değerlendirilmesine yönelik teknik bir altyapı sunmaktadır.

Risk çıktısı doğrudan bağımsız kayıp verileriyle doğrulanmamıştır. Doğrulama bileşen düzeyinde yürütülmüş olup, tehlike modeli bağımsız heyelan envanteriyle sınanmış, risk altındaki unsur katmanlarında ise kaynak toplamaların raster dönüşümü sonrasında korunumu kontrol edilmiştir. Risk düzeyinde doğrudan doğrulama için mekânsal olarak konumlandırılmış hasar, ekonomik zarar veya can kaybı verileri gerekmektedir. Mevcut genel heyelan envanteri, olayların hangi unsurları etkilediğini göstermediği için risk indeksinin doğrudan sınanmasına uygun değildir.

6.3 Veri ve Analiz Geliştirme İhtiyaçları

Çalışmanın gelecekte daha da güçlendirilmesi için öncelikli ihtiyaçlardan biri, heyelan envanterinin olay tarihi, başlangıç zonu, alan, hacim, hareket tipi ve tetikleyici bilgisi bakımından zenginleştirilmesidir. Daha geniş ve tarih bilgisi daha güvenilir bir envanter, tetikleyici pencerelerinin ve eşiklerin daha güçlü biçimde test edilmesini sağlayacaktır.

Hidro-meteorolojik bileşen açısından ERA5-Land verisi, bölgesel ölçekte tutarlı ve sürekli bir veri altyapısı sağlamaktadır. Bununla birlikte, veri setinin mekânsal çözünürlüğü yerel konvektif yağışları ve kısa süreli yüksek şiddetli olayları noktasal ölçüm hassasiyetinde temsil etmeyebilir. Bu nedenle gelecekteki analizlerde, mümkün olduğunda yer gözlemleri, radar yağış ürünleri veya daha yüksek çözünürlüklü yeniden analiz verileriyle karşılaştırmalı kontroller yapılması modelin güvenilirliğini artıracaktır.

Risk analizinin geliştirilmesi açısından temel ihtiyaç, olayların neden olduğu sonuçların sistematik ve mekânsal olarak konumlandırılmış biçimde derlenmesidir. Ölümlü heyelan envanterleri, bina ve altyapı hasar kayıtları, ekonomik kayıp verileri, sigorta kayıtları ve etkilenen unsurları içeren olay tabanlı envanterler, risk indeksinin doğrudan doğrulanmasına olanak sağlayacaktır. Bu veriler aynı zamanda maksimum kırılganlık varsayımının kaldırılmasını ve nüfus, yapı stoğu, ulaşım altyapısı ve tarım arazileri için farklı kırılganlık ilişkilerinin geliştirilmesini mümkün kılacaktır.

Nüfus katmanının ikamet nüfusuna dayanması, gün içindeki hareketlilik ile mevsimsel nüfus değişimlerini temsil etmemektedir. Gelecekte mobil nüfus, çalışma alanları, turizm hareketliliği ve ulaşım yoğunluğu gibi dinamik verilerin kullanılması, mekânsal-zamansal bulunma olasılığının daha gerçekçi biçimde modellenmesini

sağlayacaktır. Kritik tesislerin ayrı bir unsur katmanı olarak eklenmesi ve karayolu ile demiryolu için güvenilir birim maliyet verilerinin temin edilmesi de risk sonuçlarının kurumsal uygulama değerini artıracaktır.

Orta vadede, modelin çoklu tetikleyici çerçevesine genişletilmesi yararlı olacaktır. Özellikle Marmara Bölgesi'nin sismik tehlike koşulları dikkate alındığında, deprem tetikleyicisinin ayrı bir bileşen olarak değerlendirilmesi önemlidir. Uzun vadede ise iklim değişikliği projeksiyonlarının hidro-meteorolojik tehlike analizine entegre edilmesi, geleceğe dönük planlama ve afet risk azaltma stratejileri açısından önemli katkı sağlayacaktır.

6.4 Teknik ve Kurumsal Öneriler

Kısa vadede, nihai GAM tabanlı duyarlılık haritası, H_RAIN_3d 50-yıl görelî heyelan tehlike haritası ve Risk_RAIN_3d_50yr görelî heyelan risk haritası standart lejant, metadata ve veri formatlarıyla MARAP karar destek sistemine entegre edilmelidir. Harita sınıfları çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek biçiminde tutarlı olarak sunulmalı ve her sınıfın görelî önceliklendirme anlamı açıkça tanımlanmalıdır. Özellikle yüksek ve çok yüksek tehlike ile risk sınıfları, yerel ölçekte ayrıntılı etüt, saha kontrolü ve risk azaltma uygulaması gerektiren öncelikli alanlar olarak değerlendirilmelidir.

Risk haritasının kurumsal kullanımında, yüksek görelî risk değerlerinin mutlak kayıp veya kesin olay beklentisi anlamına gelmediği açıkça belirtilmelidir. Harita; yatırım, denetim, ayrıntılı inceleme ve saha çalışması önceliklerinin belirlenmesinde kullanılmalı, parsel veya yapı ölçeğindeki kararlar için tek başına yeterli kabul edilmemelidir. Nüfus, bina ve ulaşım verileri belirli aralıklarla güncellenmeli; bütün güncellemelerde veri tarihi, kaynak, rasterizasyon yöntemi ve normalizasyon parametreleri metadata içinde korunmalıdır.

Orta vadede, duyarlılık modelinde tespit edilen mekânsal bağımlılık etkisini azaltacak ek modelleme seçenekleri test edilebilir. Mekânsal terimlerin eklenmesi, farklı örnekleme stratejilerinin denenmesi veya modelin alt bölgesel ölçekte yeniden kalibre edilmesi, özellikle yerel uygulamalar için faydalı olabilir. Ayrıca H_RAIN_3d ana ürününün yanında H_EWI_7d tamamlayıcı senaryosunun da karar destek sisteminde karşılaştırmalı olarak tutulması önerilir. Bu yaklaşım, yağmur ve kar erimesi birleşik etkisinin belirli alt bölgelerde nasıl farklılaştığını izlemeye olanak sağlayacaktır.

Uzun vadede, heyelan şiddetini temsil eden hız, hacim, akış derinliği, etki basıncı veya yayılım alanı gibi değişkenler tehlike modeline entegre edilmelidir. Bu gelişme, unsur türlerine özgü kırılabilirlik eğrilerinin uygulanmasını ve mevcut görelî risk indeksinin beklenen fiziksel hasar veya ekonomik kayıp tahminlerine dönüştürülmesini sağlayacaktır. Mekânsal hasar kayıtlarının, sigorta verilerinin ve can kaybı bilgilerinin kurumsal bir veri tabanında birleştirilmesi ise risk modelinin bağımsız doğrulamasına ve düzenli olarak güncellenmesine olanak verecektir.

7 BÖLÜM 6 — RİSK AZALTMA POLİTİKA VE STRATEJİLERİ

Bu bölüm, önceki bölümlerde üretilen heyelan duyarlılık, tehlike ve göreceli risk çıktıları; bölgesel ve il ölçeğinde uygulanabilir risk azaltma politika ve stratejilerine dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Bölüm, diğer İP-4 tehlike raporlarında (deprem, sel-taşkın, orman yangını, teknolojik afet) benimsenen yaklaşımla uyumlu biçimde, ileride hazırlanacak bütünleşik Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planına doğrudan girdi oluşturacak bir çerçeve sunar. Öneriler, göreceli heyelan risk haritası (Risk_RAIN_3d_50yr) çıktıları'nın mekânsal desenine dayandırılmış; risk sınıflarının bölgesel önceliklendirme amacıyla üretilmiş göreceli değerler olduğu, mutlak olay veya kayıp tahmini olmadığı esas alınmıştır.

Politikaların temel ilkesi, kaynakların en fazla yamacın veya en dik alanın bulunduğu yere değil; heyelan tehlikesinin nüfus, yapı stoku, ulaşım altyapısı ve tarım arazileriyle çakıştığı, yani göreceli riskin yoğunlaştığı sınırlı alanlara yönlendirilmesidir. Risk analizi sonuçları, bu yoğunlaşmanın belirgin olduğunu; en yüksek göreceli riskli %10'luk alanın (çalışma alanının yalnızca %5,86'sı) bölge nüfusunun %81,1'ini ve toplam bina kat alanının %72,1'ini barındırdığını göstermektedir. Bu desen, dar fakat yüksek etkili alanlara odaklı bir risk azaltma stratejisini hem mümkün hem de gerekli kılmaktadır.

7.1 Risk Haritasının Mekânsal Deseni ve Politikaya Esası

Göreceli heyelan risk haritası, Marmara Bölgesi genelinde belirgin biçimde heterojen bir desen ortaya koymaktadır. Trakya'nın iç ve kuzey kesimleri (Edirne, Kırklareli ve Tekirdağ'ın büyük bölümü) ağırlıklı çok düşük risk sınıfındadır; buna karşılık yüksek ve çok yüksek risk değerleri belirli coğrafi eksenlerde toplanmaktadır. Bu eksenler; (i) İstanbul Boğazı çevresi ile kentin kuzeyindeki ormanlık-yamaç kuşağı, (ii) İzmit Körfezi'ni çevreleyen dik yamaçlar ve Kuzey Anadolu Fay Zonu koridoru boyunca Kocaeli-Sakarya hattı, (iii) Yalova-Bursa ekseninde güney Marmara yamaç kuşağı ve (iv) Ganos (Işıklar) Dağları'nın kontrol ettiği güney Tekirdağ kıyısı ile Biga yarımadası ve Kaz Dağı eteklerindeki yerel yoğunlaşmalardır.

Bu mekânsal desen, raporun sayısal bulgularıyla tutarlıdır. Göreceli riskin sınırlı alanlarda yoğunlaşması ve risk sıralamasının büyük ölçüde tehlike bileşeni tarafından (değişkenliğin yaklaşık %83'ü) yönlendirilmesi, önceliklendirmenin hem tehlike düzeyini hem de risk altındaki unsurların yoğunluğunu birlikte gözetten bir yaklaşımla yapılmasını gerektirmektedir. Özellikle İstanbul çevresindeki yüksek risk kümelerinin güçlü antropojenik izler (kentsel dönüşüm, inşaat, şev ve kazı-dolgu müdahaleleri) taşıması, heyelan riskinin yalnızca doğal bir süreç olarak değil, arazi kullanımı ve yapılaşma denetimiyle doğrudan ilişkili bir planlama sorunu olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

7.2 Bölgesel Politika ve Stratejiler

Marmara ölçeğinde, birbirini tamamlayan sekiz strateji eksenı önerilmektedir. Bu eksenler, il bazlı önceliklerin ortak çerçevesini oluşturur. Eksenlerin tümü, aynı risk haritası çıktısını ortak referans olarak birbirini destekleyecek biçimde kurgulanmıştır.

1) Mekânsal önceliklendirme ve hedefli kaynak tahsisi. Yüksek ve çok yüksek görelı risk kümeleri, ayrıntılı saha etüdü, jeoteknik inceleme ve risk azaltma yatırımlarında ilk sıraya alınır; kaynaklar bu sınırlı fakat yüksek maruziyetli alanlara yönlendirilir. Önceliklendirme, görelı risk sınıflarının yanı sıra nüfus, yapı stoku ve kritik tesis yoğunluğu gibi maruziyet göstergeleriyle birlikte değerlendirilir; böylece sınırlı bütçenin en yüksek fayda sağlayacağı alanlara yönlendirilmesi mümkün olur.

2) Arazi kullanımı ve imar denetimiyle bütünleşme. Duyarlılık ve tehlike haritaları, imar planlarına ve yapılaşma kararlarına altlık olarak entegre edilir; yüksek duyarlı yamaçlarda yeni yapılaşma sınırlandırılır, şev ve kazı-dolgu müdahaleleri denetlenir. Ayrıca ruhsat ve yapı denetimi süreçlerinde duyarlılık sınıfına bağlı ek jeoteknik rapor koşulu aranması, riskin planlama aşamasında önlenmesini sağlar.

3) Yağış tetikleyicili erken uyarı ve izleme. Modelin ana tetikleyicisi olan üç günlük kümülatif yağış eşikleri temel alınarak, yüksek riskli illerde meteorolojik erken uyarı ve yamaç izleme sistemleri önceliklendirilir. Eşiklerin il ve havza ölçeğinde kalibre edilmesi, yanlış alarm oranını düşürerek sistemin kurumsal güvenilirliğini artırır; uyarılar il afet müdürlükleri ve yerel yönetimlerin müdahale protokolleriyle eşleştirilir.

4) Kritik altyapı ve ulaşım koridoru güvenliği. Karayolu, demiryolu, enerji ve su altyapısının heyelan kümeleriyle kesiştiği koridorlarda yamaç stabilizasyonu, drenaj ve süreklilik planları geliştirilir. Bu koridorlarda alternatif güzergâh ve yeniden yönlendirme senaryolarının önceden tanımlanması, kesinti sürelerini ve ekonomik kaybı sınırlandırır.

5) Envanterin zenginleştirilmesi ve doğrulama. Olay tarihi, alan, hacim, hareket tipi ve tetikleyici bilgisini içeren; etkilenen unsurları konumlandıran olay-tabanlı envanter oluşturularak model doğrulaması ve eşik kalibrasyonu güçlendirilir. Standart bir kayıt formatı ve merkezi veri tabanı kullanılması, farklı kurumlarca toplanan verilerin karşılaştırılabilir ve modele doğrudan girdi olabilir nitelikte olmasını sağlar.

6) Çoklu tetikleyici ve iklim değişikliği entegrasyonu. Marmara'nın sismik koşulları nedeniyle deprem tetikleyicisi ayrı bir bileşen olarak; uzun vadede iklim değişikliği yağış projeksiyonları tehlike analizine dahil edilir. Böylece yağış dışı tetikleyicilerin katkısı ayrıştırılabilir ve tehlike tahminleri değişen iklim koşulları altında güncel tutulabilir.

7) Kurumsal yönetim ve veri paylaşımı. AFAD koordinasyonunda; İTÜ, Çevre-Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, il afet müdürlükleri, yerel yönetimler, Karayolları ve MGM arasında veri paylaşım protokolleri kurulur; çıktılar AYDES ve MARAP ŞESİM bileşenine entegre edilir. Paylaşımın sürekliliği için veri güncelleme sıklığı, format standartları ve sorumluluk matrisi protokollerde açıkça tanımlanmalıdır.

8) Finansal dayanıklılık. Yüksek riskli yamaç yerleşimlerinde yapısal önlem, taşınma/dönüşüm ve risk transferi (sigorta) mekanizmaları ile afet sonrası mali yük azaltılır. Risk transferi araçlarının yaygınlaştırılması, kamu üzerindeki afet sonrası mali yükü azaltırken hane halkı düzeyinde de toparlanma süresini kısaltır.

7.3 İl Bazlı Politika ve Öncelikler

Risk haritasının il ölçeğindeki deseni, illeri farklı öncelik düzeylerine ayırmaktadır. Aşağıdaki tablo, her il için haritadan okunan baskın risk desenini, göreceli öncelik düzeyini ve öne çıkan politika/strateji yönelimini özetlemektedir. Öncelik düzeyleri, tehlike deseni ile nüfus ve yapı yoğunluğunun birlikte değerlendirilmesine dayanan göreceli değerlendirmelerdir.

İl	Haritaya Göre Baskın Risk Deseni	Öncelik	Öne Çıkan Politika / Strateji
İstanbul	Boğaz çevresi ve kuzey ormanlık-yamaç kuşağında yoğun Yüksek-Çok Yüksek kümeleri; güçlü antropojenik izler	Çok yüksek	Şev/kazı-dolgu denetimi; kentsel dönüşüm ve imar kararlarının duyarlılık haritasıyla ilişkilendirilmesi; en yüksek nüfus maruziyeti
Kocaeli	İzmit Körfezi yamaçları ve KAF koridorunda yaygın Yüksek-Çok Yüksek	Çok yüksek	Sanayi ve ulaşım koridorlarının korunması; heyelan-deprem etkileşiminin dikkate alınması
Sakarya	Güney ve doğu dağlık kesimlerde yaygın Orta-Yüksek	Yüksek	Yamaç stabilizasyonu; orman yolu ve kırsal yerleşim önceliklendirmesi
Yalova	Kıyı gerisi dik yamaçlarda küçük alanda yoğun Yüksek	Yüksek	Dik yamaç yerleşimlerinde yapılaşma denetimi ve drenaj yönetimi
Bursa	Uludağ etekleri ile Gemlik-İznik-İnegöl kuşağında geniş Orta-Yüksek	Yüksek	Yamaç yerleşimleri ve ulaşım hatlarında etüt; arazi kullanımı denetimi
Bilecik	Tepelik-dağlık kesimlerde Orta-Yüksek	Orta-Yüksek	Karayolu şevleri ve kırsal yerleşimlerde hedefli önlem
Balıkesir	İç kesim tepelerinde yaygın Orta, dağınık Yüksek	Orta	Havza ve yamaç ölçeğinde ayrıntılı etüt
Çanakkale	Biga yarımadası ve Kaz Dağı eteklerinde Orta, yer yer Yüksek	Orta	Kıyı-dağ geçiş kuşağı ve yol şevlerinin izlenmesi
Tekirdağ	İç/kuzey kesim ağırlıklı Düşük; güney kıyıda (Ganos/Şarköy) yoğun Yüksek bandı	Orta (yerel yüksek)	Güney kıyı fay denetimli dik kuşakta hedefli önlem ve izleme

İl	Haritaya Göre Baskın Risk Deseni	Öncelik	Öne Çıkan Politika / Strateji
Kırklareli	Ağırlıklı Çok Düşük; kuzeyde Yıldız (Istranca) Dağları'nda yerel Orta	Düşük	İzleme; yol ve orman altyapısı odaklı yerel önlem
Edirne	Ağırlıklı Çok Düşük	Düşük	Genel izleme; öncelik diğer illerde

Çok yüksek öncelikli iller (İstanbul, Kocaeli). Bu illerde yüksek tehlike, yoğun nüfus ve yapı stoku bir arada bulunduğundan bölgesel riskin büyük bölümünü belirlemektedir. İstanbul'da öncelik, antropojenik kaynaklı heyelanların denetimi (şev müdahaleleri, kazı-dolgu, kentsel dönüşüm) ve imar kararlarının haritalarla ilişkilendirilmesidir. Kocaeli'de ise sanayi-ulaşım koridorları ile Kuzey Anadolu Fay Zonu'na bağlı heyelan-deprem etkileşimi ön plandadır.

Yüksek öncelikli iller (Sakarya, Yalova, Bursa). Güney ve doğu Marmara yamaç kuşağında geniş orta-yüksek risk alanları bulunmaktadır. Öncelik; yamaç stabilizasyonu, dik yamaç yerleşimlerinde yapılaşma denetimi, ulaşım hatlarında etüt ve drenaj yönetimidir.

Orta öncelikli iller (Bilecik, Balıkesir, Çanakkale, güney Tekirdağ). Bu illerde risk daha dağınık olmakla birlikte belirli yamaç, kıyı-dağ geçiş kuşağı ve yol şevlerinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle Tekirdağ'ın güney kıyısındaki fay denetimli dik kuşak, il genelinde düşük risk hâkim olsa da yerel olarak yüksek öncelik taşır.

Düşük öncelikli iller (Kırklareli, Edirne). Ağırlıklı çok düşük risk sınıfında yer alan bu illerde genel izleme yeterli olup; yalnızca Yıldız (Istranca) Dağları gibi yerel yükseltilerde hedefli değerlendirme önerilir. Düşük öncelik, mutlak güvenlik anlamına gelmez.

7.4 Yağış Tetikleyicili Erken Uyarı ve İzleme Yaklaşımı

Tehlike modelinin ana tetikleyicisinin üç günlük kümülatif yağış (RAIN_3d) olması, erken uyarı için doğrudan uygulanabilir bir dayanak sunmaktadır. Yüksek ve çok yüksek riskli illerde (öncelikle İstanbul, Kocaeli, Yalova, Sakarya ve Bursa), bölgesel yağış eşiklerine dayalı bir heyelan erken uyarı yaklaşımı geliştirilmelidir. Bu yaklaşım; Meteoroloji Genel Müdürlüğü yağış tahmin ve gözlemleri, seçili yüksek riskli yamaçlarda konumlandırılacak yamaç izleme (inklinometre, gözenek suyu basıncı, yağış ve yüzey hareketi) sensörleri ve AFAD müdahale kapasitesinin bütünleştirilmesini içerir. Erken uyarı eşikleri, envanterin zenginleştirilmesiyle birlikte yerel koşullara göre kalibre edilmelidir.

7.5 Uygulama Yol Haritası

Önerilen politika ve stratejiler, kısa, orta ve uzun vadeli bir yol haritasıyla hayata geçirilecektir. Aşağıdaki çerçeve, il bazlı önceliklerle ilişkilendirilerek uygulanmalıdır.

Vade	Odak	Beklenen Çıktı
Kısa (0–1 yıl)	En yüksek göreceli riskli kümelerin (İstanbul–Kocaeli–Yalova–Sakarya) saha doğrulaması; yağış-eşikli erken uyarı pilotu; envanterin zenginleştirilmesi	Öncelikli etüt listesi; doğrulanmış envanter; erken uyarı eşikleri
Orta (1–3 yıl)	İl bazlı ayrıntılı etüt ve yamaç stabilizasyonu; haritaların imar planlarına altlık olarak entegrasyonu; kritik altyapı süreklilik planları	Yerel duyarlılık/tehlike etütleri; planlama denetimi; müdahale planları
Uzun (3+ yıl)	Şiddet-tabanlı kırılabilirlik; deprem tetikleyicisi ve iklim projeksiyonlarının entegrasyonu; AYDES/ŞESİM ile sürekli izleme	Güncellenebilir bölgesel karar destek ve izleme sistemi

7.6 Bütünleşik Marmara Risk Azaltma Planına Katkı

Bu bölümde geliştirilen heyelan politika ve stratejileri, tek başına bir sektör planı olarak değil; MARAP kapsamında farklı afet türleri için üretilen çıktıların bütünleştirileceği çok tehlikeli (multi-hazard) bir bölgesel risk azaltma planının bileşeni olarak tasarlanmıştır. Heyelan risk haritası; deprem, sel-taşkın, orman yangını ve teknolojik afet katmanlarıyla ortak bir mekânsal çerçevede (ortak grid, ortak sınıflandırma ve ortak önceliklendirme mantığı) çakıştırıldığında, aynı alanda birden fazla tehlikenin biriktiği kümelerin belirlenmesine olanak tanır. Özellikle İstanbul–Kocaeli eksenini gibi hem yüksek heyelan hem yüksek deprem ve teknolojik afet riski taşıyan alanlar, bütünleşik planda en yüksek öncelikli müdahale bölgeleri olarak öne çıkacaktır.

Bu doğrultuda, üretilen duyarlılık, tehlike ve göreceli risk katmanlarının standart lejant, metadata ve veri formatlarıyla MARAP karar destek sistemine, AYDES ve ŞESİM bileşenlerine aktarılması; verinin güncellenebilir, izlenebilir ve müdahale planlamasına doğrudan girdi veren bir yapıya dönüşmesini sağlayacaktır. Böylece heyelan bileşeni, Marmara Bölgesi için bütüncül, ölçülebilir ve sürdürülebilir bir afet risk azaltma planına sağlam bir teknik altlık sunacaktır.

8 GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma, Marmara Bölgesi'nde heyelan olgusunu mekânsal hazırlayıcı koşullar, hidro-meteorolojik tetikleyici bileşen ve risk altındaki unsurların dağılımı ekseninde ele alan bütünleşik ve tekrarlanabilir bir analiz çerçevesi ortaya koymaktadır. Çerçevenin ilk bileşeninde, Genelleştirilmiş Ekleme Modeli (GAM) kullanılarak görelî heyelan duyarlılık yüzeyi üretilmiş; eğim, topografik nemlilik indeksi, yıllık toplam yağış, faya uzaklık, yola uzaklık, litoloji ile arazi örtüsü/kullanımı değişkenlerinin duyarlılık üzerindeki doğrusal olmayan etkileri sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Model başarımı, 0,834 eğitim AUC, $0,826 \pm 0,021$ rastgele çapraz doğrulama AUC ve 0,783 mekânsal blok çapraz doğrulama AUC değerleriyle nicelenmiştir. Bu değerler, modelin ayırt etme kapasitesinin yüksek olduğunu; buna karşılık mekânsal blok doğrulamada gözlenen görece düşüş nedeniyle sonuçların mekânsal genellenebilirlik ve artık mekânsal otokorelasyon açısından ihtiyatla yorumlanması gerektiğini göstermektedir. Değişken katkıları incelendiğinde, eğim ve topografik nemlilik indeksinin duyarlılık üzerinde en belirleyici topoğrafik denetimi kurduğu; yola uzaklık değişkeninin ise antropojenik yamaç müdahalelerinin duyarlılığı artırıcı etkisini temsil ettiği görülmüştür. Litoloji ve arazi örtüsü/kullanımı gibi kategorik değişkenler ise bu sürekli etkileri, zayıf zeminli birimler ve örtü kaybının yaşandığı yamaçlar lehine yeniden ağırlıklandırmaktadır.

Çerçevenin ikinci bileşeninde, 1990–2025 dönemine ait ERA5-Land günlük hidro-meteorolojik verilerinden yıllık maksimum tetikleyici serileri türetilmiş ve bu seriler Gumbel-MOM uç değer modellemesiyle çözümlenmiştir. RAIN_1d, RAIN_3d, RAIN_7d ve EWİ_7d tetikleyicilerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi sonucunda, nihai ana tehlike ürünü olarak H_RAIN_3d 50-yıl görelî heyelan tehlike haritası benimsenmiştir. Bu tercih, söz konusu ürünün aday tehlike ürünleri arasında en yüksek SR-AUC değerini (0,8374) üretmesi ve zamansal doğrulamada RAIN_3d değişkeninin en tutarlı tetikleyici sinyalini vermesiyle nesnel biçimde gerekçelendirilmiştir. En yüksek tehlike sınıfında 1.646 heyelan yakalanmış olup, bu sınıftaki görelî heyelan yoğunlaşma oranı bölgesel ortalamanın yaklaşık 3,4 katı düzeyinde hesaplanmıştır. Tetikleyici seçiminde üç günlük kümülatif yağışın öne çıkması, bölgedeki heyelanların büyük ölçüde tek bir yoğun sağanaktan çok, ardışık günlere yayılan ve zemin doygunluğunu artıran yağış birikimiyle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Gumbel parametrelerinin mekânsal dağılımı da bu bulguyu desteklemekte; yüksek konum ve ölçek değerleri güney ve doğu Marmara'nın yükseltisi görece fazla yamaç kuşaklarında toplanmaktadır.

Üçüncü bileşende, nüfus, bina kat alanı, karayolu, demiryolu ve tarım arazisi katmanları ortak bir ölçeğe normalize edilerek eşit ağırlıklı bileşik unsur indeksi oluşturulmuş ve bu indeks görelî tehlike yüzeyleriyle birleştirilmiştir. Böylece elde edilen birincil Risk_RAIN_3d_50yr çıktısı, tehlike ile maruz unsurların birlikte yoğunlaştığı alanları belirgin biçimde ayrıştırmaktadır. Çalışma alanının yalnızca %5,86'sını oluşturan en yüksek görelî riskli hücrelerin bölge nüfusunun %81,1'ini ve

toplam bina kat alanının %72,1'ini barındırması, riskin mekânsal olarak güçlü biçimde yoğunlaştığını ve risk azaltma kaynaklarının sınırlı fakat yüksek maruziyetli alanlara yönlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Eşit ağırlıklandırma tercihi, unsurlar arasında öncelik varsayımı yapmaktan kaçınarak yöntemin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini korumayı amaçlamıştır; farklı ağırlık setleriyle üretilecek duyarlılık sınamaları, çıktının karar süreçlerindeki sağlamlığını ayrıca test etmeye elverişlidir. Elde edilen desende riskin İstanbul-Kocaeli eksenine ile güney Marmara yamaç yerleşimlerinde belirgin biçimde kümelenildiği görülmektedir.

Bulgular bütün olarak değerlendirildiğinde, Marmara Bölgesi'nde heyelan tehlikesinin ve göreceli riskin homojen dağılmadığı; yüksek değerlerin belirli topoğrafik, jeolojik, antropojenik ve hidro-meteorolojik koşulların risk altındaki unsurlarla çakıştığı sınırlı alanlarda kümelenildiği görülmektedir. Üretilen üç harita birbirini tamamlayan farklı sorulara yanıt vermektedir: duyarlılık haritası heyelan oluşumuna elverişli alanların göreceli dağılımını betimlemekte, tehlike haritası bu desenin 50 yıllık üç günlük yağış tetikleyici senaryosu altında nasıl yeniden ağırlıklandığını göstermekte, risk haritası ise söz konusu tehlike deseninin nüfus, yapı stoğu, ulaşım altyapısı ve tarım arazilerinin mekânsal dağılımıyla kesiştiği öncelikli alanları tanımlamaktadır. Bu ayırım, haritaların birbirinin yerine kullanılmasının önüne geçmesi bakımından önemlidir: planlama ve imar kararlarında duyarlılık ve tehlike katmanları altlık niteliği taşıırken, kaynak tahsis ve müdahale önceliklendirmesinde risk katmanı esas alınmalıdır.

Bu çıktıların yorumlanmasında yöntemsel sınırların gözetilmesi gerekmektedir. Risk analizi, kırılabilirliğin azami değerde ve mekânsal-zamansal bulunma olasılığının bir olarak kabul edildiği, indeks tabanlı bölgesel bir yaklaşıma dayanmaktadır. Dolayısıyla sonuçlar beklenen can kaybı, hasarlı yapı sayısı veya parasal zarar tahmini olarak değil, Marmara Bölgesi içindeki göreceli öncelikleri ortaya koyan karar destek çıktıları olarak okunmalıdır. Mekânsal kayıp verilerinin bulunmaması nedeniyle risk düzeyinde doğrudan doğrulama yapılamamış; doğrulama çabası tehlike modeli ve risk altındaki unsur katmanları düzeyinde yürütülmüştür. Benzer biçimde, ERA5-Land verisinin mekânsal çözünürlüğü yerel ölçekteki yağış değişkenliğini kısmen yumuşatmakta; envanterin olay tarihi ve hacim bilgisi içermemesi ise zamansal doğrulamanın çözünürlüğünü sınırlamaktadır. Bu sınırlar, çıktıların bölgesel önceliklendirme ölçeğinde kullanılmasını gerektirmekte, parsel ölçeğinde karar üretilmesi için ayrıntılı saha etüdü ve jeoteknik incelemeyi zorunlu kılmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, MARAP kapsamında heyelan duyarlılığının, tehlikesinin ve göreceli riskinin CBS tabanlı, tekrarlanabilir ve teknik olarak denetlenebilir biçimde modellenmesine yönelik tutarlı bir çerçeve sunmaktadır. Üretilen duyarlılık, tehlike ve risk haritaları; bölgesel risk azaltma önceliklerinin belirlenmesine, ayrıntılı saha ve jeoteknik inceleme alanlarının seçilmesine ve kurumsal karar destek süreçlerinin güçlendirilmesine doğrudan girdi sağlayabilecek niteliktedir. Bu yönüyle çalışma, heyelanların Marmara Bölgesi'nde yalnızca

jeomorfolojik bir süreç olarak değil; arazi kullanımı, altyapı güvenliği, bölgesel planlama ve afet risk azaltma politikaları bakımından stratejik önem taşıyan bir risk kaynağı olarak ele alınması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Çerçevenin modüler yapısı, envanterin zenginleştirilmesi, deprem tetikleyicisinin ayrı bir bileşen olarak eklenmesi ve iklim değişikliği yağış projeksiyonlarının dahil edilmesi yoluyla ileride güncellenmesine olanak tanımaktadır. Böylece üretilen haritalar statik birer ürün değil, güncellenebilir bir karar destek altyapısının bileşenleri olarak konumlanmaktadır.



9 KAYNAKLAR

- Aslan, H., Görüm, T., Bozkurt, D., Şen, Ö. L., Ezber, Y., Akbaş, A., Fidan, S., Lombardo, L., & Tanyaş, H. (2025). Atmospheric rivers catalyze snowmelt and contribute to chains of landslides. *Catena*, 260, 109503. doi:10.1016/j.catena.2025.109503.
- Avcıoğlu, A., Demir, O., & Görüm, T. (2025). An automated approach for developing geohazard inventories using news: integrating natural language processing (NLP), machine learning, and mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(7), 2421–2435. doi:10.5194/nhess-25-2421-2025.
- Baum, R. L., Godt, J. W., & Savage, W. Z. (2010). Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3).
- Caleca, F., Scaini, C., Frodella, W., & Tofani, V. (2024). Regional-scale landslide risk assessment in Central Asia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 13–27. doi:10.5194/nhess-24-13-2024.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., vd. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209–263. doi:10.1007/s10064-013-0538-8.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (Transportation Research Board Special Report 247, ss. 36–75).
- Dille, A., Dewitte, O., Handwerger, A. L., vd. (2022). Acceleration of a large deep-seated tropical landslide due to urbanization feedbacks. *Nature Geoscience*, 15, 1048–1055. doi:10.1038/s41561-022-01073-3.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874.
- Fidan, S., & Görüm, T. (2020). Türkiye’de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 74, 123–134. doi:10.17211/tcd.731596.
- Fidan, S., Tanyaş, H., Akbaş, A., Lombardo, L., Petley, D. N., & Görüm, T. (2024). Understanding fatal landslides at global scales: a summary of topographic, climatic, and anthropogenic perspectives. *Natural Hazards*, 120(7), 6437–6455. doi:10.1007/s11069-024-06487-3.
- Fidan, S., Görüm, T., Akbaş, A., Ekberzade, B., & Ozturk, U. (2026). Wealth and land-cover change govern landslide fatalities on world’s mountains. *Science Advances*, 12(15), eaec2739. doi:10.1126/sciadv.aec2739.
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161–2181. doi:10.5194/nhess-18-2161-2018.

- Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Zêzere, J. L. (2016). Assessing population exposure for landslide risk analysis using dasymetric cartography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2769–2782. doi:10.5194/nhess-16-2769-2016.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252.
- Gökçe, O., Özden, Ş., & Demir, A. (2008). Türkiye’de afetlerin mekânsal ve istatistiksel dağılımı: Afet bilgileri envanteri. Ankara: Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü.
- Görüm, T., Fan, X., van Westen, C. J., Huang, R. Q., Xu, Q., Tang, C., & Wang, G. (2011). Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology*, 133(3–4), 152–167. doi:10.1016/j.geomorph.2010.12.030.
- Görüm, T., & Fidan, S. (2021). Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides*, 18(5), 1691–1705. doi:10.1007/s10346-020-01580-7.
- Görüm, T., Bozkurt, D., Korup, O., İstanbulluoğlu, E., Şen, Ö. L., Yılmaz, A., ... & Tanyas, H. (2025). The 2023 Türkiye-Syria earthquake disaster was exacerbated by an atmospheric river. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 151.
- Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., & Torrisi, G. (2019). On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. *Social Indicators Research*, 141(1), 61–94. doi:10.1007/s11205-017-1832-9.
- Guns, M., & Vanacker, V. (2014). Shifts in landslide frequency–area distribution after forest conversion in the tropical Andes. *Anthropocene*, 6, 75–85.
- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. New York: Columbia University Press. doi:10.7312/gumb92958.
- Haque, U., Blum, P., da Silva, P. F., vd. (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslides*, 13, 1545–1554. doi:10.1007/s10346-016-0689-3.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Klose, M., Maurischat, P., & Damm, B. (2016). Landslide impacts in Germany: A historical and socioeconomic perspective. *Landslides*, 13(1), 183–199.
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4–15. doi:10.1016/j.geomorph.2015.03.016.
- Lombardo, L., Opitz, T., Ardizzone, F., Guzzetti, F., & Huser, R. (2020). Space-time landslide predictive modelling. *Earth-science reviews*, 209, 103318.
- Malczewski, J. (2000). On the use of weighted linear combination method in GIS: Common and best practice approaches. *Transactions in GIS*, 4(1), 5–22. doi:10.1111/1467-9671.00035.

- Najatishendi, E., Görüm, T., Fidan, S., & Şanlı, F. B. (2026). Generating landslide archive inventories for Türkiye using web scraping and natural language processing techniques. *Natural Hazards*, 122(1), Article 27. doi:10.1007/s11069-025-07753-8.
- Nefeslioğlu, H. A., & Görüm, T. (2020). *The use of landslide hazard maps to determine mitigation priorities in a dam reservoir and its protection area. Land Use Policy*, 91, 104363.
- Moreno, M., Steger, S., Tanyas, H., & Lombardo, L. (2023). Modeling the area of co-seismic landslides via data-driven models: The Kaikōura example. *Engineering Geology*, 320, 107121.
- OECD, European Union, & European Commission–Joint Research Centre. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Publishing. doi:10.1787/9789264043466-en.
- Ozturk, U., vd. (2022). How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides. *Nature*, 608, 262–263.
- Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2005). Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 168(2), 307–323. doi:10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x.
- Tanyaş, H., van Westen, C. J., Allstadt, K. E., Nowicki Jessee, M. A., Görüm, T., Jibson, R. W., Godt, J. W., Sato, H. P., Schmitt, R. G., & Marc, O. (2017). Presentation and analysis of a worldwide database of earthquake-induced landslide inventories. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(10), 1991–2015.
- van Westen, C. J., Van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (Transportation Research Board Special Report 176, ss. 11–33).
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. Paris: UNESCO.
- Wood, S. N. (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R* (2. bs.). Chapman & Hall/CRC. doi:10.1201/9781315370279.

10 EKLER

Bu bölümde listelenen dokuz raster katman, aynı yüzeylerin Teknolojik Afet (NaTech) modelinde girdi olarak kullanılması nedeniyle 07_KAYNAK_VERI/7D_HEYELAN_KAYNAK klasöründe tek kopya hâlinde tutulmaktadır. Katmanların tam dizini, boyutları ve SHA-256 sağlama değerleri 03_CBS_CIKTILAR/3B_HEYELAN/00_KATMAN_KUNYESI.txt dosyasında verilmiştir. Her rasterin yanında .tfw, .aux.xml ve .xml yardımcı dosyaları yer alır.

Ek 1: Heyelan duyarlılık

- susceptibility_final: Nihai heyelan duyarlılık raster verisi (.tif)

Ek 2: Heyelan tehlike

- H_RAIN_3d_50yr_final: 3 günlük kümülatif yağmur (nihai ana ürün) (.tif)
- H_RAIN_1d_50yr_final: 1 günlük yağmur (.tif)
- H_RAIN_7d_50yr_final: 7 günlük kümülatif yağmur (.tif)
- H_EWI_7d_50yr_final: 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik su girdisi (.tif)

Ek 3: Heyelan riski

- Risk_RAIN_3d_50yr: 3 günlük kümülatif yağmur, nihai ana risk ürünü (.tif)
- Risk_RAIN_1d_50yr: 1 günlük yağmur senaryosu görel risk rasteri (.tif)
- Risk_RAIN_7d_50yr: 7 günlük kümülatif yağmur senaryosu görel risk rasteri (.tif)
- Risk_EWI_7d_50yr: 7 günlük yağmur–kar erimesi birleşik su girdisi senaryosu görel risk rasteri (.tif)