

İZMİR İLİ İÇİN SİMÜLASYON TABANLI SAHA BÜYÜTME FAKTÖRLERİ

SIMULATED SITE AMPLIFICATION FACTORS FOR THE CITY OF IZMIR

Onur İNDIR¹, Okan İLHAN²

ÖZET

Bu makale, tek boyutlu (1D) lineer olmayan (nonlinear, NL), eşdeğer lineer (EL) ve lineer frekans alanı (L) zemin davranış analizlerini (ZDA) içeren bir parametrik çalışma yardımıyla İzmir şehri için simülasyon tabanlı zemin büyütme faktörlerini üretmektedir. Sunulan parametrik çalışma, (i) her biri için 11 farklı yer hareketi verisinin seçildiği dokuz farklı deprem senaryosundan, (ii) V_s parametresindeki rastgele değişkenliği temsil etmek üzere randomize edilmiş 3 temel V_s profilinden, (iii) randomize V_s profillerini referans V_s katmanında kesmek için 5 farklı derinlik değerinden, ve (iv) yüksek manyitüdü depremler altında doğrusal olmayan zemin davranışını hesaba katmak için dikkate alınan ortalama kayma modülü azalım ve sönümleme (MRD) eğrisinden oluşmaktadır ve toplam 178200 1D ZDA (her biri 59,400 NL, EL ve L simülasyonu) yürütülmüştür. 1D L SRA'dan hesaplanan lineer zemin büyütme değerlerinin TBDY (2019) tarafından önerilen yerel zemin faktörlerine kısa periyotta (0.1-0.5 saniye) benzer olduğunu, ancak bu durumun uzun periyotta (1.0 saniye) tersine döndüğünü gözlenmiştir. 1D NL SRA' dan elde edilen büyütme ile lineer büyütme farkı olarak hesaplanan nonlinear yerel zemin etkisayıları durumunda, TBDY (2019) tarafından önerilen faktörlerinin hem kısa hem de uzun periyotlar için simülasyon-tabanlı değerlerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Anahtar Kelimeler: Zemin büyütmesi, zemin etkisi, tek-boyutlu (1D) zemin davranış analizi

ABSTRACT

This paper produces simulation-based site amplification factors for the city of Izmir using a parametric study of one-dimensional (1D) nonlinear (NL), equivalent-linear (EL), and linear frequency-domain (L) site response analyses (SRA). The parametric study tree is composed of (i) nine different earthquake scenarios each of which is adopted to select 11 different strong ground motion data, (ii) three base-case V_s profiles randomized to represent the aleatory variability in V_s parameter, (iii) five depth-to-reference condition values utilized to truncate the randomized V_s profiles, and (iv) mean modulus reduction and damping (MRD) curve to account for the nonlinear soil behavior under string shaking, resulting in a total of 178200 1D SRA (each of 59,400 NL, EL and L simulations). The comparison of linear amplification values computed from linear SRA with local site factors recommended by TEBC (2019) exhibits that they were similar in the short period (0.1-0.5 sec), but this condition is reversed for the long period (1.0 sec). In the case of nonlinear amplification, which is obtained as the difference between amplification from NL SRA and linear

¹ Yük. İnş. Müh., Akademi Etüt Proje Müh. Müş. Ltd. Şti. onur.indir@akademiproje.com.tr (Sorumlu yazar)

² Dr.Öğr.Üyesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, okan.ilhan@aybu.edu.tr



amplification, the code factors are observed to be higher than the simulated values for both short and long periods.

Keywords: Site amplification, site effects, one-dimensional site response analysis, Izmir

1. GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı, deprem riski taşıyan bölgeler için güçlü yer hareketi parametrelerinin (örneğin, spektral ivme (Si), PYİ, vb.) kullanılmasını gerektirir. Eğer ilgili saha aktif sismik bir bölgede bulunuyorsa ve yüksek manyitüdü bir depreme maruz kalma olasılığı mevcutsa (ör, Ekim,2020 Samos depremine maruz kalan izmir ili), tasarım için gerekli yer hareketi parametresi olasılıksal (OSTA) ya da deterministik (DSTA) sismik tehlike analizleri yardımıyla elde edilir. Bu analizler esnasında zemin etkisi, (i) bina yönetmelikleri tarafından önerilen yerel zemin katsayıları (örneğin, NEHRP, 2015; TBDY, 2019), (ii) bölgeye özgü ampirik (Sandikkaya vd., 2013; İlhan vd., 2024a), semi-ampirik (Seyhan vd., 2014) ya da simülasyon-tabanlı (Harmon vd., 2019; İlhan vd., 2024b) zemin büyütme fonksiyonları, veya (iii) tek-boyutlu (1D) sahaya-özgü zemin davranış analizleri (ZDA) yardımıyla hesaba katılabilir. Ek olarak, depreme dayanıklı tasarımda kullanılması zorunlu kılınan TBDY (2019) spektrumu, eğer saha ZF olarak sınıflandırılmamışsa, TBDY (2019)' de kısa (0.2 sn) ve uzun (1.0 sn) periyotlar için önerilen yerel zemin katsayıları kullanılarak üretilebilmektedir. Fakat, bu değerler ile alakalı aşağıdaki problemler mevcuttur:

- TBDY (2019) yerel zemin faktörleri, Amerika'nın batı yakası zemin ve deprem karakteristiği tarafından domine edilen bir veriseti kullanılarak geliştirilmiştir (Seyhan vd., 2014; NEHRP, 2015).
- Geniş V_{S30} aralıkları ile tanımlanan zemin sınıflarına bağlı olarak tablolaştırılmış zemin faktörlerinin kullanılması (ör., ZC zemin sınıfı için $360 \text{ m/s} < V_{S30} < 760 \text{ m/s}$), epistemik belirsizliklerin fazla olması sebebiyle, sahaya özgü zemin etkilerinin doğru tahmin edilemesine neden olabilir.

Bu nedenle bu çalışmanın amacı, 1D NL, EL ve L ZDA' ların bir parametrik çalışması yardımıyla izmir iline özgü zemin büyütme faktörleri üretmektir. Bir sonraki bölümlerde parametrik çalışmanın detayları sunulmuş ve izmir' e için elde edilen faktörler, TBDY (2019)' da sunulanlar ile karşılaştırılmıştır.

2. PARAMETRİK ÇALIŞMA AĞACI

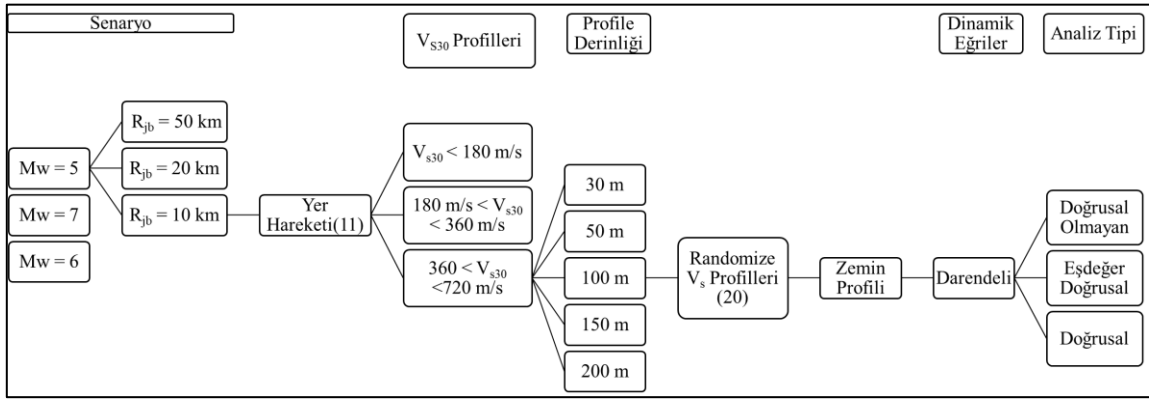
Tek-boyutlu ZDA' lar için parametrik çalışma ağacı, izmir ili'nin deprem karakteristiği, hakim V_s yapısı, zemin stratigrafisi ve referans koşuluna olan derinlik parametresindeki epistemik ve rastgele belirsizlikleri gözetererek oluşturulmuştur. Şekil 1' de sunulan çalışmanın her bir elemanı aşağıdaki alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

2.1. Kuvvetli Yer Hareketi Verileri

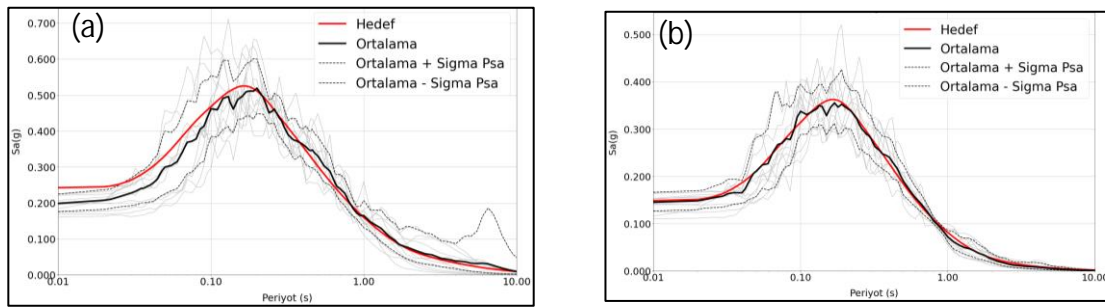
izmir için yapılan olasılıksal sismik tehlike analizleri (OSTA) kapsamında (Alpyürür ve Lav, 2022) üretilen ayrıştırma (deaggregation) sonuçları göz önünde bulundurularak toplamda dokuz farklı deprem senaryosu ($M = 5.0, 6.0$ ve 7.0 ve R_{JB} (Joyner-ve-Boore deprem kaynağı uzaklığı) = $10.0, 20.0$ ve 50.0 km) seçilmiştir. Her bir senaryo için, (i) Boore vd. (2020) tarafından Yunanistan için üretilen kuvvetli yer hareketi modeli (KYHM) kullanılarak hedef



spektrum üretilmiş, ve (ii) NGA-West2 veritabanı (Ancheta vd., 2014) ile PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center, <https://ngawest2.berkeley.edu/>) yardımıyla 22 kuvvetli yer hareketi (KYH) verisi (11 deprem X 2 yatay (DB, KG) bileşen) seçilerek hedef spektruma uydurulmuştur. $M = 6.0$ ve $R_{JB} = 10.0$ km ve $M = 7.0$ ve $R_{JB} = 10$ km için hedef spektral ivme değerleri ve ölçeklendirilen KYH verileri Şekil 2' de sunulmuştur.



Şekil 1 Parametrik çalışma ağacı



Şekil 2 (a) $M = 7$ ve $R_{JB} = 10$ km ve (b) $M = 6$ ve $R_{JB} = 10$ km için hedef spektrumlar ve seçilen kuvvetli yer hareketi verilerinin ölçeklendirilmiş spektrumları

2.2. V_s Profilleri ve Randomizasyonu

Tek-boyutlu ZDA' lar için tanımlanacak V_s profillerini belirlemek amacıyla, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı' nın (AFAD) Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS)' de yayınladığı izmir ili sınırlarına dahil olan KYH istasyonlarına ait V_s profili raporları kullanılmıştır. Bu verilere ek olarak, Bozkurt (2010), Eskişar (2008), Kuruoğlu (2019) ve Yalçın (2008)' de sunulan sondaj raporları da Hasancebi ve Ulusay (2006) SPT-N - V_s ilişkisi yardımıyla V_s ' ye çevrilerek çalışmaya dahil edilmiştir. Sonuç olarak toplamda 113 V_s profili toplanmış (Şekil 3a) ve TBDY (2019)' daki yerel zemin sınıfları kullanılarak (ZE için $V_{S30} < 180$ m/s, ZD için 180 m/s $< V_{S30} < 360$ m/s ve ZC için 360 m/s $< V_{S30} < 760$ m/s) profiller sınıflandırılmıştır (Şekil 3b).

V_s parametresindeki rastgele belirsizliği (aleatory variability), ZDA' lardan elde edilecek simülasyon-tabanlı zemin büyüme faktörlerine dahil etmek için Monte Carlo simülasyonlarını kullanmak bilinen bir yöntemdir. Bu amaçla Toro (1995) V_s randomizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Toplanan ve sınıflandırılan profillerin logaritmik ortalamaları (log-



ort), Toro (1995) modeline girdi olarak verilmiştir. Yaklaşım için gerekli diğer değişkenler (σ_{lnV_S} , logaritmik V_S profillerinin standart sapması ve ρ , katmanlar arası V_S korelasyonu), bu makalede dikkate alınan V_{S30} -tabanlı zemin sınıflarına göre Toro (1995)' da sunulan parametreler olarak seçilmiştir. Log-ort profilleri randomizasyon için kullanılmadan önce, iki farklı sorun gözlenmiştir:

- Logaritmik ortalama hesaplanan her bir derinlikte farklı sayıda V_S profili bulunmasından ötürü meydana geldiği düşünülen V_S geri dönüşleri (ör., Şekil 3b' de 10 m civarında gözlenen derinlik artışına karşın V_S azalımı)
- Log-ort profillerinin kabul edilen referans koşulu $V_S = 760$ m/s' ye ulaşmaması sebebiyle,

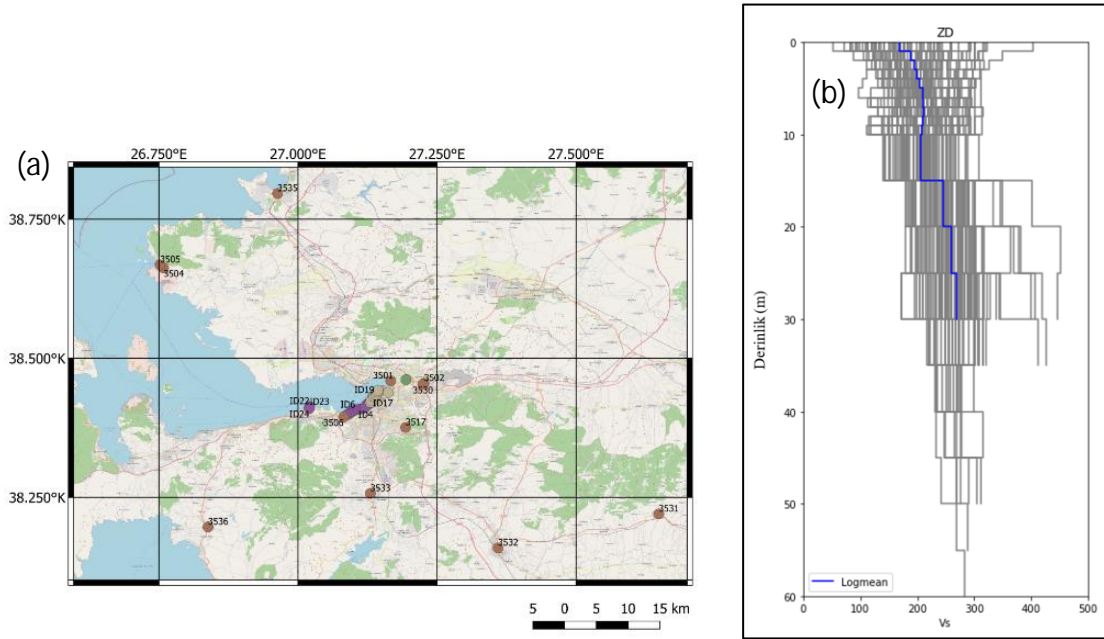
Bu iki problemi ortadan kaldırmak amacıyla, Kamai vd. (2016) tarafından önerilen aşağıdaki ilişki her bir log-ort profiline uydurulmuştur.

$$V_{S,median} = a_0 + a_1 \times \ln\left(\frac{Z + a_2}{a_2}\right) \quad (1)$$

Burada, Z derinliği temsil etmektedir. Model katsayıları da aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$a_0 = b_1 V_{S30} + b_2, a_1 = b_3 V_{S30} + b_4, a_2 = b_5 \exp(b_6 V_{S30}) \quad (2)$$

Profile özgü katsayılar Tablo 1' de, orijinal ve denklem (1)' in uydurulduğu log-ort profiller ise Şekil 4' de sunulmuştur. Her bir düzeltilmiş ve uzatılmış log-ort profili ile 20 farklı V_S randomize profili üretilmiş ve bir örneği Şekil 5' de sunulmuştur.

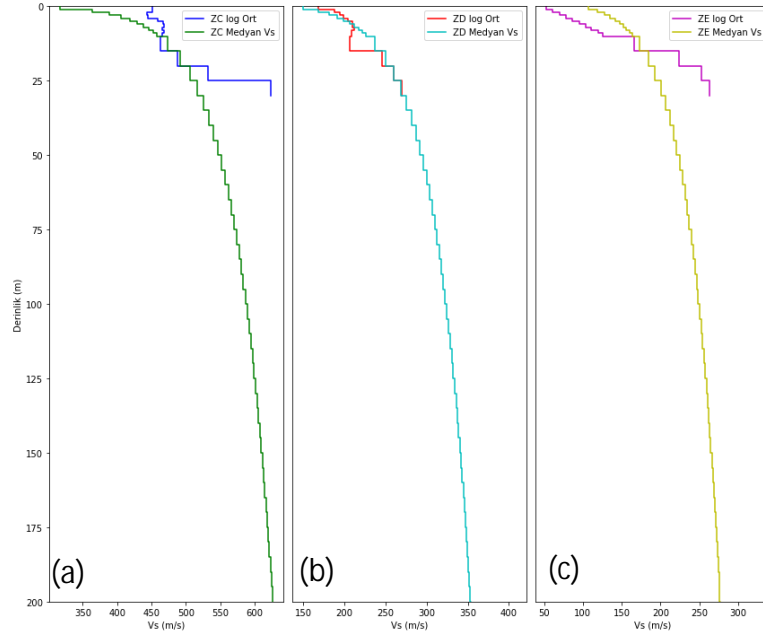


Şekil 3 (a) Çalışma kapsamında toplanan V_S ve sondaj verileri, ve (b) ZD olarak sınıflandırılan profiller ve bu profillerin logaritmik ortalaması

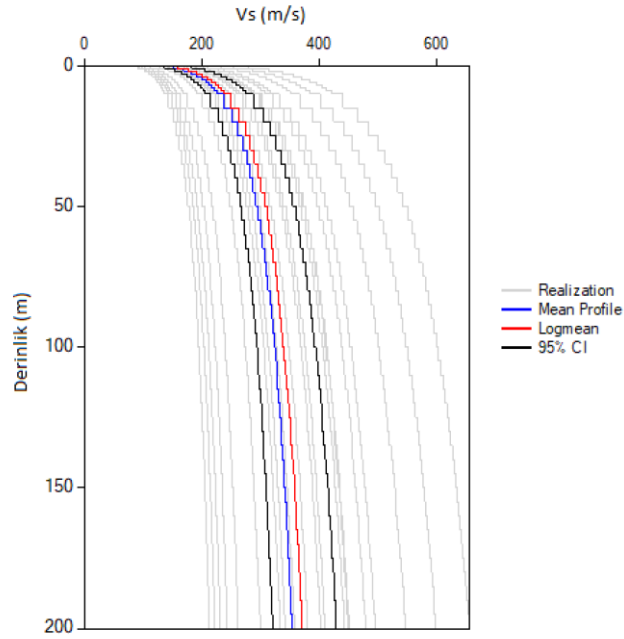
Tablo 1 Her bir log-ort profili için elde edilen Kamai vd. (2016) model katsayıları

Profil	a_0	a_1	a_2
ZC	258.75	55.59	0.27
ZD	136.84	43.67	1.40
ZE	98.89	39.96	2.35





Şekil 4 (a) ZC, (b) ZD ve (c) ZE yerel zemin sınıfı için veriden hesaplanmış ve Kamai vd. (2016) denklemleri kullanılarak üretilmiş log-ort profilleri



Şekil 5 ZD log-ort kullanılarak üretilmiş VS randomize profilleri

2.3. Doğrusal Olmayan Malzeme Davranışı

Zemin materyali, $10^{-4}\%$ birim şekil değiştirme (BŞD) değerinden itibaren lineer davranıştan uzaklaşan ve $10^{-2}\%$ BŞD' den sonra ise nonlineer davranış sergileyen bir malzemedir. (Vucetic, 1994). Bu durum, KYH geçişi sırasında saha tepkisinin doğru modellenmesi amacıyla her bir zemin katmanı için kayma modülü azalım (G/G_{max}) ve sönüm (MRD) eğrilerinin tanımlanmasını gerektirmektedir. İlk aşamada, toplanan sondaj logları



incelenerek sahayı temsil ettiği düşünülen farklı jenerik zemin stratigrafileri oluşturulmuş ve her bir log-ort profiline Tablo 2' de gösterildiği üzere atanmıştır. Referans MRD eğrileri, Darendeli (2001) tarafından geliştirilen ampirik korelasyonlar yardımıyla elde edilmiş, hesaplama için gereken sükunet halindeki zemin yanıl basıncı (K_0) (Jaky 1948 , Mayne ve Kulhawy 1982) denklemi ile hesaplanmış ve yeterli veri eksikliğinden dolayı aşırı konsolidasyon basıncı (OCR) değeri normal konsolide (OCR=1) olarak varsayılmıştır.

$$K_0 = [1 - \sin(\varphi)] \times OCR^{\sin(\varphi)} \quad (3)$$

Burada ϕ , içsel sürtünme açısını temsil etmektedir.

Tablo 2 Jenerik zemin stratigrafileri

Zemin Sınıfı	Derinlik (m)	PI(%)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	İçsel Sürtünme Açısı (φ°)
ZC	0-55	20	18	30
	55-200			38
ZD	0-200	20	18	30
ZE	0-200	20	18	30

Darendeli (2001) ile üretilen MRD eğrilerinden elde edilen gerilme-BŞD eğrilerinin yüksek BŞD değerlerinde (ör., %10) zemin dayanımına yakınsamadığı bilinen bir durumdur (Yee vd., 2013). Bu sebeple, Groholski vd. (2016) tarafından önerilen general kuadratik/hiperbolik (GQ/H) bünye denklemi her bir referans MRD' sine uydurularak, gerilme-BŞD eğrilerinin yüksek BŞD değerinde zemin dayanımına yakınsaması sağlanmıştır.

2.4. Lineer, Eşdeğer-Lineer ve Nonlinear 1D Zemin Davranış Analizleri

Yukarıda detaylandırılan algoritma yardımıyla toplam 60 farklı jenerik saha profili oluşturulmuştur. Şekil 1' de gösterildiği üzere, referans koşuluna ($V_s = 760$ m/s) dair belirsizliği temsil etmek adına oluşturulan 60 profilin her biri 5 farklı referans koşulu derinliğinde kesilmiştir ve sonuç olarak toplam 300 farklı generik V_s profili üretilmiştir. Tüm bu profiller ve KYH verileri ile DEEPSOIL V7.0 (Hashash vd., 2020) yardımıyla toplam 178200 adet 1D ZDA gerçekleştirilmiş (59400 lineer, eşdeğer-lineer ve nonlinear) ve bir sonraki bölümde anlatıldığı üzere, simülasyon-tabanlı zemin büyütmelerin elde edilmesinde kullanılmıştır.

3. SİMÜLE EDİLMİŞ ZEMİN BÜYÜTME FAKTÖRLERİ

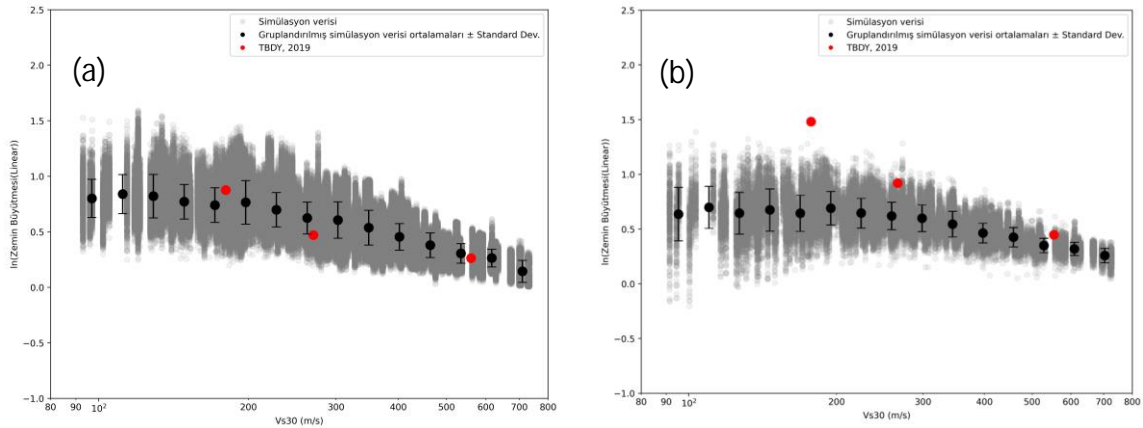
Zemin büyütmesi terimi genellikle yüzeydeki KYH parametresinin (pik yer ivmesi, spektral ivme, Fourier genlik spektrumu) referans koşulu olarak tanımlanan katmandaki KYH' ya oranının doğal logaritması olarak hesaplanır. Toplam zemin büyütmesi (F_s), lineer (F_{lin}) ve nonlinear (F_{nl}) olmayan bileşenlerin toplamı olarak tanımlanır (Seyhan ve Stewart, 2014):

$$F_s = F_{lin} + F_{nl}$$

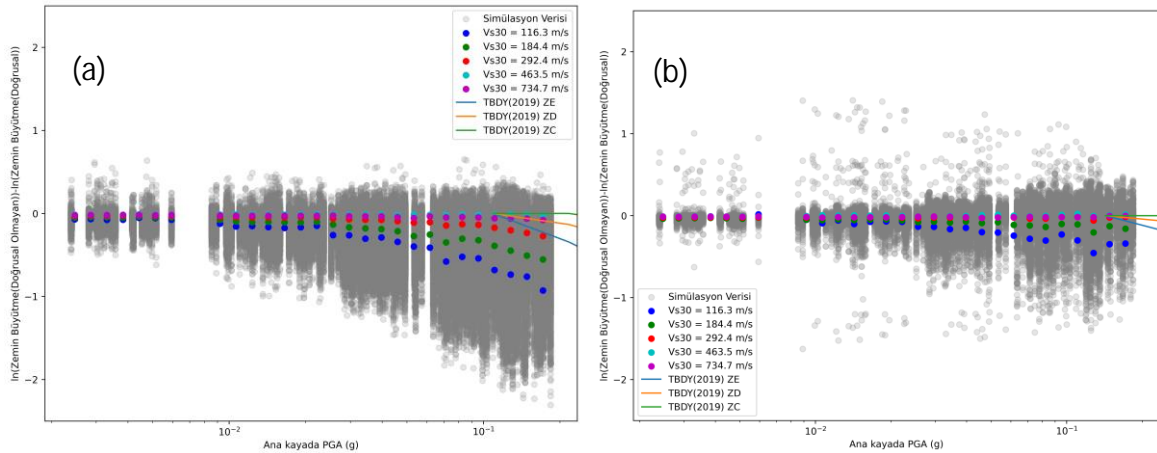
Bu çalışmada, F_s ve F_{lin} , sırasıyla, nonlinear ve lineer frekans alanı simülasyonlarından elde edilmin zemin büyütmesinin doğal logaritmasıdır. F_{nl} ise, F_s ve F_{lin} arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Şekil 6' da 0.1-0.5 sn (TBDY (2019)' da F_s) ve 1.0 sn (TBDY (2019)' da F_1)



simülasyon-tabanlı lineer zemin büyütmesi değerleri V_{S30} 'nin bir fonksiyonu olarak sunulmuş ve TBDY (2019)'da düşük spektral ivmeye karşılık gelen yerel zemin faktörlerinin doğal logaritması ise lineer büyütme olarak değerlendirilmiştir. Kısa periyot (0.1-0.5 sn) için, simülasyon-tabanlı zemin büyütmesi ile TBDY (2019) faktörleri uyumlu bulunmuş, uzun periyot' da ise düşük V_{S30} değerleri için TBDY (2019)'nin bu çalışma kapsamında üretilen değerlerden ciddi ölçüde yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6 (a) 0.1-0.5 sn aralığı ve (b) 1.0 sn için simülasyon-tabanlı lineer zemin büyütmesi değerleri (gri veri) ile V_{S30} 'ye bağlı ortalaması (siyah veri) ve TBDY (2019) lineer yerel zemin faktörleri.



Şekil 7 (a) 0.1-0.5 sn aralığında ve (b) 1.0 sn için simülasyon-tabanlı nonlineer zemin büyütmesi değerleri (gri veri) ile referans koşulundaki PYi'ye ve V_{S30} 'ye göre ortalaması (mavi, yeşil, kırmızı ve mor veriler) ve TBDY (2019)'den elde edilen nonlineer yerel zemin faktörleri.

Şekil 7' de ise bir önceki paragrafta sunulana benzer bir değerlendirme, nonlineer zemin büyütme değerleri için uygulanmıştır. TBDY (2019) F_{nl} değerleri, her bir spektral ivmeye (S_i) karşılık gelen yerel zemin faktörlerinden, en düşük S_i 'ye karşılık gelen faktör çıkarılarak elde edilmiş ve TBDY (2019)'deki S_i 'lere karşılık gelen PYi değerleri ise, Seyhan ve Stewart



(2014)' daki PYİ-Si ilişkisine bağlı olarak hesaplanmıştır. Öncelikle, kısa periyotlar için sönüm etkisinin daha fazla olması beklenmesi sebebiyle (Xu vd., 2020), 0.1-0.5 sn aralığı için elde edilen simülasyon bazlı F_{nl} değerleri, 1.0 sn için elde edilenlerden gözle görülür ölçüde düşüktür. Buna ek olarak, 1D ZDA' lara girdi olarak kullanılan KYH' lerin PYİ seviyelerinin, TBDY (2019)' yi kapsamadığı gözlenmiştir. F_{lin} için yapılan kıyastan elde edilene benzer olarak, ZDA-tabanlı F_{nl} değerleri her iki periyotta da TBDY (2019)' dan düşük çıkmıştır. Bu durum, hangi zemin büyütmesi değerinin gerçeği yansıttığını değerlendirmek amacıyla, ampirik zemin büyütmesi değerlerinin üretilerek (ör., İzmir' de mevcut KYH' larda kaydedilmiş veriyi ve referans koşulu istasyonu gerektirmeyen zemin büyütmesi yöntemini (Field ve Jacob, 1995) kullanarak elde edilen zemin faktörleri) hem ZDA-bazlı hem de TBDY (2019)' den türetilen faktörlerle karşılaştırılmasını gerekli kılmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu makale, 1D nonlinear, eşdeğer-lineer ve lineer zemin davranış analizlerini kullanarak İzmir iline özgü saha büyütme faktörlerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmanın motivasyonu iki gözlemden kaynaklanmaktadır: (i) TBDY (2019)' da tasarım spektrumu üretilmesi için önerilen yerel zemin faktörleri, Batı Amerika deprem ve zemin karakteristiği tarafından domine edilen bir veriseti kullanılarak geliştirilmiştir, ve (ii) V_{S30} aralığı geniş olan zemin sınıflarına göre tablolandırılmış zemin faktörlerinin kullanılması, yüksek epistemik belirsizlikler nedeniyle sahaya özgü zemin etkilerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesini zorlaştırabilir. Bu sebeple, İzmir ili için bir VS profili ve sondaj logu veritabanı oluşturularak, 1D ZDA' ların bir parametrik çalışması gerçekleştirilmiş ve bu amaçla 300 farklı jenerik saha profili ve 198 KYH verisi kullanılarak toplam 178200 adet 1D ZDA (59400 nonlinear, eşdeğer-lineer ve lineer) oluşturulmuştur.

1D ZDA' lardan elde edilen simülasyon bazlı lineer (F_{lin}) zemin büyütme değerleri, kısa periyotta (0.1-0.5 sn) TBDY (2019) ile uyum gösterse de, uzun periyotta (1.0 sn) TBDY (2019)' dan düşük kalmıştır. F_{nl} için ise, hem 0.1-0.5 sn aralığı hem de 1.0 sn' de simülasyon-bazlı değerler, TBDY (2019) değerlerinden küçük olarak elde edilmiştir. Bu ciddi farklılık İzmir ili için ampirik zemin büyütme değerlerinin elde edilmesini, bu çalışma kapsamında üretilen ZDA-tabanlı değerler ve TBDY (2019) yerel zemin faktörleri ile karşılaştırılmasını gerektirmektedir. Bu şekilde bir kıyas yaklaşımının hem 1D ZDA' ların daha doğru bir biçimde gerçekleştirilmesine hem de TBDY (2019)' nin sahaya özgü değerler ile güncellenmesine imkan doğuracağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- AFAD. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara, Türkiye; T.C. Resmi Gazete. 2019
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S. J., ... & Donahue, J. L. (2014). NGA-West2 database. *Earthquake Spectra*, 30(3), 989-1005.
- Alpyürür, M., & Lav, M. A. An assessment of probabilistic seismic hazard for the cities in southwest Turkey using historical and instrumental earthquake catalogs. *Natural Hazards*, 114(1), 335–365, May 2022
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Skarlatoudis, A. A., Seyhan, E., Margaris, B., Theodoulidis, N., ... & Melis, N. S. (2021). A ground-motion prediction model for shallow crustal



- earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(2), 857-874.
- Bozkurt, B. H. A Geotechnical Earthquake Engineering Investigation For Soils Of Southern Coast Of İzmir Bay. Doctoral dissertation, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2010.
- Darendeli, M. B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. The University of Texas at Austin, 2001.
- Eskişar, T. İzmir Körfezi Kuzey Kıyıları'nın Zemin Özelliklerinin ve Geoteknik Sorunlarının incelenmesi. Doctoral dissertation, Ege Üniversitesi, 2008.
- FEMA. NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. Washington, D.C. (2015)
- Field, E. H., & Jacob, K. H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bulletin of the seismological society of America*, 85(4), 1127-1143.
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M. A., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., & Stewart, J. P. Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(9), Sep. 2016
- Harmon, J., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Campbell, K. W., Silva, W. J., Xu, B., Musgrove, M., & İlhan, O. Site amplification functions for Central and eastern North America – part I: Simulation data set development. *Earthquake Spectra*, 35(2), 787–814, 2019.
- Hashash, Y.M.A., Phillips, C., Groholski, D. Recent Advances in Non-linear site response analysis. 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, 1-21, 2010.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., İlhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Idriss, I. M., & Seed, H. B. "Seismic response of horizontal soil layers." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 94, no. 4, pp. 1003–1031. 1968
- İlhan, O., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Nikolaou, S., & Campbell, K. W. (2024b). Simulated site amplification for Central and Eastern North America: Data set development and amplification models. *Earthquake Spectra*, 40(1), 200-229.
- İlhan, O., Zulfikar, A. C., Taskiran, T., Eroglu, K. N., Okuyan Akcan, S., & Ugurlu, H. A. (2024a). The Observed and Simulated Site Effects at the Selected Regions Influenced by 2023 Turkey Earthquake Sequences: A Preliminary Evaluation. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-20.
- Jaky, J. Pressure in silos, in proceedings of the 2nd international conference on soil mechanics and foundation engineering, 103–107; Rotterdam, The Netherlands, 21–30 June, 1948.
- Kamai, R., Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. VS30 in the NGA GMPES: Regional differences and suggested practice. *Earthquake Spectra*, 32(4), 2083–2108, Nov. 2016.
- Kuruoğlu, M. The Effect Of Local Site Characteristics On Dynamic Site Response Analyses Of A Major Urban Area: Warnings Of Moderate Scale Earthquakes. *Journal of Modern Technology and Engineering*, 4(3), 195–210. 2019



- Mayne, P. W., & Kulhawy, F. H. K₀-OCR relationships in soil. J Geotech Eng Div; 108:851–72, 1982.
- N.Hasancebi and R. Ulusay, "Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments," Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 66, no. 2, pp. 203–213, 2006.
- PEER Center. PEER Ground Motion Database. <https://ngawest2.berkeley.edu/site>, 2022.
- QGIS Association. QGIS Geographic Information System. <http://www.qgis.org>, 2022.
- Sandıkkaya, M. A., Akkar, S., & Bard, P. Y. (2013). A nonlinear site-amplification model for the next pan-European ground-motion prediction equations. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(1), 19-32.
- Seyhan, E., & Stewart, J. P. "Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-WEST2 data and simulations." Earthquake Spectra, vol. 30, no. 3, pp. 1241–1256. 2014
- Toro, G. R. Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies. Technical Rep 779574, 1995.
- Vucetic, M. (1994). Cyclic threshold shear strains in soils, J. Geotech. Eng. 120, 2208–2228.
- Xu, B., Rathje, E. M., Hashash, Y., Stewart, J., Campbell, K., & Silva, W. J. (2020). κ_0 for soil sites: Observations from Kik-net sites and their use in constraining small-strain damping profiles for site response analysis. Earthquake Spectra, 36(1), 111-137.
- Yalçın, İ. A. A Geotechnical Earthquake Engineering Investigation For Soils Of South Eastern Coast Of İzmir Bay. Doctoral dissertation, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2008.
- Yee, E., Stewart, J. P., & Tokimatsu, K. (2013). Elastic and large-strain nonlinear seismic site response from analysis of vertical array recordings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(10), 1789-1801.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
ZDA, SRA	Zemin davranış analizi	1D	Bir boyutlu
MRD	Kayma modülü azalım ve sönümlenme	V _s	Kayma dalgası hızı
NL	Doğrusal olmayan	EL	Eşdeğer doğrusal
L	Doğrusal	AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
TBDY	Türkiye bina deprem yönetmeliği	S _i	Spektral ivme
EL	Eşdeğer-lineer	PY _i	Pik yer ivmesi
OSTA	Olasılıksal sismik tehlike analizi	DTSA	Deterministik sismik tehlike analizi
KYH	Kuvvetli yer hareketi	R _{JB}	Joyner-Boore uzaklığı
DB	Doğu-Batı	KG	Kuzey-Güney
TADAS	Turkish Accelerometric Database and Analysis System	OCR	Aşırı konsolidasyon basıncı
K ₀	Sükunet halindeki zemin yanıl basıncı	BŞD	Birim şekil değiştirme
GQ/H	quadratic/hyperbolic modeli	F _S	Toplam zemin büyütme
F _{nl}	Doğrusal olmayan zemin büyütmesi	F _{lin}	Doğrusal zemin büyütmesi

