

## ŞEV DEFORMASYON TAHMİN MODELLERİNİN OLASILIKSAL SİSMİK TEHLİKE ANALİZİ: TÜRKİYE'DE BÖLGESEL BİR UYGULAMA

### PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ASSESSMENT OF SLOPE DISPLACEMENT PREDICTION MODELS: A REGIONAL APPLICATION IN TÜRKİYE

Burak AKBAŞ<sup>1</sup>

#### ÖZET

Son yirmi yıl içerisinde, küresel yer hareketi veri setleri kullanılarak geliştirilmiş ve depremle tetiklenmiş şevlerin Newmark kayan blok deformasyonunun tahmini için kullanılan çok sayıda tahmin modeli geliştirilmiştir. Öte yandan, sayıları az da olsa, Sonlu Elemanlar veya Sonlu Farklar gibi ileri sayısal hesaplama yöntemlerinin sonuçlarına dayanan tahmin modelleri de oldukça popüler hale gelmektedir. Bir veya daha fazla yer hareketi parametresine ek olarak saha ve şev koşullarına ilişkin çeşitli değişkenleri de barındıran bu modellerin fonksiyonel formları önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, bölgesel şev performans değerlendirmelerinde kullanılacak deformasyon tahmin modellerini içeren büyük bir küme bulunmaktadır. Bu değerlendirme ise genellikle çeşitli deformasyon seviyelerinin yıllık aşılma oranlarını gösteren şev deformasyonu tehlike eğrileri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Farklı tahmin modelleriyle hesaplanan şev deformasyonu tehlike eğrileri geniş bir epistemik belirsizlik aralığıyla sonuçlandığından, uygun model veya modellerin seçimi hala bir tartışma konusudur. Bu nedenle, literatürdeki mevcut şev deformasyon tahmin modellerinin bazıları çalışma kapsamında sismik tehlike çerçevesine dahil edilmiş ve Kuzey Anadolu Fay Hattı yakınlarında seçilen bir bölge için deformasyon tehlike eğrileri üretilmiştir. Farklı tahmin modellerinden üretilen tehlike eğrileri çeşitli girdi parametreleri için de ayrıca değerlendirilmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Sismik şev deformasyonu tahmin modelleri, olasılıksal sismik tehlike analizi, şev deformasyonu tehlike eğrileri*

#### ABSTRACT

In the last two decades, large number of Newmark's sliding block displacement prediction models for earthquake-induced slopes have been proposed using global ground motion datasets. On the other hand, although they are scarce, prediction models based on the results of advanced numerical computational methods such as Finite Element or Finite Difference are becoming popular as well. While utilizing one or more ground motion

<sup>1</sup> Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, burak.akbas@metu.edu.tr (Sorumlu yazar)



intensity measures as well as several parameters regarding the site and slope conditions, functional forms of the available models vary considerably. Hence, there is a suite of seismically-induced slope displacement prediction models that can be utilized in order to estimate the regional slope performances which can be carried out in the form of slope displacement hazard curves showing the annual rate of exceedances for various displacement levels. As the computed slope displacement hazard curves from different prediction models result in a wide range of epistemic uncertainty, selection of the appropriate model(s) is still in question. Therefore, within the content of this study, a set of slope displacement prediction models from the literature are incorporated into the seismic hazard framework and displacement hazard curves are produced for a selected area near North Anatolian Fault Zone. Produced hazard curves from different prediction models are also evaluated for a range of input parameters.

*Keywords: Seismic slope deformation prediction models, probabilistic seismic hazard assessment, slope displacement hazard curves*

## 1. GİRİŞ

Depremle tetiklenen şev deformasyonlarının risk ve güvenlik değerlendirmeleri, sismik aktiviteler sırasında oluşan yer sarsıntısından kaynaklanan ikincil tehlikelerin uygun şekilde yönetilmesi ve azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bir şevin sismik yükler altındaki performansının değerlendirilmesi ve depremle tetiklenen şev deformasyonlarının tahmin edilmesi, geoteknik deprem mühendisliği uygulamalarındaki en zorlu konulardan birisidir. Bu bağlamda araştırmacılar, deprem yüklerinden kaynaklanan şev deformasyonlarını doğru tahmin etmenin yolları üzerinde yoğunlaşmakta ve çeşitli şev deformasyon seviyelerinin yıllık aşılma olasılıklarını gösteren deformasyon tehlike eğrilerini oluşturmaya çalışmaktadırlar. Ancak, yer hareketi ve saha koşullarına bağlı olan şev performansının bölgesel olarak sismik tehlike çerçevesinde değerlendirilebilmesi için, deformasyon tahmin denklemlerinin olasılıksal yöntemlerle belirlenmiş olması gerekmektedir (Saygılı ve Rathje, 2009; Wang ve Rathje, 2015; Gülerce ve Balal, 2017).

Newmark'tan (1965) bu yana, Newmark kayan blok (NSB) yöntemi, deprem yükü altındaki şevlerin performansını temsil etmek amacıyla mühendisler tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle, son yirmi yılda, küresel yer hareketi veri tabanları kullanılarak elde edilmiş NSB deformasyonları için çok sayıda olasılıksal sismik talep modeli (PSDM) önerilmiştir (Watson-Lamprey ve Abrahamson, 2006; Jibson, 2007; Bray ve Travarasou, 2007; Saygılı ve Rathje, 2008; Bray ve Macedo, 2019). Bu modellerin çalışma prensibi, yer hareketi modellerine (GMM, aynı zamanda yer hareketi tahmin denklemleri olarak da bilinir: GMPE) benzemektedir; öyle ki, şev deformasyonunun tahmini için önerilen modelin fonksiyonel formu, yer hareketi şiddet parametrelerinden (IM) oluşmaktadır (Rathje ve Saygılı, 2008). Öte yandan, karmaşık şev geometrilerinin analizi konusundaki yetenekleri ve daha sofistike malzeme modellerinin kullanılabilmesi nedeniyle, nümerik simülasyonlar sonucunda oluşturulan şev tahmin modelleri de daha yaygın hale gelmektedir. Ancak bu tür yöntemlere odaklanan çalışmaların sayısı henüz azdır (Fotopoulou ve Pitilakis, 2015; Cho ve Rathje, 2022; Wang vd., 2023; Akbaş, 2024). Şev deformasyonu tahmin modellerinin geliştirilme süreçlerine ilişkin detaylı bilgi ilgili literatürlerde özetlenmiştir.



Mevcut literatür incelendiğinde görülmektedir ki, önerilen PSDM'lerin fonksiyonel formları değişkenlik gösterse de, temel olarak iki kategoriye ayrılmaktadırlar. Bunlar, bir IM'den (tek-IM modeli veya skaler model) oluşan modeller ve birden fazla IM'den (vektörel model) oluşan modeller olarak adlandırılmaktadır. Önerilen modeller arasında verimlilik (Luco ve Cornell, 2007) ve/veya yeterlilik (Cornell ve Luco, 2001) kriterlerini karşılayan ve sıklıkla karşılaşılan IM'ler, maksimum yer ivmesi (PGA), maksimum yer hızı (PGV), Arias şiddeti ( $I_a$ ), manyitüd (M) ve çeşitli periyotlardaki spektral ivme ( $SA_T$ ) parametreleridir. Ayrıca, statik güvenlik katsayısı ( $FS_{STA}$ ), kayan kütleli statik durumdaki temel periyodu ( $T_s$ ), eşik ivme değeri ( $k_y$ ) ve 30m derinlik için ortalama kayma dalgası hızı ( $V_{S30}$ ) gibi şev ve saha koşullarını temsil eden parametreler de tahmin modellerine dahil edilmiştir.

Birkaç örnek dışında (Saygılı ve Rathje, 2009; Wang ve Rathje, 2015; Gülerce ve Balal, 2017; Yeznabad vd., 2021), mevcut PSDM'ler ile aktif tektonik bölgeler için oluşturulan düzlemsel sismik kaynak karakterizasyon modelleri Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi (OSTA) çerçevesine entegre edilmemiştir. Bolu-Gerede bölgesinde farklı saha koşulları altında oluşabilecek NSB deformasyonlarının tahmini ve şev performanslarının tehlike eğrileri aracılığıyla değerlendirilmesi amacıyla, Saygılı ve Rathje (2008) tarafından önerilen 3-IM'li vektör PSDM, Gülerce ve Balal (2017) tarafından OSTA çerçevesine entegre edilmiştir. Bu sayede tehlike eğrilerinin farklı  $k_y$  seviyelerine göre değişimi irdelenmiştir. Cho ve Rathje (2020) tarafından yürütülen başka bir çalışma, nümerik analizler sonucu bir dizi PSDM önermiş ve önerilen tahmin modellerini kullanarak ABD'nin Kuzey Kaliforniya bölgesinde bir saha için şev deformasyonu tehlike eğrileri üretmiştir. Hem tek-IM hem de vektör modeller öneren bu çalışma, kullanılan IM'lerin ve ikili kombinasyonlarından oluşan çeşitli tahmin modellerinin tehlike eğrileri üzerinde oluşturduğu epistemik belirsizliği incelemiştir. Bu bağlamda, en küçük standart sapmaya sahip tahmin modelinin, şev deformasyonu tehlike eğrisi için her zaman en iyi model olmayacağını ve çeşitli IM'lerden oluşan birden fazla PSDM'nin OSTA hesaplamaları için dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Çalışma ayrıca, kullanılan PSDM'ye ek olarak  $V_{S30}$  ve sismik kaynağın da tehlike eğrisini ciddi ölçüde etkilediğini göstermektedir. Tehlike hesaplamasında farklı NSB şev deformasyonu tahmin modellerinin kullanılmasından kaynaklanan belirsizliği değerlendiren bir başka çalışma ise Yeznabad vd. (2021) tarafından Kanada'nın Vancouver bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Çeşitli sismik kaynakların yanı sıra farklı saha koşullarının da analiz edilmesi üzerine çalışma, kayan kütleli durumuna ( $k_y$  ve  $T_s$ ) bağlı olarak, her sismik kaynağın belirli zemin sınıflarında elde edilecek tehlike eğrilerine farklı şekillerde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle uygun PSDM'lerin seçiminin yanı sıra sismik kaynakların seçimi ve bunların kayan kütleli rijitliği ile etkileşimi de tehlike hesaplamaları için önem arz etmektedir.

Mevcut çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, bölgesel şev performanslarının tehlike eğrileri ile değerlendirilmesi kapsamında OSTA uygulamasına uygun bir dizi PSDM vardır ve bu da geniş bir epistemik belirsizlik aralığına neden olmaktadır. Bu nedenle, literatürden seçilen ve nümerik simülasyon sonuçları yardımıyla oluşturulmuş PSDM seti, Fortran programlama dilinde yazılmış ve açık kaynak kodlu OSTA yazılımı olan HAZ43'e (PG&E, 2010) entegre edilmiştir. Seçilen modellerin ve çeşitli girdi parametrelerinin tehlike eğrileri üzerindeki etkisinin incelenmesi için ise Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAFH) yakınlarında bulunan Bolu-Gerede bölgesi seçilmiş ve bölge için şev deformasyonu tehlike eğrileri üretilmiştir. Bölgeye



ait düzlemsel sismik kaynak modelleri Gülerce ve Balal (2017) tarafından ilgili yazılımda kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Bu çalışma kapsamında sismik kaynak modelleri hiç değiştirilmeden kullanılmış.

## 2. OSTA YAZILIMI ENTEGRASYONU

Geçmişte bölgeyi etkileyen birçok büyük deprem meydana gelmiştir. Bunlar; 1944 M7.2 Bolu-Gerede, 1967 M6.7 Mudurnu ve 1999 M7.1 Düzce Depremleridir. Bunlardan ilkinde ait fay bazlı düzlemsel sismik kaynak karakterizasyon modeli Levendoğlu (2013) ve Vakilinezhad vd. (2013) çalışmalarından elde edilebilmektedir. Diğer ikisinin kaynak modelleri ise Gülerce ve Ocak (2013) tarafından geliştirilmiştir. Gülerce ve Balal (2017) daha önce bu kaynak modellerini HAZ43 yazılımına hazır hale getirmiştir. Kaynak ve fay parametrelerine ilişkin belirsizlikler de mantık ağacı yaklaşımı kapsamında kod içerisine yerleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında sismik kaynak modelleri herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmıştır.

Nümerik analiz sonuçları kullanarak oluşturulan PSDM çalışmalarının ilk girişimlerinden birisi olarak, Fotopoulou ve Pitalakis (2015) (buradan itibaren FP15) üç adet skaler ve iki adet vektör PSDM önermiştir. Önerilen modellerden bir adet skaler model (PGA- $k_y$ -M modeli) ve bir adet vektör (PGV- $I_a$ - $k_y$  modeli) model seçilmiş ve yazılıma entegre edilmiştir. Daha sonraki bir çalışma olan Cho ve Rathje (2022) (buradan itibaren CR22) ise iki adet skaler model (PGV ve PGA-M modelleri) önermiş ve bunlardan PGA-M modeli seçilerek yazılıma entegre edilmiştir. CR22 modellerinin regresyon katsayıları aynı zamanda  $T_s$  ve  $k_y$  gibi parametrelere de bağlı olarak çalışmaktadır. Bunlara ek olarak, iki ayrı set olarak önerilen katsayılar şev yenilme davranışını da derin ( $H_r > 0.6$ ) ve sığ ( $H_r < 0.6$ ) kayma düzlemleri şeklinde ikiye ayırmaktadır. Son olarak Akbaş (2024), kayan kütlelerin tepe noktasında, topuğunda ve ağırlık merkezinde (CG) hem en büyük (maksimum) hem de kalıcı şev deformasyonları için bir dizi PSDM önermiştir. Önerilen modeller  $FS_{STA}$ , 1 saniye için spektral ivme ( $SA_{T=1s}$ ),  $I_a$  ve  $T_s$  ile ilişkilendirilmiştir. Bu modeller de ilgili yazılıma dahil edilmiştir. Seçilen modellerin fonksiyonel formları ve kullandıkları IM'leri gösteren denklemler aşağıda sunulmuştur. Seçilen PSDM'lerin oluşturulmasına yönelik detaylar ve regresyon katsayıları ilgili çalışmalarda mevcut olup, çalışmanın asıl odağına girmediği için burada yer verilmemiştir.

Fotopoulou ve Pitalakis (2015) çalışmasından seçilen PSDM'lerin fonksiyonel formları:

$$\ln(D) = a_0 + a_1 \ln(PGA) + a_2 k_y + a_3 M \mp \sigma \quad (1)$$

$$\ln(D) = b_0 + b_1 \ln(PGV) + b_2 \ln(I_a) + b_3 k_y \mp \sigma \quad (2)$$

Cho ve Rathje (2022) çalışmasından seçilen PSDM'nin fonksiyonel formları:

$$\ln(D) = c_0 + c_1 * \ln(PGA) + c_2 * (M - 6.5) \mp \sigma \quad (3)$$

$$c_0 = \begin{cases} d_0 + d_1 \ln(T_s) + d_2 \ln(k_y) & H_r \leq 0.6 \\ d_3 + d_4 \ln(k_y) & H_r > 0.6 \end{cases} \quad (4)$$



$$c_1 = \begin{cases} e_0 + e_1 \ln(T_s) + e_2 (\ln(T_s))^2 & H_r \leq 0.6 \\ e_3 + e_4 \ln(k_y) & H_r > 0.6 \end{cases} \quad (5)$$

$$c_2 = \begin{cases} f_0 & H_r \leq 0.6 \\ f_1 & H_r > 0.6 \end{cases} \quad (6)$$

Akbaş (2024) çalışmasından seçilen PSDM'nin fonksiyonel formu:

$$\ln(D) = g_0 + (g_1 + g_2 \ln(FS_{STA})) \ln(SA_{T=1s}) + g_3 \ln(I_a) + g_4 \ln(T_s) \mp \sigma \quad (7)$$

Bu denklemlerde, daha önce tanımlamaları yapılmış parametrelere (PGA, PGV,  $SA_{T=1s}$ ,  $I_a$ , M,  $k_y$ ,  $FS_{STA}$  ve  $T_s$ ) ve regresyon katsayılarına (a, b, c, d, e, f ve g değerleri) ek olarak, D şev deformasyonunu,  $\sigma$  ilgili PSDM'nin standart sapmasını ve  $H_r$  ise kayma düzleminin maksimum derinliğinin toplam şev yüksekliğine oranını ifade etmektedir.

Seçilen şev deformasyon modelleri için gerekli olan PGA, PGV ve  $SA_{T=1s}$  IM'leri halihazırda HAZ43'te mevcut olan NGA-West1 modellerinden Abrahamson ve Silva (2008) kullanılarak tahmin edilmiştir. Buna ek olarak, bir diğer gerekli IM olan  $I_a$  parametresinin tahmini ise Akbaş (2024) çalışması bünyesinde ve bölgesel veri seti yardımıyla geliştirilmiş tahmin modeliyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Travasarou vd. (2003) çalışmasına ait ve küresel veri setleriyle üretilmiş  $I_a$  tahmin modeli de kıyaslama maksadıyla HAZ43 yazılımına entegre edilmiştir. Öte yandan, şev deformasyonu için kullanılan PSDM'nin vektörel model olması durumunda, modeller tarafından kullanılan IM'ler arasındaki korelasyon değerlerinin de OSTA yazılımına entegre edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, PGV ile  $I_a$  arasındaki korelasyon Rathje ve Saygili (2008) tarafından sağlanan değerlerden,  $SA_{T=1s}$  ve  $I_a$  arasındaki korelasyon ise Bradley (2015) çalışmasından elde edilmiştir.

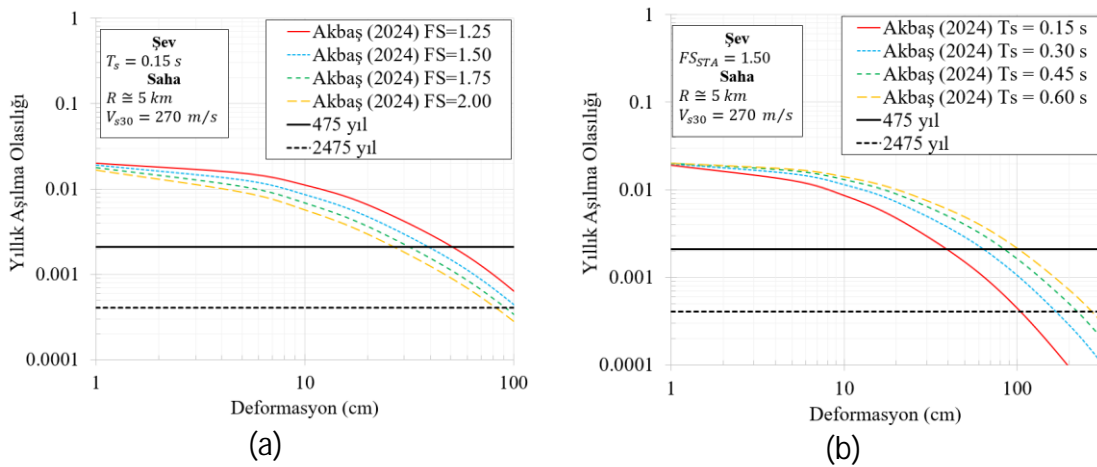
### 3. BÖLGESEL TEHLİKE EĞRİSİ UYGULAMASI

Gülerce ve Balal (2017) çalışmasının da belirttiği gibi Bolu-Gerede kırılma bölgesinin güneyinde sismik kaynaklı çok sayıda heyelan meydana gelmiştir. Ayrıca bölgede zamanında meydana gelmiş doğal şev, yapay yarma veya dolgulara ait stabilite sorunları da çeşitli çalışmalar kapsamında ele alınmıştır (Aydan ve Ulusay, 2002; Süzen ve Doyuran, 2004; Bakır ve Akış, 2005; Cetin vd., 2007). Bu nedenle, çalışma kapsamında performansları değerlendirilmek üzere bu fay segmentinin yaklaşık 5 km güneyinde yer alan bir lokasyon seçilmiştir. Koordinatları kullanılacak olan bu nokta yalnızca faya olan mesafe dikkate alınarak seçilmiş olup, şev geometrileri veya geoteknik saha özellikleri hakkında detaylı bilgi bulunmamaktadır. Fakat tehlike eğrileri için seçilen modeller, kuvvetli yer hareketi parametrelerine ek olarak şev geometrisine, rijitliğine ve saha koşullarına ait parametrelere de ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, şev deformasyon tehlike eğrileri öncelikle bölgeye uygun olarak seçilmiş çeşitli  $FS_{STA}$  (veya eş değer  $k_y$ ) değer aralıkları ve çeşitli şev rijitlik değerleri için sadece Akbaş (2024) PSDM'leri kullanılarak parametrik olarak üretilmiştir. Daha sonra ise faya olan uzaklık (R) ve  $V_{S30}$  parametrelerinin etkisi yine aynı PSDM seti ile test edilmiştir. Ayrıca, bölgesel ve küresel veri setlerinden elde edilmiş  $I_a$  tahmin modellerinin etkisi de seçilen bir şev geometrisi üzerinde test edilmiştir. Son olarak ise, seçilen tüm PSDM'ler kullanılarak bir dizi deformasyon tehlike eğrileri üretilmiş ve çeşitli modellerden gelen sonuçlar irdelenmiştir. Şev deformasyonlarına karşılık yıllık aşılma



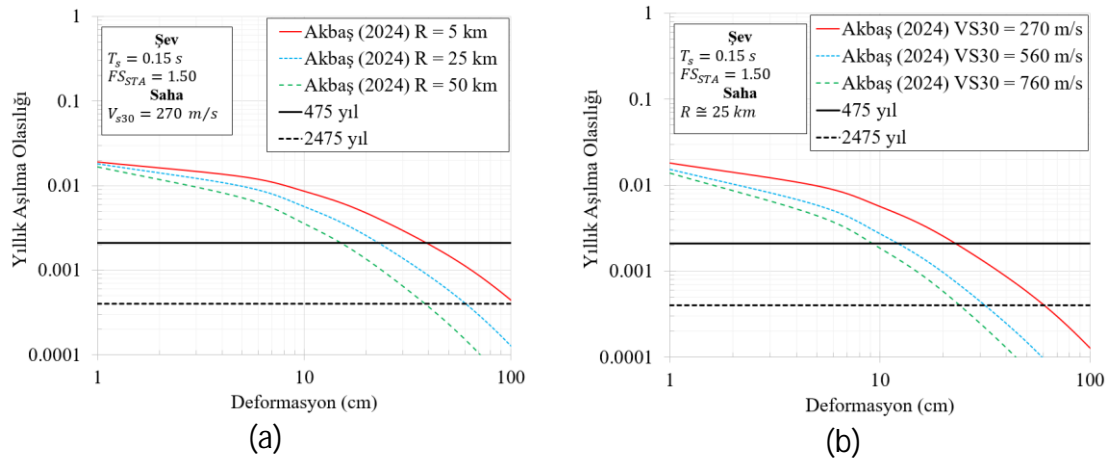
olasılıklarını gösteren bu tehlike eğrileri üzerinde, çeşitli yönetmeliklerde de karşılaşılan ve kabul edilebilir tehlike seviyelerinden olan 475 yıl ve 2475 yıl tekrarlama periyodu değerleri de gösterilmiştir. Bu değerler aynı zamanda 50 yılda sırasıyla %10 ve %2 aşılma ihtimaline karşılık gelmektedir.

İlk olarak Akbaş (2024) PSDM’lerinden tepe noktasına ait en büyük (maksimum) şev deformasyon modeli kullanılarak  $R = 5$  km,  $V_{S30} = 270$  m/s ve  $T_s = 0.15$  s değerleri için çeşitli güvenlik katsayıları ( $FS_{STA} = 1.25 - 2.00$ ) için tehlike eğrileri üretilmiştir (Şekil 1a). Ayrıca aynı saha ve  $FS_{STA} = 1.50$  değeri için çeşitli  $T_s$  parametre aralığının ( $T_s = 0.15 - 0.60$  s) sonuçlara olan etkisi gösterilmiştir (Şekil 1b). Tehlike eğrileri kıyaslandığı zaman görülmektedir ki, beklenildiği üzere şev güvenlik katsayısı arttıkça veya şevin rijitliği arttıkça (veya  $T_s$  azaldıkça) hesaplanan tehlike değerleri azalmaktadır.



Şekil 1. Deformasyon tehlike eğrilerinin a)  $FS_{STA}$  ve b)  $T_s$  parametrelerine göre değişimi

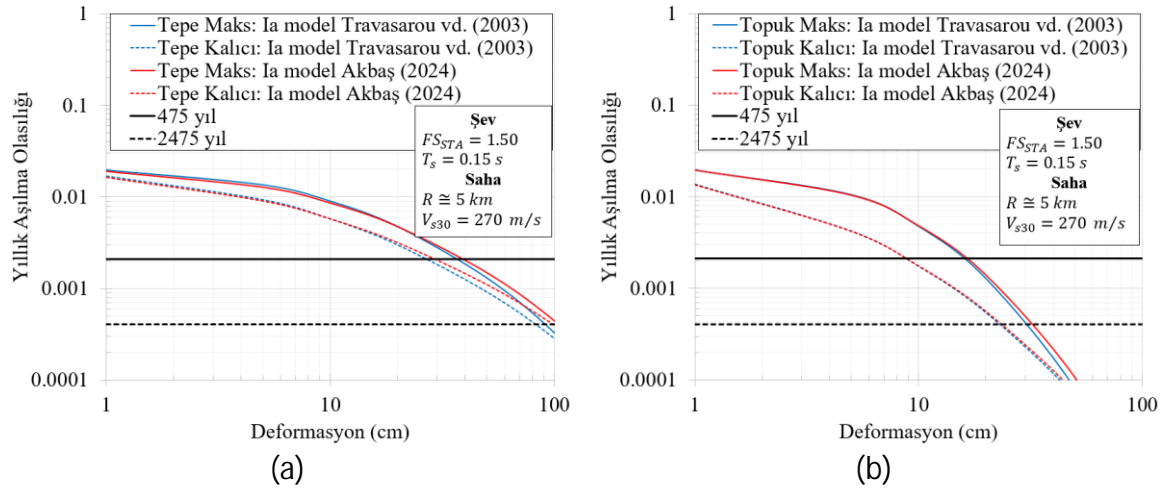
Faya olan uzaklığın ve  $V_{S30}$  değerinin etkilerini görmek adına, aynı PSDM modeli kullanılarak  $T_s = 0.15$  s ve  $FS_{STA} = 1.50$  değerleri için üretilen tehlike eğrileri Şekil 2’de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde görülmektedir ki, faydan uzaklaşıldıkça (Şekil 2a) veya aynı uzaklıkta zemin sertleştikçe (Şekil 2b) tehlike değerleri azalmaktadır.



Şekil 2. Deformasyon tehlike eğrilerinin a)  $R$  ve b)  $V_{S30}$  parametrelerine göre değişimi

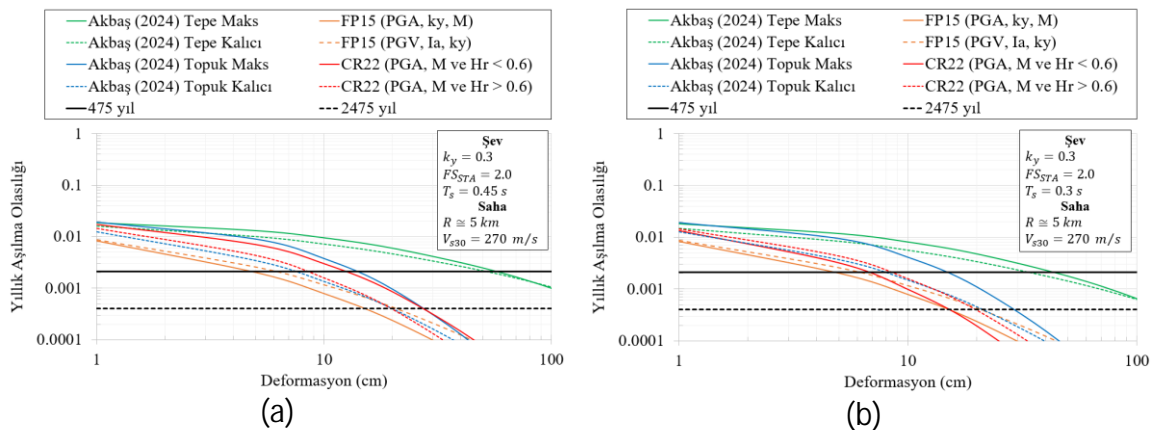


Çeşitli PSDM modellerine ait tehlike eğrilerinin kıyaslanmasından önce testi gerçekleştirilen son parametrik çalışma ise çeşitli  $I_a$  tahmin modelinin sonuca etkisidir. Bu bağlamda, bir küresel bir de bölgesel nitelikteki iki  $I_a$  tahmin modelinin  $R = 5$  km,  $V_{S30} = 270$  m/s,  $FS_{STA} = 1.50$  ve  $T_s = 0.15$  s değerleri için Akbaş (2024) PSDM'si kullanılarak üretilmiş tehlike eğrileri üzerindeki etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Tepe noktası ile CG sonuçlarının yakın çıkması ve grafiklerin sadeleştirilmesi adına, CG eğrilerine Şekil 3'te yer verilmemiştir.



Şekil 3. Farklı  $I_a$  modellerinin sonuca etkisi a) tepe noktası modeli ve b) topuk modeli

Literatürden seçilmiş bütün PSDM'ler kullanılarak,  $R = 5$  km,  $V_{S30} = 270$  m/s,  $FS_{STA} = 2.0$  ve  $k_y = 0.3$  değerleri kullanılarak tehlike eğrileri üretilmiştir. Tehlike eğrileri göreceli olarak daha esnek şev (Şekil 4a) ve daha rijit şev (Şekil 4b) için oluşturulmuştur.



Şekil 4. Seçilen PSDM'lerin tehlike eğrilerinin kıyaslanması a) esnek şev ve b) rijit şev

Çalışma kapsamında sunulan sonuçlar incelendiğinde görülmektedir ki, sismik şev deformasyonu tahmin denkleminde ait girdi parametreleri kadar, seçilen tahmin modeli de sonuçlara yadsınamaz şekilde etki etmektedir. Bu nedenle, sismik şev deformasyonu tehlike eğrileri kullanılarak yapılacak performans değerlendirmelerinde hem sahaya ait girdi sonuçları özenle seçilmeli, hem de birden fazla PSDM kullanan bir mantık ağacı oluşturulmalıdır. Ayrıca seçilen PSDM'lerin kullandığı IM'lerin de yer hareketini daha iyi temsil edebilmek adına çeşitliliği sağlanmalıdır.



#### 4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında literatürde bulunan ve dinamik şev stabilitesi simülasyon sonuçlarına dayanan deformasyon veri setleri kullanılarak üretilmiş bir dizi PSDM seçilmiştir. Seçilen şev deformasyonu tahmin modelleri, standart sapmaları ve yer hareketi parametreleri arasındaki korelasyon değerleri OSTA yazılımı olan HAZ43'e entegre edilmiştir. Ayrıca tahmin modellerinin ihtiyaç duyduğu diğer parametrelere ait GMM'ler de aynı yazılıma entegre edilmiştir. Depremle tetiklenen şevlerin sismik tehlike çerçevesi kapsamında performans değerlendirmesi için kullanılacak tehlike eğrileri üretilmesi amacıyla KAFH çevresindeki Bolu-Gerede bölgesi seçilmiştir. Bölgeye ait sismik kaynak modelleri daha önceki çalışmalardan elde edilmiştir. İlk olarak şev güvenlik katsayısı, şev rijitliği, faya olan uzaklık, zemin sertliği parametreleri ile farklı yer hareketi tahmin denklemlerinin tehlike eğrilerine olan etkisi parametrik olarak irdelenmiştir. Daha sonra ise seçilen tüm PSDM'lere ait şev deformasyon tehlike eğrileri iki ayrı senaryo özelinde kıyaslanmıştır. Akbaş (2024) çalışmasında da gösterildiği üzere, seçilen modellerin medyan deformasyon tahminlerinin yakın olmasına karşın, modellere karşılık gelen tehlike eğrileri arasında kayda değer mertebe farklılıkları bulunmaktadır. Bu nedenle, depremle tetiklenen şevlerin bölgesel performans değerlendirmeleri yapılırken, birden fazla tahmin modeli seçilmesi ve sonuçların mantık ağacı çerçevesinde yorumlanması tavsiye edilmektedir. Ayrıca tahmin modeli seçimi yapılırken, bölgede oluşabilecek yer hareketi seviyelerini daha iyi yansıtabilecek çeşitlilikte şiddet parametreleri de içeren modellerin seçilmesi önerilmektedir. Bu çalışmada sunulan şev deformasyon tehlike eğrileri, yaklaşık olarak seçilmiş bir dizi girdi parametresi ve kısıtlı sayıda tahmin modeli neticesinde elde edilmiş olup, bölgedeki şevler ve onların performans değerlendirmeleri için direkt kullanılmamalıdır.

#### KAYNAKLAR

- Akbaş, B. (2024), "Probabilistic Hazard Assessment of Seismically-Induced Slope Deformations", Doctor of Philosophy Dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/108480>
- Aydan, Ö. ve Ulusay, R. (2002), "Back-analysis of a Seismically Induced Highway Embankment Failure During the 1999 Düzce Earthquake", *Environmental Geology*, Vol 42(6), 621-631. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0565-4>
- Bakır, B.S. ve Akış, E. (2005), "Analysis of a Highway Embankment Failure Associated With the 1999 Düzce, Turkey Earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 25(3), 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.05.001>
- Bradley, B.A. (2015), "Correlation of Arias Intensity With Amplitude, Duration and Cumulative Intensity Measures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 78, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.07.009>
- Bray, J.D. ve Macedo, J. (2019), "Procedure for Estimating Shear-Induced Seismic Slope Displacement for Shallow Crustal Earthquakes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 145(12), 04019106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002143)
- Bray, J.D. ve Travasarou, T. (2007), "Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacements", *Journal of Geotechnical and*





- Geoenvironmental Engineering, Vol 133(4), 381-392.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:4\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(381))
- Cetin, K.O., Horoz, A., Erol, A.O. ve Unutmaz, B. (2007), "Seismic Performance of Existing Bakacak Landslide After 1999 Duzce (Turkey) Earthquake", In Proceedings of 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 24-27 September 2007, Madrid, Spain.
- Cho, Y. ve Rathje, E.M. (2020), "Displacement Hazard Curves Derived From Slope-Specific Predictive Models of Earthquake-Induced Displacement", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 138, 106367.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106367>
- Cho, Y. ve Rathje, E.M. (2022), "Generic Predictive Model of Earthquake-Induced Slope Displacements Derived From Finite-Element Analysis", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 148(4), 04022010.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002757)
- Cornell, C.A. ve Luco, N. (2001), "Ground Motion Intensity Measures for Structural Performance Assessment at Near-Fault Sites", US-Japan Joint Workshop and 3rd Grantees Meeting, US-Japan Cooperative Research on Urban EQ. Washington, DC: National Science Foundation.
- Fotopoulou, S.D. ve Pitilakis, K.D. (2015), "Predictive Relationships for Seismically Induced Slope Displacements Using Numerical Analysis Results", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 13(11), 3207-3238. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9768-4>
- Gülerce, Z. ve Balal, O. (2017), "Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Sliding Displacement of Slopes: An Application in Turkey", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 15, 2737-2760. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0079-1>
- Gülerce, Z. ve Ocak, S. (2013), "Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Eastern Marmara Region", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 11, 1259-1277. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9443-6>
- Jibson, R.W. (2007), "Regression Models for Estimating Coseismic Landslide Displacement", Engineering Geology, Vol 91(2-4), 209-218.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.013>
- Levendoğlu, M. (2013), "Probabilistic Seismic Hazard Assessment of Ilgaz-Abant Segments of North Anatolian Fault Using Improved Seismic Source Models", Master of Science Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.  
<https://open.metu.edu.tr/handle/11511/22336>
- Luco, N. ve Cornell, C.A. (2007), "Structure-Specific Scalar Intensity Measures for Near-Source and Ordinary Earthquake Ground Motions", Earthquake Spectra, Vol 23(2), 357-392. <https://doi.org/10.1193/1.2723158>
- Newmark, N.M. (1965), "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments", Geotechnique, Vol 15(2), 139-160.
- Pacific Gas and Electric Company (2010), "Verification of PSHA Code HAZ43", GEO.DCPP.10.03 Rev 0.
- Rathje, E.M. ve Saygili, G. (2008), "Probabilistic Seismic Hazard Analysis for the Sliding Displacement of Slopes: Scalar and Vector Approaches", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 134(6), 804-814.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:6\(804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:6(804))



- Saygili, G. ve Rathje, E.M. (2008), "Empirical Predictive Models for Earthquake-Induced Sliding Displacements of Slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 134(6), 790-803. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:6\(790\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:6(790))
- Saygili, G. ve Rathje, E.M. (2009), "Probabilistically Based Seismic Landslide Hazard Maps: An Application in Southern California", *Engineering Geology*, Vol 109(3-4), 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.08.004>
- Süzen, M.L. ve Doyuran, V. (2004), "A Comparison of the GIS Based Landslide Susceptibility Assessment Methods: Multivariate Versus Bivariate", *Environmental Geology*, Vol 45(5), 665-679. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8>
- Travasrou, T., Bray, J.D. ve Abrahamson, N.A. (2003), "Empirical Attenuation Relationship for Arias Intensity", *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 32(7), 1133-1155. <https://doi.org/10.1002/eqe.270>
- Vakilinezhad, M., Levendoğlu, M., Gülerce, Z. ve Şaroğlu, F. (2013), "Effect of Fault Characteristics on the Probabilistic Seismic Hazard Assessment Results", In *Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering*, 29–31 May 2013, Skopje.
- Wang, Y. ve Rathje, E.M. (2015), "Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps Including Epistemic Uncertainty", *Engineering Geology*, Vol 196, 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.001>
- Wang, M.X., Wu, Q., Li, D.Q. ve Du, W. (2023), "Numerical-Based Seismic Displacement Hazard Analysis for Earth Slopes Considering Spatially Variable Soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 171, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107967>
- Watson-Lamprey, J. ve Abrahamson, N. (2006), "Selection of Ground Motion Time Series and Limits On Scaling", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 26(5), 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.07.001>
- Yeznabad, A.F., Molnar, S. ve El Naggar, M.H. (2021), "Probabilistic Solution for the Seismic Sliding Displacement of Slopes in Greater Vancouver", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 140, 106393. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106393>

