

ZEMİN PARAMETRE BELİRSİZLİKLERİNİN BİR BOYUTLU ZEMİN TEPKİ ANALİZLERİNDEKİ ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

M. Abdullah Sandıkkaya¹, Abdullah İcen²

ÖZET

Tek boyutlu zemin tepki analizleri, dinamik analizlerde zemin etkilerinin tahminleri sağladığı beklentisiyle sıkça kullanılır. Bu hipoteze göre, tepki analizindeki epistemik belirsizlik, zemin özelliklerindeki belirsizlikten kaynaklanır. Sahaya özel olasılıksal sismik tehlike analizinde (OSTA), yerel zemin büyütme faktörlerinin zemin tepki analizi yoluyla belirlenmesi standart hale gelmiştir. Sonuçta elde edilen tehlike tahminlerini etkileyen tüm epistemik belirsizlikler ile rastgele değişkenleri tespit etmek ve bunları dahil etmek önemlidir. Bu nedenle, sismik kaynak özellikleri ve zemin hareketi modelleri için mantık ağaçları oluşturmanın yanı sıra, zemin büyütme faktörleri için de genellikle alternatif kayma-dalgası hızı (VS) profilleri ve farklı modül azaltma ile sönümlenme içeren dallar karakterize edilir. Bu çalışma kapsamında Monte-Carlo simülasyonu kullanılarak farklı kayma hızı dalgası profilleri ve sönümlenme ile modül azalma eğrileri kullanılarak bir boyutlu zemin tepki analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucu epistemik belirsizlik ve rastgele değişkenliklerin zemin tepki analizinin belirsizliğine olan etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eşdeğer doğrusal analiz, bir boyutlu zemin davranış analizi, epistemik belirsizlik, Monte-Carlo Simülasyonu.

¹Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, abdullahsandikkaya@hacettepe.edu.tr

²Dr. Öğr. Üyesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye, abdullahicen@munzur.edu.tr (Sorumlu yazar)

1. GİRİŞ

Deprem mühendisliği uygulamaları alanında, iki tür belirsizlik vardır: epistemik belirsizlik ve rasgele değişkenlik. Epistemik belirsizlik, basit bir ifadeyle, belirli bir parametre veya olay hakkında tam bilgi veya bilgi eksikliğinden kaynaklanan belirsizliği ifade eder. Bir sistemin veya sürecin belirli bir yönüyle ilgili sınırlı anlayışımız veya eksik verilerimizle ilişkili bir belirsizlik türüdür. Öte yandan, rasgele değişkenlik, doğrudan olasılık analizine dahil edilen bir parametrede ölçülen dağılımı veya değişkenliği temsil eder. Rasgele değişkenlik, gözlemlenen verilere veya ölçümlere dayanır ve sistem içindeki doğal değişkenlik olarak kabul edilir. Epistemik belirsizlik genellikle, alternatif geçerli deprem kaynak modellerini ve yer hareketi modellerini dikkate alan ve ağırlıklandırılan mantık ağaçları kullanılarak olasılıksal sismik tehlike analizinde temsil edilir (Bommer ve Scherbaum 2008; Bommer 2012). Yine zemin tepki analizlerinde bu etki mantık ağacı uygulamaları ve simülasyonlar ile modellenenilmektedir (Marek et al. 2014; Marek et al. 2021). Bu çalışma kapsamında, profil sınırları ve simüle edilmiş Vs profilleri ve modül azaltma eğrileri için mantık ağacını kullanarak alan zemin tepki analizindeki epistemik belirsizlik ve rasgele değişkenlik tanımlanmıştır.

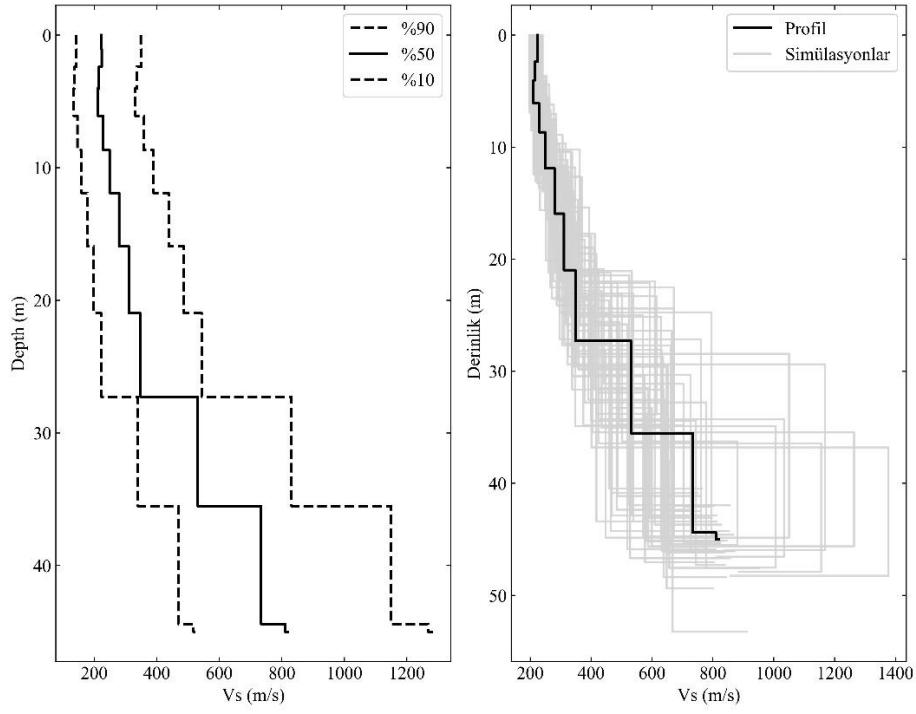
2. TEK BOYUTLU EŞDEĞER DOĞRUSAL YER TEPKİSİ ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında rastgele titreşim teorisi (RVT) yöntemini kullanarak frekans alanında alan yanıt analizi yapan Strata (Kottke and Rathje, 2008) bilgisayar programının python kodu olan pyStrata (Kottke ve Millen, 2023) kullanıldı. Strata bilgisayar programında kullanılan RVT yönteminde, zaman alanlı giriş hareketleri kullanılmaz, bunun yerine, yalnızca genlik bilgisini içeren giriş Frekans Genlik Spektrumuna (FAS) dayalı hesaplamalar gerçekleştirir. Bu çalışma kapsamında 1, 10 ve 100 km mesafe ile 5.0 ila 8.0 arasında değişen 7 büyüklük senaryosu kullanılmıştır (Tablo 1). RVT hareketlerinin pik yer ivmesi (PGA) değerleri 0.003g ile yaklaşık 1.4g arasında değişecek şekilde simüle edilmiştir. Kayma dalgası hızı (Vs) profilinin epistemik belirsizliğini hesaba katmak için EPRI (2013) tarafından tanımlanan $\sigma_{\mu} \ln = 0.35$ ile 1.28 ölçek faktörüne karşılık gelen 10., 50. ve 90. yüzdeleri hesaplanmıştır ve tesadüfi değişkenlik için Hallal ve diğerlerini (2022) kullanılmıştır. Kayma dalgası hız profillerinin (Vs) randomizasyonu aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Şekil 2'de seçilen yüzdeler için Vs profilleri (solda) ve temel durum için simüle edilmiş 50 Vs profilleri (sağda) gösterilmiştir. Burada sol sütun epistemik belirsizlik bölgelerini temsil ederek bizim sınırlı bilgimizi veya verilerimizi gösterirken, sağ sütun sistemin doğasında var olan değişkenliği ifade eden rastlantısal değişkenliği gösterir. Yapılan analizlerde ortalama profile ek olarak üst ve alt sınırlar için simüle edilmiş profillerin de oluşturulmuş ve toplam 150 profili kullanılmıştır ancak karışıklığa sebep olmaması için şekilde gösterilmemiştir. Modül azaltma eğrileri için Darendeli (2001) modeli kullanılmış olup, eğriler, özellikle Groholski vd. (2016) tarafından önerilen Genel Karesel/Hiperbolik (GQ/H) model tarafından açıklanan yaklaşım izlenerek, DeepSoil'de kullanılan yerleştirme prosedüründen elde edilen parametreler kullanılarak oluşturulmuştur. Belirlenen bu profilleri kullanılarak ayrıca rastgele modül azaltma eğrileri oluşturulmuş ve bunlar her bir profile atanmıştır.

2.1. Zemin Profillerinin Simülasyonu

Kayma dalgası hızı (Vs) profillerinin rasgele dağılımı genellikle bir Monte Carlo simülasyonları kullanılarak yapılmaktadır. Toro (1995) modeli, bu amaç için mevcut olan en eski ve en sistematik istatistiksel yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem, profildeki katmanların kalınlıklarını rastgele belirleyen, sırasıyla ana kayanın derinliğinde varyasyonlar ortaya koyan ve sırasıyla toprak katmanları içindeki Vs'deki değişkenliği simüle eden katmanlama modeli, ana kaya modeli ve hız modeli olmak üzere üç temel bileşeni içerir. Monte Carlo simülasyonları, bu bileşenleri kullanarak, sismik analiz uygulamalarında katman kalınlıkları, ana kaya derinliği ve Vs ile ilişkili belirsizlikleri etkili bir şekilde açıklayan rastgele değerlere sahip Vs profillerinin oluşturulmasına izin verir. Fakat Toro (1995) modeli, herhangi bir kısıtlama olmadan uygulandığında, katman kalınlıklarının ve Vs'nin bağımsız rasgele dağılımı nedeniyle Vs'de önemli farklılıklara ve gerçekçi olmayan simülasyonlara yol açabilir. Hallal vd. (2022), Toro'nun (1995) bazı kısıtlamalarla profil randomizasyonu için

geliştirilmiş bir model önermişlerdir. Bu model, rastgeleleştirme için üst ve alt sınırlar uygular ve sınırların dışında kalan modelleri yeniden simüle eder. Şekil 1'de analizlerde kullanılan istasyon için rasgele profili görülmektedir, yapılan analizlerde 150 simüle edilmiş profil kullanılmıştır (sınır başına 50 simülasyon).



Şekil 1. Epistemik belirsizliği (solda) ve 3124 istasyonu ve temel durum profilini (sağda) açıklamak için kullanılan temel durum (50.), üst (90.) ve alt (10.) sınırlara sahip Vs profilleri.

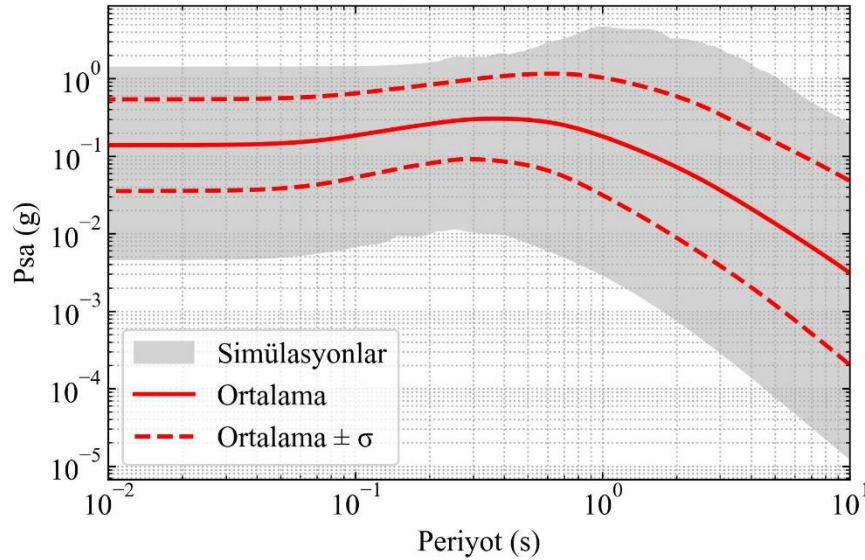
Tablo 2. RVT ile yer hareketi tanımları için kullanılan deprem senaryoları

M _w	Mesafe (km)	PGA (g)
5	100	0.00
5.5	100	0.01
6	100	0.01
6.5	100	0.02
7	100	0.03
7.5	100	0.04
8	100	0.07
5	10	0.07
5.5	10	0.12
5	1	0.13
6	10	0.18
5.5	1	0.21
6.5	10	0.28
6	1	0.32

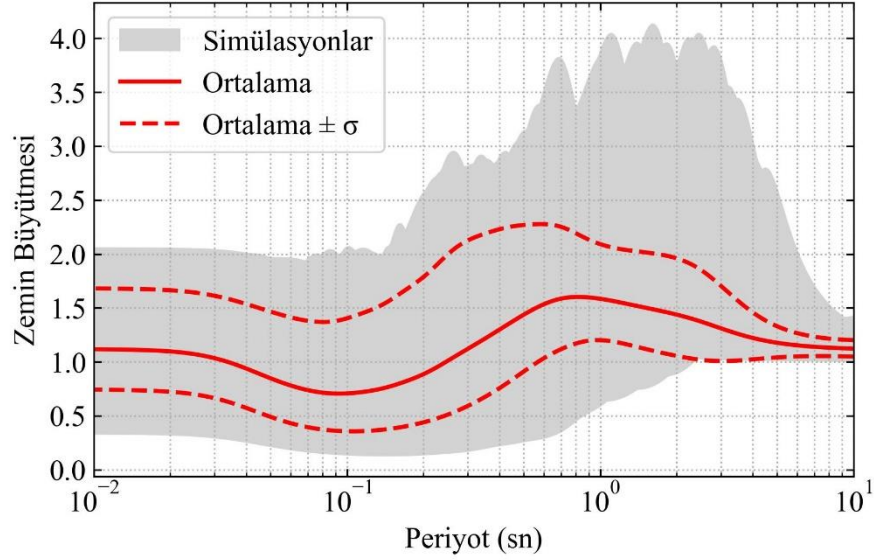
7	10	0.40
6.5	1	0.47
7.5	10	0.58
7	1	0.69
8	10	0.81
7.5	1	0.98
8	1	1.38

3. SONUÇLAR

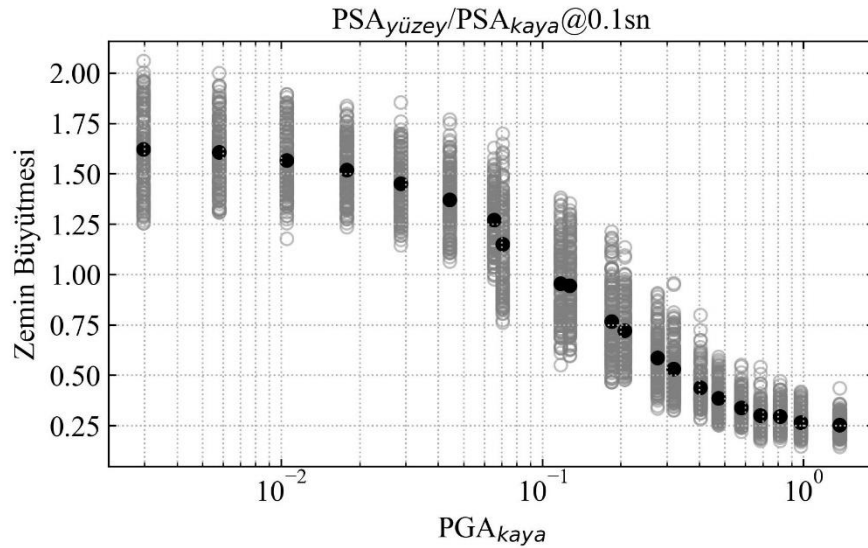
21 yer hareketi seviyesi ve 150 Vs profili kullanarak her saha için 3150 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlardan tepki spektrumunu ve saha amplifikasyonları ($PSA_{yüzey}/PSA_{kaya}$) ve bu simülasyonların ortalama ile standart sapması hesaplanmıştır. Şekil 3'te 283 V_{S30} değerlerine sahip olan Hatay-Antakya (3124) istasyonu için ortalama ve $\pm\sigma$ simülasyon aralıklarını gösterilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5, doğrusal olmayan etkileri değerlendirmek için kullanılan yer hareketi yoğunluk seviyelerinden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Ek olarak, Şekil 5'te kayada (PGA_{kaya}) her giriş yer hareketi için simülasyonların ortalaması sunulmuştur. Şekil 4 ve Şekil 5'te gözlemlendiği üzere sahanın düşük V_{S30} değerlerine sahip olması sebebi ile 0.02g'den büyük yer ivmesi için doğrusal olmayan davranış gözlemlenmiştir. Yine V_{S30} değeri daha yüksek olan zeminlerde bu eşik değerin yüksek olduğu gözlemlenmiş fakat bu çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir. Yapılan analizlerin doğrusal olmayan analiz çözümleri ile kıyaslanması ve bu ivme değerinden büyük kaya ivmesi tanımlanması durumu için karşılaştırılması gerekmektedir. Fakat benzer simülasyon analizlerinin doğrusal olmayan zemin tepki analizi programlarında kapsamlı bir analiz yürütmeye ilgili zorluklar nedeniyle, gözlemlenen veriler bu zeminin doğrusal olmayan davranışını tetikleyen PGA_{kaya} değerinden küçük ivmelerde kullanılması anlamlı bir karşılaştırmaya izin vereceği belirlenmiştir. Olasılıksal sismik tehlike analizlerine zemin tepki spektrumu belirsizliklerinin katılmasının, genellikle nükleer santraller gibi önem arz eden yapılarda kullanılması ve bu yapıların inşa alanının genellikle yüksek kayma dalgası hızı ortalamasına sahip olacak şekilde seçilmesi nedeniyle yöntemin uygulanması pratiklik açısından büyük avantaj sağlamaktadır.



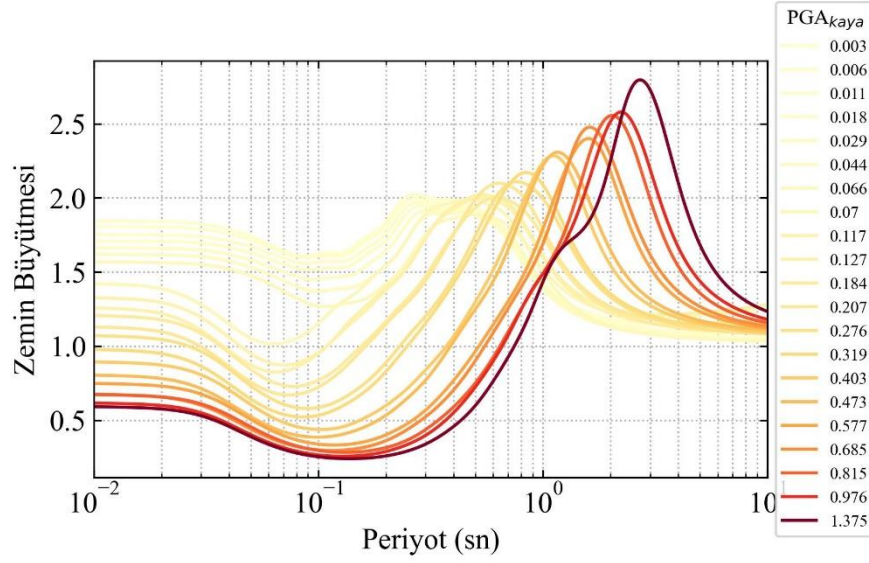
Şekil 2. Analizler sonucunda yüzeyde elde edilen spektrumunun standart sapma içindeki değişimi.



Şekil 3. $PSA_{yüzey}/PSA_{kaya}$ oranlarının periyotla karşılaştırılması. Taralı alan simülasyonlar sonucunda elde edilen en büyük ve en küçük değerleri, kırmızı çizgi simülasyonların ortalamasını, kesikli çizgiler ise standart sapma aralığını göstermektedir.



Şekil 4. Kayadaki yer hareketine göre 0,1 saniyedeki $PSA_{yüzey}/PSA_{kaya}$ oranları. Gri daireler, her simülasyon için amplifikasyonu gösterirken siyah daireler, belirtilen yer hareketi seviyesi için ortalamayı göstermektedir.



Şekil 5. Tanımlanan her PGA_{kaya} değeri için simülasyonların ortalaması için $PSA_{yüzey}/PSA_{kaya}$ oranlarının periyotla değişimi.

KAYNAKLAR

- Darendeli, M.B. (2001), "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves", Doktora Tezi, The university of Texas at Austin.
- Groholski, D., Hashash, Y., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., Stewart, J. (2016), "Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis", J. Geotech. Geoenviron. Eng., 04016042.
- Hallal, M.M., Cox, B.R., Foti, S., Rodriguez-Marek, A., Rathje, E.M. (2022), "Improved implementation of travel time randomization for incorporating Vs uncertainty in seismic ground response", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 157, 107277.
- Kottke, A. R., and Rathje, E. M. (2008). "Technical manual for Strata." Report No.: 2008/10. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Kottke, A., Millen, M. (2023). arkottke/pystrata: v0.5.2 (v0.5.2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7551992>
- Rodriguez-Marek, A., Bommer, J.J., Youngs, R.R., Crespo, M.J., Stafford, P.J., Bahrampouri, M. (2021), "Capturing epistemic uncertainty in site response", Earthquake Spectra, 37 (2), 921-936.
- Rodriguez-Marek, A., Rathje, E.M., Bommer, J.J., Scherbaum, F., Stafford, P.J. (2014), "Application of single-station sigma and site-response characterization in a probabilistic seismic-hazard analysis for a new nuclear site", Bulletin of the Seismological Society of America, 104 (4), 1601-1619.
- Toro, G.R. (1995), "Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies", Technical Report No. 779574, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY.