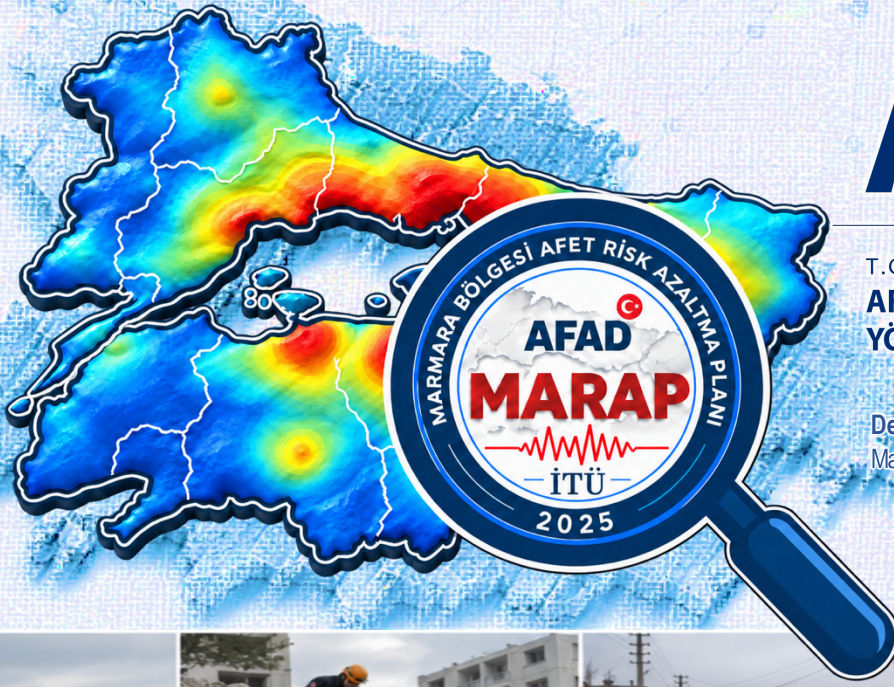




AFAD

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-A

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

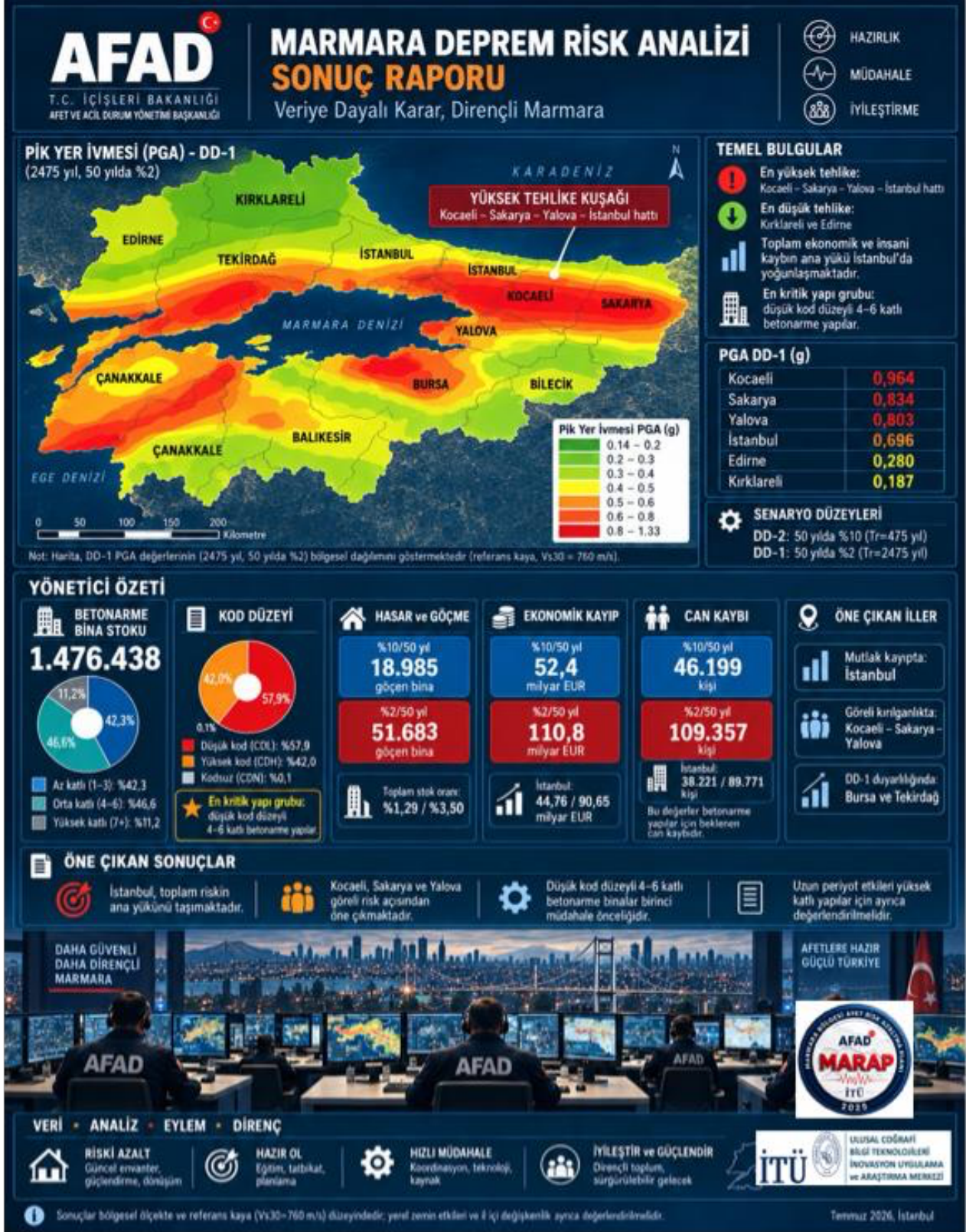


ULUSAL COĞRAFI
BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
İNNOVASYON UYGULAMA
ve ARAŞTIRMA MERKEZİ

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

4A

YÖNETİCİ ÖZETİ



Marmara Bölgesi Deprem Tehlikesi, Betonarme Bina Stoku, Hasar, Ekonomik Kayıp ve Can Kaybı Analizlerinin Bütünleşik Değerlendirmesi

Bu rapor, Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı kapsamında, bölgedeki deprem tehlikesinin ve bu tehlikenin yapı stoku, ekonomik varlıklar ve nüfus üzerindeki muhtemel sonuçlarının bütünleşik biçimde değerlendirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma; İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne ve Kırklareli olmak üzere Marmara Bölgesi'ndeki 11 ili kapsamaktadır. Raporun temel yaklaşımı, güncel olasılıksal deprem tehlike modellerini bina maruziyet verileri, yapısal kırılabilirlik fonksiyonları, hasar-görebilirlik modelleri ve gece nüfusu bilgileriyle bir araya getirerek bölgesel ölçekte karşılaştırılabilir risk göstergeleri üretmektir.

Çalışmanın en önemli sonucu, Marmara Bölgesi'ndeki deprem riskinin yalnızca faylara yakınlıkla açıklanamayacağı; tehlike düzeyi, yapı stokunun büyüklüğü, yapıların sismik tasarım seviyesi, kat sayısı, ekonomik değer ve nüfus yoğunluğunun birlikte değerlendirilmesi gerektiğidir. Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakın Kocaeli, Sakarya ve Yalova gibi iller birim yapı ve birim nüfus başına yüksek risk sergilerken, İstanbul sahip olduğu çok büyük yapı stoku, ekonomik maruziyet ve nüfus nedeniyle toplam ekonomik kayıp ve can kaybında belirleyici konuma gelmektedir. Dolayısıyla bölgesel risk azaltma politikalarının hem "görelî kırılabilirliğin en yüksek olduğu illeri" hem de "toplam kaybın en büyük olduğu İstanbul'u" aynı anda hedeflemesi gerekmektedir.

Deprem tehlikesinin bölgesel görünümü

Raporun deprem tehlikesi bölümü, olasılıksal deprem tehlike analizi yaklaşımıyla hazırlanmıştır. Hesaplamalarda Global Earthquake Model Vakfı tarafından geliştirilen OpenQuake Engine yazılımının 3.16.7 sürümü kullanılmış; Avrupa Sismik Tehlike Modeli 2020'nin ESHM20 v12e kaynak modeli ve yer hareketi mantık ağacı esas alınmıştır. Analizler 50 yıllık inceleme süresiyle yürütülmüştür.

Tehlike hesaplarında iki temel deprem yer hareketi düzeyi değerlendirilmiştir. DD-2 düzeyi, 50 yılda yüzde 10 aşılma olasılığına ve yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelmekte; olağan mühendislik tasarımlarında esas alınan deprem yer hareketini temsil etmektedir. DD-1 düzeyi ise 50 yılda yüzde 2 aşılma olasılığına ve yaklaşık 2.475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelmekte; daha düşük olasılıklı fakat çok daha şiddetli deprem etkisini ifade etmektedir. Her iki düzey için pik yer ivmesi, kısa periyot spektral ivmesi ve uzun periyot spektral ivmesi hesaplanmıştır.

İl merkezlerini temsil eden hesap noktalarına göre en yüksek deprem tehlikesi Kocaeli'nde ortaya çıkmaktadır. Kocaeli için DD-2 düzeyinde pik yer ivmesi 0,488 g, DD-1 düzeyinde ise 0,964 g olarak hesaplanmıştır. Kısa periyot spektral ivmesi DD-1 düzeyinde 2,939 g'ye, uzun periyot spektral ivmesi ise 1,417 g'ye ulaşmaktadır. Kocaeli'ni Sakarya ve Yalova takip etmektedir. Sakarya'da DD-1 pik yer ivmesi 0,834 g, Yalova'da 0,803 g'dir. İstanbul için hesaplanan pik yer ivmesi DD-2

düzeyinde 0,363 g, DD-1 düzeyinde 0,696 g olmakla birlikte, İstanbul'un yüksek ve yoğun yapılaşması nedeniyle uzun periyot etkileri ve toplam risk sonuçları özel önem taşımaktadır.

Bölgenin kuzeybatısında yer alan ve Kuzey Anadolu Fay Zonu'ndan daha uzakta bulunan Kırklareli ile Edirne, hesap noktaları itibarıyla en düşük tehlike değerlerine sahiptir. Kırklareli'nde DD-2 pik yer ivmesi 0,096 g, DD-1 pik yer ivmesi 0,187 g; Edirne'de ise sırasıyla 0,128 g ve 0,280 g olarak hesaplanmıştır. Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir ve Bilecik orta tehlike kuşağında değerlendirilirken, Bursa yüksek tehlike kuşağına yakın bir konumda bulunmaktadır.

Bu dağılım, Marmara Bölgesi'nde tek tip bir deprem tehlikesinden söz edilemeyeceğini göstermektedir. Kocaeli–Sakarya–Yalova–İstanbul hattı, Kuzey Anadolu Fay Sistemi'nin batı segmentleriyle ilişkili yüksek tehlike kuşağını oluştururken, Trakya'nın kuzey kesimlerinde tehlike görece azalmaktadır. Bununla birlikte, düşük tehlike değerine sahip bir ilde riskin tamamen ortadan kalkmadığı; yapı kırılganlığı, yerel zemin koşulları ve maruziyet düzeyinin sonuçları önemli ölçüde değiştirebileceği dikkate alınmalıdır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile karşılaştırmanın anlamı

Raporda ESHM20 tabanlı olasılıksal deprem tehlike sonuçları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 kapsamında kullanılan tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar referans kaya koşulunda, yani Vs30 değerinin 760 m/s kabul edildiği ZB zemin sınıfı seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, özellikle Kuzey Anadolu Fayı'na yakın illerde uzun periyot spektral ivmeler bakımından ESHM20 tabanlı değerlerin yönetmelik değerlerini aşabildiğini göstermektedir. İstanbul'da DD-1 uzun periyot spektral ivmesi için PSHA/TBDY oranı 1,62, Kocaeli'nde ise 1,86 olarak hesaplanmıştır. Bu durum özellikle yüksek katlı, esnek ve uzun doğal titreşim periyoduna sahip yapılar açısından önemlidir. Kocaeli'nde DD-2 uzun periyot oranı da 1,51 düzeyindedir. Sakarya ve Yalova'da da uzun periyot ordinatlarında yönetmelik değerlerinin üzerinde sonuçlar bulunmaktadır.

Buna karşılık Edirne, Kırklareli, Balıkesir ve Bilecik gibi fay zonundan daha uzak illerde olasılıksal analiz sonuçları genel olarak TBDY değerlerinin altında kalmaktadır. Bu farklılık, modellerden birinin doğru, diğerinin yanlış olduğu biçiminde yorumlanmamalıdır. Raporda da belirtildiği üzere, ESHM20 ile AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası; kaynak modelinin tanımlanması, fay karakterizasyonu, deprem kataloğu, yer hareketi tahmin denklemleri ve mantık ağacı yapısı bakımından farklı metodolojik bileşenlere sahiptir. Bu nedenle sonuçlar, yönetmeliğin yerine geçen değerler olarak değil, özellikle bölgesel planlama, kritik yapı değerlendirmesi ve ileri düzey mühendislik çalışmaları bakımından ek bir bilimsel gösterge olarak ele alınmalıdır.

Betonarme bina stokunun yapısı

Raporun bina hasarı değerlendirmesi, Marmara Bölgesi'nde toplam 1.476.438 betonarme binayı kapsamaktadır. Bu stokun yüzde 42,3'ü bir ila üç katlı az katlı, yüzde 46,6'sı dört ila altı katlı orta katlı ve yüzde 11,2'si yedi ve üzeri katlı yüksek katlı yapılardan oluşmaktadır. Başka bir ifadeyle betonarme stokun yaklaşık yüzde 89'u altı kat ve altındaki yapılardır. Bina stoku sismik tasarım kodu açısından değerlendirildiğinde, düşük kod düzeyindeki yapıların toplam stokun yaklaşık yüzde 57,9'unu, yüksek kod düzeyindeki yapıların yüzde 42'sini, kod öncesi yapıların ise yaklaşık yüzde 0,1'ini oluşturduğu belirtilmektedir. En büyük tek yapı grubu, toplam betonarme stokun yüzde 30,6'sını oluşturan düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapılardır. Bu grubu düşük kod düzeyli az katlı yapılar ve yüksek kod düzeyli az katlı yapılar izlemektedir.

İstanbul, bölgedeki betonarme binaların yüzde 60,6'sını tek başına barındırmaktadır. Bursa yüzde 11,6, Kocaeli ise yüzde 8,3'lük payla İstanbul'u takip etmektedir. Yüksek katlı betonarme yapıların özellikle İstanbul'da yoğunlaşması, kentin uzun periyot deprem etkilerine karşı hassasiyetini ve toplam ekonomik maruziyetini artırmaktadır. Bu yapı stoku dağılımı, risk azaltma açısından kritik bir önceliği ortaya koymaktadır: Sorun yalnızca eski veya tamamen kodsuz binalarla sınırlı değildir. Rapor sonuçlarına göre asıl risk yoğunlaşması, sayıca çok fazla olan, düşük sismik tasarım seviyesine sahip, dört ila altı katlı betonarme binalarda meydana gelmektedir. Bu nedenle güçlendirme, dönüşüm, hızlı tarama ve ayrıntılı performans değerlendirmesi programlarının hedef kitlesi belirlenirken yalnızca bina yaşı değil; kod seviyesi, kat sayısı, taşıyıcı sistem, konum ve nüfus yoğunluğu birlikte dikkate alınmalıdır.

Hasar ve göçme beklentileri

Hasar analizinde binalar hasarsız durumdan tam hasara kadar beş düzeyde değerlendirilmiştir. DD-2'ye karşılık gelen yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 826.139 betonarme binanın hasarsız kalması, 242.252 binanın hafif, 114.917 binanın orta, 77.587 binanın ağır ve 198.562 binanın tam hasar veya göçme önlenmesi düzeyinde bulunması beklenmektedir. Daha şiddetli olan yüzde 2/50 yıl senaryosunda dağılım önemli ölçüde değişmektedir. Hasarsız bina sayısı 384.786'ya gerilerken, tam hasar düzeyindeki bina sayısı 521.731'e yükselmektedir. Böylece düşük olasılıklı fakat çok şiddetli deprem senaryosunda tam hasar düzeyi, betonarme stok içindeki en büyük hasar grubuna dönüşmektedir. Ancak tam hasar düzeyindeki her binanın fiilen göçmeyeceği özellikle vurgulanmalıdır. Raporda fiziksel göçme sayıları, HAZUS modelindeki koşullu göçme oranları kullanılarak hesaplanmıştır. Buna göre az katlı betonarme moment çerçevelerde yüzde 13, orta katlılarda yüzde 10 ve yüksek katlılarda yüzde 5 oranı uygulanmıştır. Bu kabuller altında yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 18.985 betonarme binanın, yüzde 2/50 yıl senaryosunda ise yaklaşık 51.683 betonarme binanın göçmesi beklenmektedir. Bunlar toplam betonarme stokun sırasıyla yüzde 1,29'una ve yüzde 3,50'sine karşılık gelmektedir. Sayısal olarak göçmelerin büyük bölümü dört ila altı katlı yapılardan kaynaklanmaktadır.

Düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapıların göçmelerdeki payı, yüzde 10/50 yıl senaryosunda yüzde 80,7, yüzde 2/50 yıl senaryosunda yüzde 67,6'dır. Düşük kod düzeyli bir ila üç katlı yapıların payı ise daha şiddetli senaryoda yüzde 23,6'ya yükselmektedir. Bu sonuç, bölgesel risk azaltma politikasının en açık önceliklerinden birini tanımlamaktadır: Düşük kod düzeyli orta katlı betonarme binalar, hem stok büyüklüğü hem kırılabilirlik hem de göçme katkısı açısından birinci derecede müdahale edilmesi gereken yapı grubudur.

Ekonomik kayıp görünümü

Raporun ekonomik kayıp analizine göre Marmara Bölgesi genelinde beklenen toplam yapısal kayıp, yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 52,4 milyar avro, yüzde 2/50 yıl senaryosunda ise yaklaşık 110,8 milyar avrodur. Parasal değerler ESRM20 maruziyet modelinin yaklaşık 2020 fiyat düzeyindeki yenileme maliyetlerini temsil etmektedir. Toplam ekonomik kayıp açık biçimde İstanbul'da yoğunlaşmaktadır. Şehir bazlı genel kayıp tablosunda İstanbul için yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 44,76 milyar avro, yüzde 2/50 yıl senaryosunda ise 90,65 milyar avro kayıp hesaplanmıştır. İstanbul'u Kocaeli, Sakarya ve Bursa izlemektedir. Kocaeli'nde kayıplar sırasıyla 4,23 ve 7,69 milyar avro; Sakarya'da 1,76 ve 3,26 milyar avro; Bursa'da 0,70 ve 4,71 milyar avro düzeyindedir.

Mutlak kayıp ile görelî kayıp oranının birbirinden ayrılması gerekmektedir. İstanbul, çok büyük ekonomik maruziyeti nedeniyle mutlak kayıpta açık ara birinci sıradadır. Buna karşılık kayıp bazında ortalama kayıp oranı Kocaeli'nde yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık yüzde 49, Sakarya'da yüzde 40,2 ve Yalova'da yüzde 40 düzeyindedir. İstanbul'daki kayıp bazlı ortalama kayıp oranı ise yüzde 19,8'dir.

Maruziyete oranla kayıp değerlendirildiğinde Kocaeli yüzde 29,2, Sakarya yüzde 28,8 ve İstanbul yüzde 27 oranıyla öne çıkmaktadır. Dolayısıyla Kocaeli ve Sakarya'da varlıkların daha büyük bir yüzdesinin zarar görmesi beklenirken, İstanbul'da toplam varlık miktarı çok yüksek olduğu için ülke ekonomisini etkileyebilecek çok daha büyük mutlak kayıplar ortaya çıkmaktadır.

Beklenen can kaybı

Gece nüfusuna dayalı can kaybı analizinde, bölge genelinde tüm yapı tipleri için yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 47.500, yüzde 2/50 yıl senaryosunda yaklaşık 114.700 kişilik toplam can kaybı tahmin edilmektedir. Betonarme yapılara ilişkin hesaplamalar ise sırasıyla 46.199 ve 109.357 kişidir. İstanbul'da betonarme yapılardan kaynaklanan beklenen can kaybı yüzde 10/50 yıl senaryosunda 38.221, yüzde 2/50 yıl senaryosunda 89.771 kişidir. Kocaeli'nde bu değerler 4.566 ve 6.468; Sakarya'da 2.393 ve 3.632; Bursa'da 320 ve 5.252 kişidir. Bursa'daki büyük senaryo farkı, ilin daha düşük olasılıklı ancak şiddetli deprem etkilerine karşı hassasiyetini göstermektedir.

Can kaybının betonarme yapılardaki gece nüfusuna oranı, bölge genelinde yüzde 10/50 yıl senaryosunda yüzde 0,21, yüzde 2/50 yıl senaryosunda yüzde

0,50'dir. İstanbul'da oranlar yüzde 0,27 ve yüzde 0,63; Kocaeli'nde yüzde 0,28 ve yüzde 0,39; Sakarya'da yüzde 0,30 ve yüzde 0,45'tir. Buna göre İstanbul, Kocaeli ve Sakarya'da birim nüfus başına risk birbirine yakın seviyelerde bulunmakta; İstanbul'daki çok yüksek mutlak kayıp esas olarak nüfus büyüklüğünden kaynaklanmaktadır.

Can kaybı da ekonomik kayıptan daha keskin biçimde düşük kod düzeyli orta ve yüksek katlı yapılarda yoğunlaşmaktadır. Yüksek katlı yapıların can kaybındaki katkısı, ekonomik kayıptaki katkısından daha belirgin olabilmektedir. Raporda bu durum gece doluluğu ve kat sayısına bağlı enkaz altında kalma olasılığıyla ilişkilendirilmektedir. Yüksek kod düzeyli yapıların can kaybı katkısı ise her iki senaryoda da düşük kalmaktadır.

Yönetimsel öncelikler ve politika çıkarımları

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

- Birinci öncelik, düşük kod düzeyli dört ila altı katlı betonarme bina stokunun tespit edilmesi, derecelendirilmesi ve müdahale programına alınmasıdır. Yaklaşık 452 bin binadan oluşan bu grup, göçmelerin yaklaşık yüzde 70–80'ini oluşturmakta ve can kaybının yoğunlaştığı temel yapı kategorisi olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle grup, can güvenliği odaklı müdahale programının birincil hedefidir.
- İkinci öncelik, İstanbul için ayrı bir ölçek ve finansman modeli geliştirilmesidir. İstanbul birim yapı başına her zaman en yüksek kırılganlığa sahip il olmamakla birlikte, yapı stoku, nüfus ve ekonomik değer bakımından bölgesel sonuçları belirlemektedir. İstanbul'da oluşabilecek yaklaşık 45–91 milyar avroluk kayıp ve on binlerce kişilik can kaybı, yalnızca yerel yönetim ölçeğinde ele alınamayacak ulusal bir ekonomik ve sosyal risk anlamına gelmektedir.
- Üçüncü öncelik, Kocaeli–Sakarya–Yalova ekseninde yüksek göreceli kırılganlığa odaklanmasıdır. Bu illerde yapıların ve nüfusun daha büyük bir oranı doğrudan etkilenmektedir. Sanayi tesisleri, ulaşım bağlantıları, limanlar, enerji altyapısı ve tedarik zincirleri bakımından bölgesel karşılıklı bağımlılıklar dikkate alınarak kritik altyapı sürekliliği planlanmalıdır.
- Dördüncü öncelik, düşük kod düzeyli yüksek katlı yapıların ve uzun periyot deprem etkilerinin özel olarak incelenmesidir. Betonarme stokun yalnızca yüzde 4,9'unu (yaklaşık 72 bin bina) oluşturan bu grup, betonarme ekonomik kaybın yüzde 67,7'sini üretmekte ve birim müdahale başına kaçınılan kayıp bakımından en yüksek kaldırıca sahip yapı sınıfını oluşturmaktadır. ESHM20 ile TBDY karşılaştırmasında İstanbul ve Kocaeli başta olmak üzere bazı illerde uzun periyot spektral değerlerinin yönetmelik seviyelerini aştığı görülmektedir. Özellikle yüksek katlı konutlar, iş merkezleri ve kritik sağlık, kamu yapıları için saha ve yapı özelinde ileri analizler yapılmalıdır.

- Beşinci öncelik, risk azaltma kararlarının yalnızca bina sayısına veya toplam kayba göre değil, birden fazla göstergeyle verilmesidir. Mutlak ekonomik kayıp, maruziyete oranla kayıp, beklenen göçme sayısı, kişi başına can kaybı riski ve kritik altyapı etkisi birlikte değerlendirilmelidir.

Bu beş önceliğin somut politika paketlerine, çok ölçütlü önceliklendirme sistemine, aşamalı uygulama takvimine ve izleme göstergelerine dönüştürülmüş hâli raporun dördüncü bölümünde sunulmaktadır. Söz konusu bölüm, can güvenliği ve ekonomik dayanıklılık izlerinin eş zamanlı fakat farklı hedef gruplarla yürütülmesini öngören iki izli bir program çerçevesi önermektedir.

Genel sonuç değerlendirmesi

Raporun bütünleşik mesajı açıktır: Marmara Bölgesi'nde deprem tehlikesi yüksek, maruziyet çok büyük ve risk belirli yapı grupları ile coğrafi eksenlerde yoğunlaşmıştır. En yüksek yer hareketi Kocaeli–Sakarya–Yalova hattında görülürken, toplam ekonomik ve insani sonuçlar İstanbul'un büyüklüğü nedeniyle İstanbul merkezli hale gelmektedir. Düşük kod düzeyli 4-6 katlı betonarme yapılar bölgesel göçme riskinin ana kaynağını oluştururken, ekonomik kaybın en büyük bölümü düşük kod düzeyli 7 ve üzeri katlı betonarme yapılardan doğmaktadır. Yüksek kod düzeyli yapıların görece iyi performansı ise güncel mühendislik ilkelerinin, denetimin ve uygun tasarımın risk azaltmadaki önemini doğrulamaktadır. Raporun dördüncü bölümünde bu bulgular; politika paketleri, önceliklendirme puanı, uygulama yol haritası ve performans göstergelerinden oluşan bir uygulama stratejisine dönüştürülmüştür. Bu çerçevede Marmara için uygulanacak risk azaltma programının; güncel ve bina bazlı envanter oluşturulması, düşük kodlu orta katlı yapıların önceliklendirilmesi, İstanbul için ulusal ölçekli finansman ve süreklilik planı geliştirilmesi, Kocaeli–Sakarya–Yalova ekseninde kritik altyapı güvenliğinin artırılması, yüksek katlı yapıların uzun periyot etkileri bakımından yeniden değerlendirilmesi ve yerel zemin etkilerinin mikro bölgeleme çalışmalarıyla modele dâhil edilmesi esaslarına dayanması gerekmektedir.

Rapor, sonuçların doğrudan kesin bir deprem tahmini olarak değil; uzun vadeli planlama, yatırım önceliklendirmesi, güçlendirme ve dönüşüm programları, acil durum kapasitesinin geliştirilmesi ve kritik altyapı sürekliliği bakımından bilimsel bir karar destek altyapısı olarak kullanılmasını gerektirmektedir. En etkili risk azaltma yaklaşımı, deprem sonrasında müdahale kapasitesini artırmakla sınırlı kalmayan; deprem öncesinde yapı kırılganlığını, ekonomik maruziyeti ve toplumsal hassasiyeti sistematik biçimde azaltan uzun vadeli ve ölçülebilir bir program olacaktır.

Arz olunur.

Temmuz 2026, İstanbul

İTÜ



ULUSAL COĞRAFI
BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
İNNOVASYON UYGULAMA
ve ARAŞTIRMA MERKEZİ

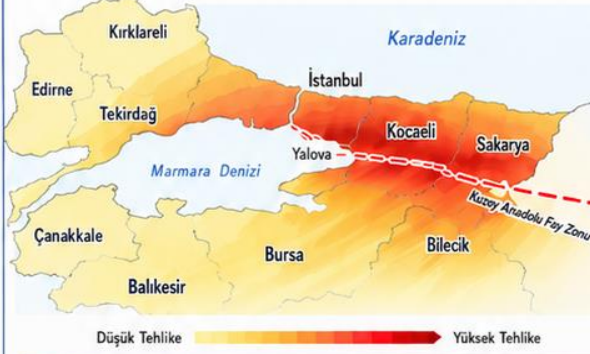
MARAP – Deprem Tehlike-Risk Analizleri Yönetici Özeti

Marmara Bölgesi (11 il) • Temmuz 2026

1 Kapsam ve Yöntem

- 11 İl:** İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne, Kırklareli.
- Olasıksal Deprem Tehlike Analizi (PSHA)**
- Hesap Motoru:** OpenQuake Engine
- Kaynak Modeli:** ESHM20
- Referans Zemin:** Vs30 = 760 m/s (ZB, referans kaya)
- İki tasarım düzeyi:**
 - DD-2 = 50 yılda %10 (Tr=475 yıl)
 - DD-1 = 50 yılda %2 (Tr=2475 yıl)
- Amaç:** Deprem tehlikesi, bina stoğu, hasar, ekonomik kayıp ve can kaybını bütünlük değerlendirmek.

2 Deprem Tehlikesi: Bölgesel Görünüm

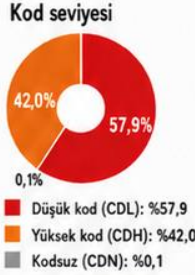
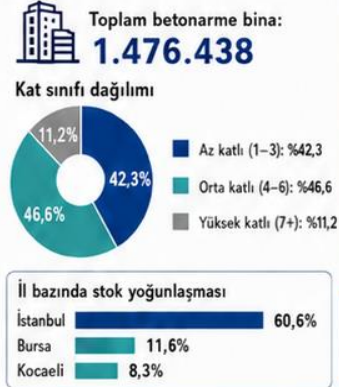


- En yüksek tehlike: Kocaeli – Sakarya – Yalova – İstanbul hattı
- En düşük tehlike: Kırklareli ve Edirne

	PGA DD-1 (g)
Kocaeli	0.964
Sakarya	0.834
Yalova	0.803
İstanbul	0.696
Edirne	0.280
Kırklareli	0.187

İ Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakınlık tehlike düzeyini belirgin biçimde artırmaktadır.

3 Betonarme Bina Stoğu



★ **En kritik yapı grubu:**
Düşük kod düzeyli 4-6 katlı betonarme binalar.

4 Hasar ve Göçme Beklentisi

%10/50 yıl senaryosu		%2/50 yıl senaryosu	
DS0	Hasarsız 826.139	DS0	Hasarsız 384.786
DS1	Hafif 242.252	DS1	Hafif 360.099
DS2	Orta 114.917	DS2	Orta 122.373
DS3	Ağır 77.587	DS3	Ağır 70.468
DS4	Tam Hasar / Göçme Önlenmesi 198.562	DS4	Tam Hasar / Göçme Önlenmesi 521.731

Beklenen göçen bina:
18.985 (%1,29)

Beklenen göçen bina:
51.683 (%3,50)

- Göçmelerin baskın kaynağı: düşük kod düzeyli orta katlı (4-6 kat) betonarme yapılar.
- Göçenler içindeki pay: %10 senaryoda %80,7; %2 senaryoda %67,6.

5 Ekonomik Kayıp



6 Can Kaybı



Yönetim İçin Ana Mesajlar

- En yüksek tehlike kuşağı Kocaeli-Sakarya-Yalova-İstanbul hattıdır.
- Toplam riskin ana yükü İstanbul'dadır; ancak göreceli kırılabilirlik Kocaeli ve Sakarya'da daha yüksektir.
- Öncelikli müdahale grubu: düşük kod düzeyli 4-6 katlı betonarme yapılar.
- Uzun periyot etkileri nedeniyle yüksek katlı yapılar için özel değerlendirme gereklidir.
- Risk azaltma için yapı güçlendirme, güncel envanter, mikro-bölgeleme ve kritik altyapı sürekliliği birlikte ele alınmalıdır.

Sınırlılıklar

Sonuçlar bölgesel ölçekte ve referans kaya (Vs30=760 m/s) düzeyindedir; yerel zemin etkileri, il içi değişkenlik ve envanter güncelliği saha bazında ayrıca değerlendirilmelidir.



ÖZET

Bu rapor, MARAP projesi kapsamında yürütülen deprem tehlikesi ve risk değerlendirme çalışmalarının temel yöntemlerini, bulgularını ve sonuçlarını bütüncül bir çerçevede sunmaktadır. Çalışmada İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne ve Kırklareli olmak üzere toplam 11 il ele alınmış; deprem tehlikesinin bölgesel dağılımı, betonarme bina stokunun özellikleri, beklenen yapısal hasarlar, göçme olasılıkları, ekonomik kayıplar ve can kaybı sonuçları birlikte değerlendirilmiştir.

Olasılıksal deprem tehlike analizleri, güncel bilimsel modeller ve açık kaynaklı hesaplama araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde farklı deprem yer hareketi düzeyleri için pik yer ivmesi ile kısa ve uzun periyot spektral ivme değerleri hesaplanmış; elde edilen sonuçlar Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında tanımlanan tasarım değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bulgular, en yüksek deprem tehlikesinin Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakın Kocaeli, Sakarya, Yalova ve İstanbul çevresinde yoğunlaştığını göstermektedir. Fay sistemlerinden daha uzak konumda bulunan Edirne ve Kırklareli'nde ise görece daha düşük tehlike değerleri elde edilmiştir.

Çalışmanın yapı stoku ve hasar değerlendirmesi bölümünde Marmara Bölgesi'ndeki betonarme binalar; kat sayısı, sismik tasarım kod seviyesi ve şehir bazındaki dağılımlarına göre incelenmiştir. Ekonomik kayıp analizleri, Marmara Bölgesi'nin sahip olduğu yüksek yapı değeri ve ekonomik yoğunluk nedeniyle olası bir depremin bölgesel ve ulusal ölçekte ciddi sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir. Toplam ekonomik kayıplarda İstanbul belirleyici olurken, yapı değerine oranla kayıp bakımından Kocaeli, Sakarya ve Yalova gibi fay zonuna yakın iller öne çıkmaktadır. Can kaybı sonuçlarında da İstanbul mutlak sayı bakımından ilk sırada yer almakta; Kocaeli ve Sakarya ise nüfusa oranlı risk göstergeleri bakımından yüksek değerlere ulaşmaktadır. Rapor sonuçları, Marmara Bölgesi'nde deprem riskinin yalnızca tehlike düzeyiyle değil; yapı stokunun niteliği, nüfus yoğunluğu, ekonomik maruziyet, yerel zemin koşulları ve kritik altyapı sistemleriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

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 **Doç. Dr. Abdullah Can Zülfiyar, Dr. Seyhan Okuyan Akcan ve İnş. Yük. Müh. Derya Şimşek'e**, 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	2
ÖZET	10
Şekiller Listesi.....	14
Tablolar listesi	17
Kısaltmalar	18
1 AFET TÜRÜNE BAĞLI OLARAK MARMARA BÖLGESİ OLASILIKSAL DEPREM TEHLİKE ANALİZİ	22
1.1 Giriş ve Kapsam.....	22
1.1.1 Çalışmanın Amacı.....	23
1.1.2 Çalışma Alanı.....	23
1.2 Veri ve Yöntem	25
1.2.1 Hesap Motoru: OpenQuake Engine	25
1.2.2 Sismik Kaynak Modeli: ESHM20.....	26
1.2.3 Zemin Koşulu: Referans Kaya ($V_{s30} = 760$ m/s)	28
1.2.4 Yer Hareketi Modeli: ESHM20 GMM Mantık Ağacı	29
1.3 Deprem Tehlike Haritaları ve Analizleri	29
1.3.1 Pik Yer İvmesi (PGA)	31
1.3.2 Kısa Periyot Spektral İvme — $S_a(T=0.2s)$	33
1.3.3 Uzun Periyot Spektral İvme — $S_a(T=1.0s)$	34
1.3.4 Marmara Bölgesi genelinde deprem tehlikesinin mekânsal yapısı ...	35
1.3.5 DD-2 düzeyi PGA haritasının değerlendirilmesi	36
1.3.6 DD-1 düzeyi PGA haritasının değerlendirilmesi	37
1.4 İl Bazında Deprem Tehlike Harita Analizleri	40
1.4.1 Haritalardan Çıkarılan Önemli Somut Sonuçlar.....	43
1.4.2 Haritaların kullanımında teknik sınırlılıklar	44
1.4.3 Genel değerlendirme	45
1.5 Tehlike Dağılımı ve Hesap Noktaları	46
1.6 Tehlike Eğrileri ve Eşdeğer Tehlike Spektrumu	46
1.6.1 Lokasyon Bazlı Sonuçlar.....	47

1.6.2	Tüm Lokasyonlar — Birleşik Grafikler.....	58
1.7	TBDY 2018 Tasarım Spektrumu ile Karşılaştırma.....	60
1.7.1	İl Bazlı Spektrum Karşılaştırmaları.....	60
1.8	Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar.....	64
1.9	Bölüm Kaynakçası.....	65
2	MARMARA BÖLGESİ İÇİN BETONARME BİNA STOĞU VE DEPREM HASAR ANALİZİ	67
2.1	Giriş ve Yöntem.....	67
2.2	Betonarme Bina Stoğunun Sınıflandırması.....	68
2.3	Kod Seviyesi ve Kat Sınıfı Birlikte	69
2.4	Şehir Bazında Dağılım	69
2.5	Hasar Analizi ve Sonuçları.....	71
2.6	Göçme Analizi: HAZUS Tablo 13.8.....	72
2.7	Göçmenin Kod Seviyesi ve Kat Sınıfı Kombinasyonuna Göre Ayrışımı	73
3	MARMARA BÖLGESİ İÇİN KAYIP ANALİZİ	75
3.1	Ekonomik Kayıp Analizi	75
3.2	Hasar-Kayıp (Consequence) Modeli.....	75
3.3	Sismik Tasarım Kod Seviyeleri ve Şehir Bazlı Kayıp Sonuçları	76
3.4	Can Kaybı Analizi: Şehir Bazında Kod Düzeyi ve Kat Sınıfı Dağılımı.....	86
3.5	Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar.....	91
3.6	Bölüm Kaynakçası.....	92
4	DEPREM RİSK AZALTMA POLİTİKALARI ve UYGULAMA STRATEJİSİ	93
4.1	Bölümün Amacı ve Karar Çerçevesi	93
4.2	Rapor Bulgularından Elde Edilen Temel Politika Sonuçları.....	94
4.3	Rapordan Doğrudan Üretilebilecek Somut Çıktılar	96
4.4	İlave Veriyle Üretilebilecek Bina ve Mahalle Bazlı Çıktılar.....	97
4.5	Deprem Risk Analizinin İleri Düzeye Taşınması	98
4.6	Önerilen Çok Ölçütlü Risk Önceliklendirme Sistemi	100
4.7	Mekânsal Politika ve İl Grupları	101
4.7.1	İstanbul: Sistemik ve Ulusal Ölçekli Risk Programı	101

4.7.2	Kocaeli–Sakarya–Yalova: Yakın-Fay ve Yüksek Göreli Kırılabilirlik Programı.....	102
4.7.3	Bursa ve Tekirdağ: Şiddetli Deprem Düzeyine Duyarlılık Programı.....	103
4.7.4	Balıkesir, Çanakkale, Bilecik, Edirne ve Kırklareli: Düşük Mutlak Kayıp, Süreklilik ve Veri Tamamlama Programı.....	103
4.8	Temel Risk Azaltma Politika Paketleri.....	103
4.8.1	Risk Esaslı Yapı Stoku Dönüşüm Programı	103
4.8.2	Yüksek Katlı Yapılar ve Uzun Periyot Risk Programı	104
4.8.3	Kritik Altyapı ve Hizmet Sürekliliği Programı.....	104
4.8.4	Can Kaybı ve Acil Müdahale Kapasitesi Programı	105
4.8.5	Finansal Dayanıklılık ve Risk Transferi Programı	105
4.8.6	Yerel Zemin ve Risk Duyarlı Mekânsal Planlama Programı.....	105
4.8.7	Güncel Envanter ve Veri Yönetimi Programı.....	106
4.9	Uygulama Yol Haritası	106
4.10	İzleme ve Performans Göstergeleri	108
4.11	Teknik ve Kurumsal Kalite Güvence İhtiyacı.....	109
4.12	Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar.....	110
5	SONUÇLAR ve GENEL DEĞERLENDİRME.....	111

Şekiller Listesi

Şekil 1-1 Çalışma alanı ve 11 il hesap noktası (şehir merkezleri). Arka plan: bölgesel topoğrafya ve Marmara Denizi.	25
Şekil 1-2 MARAP çalışma alanı ve ESHM20 alan kaynak zonları.....	27
Şekil 1-3 ESHM20 deprem kataloğu — büyüklük sınıflarına göre deprem dağılımı (Mw 1.9–8.5).....	27
Şekil 1-4 ESHM20 fay (çizgi) kaynakları — Kuzey Anadolu Fay Sistemi başta olmak üzere bölgesel aktif faylar.	28
Şekil 1-5 USGS eğime bağlı Vs30 haritası — zemin sınıflandırması ve bölgesel dağılım (98–2197 m/s).	29
Şekil 1-6 PGA tehlike haritası — DD-2 düzeyi (Tr≈475 yıl, 50 yılda %10). Karaya kırılmış grid interpolasyonu; en yüksek değerler Kuzey Anadolu Fay koridorunda.	32
Şekil 1-7 PGA tehlike haritası — DD-1 düzeyi (Tr≈2475 yıl, 50 yılda %2). DD-2 ile aynı renk ölçeği.	32
Şekil 1-8 Sa(0.2s) Tehlike Haritası — DD-2 düzeyi (Tr≈475 yıl, 50 yılda %10).....	33
Şekil 1-9 Sa(0.2s) Tehlike Haritası — DD-1 düzeyi (Tr≈2475 yıl, 50 yılda %2). Fay koridoru üzerindeki uç değerler, yerleşim ölçeğinde okunabilirlik için 11-nokta şehir maksimumu (≈2.9 g) düzeyinde sınırlandırılmıştır; nokta tasarım değerleri için Tablo 1-2.	34
Şekil 1-10 Sa(1.0s) tehlike haritası — DD-2 düzeyi (Tr≈475 yıl, 50 yılda %10).	34
Şekil 1-11 Sa(1.0s) tehlike haritası — DD-1 düzeyi (Tr≈2475 yıl, 50 yılda %2)	35
Şekil 1-12 PGA — DD-1 (Tr≈2475 yıl) dağılımı ve 11 il hesap noktası (şehir merkezleri). İl tasarım değerleri için Tablo 1-2.....	46
Şekil 1-13 İstanbul — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	47
Şekil 1-14 Kocaeli — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	48
Şekil 1-15 Sakarya — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	49
Şekil 1-16 Yalova — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	50

Şekil 1-17 Bursa — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	51
Şekil 1-18 Tekirdağ — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	52
Şekil 1-19 Çanakkale — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	53
Şekil 1-20 Balıkesir — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	54
Şekil 1-21 Bilecik — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	55
Şekil 1-22 Edirne — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	56
Şekil 1-23 Kırklareli — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.	57
Şekil 1-24 PGA tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log). DD-2 ve DD-1 referans düzeyleri yatay kesik çizgilerle gösterilmiştir.	58
Şekil 1-25 Sa(0.2s) tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log).....	59
Şekil 1-26 Sa(1.0s) tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log).....	59
Şekil 1-27 Eşdeğer Tehlike Spektrumu (UHS) — tüm noktalar, 0–3 s (sürekli çizgi). Sol: DD-1 (Tr≈2475 yıl); Sağ: DD-2 (Tr≈475 yıl).....	60
Şekil 1-28 İstanbul — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	61
Şekil 1-29 Kocaeli — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	61
Şekil 1-30 Sakarya — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	61

Şekil 1-31 Yalova — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	62
Şekil 1-32 Bursa — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.	62
Şekil 1-33 Tekirdağ — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	62
Şekil 1-34 Çanakkale — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	63
Şekil 1-35 Balıkesir — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	63
Şekil 1-36 Bilecik — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	63
Şekil 1-37 Edirne — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	64
Şekil 1-38 Kırklareli — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.....	64
Şekil 2-1 Betonarme bina stoğunun kat sınıfına göre dağılımı (Ref: ESRM20).	68
Şekil 2-2 Betonarme bina stoğunun kod seviyesi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre dağılımı (Ref: ESRM20).....	69
Şekil 2-3 Betonarme binaların şehir bazında toplam dağılımı (Ref: ESRM20).	70
Şekil 2-4 Şehir bazında betonarme bina dağılımı (kat sınıfına göre yığılmış) (Ref: ESRM20).	70
Şekil 2-5 Betonarme yapıların hasar düzeyine göre dağılımı (iki tehlike seviyesi).	72
Şekil 2-6 HAZUS Tablo 13.8 ile göçmesi beklenen betonarme yapı sayısı ve toplam betonarme stoğuna oranı.	73
Şekil 2-7 Göçen betonarme yapıların kod seviyesi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre dağılımı (iki tehlike seviyesi).	73

Şekil 3-1 Marmara Bölgesi şehir bazlı yapısal kayıp değerlendirilmesi (10% ve 2% aşılma olasılığı senaryoları).	78
Şekil 3-2 Marmara Bölgesindeki 11 il için — betonarme yapılarda kod düzeyi ve kat sınıfına göre kayıp oranları (iki senaryo).	85
Şekil 3-3 Marmara Bölgesindeki 11 il için — betonarme yapılarda kod düzeyi ve kat sınıfına göre beklenen can kaybı (gece nüfusu, iki senaryo).	90

Tablolar listesi

Tablo 1-1 Analiz noktaları — koordinatlar ve zemin koşulu.	24
Tablo 1-2 Her ili temsil eden noktanın ortalama yer hareketi değerleri (g). DD-2: Tr≈475 yıl; DD-1: Tr≈2475 yıl.	30
Tablo 2-1 Betonarme bina stoğunun kat sınıfına göre sayısal dağılımı (Ref: ESRM20).	68
Tablo 2-2 Betonarme yapıların hasar düzeyine göre dağılımı (DS0–DS4, iki tehlike seviyesi).	72
Tablo 2-3 HAZUS-MH MR4 Tablo 13.8 koşullu göçme oranlarıyla beklenen göçme sayıları.	72
Tablo 3-1 ESRM20 hasar-kayıp (consequence) modeline göre hasar durumu başına hasar oranları.	76
Tablo 3-2 Şehir bazında beklenen yapısal kayıp ve kayıp oranları (tüm yapı tipleri).	79
Tablo 3-3 Şehir, sismik tasarım kod düzeyi ve kat sınıfına göre betonarme ekonomik kayıp.	79
Tablo 3-4 İl bazında beklenen can kaybı (gece nüfusu ile, betonarme yapılar).	86
Tablo 3-5 İl bazında beklenen can kaybının ilin betonarme yapılar gece nüfusuna oranı.	87
Tablo 4-1 Rapor bulgularının politika ve uygulama karşılıkları	94
Tablo 4-2 Mevcut rapor sonuçlarından üretilebilecek karar destek ürünleri	96
Tablo 4-3 Önerilen ileri risk analizi ürünleri	98
Tablo 4-4 Önerilen deprem risk öncelik puanı ve iki izli ağırlıklandırma	100
Tablo 4-5 Risk düzeyi ve veri güvenilirliğine göre karar matrisi	101
Tablo 4-6 Önerilen aşamalı uygulama programı	106
Tablo 4-7 Önerilen performans göstergeleri	108

Kısaltmalar

Kısaltma	Türkçe Karşılığı / Açılımı	Açıklama
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı	Türkiye’de afet ve acil durum yönetiminden sorumlu ulusal kurum
BA	Betonarme	Beton ve çelik donatının birlikte kullanıldığı taşıyıcı yapı sisteminin kısa gösterimi
C1	Betonarme Moment Çerçevesi Yapı Tipi	HAZUS sınıflandırmasında betonarme moment taşıyan çerçeve sistemleri ifade eden yapı sınıfı
C1H	Yüksek Katlı Betonarme Moment Çerçevesi	HAZUS kapsamında genellikle yedi ve üzeri katlı betonarme moment çerçevesi yapı sınıfı
C1L	Az Katlı Betonarme Moment Çerçevesi	HAZUS kapsamında genellikle bir ila üç katlı betonarme moment çerçevesi yapı sınıfı
C1M	Orta Katlı Betonarme Moment Çerçevesi	HAZUS kapsamında genellikle dört ila altı katlı betonarme moment çerçevesi yapı sınıfı
CBR	Merkez–Gövde–Kenar Yaklaşımı	Yer hareketi modellerinin merkezî tahmin ve belirsizlik sınırlarıyla birlikte ele alındığı mantık ağacı yaklaşımı
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri	Mekânsal verilerin toplanması, yönetilmesi, analiz edilmesi ve haritalanmasına yönelik sistemler
CDH	Code Design High – Yüksek Kod Düzeyi	Kapasite tasarımı ve süneklik ilkelerini içeren modern deprem hükümlerine göre inşa edilmiş yapı sınıfı
CDL	Code Design Low – Düşük Kod Düzeyi	Sınırlı sismik tasarım hükümlerine göre inşa edilmiş yapı sınıfı
CDM	Code Design Moderate – Orta Kod Düzeyi	Orta düzeyde sismik tasarım ve dayanım hükümlerine göre inşa edilmiş yapı sınıfı
CDN	Code Design None – Kodsuz/Kod Öncesi	Sismik tasarım hükümleri bulunmadan veya modern deprem kodları öncesinde inşa edilen yapı sınıfı
CORINE	Coordination of Information on the Environment	Avrupa ölçeğinde arazi örtüsü ve arazi kullanımı sınıflandırma veri seti
CR	Concrete Reinforced – Betonarme	ESRM20 yapı sınıflandırmasında betonarme yapı malzemesini ifade eden kod
DD-1	Deprem Yer Hareketi Düzeyi 1	50 yılda yüzde 2 aşılma olasılığına ve yaklaşık 2.475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen çok seyrek deprem yer hareketi düzeyi
DD-2	Deprem Yer Hareketi Düzeyi 2	50 yılda yüzde 10 aşılma olasılığına ve yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen standart tasarım deprem yer hareketi düzeyi
DS	Damage State – Hasar Durumu	Yapıların deprem sonrasındaki hasar seviyelerini ifade eden genel sınıflandırma
DS0	Hasarsız Durum	Yapıda dikkate değer bir yapısal hasarın meydana gelmediği durum
DS1	Hafif Hasar	Sınırlı düzeyde ve çoğunlukla kolay onarılabilir hasar durumu

DS2	Orta Hasar	Yapının kullanımını ve onarım gereksinimini etkileyen orta düzey hasar durumu
DS3	Ağır/Yaygın Hasar	Yapıda önemli yapısal hasarların ve kapsamlı onarım ihtiyacının olduğu durum
DS4	Tam Hasar/Göçme Önlenmesi	Yapının ağır biçimde hasar gördüğü, göçme sınırına yaklaştığı veya göçme önlenmesi performans düzeyine ulaştığı durum
ERA5	ECMWF Re-Analysis 5	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi tarafından üretilen atmosferik yeniden analiz veri seti
ESRM20	European Seismic Risk Model 2020 – Avrupa Sismik Risk Modeli 2020	Avrupa genelindeki bina maruziyeti, kırılabilirlik, hasar, ekonomik kayıp ve can kaybı modellerini içeren risk modeli
EUR	Euro	Raporda ekonomik kayıp ve yenileme maliyetlerinin ifade edildiği para birimi
F1	1,0 Saniye Periyot Yerel Zemin Etki Katsayısı	Uzun periyot spektral ivme değerinin yerel zemin koşullarına göre düzenlenmesinde kullanılan katsayı
Fs	Kısa Periyot Yerel Zemin Etki Katsayısı	Kısa periyot spektral ivme değerinin yerel zemin koşullarına göre düzenlenmesinde kullanılan katsayı
GEM	Global Earthquake Model	Küresel deprem tehlikesi ve riskinin modellenmesine yönelik uluslararası bilimsel girişim ve vakıf
GIS	Geographic Information Systems	Coğrafi Bilgi Sistemleri kavramının İngilizce karşılığı
GMM	Ground Motion Model – Yer Hareketi Modeli	Deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi ve zemin koşullarına bağlı yer hareketini tahmin eden model
GMPE	Ground Motion Prediction Equation – Yer Hareketi Tahmin Denklemi	Deprem özellikleri ve saha koşulları kullanılarak yer hareketi parametrelerini hesaplayan matematiksel denklem
HAZUS	Hazards United States	Deprem ve diğer doğal afetlerin fiziksel, ekonomik ve sosyal sonuçlarının tahmininde kullanılan yöntem ve modelleme sistemi
IM	Intensity Measure – Şiddet Ölçüsü	Yapıların kırılabilirlik ve hasar analizlerinde kullanılan PGA veya spektral ivme gibi yer hareketi parametresi
IMT	Intensity Measure Type – Şiddet Ölçüsü Türü	Bir yapı sınıfının deprem davranışını değerlendirmek üzere kullanılan yer hareketi parametresinin türü
İP-4	IV No'lu İş Paketi – Haritalama	MARAP kapsamında tehlike, risk ve mekânsal analiz haritalarının üretildiği iş paketi
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu	Marmara Bölgesi'nin deprem tehlikesini belirleyen başlıca aktif fay sistemi
MARAP	Marmara Bölgesi Afet Risk Azaltma Planı	Marmara Bölgesi'nde afet risklerinin azaltılmasına yönelik bölgesel planlama çalışması
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü	Meteorolojik gözlem, tahmin ve iklim verilerinden sorumlu ulusal kurum

MLR	Mean Loss Ratio – Ortalama Kayıp Oranı	Beklenen onarım veya yenileme maliyetinin toplam yapı değerine oranı
Mw	Moment Büyüklüğü	Depremi açıkça çıkardığı sismik moment esas alınarak hesaplanan büyüklük ölçüsü
OpenQuake	OpenQuake Engine	GEM Vakfı tarafından geliştirilen açık kaynaklı deprem tehlikesi ve risk analizi hesap motoru
PGA	Peak Ground Acceleration – Pik Yer İvmesi	Deprem sırasında zeminde oluşması beklenen en yüksek ivme değerini ifade eden temel tehlike parametresi
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis – Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi	Farklı deprem kaynaklarının, oluşma sıklıklarının ve yer hareketlerinin olasılıksal olarak birlikte değerlendirildiği analiz yöntemi
QGIS	Quantum GIS	Mekânsal veri işleme, analiz ve haritalama amacıyla kullanılan açık kaynaklı CBS yazılımı
S1	1,0 Saniye Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı	TBDY tasarım spektrumunun uzun periyot bölümünün oluşturulmasında kullanılan harita parametresi
Sa(0.2s)	0,2 Saniye Periyotlu Spektral İvme	Özellikle az ve orta katlı, kısa periyotlu yapıların deprem etkisinin değerlendirilmesinde kullanılan parametre
Sa(1.0s)	1,0 Saniye Periyotlu Spektral İvme	Özellikle yüksek katlı ve esnek yapıların deprem etkisinin değerlendirilmesinde kullanılan parametre
Sa(T)	Spectral Acceleration – Spektral İvme	Belirli bir doğal titreşim periyoduna sahip yapının maruz kalacağı deprem etkisini gösteren spektral değer
SDOF	Single Degree of Freedom – Tek Serbestlik Dereceli Sistem	Yapıların dinamik davranışını basitleştirilmiş biçimde temsil etmek için kullanılan mekanik model
SS	Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı	TBDY tasarım spektrumunun kısa periyot bölümünün oluşturulmasında kullanılan harita parametresi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği	Binaların deprem etkisi altında tasarım ve değerlendirme esaslarını belirleyen ulusal yönetmelik
TDTH	Türkiye Deprem Tehlike Haritası	Türkiye genelindeki deprem yer hareketi parametrelerini coğrafi olarak gösteren ulusal tehlike haritası
Tr	Dönüş Periyodu	Belirli bir deprem yer hareketi düzeyinin ortalama tekrarlanma süresi
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu	Nüfus, bina, demografi ve diğer resmî istatistikleri üreten ulusal kurum
UHS	Uniform Hazard Spectrum – Eşdeğer Tehlike Spektrumu	Farklı periyotlarda aynı aşılma olasılığına karşılık gelen spektral ivmelerden oluşturulan tehlike spektrumu
URML	Az Katlı Donatısız Yığma Yapı	HAZUS kapsamında az katlı donatısız yığma yapı tipini ifade eden sınıf
URMM	Orta Katlı Donatısız Yığma Yapı	HAZUS kapsamında orta katlı donatısız yığma yapı tipini ifade eden sınıf

Vs30	Üst 30 Metrenin Ortalama Kayma Dalgası Hızı	Zemin koşullarının ve yerel zemin sınıfının tanımlanmasında kullanılan temel jeoteknik parametre
W1	Ahşap Yapı Tipi	HAZUS yapı sınıflandırmasında hafif ahşap çerçeve yapıları temsil eden sınıf
ZB	Yerel Zemin Sınıfı ZB	TBDY kapsamında sağlam kaya veya referans kaya koşulunu temsil eden zemin sınıfı

1 AFET TÜRÜNE BAĞLI OLARAK MARMARA BÖLGESİ OLASILIKSAL DEPREM TEHLİKE ANALİZİ *

1.1 Giriş ve Kapsam

Bu bölümde, **MARAP (Marmara Bölgesi Afet Risk ve Azaltma Planlaması)** projesi kapsamında yürütülen **Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi (PSHA)** çalışmalarının teknik bulguları ayrıntılı şekilde sunulmaktadır. Çalışma, Marmara Bölgesi'nde yer alan 11 ili kapsayan bir coğrafi alan için gerçekleştirilmiş ve güncel bilimsel yöntemlerle desteklenmiştir. Analizlerde, Avrupa ve Türkiye'ye özgü veri tabanları kullanılarak **OpenQuake Engine** hesap motoru ile modelleme yapılmıştır.

Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en yoğun nüfuslu ve sanayileşmiş bölgesi olmasının yanı sıra hem ekonomik hem de sosyal açıdan ülkenin kalbi niteliğindedir. Bölge, aynı zamanda dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) doğrudan etkisi altında yer almaktadır. Bu fay hattı, tarih boyunca birçok büyük ve yıkıcı depreme sahne olmuştur. Özellikle 1999 Kocaeli (Mw 7.6) ve Düzce (Mw 7.2) depremleri Marmara'da binlerce can kaybına, ciddi ekonomik kayıplara ve altyapı hasarlarına yol açarak bölgenin deprem tehlikesi açısından ne denli kritik bir öneme sahip olduğunu gözler önüne sermiştir. Bununla birlikte, geçmişte yaşanan diğer büyük depremler de bölgenin sismik tehlike profilini şekillendirmiştir. Marmara'nın stratejik konumu, yoğun nüfus yapısı ve sanayi altyapısı, deprem riskinin yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen olasılıksal deprem tehlike analizinde, kullanılan sismik kaynak modeli; fay segmentlerinin geometrisi, aktivite oranları ve tarihsel deprem kataloglarından elde edilen verilerle oluşturulmuştur. Yer hareketi tahmin denklemleri (GMM), belirli bir deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi, fay mekanizması ve saha koşulu için beklenen yer hareketi genliğini (PGA, spektral ivme) ve bu genliğin saçılımını tahmin eden matematiksel modellerdir; bu çalışmada ESHM20 kapsamındaki bölgesel olarak uyarlanabilir modeller esas alınmıştır ve Avrupa ile Türkiye'ye özgü güncel bilimsel literatür dikkate alınarak seçilmiştir. Çalışma, ESHM20 kaynak ve yer hareketi modellerine dayalı olarak referans kaya koşulunda ($V_{s30} = 760$ m/s) gerçekleştirilen bölgesel ölçekli bir olasılıksal deprem tehlikesi değerlendirmesi niteliği taşımaktadır. Analizlerde, Avrupa ve Türkiye veri tabanları ile OpenQuake Engine hesap motoru kullanılmıştır. Bulgular, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kapsamında belirlenen seviyelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; böylece analizlerin mevcut mevzuatla uyumu ve bölgenin deprem tehlikesine ilişkin güncel bilimsel yaklaşım ortaya konmuştur.

* Bu bölüm; **Doç. Dr. Abdullah Can Zülfikar (İTÜ)**, **Dr. Seyhan Okuyan** ve **İnş. Yük. Müh. Derya Şimşek** tarafından düzenlenmiştir.

1.1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Marmara Bölgesi'nde deprem tehlikesine yönelik bilimsel ve teknik açıdan kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, bölgenin özgün sismik yapısı ve tarihi deprem kayıtları dikkate alınarak, güncel analiz ve modelleme yöntemleriyle elde edilen bulgular karar vericilere ve mühendislik uygulamalarına rehberlik etmektedir.

Çalışmanın ana hedefleri aşağıda detaylandırılmıştır:

- Marmara Bölgesi için bilimsel temellere dayalı, uluslararası standartlarla uyumlu ve mevcut veri tabanlarıyla desteklenen güncel bir deprem tehlike haritası üretmek; böylece bölgedeki yerleşim alanlarının ve kritik altyapının maruz kaldığı deprem tehlikesinin mekânsal dağılımını ortaya koymaktadır. Hazırlanan haritalar hem afet yönetimi hem de yapıların güvenli tasarımı açısından temel bir referans niteliğindedir.
- Farklı aşılma olasılıklarına karşılık gelen tehlike düzeylerini (DD-1 ve DD-2) belirlemek; bu sayede, deprem sırasında meydana gelebilecek olası yer hareketlerinin bölge geneli ve özelinde hangi büyüklükte ve sıklıkta yaşanabileceği öngörülebilmektedir. Bu parametreler, risk değerlendirmesi ve yapı tasarımı için vazgeçilmez bir bilgi kaynağıdır.
- Eşdeğer Tehlike Spektrumları (Uniform Hazard Spectra – UHS) aracılığıyla farklı yapı tipleri ve kullanım amaçları için yapısal tasarım girdisi oluşturmak; bu spektrumlar, mühendislerin deprem etkilerini doğru biçimde hesaba katmasını ve yapıları güvenli şekilde tasarlamasını mümkün kılmaktadır. Özellikle bölgedeki yeni yapıların ve mevcut binaların güçlendirilmesi süreçlerinde bu spektrumların önemi büyüktür.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) kapsamında belirlenen tasarım seviyeleri ile Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi (PSHA) sonuçlarının tutarlılığını değerlendirmek; böylece, yapılan analizlerin ülkemizdeki mevzuata uygunluğu ve pratikte uygulanabilirliği ortaya konmaktadır. Bu değerlendirme, bilimsel bulguların güncel yasal çerçeveye uyumlu olmasını ve afet risklerinin etkin biçimde yönetilmesini sağlamaktadır.

Bu kapsamda, çalışmanın sonuçları Marmara Bölgesi'ndeki afet risklerinin azaltılması, yapı güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir şehir planlaması için önemli bir bilimsel dayanak sunmaktadır. Ayrıca, afet yönetimi süreçlerinde kullanılabilecek dinamik ve karar destek odaklı bir sistemin altyapısını oluşturarak, bölgenin deprem tehlikesine karşı hazırlıklı olmasına katkı sağlamaktadır.

1.1.2 Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Marmara Bölgesi'nde deprem tehlikesi ve riski açısından kritik öneme sahip olan coğrafi bir bölgeyi kapsamaktadır. Yaklaşık 26°–31° doğu boylamları ile 39°–42° kuzey enlemleri arasında yer alan bu geniş alan, toplam 11

ili içine almaktadır: İstanbul, Tekirdağ, Kırklareli, Edirne, Çanakkale, Balıkesir, Bursa, Yalova, Kocaeli, Sakarya ve Bilecik. Marmara Bölgesi hem nüfus yoğunluğu hem de sanayi ve ticaret açısından Türkiye'nin en dinamik bölgelerinden biri olmasının yanı sıra, aktif fay hatlarının geçtiği bir alan olması nedeniyle deprem tehlikesine karşı hassas bir yapı sergilemektedir. Tehlike hesapları, bu alan içinde tanımlanan 45 × 34 düğümlü düzenli grid üzerinde yürütülmüştür.

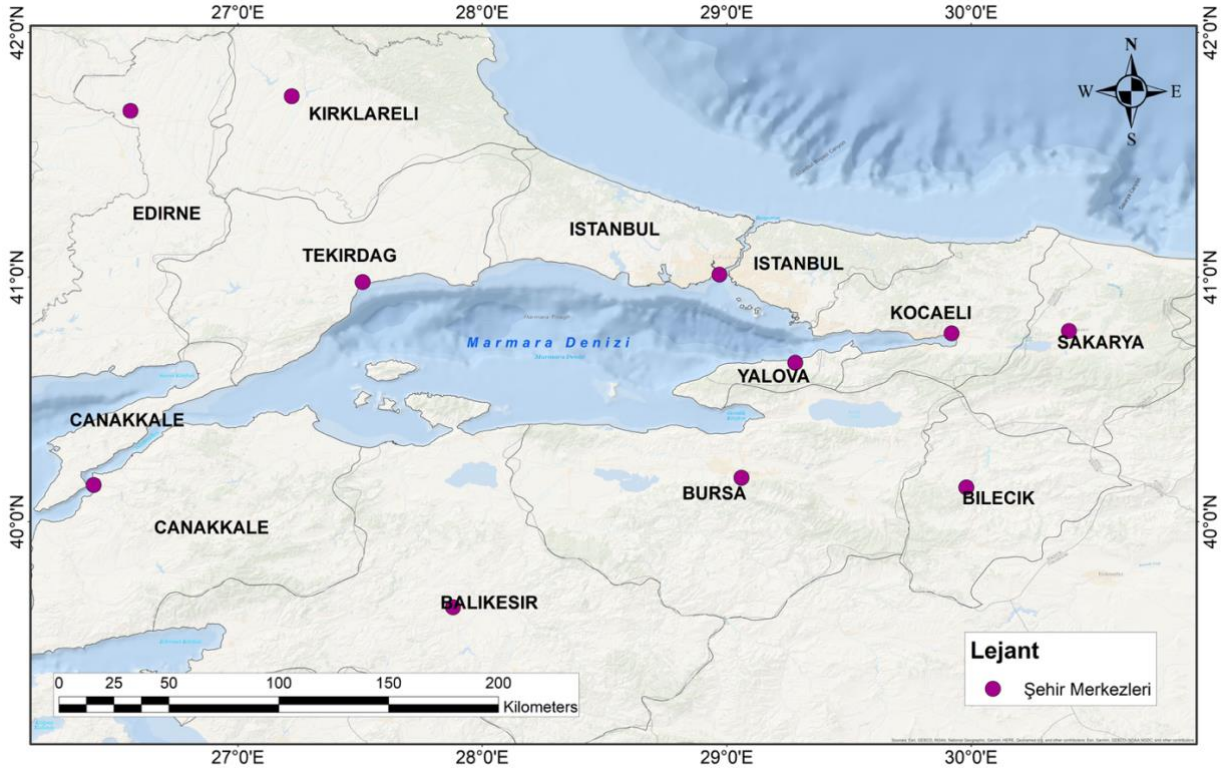
Bölge sınırları, doğal ve beşeri faktörler göz önüne alınarak belirlenmiş olup, çalışmada kullanılan analizlerin kapsamı bölgedeki tüm yerleşim alanlarını, önemli altyapı tesislerini ve kritik yapıları içine alacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışma alanında yer alan iller, farklı jeolojik ve jeoteknik özelliklere sahip olmaları nedeniyle deprem etkilerine karşı farklı risk profilleri göstermektedir. Özellikle İstanbul ve çevresi hem tarihsel depremler hem de mevcut şehirleşme yoğunluğu açısından ön plana çıkmaktadır.

Marmara Bölgesi'nin sınırları içerisinde yer alan iller, geçmişte yaşanan büyük depremlerle afet risklerinin ve yapı güvenliğinin sağlanmasının ne kadar hayati olduğunu defalarca göstermiştir. Bölgedeki aktif fay sistemleri ve sismik hareketlilik hem bilimsel araştırmaların hem de kamu kurumlarının afet yönetim stratejilerinde öncelikli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle, çalışma alanının kapsamı yalnızca idari sınırlarla değil, aynı zamanda sismik tehlike analizlerinin gerektirdiği teknik ve bilimsel kriterlerle de şekillendirilmiştir.

Her il, aşağıdaki tabloda (Tablo 1-1) koordinatları verilen tek bir hesap noktasıyla temsil edilmektedir. Bu nokta değerleri il merkezindeki bölgesel tehlike eğilimini temsil etmek üzere seçilmiş olup il geneline genellenmemelidir; il içi mekânsal değişim için tehlike haritaları esas alınmalıdır. Bu 11 hesap noktasının (il merkezleri) bölge içindeki konumu Şekil 1-1'de gösterilmektedir.

Tablo 1-1 Analiz noktaları — koordinatlar ve zemin koşulu

İl	Enlem	Boylam	Vs30 (m/s)	TBDY zemin sınıfı
İstanbul	41.0346	28.9412	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Kocaeli	40.7950	29.6725	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Sakarya	40.7679	30.4618	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Yalova	40.6436	29.2611	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Bursa	40.2066	29.0726	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Tekirdağ	41.1498	27.6816	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Çanakkale	40.0615	26.6339	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Balıkesir	39.7798	27.6685	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Bilecik	40.0977	30.0821	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Edirne	41.2961	26.5949	760 (referans kaya)	ZB (referans)
Kırklareli	41.5446	27.3456	760 (referans kaya)	ZB (referans)



Şekil 1-1 Çalışma alanı ve 11 il hesap noktası (şehir merkezleri). Arka plan: bölgesel topoğrafya ve Marmara Denizi.

Sonuç olarak, Marmara Bölgesi'nde belirlenen çalışma alanı; deprem tehlike analizlerinin güncel veri tabanları ve uluslararası standartlarla uyumlu biçimde yürütülmesini, bölgedeki yapıların güvenli tasarımı ve afet risklerinin azaltılması için bütüncül bir yaklaşım sunulmasını sağlamaktadır. Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler ve elde edilen sonuçlar, bölgenin sürdürülebilir şehir planlaması ve etkin afet yönetimi süreçleri için önemli bir bilimsel altlık oluşturmuştur.

1.2 Veri ve Yöntem

1.2.1 Hesap Motoru: OpenQuake Engine

Tüm PSHA hesapları, GEM Vakfı (Global Earthquake Model Foundation) tarafından geliştirilen ve aktif olarak sürdürülen açık kaynaklı **OpenQuake Engine** (sürüm 3.16.7) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplar klasik (classical) PSHA modunda, 50 yıllık inceleme süresi ile yürütülmüştür. OpenQuake, olasılıksal tehlike hesaplamalarında uluslararası alanda yaygın olarak kullanılan, tekrarlanabilir ve şeffaf bir platform sunmaktadır. Yazılımın sağladığı modüler yapı ve gelişmiş modelleme olanakları sayesinde, farklı sismik kaynak modellerinin ve zemin parametrelerinin hesaba katılması mümkün olmaktadır; böylece bölgeye özgü deprem risklerinin daha gerçekçi ve güvenilir biçimde değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Özellikle OpenQuake'in kullanıcı dostu arayüzü, geniş veri tabanı desteği ve analiz sonuçlarının detaylı görselleştirme imkânı, mühendislik ve afet yönetimi alanında

çalışan uzmanların hızlı ve etkin kararlar almasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, yazılımın sürekli güncellenen algoritmaları ve topluluk desteği sayesinde, en güncel bilimsel yaklaşımlar ve teknikler kolaylıkla uygulanabilmektedir.

1.2.2 Sismik Kaynak Modeli: ESHM20

Analizde, 2020 yılında yayımlanan Avrupa Sismik Tehlike Modeli (European Seismic Hazard Model 2020, ESHM20, v12e sürümü) esas alınmıştır. ESHM20, Avrupa ve çevre bölgeler için günümüzdeki en kapsamlı ve güncel sismik kaynak modeli olarak kabul edilmekte olup, deprem tehlikesinin bilimsel ve teknik açıdan ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu model, uluslararası standartlara uygun olarak geliştirilmiş ve bölgesel sismik tehlike analizlerinde yüksek doğruluk sağlamasıyla öne çıkmaktadır. ESHM20'nin Marmara Bölgesi gibi aktif fay hatlarının yoğun olduğu alanlarda uygulanması, yerel ve bölgesel ölçekte güvenilir tehlike değerlendirmeleri sunarak afet yönetimi ve yapı güvenliği açısından büyük katkı sağlamaktadır.

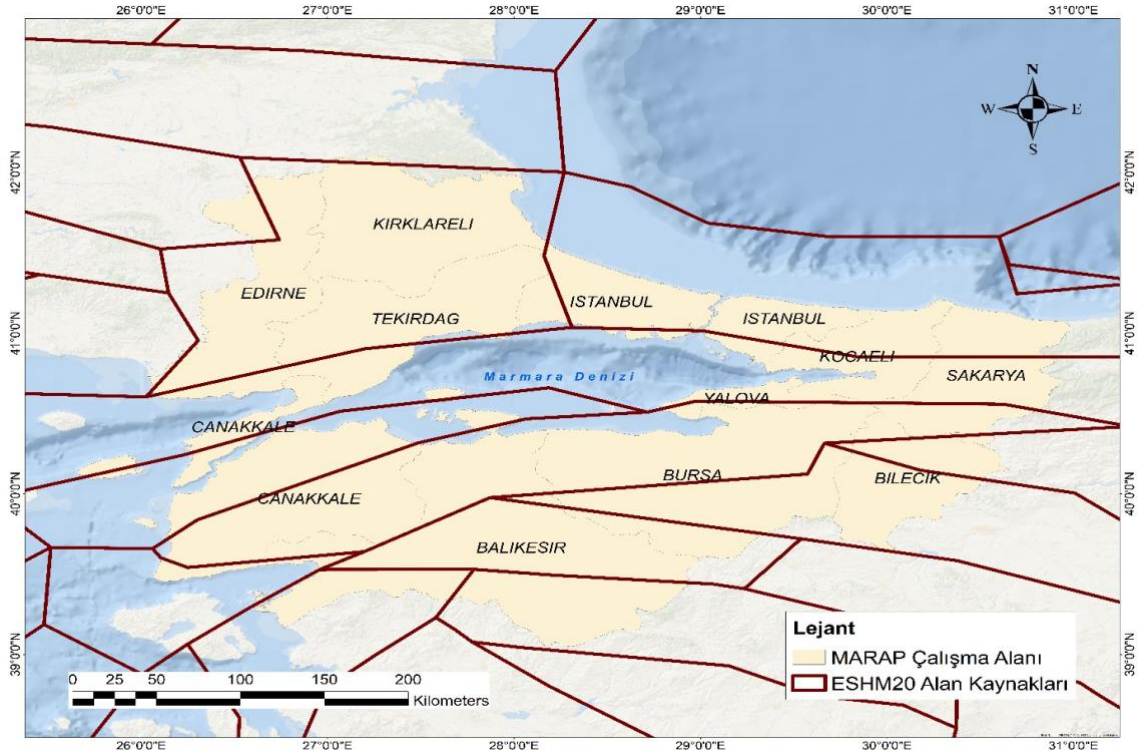
ESHM20 modeli üç temel bileşen üzerine inşa edilmiştir ve bu bileşenler, bölgenin sismik karakteristiğini bütüncül bir yaklaşımla tanımlamaktadır.

- **Alan kaynaklar (Area Sources):** Tektonik bölgelerin jeolojik özelliklerine göre tanımlanmış, homojen sismisiteli poligon kaynak zonlarıdır. Bu zonlar, geniş coğrafi alanlarda depremlerin ortalama oluş sıklığını ve büyüklük dağılımını temsil ederek, bölgenin genel sismik potansiyelini ortaya koymaktadır.

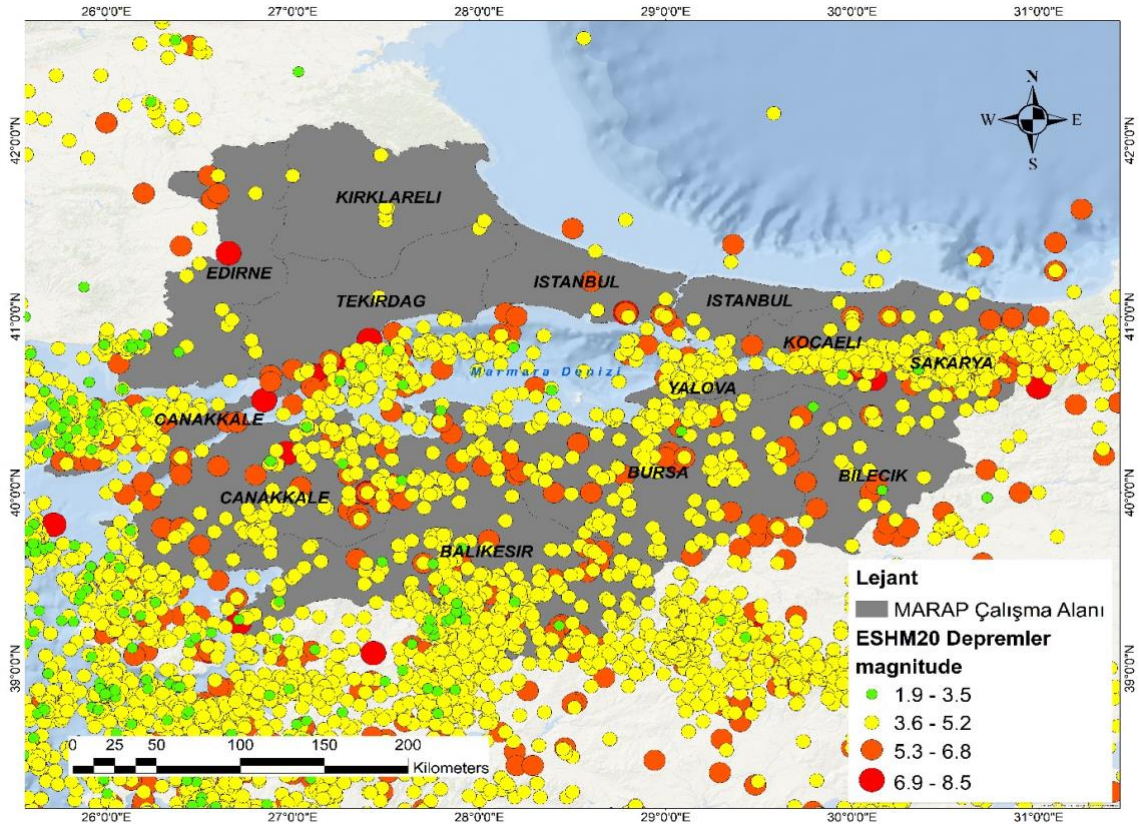
- **Çizgi kaynaklar (Fault Sources):** Bilinen aktif fayların geometrileri ve karakteristik özellikleri temel alınarak oluşturulan deprem kaynaklarıdır. Bu bileşen, özellikle Marmara Bölgesi'nde olduğu gibi büyük ve tarihsel olarak aktif fay hatlarının bulunduğu alanlarda, fayın konumu, uzunluğu ve kayma oranı gibi parametrelerle deprem üretme potansiyelini daha hassas biçimde modellemektedir.

- **Arka plan sismisitesi (Background Seismicity):** Bilinen kaynaklara doğrudan atfedilemeyen, bölge genelinde yaygın ve difüz nitelik taşıyan depremselliği temsil eden gridlenmiş nokta kaynaklardan oluşmaktadır. Bu bileşen sayesinde, mevcut fay sistemlerinin dışında kalan ve küçük ölçekli sismik aktivitelerin gözlemlendiği alanlar da tehlike analizine dâhil edilmektedir.

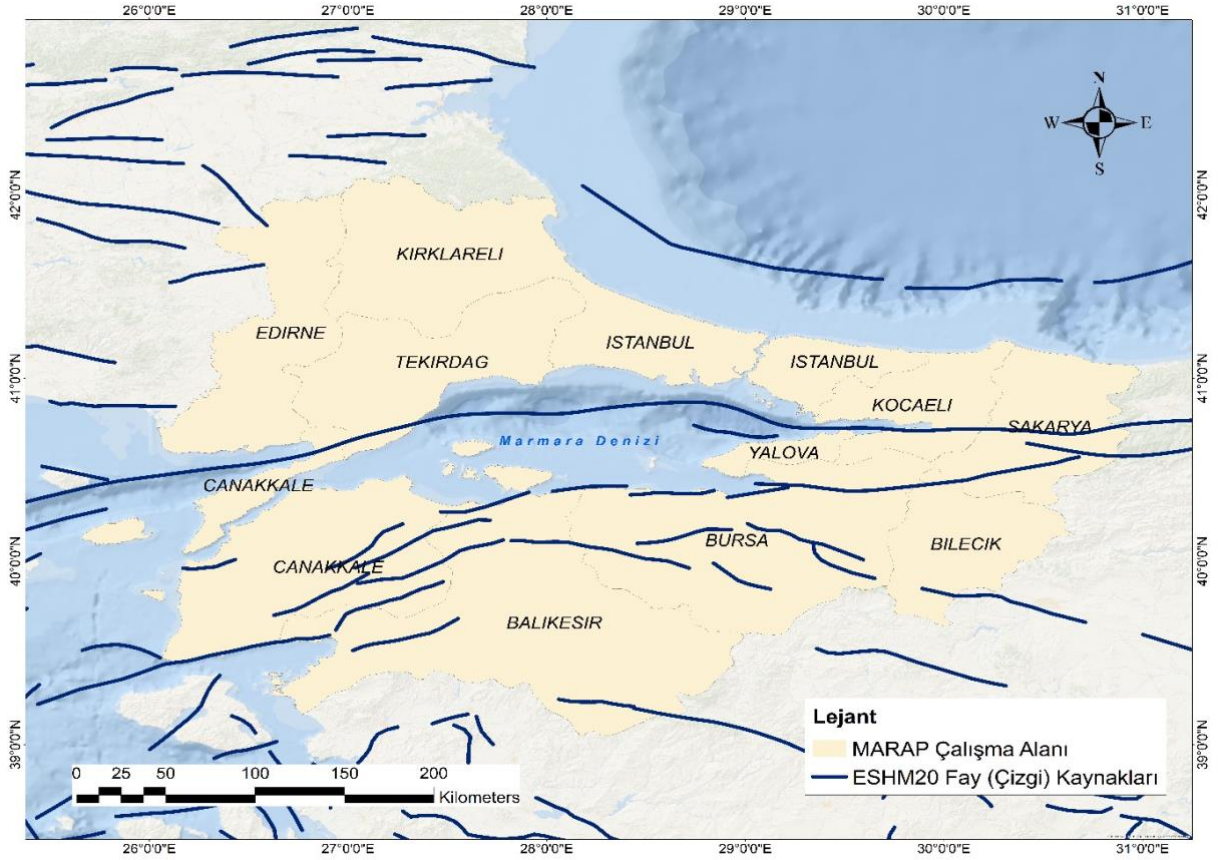
Bu kapsamlı yapı sayesinde ESHM20, Marmara Bölgesi gibi karmaşık jeolojik yapıya sahip alanlarda farklı deprem kaynak türlerinin ve sismik hareketlilik biçimlerinin bütünsel olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece hem bölgesel planlama hem de afet yönetimi süreçlerinde daha etkin ve güvenilir kararlar alınabilmektedir. Şekil 1-2, çalışma alanı içindeki ESHM20 alan kaynak zonlarının coğrafi dağılımını ortaya koyarken; Şekil 1-4 ise özellikle Kuzey Anadolu Fay Sistemi başta olmak üzere bölgedeki aktif fay (çizgi) kaynaklarını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 1-3'de sunulan deprem kataloğu, büyüklük aralığı Mw 1.9–8.5 olan tarihsel ve aletsel deprem kayıtlarını içermekte olup, bölgedeki sismik aktivitenin zamansal ve büyüklük bazında çeşitliliğini görselleştirmektedir.



Şekil 1-2 MARAP çalışma alanı ve ESHM20 alan kaynak zonları.



Şekil 1-3 ESHM20 deprem kataloğu — büyüklük sınıflarına göre deprem dağılımı (Mw 1.9–8.5).

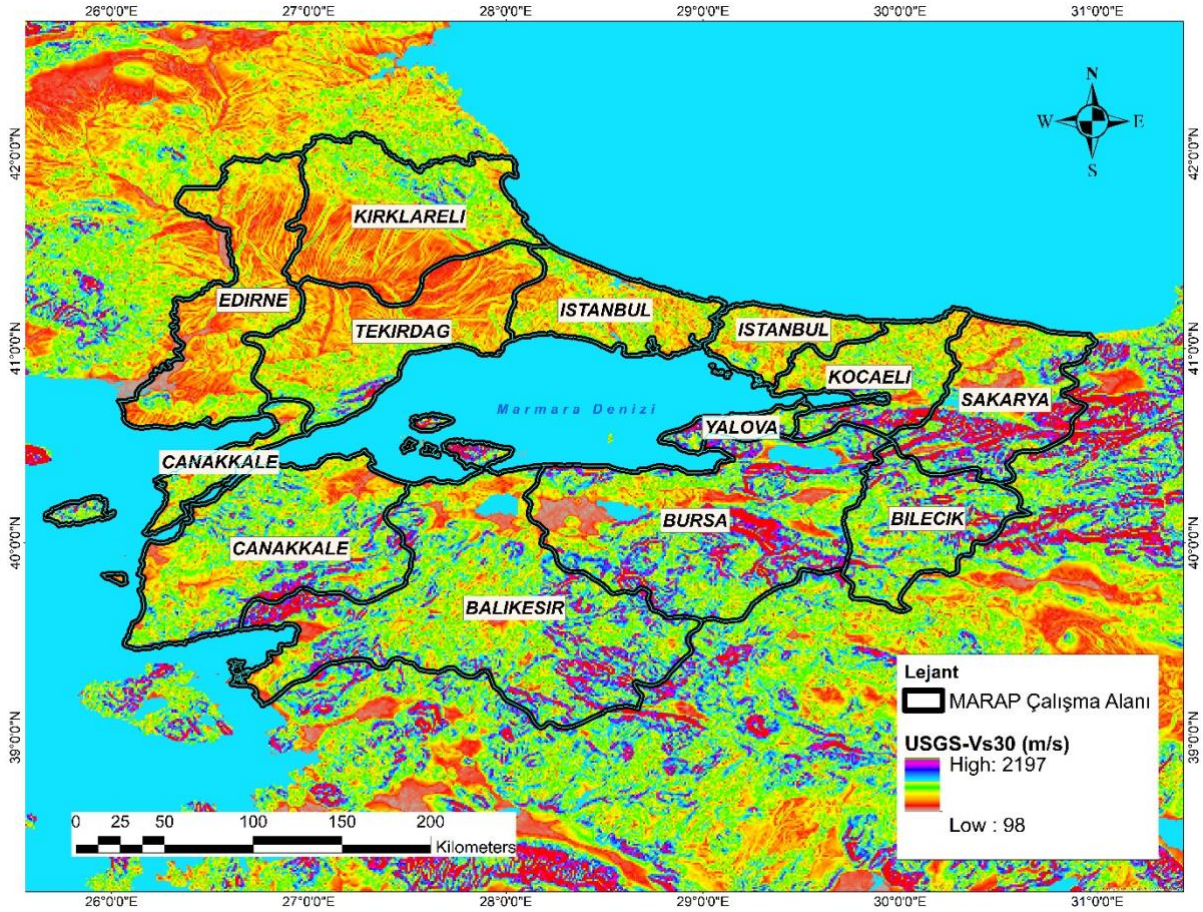


Şekil 1-4 ESHM20 fay (çizgi) kaynakları — Kuzey Anadolu Fay Sistemi başta olmak üzere bölgesel aktif faylar.

1.2.3 Zemin Koşulu: Referans Kaya ($V_{s30} = 760$ m/s)

Çalışma alanında V_{s30} değerleri 98 m/s (yumuşak zemin) ile 2197 m/s (kayalık arazi) arasında değişmekte olup, bu geniş değer aralığı farklı jeolojik ve hidrojeolojik koşulların etkisini yansıtmaktadır. Özellikle İstanbul havzaları ve Bursa Ovası gibi alüvyal çöküntü alanlarında belirgin biçimde düşük V_{s30} değerleri gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 1-5). Bu durum, söz konusu alanlarda deprem sırasında zemin büyütme etkisinin daha yüksek olabileceğini göstermektedir. Yüksek V_{s30} değerleri ise genellikle kayalık ve sağlam zemine sahip bölgelerde tespit edilmektedir ve bu alanlar zemin büyütmesinin görece sınırlı olduğu alanlar olarak kabul edilmektedir. Bu haritalama çalışması, zemin büyütme etkilerinin bölgesel dağılımının belirlenmesinde ve yerel yapı tasarımı ile afet yönetimi açısından kritik öneme sahiptir.

Çalışma kapsamında tüm hesaplar, $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya koşulunda yürütülmüştür; bu değer TBDY 2018'de ZB zemin sınıfının alt sınırına ve AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nın referans zemin koşuluna karşılık gelmektedir. Elde edilen değerler referans kaya üzerindeki yer hareketini temsil etmektedir. Şekil 1-5'te verilen topografik eğim tabanlı V_{s30} dağılımı yalnızca bilgilendirme amaçlı sunulmuştur; PSHA hesaplarında kullanılmamıştır.



Şekil 1-5 USGS eğime bağlı Vs30 haritası — zemin sınıflandırması ve bölgesel dağılım (98–2197 m/s).

1.2.4 Yer Hareketi Modeli: ESHM20 GMM Mantık Ağacı

Sığ kabuk depremleri için yer hareketi tahmininde, ESHM20 kapsamında omurga (backbone) model olarak benimsenen Kotha vd. (2020) bölgesel uyarlanabilir yer hareketi modeli kullanılmıştır. Model, Avrupa ölçeğinde derlenen kuvvetli yer hareketi veri tabanı üzerine kurulmuş olup bölgesel kaynak ve sönüm farklılıklarını ayrı terimlerle temsil edebilmesi nedeniyle Marmara Bölgesi gibi tektonik olarak etkin alanlarda uygulanabilir niteliktedir.

Yer hareketi tahminindeki epistemik belirsizlik, ölçeklenmiş omurga (scaled backbone) yaklaşımıyla kurulan bir mantık ağacı üzerinden temsil edilmiştir (Weatherill vd., 2020). Raporda sunulan tehlike değerleri, bu mantık ağacı üzerinden hesaplanan ortalama (mean) değerlerdir.

1.3 Deprem Tehlike Haritaları ve Analizleri

Bu bölümde, Marmara Bölgesi için üretilen **Pik Yer İvmesi (PGA)** dağılım haritaları iki farklı deprem yer hareketi düzeyi üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Birinci harita (Şekil 1-6), 50 yılda yüzde 10 aşılma olasılığına ve

yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen **DD-2** düzeyini; ikinci harita (Şekil 1-7) ise 50 yılda yüzde 2 aşılma olasılığına ve yaklaşık 2475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen **DD-1** düzeyini göstermektedir. DD-2, olağan mühendislik tasarımlarında esas alınan standart deprem yer hareketi düzeyini; DD-1 ise gerçekleşme olasılığı daha düşük fakat etkisi daha yüksek olan, özellikle kritik ve önemli yapıların değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken çok seyrek deprem yer hareketi düzeyini temsil etmektedir.

Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (PSHA) hesaplamaları, farklı aşılma olasılıklarına karşılık gelen sismik tasarım yer hareketi düzeylerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu düzeyler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) tarafından tanımlanan deprem yer hareketi seviyeleriyle uyumlu olup, uluslararası standartlara paralel olarak kabul edilmektedir. PSHA yaklaşımı, deprem riskinin nicel olarak değerlendirilmesinde ve yapıların sismik tasarımında güvenilir bir temel sunmaktadır.

- **DD-2:** 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip sismik tasarım düzeyi — dönüş periyodu yaklaşık 475 yıl. Bu düzey, olağan mühendislik tasarımlarında esas alınan standart deprem yer hareketi düzeyini temsil etmektedir.

- **DD-1:** 50 yılda %2 aşılma olasılığına sahip sismik tasarım düzeyi — dönüş periyodu yaklaşık 2475 yıl. Bu düzey ise, düşük olasılıklı ancak yüksek şiddetli deprem yer hareketini ifade eder ve özellikle kritik ve önemli yapıların tasarımında dikkate alınmaktadır.

Her iki düzey için PGA, $S_a(T=0.2s)$ ve $S_a(T=1.0s)$ ortalama (mean) tehlike değerleri hesaplanmıştır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 1-2), her ili temsil eden tek hesap noktasının değerleri (g) DD-1 düzeyindeki PGA değerine göre azalan sırada verilmektedir.

Tablo 1-2 Her ili temsil eden noktanın ortalama yer hareketi değerleri (g). DD-2: $T_r \approx 475$ yıl; DD-1: $T_r \approx 2475$ yıl.

İl	PGA DD-2	PGA DD-1	$S_a(0.2)$ DD-2	$S_a(0.2)$ DD-1	$S_a(1.0)$ DD-2	$S_a(1.0)$ DD-1
Kocaeli	0.488	0.964	1.411	2.939	0.611	1.417
Sakarya	0.422	0.834	1.200	2.517	0.484	1.230
Yalova	0.436	0.803	1.196	2.243	0.452	0.949
Bursa	0.356	0.759	0.890	1.888	0.229	0.470
İstanbul	0.363	0.696	0.957	1.844	0.346	0.717
Balıkesir	0.239	0.458	0.606	1.174	0.165	0.307
Çanakkale	0.228	0.430	0.576	1.098	0.180	0.337
Tekirdağ	0.212	0.409	0.539	1.047	0.203	0.407
Bilecik	0.166	0.332	0.411	0.832	0.132	0.249
Edirne	0.128	0.280	0.307	0.684	0.109	0.215
Kırklareli	0.096	0.187	0.223	0.446	0.094	0.180

Tehlike haritaları çalışma alanını yaklaşık 0,1° aralıkla kaplayan 45 × 34 = 1.530 düğümlü düzenli bir hesap gridinden üretilmiştir (düğüm aralığı kuzey–güney yönünde ≈11 km, doğu–batı yönünde ≈8,5 km); bu düğümlerin 1.074'ü kara üzerindedir. Grid düğümlerindeki PSHA değerleri ArcGIS 10.8 ortamında Ters Mesafe Ağırlıklandırması (Inverse Distance Weighting) yöntemi ile sürekli yüzeye dönüştürülmüştür. Elde edilen dağılımlar Şekil 1-6 ile Şekil 1-11 arasında sunulmaktadır.

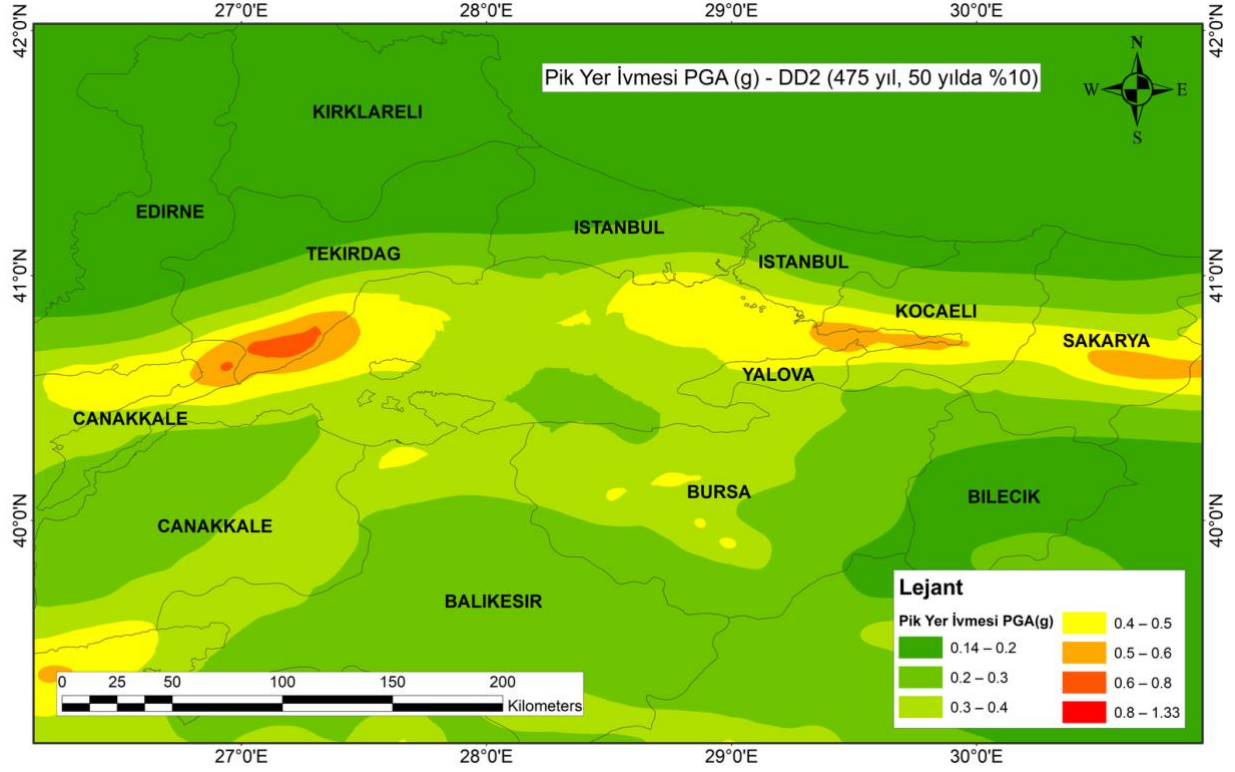
DD-2 tehlike düzeyinde PGA değerleri 0.10 g (Kırklareli) ile 0.49 g (Kocaeli) arasında; DD-1 düzeyinde ise 0.19 g ile 0.96 g arasında dağılım göstermektedir. En yüksek değerler Kuzey Anadolu Fay Zonu'na yakın Kocaeli–Sakarya–Yalova ekseninde elde edilmiş; en düşük değerler ise fay zonundan uzak konumdaki Kırklareli ve Edirne illerinde belirlenmiştir.

1.3.1 *Pik Yer İvmesi (PGA)*

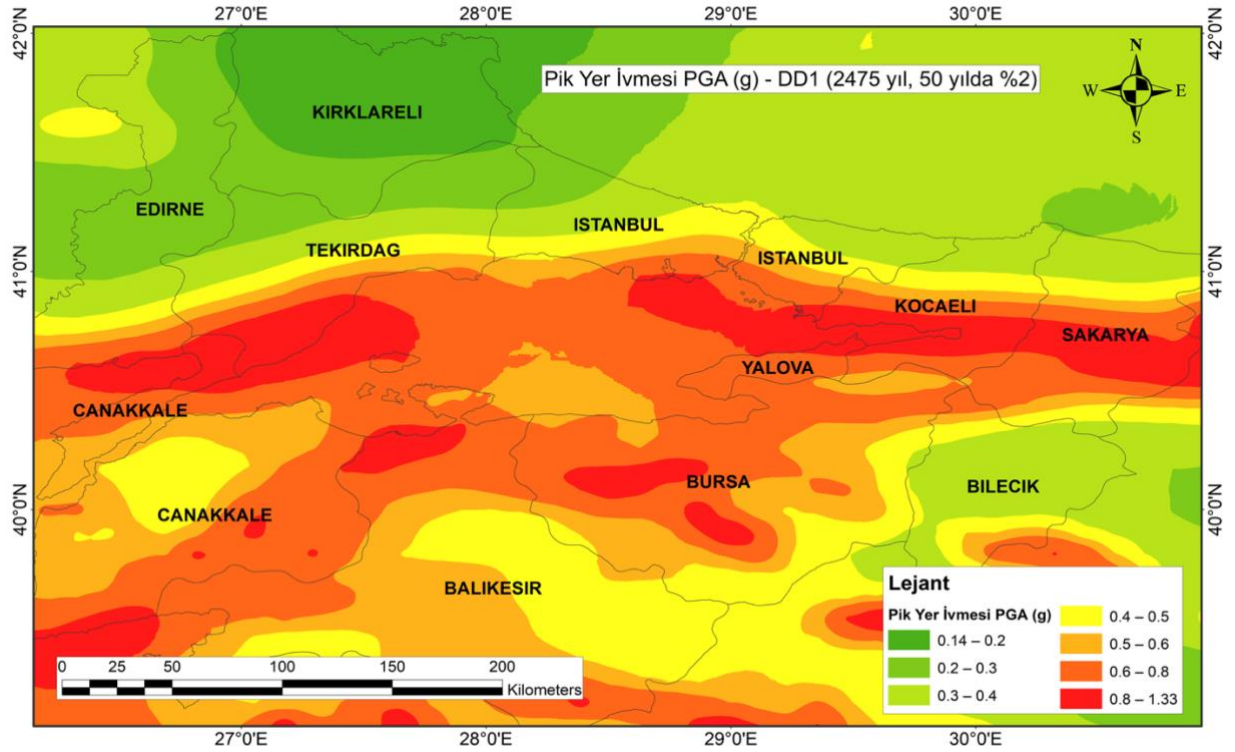
PGA- Pik Yer İvmesi, deprem sırasında yer hareketinde ortaya çıkan en büyük ivme genliğidir; haritalarda yerçekimi ivmesine oranlanarak "g" birimiyle verilmiştir. PGA; doğrudan bina hasarı, can kaybı veya ekonomik kayıp anlamına gelmez. Bir alanın gerçek deprem riski, bu tehlike değerinin yerel zemin koşulları, yapı stokunun niteliği, bina kullanım biçimi, nüfus yoğunluğu, kritik altyapı maruziyeti ve müdahale kapasitesiyle birlikte değerlendirilmesi sonucunda ortaya çıkar.

PGA haritaları, tehlike değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılan ve referans kaya düzeyindeki maksimum ivme değerini temsil eden en temel tehlike parametrelerinden birini sunmaktadır. Bu haritalar sayesinde, farklı bölgelerde deprem sırasında oluşabilecek yer hareketinin şiddeti önceden tahmin edilerek, yapıların güvenliğini ve dayanıklılığını artırmaya yönelik uygun mühendislik çözümleri geliştirilebilmektedir. Ayrıca, Pik Yer İvmesi haritaları, afet yönetimi ve bölgesel risk analizi açısından da önemli bir rehber niteliği taşıyarak, karar vericilere sismik tehlike dağılımı konusunda bilimsel ve pratik bilgiler sağlar.

Şekil 1-6 ve Şekil 1-7'de sunulan haritalar sırasıyla DD-2 ve DD-1 tehlike düzeylerine karşılık gelen PGA dağılımlarını göstermektedir. Renk ölçeği AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası gösterimiyle uyumlu seçilmiş olup, her iki harita ortak renk eksenini paylaşmaktadır.



Şekil 1-6 PGA tehlike haritası — DD-2 düzeyi (Tr≈475 yıl, 50 yılda %10). Karaya kırılmış grid interpolasyonu; en yüksek değerler Kuzey Anadolu Fay koridorunda.



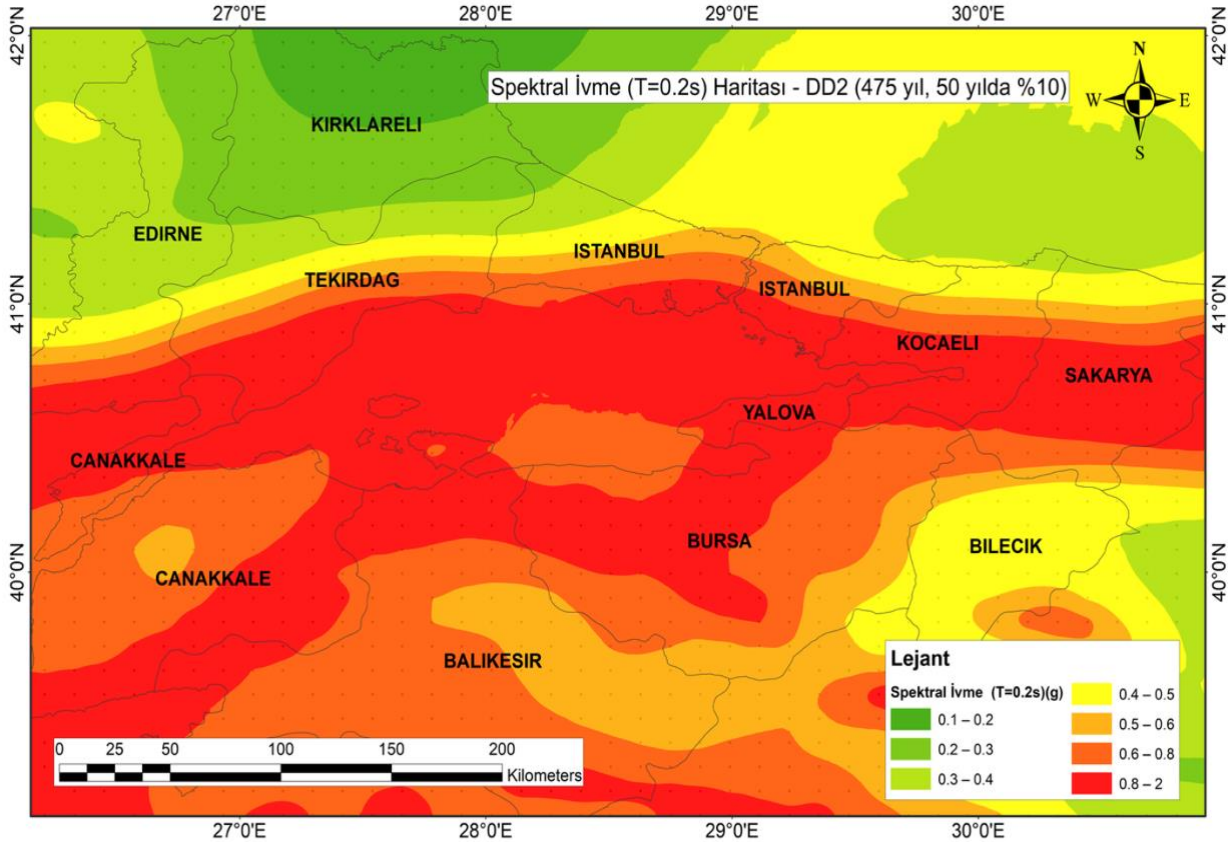
Şekil 1-7 PGA tehlike haritası — DD-1 düzeyi (Tr≈2475 yıl, 50 yılda %2). DD-2 ile aynı renk ölçeği.

Her iki haritada da ortak renk ölçeğinin kullanılması, DD-1 ve DD-2 düzeylerinin doğrudan karşılaştırılmasına imkân vermektedir. Lejantta PGA değerleri 0,14–0,20 g'den başlayarak 0,80–1,33 g'ye kadar uzanan yedi sınıfta gösterilmiştir. Yeşil tonlar görece düşük, sarı tonlar orta, turuncu ve kırmızı tonlar ise yüksek ve çok yüksek yer ivmesi değerlerini temsil etmektedir. Aynı renk sınıflarının her iki haritada korunmuş olması, DD-1 düzeyinde yüksek tehlike alanlarının hem şiddet hem de alan bakımından ne ölçüde genişlediğinin açık biçimde görülmesini sağlamaktadır.

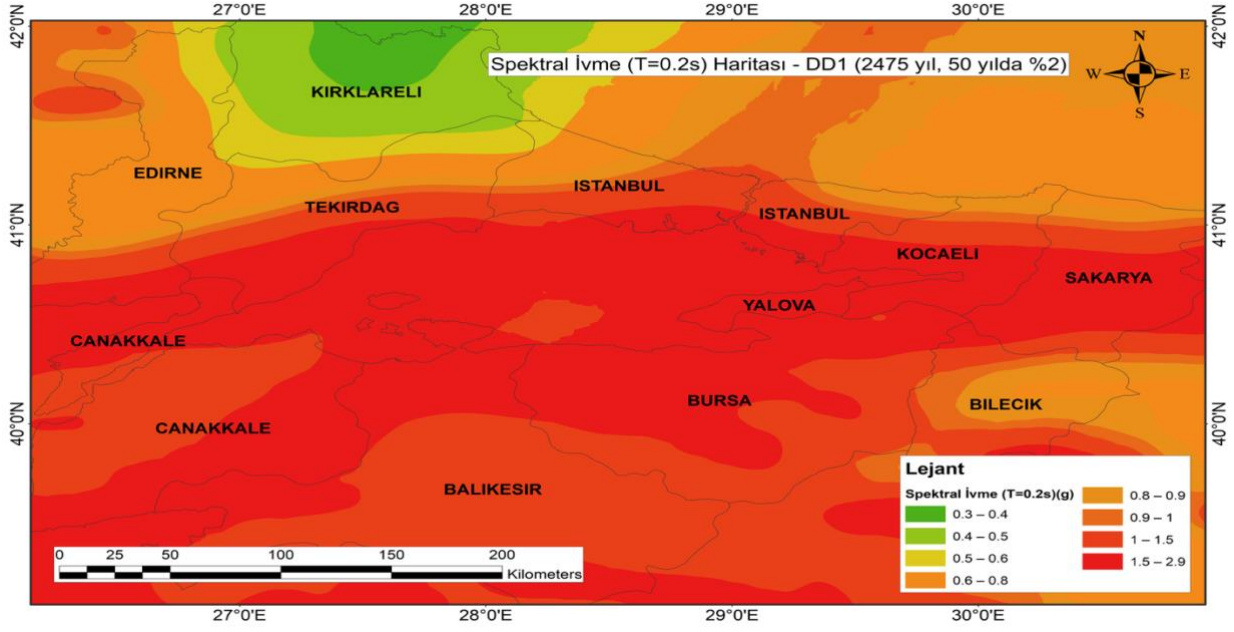
İl merkezlerine ait sayısal değerler, haritanın mekânsal dağılımını tamamlayan temsilî nokta değerleri olarak ele alınmalıdır.

1.3.2 Kısa Periyot Spektral İvme — $S_a(T=0.2s)$

$S_a(0.2 s)$, hâkim titreşim periyodu yaklaşık 0.2 s mertebesinde olan rijit ve az katlı yapılar için belirleyici olan spektral ivme ordinatıdır; TBDY 2018'de kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (SS) bu periyotta tanımlanmaktadır. Bu ordinata ait bölgesel tehlike dağılımı Şekil 1-8 (DD-2) ve Şekil 1-9 $S_a(0.2s)$ Tehlike Haritası — DD-1 düzeyi ($T_r \approx 2475$ yıl, 50 yılda %2). Fay koridoru üzerindeki uç değerler, yerleşim ölçeğinde okunabilirlik için 11-nokta şehir maksimumu ($\approx 2.9 g$) düzeyinde sınırlandırılmıştır; nokta tasarım değerleri için Tablo 1-2 (DD-1) haritalarında sunulmaktadır.



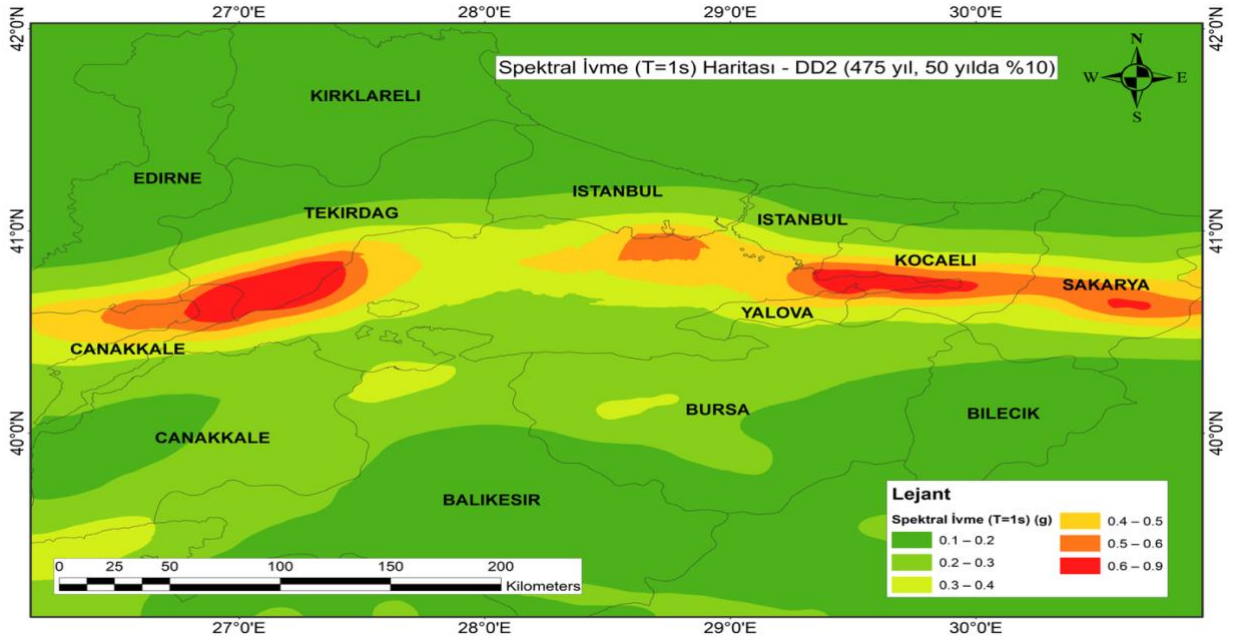
Şekil 1-8 $S_a(0.2s)$ Tehlike Haritası — DD-2 düzeyi ($T_r \approx 475$ yıl, 50 yılda %10).



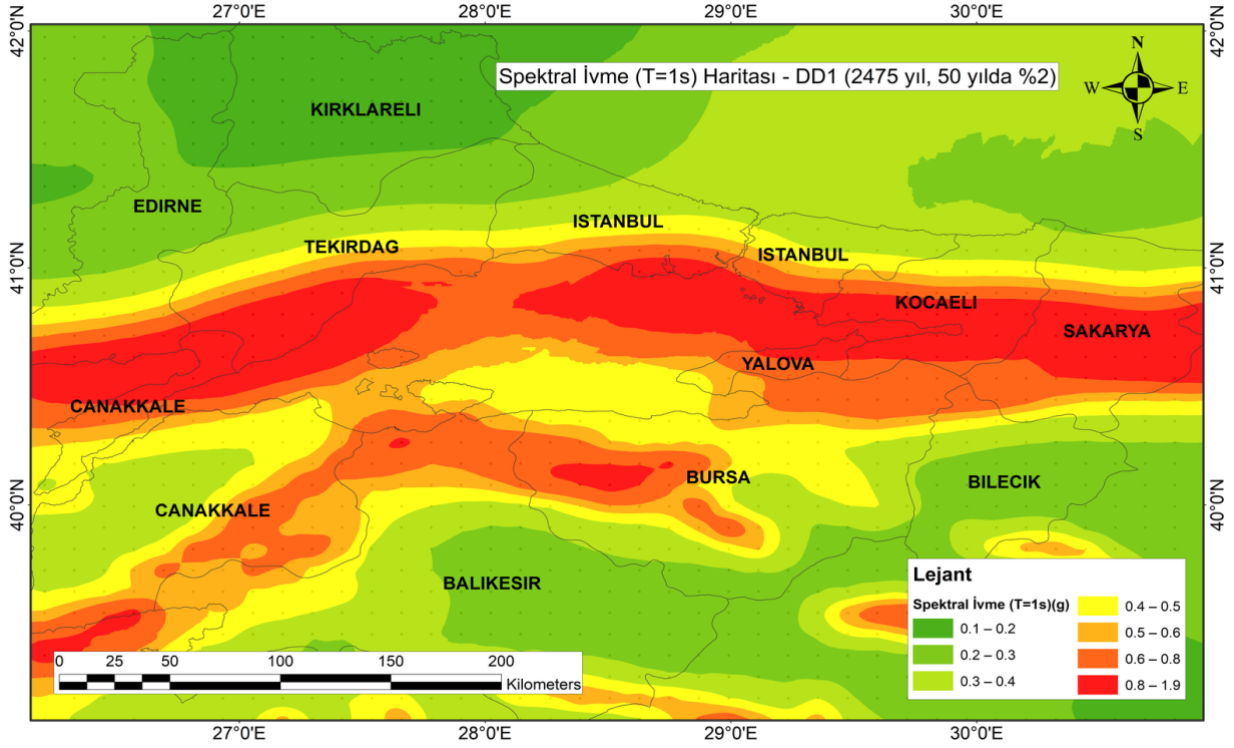
Şekil 1-9 Sa(0.2s) Tehlike Haritası — DD-1 düzeyi ($T_r \approx 2475$ yıl, 50 yılda %2). Fay koridoru üzerindeki uç değerler, yerleşim ölçeğinde okunabilirlik için 11-nokta şehir maksimumu (≈ 2.9 g) düzeyinde sınırlandırılmıştır; nokta tasarım değerleri için Tablo 1-2.

1.3.3 Uzun Periyot Spektral İvme — $S_a(T=1.0s)$

$S_a(1.0\text{ s})$, hâkim titreşim periyodu yaklaşık 1.0 s mertebesinde olan orta-yüksek katlı ve görece esnek yapılar için belirleyici olan spektral ivme ordinatıdır; TBDY 2018'de uzun periyot harita spektral ivme katsayısı (S_1) bu periyotta tanımlanmaktadır. Bu ordinata ait bölgesel tehlike dağılımı Şekil 1-10 (DD-2) ve Şekil 1-11 (DD-1) haritalarında sunulmaktadır.



Şekil 1-10 Sa(1.0s) tehlike haritası — DD-2 düzeyi ($T_r \approx 475$ yıl, 50 yılda %10).



Şekil 1-11 Sa(1.0s) tehlike haritası — DD-1 düzeyi (Tr≈2475 yıl, 50 yılda %2)

1.3.4 Marmara Bölgesi genelinde deprem tehlikesinin mekânsal yapısı

Tehlikenin temel geometrisi: doğrusal ve segmentli bir koridor

Haritaların en belirgin ortak özelliği, deprem tehlikesinin tek bir merkezden çevreye doğru düzenli biçimde azalan dairesel bir dağılım göstermemesidir. Bunun yerine yüksek PGA değerleri, Marmara Denizi boyunca doğu-batı doğrultusunda uzanan ve yer yer genişleyip daralan **doğrusal ve segmentli bir tehlike koridoru** oluşturmaktadır. Bu koridor genel olarak;

- Çanakkale Boğazı ve Gelibolu çevresinden,
- Tekirdağ'ın güney Marmara kıyılarına,
- Marmara Denizi'nin kuzey ve güney kıyı geçişlerine,
- İstanbul'un güney kesimlerine,
- Yalova ve İzmit Körfezi'ne,
- Kocaeli ve Sakarya'ya

kadar devam etmektedir.

Bu mekânsal örüntü, yüksek tehlikenin Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun (KAFZ) Marmara içindeki ve doğusundaki segmentleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir.

En yüksek değerler, KAFZ koridoru ve açık deniz fay segmentleri boyunca yoğunlaşmaktadır. Haritalarda iki ana yüksek tehlike odağı seçilmektedir. Bunlar:

- 1) **Batı Marmara odağı:** Çanakkale'nin kuzeyi, Gelibolu, Tekirdağ'ın güneyi ve Marmara Denizi'nin batı kesimi;
- 2) **Doğu Marmara odağı:** İstanbul'un güneyi, Yalova, İzmit Körfezi, Kocaeli ve Sakarya hattı.

Bu iki odak arasında Marmara Denizi boyunca devam eden orta-yüksek tehlike bandı, bölgedeki sismik tehlikenin tekil il sınırlarından bağımsız, bölgesel bir koridor mantığıyla ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Kuzey-güney yönlü belirgin tehlike gradyanı

Haritalardaki ikinci temel desen, özellikle Trakya ve İstanbul çevresinde belirginleşen **kuzey-güney tehlike gradyanıdır**. Edirne ve Kırklareli'nin kuzey ve iç kesimleri yeşil tonlarla temsil edilirken, Marmara Denizi'ne ve fay koridoruna yaklaşıldıkça renkler açık yeşil, sarı, turuncu ve kırmızıya dönüşmektedir. Bu gradyan özellikle şu alanlarda belirgindir:

- Kırklareli–Tekirdağ kuzey-güney geçişi,
- İstanbul'un Karadeniz kıyıları ile Marmara kıyıları arasındaki geçiş,
- Tekirdağ'ın iç kesimleri ile güney kıyı kuşağı arasındaki fark,
- Sakarya'nın kuzey kesimleri ile merkezi ve güney geçiş alanları,
- Bilecik ile Bursa–Sakarya geçiş zoneu.

Bu durum, bir ilin tek bir tehlike sınıfı ile tanımlanmasının yetersiz olduğunu göstermektedir. Özellikle İstanbul, Tekirdağ, Çanakkale, Bursa ve Sakarya'da il içi farklılıklar, bazı durumlarda iller arasındaki farklardan daha yüksek olabilmektedir. Bu değerlendirmeler, grid düğümlerinden üretilen ve mekânsal enterpolasyonla düzgünleştirilmiş yüzeyler üzerinden yapılmış olup nokta bazlı tasarım değerleri için Tablo 1-2 esas alınmalıdır.

1.3.5 DD-2 düzeyi PGA haritasının değerlendirilmesi

DD-2 haritası, 50 yılda yüzde 10 aşılma olasılığına sahip standart tasarım deprem yer hareketi düzeyindeki bölgesel dağılımı göstermektedir. Bu haritada Marmara Bölgesi'nin önemli bir bölümü 0,20–0,40 g aralığındaki yeşil ve açık yeşil sınıflarda yer almaktadır. Bununla birlikte fay koridoruna yaklaşan alanlarda 0,40–0,60 g, yerel bazı odaklarda ise 0,60–0,80 g sınıfları görülmektedir.

DD-2 düzeyindeki yüksek tehlike kuşakları

DD-2 düzeyinde yüksek PGA değerlerinin başlıca üç alanda yoğunlaştığı görülmektedir:

Batı Marmara–Gelibolu–Güney Tekirdağ kuşağı: Çanakkale'nin kuzeydoğusu ile Tekirdağ'ın güney kıyıları arasında sarı, turuncu ve yerel kırmızımsı

alanlar oluşmaktadır. Bu kuşakta 0,40–0,60 g sınıfları yaygınlaşmakta, bazı yerel gridlerde 0,60–0,80 g aralığına ulaşılmaktadır. Bu durum, Tekirdağ veya Çanakkale il merkezlerinin temsili değerlerinin, il sınırları içindeki en yüksek tehlikeyi tek başına ifade etmediğini göstermektedir.

İstanbul’un güneyi–Yalova–İzmit Körfezi kuşağı: İstanbul’un Marmara kıyıları ile Yalova ve İzmit Körfezi çevresi ağırlıklı olarak 0,40–0,50 g sınıfında görülmektedir. Kocaeli’nin körfez çevresindeki bazı kesimleri ise 0,50–0,60 g sınıfına yaklaşmaktadır.

Kocaeli–Sakarya kuşağı: Doğu Marmara’da Kocaeli ve Sakarya çevresinde sarı ve turuncu renklerin belirginleştiği görülmektedir. Kocaeli il merkezi için hesaplanan 0,488 g değeri, DD-2 düzeyindeki en yüksek temsili il merkezi değeridir. Sakarya ve Yalova da 0,42–0,44 g aralığındaki değerlerle yüksek tehlike grubunda yer almaktadır.

DD-2 düzeyindeki görece düşük tehlike alanları

Edirne ve Kırklareli’nin kuzey ve iç kesimleri, DD-2 haritasında koyu yeşil ve yeşil sınıflarla temsil edilmektedir. Bilecik’in doğu ve güneydoğu bölümleri de görece düşük tehlike sınıfındadır.

Bununla birlikte “düşük tehlike” tanımı, deprem bakımından güvenli veya risksiz anlamına gelmemektedir. Örneğin düşük PGA değerinin bulunduğu bir alanda zayıf yapı stoku, yumuşak zemin, kritik altyapı yoğunluğu veya yüksek sosyal kırılganlık bulunması durumunda risk yine yüksek olabilir.

DD-2 haritasının mühendislik anlamı

DD-2 haritası, yaygın yapı tasarımı ve mevcut yapı stokunun genel performans değerlendirmesi için temel bir bölgesel girdidir. Haritada 0,40 g ve üzerindeki sınıflarda bulunan alanlarda;

- taşıyıcı sistem düzensizlikleri,
- düşük beton ve donatı kalitesi,
- yumuşak kat,
- kısa kolon,
- bitişik nizam çarpışması,
- sıvılaşma ve zemin büyütmesi

gibi kırılganlıkların yapısal sonuçları önemli ölçüde ağırlaştırabileceği dikkate alınmalıdır.

1.3.6 DD-1 düzeyi PGA haritasının değerlendirilmesi

DD-1 haritası, daha düşük gerçekleşme olasılığına sahip fakat çok daha şiddetli yer hareketlerini göstermektedir. Aynı renk ölçeği kullanıldığında DD-1 haritasında turuncu ve kırmızı sınıfların yalnızca koyulaşmadığı, aynı zamanda çok daha geniş alanlara yayıldığı açıkça görülmektedir.

Yüksek tehlike kuşağının genişlemesi

DD-1 düzeyinde 0,60–0,80 g ve 0,80–1,33 g sınıfları, Marmara'nın büyük bölümünde sürekli veya yarı sürekli bir bant oluşturmaktadır. Özellikle;

- Çanakkale'nin kuzeyi,
- Tekirdağ'ın güney kıyıları,
- Marmara Denizi'nin kuzey ve güney kıyı geçişleri,
- İstanbul'un güney kesimleri,
- Yalova,
- Kocaeli,
- Sakarya

kırmızı ve kırmızı-turuncu sınıflarla temsil edilmektedir. DD-2 haritasında daha çok yerel cepler şeklinde görülen yüksek değerler, DD-1 haritasında birbirine bağlanarak geniş bir bölgesel koridor meydana getirmektedir. Bu sonuç, düşük olasılıklı fakat yüksek şiddetli deprem düzeyinde tehlikenin tekil sıcak noktalardan çıkıp bölgesel bir sistem riski üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Güney Marmara'daki belirgin artış

DD-2 haritasında çoğunlukla 0,30–0,40 g sınıfında bulunan Bursa ve çevresi, DD-1 düzeyinde geniş ölçüde 0,60–0,80 g sınıfına yükselmektedir. Bursa ili içinde yerel kırmızı odakların oluşması, düşük olasılıklı şiddetli yer hareketleri bakımından ilin hassasiyetinin DD-2 haritasına göre daha güçlü olduğunu göstermektedir.

Balıkesir'in kuzey ve orta kesimlerinde de benzer biçimde sarı-turuncu sınıfların genişlediği, yer yer daha yüksek değerlerin olduğu görülmektedir. Bilecik, bölgesel sıralamada daha düşük kalmakla birlikte DD-1 düzeyinde tamamen düşük sınıfta değildir; özellikle batı ve kuzeybatı geçişlerinde tehlike artmaktadır.

Kuzey Trakya'nın göreceli konumu

Edirne ve Kırklareli DD-1 düzeyinde de bölgenin görece düşük PGA değerlerine sahip illeri olarak kalmaktadır. Ancak DD-1 haritasında bu illerin önemli bölümü DD-2'ye göre bir veya iki renk sınıfı yukarı çıkmaktadır. Dolayısıyla düşük tehlike bölgelerinde de mutlak sismik talep artmaktadır. Bu durum şu önemli ayrımı ortaya koymaktadır:

DD-1 düzeyinde bölgesel sıralama büyük ölçüde korunmakta, ancak bütün bölgenin mutlak yer hareketi talebi yükselmektedir.

Kırklareli ve Edirne, Kocaeli veya Sakarya'ya kıyasla daha düşük tehlikeli olmaya devam etmekte; buna karşılık kendi DD-2 değerlerine göre yaklaşık iki kat daha yüksek PGA talepleriyle karşılaşmaktadır.



Deprem Tehlike Harita Analizi – DD-2 Düzeyi

Pik Yer İvmesi (PGA), $T_r \approx 475$ yıl, 50 yılda %10 aşılma olasılığı

Marmara Bölgesi Genel Özeti



1) Haritanın Anlamı
DD-2 düzeyi, yönetmeliklerde tanımlanan standart tasarım depremi düzeyidir. Harita; $T_r \approx 475$ yıl (50 yılda %10 aşılma) için referans kaya koşullarında ($V_{s30} \approx 760$ m/s) beklenen Pik Yer İvmesi (PGA) dağılımını gösterir.



2) Marmara Genel Görünüm
Bölge homojen değildir. Tehlike, doğu-batı uzanımlı bir koridor biçiminde; Kuzey Anadolu Fay sistemi ve Marmara Denizi geçiş zonu boyunca artış göstermektedir.



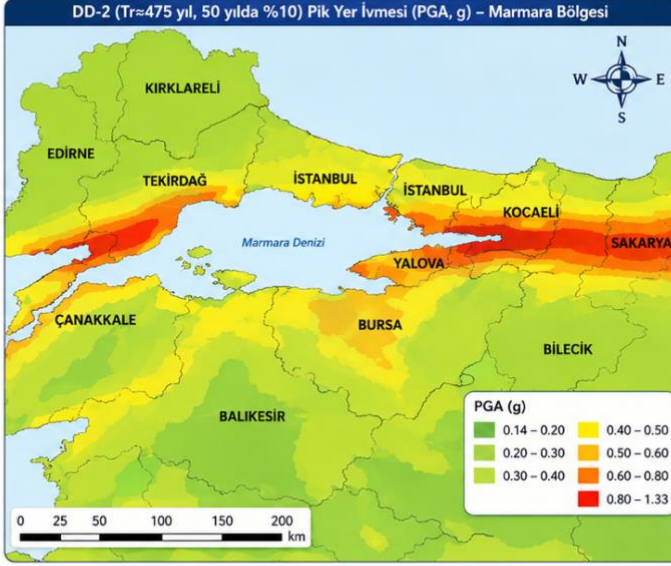
3) Öne Çıkan Yüksek Tehlike Alanları
• Batı Marmara / Gelibolu–Güney Tekirdağ
• Güney İstanbul–Yalova–İzmit Körfezi
• Kocaeli–Sakarya hattı



4) Görece Düşük Tehlike Alanları
• Edirne ve Kırklareli'nin kuzeyi ve iç kesimleri
• Bilecik'in bazı kesimleri



5) Temel Somut Çıkarımlar
• Tehlike koridor biçimindedir; doğu-batı boyunca değişir.
• İl içi farklılıklar önemlidir.
• İl merkezi değeri tek başına yeterli değildir; ilçe/mahalle ölçeğinde değerlendirme gerekir.
• Kıyı ve fay yakın kesimlerde mühendislik talebi artar.
• DD-2, yapı tasarımı ve tarama öncelikleri için temel girdidir.



İl	PGA (g)
1 Kocaeli	0.488
2 Yalova	0.436
3 Sakarya	0.422
4 İstanbul	0.363
5 Bursa	0.356
6 Balıkesir	0.239
7 Çanakkale	0.228
8 Tekirdağ	0.212
9 Bilecik	0.166
10 Edirne	0.128
11 Kırklareli	0.096

Not: Değerler yaklaşık ve bölgesel temsildir. İl içi ve yerel ölçekli farklılıklar olabilir.



7) Planlama Mesajı
Bu değerler referans kaya düzeyi için bölgesel ölçekli tehlike değerleridir. Risk analizlerinde; zemin koşulları, yapı stoğu ve maruziyet ile birlikte değerlendirilmelidir.



Kaynak: AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları – DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl, 50 yılda %10) | Referans kaya koşulları ($V_{s30} \approx 760$ m/s)



Deprem Tehlike Harita Analizi – DD-1 Düzeyi

Pik Yer İvmesi (PGA), $T_r \approx 2475$ yıl, 50 yılda %2 aşılma olasılığı

Marmara Bölgesi Genel Özeti



1) Haritanın Anlamı
DD-1 düzeyi, $T_r \approx 2475$ yıl tekrarlama periyoduna sahip, nadir ancak çok daha güçlü depremleri temsil eder. Harita, Marmara Bölgesi'nde 50 yılda %2 aşılma olasılığına karşılık gelen PGA (g) değerlerinin coğrafi dağılımını gösterir.



2) Marmara Genel Görünüm
DD-1 düzeyinde yüksek tehlike sınıfları doğu-batı yönünde geniş bir kuşak halinde bürür ve birbirine bağlanır. Bölge genelinde daha yüksek PGA değerleri hakim olur.



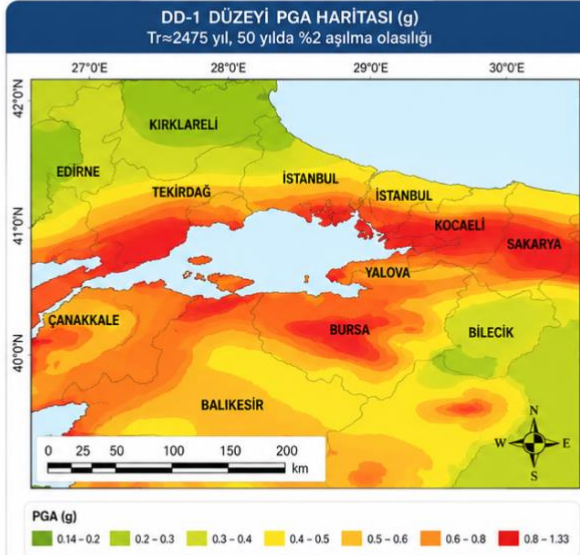
3) Öne Çıkan Çok Yüksek Tehlike Alanları
Gelibolu–Güney Tekirdağ hattı, Güney İstanbul–Yalova–Kocaeli hattı ve Sakarya hattı çok yüksek tehlike düzeyindedir. Bursa çevresinde de belirgin bir artış görülmektedir.



4) Görece Daha Düşük Alanlar
Edirne ve Kırklareli'nin büyük kısmı ile Bilecik'in bazı kesimleri görece daha düşük pga düzeyindedir. Ancak bu alanlarda bile DD-2'ye kıyasla belirgin bir artış söz konusudur.



5) Temel Somut Çıkarımlar
• DD-1 düzeyinde yüksek tehlike alanları genişler ve sürekli bir doğu-batı kuşağı oluşturur.
• Mutlak yer hareketi talebi DD-2'ye kıyasla yaklaşık iki kat düzeyine çıkar.
• Kritik yapılar ve önemli yapılar için tasarımda belirleyici düzeydir.
• Bursa ve çevresi, yüksek tehlike kuşağı içinde durmaktadır.
• İl sınırlarından çok, tehlike koridorları ve fay hatları tasarımda esas alınmalıdır.



Sıra	İl	PGA (g)
1	Kocaeli	0.964
2	Sakarya	0.834
3	Yalova	0.803
4	Bursa	0.759
5	İstanbul	0.696
6	Balıkesir	0.458
7	Çanakkale	0.430
8	Tekirdağ	0.409
9	Bilecik	0.332
10	Edirne	0.280
11	Kırklareli	0.187

Not: Değerler il bazında temsili ortalama PGA (g) düzeyleridir.

Not: Değerler kaya (referans zemin) koşulları için hesaplanmıştır.



7) Planlama Mesajı
Kritik yapılar için belirleyici düzeydir.



Hizmet sürekliliği ve iş sürekliliği planlaması için esastır.



Afet senaryoları ve acil durum planları için referans düzeydir.



İleri düzey performans analizleri ve risk değerlendirmelerinde kullanılır.



ÖNEMLİ NOT
Bu harita sonuçları bölgesel ölçekli bir değerlendirilme ve kaya (referans zemin) koşullarına göre üretilmiştir. Yerel zemin etkileri dikkate alınmalıdır.

1.4 İl Bazında Deprem Tehlike Harita Analizleri

• İstanbul

İstanbul'da belirgin bir kuzey-güney tehlike farklılığı bulunmaktadır. Karadeniz kıyıları ve kuzey iç kesimlerde PGA seviyesi DD-2 haritasında ağırlıklı olarak 0,20–0,30 g; merkezi geçiş alanları 0,30–0,40 g; Marmara kıyıları ise 0,40–0,50 g sınıfında görünmektedir.

DD-1 düzeyinde PGA seviyesi İstanbul'un güney kesimleri ve Marmara kıyı kuşağı 0,60–0,80 g ile yer yer 0,80 g üzerindeki sınıflara yükselirken, kuzey kesimler çoğunlukla 0,30–0,50 g aralığında kalmaktadır. İl merkez noktası temsili PGA değeri DD-2 için 0,363 g, DD-1 için 0,696 g'dir.

İstanbul açısından haritanın temel mesajı, ilin tek bir PGA değeriyle temsil edilemeyeceğidir. Güney kıyı ilçeleri ile kuzeydeki orman ve havza alanları arasında belirgin bir tehlike farkı bulunmaktadır. Söz konusu fark referans kaya düzeyine ait olup, alüvyon üzerinde yer alan güney kesimlerde zemin büyütmesi etkisiyle yüzeydeki fark daha da artabilir. Bununla birlikte İstanbul'un toplam deprem riski, yalnızca PGA yüksekliğinden değil, olağanüstü yüksek nüfus, bina stoku, ekonomik değer ve altyapı yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle İstanbul'da tehlike haritası mutlaka yapı stoku, zemin, sıvılaşma, nüfus ve kritik altyapı katmanlarıyla birlikte kullanılmalıdır.

• Kocaeli

Kocaeli, her iki tehlike düzeyinde de en yüksek temsilî PGA değerine sahip ildir. DD-2 il merkezi değeri 0,488 g, DD-1 değeri 0,964 g'dir. DD-1 değeri doğrudan haritanın en yüksek 0,80–1,33 g sınıfına girmektedir.

İzmit Körfezi boyunca uzanan tehlike bandı, Kocaeli'nin yalnızca tek bir noktasında değil, geniş bir kıyı ve sanayi koridorunda yüksek yer hareketi talebiyle karşı karşıya olduğunu göstermektedir. İlin kuzey kesimlerinde değerler görece azalmakla birlikte, sanayi, liman, enerji ve ulaşım altyapılarının yoğunlaştığı körfez kuşağı en yüksek tehlike sınıfındadır.

Kocaeli'nde tehlikenin yüksekliği, yerel zemin ve sanayi maruziyetiyle birleştiğinde yalnızca yapısal hasar değil, yangın, kimyasal sızıntı, liman kesintisi ve diğer NaTech senaryoları bakımından da kritik sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir.

• Sakarya

Sakarya için hesaplanan temsilî PGA değeri DD-2'de 0,422 g, DD-1'de 0,834 g'dir. DD-1 düzeyinde il merkezi en yüksek harita sınıfına girmektedir.

Haritada yüksek tehlike bandı Kocaeli'nden doğuya doğru Sakarya'ya devam etmektedir. Sakarya ilinin kuzey kesimleri görece daha düşük sınıflarda kalırken merkezi, batı ve güney geçiş alanlarında tehlike belirgin şekilde artmaktadır.

Sakarya'da tehlike değerlendirmesinde yalnızca PGA değil, ova zeminleri, yeraltı suyu, sıvılaşma potansiyeli ve kalın alüvyon tabakalarının dinamik davranışı da dikkate alınmalıdır. Referans kaya düzeyindeki 0,834 g değeri, saha koşullarının ayrıca hesaba katılması gerektiğini gösteren yüksek bir temel tehlike girdisidir.

- **Yalova**

Yalova küçük yüzölçümüne rağmen yüksek tehlike bandının büyük bölümünü kapladığı bir ildir. İl merkezi PGA değeri DD-2'de 0,436 g, DD-1'de 0,803 g'dir. Yalova'nın küçük mekânsal boyutu nedeniyle yüksek tehlike alanları ile yerleşim, kıyı, ulaşım ve altyapı unsurları arasındaki mesafe sınırlıdır. DD-1 düzeyinde ilin önemli bir bölümü 0,60–0,80 g ve üzerindeki sınıflarda yer almaktadır.

Yalova açısından deprem sonrası ulaşım bağlantılarının, sağlık hizmetlerinin, geçici barınma alanlarının ve deniz ulaşımı alternatiflerinin önceden planlanması önem taşımaktadır.

- **Bursa**

Bursa'nın temsilî PGA değeri DD-2'de 0,356 g, DD-1'de 0,759 g'dir. DD-1/DD-2 oranının yaklaşık 2,13 olması, ilin düşük olasılıklı şiddetli deprem düzeyine karşı belirgin duyarlılığını göstermektedir.

DD-2 haritasında Bursa'nın büyük bölümü 0,30–0,40 g sınıfındayken, kuzey ve merkezi geçişlerde 0,40–0,50 g değerleri görülmektedir. DD-1 düzeyinde ise geniş alanlar 0,60–0,80 g'ye yükselmekte ve yerel kırmızı odaklar oluşmaktadır.

Bursa'daki tehlike dağılımı, ilin yalnızca Marmara kıyılarına yakın kuzey kesimlerinin değil, iç kentsel ve sanayi alanlarının da şiddetli yer hareketlerine maruz kalabileceğini göstermektedir. Bursa Ovası ve alüvyal alanlarda yerel zemin etkileri ayrıca değerlendirilmelidir.

- **Tekirdağ**

Tekirdağ, il içi tehlike farklılığının en belirgin olduğu illerden biridir. İl merkezi temsilî değeri DD-2'de 0,212 g ve DD-1'de 0,409 g olmakla birlikte, haritada ilin güney Marmara kıyı kuşağı çok daha yüksek sınıflarda görülmektedir.

DD-2'de kuzey ve iç kesimler çoğunlukla 0,20–0,30 g sınıfındayken, güney kıyıları 0,40–0,60 g ve yerel olarak daha yüksek değerlere çıkmaktadır. DD-1 düzeyinde güney Tekirdağ kuşağında 0,80–1,33 g sınıfına giren geniş alanlar oluşmaktadır.

Dolayısıyla Tekirdağ için yalnızca il merkezi değerine dayalı bir tehlike değerlendirmesi yanıltıcı olabilir. Güney kıyı kuşağı, limanlar, sanayi alanları, enerji tesisleri ve kıyı ulaşım altyapıları ayrı bir yüksek tehlike alt bölgesi olarak ele alınmalıdır.

- **Çanakkale**

Çanakkale'nin il merkezi temsilî değeri DD-2'de 0,228 g, DD-1'de 0,430 g'dir. Ancak kuzeydoğu Çanakkale, Gelibolu ve Marmara geçiş alanları il merkezi değerinden çok daha yüksek PGA sınıflarında bulunmaktadır.

DD-2 haritasında kuzey kuşakta 0,50–0,60 g ve yerel 0,60–0,80 g alanlar görülmektedir. DD-1 düzeyinde bu kuşak 0,80–1,33 g sınıfına yükselmektedir. Buna karşılık ilin güney ve iç kesimleri genel olarak orta sınıflarda kalmaktadır.

Çanakkale açısından en önemli sonuç, il sınırları içinde güçlü bir mekânsal heterojenlik bulunmasıdır. Boğaz geçişi, Gelibolu, Marmara kıyısı ve güney iç kesimler aynı tehlike düzeyiyle temsil edilmemelidir.

- **Balıkesir**

Balıkesir için temsilî PGA değerleri DD-2'de 0,239 g, DD-1'de 0,458 g'dir. İl genelinde tehlike orta düzeyde olmakla birlikte kuzey Marmara'ya yakın kesimlerde ve bazı yerel alanlarda daha yüksek sınıflar görülmektedir.

DD-2'de 0,20–0,40 g sınıfları baskınken, DD-1'de 0,40–0,60 g sınıfları yaygınlaşmakta; kuzey ve kuzeydoğu geçişlerinde 0,60–0,80 g değerlerine ulaşılabilir.

Balıkesir'in geniş yüzölçümü nedeniyle il merkezi değeri, il genelindeki çeşitliliği sınırlı ölçüde temsil etmektedir. Bandırma–Marmara geçişi ile iç ve güney kesimler ayrı tehlike alt bölgeleri olarak ele alınmalıdır.

- **Bilecik**

Bilecik, bölgesel ölçekte görece düşük tehlike düzeyine sahiptir. Temsilî PGA değeri DD-2'de 0,166 g, DD-1'de 0,332 g'dir. DD-2 haritasında ilin büyük bölümü 0,14–0,30 g sınıflarında yer almakta, DD-1 düzeyinde ise 0,30–0,40 g sınıfı yaygınlaşmaktadır. Batı ve kuzeybatı geçişlerinde daha yüksek yerel sınıflar görülebilmektedir.

Bilecik'te tehlikenin görece düşük olması, yapı güvenliği ve kritik altyapı değerlendirmelerinin ikinci plana atılmasını gerektirmez. Özellikle eski yapı stoku veya yerel zemin sorunları bulunan alanlarda düşük-orta tehlike önemli hasar sonuçları üretebilir.

- **Edirne**

Edirne'nin temsilî PGA değeri DD-2'de 0,128 g, DD-1'de 0,280 g'dir. İl, Marmara Bölgesi içinde görece düşük sismik tehlikeye sahip olmakla birlikte güney kesimlere doğru tehlike artmaktadır. DD-2 haritasında kuzey ve merkezi kesimler düşük sınıflarda, güney Marmara ve Ege geçişine yakın alanlar ise bir üst sınıfta görülmektedir. DD-1 düzeyinde ilin geniş bölümü 0,20–0,40 g aralığına yükselmektedir.

Edirne'nin göreceli düşük tehlikesi, afet sonrası bölgesel lojistik, yedek hizmet ve destek kapasitesi bakımından stratejik avantaj oluşturabilir. Ancak ilin güney kesimleri için il merkezinden farklı değerlendirmeler yapılması gereklidir.

- **Kırklareli**

Kırklareli, temsilî il merkezi değerleri bakımından bölgenin en düşük PGA değerlerine sahip ilidir. DD-2 değeri 0,096 g, DD-1 değeri 0,187 g'dir.

Harita genelinde kuzey ve iç kesimler en düşük yeşil sınıflarda yer almakta; Tekirdağ ve İstanbul yönüne doğru değerler kademeli olarak yükselmektedir. DD-1 düzeyinde bile il merkezi en düşük sınıfta kalmaktadır.

Bununla birlikte Kırklareli için iki husus önemlidir. Birincisi, düşük tehlike ilin güneyindeki bütün alanların aynı ölçüde düşük olduğu anlamına gelmemektedir. İkincisi, düşük PGA değerleri yapı kırılganlığı veya yerel zemin etkilerini ortadan kaldırmamaktadır.

1.4.1 Haritalardan Çıkarılan Önemli Somut Sonuçlar

a) **Birinci öncelikli sismik tehlike koridoru**

Haritalara göre en yüksek öncelikli bölgesel tehlike koridoru şu iki bağlantılı alt kuşaktan oluşmaktadır:

- **Gelibolu–Güney Tekirdağ–Marmara batısı**
- **Güney İstanbul–Yalova–İzmit Körfezi–Kocaeli–Sakarya**

Bu alanlar, mikro-bölgeleme, hızlı yapı taraması, kritik altyapı performans analizi ve deprem sonrası hizmet sürekliliği çalışmalarında birinci öncelikli olmalıdır.

b) **İl merkezi değeri ile il içi maksimumların ayrılması gerekir**

Tekirdağ, Çanakkale, İstanbul, Bursa ve Balıkesir haritaları, il merkezi nokta değerinin il sınırları içindeki en yüksek tehlikeyi temsil etmeyebileceğini açık biçimde göstermektedir. Bu nedenle yatırım ve yapı güvenliği kararları il merkezine ait tek bir PGA değerine göre verilmemelidir.

c) **DD-1 düzeyi kritik altyapılar açısından belirleyicidir**

DD-1 haritasında yüksek ve çok yüksek sınıfların geniş bir bölgesel koridora dönüşmesi;

- hastaneler,
- enerji üretim ve dağıtım tesisleri,
- limanlar,
- ana ulaşım koridorları,
- haberleşme merkezleri,
- su ve atıksu sistemleri,
- afet yönetim merkezleri

için yalnızca standart DD-2 tasarım düzeyinin değil, DD-1 performansının da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

d) Güney İstanbul–Kocaeli–Yalova–Sakarya bütüncül ele alınmalıdır

Bu alanlar idari açıdan farklı illere bağlı olmakla birlikte sismik tehlike açısından aynı yüksek tehlike sisteminin parçalarıdır. Deprem sonrası ulaşım, sağlık, lojistik, enerji ve haberleşme kesintileri il sınırlarını aşacaktır. Bu nedenle planlama, il bazlı bağımsız müdahale planlarından çok bölgesel hizmet ağları üzerinden yapılmalıdır.

e) Bursa'nın DD-1 duyarlılığı ayrıca dikkate alınmalıdır

Bursa'nın DD-1/DD-2 oranı yaklaşık 2,13'tür. Haritada DD-1 düzeyinde yüksek sınıfların Bursa içinde belirgin biçimde genişlemesi, kritik yapılar ve sanayi tesisleri için daha ayrıntılı tehlike ve performans analizlerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

f) Düşük tehlikeli kuzey Trakya bölgesel destek kapasitesi sunabilir

Edirne ve Kırklareli'nin görece düşük tehlike düzeyi, bu illeri bölgesel afet sonrası lojistik destek, geçici depolama, personel ve malzeme konuşlandırma bakımından potansiyel yedek alanlar haline getirebilir. Bunun için ulaşım ağlarının sürekliliği ve bu illerin kendi yerel kırılabilirlikleri ayrıca değerlendirilmelidir.

1.4.2 Haritaların kullanımında teknik sınırlılıklar

Bu haritalar güçlü bir bölgesel karar desteği sunmakla birlikte aşağıdaki sınırlılıklar dikkate alınmalıdır:

Referans kaya koşulu: Hesaplar $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya koşulunda yürütülmüştür. Dolayısıyla İstanbul havzaları, Bursa Ovası, Sakarya Ovası, İzmit Körfezi kıyıları ve diğer alüvyal alanlardaki yerel zemin büyütmesi, sıvılaşma ve havza etkileri doğrudan bu PGA haritalarında temsil edilmemektedir.

Bölgesel çözünürlük: Yaklaşık 10–11 kilometrelik grid, il ve bölge ölçeğinde uygundur; ancak mahalle, parsel veya tekil yapı ölçeğinde karar vermek için yetersizdir. Mikro-bölgeleme çalışmalarında daha sık grid, sondaj, jeofizik ölçüm ve yerel zemin tepki analizleri gereklidir.

Enterpolasyon etkisi: Sürekli yüzey üretimi, bazı keskin mekânsal geçişleri yumuşatabilir. Özellikle aktif fay segmentlerine yakın alanlarda gerçek tehlike gradyanı haritada görünenden daha keskin olabilir.

Ortalama tehlike değeri: Haritalar mantık ağacından elde edilen ortalama tehlike değerlerini temsil etmektedir. Uzun dönüş periyotlarında epistemik belirsizlik artmakta ve ortalama değer medyanın üzerinde oluşabilmektedir.

PGA'nın tek başına yeterli olmaması: PGA özellikle rijit, az katlı yapılar ve kısa süreli yüksek frekanslı yer hareketleri için önemli bir göstergedir. Orta ve yüksek katlı yapılar için $S_a(0.2s)$, $S_a(1.0s)$, eşdeğer tehlike spektrumları ve mümkünse koşullu ortalama spektrumlar ayrıca değerlendirilmelidir.

Tehlike–risk ayrımı: Haritalar doğrudan risk haritası değildir. Gerçek riskin hesaplanması için PGA yüzeyinin bina stoku, nüfus, ekonomik varlıklar, kritik altyapı, yerel zemin ve kırılabilirlik fonksiyonlarıyla bütünleştirilmesi gerekir. Rapor da tehlike çıktılarının risk analizine dönüştürülmesi için maruziyet ve kırılabilirlik verileriyle birleştirilmesi gerektiğini belirtmektedir.

1.4.3 Genel değerlendirme

DD-2 ve DD-1 PGA haritaları birlikte değerlendirildiğinde Marmara Bölgesi'nin sismik tehlike profilinin üç temel özelliği ortaya çıkmaktadır.

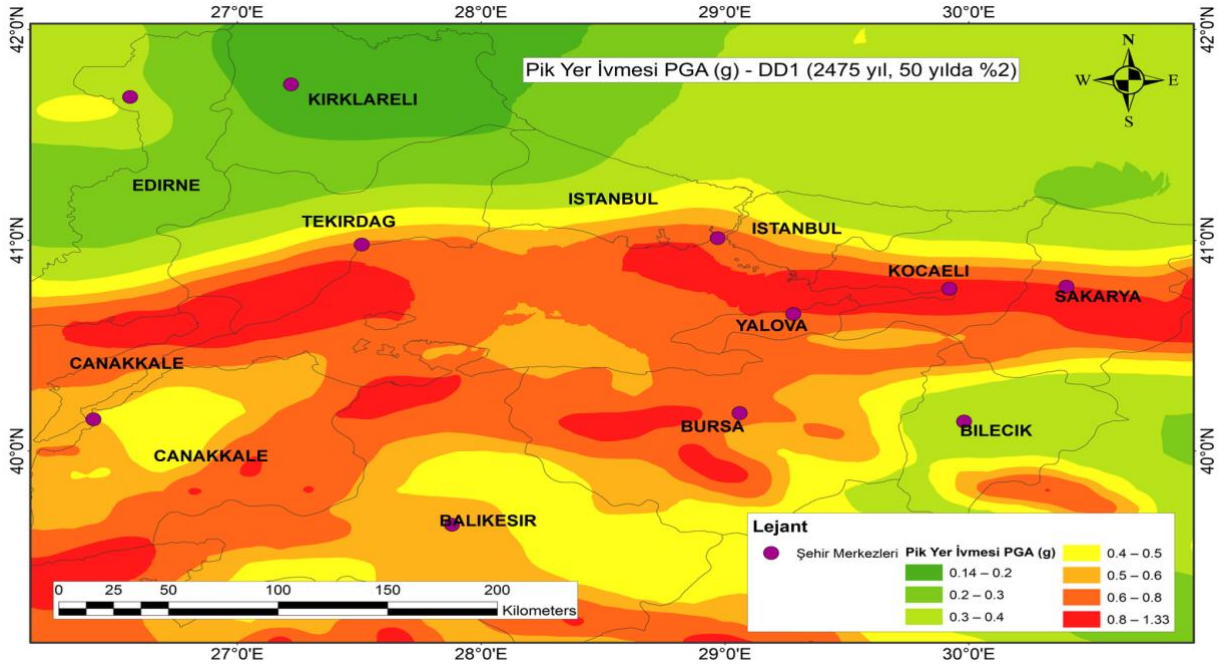
- Birincisi**, tehlike **doğu-batı doğrultusunda uzanan, aktif fay segmentleriyle ilişkili bölgesel bir koridor** oluşturmaktadır. Bu koridorun en kritik bölümleri Batı Marmara–Gelibolu–Güney Tekirdağ ile Güney İstanbul–Yalova–Kocaeli–Sakarya hatlarıdır.
- İkincisi**, DD-1 düzeyinde yalnızca yer ivmesi değerleri artmamakta; yüksek tehlike sınıfları mekânsal olarak genişleyerek birbirine bağlanmaktadır. İl merkezi değerlerinde DD-1 yer hareketi talebi DD-2'ye göre yaklaşık iki kat artmaktadır.
- Üçüncüsü**, tehlike dağılımı idari sınırlarla uyumlu değildir. Aynı il içinde kuzey-güney veya kıyı-iç kesim farklılıkları son derece belirgindir. Bu nedenle deprem tehlike ve risk azaltma kararları il ortalamaları üzerinden değil, tehlike koridorları, alt bölgeler, yerel zemin birimleri ve kritik altyapı ağları üzerinden geliştirilmelidir.

Sonuç olarak DD-2 ve DD-1 haritaları, Marmara Bölgesi için yalnızca sismik tehlikenin nerede yüksek olduğunu gösteren kartografik ürünler değildir. Doğru maruziyet ve kırılabilirlik katmanlarıyla bütünleştirildiklerinde; yapı güçlendirme ve dönüşüm önceliklerinin belirlenmesi, kritik altyapı yatırımlarının yönlendirilmesi, mikro-bölgeleme alanlarının seçilmesi, acil müdahale kapasitesinin dağıtılması ve bölgesel hizmet sürekliliği planlarının hazırlanması için temel karar destek girdileri niteliğindedir.



1.5 Tehlike Dağılımı ve Hesap Noktaları

Şekil 1-12'de PGA DD-1 tehlike dağılımı üzerinde 11 il hesap noktasının konumsal dağılımı sunulmaktadır. Haritalar bölgesel ölçekteki mekânsal dağılımı; Tablo 1-2 ise il bazında nokta tasarım değerlerini vermektedir. En yüksek tehlike değerlerinin Kuzey Anadolu Fay koridoru ile kısmen açık-deniz fay segmentleri boyunca yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 1-12 PGA — DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) dağılımı ve 11 il hesap noktası (şehir merkezleri). İl tasarım değerleri için Tablo 1-2.

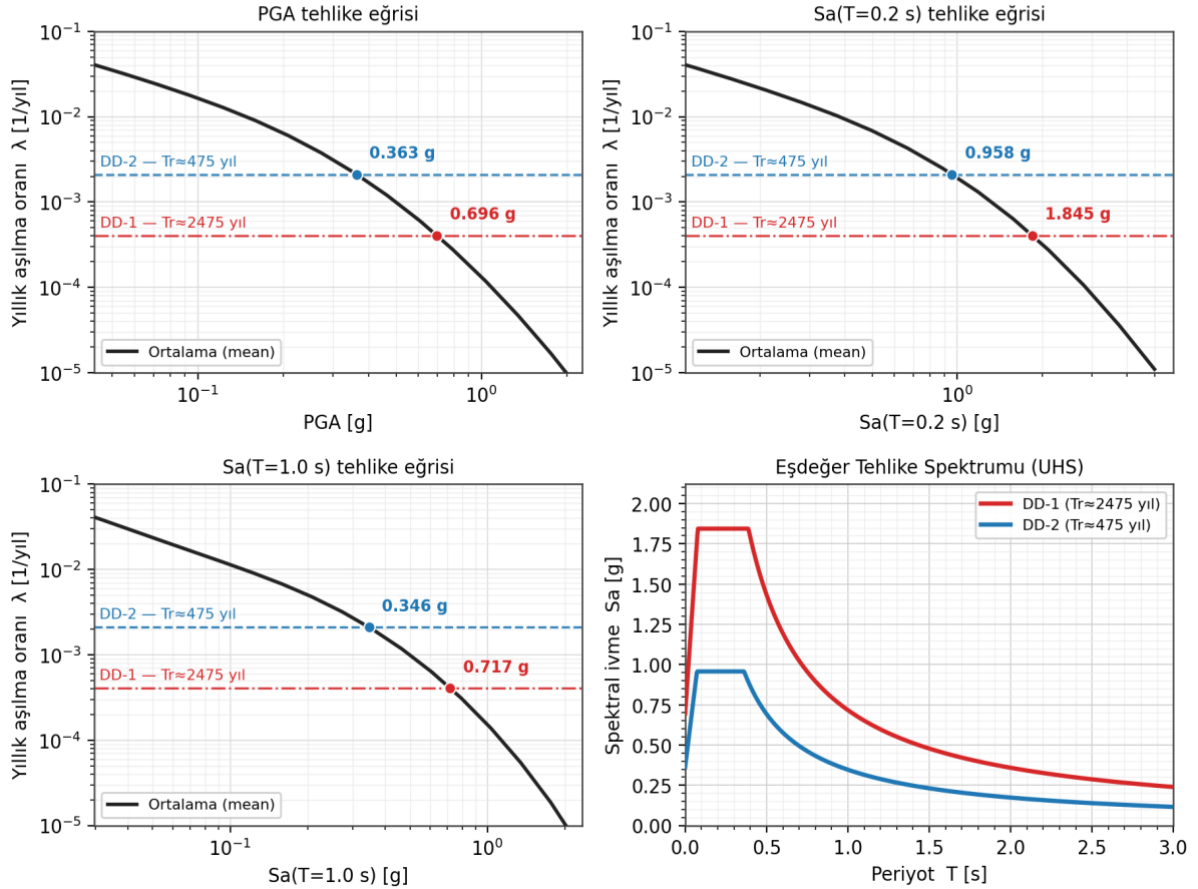
1.6 Tehlike Eğrileri ve Eşdeğer Tehlike Spektrumu

Bu bölümde her hesap noktası için belirlenen deprem tehlike eğrileri (PGA, $S_a(0.2s)$, $S_a(1.0s)$) ve Eşdeğer Tehlike Spektrumları (UHS) ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Spektrumlar, PSHA ile doğrudan hesaplanan üç ordinat (PGA , $S_a(0.2s)$, $S_a(1.0s)$) esas alınarak oluşturulmuştur; 1 s'nin ötesindeki değerler TBDY 2018 spektral formuna dayalı bir uzantı ile elde edilmiş olup bağımsız bir PSHA sonucu olarak yorumlanmamalıdır. Her il tek bir hesap noktasıyla temsil edildiğinden, görsel sunum önceki sürümdeki merkez/pik ikili düzeninden tek-nokta gösterimine dönüştürülmüştür. Tehlike eğrileri logaritmik-logaritmik (log-log) ölçekte çizilmiş; DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) ve DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) referans aşılma düzeyleri yatay kesik çizgilerle, söz konusu seviyelere karşılık gelen tasarım değerleri ise grafik üzerinde ilgili noktaya işaretlenmiştir. Lokasyon bazlı sonuçlar sırasıyla İstanbul için Şekil 1-13, Kocaeli için Şekil 1-14, Sakarya için Şekil 1-15, Yalova için Şekil 1-16, Bursa için Şekil 1-17, Tekirdağ için Şekil 1-18, Çanakkale için Şekil 1-19, Balıkesir için Şekil 1-20, Bilecik için Şekil 1-21, Edirne için Şekil 1-22 ve Kırklareli için Şekil 1-23 numaralı şekillerde verilmektedir.

1.6.1 Lokasyon Bazlı Sonuçlar

- İstanbul

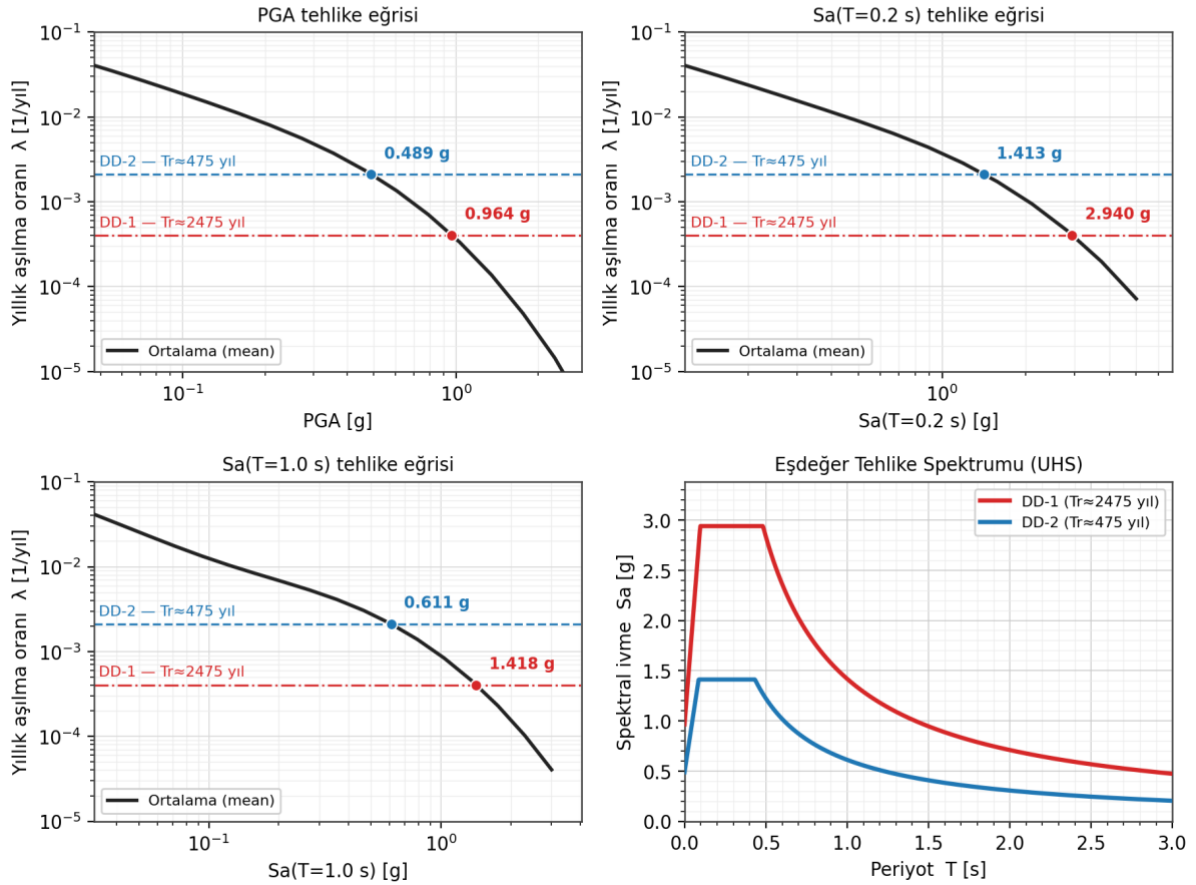
İstanbul — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-13 İstanbul — Tehlike eğrileri (PGA, $S_a(0.2s)$, $S_a(1.0s)$; log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- **Kocaeli**

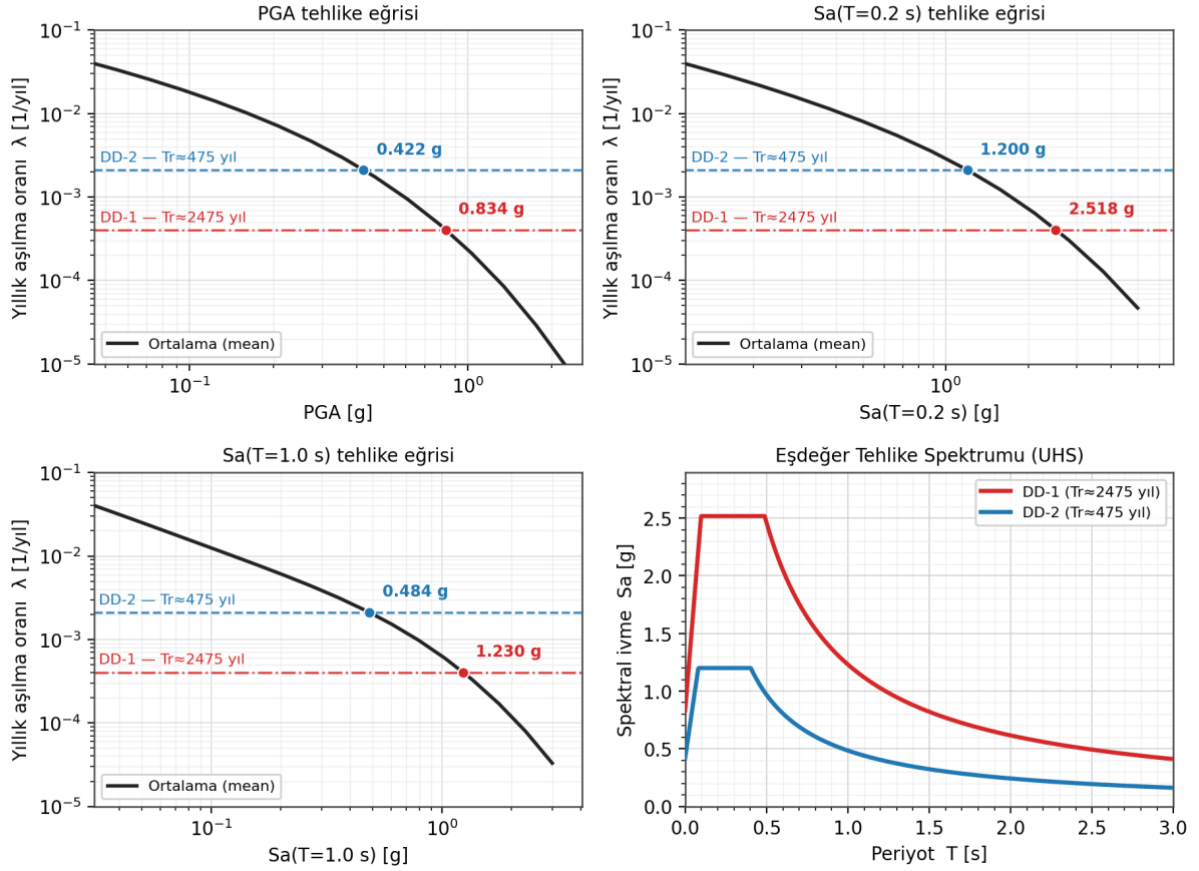
Kocaeli — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS (Vs30 = 760 m/s, referans kaya)



Şekil 1-14 Kocaeli — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Sakarya**

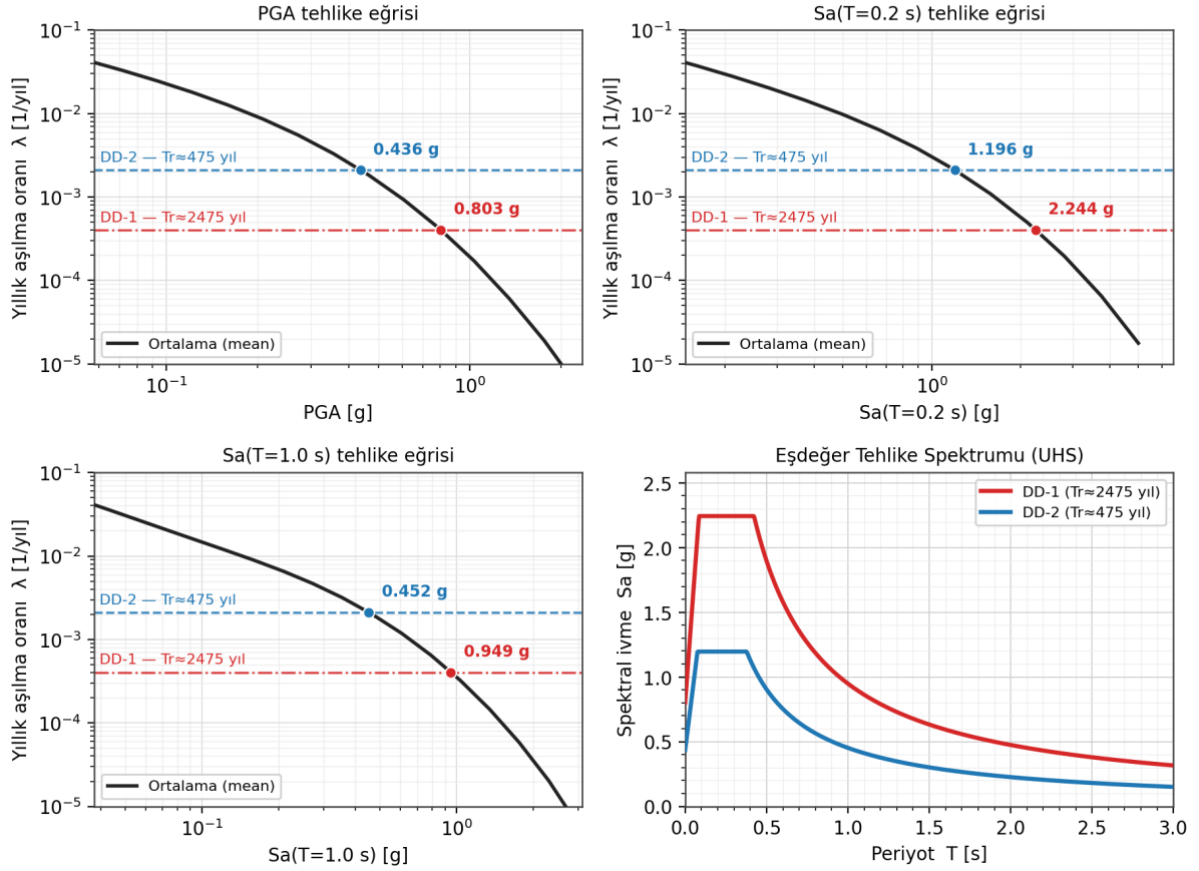
Sakarya — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-15 Sakarya — Tehlike eğrileri (PGA, $S_a(0.2\text{ s})$, $S_a(1.0\text{ s})$; log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Yalova

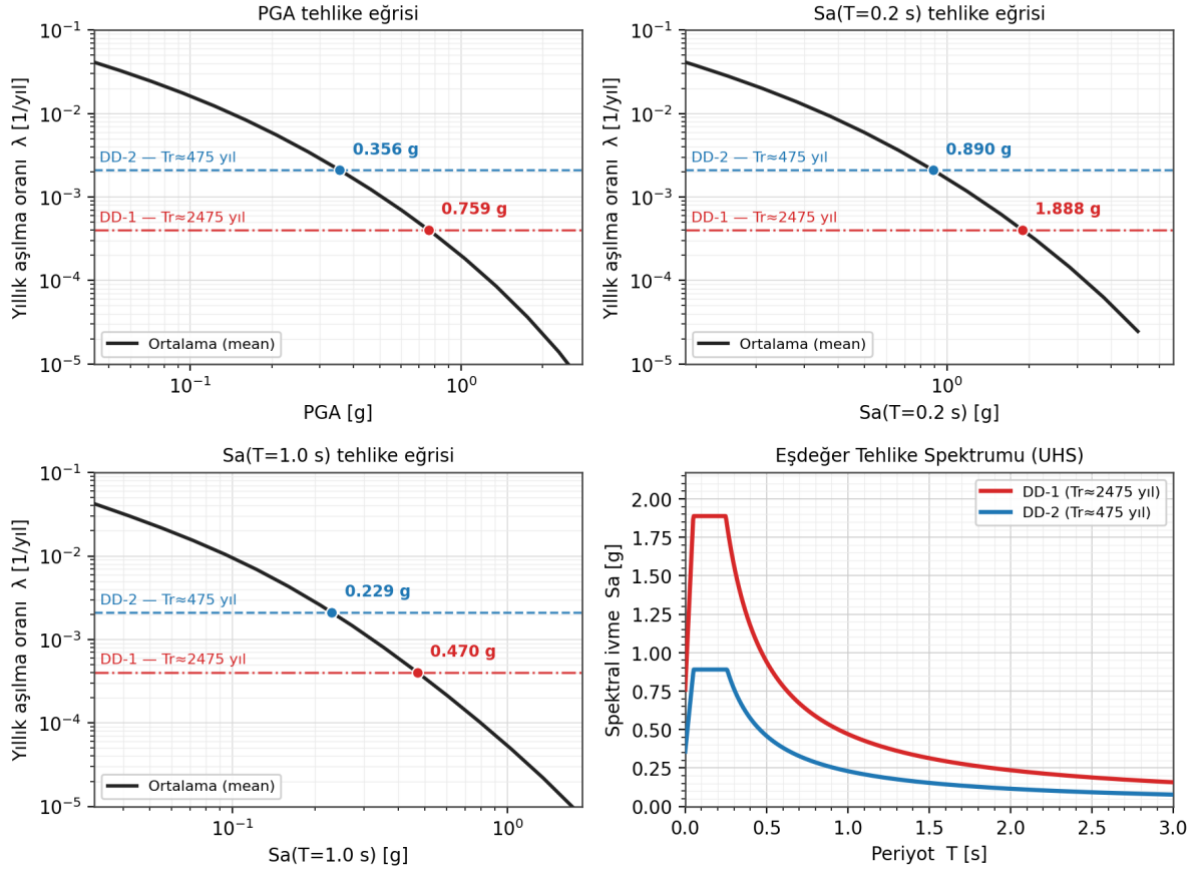
Yalova — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-16 Yalova — Tehlike eğrileri (PGA, $S_a(0.2s)$, $S_a(1.0s)$; log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Bursa**

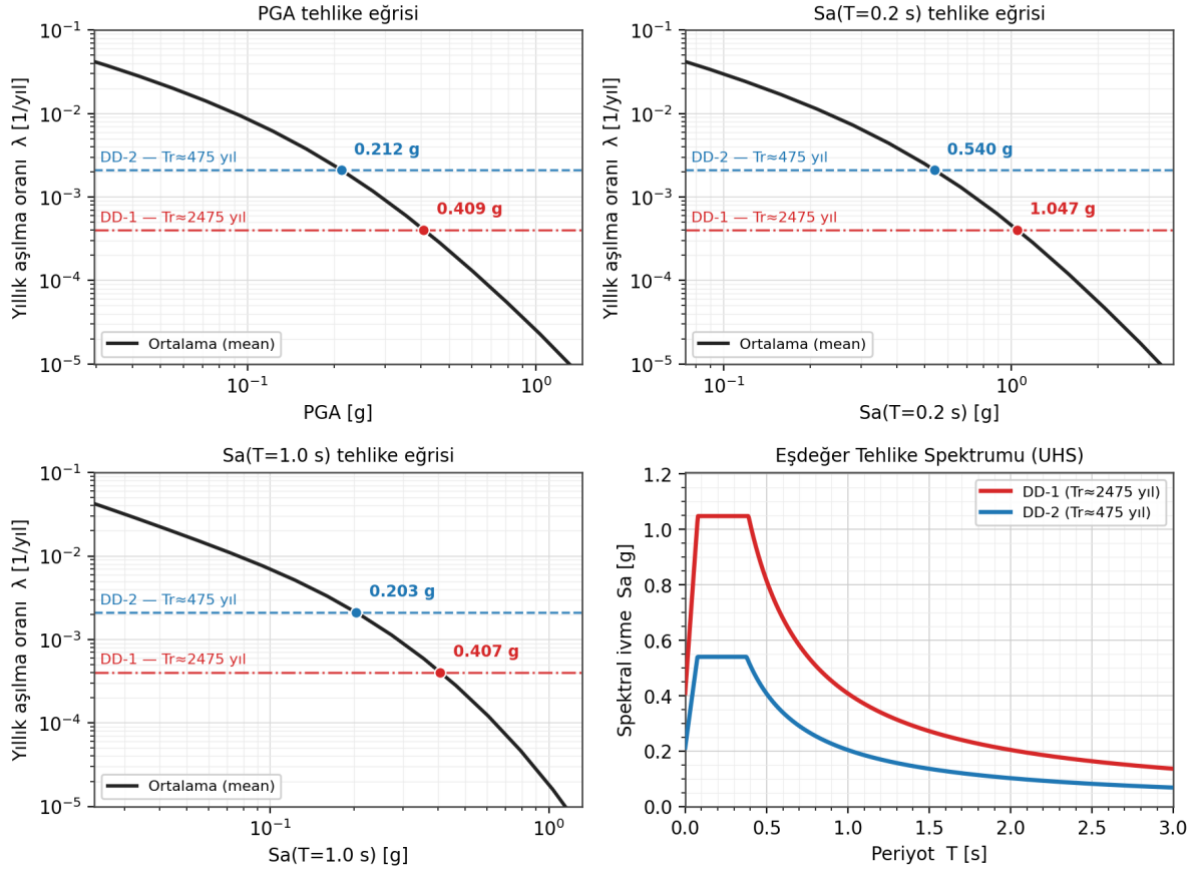
Bursa — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-17 Bursa — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Tekirdağ

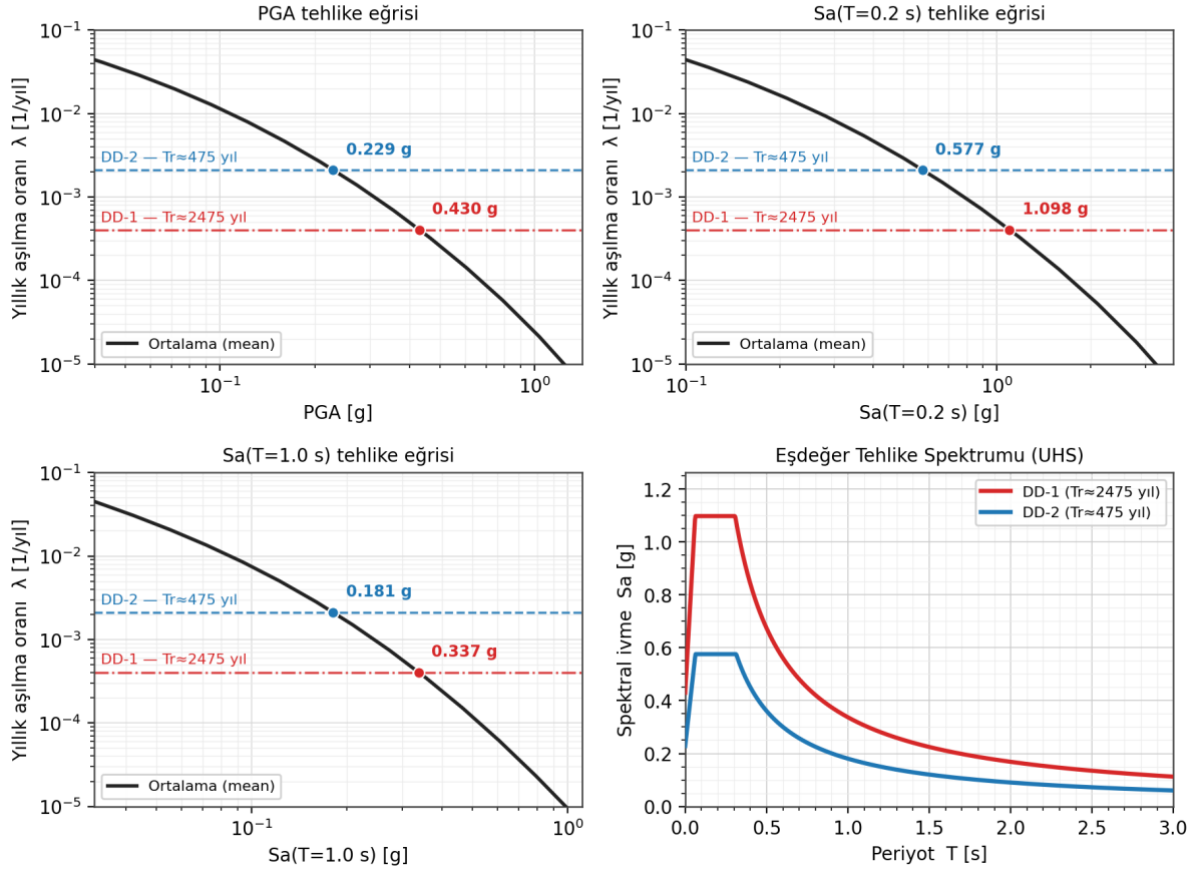
Tekirdağ — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-18 Tekirdağ — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- **Çanakkale**

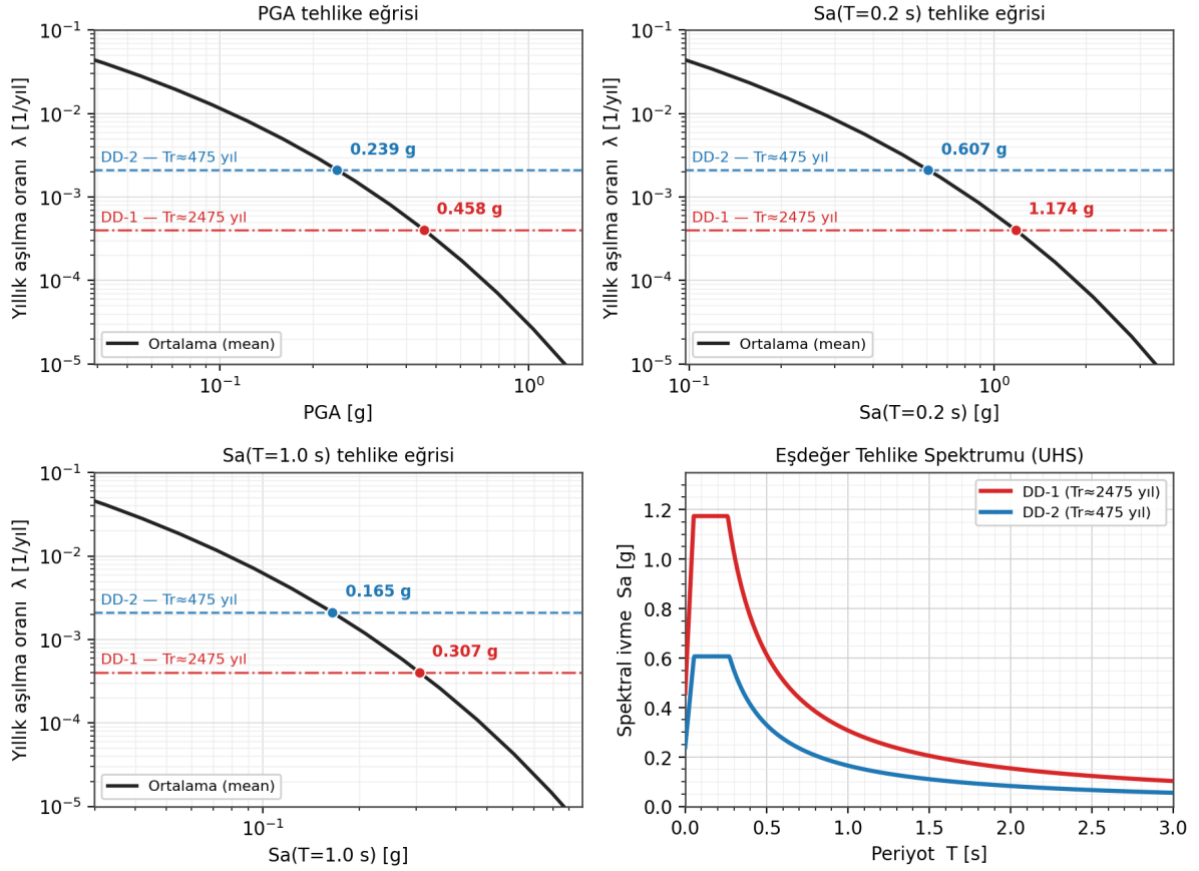
Çanakkale — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-19 Çanakkale — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($Tr \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($Tr \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Balıkesir**

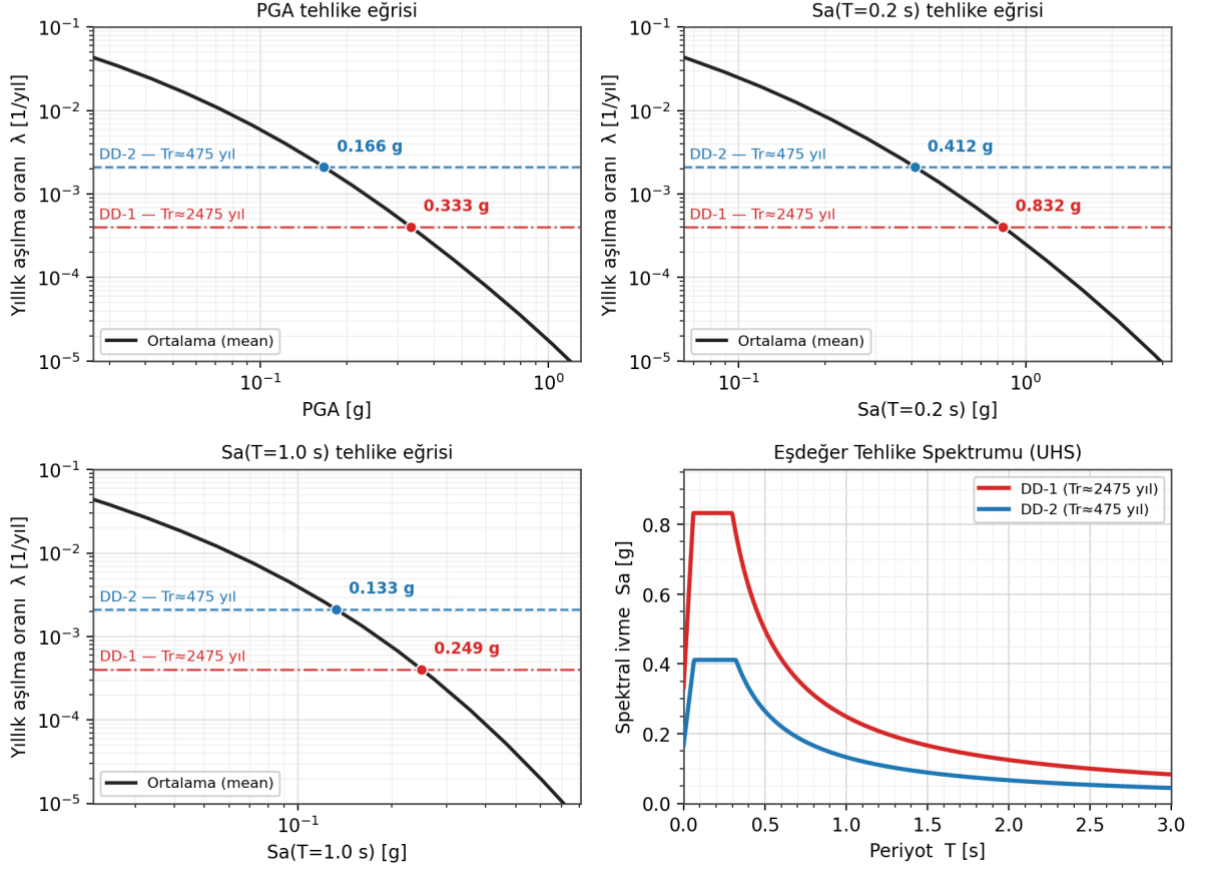
Balıkesir — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-20 Balıkesir — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- **Bilecik**

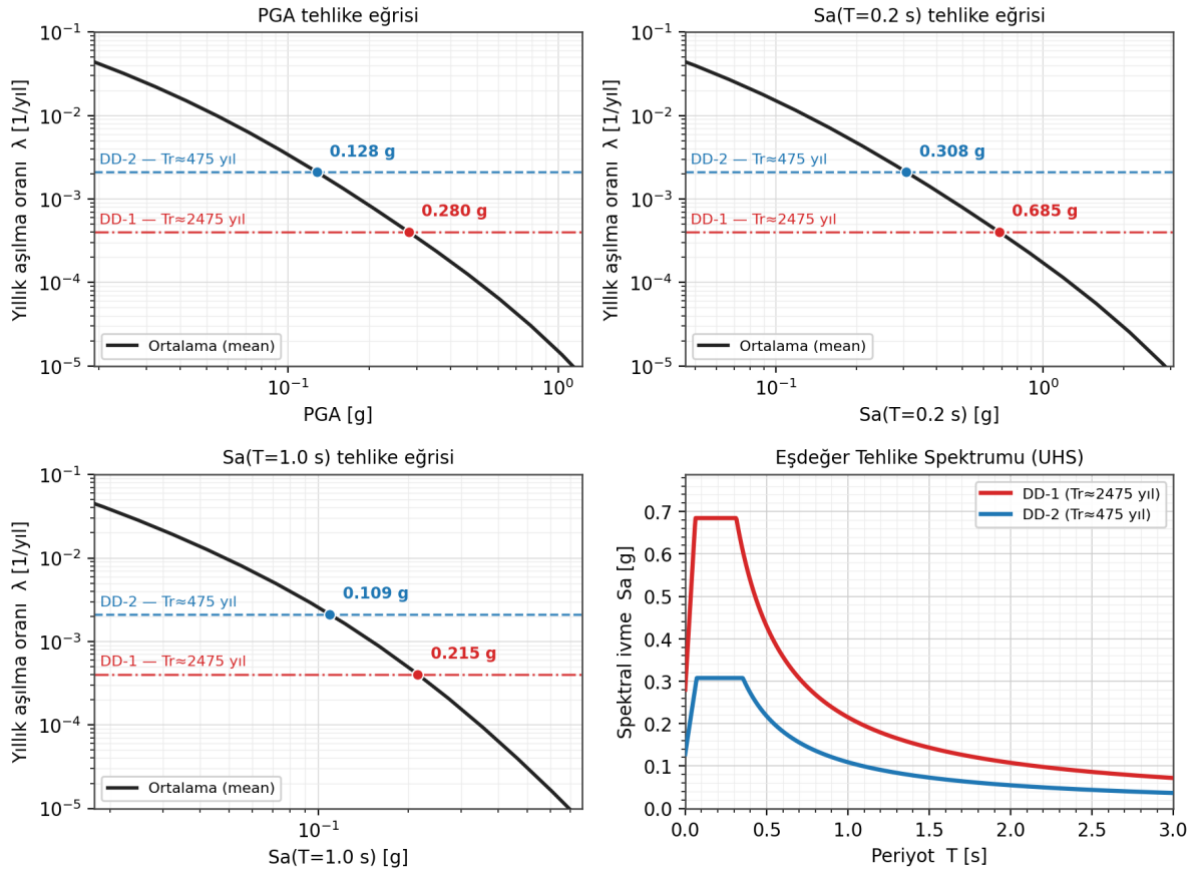
Bilecik — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS (Vs30 = 760 m/s, referans kaya)



Şekil 1-21 Bilecik — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 (Tr≈475 yıl) ve DD-1 (Tr≈2475 yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- Edirne

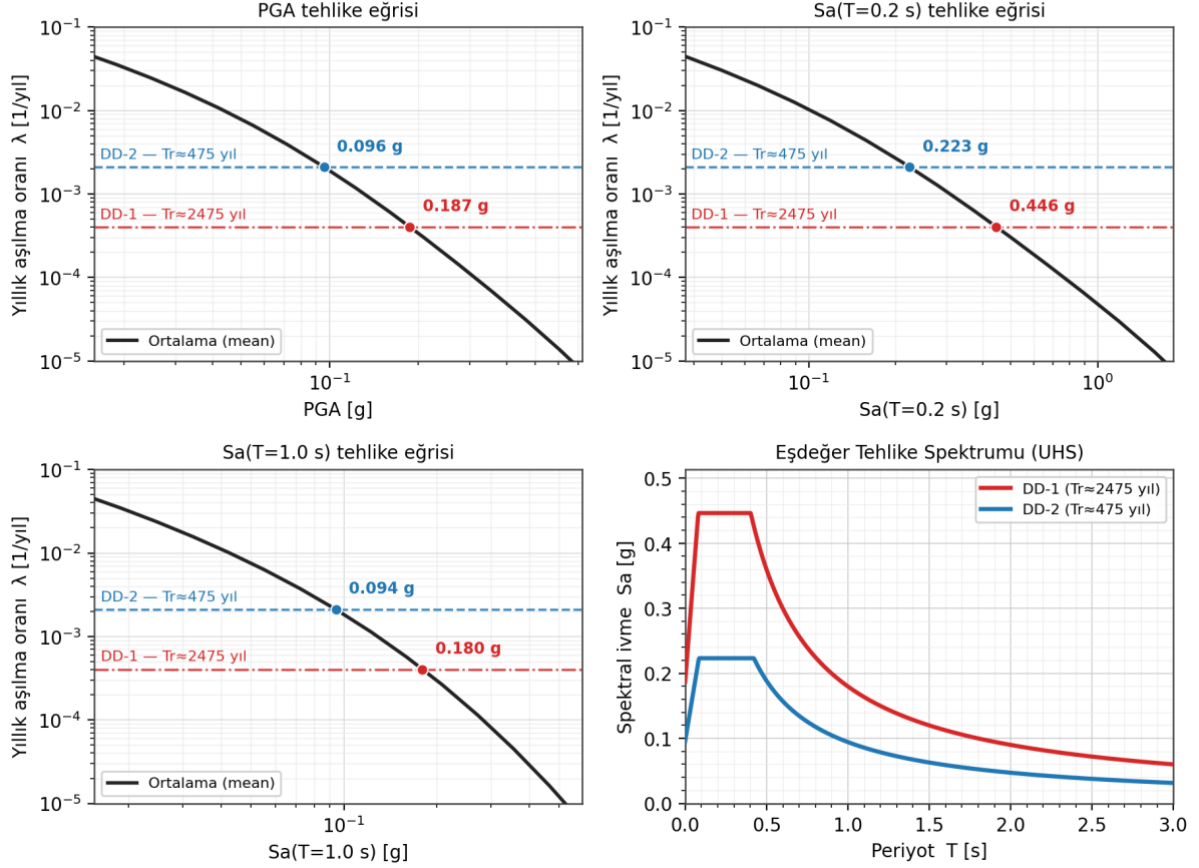
Edirne — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



Şekil 1-22 Edirne — Tehlike eğrileri (PGA, $S_a(0.2\text{ s})$, $S_a(1.0\text{ s})$; log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

- **Kırklareli**

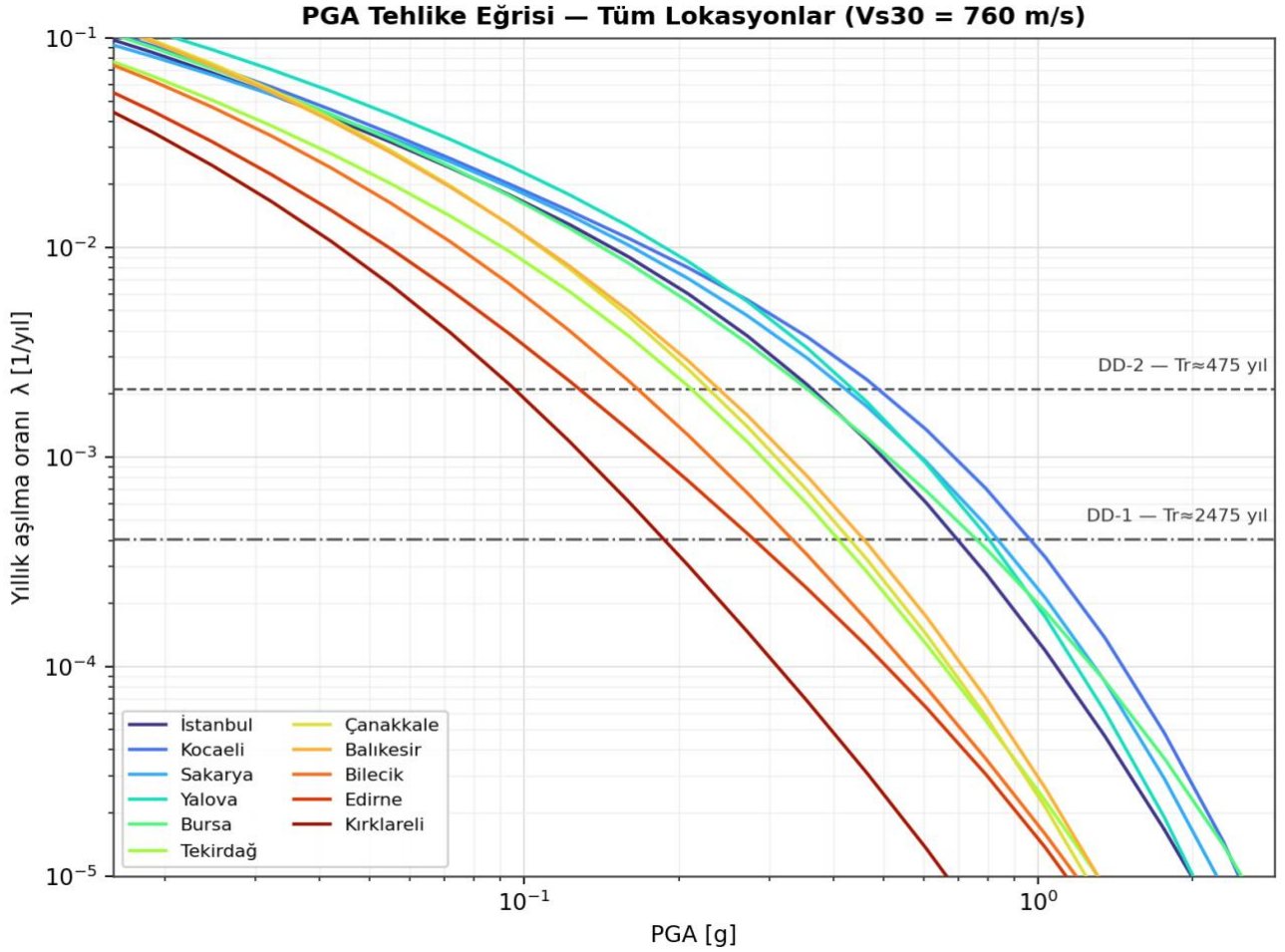
Kırklareli — Deprem Tehlike Eğrileri ve UHS ($V_{s30} = 760$ m/s, referans kaya)



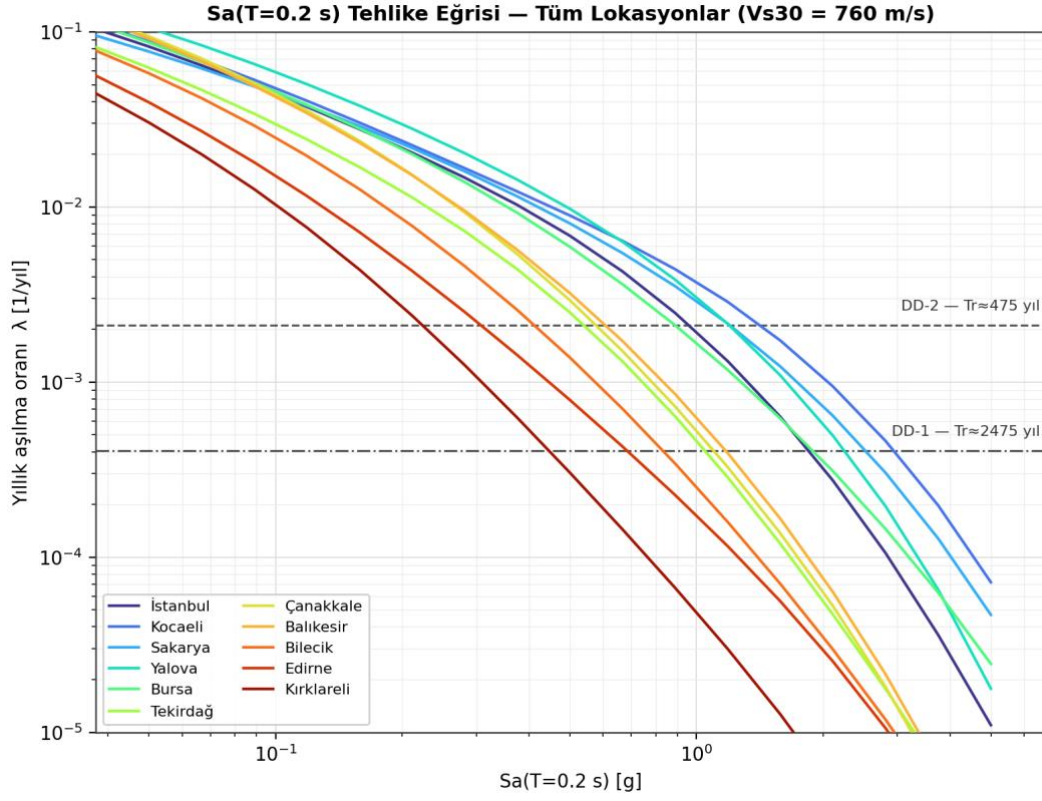
Şekil 1-23 Kırklareli — Tehlike eğrileri (PGA, Sa(0.2s), Sa(1.0s); log-log, y-ekseni yıllık aşılma oranı) ve UHS (0–3 s, sürekli çizgi). Tehlike eğrilerinde DD-2 ($T_r \approx 475$ yıl) ve DD-1 ($T_r \approx 2475$ yıl) düzeyleri ile kesişim tasarım değerleri işaretlidir.

1.6.2 Tüm Lokasyonlar — Birleşik Grafikler

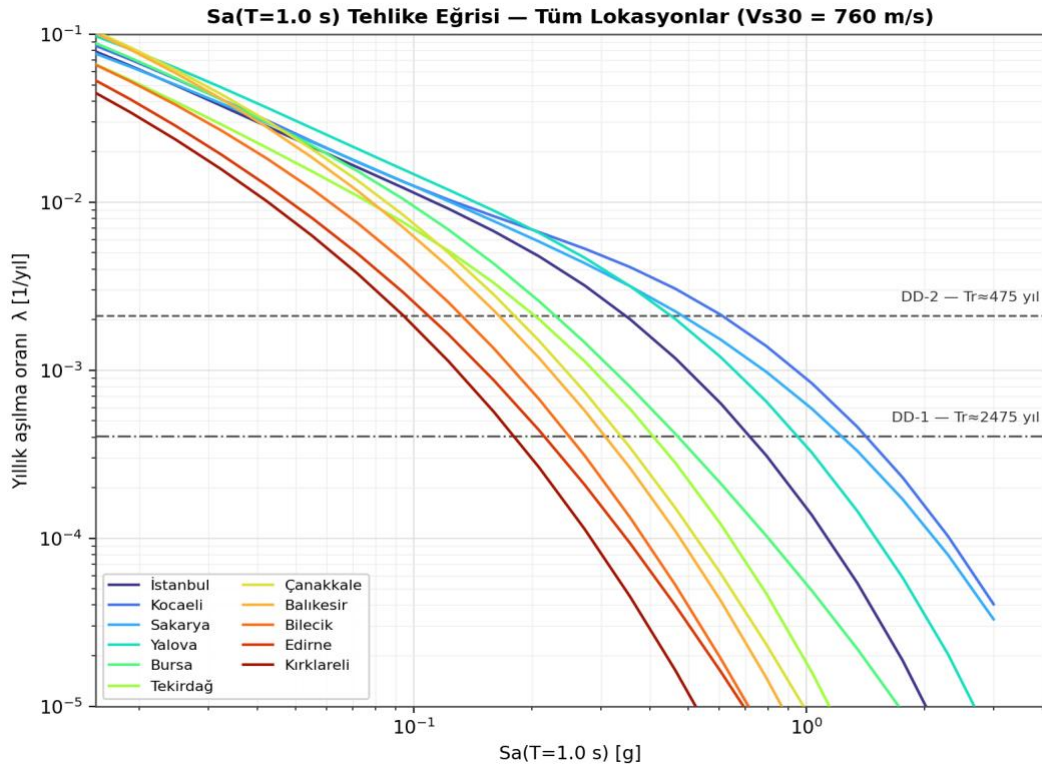
Aşağıdaki grafiklerde tüm noktaların tehlike eğrileri ve UHS sonuçları karşılaştırmalı sunulmaktadır. Her ili tek çizgi temsil etmektedir; DD-2 ve DD-1 referans düzeyleri noktalı yatay çizgilerle işaretlenmiştir. Bu grafikler sırasıyla Şekil 1-24 (PGA), Şekil 1-25 ($S_a(0.2\text{ s})$), Şekil 1-26 ($S_a(1.0\text{ s})$) ve Şekil 1-27 (UHS) olarak sunulmaktadır.



Şekil 1-24 PGA tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log). DD-2 ve DD-1 referans düzeyleri yatay kesik çizgilerle gösterilmiştir.

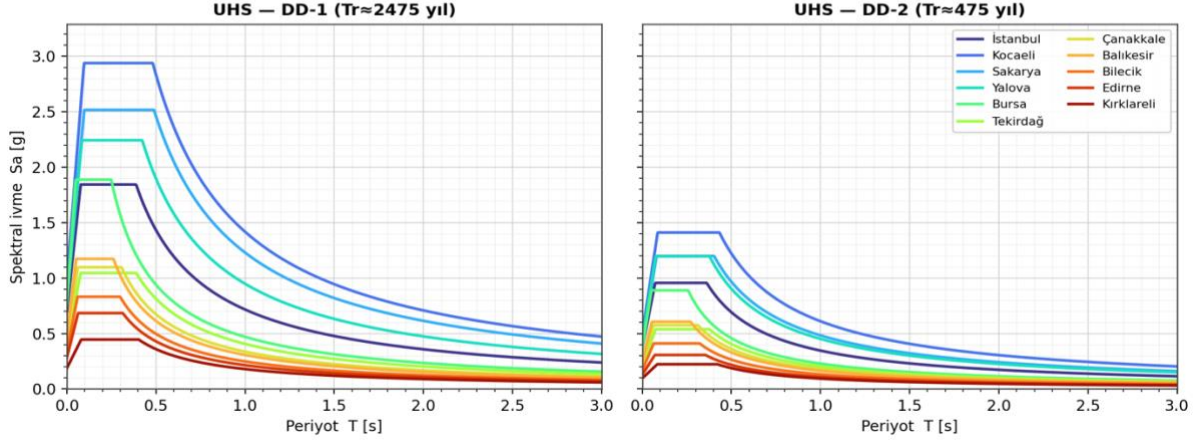


Şekil 1-25 Sa(0.2s) tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log).



Şekil 1-26 Sa(1.0s) tehlike eğrisi — tüm noktalar (log-log).

Eşdeğer Tehlike Spektrumu (UHS) — Tüm Lokasyonlar ($V_{s30} = 760$ m/s)



Şekil 1-27 Eşdeğer Tehlike Spektrumu (UHS) — tüm noktalar, 0–3 s (sürekli çizgi). Sol: DD-1 ($Tr \approx 2475$ yıl); Sağ: DD-2 ($Tr \approx 475$ yıl).

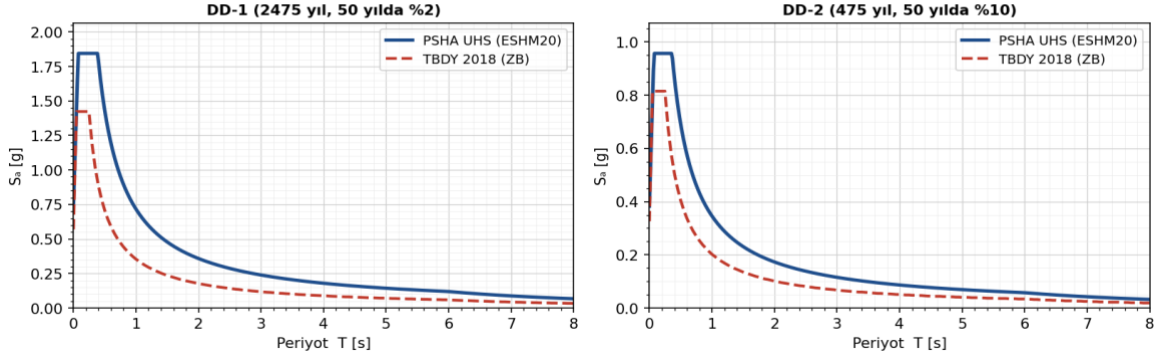
1.7 TBDY 2018 Tasarım Spektrumu ile Karşılaştırma

Bu bölümde her il için elde edilen PSHA Eşdeğer Tehlike Spektrumu (UHS; ESHM20 tabanlı, $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya, ortalama/mean) ile TBDY 2018 tasarım spektrumu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Karşılaştırma, her iki tehlike düzeyi (DD-1: $Tr = 2475$ yıl, 50 yılda %2; DD-2: $Tr = 475$ yıl, 50 yılda %10) için 0–8.0 s periyot aralığında ve referans kaya / ZB koşulunda gerçekleştirilmiştir.

1.7.1 İl Bazlı Spektrum Karşılaştırmaları

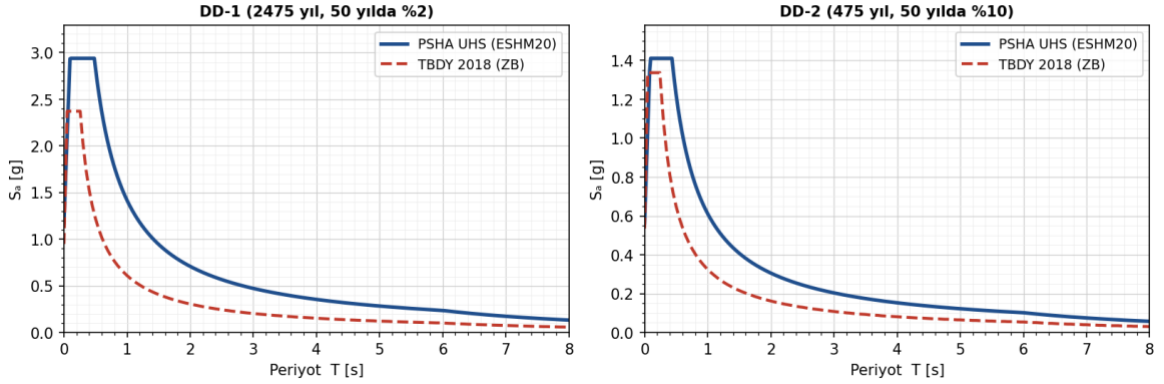
Şekil 1-28 - Şekil 1-38, her il için PSHA UHS (ESHM20, ortalama) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumunun 0–8.0 s periyot aralığındaki karşılaştırmasını sunmaktadır. Her şekil, sol panelde DD-1 ($Tr = 2475$ yıl, 50 yılda %2) ve sağ panelde DD-2 ($Tr = 475$ yıl, 50 yılda %10) tehlike düzeyini içermekte; sayısal değerler Tablo 1-2 'de verilmektedir. Grafikler bölgesel ölçekte okunmalı; il içi mekânsal değişkenlik için yukarıda belirlenen tehlike haritaları ([Link](#)) esas alınmalıdır. Şekil karşılıkları sırasıyla İstanbul için Şekil 1-28, Kocaeli için Şekil 1-29, Sakarya için Şekil 1-30, Yalova için Şekil 1-31, Bursa için Şekil 1-32, Tekirdağ için Şekil 1-33, Çanakkale için Şekil 1-34, Balıkesir için Şekil 1-35, Bilecik için Şekil 1-36, Edirne için Şekil 1-37 ve Kırklareli için Şekil 1-38 biçimindedir.

İstanbul — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



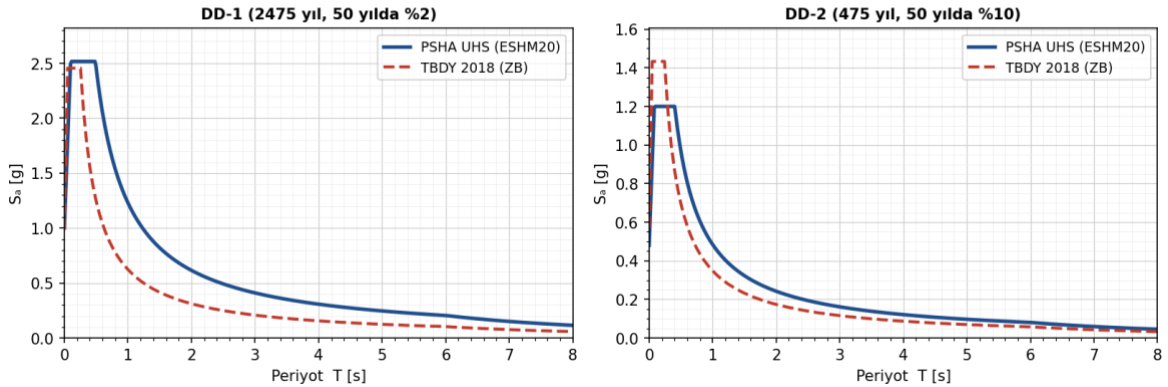
Şekil 1-28 İstanbul — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Kocaeli — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



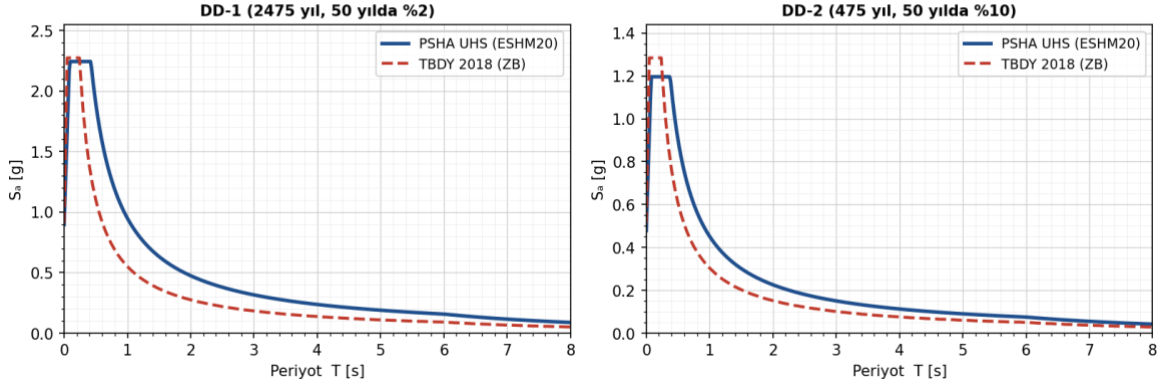
Şekil 1-29 Kocaeli — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Sakarya — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



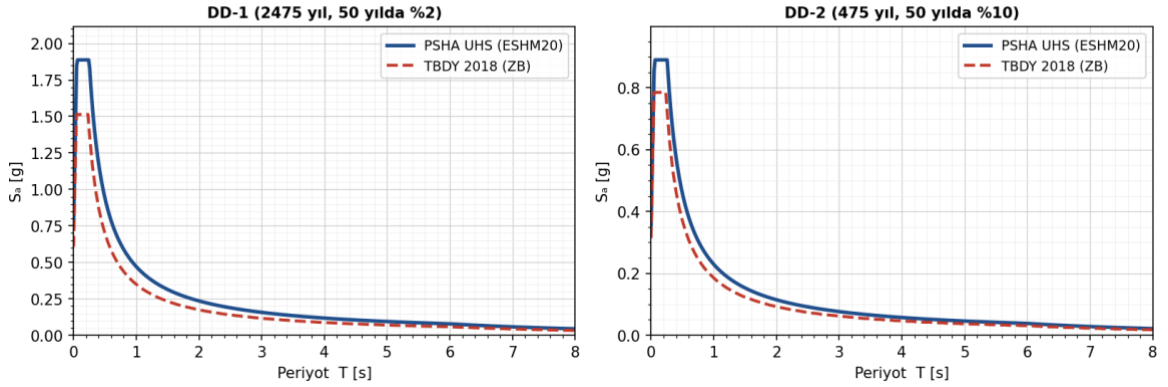
Şekil 1-30 Sakarya — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Yalova — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



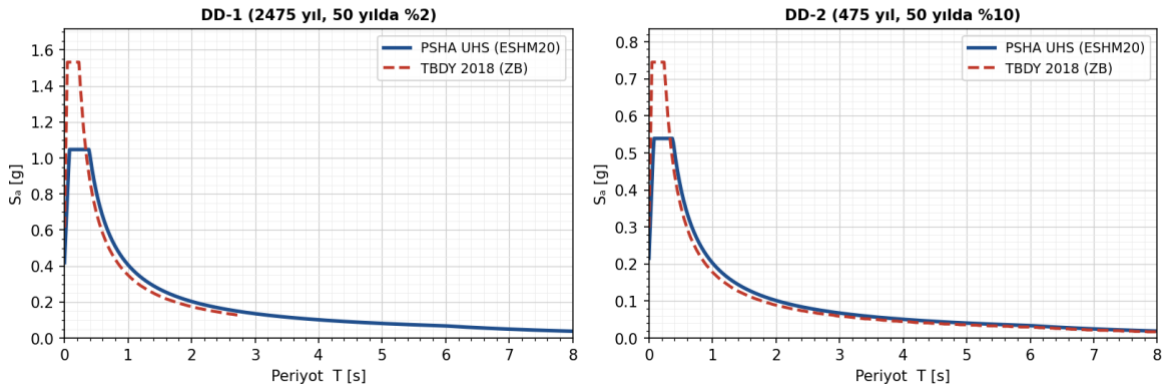
Şekil 1-31 Yalova — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Bursa — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



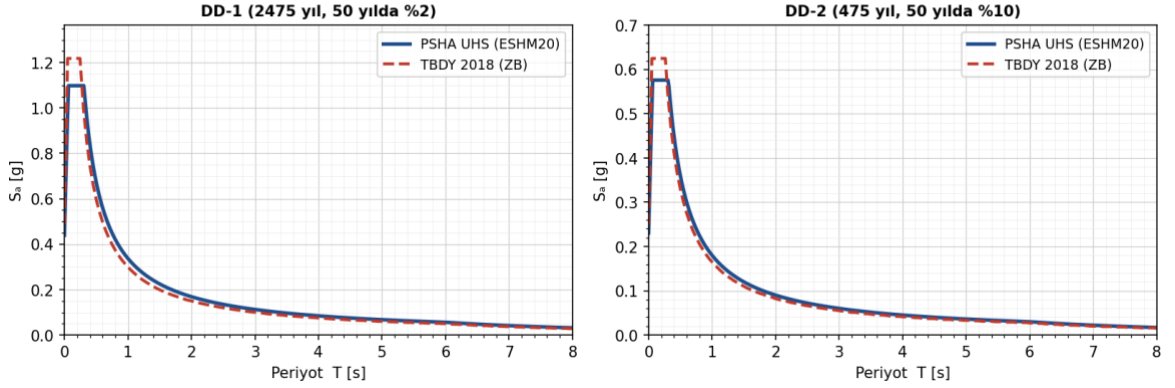
Şekil 1-32 Bursa — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Tekirdağ — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



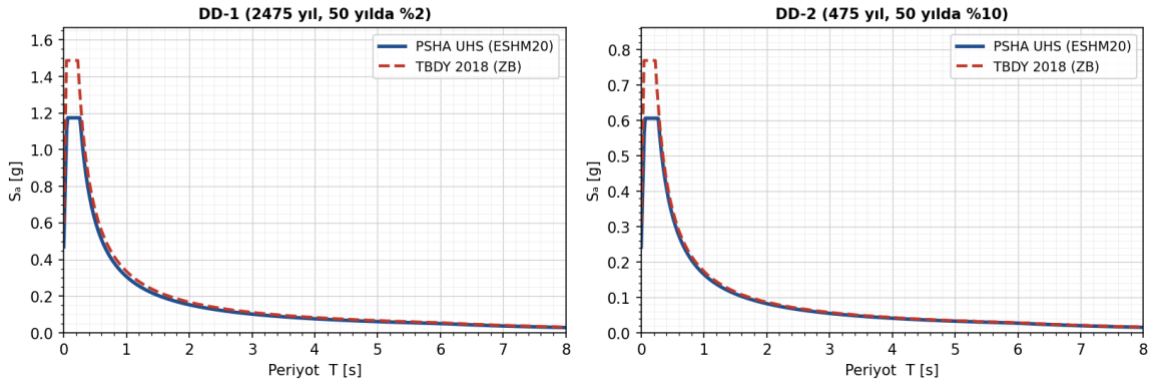
Şekil 1-33 Tekirdağ — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Çanakkale — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



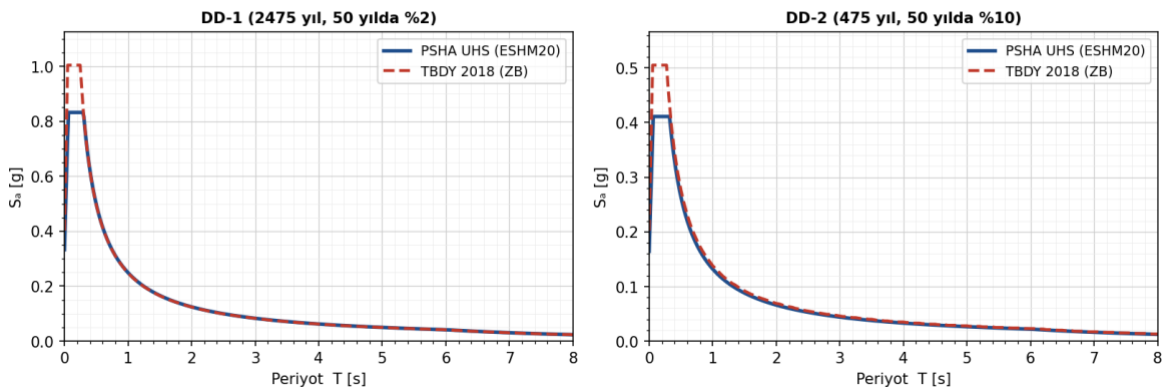
Şekil 1-34 Çanakkale — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Balıkesir — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



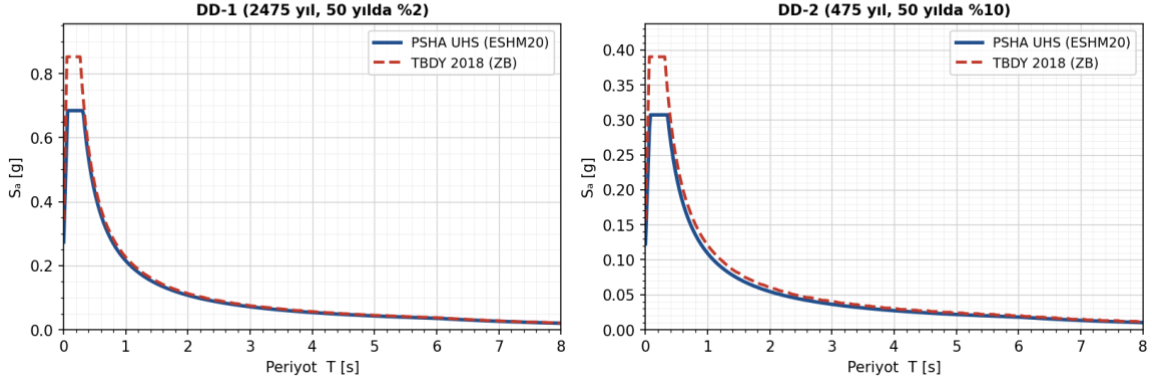
Şekil 1-35 Balıkesir — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Bilecik — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



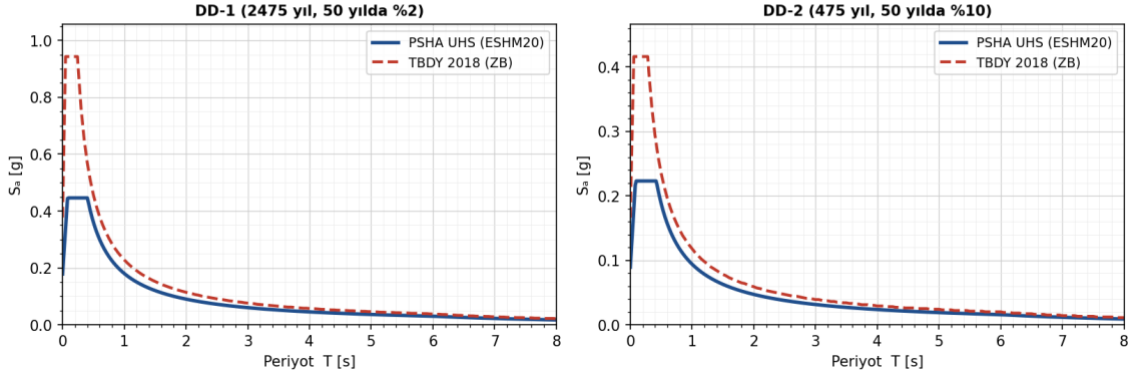
Şekil 1-36 Bilecik — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Edirne — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



Şekil 1-37 Edirne — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

Kırklareli — PSHA UHS ile TBDY 2018 Tasarım Spektrumu Karşılaştırması



Şekil 1-38 Kırklareli — PSHA UHS (ESHM20) ile TBDY 2018 (ZB) tasarım spektrumu karşılaştırması. Sol: DD-1 (2475 yıl, %2); Sağ: DD-2 (475 yıl, %10). Periyot 0–8 s.

1.8 Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Marmara Bölgesi için OpenQuake Engine yazılımı, ESHM20 v12e kaynak modeli, ESHM20 GMM mantık ağacı ve $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya koşulu esas alınarak PSHA hesapları yürütülmüştür. Elde edilen başlıca bulgular aşağıdaki alt bölümlerde sunulmaktadır.

Yüksek Sismik Tehlike Kuşağı

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun batı segmentleri boyunca uzanan Kocaeli–Sakarya–Yalova–İstanbul hattı, bölgenin en yüksek sismik tehlikesini taşıyan kuşağı oluşturmaktadır. Bu noktalarda DD-2 düzeyinde PGA 0.36–0.49 g, DD-1 düzeyinde 0.70–0.96 g aralığındadır. En yüksek tehlike Kocaeli noktasında hesaplanmış olup DD-1 düzeyinde PGA = 0.96 g, $S_a(0.2s) = 2.94$ g ve $S_a(1.0s) = 1.42$ g değerlerine ulaşmaktadır. Kocaeli'yi Sakarya (DD-1 PGA 0.83 g) ve Yalova (DD-1 PGA 0.80 g) izlemektedir.

Bölgesel Farklılıklar

Çalışma alanında belirgin mekânsal farklılıklar tespit edilmiştir. Fay zonundan uzak kuzey illerinde en düşük tehlike değerleri elde edilmiş olup Kırklareli için DD-2 PGA = 0.10 g (DD-1: 0.19 g), Edirne için ise DD-2 PGA = 0.13 g (DD-1: 0.28 g) olarak hesaplanmıştır. Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir ve Bilecik illeri orta düzey tehlike koridorunda yer almakta; bu illerin DD-2 PGA değerleri 0.17–0.24 g aralığında seyretmektedir. Bursa hesap noktası ise DD-2 PGA = 0.36 g değeriyle yüksek tehlike kuşağına yakın konumlanmaktadır.

Bu çalışmanın en genel sonucu olarak; çalışma kapsamında Marmara Bölgesi'nin referans kaya düzeyindeki sismik tehlike profili, güncel kaynak ve yer hareketi modelleri kullanılarak nicel olarak belirlenmiştir. **En yüksek tehlike değerleri Kocaeli, Sakarya ve Yalova hesap noktalarında elde edilmiş; DD-1 tehlike düzeyinde PGA 0.80–0.96 g aralığına ulaşmıştır.** Üretilen tehlike tabloları, tehlike eğrileri ve UHS eğrileri; **MARAP** projesi kapsamındaki bölgesel deprem riski değerlendirmeleri için referans kaya düzeyinde temel girdi niteliği taşımaktadır. Bu girdilerin olasılıksal deprem riskine dönüştürülmesi aşamasında bina ve yapı stoku, kırılabilirlik fonksiyonları ile maruziyet verileriyle bütünleştirilmesi gerekmekte olup MARAP projesi bünyesindeki risk analizleri bu çıktılar esas alınarak yürütülmektedir.

Bu bölüme dair sınırlamalar

Bu çalışmanın kapsamı ve sonuçları aşağıdaki sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir:

- Her il tek bir hesap noktasıyla (il merkezi) temsil edilmiştir; bu değerler bölgesel eğilimi yansıtır ve il geneline genellenmemelidir. Mekânsal dağılım için haritalar esas alınmalıdır.
- Tüm nokta/spektrum sonuçları $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya düzeyindedir. Saha-spesifik tasarım ve risk için yerel zemin profili (V_{s30} , zemin sınıfı) ve zemin büyümesi ayrıca dikkate alınmalıdır.
- Tehlike haritaları bölgesel çözünürlükteki (~10–11 km) bir gridden üretilmiştir; mikro bölgeleme ölçeğinde daha sık grid ve yerel saha verisi ileriki çalışma konusudur.
- Çalışma ESHM20 tabanlıdır. AFAD ulusal tehlike modeli (TDTH) ile bileşen bazında (kaynak modeli, yer hareketi modeli) nicel karşılaştırma ve bütünleştirme ileriki çalışmada ele alınabilir.

1.9 Bölüm Kaynakçası

Akkar, S., Kale, Ö., Yakut, A., Çeken, U. (2018). Ground-motion characterization for the probabilistic seismic hazard assessment in Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3439–3463.

Danciu, L. ve diğerleri (2021). The 2020 update of the European Seismic Hazard Model — ESHM20: Model Overview. EFEHR Technical Report 002.

- Emre, Ö. ve diğerleri (2018). Active fault database of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3229–3275.
- Kadirioglu, F. T. ve diğerleri (2018). An improved earthquake catalogue ($M \geq 4.0$) for Turkey and its near vicinity (1900–2012). Bulletin of Earthquake Engineering, 16(8), 3317–3338.
- Kotha, S. R. ve diğerleri (2020). A regionally adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(9), 4091–4125.
- Pagani, M. ve diğerleri (2014). OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. Seismological Research Letters, 85(3), 692–702.
- T.C. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018). Resmî Gazete, Sayı 30364; Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (tdth.afad.gov.tr).
- Weatherill, G. ve diğerleri (2020). Modelling seismic ground motion and its uncertainty in different tectonic contexts: application to ESHM20. Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS).

2 MARMARA BÖLGESİ İÇİN BETONARME BİNA STOĞU VE DEPREM HASAR ANALİZİ

2.1 Giriş ve Yöntem

Raporun bu bölümünde, Marmara Bölgesi için ESRM20 (European Seismic Risk Model 2020) maruziyet modelinden alınan bina taksonomileri ve bina sayıları kullanılarak yapılan sismik hasar, göçme ve ekonomik kayıp analizinin sonuçları sunulmaktadır. Bu ve izleyen bölümde sırasıyla Bölüm 2'de hasar ve göçme analizi, Bölüm 3'te ekonomik kayıp ve can kaybı analizleri adım adım açıklanmaktadır. Tüm analizler aynı veri altyapısını paylaşır: ESRM20 maruziyet modeli (bina sınıfları ve sayıları), OpenQuake ile hesaplanmış olasılıksal sismik tehlike (iki aşılma olasılığı düzeyi) ve ESRM20 kırılgenlik/hasar görebilirlik modelleri. Hesaplar il temsili koordinatlarda, yapı sınıfı (taksonomi) çözünürlüğünde yürütülmüştür.

Her bina sınıfı, ESRM20 kırılgenlik eğrileriyle eşleştirilmiş ve bulunduğu konumdaki sismik tehlike değerlerine (PGA, SA(0,3), SA(0,6), SA(1,0)) göre dört hasar düzeyinde (DS1–DS4) olma olasılıkları hesaplanmıştır. Tehlike iki olasılık seviyesinde değerlendirilmiştir: 50 yılda %10 aşılma (yaklaşık 475 yıl dönüş periyodu) ve 50 yılda %2 aşılma (yaklaşık 2475 yıl dönüş periyodu). ESRM20 kırılgenlik fonksiyonlarının gerektirdiği SA(0,3) ve SA(0,6) ordinatları, Bölüm 1'de tanımlanan aynı olasılıksal tehlike modeli (ESHM20 v12e kaynak modeli, ESHM20 GMM mantık ağacı, Vs30 = 760 m/s referans kaya koşulu) esas alınarak elde edilmiştir. Bölüm 1'de ise, TBDY 2018'in kısa ve uzun periyot harita spektral ivme katsayılarına (SS ve S1) karşılık geldikleri için yalnızca PGA, Sa(0,2s) ve Sa(1,0s) ordinatları raporlanmıştır. Bölüm 2 betonarme (CR) yapılara odaklanır; toplam betonarme bina stoğu 1.476.438'dir. Her yapı sınıfı, tek bir ortak ölçüyle değil, **kendi IMT'siyle** değerlendirilmiştir: ESRM20'de her sınıf için nihai şiddet ölçüsü, kırılgenlik fonksiyonunda en düşük lognormal saçılımı veren, yani yapısal tepkiyi en verimli açıklayan ölçü olarak seçilmiştir. Genel eğilim olarak alçak yapılar PGA veya kısa periyot spektral ivmeyle, yüksek yapılar SA(1,0s) ile değerlendirilir. Analizde her kaydın IMT kolonundaki ölçüye karşılık gelen tehlike değeri kullanılmıştır.

Analiz boyunca yapılar, ESRM20 sınıflandırmasına göre sismik tasarım kod seviyeleriyle birlikte ele alınır. Bu seviyeler kısaca şöyle tanımlanır: **CDN** (kod öncesi, pre-code) sismik tasarımın bulunmadığı, ağırlıklı olarak yerçekimi yüklerine göre tasarlanmış eski yapıları; **CDL** (düşük kod, low code) yanal dayanım için izin verilebilir gerilme tasarımı kullanılan ve sismik etkinin yanal kuvvet katsayısı ile dikkate alındığı yapıları; **CDM** (orta kod, moderate code) modern sınır durum tasarımıyla boyutlandırılmış yapıları; **CDH** (yüksek kod, high code) ise kapasite tasarımı ve yerel süneklik ölçütlerini içeren, Eurocode 8'e benzer modern ilkelerle tasarlanmış yapıları ifade eder. Türkiye için varsayılan tasarım dönemleri CDN < 1975, CDL 1975–1997 ve CDH > 1997'dir. Bu seviyelerin ayrıntılı tanımları ve kayıp oranına etkisi Bölüm 3.3'te tablo halinde verilmiştir.

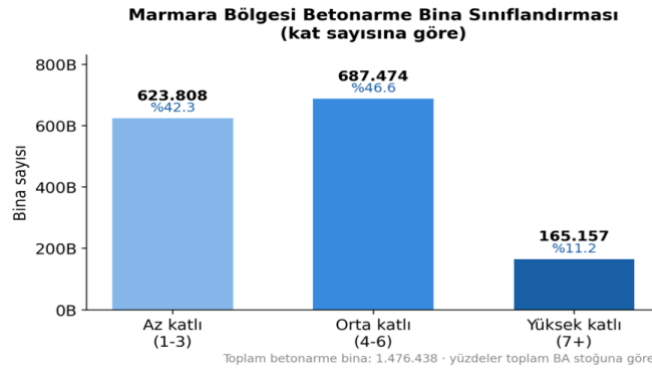
Envanterin zaman kapsamı: ESRM20'nin Türkiye konut envanteri, yapı özellik dağılımları (malzeme, taşıyıcı sistem, kat sayısı, yapım dönemi) açısından Türkiye'de yayımlanmış son Bina Sayımı olan **2000 Bina Sayımı**'na dayanmaktadır; toplam konut/bina sayıları ise TÜİK 2001–2017 yapı ruhsatı istatistikleri kullanılarak güncellenmiştir (ESRM20 kaynak dokümantasyonu: “2000 Population and Housing Census + 2001–2017 Building permits”; Türkiye, genel Avrupa metodolojisinde kullanılan EuroStat 2011 sayım turu veritabanında yer almadığından bu ulusal kaynak kullanılmıştır — Crowley vd., 2021; ESRM20 exposure veri deposu). Dolayısıyla bu raporda kullanılan envanter, **yaklaşık 2017 yılına kadarki ruhsatlı yapı stoğunu** temsil eder; 2017 sonrasında inşa edilen binalar (2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamındaki yeni yapılar) ve ruhsatsız yapılaşma modelde yer almamaktadır. Bunun etkileri şöyledir: toplam bina sayısı ve maruziyet değeri güncel duruma göre eksiktir; 1997 sonrası ruhsatlı stok yüksek kod (CDH) sınıfında temsil edildiğinden kod seviyesi dağılımı, 2011 varsayımına kıyasla güncel stoğu daha iyi yansıtır. Eksik kalan 2017 sonrası stok ve ruhsatsız yapılaşma nedeniyle hasar ve kayıp oranları yine hafif muhafazakâr yönde yorumlanmalıdır.

2.2 Betonarme Bina Stoğunun Sınıflandırması

Betonarme yapılar kat sayısına göre üç gruba ayrılmıştır: az katlı (1-3 kat), orta katlı (4-6 kat) ve yüksek katlı (7 ve üzeri kat). Aşağıdaki tablo ve şekilde bu dağılımı göstermektedir. Dağılım Tablo 2-1'de sayısal, Şekil 2-1'de grafik olarak sunulmaktadır.

Tablo 2-1 Betonarme bina stoğunun kat sınıfına göre sayısal dağılımı (Ref: ESRM20).

Kat Sınıfı	Bina Sayısı	% (BA stoğu)
Az katlı (1-3)	623.808	%42,3
Orta katlı (4-6)	687.474	%46,6
Yüksek katlı (7+)	165.157	%11,2
TOPLAM	1.476.438	%100

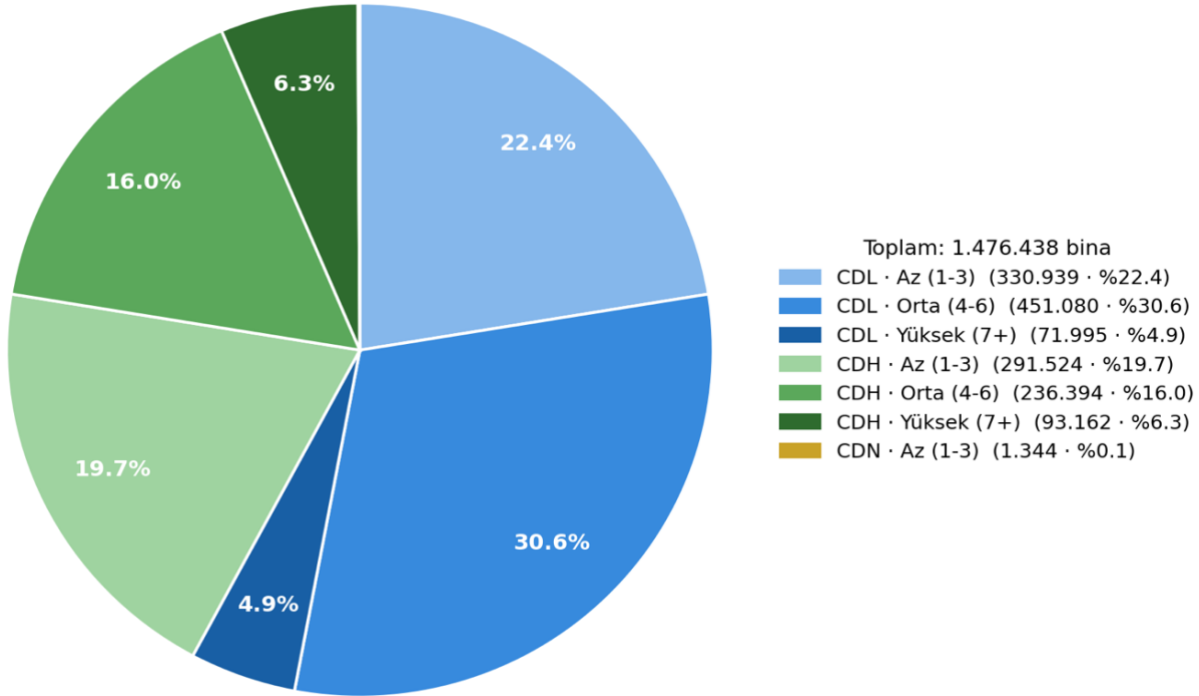


Şekil 2-1 Betonarme bina stoğunun kat sınıfına göre dağılımı (Ref: ESRM20).

Stoğun yaklaşık %89'u altı kat ve altındaki binalardan oluşmaktadır; orta katlı yapılar en kalabalık gruptur (%46,6).

2.3 Kod Seviyesi ve Kat Sınıfı Birlikte

Betonarme bina stoğu, yalnızca kat sayısına göre değil, aynı zamanda sismik tasarım kod seviyesiyle (CDL: düşük, CDH: yüksek, CDN: kodsuz) birlikte değerlendirildiğinde daha ayrıntılı bir tablo ortaya çıkmaktadır. Şekil 2-2, stoğun bu iki özelliğin kombinasyonuna göre dağılımını göstermektedir.



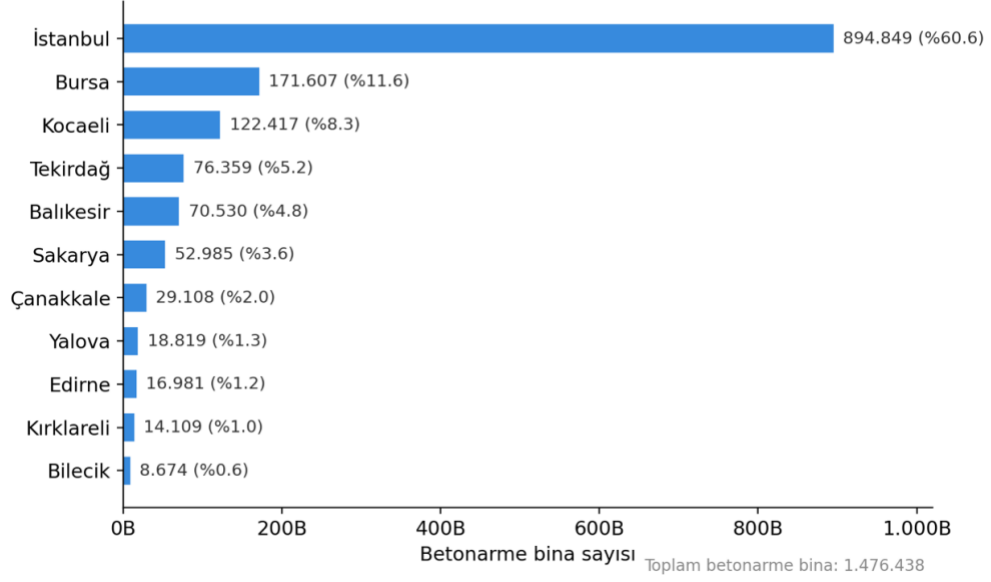
Şekil 2-2 Betonarme bina stoğunun kod seviyesi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre dağılımı (Ref: ESRM20).

En büyük tek grup, düşük kod düzeyli orta katlı (CDL · 4-6 kat) yapılarıdır ve stoğun %30,6'sını oluşturur. Bunu düşük kod düzeyli az katlı (CDL · 1-3 kat, %22,4) ve yüksek kod düzeyli az katlı (CDH · 1-3 kat, %19,7) yapılar izler. Düşük kod düzeyli (CDL) yapılar tüm kat sınıfları birlikte stoğun yaklaşık %57,9'unu kaplarken, yüksek kod düzeyli (CDH) yapılar %42,0'sini, kodsuz (CDN) yapılar ise yalnızca %0,1'ini oluşturmaktadır. Orta katlı düşük kod düzeyli grubun baskınlığı, göçme analizinde (Bölüm 2.7) bu kategorinin neden en yüksek göçme katkısına sahip olduğunu da açıklamaktadır.

2.4 Şehir Bazında Dağılım

Betonarme bina stoğunun Marmara'daki 11 il arasındaki dağılımı belirgin biçimde İstanbul ağırlıklıdır. İstanbul tek başına stoğun %60,6'sını barındırmaktadır; bunu Bursa (%11,6) ve Kocaeli (%8,3) izlemektedir (Şekil 2-3).

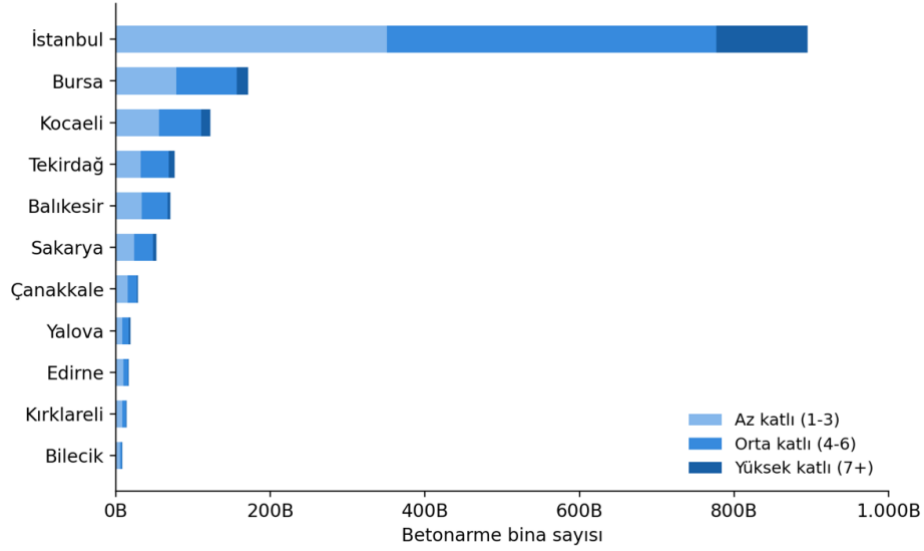
Marmara Bölgesi Betonarme Binaların Şehir Bazında Dağılımı



Şekil 2-3 Betonarme binaların şehir bazında toplam dağılımı (Ref: ESRM20).

Şekil 2-4, aynı şehir dağılımını kat sınıfına göre ayrıştırarak göstermektedir. Yüksek katlı betonarme yapılar özellikle İstanbul'da yoğunlaşmakta, küçük illerde ise neredeyse hiç bulunmamaktadır.

Şehir Bazında Betonarme Bina Dağılımı (kat sınıfına göre)



Şekil 2-4 Şehir bazında betonarme bina dağılımı (kat sınıfına göre yığılmış) (Ref: ESRM20).

2.5 Hasar Analizi ve Sonuçları

Hasar analizi, ESRM20'nin analitik kırılma fonksiyonlarına dayanır (Martins & Silva, 2021). Her yapı sınıfı için dört hasar düzeyinin (DS1: hafif, DS2: orta, DS3: yaygın/ağır, DS4: tam) aşılma olasılığı, lognormal dağılım varsayımıyla şu ifadeyle hesaplanır:

$$P(DS \geq k | IM) = \Phi[\ln(IM / \theta_k) / \beta]$$

Burada IM konumdaki şiddet ölçüsü değeri, θ_k k'inci hasar düzeyinin medyanı (Median_DS1...DS4), β lognormal standart sapma ve Φ standart normal birikimli dağılım fonksiyonudur. Bu eğriler, eşdeğer tek serbestlik dereceli (SDOF) sistemlerin doğrusal olmayan zaman-tanım analizleri ile türetilmiş, hasar eşikleri akma (S_{dy}) ve nihai (S_{du}) yer değiştirmeler cinsinden tanımlanmıştır. Ayırık hasar düzeyi olasılıkları, ardışık aşılma olasılıklarının farkı olarak elde edilir:

$$P(DSk) = P(DS \geq k) - P(DS \geq k+1), \quad P(DS0) = 1 - P(DS \geq 1)$$

Her hasar düzeyindeki beklenen bina sayısı, bu olasılığın o kayıttaki bina sayısı ile çarpımıdır:

$$N(DSk) = P(DSk) \times N(\text{bina})$$

Bölüm 2'deki hasar dağılım tabloları ve şekilleri, bu değerlerin il, kod düzeyi ve kat sınıfı bazında toplanmasıyla üretilmiştir. DS4 (tam yapısal hasar) düzeyindeki binaların tamamı fiilen göçmez. Fiziksel göçme, HAZUS-MH MR4 Teknik El Kitabı Tablo 13.8'deki koşullu göçme oranlarıyla tahmin edilir; bu oranlar, tam hasar durumundaki binaların göçen kesrini bina tipine göre verir:

$$N(\text{göçme}) = N(DS4) \times \text{göçme oranı}$$

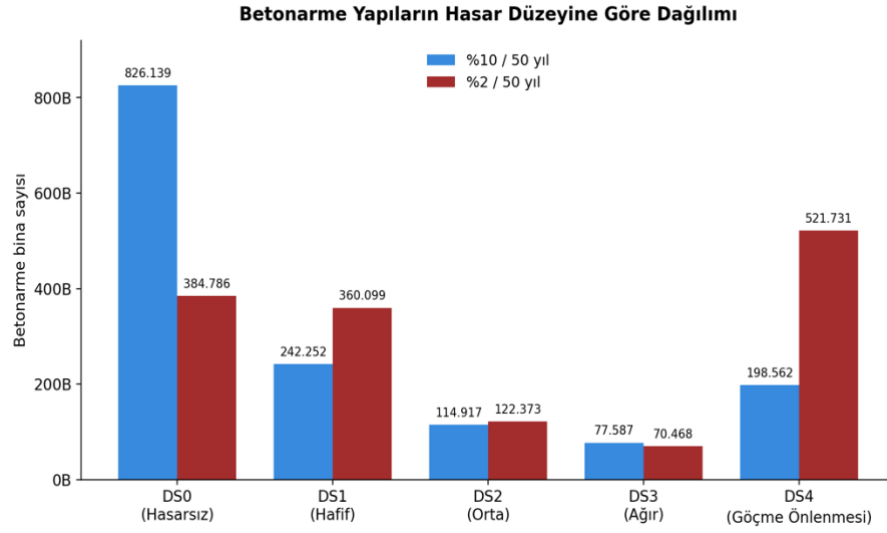
Betonarme moment çerçeveler için oranlar yüksekliğe göre azalır: C1L (1-3 kat) %13, C1M (4-6 kat) %10, C1H (7+ kat) %5. Betonarme dışı yapı tipleri için HAZUS standart oranları kullanılmıştır: donatısız yığma (URML/URMM) %15, ahşap (W1) %3, çelik kata göre %3-8.

Betonarme yapıların beş hasar düzeyindeki (DS0–DS4) dağılımı, iki tehlike seviyesi için aşağıdaki tabloda ve şekilde verilmiştir. DS4, performans tabanlı tasarımdaki Göçme Önlenmesi (Collapse Prevention) limit durumuna karşılık gelmektedir. Söz konusu dağılım Tablo 2-2'de sayısal, Şekil 2-5'te grafik olarak sunulmaktadır.

Not: Hasar dağılımı tablosundaki bina sayıları her iki tehlike düzeyinde de toplam 1.459.457 binaya karşılık gelmektedir; bu değer toplam betonarme stoğunun (1.476.438) %98,85'ine eşittir. Aradaki 16.981 binalık fark (%1,15), ESRM20 kırılma fonksiyonu veya şiddet ölçüsü (IMT) eşleşmesi sağlanamayan kayıtlardan kaynaklanmakta olup hasar dağılımı hesabına dâhil edilmemiştir. Bu bölümdeki hasar ve göçme sonuçları söz konusu 1.459.457 binalık alt küme üzerinden okunmalıdır.

Tablo 2-2 Betonarme yapıların hasar düzeyine göre dağılımı (DS0–DS4, iki tehlike seviyesi).

	Hasar Düzeyi	Bina (%10/50y)	Bina (%2/50y)
	DS0 (Hasarsız)	826.139	384.786
	DS1 (Hafif)	242.252	360.099
	DS2 (Orta)	114.917	122.373
	DS3 (Ağır)	77.587	70.468
	DS4 (Göçme Önlenmesi)	198.562	521.731



Şekil 2-5 Betonarme yapıların hasar düzeyine göre dağılımı (iki tehlike seviyesi).

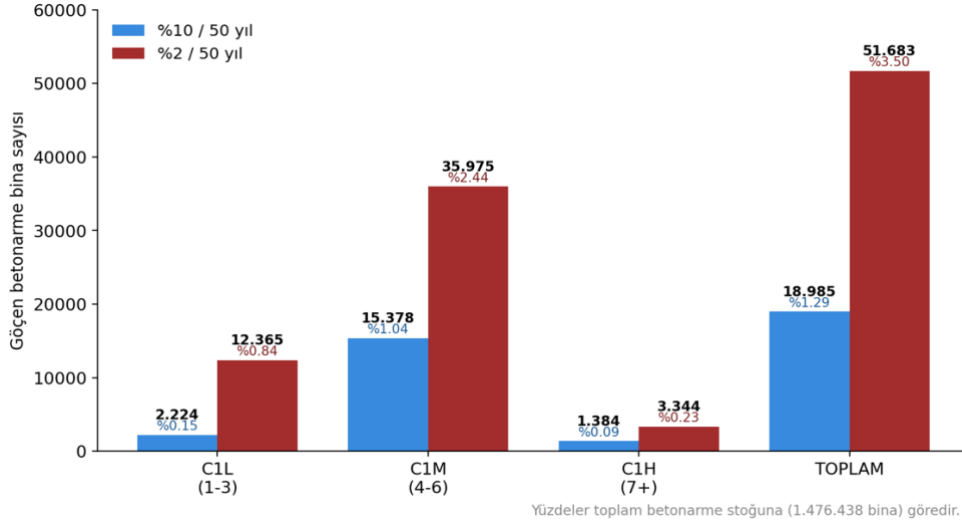
2.6 Göçme Analizi: HAZUS Tablo 13.8

DS4 (tamamen yapısal hasar) limit durumundaki binaların tamamı fiilen göçmez; yalnızca bir kısmı tamamen göçer. HAZUS-MH MR4 Teknik El Kitabı Tablo 13.8 (Collapse Rates by Model Building Type for Complete Structural Damage), her bina tipi için bu koşullu göçme oranını tanımlar. Betonarme moment çerçeveli yapılar (C1) için göçme oranı yüksekliğe göre azalır: C1L (alçak) %13, C1M (orta) %10, C1H (yüksek) %5. DS4'teki bina sayıları bu oranlarla çarpılarak göçmesi beklenen yapı sayısı hesaplanmıştır. Bu oranlarla hesaplanan beklenen göçme sayıları Tablo 2-3'te verilmektedir.

Tablo 2-3 HAZUS-MH MR4 Tablo 13.8 koşullu göçme oranlarıyla beklenen göçme sayıları.

HAZUS Tipi	Oran	Göçen (%10)	Göçen (%2)	Açıklama
C1L	%13	2.224	12.365	1-3 kat
C1M	%10	15.378	35.975	4-6 kat
C1H	%5	1.384	3.344	7+ kat
TOPLAM	—	18.985	51.683	%1,29 / %3,50

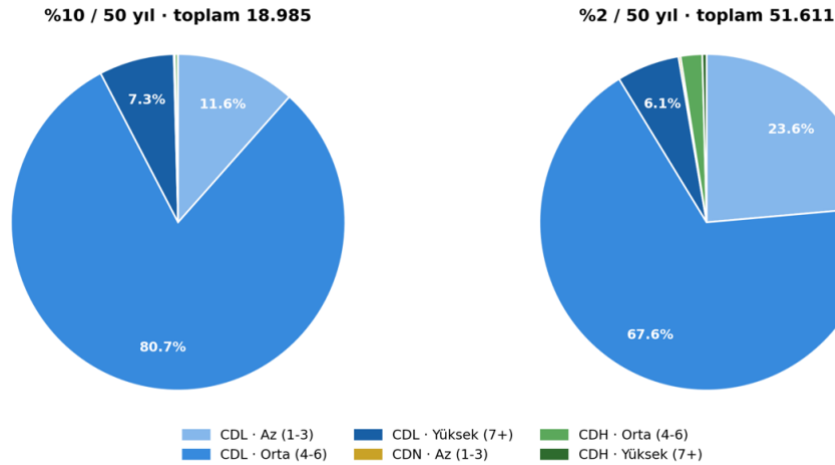
Toplamda, betonarme stoğunun %10/50 yıl senaryosunda %1,29'unun (18.985 bina), %2/50 yıl senaryosunda %3,50'sinin (51.683 bina) göçmesi beklenmektedir. Göçmenin büyük çoğunluğu hem bina sayısı fazla hem de göçme oranı görece yüksek olan orta katlı (C1M) yapılardan kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar Şekil 2-6'da özetlenmektedir.



Şekil 2-6 HAZUS Tablo 13.8 ile göçmesi beklenen betonarme yapı sayısı ve toplam betonarme stoğuna oranı.

2.7 Göçmenin Kod Seviyesi ve Kat Sınıfı Kombinasyonuna Göre Ayrışımı

Göçen yapıların hangi bina gruplarından kaynaklandığını daha ayrıntılı incelemek için, göçme sayıları kod seviyesi (CDL, CDN, CDH) ile kat sınıfı (az, orta, yüksek katlı) kombinasyonuna göre ayrıştırılmıştır. Şekil 2-7, bu altı kombinasyonun her iki tehlike seviyesindeki görece dağılımını iki pasta grafiğiyle göstermektedir.



Şekil 2-7 Göçen betonarme yapıların kod seviyesi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre dağılımı (iki tehlike seviyesi).

Her iki senaryo da tek bir kategori tarafından belirgin biçimde domine edilmektedir: düşük kod düzeyli, orta katlı (CDL · 4-6 kat) betonarme yapılar. Bu kategori, %10/50 yıl senaryosunda göçmelerin %80,7'sini, %2/50 yıl senaryosunda ise %67,6'sını oluşturmaktadır.

İkinci en büyük katkı, düşük kod düzeyli az katlı (CDL · 1-3 kat) yapılardan gelmektedir; payı daha şiddetli senaryoda %11,6'dan %23,6'ya yükselmektedir. Buna karşılık, kodsuz (CDN) ve yüksek kod düzeyli (CDH) yapıların tüm kombinasyonları birlikte göçmelerin yalnızca küçük bir bölümünü (toplamda yaklaşık %1-3) temsil etmektedir. Bu ayrışım, göçme riskinin ezici biçimde düşük kod düzeyli orta katlı yapı stoğunda yoğunlaştığını ve olası bir güçlendirme/dönüşüm önceliklendirmesinde bu grubun öne çıkması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Betonarme Bina Stoğu, Hasar ve Göçme Analizi

MARAP · Marmara Bölgesi (11 il) · ESRM20 kırılabilirlik · HAZUS göçme modeli

A Temel Sayısal Bulgular — Hasar Düzeyine Göre Bina Sayısı

%10/50 yıl senaryosu (Tr=475 yıl)			%2/50 yıl senaryosu (Tr=2475 yıl)		
DS0	Hasarsız	826.139	DS0	Hasarsız	384.786
DS1	Hafif hasar	242.252	DS1	Hafif hasar	360.099
DS2	Orta hasar	114.917	DS2	Orta hasar	122.373
DS3	Ağır hasar	77.587	DS3	Ağır hasar	70.468
DS4	Tam hasar / Göçme önlenmesi	198.562	DS4	Tam hasar / Göçme önlenmesi	521.731

Hasar dağılımı 1.459.457 bina üzerinden hesaplanmıştır; bu, toplam betonarme stoğunun (1.476.438) %98,85'idir. Daha şiddetli senaryoda DS4, stok içindeki en büyük hasar sınıfına dönüşmektedir.

B Göçme Analizi — HAZUS Tablo 13.8

HAZUS tipi	Kat	Göçme oranı	Göçen (%10)	Göçen (%2)
C1L	1-3	%13	2.224	12.365
C1M	4-6	%10	15.378	35.975
C1H	7+	%5	1.384	3.344
TOPLAM			18.985	51.683

Göçen bina (%10/50 yıl)
18.985 (%1,29)

Göçen bina (%2/50 yıl)
51.683 (%3,50)

Göçmelerin kod düzeyi ve kat sınıfına göre payı



C Öne Çıkan Sonuç ve Yorum

- Göçmelerin baskın kaynağı **düşük kod düzeyli 4-6 katlı (CDL-C1M)** yapılardır; payı %80,7 (%10/50) ve %67,6 (%2/50).
- Düşük kod düzeyli **1-3 katlı** yapıların payı, şiddetli senaryoda %11,6'dan %23,6'ya yükselir.

Kodsuz (CDN) ve yüksek kod düzeyli (CDH) yapıların tüm kombinasyonları göçmelerin yalnızca ~%1-3'ünü oluşturur; modern sismik tasarımın koruyucu etkisi doğrulanmaktadır.

Göçme yükü, hem sayıca fazla hem göçme oranı görece yüksek olan **orta katlı** yapılarda yoğunlaşır. DS4 düzeyindeki binaların tamamı fiilen göçmez.

Ekonomik kayıpta baskın grup farklıdır: düşük kod düzeyli **7+ katlı** yapılar (betonarme kayıp %67,7'si). Can güvenliği ile ekonomik kayıp öncelikleri ayrı ele alınmalıdır.

Özet Mesaj

Can güvenliği odaklı müdahale önceliği **düşük kod düzeyli 4-6 katlı** betonarme stoktur; ekonomik kayıp odaklı önceliklendirmede ise **düşük kod düzeyli 7 ve üzeri katlı** yapılar öne çıkmaktadır.

3 MARMARA BÖLGESİ İÇİN KAYIP ANALİZİ

3.1 Ekonomik Kayıp Analizi

Bu bölüm, aynı ESRM20 çerçevesini kullanarak Marmara Bölgesi'ndeki 11 il için hesaplanan yapısal kayıp (structural loss) sonuçlarını sunar. Analiz, her yapı türünün kendi yer hareketi şiddet ölçüsü (IMT) üzerinden gerçekleştirilmiştir. **Tüm yapı tipleri için toplam beklenen yapısal kayıp, %10 aşılma olasılığı senaryosunda yaklaşık 52.4 milyar EUR, %2 aşılma olasılığı senaryosunda ise yaklaşık 110.8 milyar EUR düzeyindedir.** Bu toplamın yalnızca betonarme (CR) yapılardan kaynaklanan bölümü sırasıyla yaklaşık 49,1 milyar EUR ve 101,6 milyar EUR düzeyindedir; kod düzeyi ve kat sınıfı ayrıntılı tabloları bu betonarme alt kümesini esas alır. **Kayıp, çoğunlukla yüksek maruziyete sahip İstanbul'da ve Kuzey Anadolu Fayı'na yakın Kocaeli-Sakarya-Yalova ekseninde yoğunlaşmaktadır.**

Not: Bu rapordaki tüm parasal kayıp değerleri, ESRM20 maruziyet modelinin yenileme maliyeti birimi olan Euro (EUR, yaklaşık 2020 fiyat düzeyi) cinsindendir; "milyar" ifadeleri milyar EUR olarak okunmalıdır.

Ekonomik kayıp, kırılabilirliğin ESRM20 hasar-kayıp (consequence) modeliyle birleştirilmesiyle elde edilen hasar-görebilirlik (vulnerability) fonksiyonlarına dayanır. Her hasar düzeyi için hasar oranı (onarım maliyeti / toplam yenileme maliyeti) şöyledir: DS1 = 0,05; DS2 = 0,15; DS3 = 0,60; DS4 = 1,00. Belirli bir IM düzeyindeki ortalama kayıp oranı (mean loss ratio, MLR):

$$MLR(IM) = \sum_k P(DSk | IM) \times DR_k, \quad DR = \{0.05, 0.15, 0.60, 1.00\}$$

ESRM20, bu birleşimi 50 IM değerinde önceden hesaplanmış kayıp oranı eğrileri (total replacement cost hasar-görebilirlik seti) olarak yayımlar. Bu çalışmada her kayıt için: (i) maruziyet dosyasındaki dönüşüm (conversion) anahtarıyla yapı sınıfının ESRM20 hasar-görebilirlik eğrisi belirlenmiş, (ii) kaydın IMT'sindeki tehlike değerine karşılık gelen kayıp oranı bu eğriden doğrusal interpolasyonla okunmuş, (iii) parasal kayıp şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Kayıp = Kayıp Oranı (IM) \times Yapısal Yenileme Maliyeti$$

Kayıp oranındaki belirsizlik ESRM20'de beta dağılımıyla temsil edilir (Silva, 2019); bu raporda ortalama (beklenen) değerler sunulmaktadır. Hasar oranlarının toplam yenileme maliyetinin (yapısal + yapısal olmayan + içerik) oranı olduğu ve bileşen bazlı ayrı kırılabilirlik modellerinin bu ESRM20 sürümünde henüz bulunmadığı not edilmelidir.

3.2 Hasar-Kayıp (Consequence) Modeli

Kullanılan kayıp oranları, ESRM20'nin hasar-kayıp (damage-to-loss) modeline dayanmaktadır. Her yapı sınıfının kırılabilirlik fonksiyonları, her hasar durumu için tanımlanan hasar oranlarıyla (damage ratio) birleştirilerek hasar-görebilirlik

(vulnerability) fonksiyonlarına dönüştürülür. Hasar oranı, bir hasar durumundaki onarım maliyetinin yenileme maliyetine oranını ifade eder. Hasar durumu başına hasar oranları Tablo 3-1’de verilmektedir.

Tablo 3-1 ESRM20 hasar-kayıp (consequence) modeline göre hasar durumu başına hasar oranları.

Hasar Durumu	Tanım	Hasar Oranı (kayıp/yenileme)
DS1	Hafif (slight)	0.05
DS2	Orta (moderate)	0.15
DS3	Yaygın (extensive)	0.60
DS4	Tam (complete)	1.00

Bu tablo değerleri, güncel Avrupa hasar-kayıp modellerinin gözden geçirilmesine dayanır. Belirli bir yer hareketi şiddeti düzeyinde, her hasar durumunun olma olasılığı kırılmalık fonksiyonlarından elde edilir, ilgili hasar oranıyla çarpılır ve toplanarak ortalama kayıp oranı (mean loss ratio) bulunur. Belirsizlik beta dağılımı ile modellenmiştir (Silva, 2019).

Not: Bu hasar oranları, hasar maliyetini toplam yenileme maliyetinin (yapısal + yapısal olmayan + içerik) oranı olarak temsil eder. Bu ilk versiyonda hasar durumu, yapısal ve yapısal olmayan eleman ile içerik hasarının birleşik halini ifade eder.

3.3 Sismik Tasarım Kod Seviyeleri ve Şehir Bazlı Kayıp Sonuçları

ESRM20 maruziyet ve kırılmalık modellerinde mühendislik yapıları sismik tasarım kod seviyesine göre dört sınıfa ayrılır. Bu sınıflandırma her yapı sınıfının kırılmalığını ve dolayısıyla kayıp oranını doğrudan etkiler. Türkiye için varsayılan tasarım dönemleri: CDN < 1975, CDL 1975–1997, CDH > 1997.

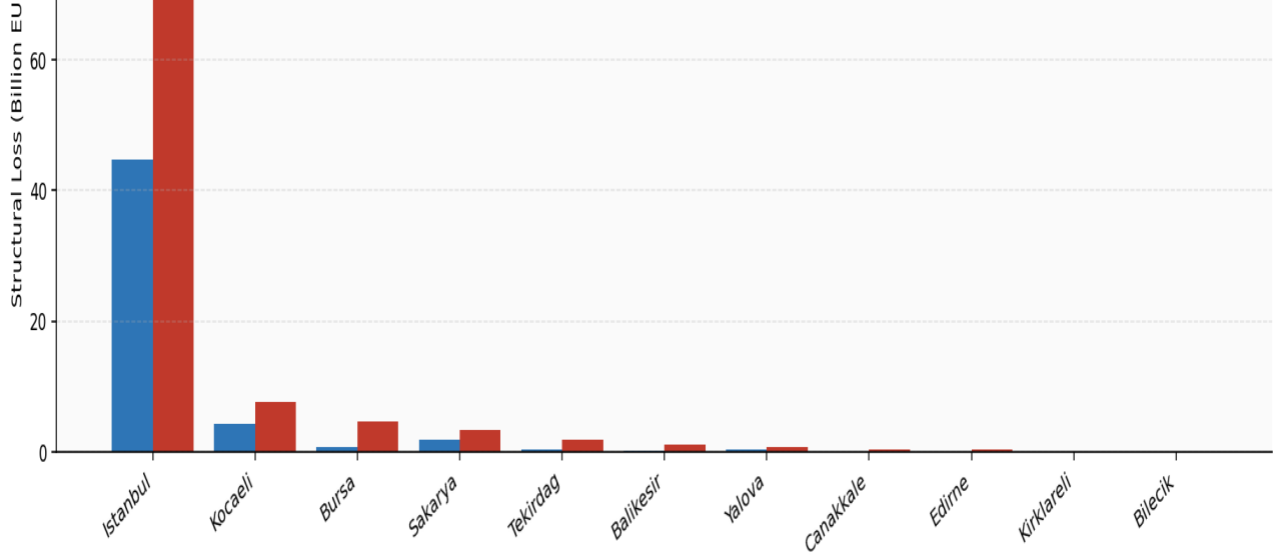
"Maruziyet" (exposure), depremden zarar görebilecek yapı stoğunun toplam ekonomik değeridir; yani **o ildeki tüm binaların toplam yenileme (yeniden inşa) maliyeti**. Bu raporda maruziyet, ESRM20 exposure modelinden gelen "structural" (yapısal yenileme maliyeti) kolonundan türetilir ve Euro cinsindendir. Örneğin İstanbul'daki tüm betonarme binaların toplam maruziyet değeri ~157 milyar EUR'dur. Aşağıdaki görsel üç farklı bakış açısından şehir bazlı kayıp dağılımını özetlemektedir: *toplam parasal kayıp (üst panel)*, *ortalama kayıp oranı (sol alt)* ve *maruziyete oranla kayıp (sağ alt)*.

• **Üst panel — Toplam parasal yapısal kayıp (milyar EUR).** Her il için iki senaryonun mutlak kayıp değerleri karşılaştırılır. Ölçek büyük ölçüde İstanbul tarafından belirlenir (~45 milyar EUR / ~91 milyar EUR); Kocaeli, Bursa ve Sakarya sonraki sıralarda takip eder, kalan iller görsel olarak neredeyse görünmez. Bu panel **hangi ilde toplam ekonomik etki en büyüktür** sorusuna cevap verir; ekonomik kaynak tahsisi ve sigorta/finansman planlaması bakımından önceliklidir.

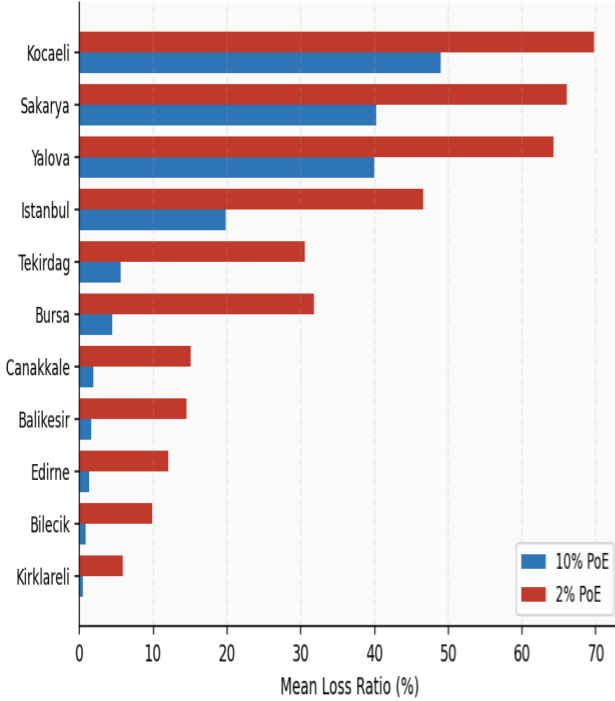
• **Sol alt panel — Ortalama kayıp oranı (%).** İl içindeki tüm kayıtların LossRate değerlerinin aritmetik ortalamasıdır (her kayıt eşit ağırlıklıdır, bina büyüklüğü dikkate alınmaz). Sıralama üst panelden belirgin biçimde farklıdır: Kocaeli %10 senaryoda ~%49 ile açık ara öndedir, onu Sakarya (~%40) ve Yalova (~%40) izler; İstanbul dördüncü sıraya düşer (~%20). Bu panel, **birim yapı başına ortalama tehlike şiddetini** gösterir ve doğrudan **Kuzey Anadolu Fayı'na yakınlığın** bir okumasıdır. Fay üstündeki iller burada öne çıkar.

• **Sağ alt panel — Maruziyete oranla kayıp (%).** İlin toplam parasal kaybının, ilin toplam yapısal yenileme maliyetine bölünmesidir; yani bina büyüklüğüne göre **ağırlıklı** bir orandır. Sıralama tekrar değişir: Kocaeli ve Sakarya en üstte kalmaya devam eder (~%29), İstanbul üçüncü sıraya yükselir (~%27) çünkü büyük ve pahalı stok toplam ağırlıklı ortalamayı yukarı çeker. Bu panel **ilin varlığının yüzde kaçının kaybedildiği** sorusuna cevap verir ve finansal risk yönetimi bakımından en tutarlı yüzdesel göstergedir. *Kısaca: bu oran, "ilin binalarının toplam değerinin (maruziyetin) yüzde kaçını kayboluyor?" sorusuna cevap verir. İstanbul için ~%27, ilin ~157 milyar EUR değerindeki betonarme stoğunun ~%27'sinin kaybedileceği anlamına gelir.*

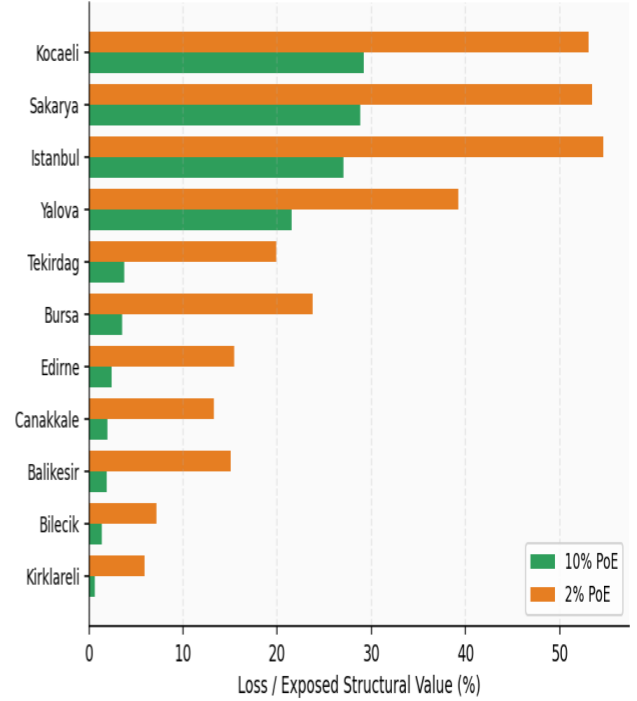
Aynı ilin aynı senaryosunda üç panelde üç farklı değer okumak beklenen bir sonuçtur; her biri farklı bir bakış açısidir (bkz. yukarıdaki panel açıklamaları). İstanbul %10 senaryosu için üç panelin verdiği değerler sırasıyla ~45 milyar EUR (mutlak), %19,8 (sıra ortalaması) ve %27,0 (ağırlıklı oran) düzeyindedir. Üç panelin ortak mesajı şudur: **mutlak ekonomik yıkım İstanbul odaklı, göreceli kırılabilirlik ise Kocaeli-Sakarya-Yalova ekseninde yoğun**; etkili bir risk yönetimi her iki eksenin birlikte ele alınmasını gerektirir. Üç panelin tamamı Şekil 3-1'de birlikte sunulmaktadır.



Mean Loss Ratio by City



Loss Ratio Relative to Total Exposure



Şekil 3-1 Marmara Bölgesi şehir bazlı yapısal kayıp değerlendirilmesi (10% ve 2% aşılma olasılığı senaryoları).

→ Şehir Bazlı Kayıp Tablosu

Aşağıdaki tablo, toplam parasal kayba göre azalan sırada düzenlenmiştir. Kayıp oranı, il genelindeki ortalama yapısal kayıp yüzdesini; maruziyete oran, toplam kaybın il yapısal değerine bölünmesini gösterir. Bu tablodaki kayıp ve maruziyet değerleri tüm yapı tiplerini (betonarme, yığma, çelik ve ahşap) kapsamaktadır; yalnızca betonarme yapılara ilişkin değerler için izleyen ayrıntılı tablo esas alınmalıdır. İlgili değerler Tablo 3-2’de verilmektedir.

Tablo 3-2 Şehir bazında beklenen yapısal kayıp ve kayıp oranları (tüm yapı tipleri).

İl	Kayıp Oranı %10	Kayıp Oranı %2	Kayıp %10 (Milyar EUR)	Kayıp %2 (Milyar EUR)	Maruziyete Oran %10
İstanbul	19.8	46.6	44.76	90.65	27.0
Kocaeli	49.0	69.8	4.23	7.69	29.2
Sakarya	40.2	66.0	1.76	3.26	28.8
Bursa	4.4	31.7	0.70	4.71	3.5
Yalova	40.0	64.2	0.38	0.68	21.5
Tekirdağ	5.6	30.6	0.35	1.86	3.7
Balıkesir	1.6	14.5	0.14	1.12	1.9
Çanakkale	1.9	15.1	0.06	0.41	2.0
Edirne	1.3	12.0	0.04	0.28	2.4
Bilecik	0.9	9.8	0.01	0.05	1.3
Kırklareli	0.4	5.8	0.01	0.06	0.6

→ Şehir / Kod Düzeyi / Kat Sınıfı Detay Tablosu

Aşağıdaki tablo, tüm iller için betonarme yapıların ekonomik kaybını kod düzeyi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre vermektedir. Her ilin mavi başlık satırında o ilin toplam betonarme yapı maliyeti ile şehir geneli kayıp ve oranları yer alır. Oran sütunları, ilgili grubun kaybının o ilin toplam betonarme maliyetine bölünmesiyle hesaplanmıştır. İller, %2/50 yıl senaryosundaki toplam kayba göre azalan sırada listelenmiştir. Ayrıntılı değerler Tablo 3-3'te sunulmaktadır.

Tablo 3-3 Şehir, sismik tasarım kod düzeyi ve kat sınıfına göre betonarme ekonomik kayıp.

Grup (Kod · Kat)	Kayıp %10 (B) / grup	Kayıp %2 (B) / grup	Oran %10	Oran %2
İstanbul	43.22 B	86.09 B	27.6%	55.0%
CDN · Az katlı (1-3)	0.01	0.03	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.81	3.29	0.5%	2.1%
CDL · Orta katlı (4-6)	9.98	17.61	6.4%	11.2%
CDL · Yüksek katlı (7+)	30.84	56.06	19.7%	35.8%
CDH · Az katlı (1-3)	0.02	0.20	0.0%	0.1%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.37	1.58	0.2%	1.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	1.20	7.32	0.8%	4.7%

Grup (Kod · Kat)	Kayıp %10 (B) / grup	Kayıp %2 (B) / grup	Oran %10	Oran %2
Kocaeli	3.38 B	6.17 B	26.5%	48.4%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.17	0.29	1.4%	2.3%
CDL · Orta katlı (4-6)	1.41	1.52	11.1%	12.0%
CDL · Yüksek katlı (7+)	1.29	1.43	10.1%	11.3%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.05	0.0%	0.4%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.05	0.28	0.4%	2.2%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.45	2.58	3.5%	20.3%
Bursa	0.45 B	3.56 B	2.7%	21.7%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.01	0.15	0.0%	0.9%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.21	1.65	1.3%	10.1%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.23	1.58	1.4%	9.7%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.03	0.0%	0.2%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.01	0.15	0.0%	0.9%
Sakarya	1.37 B	2.39 B	27.4%	47.7%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.05	0.13	1.1%	2.5%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.64	0.79	12.8%	15.7%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.58	0.70	11.6%	14.0%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.01	0.0%	0.2%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.01	0.07	0.2%	1.5%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.08	0.69	1.7%	13.8%
Tekirdağ	0.27 B	1.55 B	3.3%	19.2%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.03	0.0%	0.4%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.13	0.75	1.6%	9.3%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.12	0.61	1.4%	7.5%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.01	0.03	0.1%	0.4%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.01	0.12	0.2%	1.5%
Balıkesir	0.07 B	0.77 B	1.4%	15.2%

Grup (Kod · Kat)	Kayıp %10 (B) / grup	Kayıp %2 (B) / grup	Oran %10	Oran %2
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.02	0.0%	0.5%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.03	0.41	0.7%	8.1%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.03	0.33	0.7%	6.5%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Yalova	0.30 B	0.52 B	20.0%	34.6%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.01	0.02	0.6%	1.6%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.14	0.19	9.5%	12.4%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.13	0.16	8.3%	10.6%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.2%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.01	0.2%	1.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.02	0.13	1.4%	8.8%
Çanakkale	0.03 B	0.30 B	1.4%	13.4%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.01	0.0%	0.2%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.01	0.15	0.7%	6.9%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.02	0.14	0.7%	6.2%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Edirne	0.01 B	0.14 B	1.3%	14.6%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.01	0.0%	0.7%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.01	0.07	0.6%	7.4%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.01	0.06	0.6%	6.3%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.00	0.0%	0.1%
Kırklareli	0.00 B	0.04 B	0.4%	7.7%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%

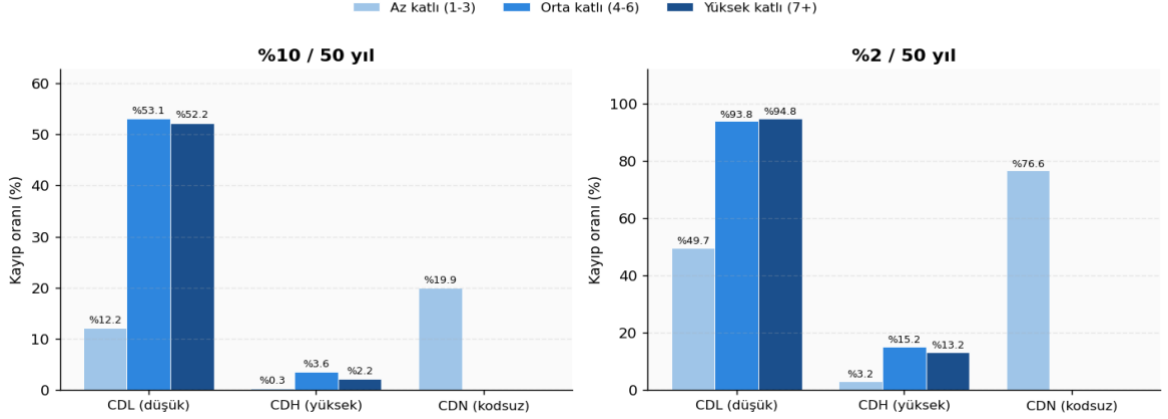
Grup (Kod · Kat)	Kayıp %10 (B) / grup	Kayıp %2 (B) / grup	Oran %10	Oran %2
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.1%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.00	0.02	0.2%	4.4%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.02	0.2%	3.2%
Bilecik	0.00 B	0.02 B	0.2%	4.3%
CDN · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDL · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.1%
CDL · Orta katlı (4-6)	0.00	0.01	0.1%	2.2%
CDL · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.01	0.1%	2.0%
CDH · Az katlı (1-3)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Orta katlı (4-6)	0.00	0.00	0.0%	0.0%
CDH · Yüksek katlı (7+)	0.00	0.00	0.0%	0.1%

Not: Mavi başlık satırındaki kayıp değerleri ve oranlar o ilin tüm betonarme grupları toplamıdır; grup satırlarındaki oranlar ise her grubun kaybının o ilin toplam betonarme maliyetine bölünmesiyle elde edilmiştir. "B" = Milyar EUR. CDM sınıfı Türkiye yapı stoğunda bulunmadığından tabloda yer almaz. Bu tablo yalnızca betonarme (CR) yapıları kapsadığından il toplamı, tüm yapı tiplerini içeren şehir bazlı kayıp tablosundaki değerlerin altında kalmaktadır: betonarme yapılar için bölge toplamı %10/50 yıl senaryosunda 49,10 milyar EUR, %2/50 yıl senaryosunda 101,55 milyar EUR olup, şehir bazlı tabloya göre sırasıyla 3,3 ve 9,2 milyar EUR'luk fark yığma, çelik ve ahşap yapı stoğundan doğmaktadır. Aynı nedenle şehir bazlı tablodaki "maruziyete oran" sütunu tüm yapı tiplerinin toplam maruziyeti üzerinden hesaplandığından, bu tablodaki betonarme oranlarından farklıdır.

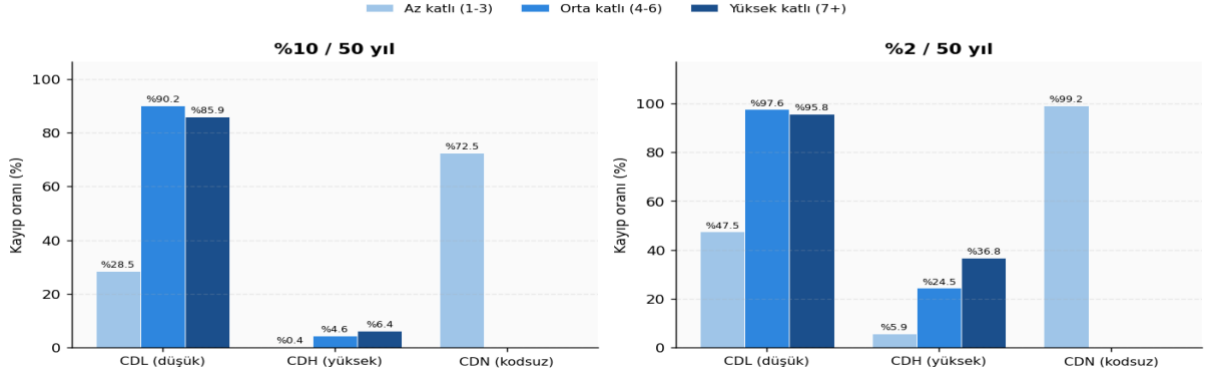
➔ Şehir Bazında Grup Kayıp Oranları (kendi yapısal değerine göre)

Aşağıdaki grafikler (Şekil 3-2), her il için betonarme yapıların kayıp oranını kod düzeyi (CDL, CDH, CDN) ve kat sınıfı (az/orta/yüksek katlı) kombinasyonuna göre gösterir. Ayrıntılı şehir/kod/kat kayıp tablosundan farklı olarak buradaki oran, her grubun kaybının o grubun kendi yapısal değerine bölünmesiyle hesaplanmıştır; yani grubun kendine özgü hasar-görebilirliğini (loss rate) yansıtır. Sol panel %10/50 yıl, sağ panel %2/50 yıl senaryosuna aittir. Bu gösterim, il içinde hangi yapı tipinin birim değer başına en kırılğan olduğunu ortaya koyar.

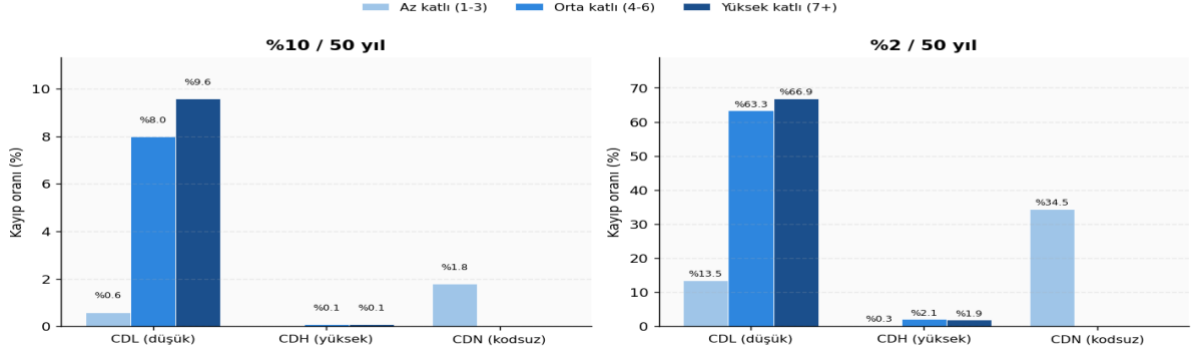
İstanbul — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



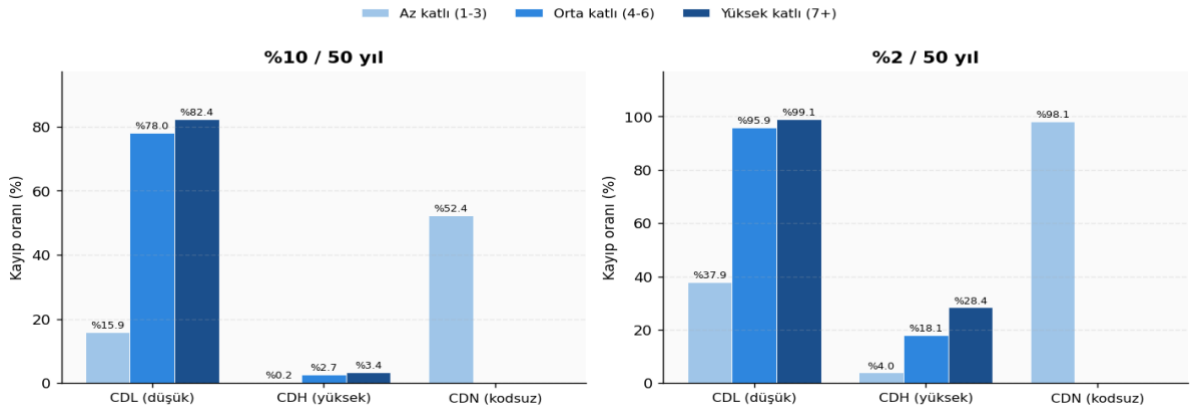
Kocaeli — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



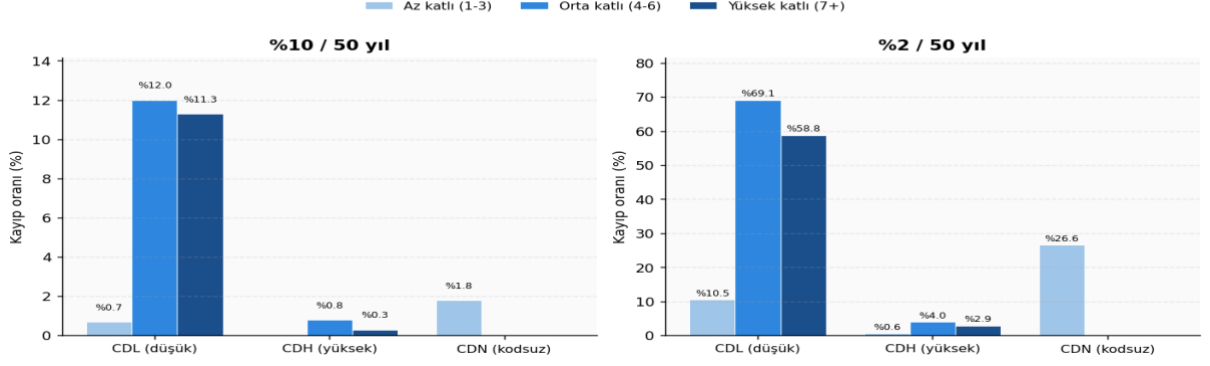
Bursa — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



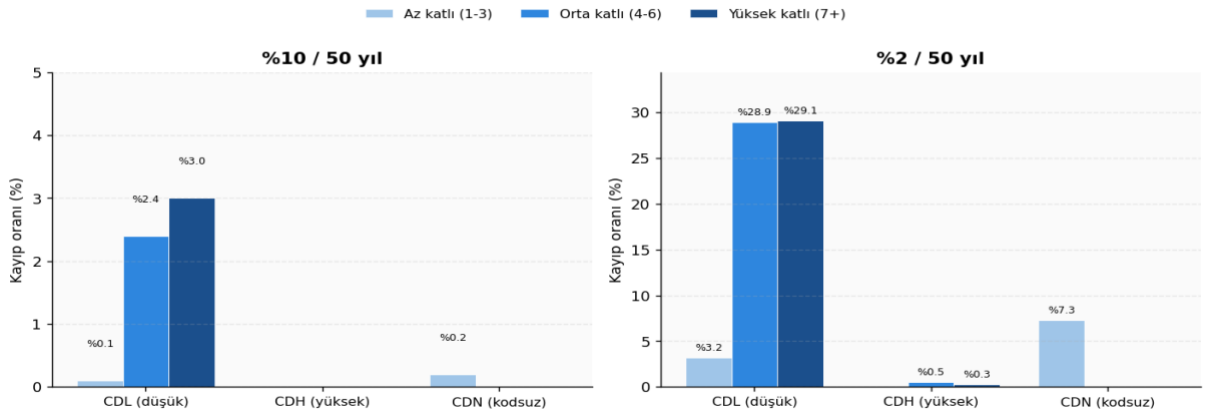
Sakarya — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



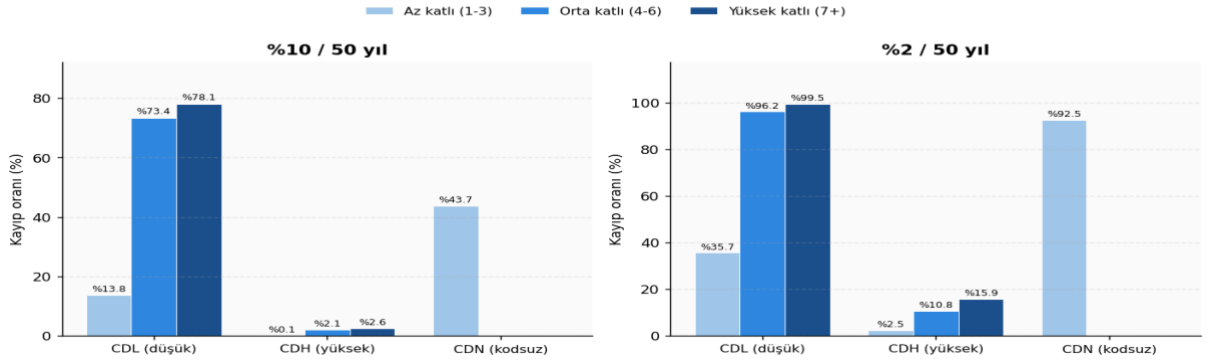
Tekirdağ — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



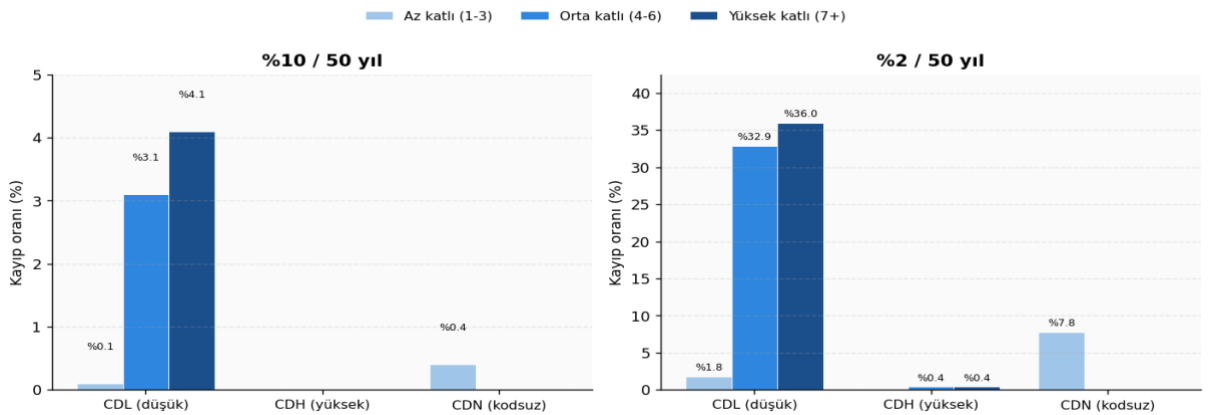
Balıkesir — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



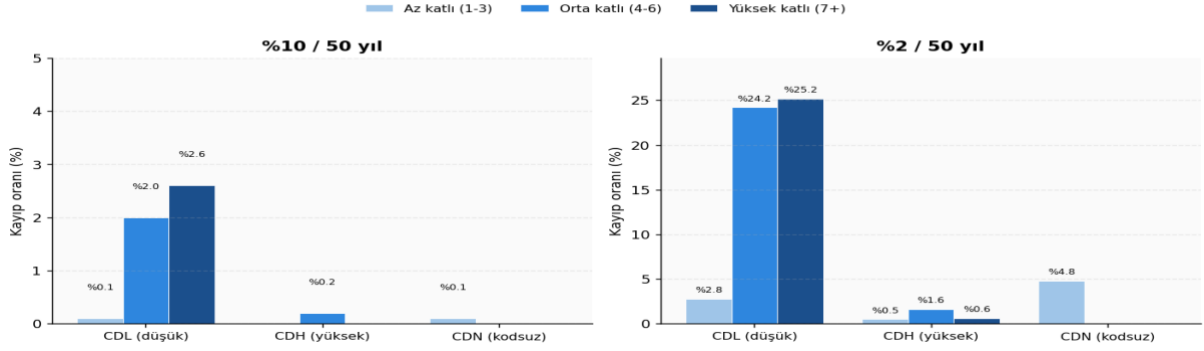
Yalova — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



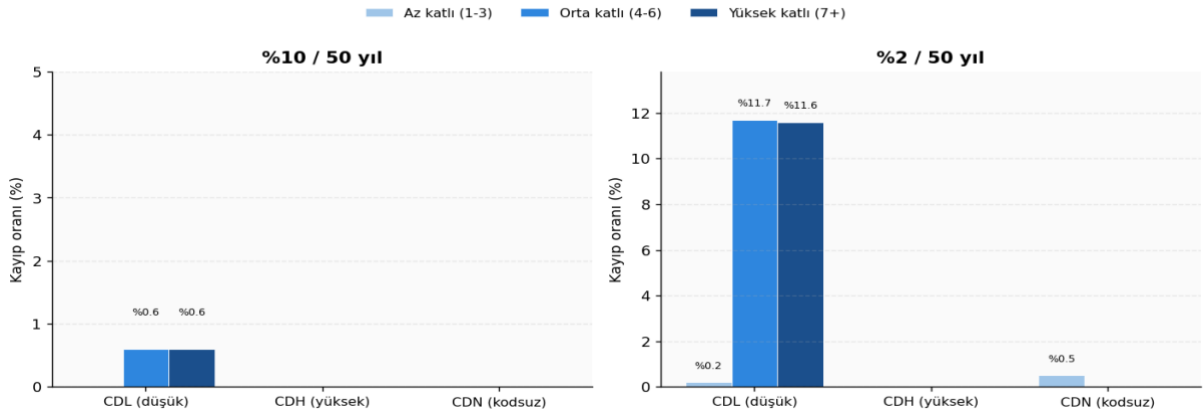
Çanakkale — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



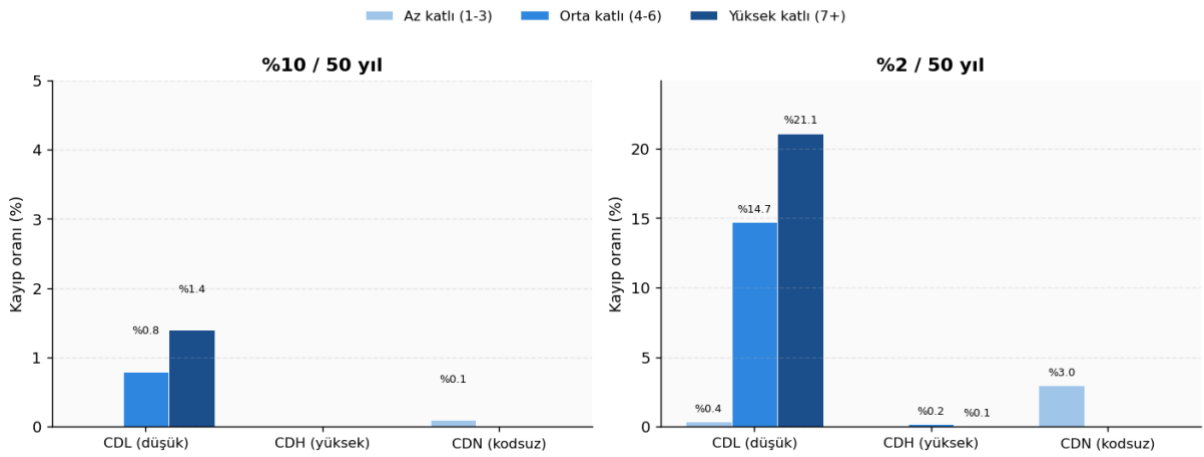
Edirne — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



Kırklareli — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



Bilecik — Betonarme Yapılarda Kayıp Oranı (kendi yapısal değerine göre)



Şekil 3-2 Marmara Bölgesindeki 11 İl için — betonarme yapılarda kod düzeyi ve kat sınıfına göre kayıp oranları (iki senaryo).

Genel örüntü: Düşük kod düzeyli orta ve yüksek katlı (CDL - 4-6 ve 7+) yapılar, birim yapısal değer başına en yüksek kayıp oranına sahiptir; %2/50 yıl senaryosunda bu gruplarda oran çoğu ilde %90'ı aşmaktadır. Yüksek kod düzeyli (CDH) yapılar aynı senaryoda belirgin biçimde daha düşük kayıp oranı gösterir; bu da modern sismik tasarımın (kapasite tasarımı ve süneklik) beklenen koruyucu etkisini doğrular. Kodsuz (CDN) yapılar yalnızca birkaç ilde ve az katlı sınıfta bulunur; oradaki oranlar da yüksektir.

3.4 Can Kaybı Analizi: Şehir Bazında Kod Düzeyi ve Kat Sınıfı Dağılımı

Can kaybı tahmini, ESRM20'nin can kaybı (loss of life) hasargörebilirlik modeli kullanılarak yapılmıştır. Bu modelde her yapı sınıfı için, yer hareketi şiddetine bağlı ortalama can kaybı oranı (bina sakinleri başına ölüm olasılığı) tanımlanır; bu oran, tam hasar kırılabilirliğinin göçme faktörü, enkaz altında kalma (entrapment) olasılığı ve enkaz altında ölüm olasılığı ile birleşiminden türetilmiştir (ESRM20 Bölüm 5.4). Her konum için, yapı sınıfının kendi IMT'sindeki tehlike değerine karşılık gelen can kaybı oranı doğrusal interpolasyonla elde edilmiş ve gece nüfusu ile çarpılarak beklenen can kaybı hesaplanmıştır. Gece nüfusunun kullanılması, konut ağırlıklı yapı stoğunda en olumsuz senaryoyu temsil eder.

Bölge genelinde (tüm yapı tipleri) beklenen toplam can kaybı, %10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 47.500, %2/50 yıl senaryosunda yaklaşık 114.700 kişidir; bunun sırasıyla 46.199 ve 109.357'si betonarme yapılardan kaynaklanmaktadır.

Aşağıdaki Tablo 3-4, bu raporun kapsamıyla tutarlı olarak betonarme yapılardaki can kaybının il bazındaki dağılımını özetler; grafikler ise her il için beklenen can kaybını kod düzeyi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre gösterir. İller %2/50 yıl senaryosundaki toplam can kaybına göre azalan sırada listelenmiştir.

Tablo 3-4 İl bazında beklenen can kaybı (gece nüfusu ile, betonarme yapılar).

İl	Can Kaybı (%10/50y) kişi	Can Kaybı (%2/50y) kişi
İstanbul	38.221	89.771
Kocaeli	4.566	6.468
Bursa	320	5.252
Sakarya	2.393	3.632
Tekirdağ	161	1.634
Balıkesir	50	1.048
Yalova	451	719
Çanakkale	21	434
Edirne	12	256
Kırklareli	3	104
Bilecik	1	39
TOPLAM	46.199	109.357

Can Kaybının Nüfusa Oranı (Yüzdesel Gösterim)

Mutlak can kaybı sayıları, ilin nüfus büyüklüğünden etkilenir; küçük bir ilde 500 ölüm ile büyük bir ilde 500 ölüm aynı risk düzeyini ifade etmez. Aşağıdaki Tablo 3-5, beklenen can kaybını her ilin **betonarme yapılardaki toplam gece nüfusuna** oranlayarak sunar. Yüzde şu şekilde okunur:

$$\text{Yüzde} = (\text{Beklenen can kaybı} / \text{BA gece nüfusu}) \times 100$$

Bu, o ilin betonarme yapılarında geceleyin bulunan bir kişinin depremde ölme olasılığının bir tahminidir. Örneğin "%0,30" değeri, o ildeki BA yapılarındaki her ~330 kişiden birinin bu senaryoda hayatını kaybetmesinin beklendiği anlamına gelir. Marmara geneli için bu oran %10/50 yıl senaryosunda **%0.21**, %2/50 yıl senaryosunda **%0.50** düzeyindedir; yani bölge betonarme stoğundaki gece nüfusunun sırasıyla yaklaşık iki binde biri ile binde beşi. Bu **mutlak sayı değil oransal bir gösterge** olduğundan, iller arası göreceli riski karşılaştırmak için mutlak sayı tablosundan daha uygundur.

Özet Bulgular: %10 senaryoda İstanbul, Kocaeli ve Sakarya BA gece nüfuslarının yaklaşık **%0,27-0,30'unu** kaybederken, %2 senaryoda İstanbul **%0,63'e** çıkarak birim insan başına en yüksek risk düzeyine erişir.

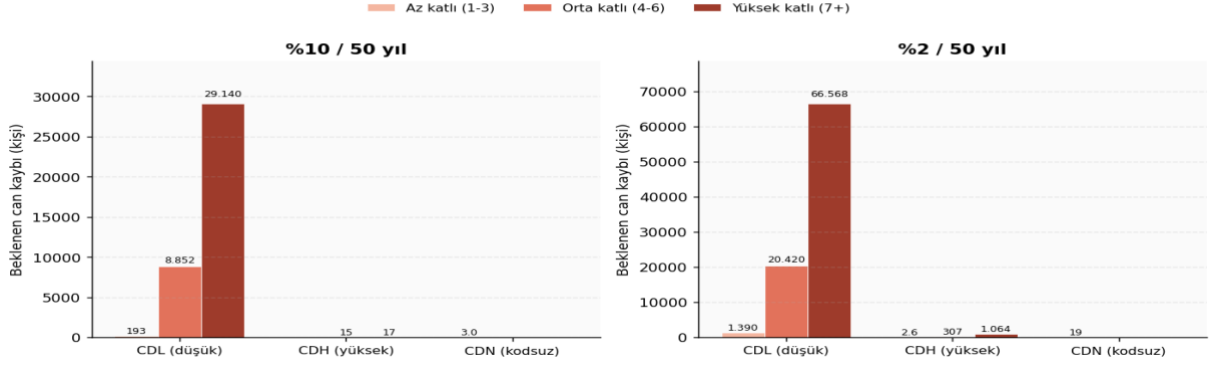
Yalova (%0,21 → %0,33) ve Bursa (%0,01 → %0,22) senaryolar arasında en keskin sıçramayı gösteren illerdir; bu iller nadir fakat şiddetli depremlere karşı hassastır.

Mutlak sayıda büyük görünen İstanbul kaybı, **yüzdesel karşılaştırmada Kocaeli ve Sakarya'ya benzer bir düzeydedir** — yani riskin "birim insan başına yoğunluğu" bu üç ilde birbirine yakındır; farkı yaratan İstanbul'un nüfus büyüklüğüdür.

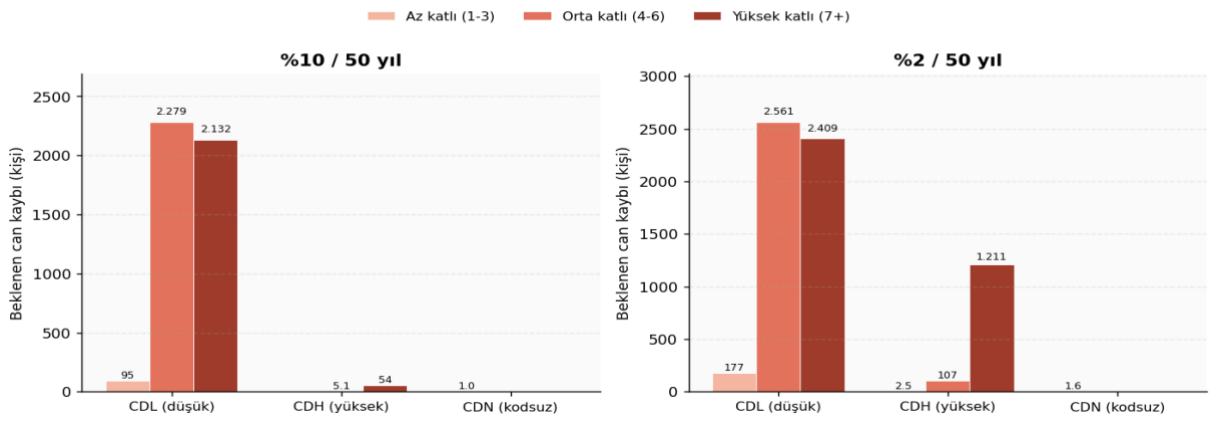
Tablo 3-5 İl bazında beklenen can kaybının ilin betonarme yapılar gece nüfusuna oranı.

İl	BA gece nüfusu	Beklenen can kaybı (%10)	Oran (%10)	Oran (%2)
İstanbul	14.224.580	38.221	%0.27	%0.63
Kocaeli	1.653.740	4.566	%0.28	%0.39
Bursa	2.413.789	320	%0.01	%0.22
Sakarya	809.485	2.393	%0.30	%0.45
Tekirdağ	865.601	161	%0.02	%0.19
Balıkesir	812.913	50	%0.01	%0.13
Yalova	217.880	451	%0.21	%0.33
Çanakkale	377.292	21	%0.01	%0.12
Edirne	218.079	12	%0.01	%0.12
Kırklareli	181.168	3	%0.00	%0.06
Bilecik	129.249	1	%0.00	%0.03
TOPLAM	21.903.776	46.199	%0.21	%0.50

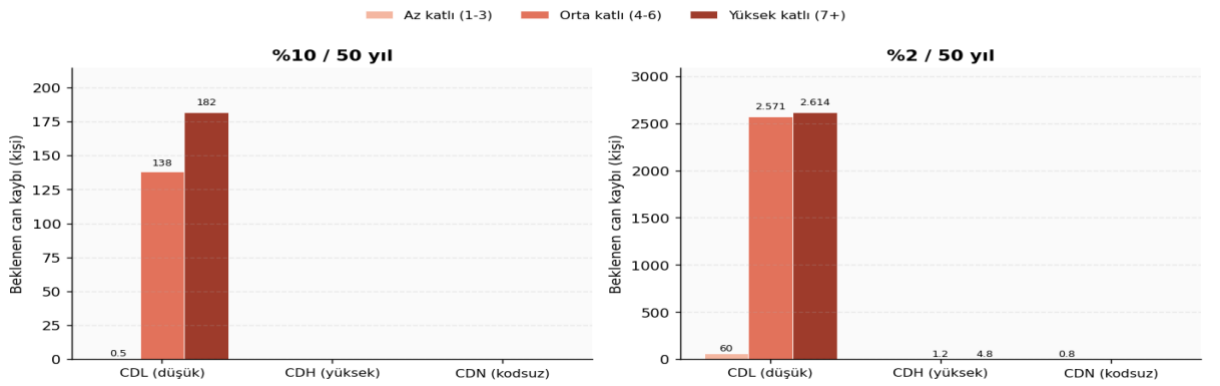
İstanbul — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



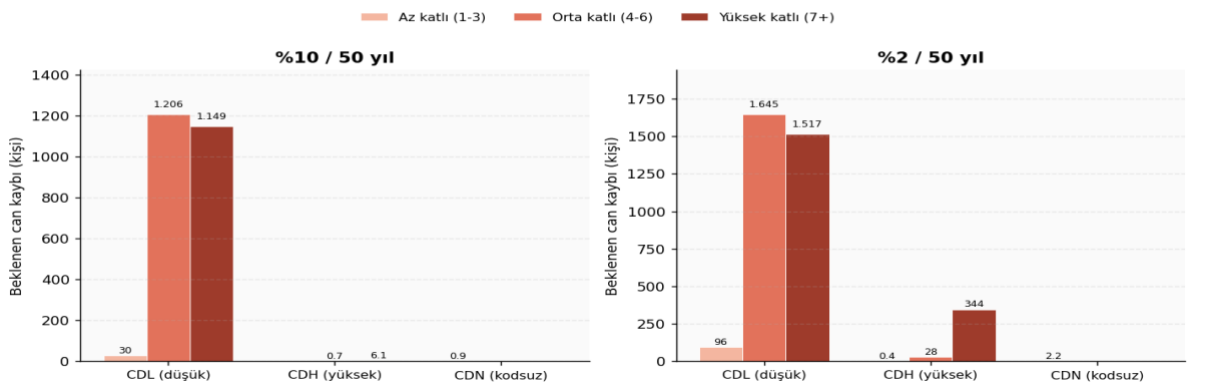
Kocaeli — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



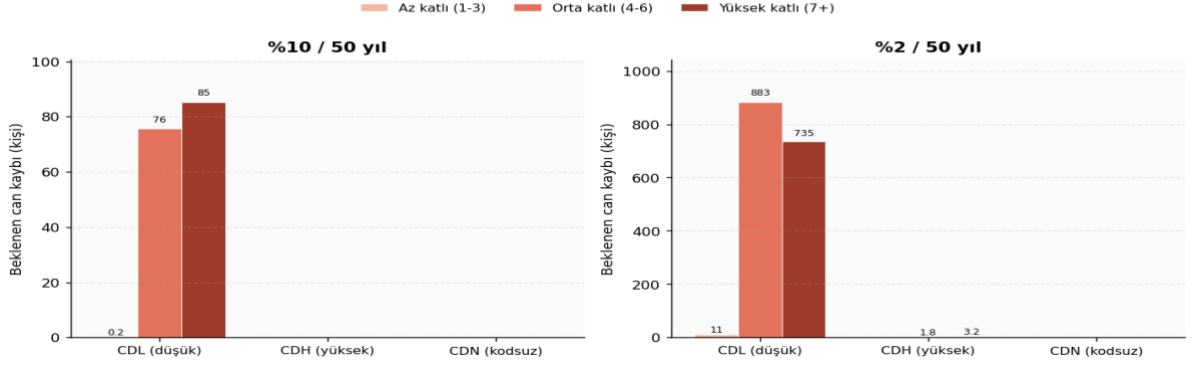
Bursa — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



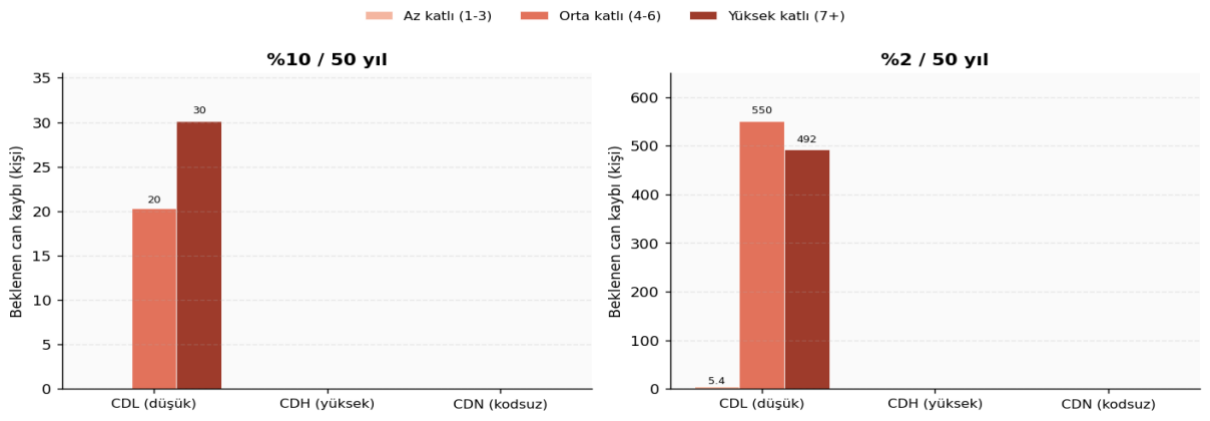
Sakarya — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



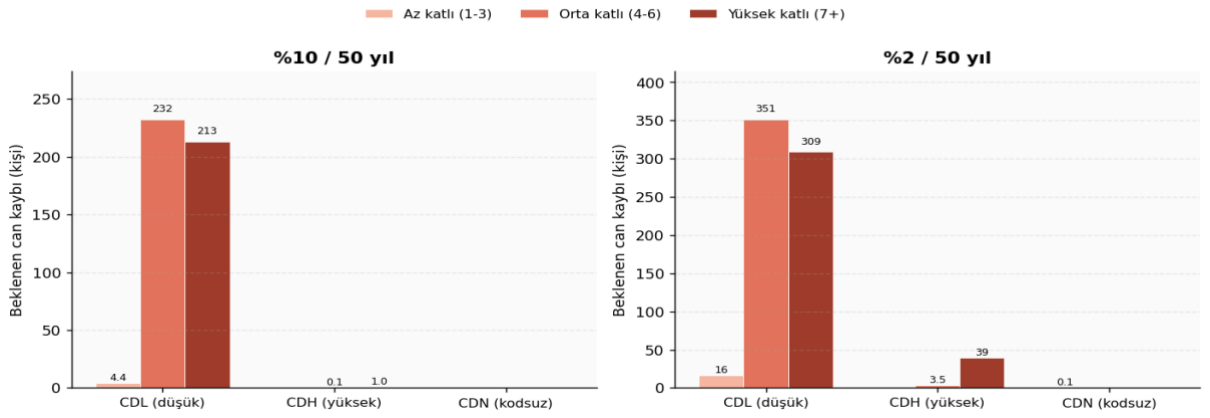
Tekirdağ — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



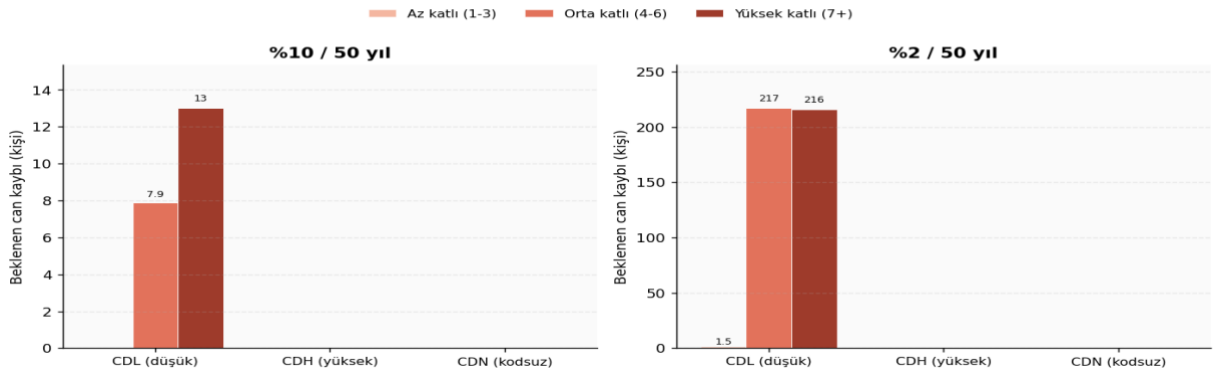
Balıkesir — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



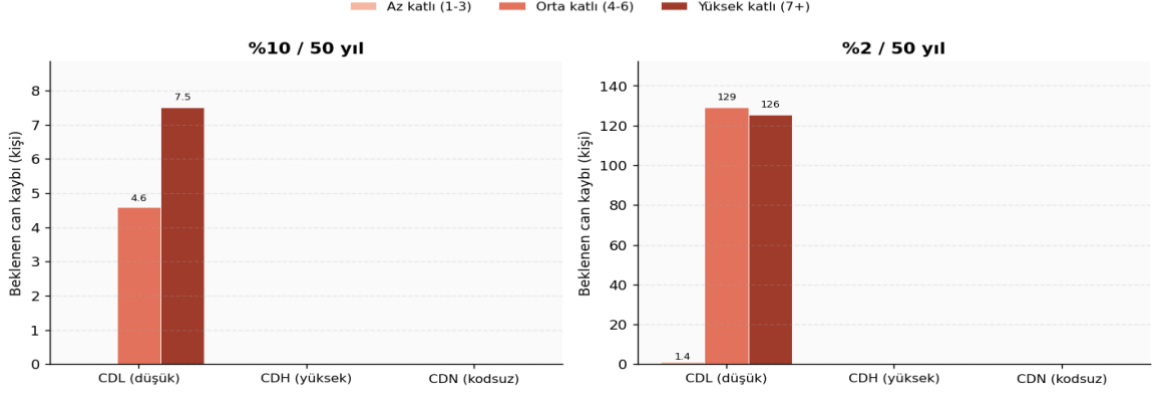
Yalova — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



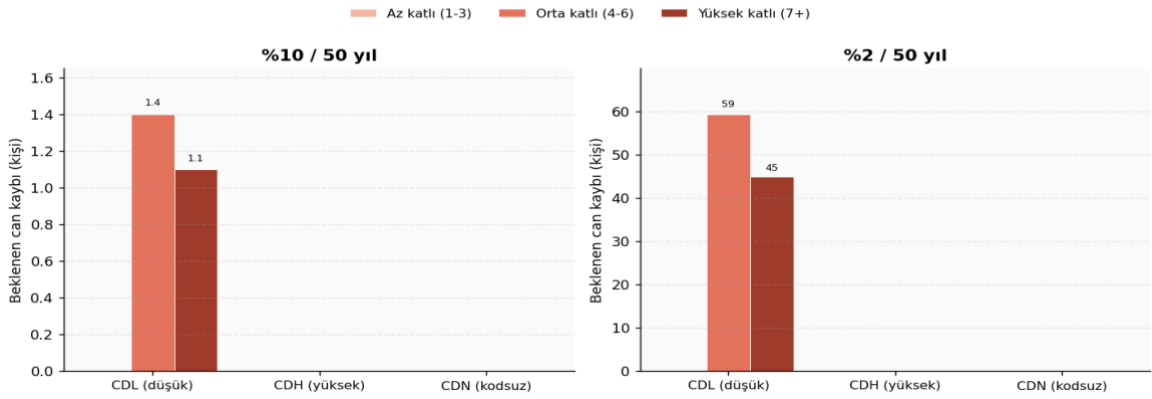
Çanakkale — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



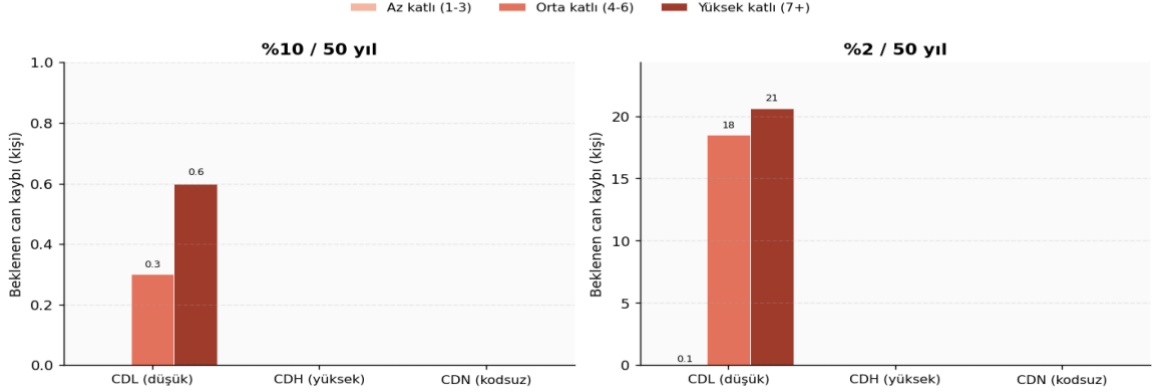
Edirne — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



Kırklareli — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



Bilecik — Betonarme Yapılarda Beklenen Can Kaybı (gece nüfusu)



Şekil 3-3 Marmara Bölgesindeki 11 il için — betonarme yapılarda kod düzeyi ve kat sınıfına göre beklenen can kaybı (gece nüfusu, iki senaryo).

Genel örüntü: Can kaybı, ekonomik kayıptan daha da keskin biçimde düşük kod düzeyli (CDL) orta ve yüksek katlı yapılarda yoğunlaşmaktadır. Yüksek katlı yapıların payı can kaybında ekonomik kayba göre daha belirgindir; bunun nedeni hem gece doluluk düzeyinin hem de enkaz altında kalma olasılığının kat sayısı ile artmasıdır. Yüksek kod düzeyli (CDH) yapıların kat sayısı her iki senaryoda da çok düşük kalmaktadır. Bu örüntü Şekil 3-3'te görselleştirilmiştir.

3.5 Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar

- a) **Mutlak kayıp (ekonomik öncelik):** İstanbul hem büyük yapı stoğu hem yüksek tehlike nedeniyle toplam kaybın büyük çoğunluğunu oluşturur (44.8 milyar, %10 senaryo). Bunu Kocaeli ve Sakarya izler.
- b) **Kayıp oranı (görelî kırılabilirlik):** Birim yapı başına en yüksek kayıp oranı Kocaeli (%49), Sakarya (%40) ve Yalova (%40) illerindedir. Bu iller Kuzey Anadolu Fayı'na en yakın konumda olup yapı stoğunun orantısız biçimde yüksek hasar görmesi beklenmektedir.
- c) **Can kaybı:** Beklenen can kaybı da aynı örüntüyü izler: İstanbul mutlak sayıda açık ara öndedir ve kayıpların büyük bölümü düşük kod düzeyli orta ve yüksek katlı yapılardan gelir. Modern kodlu (CDH) yapıların can kaybı katkısı her iki senaryoda da düşüktür.
- d) **Hasar ve kayıp bulgularının örtüşmesi:** Bölüm 2'deki göçme analizi ile Bölüm 3'deki kayıp analizi, risk yoğunlaşmasını coğrafi olarak aynı ekseninde (İstanbul-Kocaeli-Sakarya) göstermekle birlikte, yapı grubu bakımından iki farklı önceliğe işaret etmektedir. Göçme sayısında baskın grup düşük kod düzeyli orta katlı (CDL · 4-6 kat) yapılardır; bu grup göçmelerin %10/50 yıl senaryosunda %80,7'sini, %2/50 yıl senaryosunda %67,6'sını oluşturmaktadır. Ekonomik kayıpta ise baskın grup düşük kod düzeyli yüksek katlı (CDL · 7+ kat) yapılardır; bu grup betonarme kaybın %10/50 yıl senaryosunda %67,7'sini (33,25 milyar EUR), %2/50 yıl senaryosunda %60,2'sini (61,10 milyar EUR) tek başına üretmekte; CDL · 4-6 kat grubunun payı ise sırasıyla %25,6 (12,56 milyar EUR) ve %22,8 (23,17 milyar EUR) düzeyinde kalmaktadır. Bu ayrışmanın nedeni, yüksek katlı yapıların sayıca az (stoğun %11,2'si) fakat birim yenileme maliyeti bakımından çok daha değerli olmasıdır. Dolayısıyla can güvenliği odaklı önceliklendirmede CDL · 4-6 kat, ekonomik kayıp ve afet finansmanı odaklı önceliklendirmede ise CDL · 7+ kat grubu öne çıkmakta; güçlendirme/dönüşüm programlarının her iki grubu birlikte hedeflemesi gerekmektedir.
- e) **Ekonomik kayıp hesabında** Yüzde %20-30 gibi rakamlar iki nedenle beklenenden yüksek görünür: (i) hafif hasarlı binalar bile ekonomik kayba katkı verir; bir ilin binalarının çoğu DS1-DS2'de kalsa bile toplam kayıp oranı kolayca %20-30'a çıkar. (ii) ESRM20 hasar oranları **toplam yenileme maliyetinin** (yapısal + yapısal olmayan + içerik) oranıdır. Yapısal olmayan elemanlar (bölme duvarları, tesisat, kaplama) genelde yapıdan önce ve daha ucuz eşiklerde hasar görür; bu da orta hasar durumlarında yüksek kayıp oranı üretir.
- f) ESRM20 raporunun kendi doğrulamasında da (Bölüm 6.2 ve Şekil 5.7) can kaybı modellerinin ekonomik kayıp modellerinden **belirgin biçimde daha belirsiz** ve gözlemlere kıyasla **hafif azımsama eğiliminde** olduğu belirtilir. Türkiye'nin geçmiş büyük depremleriyle karşılaştırma da hesaplamanın büyüklük mertebesini doğrular: 1999 Kocaeli depreminde (Mw 7,6) ölü/etkilenen nüfus

oranı yaklaşık binde 1-2 mertebesindeydi; 2023 Kahramanmaraş depremi (Mw 7,8) benzer bir büyüklük mertebesindeydi. Bu çalışmanın %10/50 yıl senaryosunda Marmara toplamı **binde 2.1**, İstanbul-Kocaeli-Sakarya eksenini için **binde 2.7-3.0** düzeyinde çıkmaktadır — yani model, geçmiş büyük Türkiye depremleriyle aynı büyüklük mertebesinde bir tahmin üretmektedir. Beton yapılar tam göçmeden önce genellikle ciddi ekonomik hasar alır ve büyük çoğunlukla insanlar bina göçmeden önce çıkabilir/tahliye edilebilir. Ancak sonuçların yorumlanmasında dört önemli uyarı vardır. **Birincisi**, ESRM20 doğrulamasının azımsama eğilimi göz önüne alındığında bu tahminler **üst sınır olarak değil, en olası tahmin olarak** sunulmalıdır; gerçekleşecek bir Marmara depreminde can kaybı bu tahminlerin birkaç katı olabilir. **İkincisi**, model gece nüfusu varsayar; depremin gündüz, işe gidiş-geliş saatinde veya doluluk yüksek zamanlarda olması sonuçları değiştirir. **Üçüncüsü**, bu raporda can kaybı yalnızca betonarme yapılar için hesaplanmıştır; yığma stoğun ağırlıklı olduğu küçük illerde toplam can kaybı burada verilenin bir miktar üzerinde olacaktır. **Dördüncüsü**, ESRM20 v1, yumuşak kat ve sünek olmayan beton gibi Türkiye'ye özgü kırılma türlerini tam yakalamamaktadır.

Bu bölüme dair sınırlamalar

- Hasar ve göçme analizi yalnızca betonarme (CR) yapıları kapsar; yığma, çelik ve ahşap yapı tipleri dahil edilmemiştir.
- Tüm betonarme taksonomilerin HAZUS C1 tipiyle eşlenmesi yöntemsel bir tercihtir; ancak Tablo 13.8'de C1 ve C2 tipleri aynı göçme oranlarına sahip olduğundan bu tercih göçme sonuçlarını etkilememektedir.
- Kayıp analizinde hasar durumu, yapısal + yapısal olmayan + içerik hasarının birleşik halini temsil eder; bileşen-bazlı ayrı kırılma modelleri henüz geliştirilmemiştir.

3.6 Bölüm Kaynakçası

Göçme oranları — HAZUS-MH MR4 Technical Manual, Bölüm 13 (Direct Social Losses – Casualties), Tablo 13.8.

Hasar-kayıp oranlarının dayandığı modeller — Cosenza vd. (2018); Di Ludovico vd. (2021); De Martino vd. (2017); Erdik (2021); Akkar (2021); Tyagunov vd. (2006). Tam künyeler ESRM20 EFEHR TR002 kaynakçasındadır.

Kayıp oranı belirsizliği — Silva, V. (2019). Uncertainty and correlation in seismic vulnerability functions of building classes. Earthquake Spectra, 35(4), 1515–1539.

Maruziyet ve kırılma modeli — Crowley, H., Dabbeek, J., Despotaki, V., Rodrigues, D., Martins, L., Silva, V., Romão, X., Pereira, N., Weatherill, G., & Danciu, L. (2021). European Seismic Risk Model (ESRM20). EFEHR Technical Report 002, V1.0.1. <https://doi.org/10.7414/EUC-EFEHR-TR002-ESRM20>

4 DEPREM RİSK AZALTMA POLİTİKALARI ve UYGULAMA STRATEJİSİ

4.1 Bölümün Amacı ve Karar Çerçevesi

Bu raporda üretilen deprem tehlike, bina stoku, hasar, göçme, ekonomik kayıp ve can kaybı sonuçları; yalnızca mevcut risk durumunu tarif eden teknik bulgular olarak değil, bölgesel risk azaltma politikalarının hazırlanmasına esas oluşturacak bir karar destek altyapısı olarak değerlendirilmelidir. Çalışmanın temel katkısı, Marmara Bölgesi'ndeki deprem riskinin hangi illerde, hangi yapı gruplarında ve hangi kayıp bileşenlerinde yoğunlaştığını karşılaştırmalı ve tutarlı bir çerçevede ortaya koymasıdır. Rapor sonuçlarına göre Marmara Bölgesi'nde incelenen 1.476.438 betonarme binanın yüzde 57,9'u düşük sismik kod düzeyinde bulunmaktadır. Toplam betonarme stokun yüzde 30,6'sını oluşturan düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapılar, yaklaşık 452 bin binaya karşılık gelen en büyük tek yapı grubudur. Aynı grup, yüzde 10/50 yıl tehlike düzeyinde beklenen göçmelerin yüzde 80,7'sini, yüzde 2/50 yıl düzeyinde ise yüzde 67,6'sını oluşturmaktadır. Bu bulgu, can güvenliği odaklı müdahale programının birincil hedef grubunu tanımlamaktadır.

Buna karşılık ekonomik kayıpta baskın yapı grubu farklıdır. Düşük kod düzeyli yedi ve üzeri katlı yapılar betonarme stokun yalnızca yüzde 4,9'unu, yaklaşık 72 bin binayı oluşturmakla birlikte; betonarme yapısal kaybın yüzde 10/50 yıl senaryosunda yüzde 67,7'sini (33,25 milyar avro), yüzde 2/50 yıl senaryosunda ise yüzde 60,2'sini (61,10 milyar avro) tek başına üretmektedir. Aynı senaryolarda düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapıların ekonomik kayıptaki payı yüzde 25,6 (12,56 milyar avro) ve yüzde 22,8 (23,17 milyar avro) düzeyinde kalmaktadır. Dolayısıyla bölgesel risk azaltma programı tek bir hedef grup üzerine değil, birbirini tamamlayan iki iz üzerine kurulmalıdır: can güvenliği izinde düşük kod düzeyli orta katlı stok, ekonomik dayanıklılık ve finansman izinde ise düşük kod düzeyli yüksek katlı stok önceliklidir.

Raporda betonarme yapıların yaklaşık 18.985'inin yüzde 10/50 yıl düzeyinde, 51.683'ünün ise yüzde 2/50 yıl düzeyinde göçmesinin beklendiği hesaplanmıştır. Tüm yapı tiplerini kapsayan toplam yapısal ekonomik kayıp iki tehlike düzeyinde sırasıyla yaklaşık 52,4 milyar avro ve 110,8 milyar avro; bunun betonarme yapılardan kaynaklanan bölümü ise 49,10 milyar avro ve 101,55 milyar avrodur. Betonarme yapılardaki beklenen can kaybı sırasıyla 46.199 ve 109.357 kişi düzeyindedir. Bu değerler kesin bir deprem tahmini veya gerçekleşmesi zorunlu sonuçlar değil; kullanılan tehlike, maruziyet, kırılma ve nüfus varsayımları altındaki beklenen sonuçlardır. Bununla birlikte kayıpların büyüklük mertebesi, bölgesel risk azaltma programının olağan bir imar veya bina yenileme faaliyeti olarak değil, ulusal ekonomik ve toplumsal güvenlik programı olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Sonuçların karar süreçlerinde doğru ölçekte kullanılabilmesi için üç sınırlılık göz önünde tutulmalıdır. Tehlike hesapları $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya koşulunda ve yaklaşık 10–11 kilometre çözünürlüklü bir grid üzerinde yürütülmüştür; hasar dağılımı toplam betonarme stokun yüzde 98,85'ine karşılık gelen 1.459.457 bina üzerinden üretilmiştir; maruziyet modeli ise yaklaşık 2017 yılına kadarki ruhsatlı yapı stokunu temsil etmektedir. Bu üç husus, bulguların il ve bölge ölçeğinde önceliklendirme için güçlü, buna karşılık tekil bina kararları için tek başına yetersiz olduğunu göstermektedir.

Bu bölümde sunulan politika, strateji ve proje önerileri rapordaki sayısal sonuçlardan türetilmiştir. Önerilen risk puanlama sistemi, uygulama takvimi, yatırım modeli ve ileri analiz ürünleri mevcut raporda doğrudan hesaplanmış sonuçlar değildir; rapor bulgularının operasyonel bir risk azaltma programına dönüştürülmesine yönelik önerilen çerçeveyi oluşturmaktadır.

4.2 Rapor Bulgularından Elde Edilen Temel Politika Sonuçları

Raporun altı temel bulgu alanı ile bunların politika ve uygulama karşılıkları Tablo 4-1'de özetlenmektedir.

Tablo 4-1 Rapor bulgularının politika ve uygulama karşılıkları

<i>Risk bileşeni</i>	<i>Raporun ortaya koyduğu temel bulgu</i>	<i>Politika ve uygulama karşılığı</i>
Bölgesel deprem tehlikesi	En yüksek tehlike Kocaeli–Sakarya–Yalova–İstanbul hattında yoğunlaşmaktadır. DD-1 düzeyinde pik yer ivmesi Kocaeli'nde 0,964 g, Sakarya'da 0,834 g, Yalova'da 0,803 g ve İstanbul'da 0,696 g'dir.	Kaynakların yalnızca nüfus büyüklüğüne göre değil, fay yakınlığı ve göreceli risk yoğunluğuna göre de dağıtılması gereklidir.
Uzun periyot etkileri	İstanbul ve Kocaeli'nde DD-1 düzeyinde $S_a(1,0s)$ için PSHA/TBDY oranları sırasıyla 1,62 ve 1,86'dır; Kocaeli'nde DD-2 düzeyindeki oran da 1,51'dir.	Yüksek katlı yapılar, hastaneler, iş merkezleri ve kritik kamu tesisleri için saha ve yapı özelinde uzun periyot değerlendirme programı oluşturulmalıdır.
Yapı stoku kırılganlığı	Düşük kod düzeyli yapılar stokun yüzde 57,9'unu oluşturmaktadır. Düşük kodlu dört-altı katlı yapılar yüzde 30,6 (≈ 452.000 bina), düşük kodlu yedi ve üzeri katlı yapılar yüzde 4,9 (≈ 72.000 bina) paya sahiptir.	Hızlı tarama önceliği düşük kodlu dört-altı katlı stokta; ayrıntılı ekonomik ve performans değerlendirmesi önceliği ise düşük kodlu yüksek katlı stokta olmalıdır.
Göçme riski	Beklenen göçen bina sayısı 18.985 (stokun yüzde 1,29'u) ve 51.683'tür (yüzde 3,50). Göçme yükünün yüzde 67,6–80,7'si düşük kodlu orta katlı yapılardadır.	Kentsel dönüşüm ve güçlendirme programlarının başarısı, müdahale edilen toplam bina sayısından ziyade azaltılan beklenen göçme sayısı ile ölçülmelidir.
Ekonomik riskin	Tüm yapı tipleri için toplam yapısal kayıp 52,4 ve 110,8 milyar avro; betonarme yapılar için 49,10 ve 101,55 milyar avrodur.	İstanbul için sistemik ekonomik risk programı; Kocaeli, Sakarya ve Yalova

Risk bileşeni	Raporun ortaya koyduğu temel bulgu	Politika ve uygulama karşılığı
mekânsal dağılımı	Mutlak kayıp İstanbul'da (44,76 ve 90,65 milyar avro), maruziyete oranlı kayıp ise Kocaeli (yüzde 29,2) ve Sakarya'da (yüzde 28,8) yoğunlaşmaktadır.	için yüksek göreceli kırılabilirlik programı birlikte yürütülmelidir.
Ekonomik riskin yapı grubu dağılımı	Betonarme kaybın yüzde 67,7'si (33,25 milyar avro) düşük kod düzeyli yedi ve üzeri katlı yapılardan kaynaklanmaktadır; düşük kodlu dört-altı katlı yapıların payı yüzde 25,6'dır (12,56 milyar avro).	Afet finansmanı, sigorta ve risk transferi araçlarının hedef grubu, sayıca küçük fakat birim değeri yüksek olan düşük kodlu yüksek katlı stok olmalıdır.
Can kaybı	Betonarme yapılarda beklenen can kaybı 46.199 ve 109.357 kişidir. İstanbul'da 38.221 ve 89.771 kişi; gece nüfusuna oran İstanbul'da yüzde 0,27 ve 0,63, Kocaeli'nde 0,28 ve 0,39, Sakarya'da 0,30 ve 0,45'tir.	Arama-kurtarma, sağlık kapasitesi, geçici barınma ve tahliye planları il nüfusuna değil, beklenen göçme ve can kaybının mekânsal dağılımına göre düzenlenmelidir.
Model ve veri belirsizliği	Sonuçlar referans kaya düzeyinde ve bölgesel çözünürlükte üretilmiştir; hasar dağılımı stokun yüzde 98,85'i üzerinden hesaplanmıştır; envanter yaklaşık 2017 yılına kadarki ruhsatlı stoku temsil etmektedir.	Bina bazlı karar verilmeden önce yerel zemin, güncel yapı envanteri, bina kullanım ve nüfus verileri sisteme eklenmelidir.

Tablo 4-1, riskin üç farklı mekânsal karakter taşıdığını göstermektedir:

- Mutlak veya sistemik risk: İstanbul'da yoğunlaşmaktadır.
- Göreceli kırılabilirlik ve yakın-fay riski: Kocaeli, Sakarya ve Yalova'da öne çıkmaktadır.
- Düşük olasılıklı şiddetli deprem düzeyine duyarlılık: Bursa ve kısmen Tekirdağ gibi illerde önem kazanmaktadır.

Bu üç risk türü için aynı müdahale politikası uygulanmamalıdır. İstanbul için büyük ölçekli ekonomik ve nüfus riskinin yönetimi; Kocaeli–Sakarya–Yalova için yapı başına yüksek risk ve kritik hizmet sürekliliği; Bursa ve Tekirdağ için ise daha şiddetli deprem düzeyinde hızla yükselen kayıp potansiyeli esas alınmalıdır.

Mekânsal ayrımın yanı sıra, raporun ortaya koyduğu ikinci ayırım yapı grubu eksenindedir. Can kaybı ve göçme riski düşük kod düzeyli orta katlı stokta, ekonomik kayıp ise düşük kod düzeyli yüksek katlı stokta yoğunlaşmaktadır. Bu iki hedef grubun müdahale araçları, maliyet yapısı, teknik gereklilikleri ve finansman modelleri farklıdır; bu nedenle program tasarımında ayrı izler olarak kurgulanmalı, ancak ortak bir önceliklendirme sistemi üzerinden yönetilmelidir.

4.3 Rapordan Doğrudan Üretililecek Somut Çıktılar

Mevcut analiz sonuçları kullanılarak, ilave kapsamlı saha verisi beklenmeden Tablo 4-2’de listelenen temel ürünler hazırlanabilir.

Tablo 4-2 Mevcut rapor sonuçlarından üretililecek karar destek ürünleri

Somut çıktı	İçeriği	Kullanım amacı
Marmara Bölgesi Deprem Risk Atlası	DD-1 ve DD-2 tehlike haritaları ile bina stoku, beklenen hasar, göçme, ekonomik kayıp ve can kaybı göstergelerinin bütünlük sunumu	Bölgesel yatırım ve risk azaltma önceliklerinin belirlenmesi
İl Bazlı Risk Karneleri	Her il için tehlike, yapı stoku, kayıp oranı, mutlak kayıp, göçme ve can kaybı göstergeleri	Valilikler, belediyeler ve merkezi yönetim için karşılaştırmalı performans ve ihtiyaç değerlendirmesi
Yapı Sınıfı Risk Matrisi	Kod düzeyi ve kat sınıfı kombinasyonuna göre göçme, ekonomik kayıp ve can kaybı katkılarının birlikte sıralanması	Hızlı tarama, güçlendirme ve dönüşüm programlarının hedef grubunun belirlenmesi
Bölgesel Göçme Yoğunluğu Tablosu	İllere ve yapı gruplarına göre beklenen göçme sayıları	Arama-kurtarma kapasitesinin, ekipman ve personel ihtiyacının planlanması
Ekonomik Kayıp Öncelik Haritası	Mutlak kayıp, ortalama kayıp oranı ve maruziyete oranlı kaybın ayrı ayrı gösterimi	Kamu yatırım programı, sigorta, afet finansmanı ve mali rezerv planlaması
Can Kaybı Risk Haritası	Mutlak can kaybı ve gece nüfusuna oranlı can kaybının ayrı gösterimi	Sağlık kapasitesi, tahliye, toplanma alanı ve acil müdahale planlaması
İki İzli Müdahale Öncelik Listesi	Can güvenliği izinde düşük kodlu dört-altı katlı yapılar, ekonomik dayanıklılık izinde düşük kodlu yedi ve üzeri katlı yapılar	Hızlı tarama kampanyalarının ve finansman programının kapsamının ayrı ayrı tanımlanması
Yüksek Katlı Yapı Risk Programı	Uzun periyot tehlikesinin yüksek olduğu illerde yedi ve üzeri katlı yapıların özel değerlendirmesi	Yüksek katlı binalar için ilave performans ve hizmet sürekliliği incelemeleri
Risk İletişimi Ürünleri	Yönetici özeti, infografik, il risk kartları ve sadeleştirilmiş kamu bilgilendirme haritaları	Teknik sonuçların karar vericilere ve topluma doğru aktarılması
MARAP Risk İzleme Gösterge Paneli	Rapor sonuçlarının harita ve grafiklerle dinamik biçimde izlenmesi	Program ilerlemesinin ve risk azaltma performansının takip edilmesi

Bu ürünler il düzeyindeki stratejik planlama için kullanılabilir. Ancak mevcut çalışma, tekil bir binanın güvenli veya güvensiz olduğu yönünde karar verilmesi için yeterli değildir. Bina bazlı kararlar için güncel yapı verisi, yerel zemin bilgisi, hızlı tarama ve gerektiğinde ayrıntılı mühendislik performans analizi gereklidir.

4.4 İlave Veriyle Üretilebilecek Bina ve Mahalle Bazlı Çıktılar

Raporun bölgesel sonuçlarının uygulamaya dönüşebilmesi için ikinci aşamada analiz biriminin il düzeyinden mahalle, yapı adası ve bina düzeyine indirilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki veri katmanlarının ortak bir coğrafi veri tabanında birleştirilmesi gereklidir:

- Yapı kimlik numarası ve bina koordinatı,
- Yapım yılı ve geçirdiği tadilatlar,
- Taşıyıcı sistem türü,
- Kat sayısı, taban alanı ve toplam inşaat alanı,
- Sismik tasarım kod düzeyi,
- Beton dayanımı ve donatı özelliklerine ilişkin mevcut bilgiler,
- Yumuşak kat, kısa kolon, düzensizlik ve bitişik nizam gibi gözlemsel kırılma göstergeleri,
- Bina kullanım türü ile gündüz ve gece doluluğu,
- Yerel zemin sınıfı, Vs30, zemin büyütmesi ve sıvılaşma potansiyeli,
- Yapının hastane, okul, itfaiye, enerji, su, haberleşme veya ulaşım sistemi açısından kritik olup olmadığı,
- Sosyal kırılma göstergeleri,
- Tahliye güzergâhı, yol erişilebilirliği ve çevrede beklenen enkaz yoğunluğu.

Bu veri altyapısı kurulduğunda aşağıdaki operasyonel çıktılar üretilir.

a) **Bina Bazlı Öncelikli Tarama Listesi**

Her bina için “müdahale kararı” değil, öncelikle “inceleme önceliği” belirlenmelidir. Liste; binanın kırılma göstergeleri, bulunduğu yerdeki deprem tehlikesi, beklenen can kaybı, kullanıcı yoğunluğu, yenileme maliyeti ve kritik işlevi dikkate alınarak hazırlanmalıdır.

b) **Mahalle Ölçeğinde Göçme ve Enkaz Haritaları**

Beklenen göçme sayıları mahallelere dağıtılarak yol kapanma olasılığı, arama-kurtarma ekiplerinin erişim süresi, muhtemel enkaz hacmi, ağır iş makinesi ihtiyacı ve geçici enkaz depolama alanı ihtiyacı hesaplanabilir.

c) **Geçici Barınma ve Yer Değiştirme Tahmini**

DS3 ve DS4 düzeyindeki yapıların kullanım dışı kalacağı varsayımıyla kısa, orta ve uzun süreli barınma ihtiyacı belirlenebilir. Bu çıktı yalnızca toplanma alanı

büyükliğini değil; geçici konut, kira desteği, sosyal yardım ve nüfusun başka bölgelere taşınma ihtiyacını da kapsamalıdır.

d) Sağlık Hizmeti Talep Modeli

Beklenen göçme ve yaralanma dağılımı; hastane yatak kapasitesi, travma merkezi ihtiyacı, ambulans ulaşım süresi ve hastanelerin deprem sonrası işlevselliğiyle birlikte değerlendirilmelidir.

e) Bina Güçlendirme ve Yenileme Proje Havuzu

Her yapı veya yapı grubu için mevcut risk düzeyi, önerilen müdahale türü, yaklaşık maliyet, uygulama süresi, müdahale sonrası beklenen göçme ve can kaybı azalması, önlenen ekonomik kayıp, finansman ihtiyacı ve bina sakinlerinin geçici yer değiştirme ihtiyacı bilgilerini içeren proje kartları hazırlanmalıdır. Bu kartlar, kentsel dönüşüm programını yalnızca yıkılan veya yenilenen bina sayısı ile değil, önlenen can kaybı ve kaçınılan ekonomik kayıp üzerinden yönetilebilir hale getirecektir.

4.5 Deprem Risk Analizinin İleri Düzeye Taşınması

Mevcut rapor, DD-1 ve DD-2 tehlike düzeylerine karşılık gelen beklenen sonuçları vermektedir. Bu yaklaşım, bölgesel riskin karşılaştırılması açısından güçlü bir ilk aşamadır. Ancak tam anlamıyla olasılıksal finansal ve operasyonel risk yönetimi için iki tehlike düzeyinin ötesine geçilmesi gerekmektedir. Teknik açıdan DD-1 ve DD-2, belirli bir fayın kırılmasını temsil eden deterministik deprem senaryoları değil, belirli aşılma olasılıklarına karşılık gelen yer hareketi düzeyleridir. Bu nedenle mevcut kayıplar, söz konusu tehlike düzeylerine koşullu beklenen sonuçlar olarak değerlendirilmelidir. Arama-kurtarma ve olay yönetimi planları için ayrıca belirli fay kırılmalarına dayalı deterministik deprem senaryoları geliştirilmelidir. Önerilen ileri risk analizi ürünleri Tablo 4-3'te özetlenmektedir.

Tablo 4-3 Önerilen ileri risk analizi ürünleri

İleri analiz çıktısı	Tanımı	Politika kullanım alanı
Kayıp Aşılma Eğrisi	Belirli ekonomik kayıp tutarlarının yıllık aşılma olasılığını gösterir	Afet finansmanı, sigorta ve mali rezerv
Ortalama Yıllık Kayıp	Uzun dönemli yıllık beklenen ekonomik kayıp	Yıllık bütçe ayırma ve yatırım maliyet-fayda analizi
Olası En Büyük Kayıp	100, 250, 475, 975 ve 2.475 yıllık düzeylerde ekonomik kayıp	Finansal dayanıklılık ve reasürans planlaması
Can Kaybı Aşılma Eğrisi	Belirli can kaybı seviyelerinin yıllık aşılma olasılığı	Sağlık ve acil müdahale kapasite planlaması

<i>İleri analiz çıktısı</i>	<i>Tanımı</i>	<i>Politika kullanım alanı</i>
İşlev Kaybı ve Kesinti Süresi	Binaların ve altyapıların hizmet dışı kalma süresi	İş sürekliliği ve kamu hizmeti sürekliliği
Dolaylı Ekonomik Kayıp	Üretim, ticaret, lojistik ve tedarik zinciri kesintileri	Makroekonomik risk ve sanayi politikası
Kritik Altyapı Ağ Riski	Elektrik, su, doğalgaz, haberleşme ve ulaşım ağlarında zincirleme arızalar	Altyapı yatırımı ve yedeklilik planlaması
Toparlanma Eğrisi	Bölgenin hizmet, üretim ve konut kapasitesinin zamana bağlı geri dönüşü	Afet sonrası iyileştirme stratejisi
Yer Değiştiren Nüfus Tahmini	Kullanılamaz konutlar nedeniyle geçici veya kalıcı yer değiştiren nüfus	Barınma, kira ve sosyal destek programı
Enkaz Hacmi Tahmini	Yapı türü ve hasar düzeyine göre oluşacak enkaz miktarı	Lojistik, çevre ve atık yönetimi
Gündüz–Gece Nüfus Senaryoları	Günün farklı saatlerine göre can kaybı ve yaralanma analizi	Tahliye, işyeri güvenliği ve ulaşım planlaması
Artçı Deprem ve Birikimli Hasar Modeli	Ana şok sonrasında zayıflayan yapılardaki ilave risk	Hasar tespiti, tahliye ve yeniden kullanım kararları
Betonarme Dışı Yapı Stoku Analizi	Yığma, çelik ve ahşap yapılar için kırılganlık, hasar ve can kaybı hesabı	Kırsal ilçelerde ve yığma ağırlıklı yerleşimlerde risk tamamlaması

Özellikle ekonomik risk yönetiminde “en büyük kayıp hangi ilde?” sorusunun yanı sıra “belirli bir mali kaybın her yıl aşılma olasılığı nedir?” sorusu da cevaplanmalıdır. Mevcut rapordaki 52,4 ve 110,8 milyar avroluk değerler önemli referans noktalarıdır; ancak yıllık bütçe, afet fonu, sigorta ve borçlanma kapasitesinin belirlenmesi için ortalama yıllık kayıp ve kayıp aşılma eğrileri gereklidir. Benzer biçimde yapısal hasar ile ekonomik faaliyet kesintisi birbirinden ayrılmalıdır. Rapordaki kayıp değerleri yaklaşık 2020 fiyat düzeyinde yenileme maliyeti yaklaşımına dayanmakta; yapısal, yapısal olmayan elemanlar ile içeriğin birleşik hasarını temsil etmektedir. Bütçe ve yatırım programı hazırlanırken değerlerin güncel fiyat düzeyine taşınması; üretim kaybı, iş kesintisi, kira kaybı, ulaşım aksaması ve tedarik zinciri etkilerinin ayrıca modellenmesi gereklidir.

Raporun betonarme dışı yapı stokunu kapsamaması, ileri analiz gündeminin ayrı bir başlığını oluşturmaktadır. Şehir bazlı kayıp tablosu ile betonarme detay tablosu arasındaki fark, yığma, çelik ve ahşap stokun bölge genelinde yaklaşık 3,3 ve 9,2 milyar avroluk kayıp ürettiğini göstermektedir. Bu payın kırsal ve yığma ağırlıklı ilçelerde çok daha yüksek olması beklenir; can kaybı sonuçlarının yalnızca betonarme yapılar için verilmiş olması da bu illerde toplam riskin olduğundan düşük temsil edilmesine yol açmaktadır.

4.6 Önerilen Çok Ölçütlü Risk Önceliklendirme Sistemi

Yapıların yalnızca yapım yılına veya deprem tehlikesine göre sıralanması, gerçek risk yoğunluğunu yeterli ölçüde temsil etmez. Bu nedenle yapı, mahalle veya proje bazında kullanılmak üzere 100 puanlık bir “Deprem Risk Öncelik Puanı” oluşturulması önerilmektedir. Raporun ortaya koyduğu iki izli yapı grubu ayrımı nedeniyle puanın tek bir ağırlık setiyle değil, birbirini tamamlayan iki ağırlık setiyle hesaplanması önerilir: can güvenliği ağırlıklı puan, hızlı tarama ve dönüşüm sıralamasında; ekonomik ağırlıklı puan ise finansman, sigorta ve risk transferi programlarının hedeflenmesinde kullanılmalıdır. Önerilen öncelik puanı ve iki izli ağırlıklandırma yapısı Tablo 4-4’te sunulmaktadır.

Tablo 4-4 Önerilen deprem risk öncelik puanı ve iki izli ağırlıklandırma

Bileşen	Can güvenliği ağırlığı	Ekonomik ağırlık	Değerlendirilecek göstergeler
Yapısal kırılganlık	30	25	Kod düzeyi, kat sayısı, taşıyıcı sistem, düzensizlikler, malzeme kalitesi, bina yaşı
Beklenen göçme ve can kaybı	25	10	Göçme olasılığı, gece ve gündüz nüfusu, kişi başına ölüm riski
Yerel deprem tehlikesi	15	15	PGA, kısa ve uzun periyot ivmeleri, fay yakınlığı, yerel zemin büyütmesi
Ekonomik maruziyet ve kayıp	15	35	Yenileme maliyeti, beklenen kayıp oranı, iş ve gelir kaybı
Kullanım ve sosyal kırılganlık	10	5	Okul, hastane, yurt, yaşlı nüfus, düşük gelir, erişim kısıtları
Kritik işlev ve ağ etkisi	5	10	Elektrik, su, haberleşme, ulaşım veya acil hizmet sistemindeki rolü
Toplam	100	100	—

Bu ağırlıklar başlangıç önerisidir; kurumsal politika hedeflerine, veri kalitesine ve bütçe koşullarına göre kalibre edilmelidir. Puan, bir binanın mühendislik açısından kesin olarak riskli olduğuna karar vermek için değil, hangi binaların önce inceleneceğini ve yatırım programına hangi sırayla alınacağını belirlemek için kullanılmalıdır.

Risk puanının yanında ayrıca bağımsız bir veri güvenilirliği sınıfı tanımlanmalıdır:

- A sınıfı: Güncel bina, zemin ve nüfus verisi mevcut.
- B sınıfı: Temel bina verileri mevcut, bazı parametreler tahmini.
- C sınıfı: Yapı sınıfı ve konumu biliniyor, mühendislik parametreleri eksik.
- D sınıfı: Envanter kaydı eski, uyumsuz veya doğrulanmamış.

Risk düzeyi ile veri güvenilirliği birlikte kullanıldığında Tablo 4-5'teki karar matrisi elde edilir.

Tablo 4-5 Risk düzeyi ve veri güvenilirliğine göre karar matrisi

<i>Risk düzeyi</i>	<i>Veri güvenilirliği</i>	<i>Öncelikli işlem</i>
Yüksek	Yüksek	Ayrıntılı performans analizi ve müdahale projesi
Yüksek	Düşük	Acil veri doğrulaması ve hızlı saha taraması
Orta	Yüksek	Programlı güçlendirme veya kullanım düzenlemesi
Orta	Düşük	Envanter tamamlama ve ikinci kademe tarama
Düşük	Yüksek	Periyodik izleme ve bakım
Düşük	Düşük	Veri kalitesini iyileştirme; risk düşük varsayılmamalıdır

Örnek uygulama eşikleri olarak 80–100 puan “çok yüksek”, 65–79 “yüksek”, 50–64 “orta”, 35–49 “düşük” ve 35 altı “çok düşük” öncelik sınıfı kullanılabilir. Bu eşikler pilot çalışmalar ve saha doğrulamaları sonucunda yeniden belirlenmelidir.

4.7 Mekânsal Politika ve İl Grupları

4.7.1 İstanbul: Sistemik ve Ulusal Ölçekli Risk Programı

İstanbul, toplam betonarme stokun yüzde 60,6'sını barındırmakta; yüzde 10/50 yıl düzeyinde yaklaşık 44,76 milyar avro, yüzde 2/50 yıl düzeyinde 90,65 milyar avro yapısal kayıp üretmektedir. Betonarme yapılardaki beklenen can kaybı sırasıyla

38.221 ve 89.771 kişidir. İlin betonarme kaybının yüzde 71'ine yakın bölümü düşük kod düzeyli yedi ve üzeri katlı yapılardan kaynaklanmakta; bu grup yüzde 10/50 yıl senaryosunda tek başına 30,84 milyar avroluk kayıp üretmektedir. Bu nedenle İstanbul riski, yalnızca belediye sınırları içindeki bina güvenliği sorunu değil; finans sistemi, ulaşım, sanayi, ticaret, sağlık ve kamu yönetimini etkileyebilecek ulusal ölçekli sistemik bir risk olarak ele alınmalıdır.

İstanbul için önerilen öncelikler şunlardır:

- Düşük kodlu orta ve yüksek katlı yapıların bina bazında belirlenmesi,
- Yüksek katlı yapıların uzun periyot etkileri ve ekonomik kayıp katkısı açısından özel değerlendirilmesi,
- Hastane, okul, itfaiye, haberleşme ve ulaşım yapılarında hizmet sürekliliği analizi,
- İlçe ve mahalle ölçeğinde göçme, yol kapanması ve enkaz haritalarının hazırlanması,
- Finansal sektör ve kamu bütçesi için İstanbul'a özel olası en büyük kayıp modeli,
- Konutların yanı sıra işyeri ve gündüz nüfusu senaryolarının modele eklenmesi,
- Bir ilçedeki kaybın komşu ilçelerin tahliye, sağlık ve lojistik kapasitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi.

4.7.2 Kocaeli–Sakarya–Yalova: Yakın-Fay ve Yüksek Göreli Kırılabilirlik Programı

Kocaeli, Sakarya ve Yalova'da mutlak kayıp İstanbul'dan düşük olmakla birlikte birim yapı ve toplam maruziyet içindeki kayıp oranları yüksektir. Yüzde 10/50 yıl düzeyinde kayıt bazında ortalama kayıp oranı Kocaeli'nde yüzde 49,0, Sakarya'da yüzde 40,2 ve Yalova'da yüzde 40,0'dır. Maruziyete oranlı kayıp Kocaeli'nde yüzde 29,2, Sakarya'da yüzde 28,8'dir. Bu üç ilde can kaybının gece nüfusuna oranı da yüzde 0,21 ile 0,30 aralığındadır.

Bu ekseninde önerilen politika şu esaslara dayanmalıdır:

- Yakın-fay yer hareketi ve yerel zemin koşullarının daha yüksek çözünürlükte modellenmesi,
- Düşük kodlu dört-altı katlı yapıların kapsamlı hızlı taraması,
- Sanayi tesisleri ve tehlikeli madde içeren işletmeler için deprem ve ikincil kaza (NaTech) senaryoları,
- Liman, karayolu, demiryolu, enerji ve haberleşme sistemleri için ağ sürekliliği analizi,
- İl sınırlarını aşan ortak arama-kurtarma ve sağlık kaynak planlaması,
- Yalova gibi küçük fakat görece riski yüksek illerde nüfus büyüklüğünün riski olduğundan düşük göstermesinin önlenmesi.

4.7.3 Bursa ve Tekirdağ: Şiddetli Deprem Düzeyine Duyarlılık Programı

Bursa'da ekonomik kayıp yüzde 10/50 yıl düzeyinde 0,70 milyar avro iken, yüzde 2/50 yıl düzeyinde 4,71 milyar avroya çıkmaktadır. Betonarme yapılardaki beklenen can kaybı 320 kişiden 5.252 kişiye yükselmekte, nüfusa oranlı risk yüzde 0,01'den yüzde 0,22'ye çıkmaktadır. Tekirdağ'da kayıp 0,35 milyar avrodan 1,86 milyar avroya, can kaybı 161 kişiden 1.634 kişiye yükselmektedir. Bursa'nın DD-1/DD-2 pik yer ivmesi oranının yaklaşık 2,13 olması da bu duyarlılığı desteklemektedir.

Bu iller, olağan tasarım düzeyinde görece sınırlı görünen ancak düşük olasılıklı şiddetli yer hareketinde hızla büyüyen riskin ayrı izlenmesi gereken alanlardır. Bu illerde şu başlıklar önceliklendirilmelidir:

- DD-1 duyarlılık haritalarının üretilmesi,
- Kritik kamu yapılarında ileri performans analizi,
- Yerel zemin ve havza etkilerinin belirlenmesi,
- Yeni gelişme alanlarında risk duyarlı arazi kullanım kararları,
- Bölgesel tahliye ve lojistik bağlantılarının sürekliliği.

4.7.4 Balıkesir, Çanakkale, Bilecik, Edirne ve Kırklareli: Düşük Mutlak Kayıp, Süreklilik ve Veri Tamamlama Programı

Bu illerde model sonuçları daha düşük tehlike ve kayıp değerleri üretmektedir; beş ilin toplam ekonomik kaybı yüzde 10/50 yıl düzeyinde 0,26 milyar avro düzeyinde kalmaktadır. Bununla birlikte düşük bölgesel ortalama, belirli ilçelerde veya zayıf yapı gruplarında yüksek yerel risk bulunmadığı anlamına gelmez. Ayrıca raporun hasar, göçme ve can kaybı analizleri betonarme yapıları kapsadığından, yığma yapı stokunun daha önemli olduğu bu illerde toplam risk olduğundan düşük temsil edilmiş olabilir. Bu illerde politika odağı şu başlıklarda olmalıdır:

- Envanter ve yerel zemin verisinin tamamlanması,
- Yığma ve diğer betonarme dışı yapıların analize eklenmesi,
- Kritik kamu binalarının değerlendirilmesi,
- Ana ulaşım, lojistik ve sağlık destek işlevlerinin sürekliliği,
- Komşu yüksek riskli illere afet sonrası destek sağlayabilme kapasitesi.

4.8 Temel Risk Azaltma Politika Paketleri

4.8.1 Risk Esaslı Yapı Stoku Dönüşüm Programı

Programın birinci hedefi, düşük kod düzeyli dört-altı katlı betonarme yapılarda beklenen göçme ve can kaybını azaltmak olmalıdır. Bununla birlikte aynı yapı sınıfındaki bütün binalar eşit riskli kabul edilmemelidir. Yerel zemin, bina doluluğu, yapısal düzensizlik ve kritik kullanım gibi parametreler kullanılarak grup içi sıralama yapılmalıdır. Müdahale seçenekleri dört sınıfta ele alınmalıdır:

- a) Güçlendirme,
- b) Yeniden yapım,
- c) Kullanım türü veya kullanıcı yoğunluğu değişikliği,
- d) Geçici kullanım kısıtlaması ve izleme.

Karar, yalnızca müdahale maliyetine göre değil; müdahale sonucunda önlenerek göçme, can kaybı ve ekonomik kayıp birlikte değerlendirilerek verilmelidir.

4.8.2 Yüksek Katlı Yapılar ve Uzun Periyot Risk Programı

Raporun ekonomik kayıp ayrışımı, düşük kod düzeyli yedi ve üzeri katlı yapıların betonarme kaybın yüzde 67,7'sini ürettiğini göstermektedir. Bu grup stokun yalnızca yüzde 4,9'unu oluşturduğundan, birim müdahale başına kaçınılan ekonomik kayıp bakımından en yüksek kaldıracı sahip yapı sınıfıdır. Buna ek olarak İstanbul ve Kocaeli'nde uzun periyot spektral değerlerinin TBDY karşılaştırmasında yüksek çıkması, yedi ve üzeri katlı yapıların yalnızca standart pik yer ivmesi veya kısa periyot parametreleriyle değerlendirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu program:

- Saha özelinde zemin ve tasarım spektrumunun belirlenmesini,
- Taşıyıcı sistem performansını,
- Yapısal olmayan elemanları,
- Cephe, mekanik tesisat ve asansör sistemlerini,
- Tahliye süresini,
- Yangın sonrası müdahale kapasitesini,
- Deprem sonrasında binanın yeniden kullanılabilirliğini
- ve müdahale sonrası kaçınılan ekonomik kaybı

birlikte değerlendirmelidir. Program, sayıca sınırlı bir yapı grubunu hedeflediğinden, bina bazlı ayrıntılı envanter çıkarımı görece kısa sürede tamamlanabilir ve erken kazanım sağlayabilir.

4.8.3 Kritik Altyapı ve Hizmet Sürekliliği Programı

Bina kayıpları; elektrik, su, doğalgaz, haberleşme, ulaşım ve sağlık sistemlerinin işlev kaybıyla birleştiğinde bölgesel sonuçlar önemli ölçüde büyüyebilir. Bu nedenle kritik altyapılar bağımsız tesisler olarak değil, birbirine bağımlı ağlar olarak analiz edilmelidir. Her kritik sistem için hizmet dışı kalma olasılığı, tamir süresi, alternatif besleme veya güzergâh, yedek kapasite, personel erişimi ve dış sistemlere bağımlılık hesaplanmalıdır. Temel performans ölçütü "hasar görüp görmemesi" değil, "depremden sonra asgari hizmet düzeyine ne kadar sürede dönebildiği" olmalıdır.

4.8.4 Can Kaybı ve Acil Müdahale Kapasitesi Programı

Rapordaki göçme ve can kaybı değerleri, arama-kurtarma kaynaklarının nüfusa göre eşit dağıtılması yerine beklenen operasyon yüküne göre konumlandırılmasını gerektirmektedir. Aşağıdaki somut planlar hazırlanmalıdır:

- Beklenen göçme kümelerine göre arama-kurtarma ekip üsleri,
- Ağır iş makinesi ve kesme-kaldırma ekipmanı dağılımı,
- Hastane ve sahra hastanesi kapasitesi,
- Ana ve alternatif ambulans güzergâhları,
- Toplanma ve geçici barınma alanı kapasitesi,
- Enkaz taşıma rotaları,
- Kritik ilk 24 saat, 72 saat ve 7 günlük kaynak planları.

Can kaybı modelinin gece nüfusu varsayımına dayanması nedeniyle gündüz, iş saati, okul saati ve ulaşım yoğunluğu senaryoları ayrıca hesaplanmalıdır. Raporda da belirtildiği üzere can kaybı modeli ekonomik kayıp modelinden daha belirsizdir, gözlemlere kıyasla hafif azımsama eğilimindedir ve Türkiye'ye özgü yumuşak kat veya sünek olmayan betonarme davranışlarını tam olarak temsil etmemektedir.

4.8.5 Finansal Dayanıklılık ve Risk Transferi Programı

Ekonomik kayıp değerleri, risk azaltma yatırımları ile afet sonrası finansman ihtiyacının birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Kaybın yapı grubu ayrışımı, finansal araçların hedeflenmesinde doğrudan kullanılmalıdır: düşük kod düzeyli yüksek katlı stok hem sigorta portföyünde hem de güçlendirme kredisi programlarında öncelikli hedef grubu oluşturmaktadır. Önerilen finansal çerçeve şu bileşenleri içermelidir:

- Ortalama yıllık kayıp hesabı,
- Olası en büyük kayıp hesapları,
- Merkezi ve yerel afet rezervleri,
- Sigorta ve reasürans kapasitesi,
- Koşullu afet finansmanı,
- Kamu binaları ve altyapılar için risk transferi,
- Güçlendirme kredileri ve teşvikleri,
- Müdahale projelerinde maliyet-fayda analizi.

4.8.6 Yerel Zemin ve Risk Duyarlı Mekânsal Planlama Programı

Mevcut tehlike sonuçları $V_{s30} = 760$ m/s referans kaya düzeyindedir. İl merkezleri tek hesap noktasıyla temsil edilmiş, haritalar yaklaşık 10–11 kilometre çözünürlüklü grid üzerinden üretilmiştir. Bu nedenle sonuçlar mahalle veya parsel ölçeğinde doğrudan kullanılmamalıdır. İkinci aşamada mikro-bölgeleme, yerel V_{s30}

ölçümleri, zemin büyütmesi, sıvılaşma potansiyeli, havza etkileri, şev ve heyelan duyarlılığı ile fay yakınlığı ve yüzey deformasyonu mekânsal planlama kararlarına eklenmelidir.

Yeni yapılaşma alanlarında yalnızca yapı yönetmeliğine uygunluk değil; altyapı erişimi, tahliye olanağı, kritik tesislere uzaklık ve afet sonrası hizmet sürekliliği de plan kararının parçası olmalıdır.

4.8.7 Güncel Envanter ve Veri Yönetişimi Programı

Raporda kullanılan ESRM20 maruziyet modeli, Türkiye için 2000 Bina Sayımı ile 2001–2017 yapı ruhsatı istatistiklerine dayanmakta ve yaklaşık 2017 yılına kadarki ruhsatlı yapı stokunu temsil etmektedir. Buna göre 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında inşa edilen yapılar ile ruhsatsız yapılaşma modelde yer almamaktadır. Operasyonel kullanım öncesinde envanterin bu zaman kapsamı güncellenmeli ve nihai veri sürümü tek bir tarih ve yöntem tanımıyla belgelenmelidir. Ayrıca hasar dağılımı hesabının stokun yüzde 98,85'i üzerinden yürütülmüş olması nedeniyle, kırılabilirlik veya şiddet ölçüsü eşleşmesi sağlanamayan kayıtların gerekçesi kayıt altına alınmalı ve giderilmelidir.

Önerilen veri yönetişimi ilkeleri şunlardır:

- Her bina için tekil ve kalıcı yapı kimlik numarası,
- Kurumlar arasında ortak veri sözlüğü,
- Yapı, zemin, nüfus ve ekonomik değer verilerinin sürüm kontrolü,
- Değişikliklerin tarihçe kayıtlarıyla tutulması,
- Yıllık veri güncellemesi,
- Model girdileri ve sonuçlarının yeniden üretilebilir olması,
- OpenQuake hesap dosyalarının, şiddet ölçüsü listesinin, parametrelerin ve mantık ağacı sürümlerinin arşivlenmesi,
- Gizlilik ve erişim yetkilerinin veri türüne göre tanımlanması.

4.9 Uygulama Yol Haritası

Önerilen aşamalı uygulama programı Tablo 4-6'da sunulmaktadır. Program, can güvenliği ve ekonomik dayanıklılık izlerinin eş zamanlı fakat farklı hızlarda ilerlemesini öngörmektedir.

Tablo 4-6 Önerilen aşamalı uygulama programı

Aşama	Süre	Temel faaliyetler	Ana çıktılar
Hazırlık ve kalite güvence	0–6 ay	Veri referans yılının netleştirilmesi, hesap künyesinin belgelenmesi, kurumsal görev paylaşımı, ortak veri modeli ile yöntem ve gösterge standardı	Uygulama protokolü, veri sözlüğü, hesap künyesi ve kalite güvence raporu

Aşama	Süre	Temel faaliyetler	Ana çıktılar
Envanter ve model güncelleme	6–18 ay	Güncel bina, nüfus, zemin ve ekonomik değer verilerinin toplanması; pilot alanlarda bina bazlı eşleştirme	Güncel maruziyet veri tabanı, ilçe ve mahalle risk haritaları
Öncelikli hızlı tarama (can güvenliği izi)	12–36 ay	Düşük kodlu dört-altı katlı yapıların ve kritik kamu binalarının taranması	Bina öncelik listeleri, ayrıntılı inceleme programı
Yüksek katlı stok envanteri (ekonomik iz)	12–24 ay	Düşük kodlu yedi ve üzeri katlı yapıların bina bazında belirlenmesi, uzun periyot ve ekonomik kayıp değerlendirmesi	Yüksek katlı yapı risk envanteri, sigorta ve finansman hedef listesi
Ayrıntılı risk ve proje geliştirme	18–48 ay	Yüksek riskli binaların performans analizi; güçlendirme ve yenileme projeleri; maliyet-fayda değerlendirmesi	Müdahale proje havuzu, finansman planı
Kritik altyapı ve hizmet sürekliliği	18–48 ay	Altyapı ağlarının ve kritik tesislerin sistem analizi	Hizmet sürekliliği planları, yedeklilik yatırımları
Ölçekli uygulama	3–10 yıl	Güçlendirme, yeniden yapım, altyapı iyileştirmesi ve risk transferi	Azaltılmış göçme, can kaybı ve ekonomik kayıp
Sürekli izleme	Yıllık	Envanter ve model güncelleme, müdahale sonrası yeniden analiz	Yıllık Marmara Deprem Riski İzleme Raporu

İlk uygulama döneminde bütün bölgeyi eş zamanlı olarak bina bazında analiz etmek yerine pilot alanlar seçilmesi önerilmektedir. Pilotların farklı risk karakterlerini temsil etmesi gerekir:

- İstanbul'da yüksek maruziyetli ve düşük kodlu yüksek katlı yapıların bulunduğu bir alan,
- Kocaeli veya Sakarya'da yakın-fay ve düşük kodlu orta katlı yapıların yoğun olduğu bir alan,
- Yalova'da küçük nüfuslu fakat yüksek göreceli riskli bir alan,
- Bursa'da DD-1 düzeyinde kaybın keskin arttığı bir alan,
- Trakya'da görece düşük tehlikeli fakat envanter doğrulaması gereken bir alan.

Pilot sonuçlarıyla risk puanları, kırılabilirlik fonksiyonları, birim maliyetler ve uygulama süreleri kalibre edilerek bölgesel programa geçilmelidir.

4.10 İzleme ve Performans Göstergeleri

Risk azaltma programının başarısı yalnızca yapılan harcama veya dönüştürülen bina sayısı ile ölçülmemelidir. Asıl göstergeler, beklenen sonuçlardaki azalma olmalıdır. Önerilen gösterge seti Tablo 4-7’de verilmektedir.

Tablo 4-7 Önerilen performans göstergeleri

Gösterge	Hesaplama veya tanım	İzleme sıklığı
Güncel bina envanteri kapsamı	Güncel ve konumlandırılmış bina sayısı / toplam bina sayısı	Yıllık
Öncelikli yapı tarama oranı (can güvenliği izi)	Taranan düşük kodlu dört-altı katlı bina / hedef gruptaki toplam bina	Altı aylık
Yüksek katlı stok envanter oranı (ekonomik iz)	Bina bazında belirlenen düşük kodlu yedi ve üzeri katlı yapı / hedef gruptaki toplam bina	Altı aylık
Ayrıntılı değerlendirme oranı	Performans analizi tamamlanan yüksek öncelikli bina / yüksek öncelikli bina toplamı	Yıllık
Müdahale edilen yüksek riskli bina	Güçlendirilen, yenilenen veya kullanım kararı değiştirilen bina sayısı	Altı aylık
Beklenen göçme azalması	Başlangıç ve güncel model arasındaki göçen bina farkı	Yıllık
Beklenen can kaybı azalması	Başlangıç ve güncel model arasındaki beklenen can kaybı farkı	Yıllık
Kaçınılan ekonomik kayıp	Müdahale öncesi ve sonrası beklenen doğrudan kayıp farkı; yapı grubu bazında ayrıştırılmış	Yıllık
Kritik hizmet geri dönüş süresi	Elektrik, su, sağlık, ulaşım ve haberleşmenin hedef hizmet düzeyine dönüş süresi	Tatbikat ve model güncellemesi sonrası
Mikro-bölgeleme kapsamı	Ayrıntılı zemin çalışması tamamlanan yerleşim alanı oranı	Yıllık
Veri güvenilirliği	A ve B güvenilirlik sınıfındaki bina kayıtlarının toplam içindeki payı	Yıllık
Finansal koruma oranı	Önceden düzenlenmiş finansman ve risk transferinin tahmini afet finansman ihtiyacına oranı	Yıllık
Model güncelliği	Son kapsamlı model güncellemesinden itibaren geçen süre	Sürekli

Müdahale programları her yıl veya önemli veri güncellemelerinden sonra yeniden modellenmelidir. Böylece “kaç bina güçlendirildi?” sorusuna ek olarak “beklenen göçme, can kaybı ve ekonomik kayıp ne kadar azaldı?” sorusu da cevaplanabilir.

4.11 Teknik ve Kurumsal Kalite Güvence İhtiyacı

Rapor sonuçlarının operasyonel politika ve bütçe kararlarında kullanılabilmesi için aşağıdaki kalite güvence işlemleri tamamlanmalıdır:

- Hasar dağılımı hesabına henüz dâhil edilmeyen 16.981 binalık farkın gerekçesi belgelenmeli ve mümkünse giderilmelidir.
- Kırılgenlik hesaplarında kullanılan SA(0,3) ve SA(0,6) ordinatlarının üretim yöntemi, hesap künyesinde açıkça tanımlanmalıdır.
- PSHA sonuçlarının TBDY 2018 tasarım spektrumuna oranı, tüm iller ve her iki tehlike düzeyi için tablo halinde raporlanmalıdır.
- Mantık ağacından elde edilen ortalama değerlerin yanında fraktil değerler verilerek epistemik belirsizlik bandı gösterilmelidir.
- İl merkezi hesap noktalarıyla grid haritaları arasındaki kullanım ayrımı açık biçimde korunmalıdır.
- Referans kaya sonuçları hiçbir karar ürününde yerel zemin değerleri olarak sunulmamalıdır.
- Can kaybı sonuçları kesin tahmin değil, beklenen değer ve belirsizlik aralığıyla sunulmalıdır.
- Betonarme dışı yapı stoku için ayrı kırılgenlik, hasar ve can kaybı değerlendirmesi yapılmalıdır.
- Türkiye'ye özgü yumuşak kat, kısa kolon, düşük beton dayanımı, korozyon ve sünek olmayan detaylar modele eklenmelidir.
- Ekonomik kayıp değerleri bütçe çalışmalarında kullanılmadan önce güncel fiyat düzeyine taşınmalıdır.
- Müdahale sonrası riskin yeniden hesaplanabileceği standart bir “önce–sonra” analiz protokolü hazırlanmalıdır.
- Model sonuçları gözlemsel saha verileri, geçmiş deprem hasarları ve pilot bina incelemeleriyle kalibre edilmelidir.

Raporun mevcut sınırlılıkları, sonuçların değersiz olduğu anlamına gelmemekte; hangi karar ölçeğinde kullanılabileceğini tanımlamaktadır. Bölgesel sonuçlar stratejik önceliklendirme için yeterli bir başlangıç oluşturmakta; bina veya parsel ölçeğindeki kararlar ise daha ayrıntılı veri ve mühendislik analizini gerektirmektedir.

4.12 Bölüme Dair Temel Bulgular ve Sonuçlar

Bu rapordan elde edilebilecek en önemli somut çıktı, Marmara Bölgesi için yalnızca bir deprem tehlike haritası değil, risk esaslı bir yatırım ve müdahale programı oluşturulabilmesidir. Rapor; mutlak ekonomik ve insani kaybın İstanbul’da, görece kırılabilirliğin Kocaeli–Sakarya–Yalova ekseninde, göçme ve can kaybı riskinin düşük kod düzeyli orta katlı betonarme yapılarda, ekonomik kaybın ise düşük kod düzeyli yüksek katlı yapılarda yoğunlaştığını göstermektedir. Bu dört bulgu, yapı stoku müdahalelerinin, finansal hazırlığın ve acil müdahale kapasitesinin aynı ölçüde göre değil, farklı risk bileşenlerine göre düzenlenmesini gerektirmektedir. Bu ayrışma, tehlike tarafında da desteklenmektedir: DD-2 düzeyinde bölge genelinde yaygın bir tehlike tabanı görülürken, DD-1 düzeyinde Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun Marmara segmentlerine yakın illerde belirgin bir yoğunlaşma ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla tek bir eşik değere dayanan müdahale kararı, hem yüksek tehlikeli hem de yüksek kırılabilirlikli alanların birlikte ele alınmasını engelleyecektir.

Önerilen yaklaşımın temel ilkesi, kaynakların en fazla binanın yenilendiği yere değil, en fazla can kaybının, göçmenin, ekonomik zararın ve hizmet kesintisinin önlenemediği müdahalelere yönlendirilmesidir. İki izli önceliklendirme bu ilkenin doğrudan uygulamasıdır: can güvenliği izi beklenen göçme ve can kaybını, ekonomik dayanıklılık izi ise kaçınılan yapısal kaybı en büyüleyecek biçimde kurgulanmalıdır. Bunun için mevcut bölgesel model; güncel bina envanteri, yerel zemin verileri, gündüz ve gece nüfusu, kritik altyapı ağları ve ekonomik faaliyet verileriyle genişletilmelidir. Genişletilmiş model, il ölçeğinden mahalle ve bina ölçeğine inildiğinde önceliklendirmenin çözünürlüğünü artıracak; kısa ve uzun periyot spektral ivme farklılıklarının yapı tipine göre yarattığı risk ayrışmasının da karar süreçlerine yansıtılmasını sağlayacaktır. Bu kapsamda her iki iz için ölçülebilir hedefler, bütçe tavanları ve yıllık gerçekleşme oranları tanımlanmalıdır.

Nihai hedef, periyodik rapor üreten statik bir çalışma değil; her yeni veri, yapı müdahalesi ve planlama kararı sonrasında risk sonuçlarını yeniden hesaplayan Marmara Deprem Risk Karar Destek ve İzleme Sistemi kurulmasıdır. Böyle bir sistem, güçlendirme ve dönüşüm yatırımlarının etkisini ölçülebilir hale getirecek; merkezi ve yerel kurumların ortak öncelikler etrafında hareket etmesini sağlayacak; afet öncesi risk azaltma ile afet sonrası müdahale ve iyileştirme planlarını aynı bilimsel çerçevede birleştirecektir. Sistemin sürdürülebilirliği, kurumsal sahiplik ve veri yönetişiminin açık biçimde tanımlanmasına bağlıdır; veri güncelleme sıklığı, sorumlu birimler ve paylaşım protokolleri baştan belirlenmelidir. Ayrıca sonuçların şeffaf biçimde raporlanması, yerel yönetimlerin ve kamuoyunun risk azaltma programlarına katılımını güçlendirecektir.

5 SONUÇLAR ve GENEL DEĞERLENDİRME

Bu rapor, Marmara Bölgesi'nde deprem tehlikesinin mekânsal dağılımını, betonarme bina stokunun yapısal özelliklerini, beklenen hasar ve göçme düzeylerini, doğrudan ekonomik kayıpları ve olası can kayıplarını aynı değerlendirme çerçevesi içinde ele alarak bölgesel deprem riskinin bütüncül görünümünü ortaya koymuştur.

Çalışma; İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne ve Kırklareli olmak üzere Marmara Bölgesi'ndeki 11 ili kapsamış; tehlike, maruziyet ve kırılganlık bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesi yoluyla karşılaştırılabilir risk göstergeleri üretilmiştir. Elde edilen bulgular, deprem riskinin yalnızca aktif faylara yakınlık veya beklenen yer hareketi şiddetiyle açıklanamayacağını; yapı stokunun büyüklüğü ve niteliği, sismik tasarım seviyesi, kat sayısı, nüfus yoğunluğu, ekonomik değer, bina kullanım biçimi ve kritik altyapı bağımlılıklarının birlikte ele alınması gerektiğini açık biçimde göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, Marmara Bölgesi için yalnızca bir deprem tehlike haritalama çalışması değil, risk azaltma politikalarının ve uygulama önceliklerinin belirlenmesine yönelik bilimsel bir karar destek altyapısı niteliğindedir.

Olasılıksal deprem tehlike analizleri, OpenQuake Engine hesap motoru ile ESHM20 sismik kaynak ve yer hareketi modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş; farklı kaynak ve yer hareketi kabullerinden kaynaklanan epistemik belirsizlikler mantık ağacı yaklaşımıyla analize dâhil edilmiştir. Tehlike değerlendirmelerinde 50 yılda yüzde 10 aşılma olasılığına ve yaklaşık 475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen DD-2 ile 50 yılda yüzde 2 aşılma olasılığına ve yaklaşık 2.475 yıllık dönüş periyoduna karşılık gelen DD-1 deprem yer hareketi düzeyleri esas alınmıştır. Pik yer ivmesinin yanı sıra kısa periyot ve uzun periyot spektral ivme değerlerinin hesaplanması, bölgedeki farklı kat yüksekliğine ve dinamik davranışa sahip yapıların maruz kalabileceği deprem etkilerinin daha geniş bir mühendislik perspektifiyle değerlendirilmesini sağlamıştır.

Tehlike haritaları ve il merkezi hesap sonuçları, Marmara Bölgesi'nde sismik tehlikenin homojen dağılmadığını, aktif fay segmentleriyle ilişkili olarak doğu-batı doğrultusunda uzanan bölgesel bir koridor oluşturduğunu göstermiştir. Bu koridorun en belirgin bölümleri Batı Marmara–Gelibolu–Güney Tekirdağ hattı ile Güney İstanbul–Yalova–Kocaeli–Sakarya hattıdır. Kocaeli, il merkezi hesap noktasında DD-2 için 0,488 g ve DD-1 için 0,964 g PGA değeriyle en yüksek temsilî tehlike düzeyine ulaşmış; Sakarya ve Yalova da yüksek tehlike grubunda yer almıştır. İstanbul'un temsilî değerleri Kocaeli, Sakarya ve Yalova'nın altında kalmakla birlikte, güney kıyı kuşağındaki yüksek tehlike, yoğun yapılaşma, yüksek katlı bina varlığı ve olağanüstü büyüklükteki nüfus ve ekonomik maruziyet nedeniyle kentin toplam riskini belirleyici hâle getirmiştir. Edirne ve Kırklareli ise Kuzey Anadolu Fay Sistemi'nden görece uzak konumları nedeniyle daha düşük tehlike değerleri

göstermiştir. Bununla birlikte düşük tehlike düzeyinin düşük riskle eş anlamlı olmadığı; zayıf yapı stoku, yerel zemin koşulları veya kritik işlevlerin yoğunlaşması durumunda bu alanlarda da önemli kayıpların oluşabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

DD-1 ve DD-2 haritalarının birlikte incelenmesi, daha seyrek ancak daha şiddetli deprem düzeyinde yalnızca yer hareketi değerlerinin yükselmediğini, yüksek tehlike sınıflarının mekânsal olarak genişleyerek birbirine bağlandığını göstermiştir. İl merkezi değerlerinde DD-1 yer hareketi talebinin DD-2'ye göre yaklaşık iki kat artması, düşük olasılıklı fakat yüksek sonuçlu deprem senaryolarının özellikle kritik yapılar, büyük sanayi tesisleri, ulaşım düğümleri ve bölgesel hizmet altyapıları için göz ardı edilemeyeceğini ortaya koymaktadır. Bursa'nın DD-1 düzeyinde belirginleşen tehlike ve kayıp duyarlılığı, bu ilin yalnızca standart tasarım depremi çerçevesinde değil, daha şiddetli deprem düzeyleri bakımından da ayrı değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Tekirdağ ve Çanakkale'de ise il merkezi değerleriyle kıyı ve fay yakın kesimlerdeki yerel tehlike düzeyleri arasında önemli farklılıklar bulunması, il ortalamalarının yatırım ve planlama kararları için tek başına yeterli olmadığını doğrulamaktadır. Deprem tehlike ve risk azaltma kararlarının idari sınırlar yerine tehlike koridorları, alt bölgeler, yerel zemin birimleri ve birbirine bağımlı altyapı ağları üzerinden geliştirilmesi gerekmektedir.

ESHM20 tabanlı olasılıksal tehlike sonuçlarının Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 tasarım spektrumlarıyla karşılaştırılması, özellikle Kuzey Anadolu Fay Sistemi'ne yakın illerde uzun periyot etkilerinin önemini ortaya koymuştur. İstanbul'da DD-1 düzeyinde uzun periyot spektral ivme için PSHA/TBDY oranının 1,62'ye, Kocaeli'nde 1,86'ya ulaşması; yüksek katlı, esnek ve uzun doğal titreşim periyoduna sahip yapıların standart değerlendirme yaklaşımlarının ötesinde saha ve yapı özelinde incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Sakarya ve Yalova'da da uzun periyot ordinatlarında yönetmelik değerlerini aşan sonuçların bulunması, yüksek katlı konutlar, hastaneler, iş merkezleri, acil durum yapıları ve kritik kamu tesisleri için özel bir uzun periyot risk programının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte bu karşılaştırmalar, modellerden birinin diğerinin yerine geçmesi biçiminde yorumlanmamalıdır. Kullanılan kaynak modelleri, fay tanımları, deprem katalogları, yer hareketi tahmin ilişkileri ve mantık ağacı yapıları farklı olduğundan, PSHA sonuçları yönetmeliğin alternatifi değil; bölgesel planlama ve ileri mühendislik değerlendirmeleri için tamamlayıcı bir bilimsel gösterge olarak ele alınmalıdır.

Bina maruziyet ve kırılma analizleri, Marmara Bölgesi'ndeki deprem riskinin yapı stoku içinde belirli sınıflarda yoğunlaştığını göstermiştir. İncelenen 1.476.438 betonarme binanın yüzde 42,3'ü bir ila üç katlı, yüzde 46,6'sı dört ila altı katlı ve yüzde 11,2'si yedi ve üzeri katlıdır. Betonarme stokun yüzde 57,9'unun düşük sismik kod düzeyinde bulunması ve toplam stokun yüzde 30,6'sını düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapıların oluşturması, bölgesel kırılma eğiliminin temel kaynağını tanımlamaktadır. İstanbul toplam betonarme bina stokunun yüzde 60,6'sını barındırırken Bursa yüzde 11,6 ve Kocaeli yüzde 8,3'lük paya sahiptir. Bu dağılım, İstanbul'daki toplam kayıp büyüklüğünü açıklarken, düşük kodlu orta katlı yapıların

bölge genelindeki yüksek göçme ve can kaybı katkısını da desteklemektedir. Sorunun yalnızca çok eski veya kod öncesi binalardan oluşmadığı; sınırlı sismik tasarım hükümlerine göre inşa edilmiş ve sayıca çok büyük bir grubu oluşturan orta katlı yapıların risk azaltma programlarının odağında bulunması gerektiği anlaşılmıştır.

Hasar analizleri, deprem yer hareketi düzeyinin ağırlaşmasıyla bina stokundaki hasar dağılımının köklü biçimde değiştiğini ortaya koymuştur. Yüzde 10/50 yıl senaryosunda betonarme binaların önemli bir bölümü hasarsız veya hafif hasarlı durumda kalırken, yüzde 2/50 yıl senaryosunda hasarsız bina sayısı 384.786'ya düşmekte ve tam hasar veya göçme önlenmesi düzeyindeki bina sayısı 521.731'e yükselmektedir. Böylece daha şiddetli deprem düzeyinde DS4, betonarme stok içindeki en büyük hasar grubuna dönüşmektedir. HAZUS koşullu göçme oranlarının uygulanması sonucunda, yüzde 10/50 yıl düzeyinde yaklaşık 18.985, yüzde 2/50 yıl düzeyinde ise yaklaşık 51.683 betonarme binanın göçmesi beklenmektedir. Bu değerler toplam betonarme stokun sırasıyla yüzde 1,29'una ve yüzde 3,50'sine karşılık gelmektedir. Düşük kod düzeyli dört ila altı katlı yapıların beklenen göçmeler içindeki payının ilk senaryoda yüzde 80,7, ikinci senaryoda yüzde 67,6 olması, bu yapı grubunun güçlendirme, yeniden yapım, kullanım kısıtlaması ve ayrıntılı performans değerlendirmelerinde birinci öncelikli hedef olması gerektiğini göstermektedir.

Ekonomik kayıp analizleri, Marmara Bölgesi'nde deprem riskinin ülke ekonomisi üzerinde sistemik sonuçlar doğurabilecek büyüklükte olduğunu göstermiştir. Bölge genelinde beklenen toplam yapısal kayıp yüzde 10/50 yıl senaryosunda yaklaşık 52,4 milyar avro, yüzde 2/50 yıl senaryosunda ise yaklaşık 110,8 milyar avrodur. İstanbul'da hesaplanan yaklaşık 44,76 ve 90,65 milyar avroluk kayıplar, kentin toplam ekonomik riskte açık ara belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık Kocaeli, Sakarya ve Yalova'da ortalama ve maruziyete oranlı kayıp değerlerinin yüksek olması, bu illerin göreceli kırılganlık bakımından ön plana çıktığını göstermektedir. Dolayısıyla İstanbul için yüksek mutlak ve sistemik kaybı yönetecek ulusal ölçekte bir ekonomik dayanıklılık ve finansman modeli geliştirilirken, Kocaeli-Sakarya-Yalova ekseninde varlık başına yüksek hasar ve kritik altyapı sürekliliğine odaklanan farklılaştırılmış bir risk azaltma programı uygulanmalıdır. Risk finansmanı, afet rezervleri, sigorta ve reasürans kapasitesi, koşullu finansman, güçlendirme kredileri ve risk transferi araçları bu çerçevede birlikte ele alınmalıdır.

Can kaybı analizleri de ekonomik kayıp sonuçlarıyla uyumlu, ancak yapı kırılganlığı bakımından daha keskin bir örüntü ortaya koymuştur. Betonarme yapılardaki beklenen can kaybı yüzde 10/50 yıl senaryosunda 46.199, yüzde 2/50 yıl senaryosunda 109.357 kişi olarak hesaplanmıştır. İstanbul'da beklenen can kayıplarının 38.221 ve 89.771 kişi düzeyine ulaşması, toplam nüfus ve yapı maruziyetinin sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisini göstermektedir. Kocaeli ve Sakarya ise hem mutlak değerler hem de betonarme yapılardaki gece nüfusuna

oranlı sonuçlar bakımından yüksek risk göstermektedir. Can kayıplarının düşük kod düzeyli orta ve yüksek katlı yapılarda yoğunlaşması; yapı dönüşümünün yanında arama-kurtarma üslerinin, sağlık kapasitesinin, ağır ekipmanların, tahliye güzergâhlarının, geçici barınma alanlarının ve ilk 24–72 saatlik operasyon planlarının beklenen göçme kümelerine göre düzenlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu sonuçlar, acil müdahale kapasitesinin yalnızca il nüfusuna göre değil, olası enkaz, can kaybı ve ulaşılabilirlik dağılımına göre planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bütünleşik değerlendirme sonucunda Marmara Bölgesi'nde üç farklı mekânsal risk karakteri belirginleşmektedir. İstanbul, toplam yapı stoku, nüfus, ekonomik değer ve kritik işlevlerin yoğunluğu nedeniyle mutlak ve sistemik riskin merkezidir. Kocaeli, Sakarya ve Yalova; yakın-fay etkisi, yüksek göreceli kayıp oranları ve sanayi, liman, enerji ve ulaşım altyapılarının yoğunluğu nedeniyle göreceli kırılganlık ve hizmet sürekliliği açısından öncelikli eksen oluşturmaktadır. Bursa ve kısmen Tekirdağ ise düşük olasılıklı daha şiddetli deprem düzeyine geçildiğinde kayıpların hızla yükseldiği alanlar olarak ayrı bir duyarlılık profili göstermektedir. Balıkesir, Çanakkale, Bilecik, Edirne ve Kırklareli'nde mutlak kayıplar görece düşük olmakla birlikte, il içi farklılıkların, betonarme dışı yapı stokunun, yerel zeminlerin ve bölgesel destek işlevlerinin ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle Edirne ve Kırklareli'nin göreceli düşük tehlike düzeyleri, uygun altyapı ve erişim koşulları sağlandığında bu illerin afet sonrası lojistik, geçici depolama ve destek kapasitesi bakımından bölgesel rol üstlenebileceğini düşündürmektedir.

Bununla birlikte rapor sonuçlarının kullanımında yöntemsel ve veri kaynaklı sınırlılıklar açık biçimde dikkate alınmalıdır. Tehlike hesapları $Vs_{30} = 760$ m/s referans kaya koşulunda gerçekleştirilmiştir; İstanbul havzaları, Bursa ve Sakarya ovaları, İzmit Körfezi kıyıları ve diğer alüvyal alanlardaki zemin büyütmesi, sıvılaşma ve havza etkileri sonuçlarda doğrudan temsil edilmemektedir. Yaklaşık 10–11 kilometrelik grid çözünürlüğü bölgesel planlama için uygun olmakla birlikte mahalle, parsel veya tekil bina düzeyinde karar vermek için yeterli değildir. İl merkezlerine ait hesap noktaları da il genelinin tamamını temsil eden değerler olarak kullanılmamalıdır. Ayrıca PGA tek başına bütün yapı tiplerinin davranışını açıklamadığından, orta ve yüksek katlı yapılar için spektral ivme, eşdeğer tehlike spektrumu ve yerel saha tepkisi analizleri birlikte değerlendirilmelidir. Can kaybı analizlerinin gece nüfusuna dayanması ve betonarme dışı yapıların kapsamaması da sonuçların operasyonel kullanımdan önce güncellenmesini gerektirmektedir.

Sonuç olarak bu raporun ana çıktısı, Marmara Bölgesi'nde deprem riskinin nerede ve neden yoğunlaştığını belirleyen, sayısal bulguları uygulanabilir politika ve yatırım önceliklerine dönüştüren bütünleşik bir çerçevenin kurulmuş olmasıdır. Deprem tehlikesi Kocaeli–Sakarya–Yalova–İstanbul hattında yoğunlaşmakta; mutlak ekonomik ve insani kayıp İstanbul'un çok büyük maruziyeti nedeniyle İstanbul merkezli hâle gelmekte; göçme ve can kaybının temel kaynağını düşük kod düzeyli dört ila altı katlı betonarme yapılar, ekonomik kaybın baskın kaynağını ise

düşük kod düzeyli yedi ve üzeri katlı betonarme yapılar oluşturmaktadır. Yüksek kod düzeyli yapıların görece daha iyi performansı, güncel mühendislik tasarımı, etkin denetim ve uygun yapım uygulamalarının risk azaltmadaki belirleyici önemini doğrulamaktadır.

Bu bulguların politika ve uygulama karşılıkları, önerilen risk azaltma paketleri, çok ölçütlü önceliklendirme sistemi, aşamalı uygulama takvimi ve izleme göstergeleri raporun dördüncü bölümünde ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bu çerçevede Marmara Bölgesi için izlenecek yol; güncel ve bina bazlı envanterin oluşturulması, düşük kod düzeyli orta katlı yapıların öncelikli olarak taranması, yüksek riskli yapıların güçlendirilmesi veya yenilenmesi, yüksek katlı yapıların uzun periyot etkileri bakımından yeniden değerlendirilmesi, mikro-bölgeleme çalışmalarının yaygınlaştırılması, kritik altyapı ağlarının hizmet sürekliliğinin güvence altına alınması ve afet finansmanı araçlarının geliştirilmesinden oluşmalıdır. İstanbul için ulusal ölçekli sistemik risk ve finansman programı; Kocaeli–Sakarya–Yalova için yakın-fay, sanayi ve altyapı sürekliliği programı; Bursa ve Tekirdağ için şiddetli deprem duyarlılığı programı; diğer iller için ise veri tamamlama, yerel kırılma ve bölgesel destek kapasitesi programları birlikte yürütülmelidir.

Nihai hedef, belirli bir tarihte tamamlanmış statik bir rapor üretmekten öte; yeni bina, nüfus, zemin ve altyapı verileriyle sürekli güncellenen, yapılan her müdahalenin risk azaltma etkisini yeniden hesaplayan bir **Marmara Deprem Risk Karar Destek ve İzleme Sistemi** oluşturmaktır. Böyle bir sistem; tehlike, maruziyet, kırılma ve yönetim kapasitesini ortak bir mekânsal altyapıda birleştirerek merkezi yönetim, yerel yönetimler, altyapı işletmecileri, sanayi kuruluşları ve diğer paydaşların aynı veri ve karar dili üzerinden hareket etmesini sağlayacaktır. Marmara Bölgesi'nde depreme karşı kalıcı dirençlilik, yalnızca afet sonrasındaki müdahale kapasitesinin artırılmasıyla değil; afet öncesinde yapı kırılma ve yönetimin, ekonomik maruziyetin ve toplumsal hassasiyetlerin ölçülebilir, izlenebilir ve sürekli güncellenen bir programla azaltılmasıyla mümkün olacaktır.

MARAP – Deprem Tehlike-Risk Analizleri Yönetici Özeti

Marmara Bölgesi (11 il) • Temmuz 2026

1 Kapsam ve Yöntem

11 il: İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Yalova, Bursa, Tekirdağ, Çanakkale, Balıkesir, Bilecik, Edirne, Kırklareli.

Yöntem: Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi (PSHA)

Hesap motoru: OpenQuake Engine 3.16.7

Modeller: ESHM20 (tehlike) · ESRM20 (maruziyet)
Referans zemin: Vs30 = 760 m/s (ZB kaya)

Tasarım düzeyleri:

DD-2 = 50 yılda %10 (Tr=475 yıl)

DD-1 = 50 yılda %2 (Tr=2475 yıl)

2 Deprem Tehlikesi: Bölgesel Görünüm



En yüksek: Kocaeli-Sakarya-Yalova-İstanbul
En düşük: Kırklareli ve Edirne

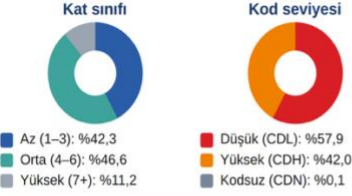
PGA DD-1 (g)	
Kocaeli	0.964
Sakarya	0.834
Yalova	0.803
İstanbul	0.696
Edirne	0.280
Kırklareli	0.187

Değerler il merkezi hesap noktalarına aittir.

3 Betonarme Bina Stoğu

Toplam betonarme bina:

1.476.438



İl bazında stok payı

İstanbul %60,6 · Bursa %11,6 · Kocaeli %8,3 · diğer 8 il %19,5

En kritik grup: düşük kod düzeyli 4-6 katlı binalar (stoğun %30,6'sı).

4 Hasar ve Göçme Beklentisi

%10/50 yıl senaryosu

DS0	Hasarsız	826.139
DS1	Hafif	242.252
DS2	Orta	114.917
DS3	Ağır	77.587
DS4	Tam hasar	198.562

Göçen bina (%10/50 yıl)

18.985 (%1,29)

%2/50 yıl senaryosu

DS0	Hasarsız	384.786
DS1	Hafif	360.099
DS2	Orta	122.373
DS3	Ağır	70.468
DS4	Tam hasar	521.731

Göçen bina (%2/50 yıl)

51.683 (%3,50)

Göçmelerin kod düzeyi ve kat sınıfına göre payı



Baskın kaynak: düşük kod düzeyli 4-6 katlı yapılar. Hasar dağılımı 1.459.457 bina (stoğun %98,85'i) üzerinden hesaplanmıştır.

5 Ekonomik Kayıp

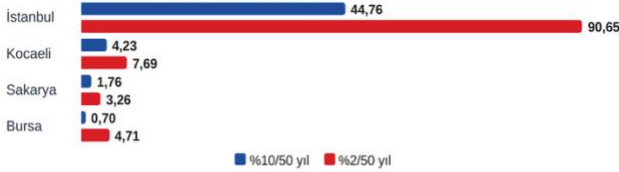
%10/50 yıl

52,4
milyar EUR

%2/50 yıl

110,8
milyar EUR

İl bazında yapısal kayıp (milyar EUR) — tüm yapı tipleri



Maruziyete oranla kayıp (%10 senaryosu)

Kocaeli %29,2 · Sakarya %28,8 · İstanbul %27,0

Betonarme kayıp yapı grubuna göre payı (%10)



Mutlak kayıp İstanbul'da; göreceli kırılabilirlik Kocaeli-Sakarya'da. Ekonomik kayıpta baskın grup: düşük kod düzeyli 7+ katlı yapılar.

6 Can Kaybı

%10/50 yıl

46.199
kişi

%2/50 yıl

109.357
kişi

İl bazında beklenen can kaybı (kişi) — gece nüfusu



Nüfusa oranla risk — %10/50 yıl · %2/50 yıl

İstanbul %0,27·%0,63 Kocaeli %0,28·%0,39 Sakarya %0,30·%0,45
Marmara geneli %0,21·%0,50

Can kaybı düşük kod düzeyli orta ve yüksek katlı yapılarda yoğunlaşır; birim insan başına risk üç ilde birbirine yakındır.

Yönetim İçin Ana Mesajlar

- En yüksek tehlike kuşağı Kocaeli-Sakarya-Yalova-İstanbul hattıdır.
- Toplam risk İstanbul'da; göreceli kırılabilirlik Kocaeli ve Sakarya'da yüksektir.
- Öncelik ikiye ayrılır: can güvenliğinde 4-6 katlı, ekonomik kayıpta 7+ katlı düşük kodlu yapılar.
- Uzun periyot etkileri nedeniyle yüksek katlı yapılar özel değerlendirme ister.
- Güncel envanter, güçlendirme, mikro-bölgeleme ve altyapı sürekliliği birlikte yürütülmelidir.

Sınırlılıklar

Sonuçlar bölgesel ölçekte ve referans kaya (Vs30 = 760 m/s) düzeyindedir; yerel zemin etkileri ve envanter güncelliği saha bazında ayrıca değerlendirilmelidir. Hasar ve kayıp analizleri betonarme yapıları kapsar.



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

AFAD**İTÜ**

ULUSAL COĞRAFI
BİLGİ TEKNOLOJİLERİ
İNOVASYON UYGULAMA
ve ARAŞTIRMA MERKEZİ