

DOĞRUSAL OLMAYAN ZEMİN TEPKİ DAVRANIŞLARI ÜZERİNE BİR İNCELEME

ASSESSMENT OF NON-LINEAR SITE RESPONSE OF SOILS

Tuğba İLERİ¹, Fatmanur ERCİYES², Berna UNUTMAZ³

ÖZET

Zemin tepki analizleri, sismik analiz süreçlerinde yer hareketi ile yerel zemin koşullarında oluşacak özel davranışın belirlenmesi için önemli bir aşama teşkil etmektedir. Ancak, belirli bir yer hareketi etkisi altında zemin tepkisinin analizi esnasında belirsizlik yaratan pek çok faktör mevcuttur. Bu belirsizlikler genellikle yer hareketinin frekans içeriği, zemin kayma dalgası hızı profili, doğrusal olmayan dinamik zemin özellikleri ve uygulanan analiz yöntemi gibi unsurlara bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, zeminler, doğrusal olmayan dinamik özellikleri ve yer hareketinin frekans içeriği doğrultusunda, maruz kaldıkları yer hareketini büyütebilmekte veya sönmüleyebilmektedirler. Bu çalışmada, zeminlerin doğrusal olmayan tepki davranışları, dört farklı derin zemin profilinin üç farklı ölçeklendirilmiş deprem hareketinin etkisi altında analiz edilmesi yolu ile incelenmiştir. Çalışma, zeminlerin yer hareketini büyütme ve sönmüleme eğilimlerinin, yer hareketi parametreleriyle olan ilişkisini ortaya koymaya odaklanmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde, zeminlerin doğrusal olmayan büyütme ve sönmüleme davranışlarının yer hareketi parametreleri ile ilişkisi detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan zemin davranışı, Zemin tepki analizi, Zemin büyütmesi

ABSTRACT

Site response analysis is an important step in the seismic analysis process to determine the specific behavior of ground motion and local soil conditions. However, there are many factors that introduce uncertainty into the analysis of the site response under the influence of a particular ground motion. These uncertainties typically arise from factors such as the frequency content of the ground motion, the ground shear wave velocity profile, non-linear dynamic soil properties and the analysis method used. In addition, soils can amplify or attenuate the ground motion to which they are subjected, depending on their nonlinear dynamic properties and the frequency content of the ground motion. In this study, the nonlinear response behavior of soils is investigated by analyzing four different deep soil

¹ Doktora Öğrencisi, Hacettepe Üniversitesi, tugbaileri1@gmail.com

² Araştırmacı, Hacettepe Üniversitesi

³ Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi

profiles under the influence of three different scaled earthquake motions. The study focuses on the relationship between the ground motion amplification and damping tendencies of soils and the ground motion parameters. As a result of the findings, the relationship between the nonlinear amplification and damping behavior of soils and ground motion parameters is interpreted in detail.

Keywords: Non-linear soil behavior, Site response analysis, Soil amplification

1. GİRİŞ

1800'lü yılların sonlarından itibaren zeminlerin ana kayadan gelen deprem hareketlerini büyüttüğü bilinmektedir (Milne, 1898). Zemin tepki analizleri, yerel zemin koşulları boyunca ana kaya hareketinde meydana gelecek bu değişimlerin gerçekçi bir simülasyonunu sunar (Tran vd., 2018). Zemin katmanları boyunca değişen kayma dalgası hızı profili, şekil değiştirme etkisine bağlı olarak azalan kayma modülü ilişkisi ve sönüm oranı, zeminlerin sismik zorlanma altında sergiledikleri davranışı önemli ölçüde değiştirmektedir. Ancak gelişen deprem mühendisliği tecrübeleri, zeminlerin yer hareketi altında sergiledikleri davranışlarının doğrusal olmayan şekilde değiştiğini ortaya koymuştur (Hardin ve Drnevich, 1972; Darendeli, 2001; Hashash vd., 2010).

Bu çalışma kapsamında, 4 farklı derin zemin profilinin 3 farklı deprem hareketi etkisinde bir boyutlu zemin tepki analizleri gerçekleştirilerek, değişen zemin karakteristikleri ile değişen frekans içerikli yer hareketlerinin bir fonksiyonu olan zemin büyütme/sönümlenme davranışları incelenmiştir. 400 m derinliğinde ve uniform kil ve kum birimlerden oluşan zeminlerin farklı sismik zorlanmalar altında sergiledikleri doğrusal olmayan davranış ile zeminin doğrusal olmayan büyütme/sönümlenme davranışının yer hareketi parametreleri ile ilişkisi yorumlanmıştır.

2. ZEMİNLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN TEPKİ DAVRANIŞLARI

Zeminlerin sahip oldukları karakteristik özellikleri ve deprem hareketi frekans içeriğinin bir fonksiyonu şeklinde maruz kaldıkları hareketi büyüteceği veya sönümleyeceği, geçmişten günümüze farklı sismik bölgelerde tecrübe eden yıkıcı depremlere dayanan gözlemler ile keşfedilmiştir. Ancak zeminlerin maruz kaldıkları depremin gücü ile doğru orantılı olmaksızın sergiledikleri büyütme/sönümlenme davranışları nispeten yeni tespit edilmiştir ve günümüzde sahaya özel analizlerin ilgi noktalarından birisi olmaya devam etmektedir.

Northridge Depremi (1994) sırasında ana ve artçı sarsıntılara maruz kalan 15 farklı noktada kaydedilen veriler alüvyon zeminlerin, artçı ve nispeten zayıf sismik etkileri, 1 Hz için ~3.1 ve 3-10 Hz için ~1.4 olmak üzere, artan frekans ile azalan şekilde büyüttüğü ve güçlü ana sarsıntıları 1 Hz için ~1.9, 3 Hz için ~1.3 ve 10 Hz için ~0.8 olmak üzere, frekans ile azalan şekilde daha az büyüttüğü ve belirli frekans aralığında sönümlediği gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, zeminlerin doğrusal olmayan tepki davranışlarına ve hareketin frekans karakteristiklerinin tepki davranışındaki etkisine dair önemli bir değerlendirme sağlamıştır (Field vd., 1997). Benzer şekilde, Northridge Depremi (1994) depreminden sonra yüzeyden itibaren ilk 30 m boyunca ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}) 360 m/s'den küçük olan

sahalarda doğrusal olmayan zemin davranışının daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir (Tcifunac and Todorovska, 1996).

Aki (1988) ise zemin büyütme faktörünün yer hareketinin frekansına bağlı değiştiğini; zemin ortamlarının ~0.2 saniyeden daha uzun periyotlara sahip hareketlere maruz kaldıklarında, kaya ortamlarından yaklaşık 2-3 kat daha yüksek büyütme faktörleri gösterdiğini belirtmiştir. Periyodun 0.2 saniyeden daha kısa olması durumunda ise bu etki tam tersi olarak belirtilmiştir.

Bu durum Idriss (1991) tarafından, yumuşak zeminlerin doğrusal olmayan davranışları nedeni ile belirli koşullarda etkin kayma rijitliklerinin azalması ve döngüsel sönümlenmenin artması ile hareketlerin genliklerini azaltma eğiliminde olmaları şeklinde açıklanmıştır. Buna göre doğrusal olmayan etki genellikle sedimanların etkin kayma rijitliğinin azalması ve histeretik sönümlenmenin artması ile genlikleri azaltır.

Fercan vd. (2023) ise parametrik çalışmalar sonucunda daha az rijit zemin koşullarında ($V_{s30} < 180$ m/s ve kayma dalgası hızı profilinin doğrusal olması halinde), yüzeyde pik ivmelerin sönümlendiği, azalan büyütme faktörleri ile daha hızlı doğrusal olmayan davranış geliştiğini belirlemiştir. Buna göre zayıf rijitliğe sahip zeminler daha hızlı ve daha yüksek kayma modülü azalımı tecrübe etmektedir. Bu durum ise daha belirgin doğrusal olmayan davranışı göstermektedir.

3. ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ

Bu çalışma kapsamında zeminin gerilme-şekil değiştirme karakteristiğini göz önünde bulundurabilmek için bir boyutlu doğrusal olmayan (elastik olmayan) zemin tepki analizleri yapılmıştır. Zeminin doğrusal olmayan davranışı, zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizler ile incelenmiş ve bu analizler sonucunda zemin profillerinin dinamik özellikleri ile ilgili sonuçlar elde edilmiştir. Bu analizlerde deprem gibi tekrarlı yüklemeler altında her bir zemin tabakası için gerilme-şekil değiştirme (deformasyon) ilişkisine bağlı olarak kayma modülü ve sönüm oranında değişiklikler meydana geldiği kabul edilmektedir.

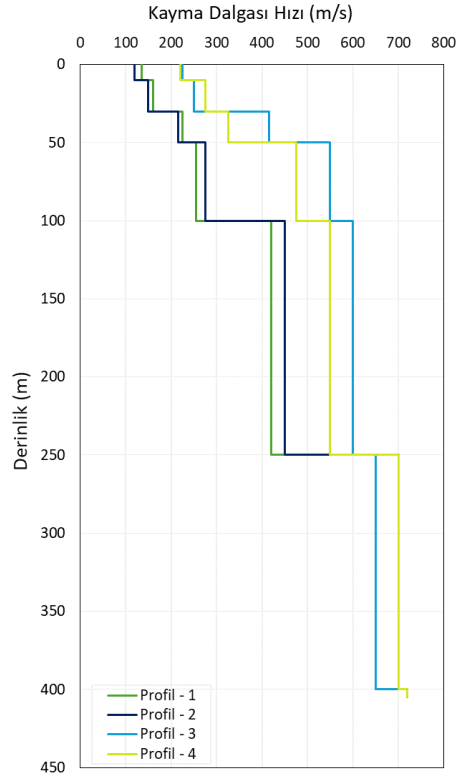
2.1. Zemin Profilleri

Her biri 400 m derinliğe sahip olmak üzere dört farklı zemin profili ile zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. İki profil sert ve yumuşak kil tabakalarından oluşurken, diğer iki profil gevşek ve orta sıkı kum tabakalarından oluşmaktadır. Tüm profillerde ayrılmış kaya tanımlanmış ve 400 metre derinlikte ana kaya ile sonlandırılmıştır. Zemin profillerinde yeraltı su seviyesi tanımlanmamıştır.

Analizlerde kullanılan zemin profillerinin özellikleri Tablo 1'de ve kayma dalgası hızının derinlik ile değişimi Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Bir boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinde kullanılan zemin profillerinin özellikleri

Zemin Profili	Tabaka No	Derinlik (m)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)	Plastisite İndisi (%)	Doğal Titreşim Frekansı (Hz)
Profil - 1	Kil 1-1	10	19	135-160	15	0.27
	Kil 2-1	30	19	160-225	15	
	Kil 3-1	50	20	225-255	15	
	Kil 4-1	100	20	255-420	20	
	Ayrışmış Kaya 1-1	250	21	420-650	20	
	Ayrışmış Kaya 2-1	400	21	650	20	
Profil - 2	Ana Kaya	400	22	720	-	0.28
	Kum 1-1	10	18	120-150	-	
	Kum 2-1	30	18	150-215	-	
	Kum 3-1	50	19	215-275	-	
	Kum 4-1	100	20	275-450	-	
	Ayrışmış Kaya 1-2	250	21	450-700	-	
Profil - 3	Ayrışmış Kaya 2-2	400	21	700	-	0.36
	Ana Kaya	400	22	720	-	
	Kil 1-2	10	20	225-250	15	
	Kil 2-2	30	20	250-415	20	
	Kil 3-2	50	21	415-550	20	
	Kil 4-2	100	21	550-600	20	
Profil - 4	Ayrışmış Kaya 1-3	250	21	600-650	20	0.35
	Ayrışmış Kaya 1-1	400	21	650	20	
	Ana Kaya	400	22	720	-	
	Kum 1-2	10	19	220-275	-	
	Kum 2-2	30	20	275-325	-	
	Kum 3-2	50	21	325-475	-	
Profil - 4	Kum 4-2	100	21	475-550	-	0.35
	Ayrışmış Kaya 2-1	250	21	550-700	-	
	Ayrışmış Kaya 2-2	400	21	700	-	
	Ana Kaya	400	22	720	-	



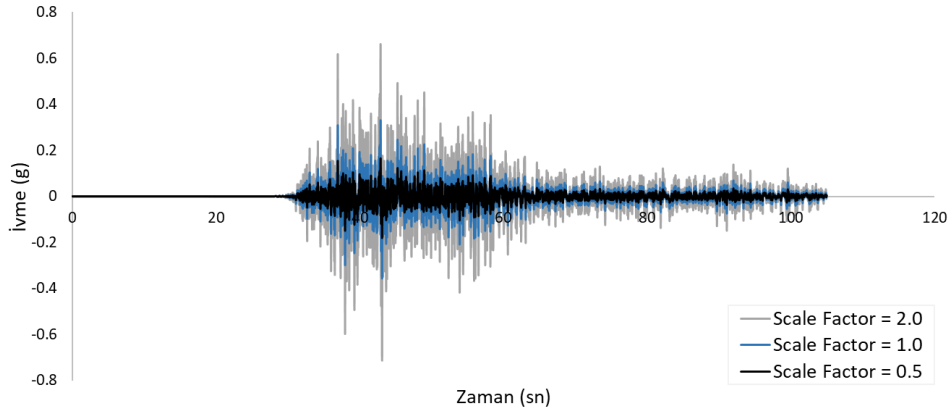
Şekil 1. Analizlerde kullanılan zeminlere ait kayma dalgası hızı profilleri

2.2. Deprem Kayıtlarının Seçimi

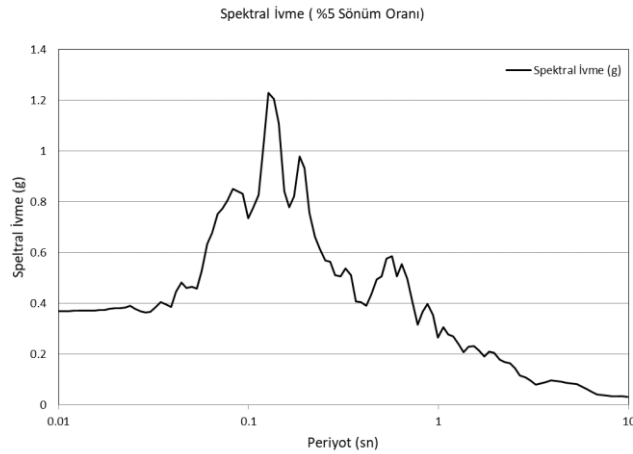
Çalışmada TADAS (Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi) veri tabanından indirilen moment büyüklüğü (M_w) 7.7, en büyük ivme (PGA) değeri 349.72 cm/s^2 ve Zemin Sınıfı ZB olan deprem yer hareketi kullanılmıştır (Tablo 2). Bu deprem yer hareketi kaydı, 3 farklı en büyük ivme (PGA) değerine göre ölçeklenerek 1 boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinde kullanılmıştır (Şekil 2). Zaman tanım alanında yapılan ölçeklendirmede frekans içeriği değiştirilmeden, deprem kaydının genliği sabit bir sayı ile lineer olarak ölçeklenmiştir. Şekil 3'te bu istasyonda kaydedilmiş %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumu verilmiştir.

Tablo 2. Bu çalışma kapsamında seçilen deprem kaydı ve özellikleri

Deprem Adı	İstasyon Kodu	Moment Büyüklük (M_w)	PGA (cm/s^2)	R_{epi} (km)	V_{s30} (m/s)	Zemin Sınıfı (EC8)
Kahramanmaraş Pazarcık, 2023	4611	7.7	349.72	55.32	731	ZB



Şekil 2. Doğrusal olmayan (nonlinear) zemin tepki analizlerinde kullanılan $\text{PGA}=0.18 \text{ g}$, $\text{PGA}=0.36 \text{ g}$ ve $\text{PGA}=0.72 \text{ g}$ olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları

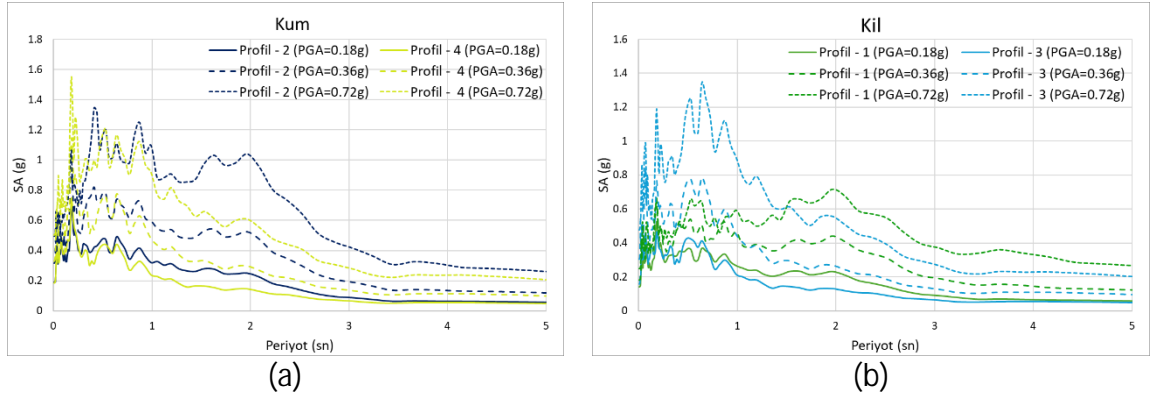


Şekil 3. TADAS veri tabanından indirilen 4611 no'lu istasyonun ivme kayıt spektrumu (%5 sönümleme oranı)

2.3. Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Zemin Tepki Analizleri

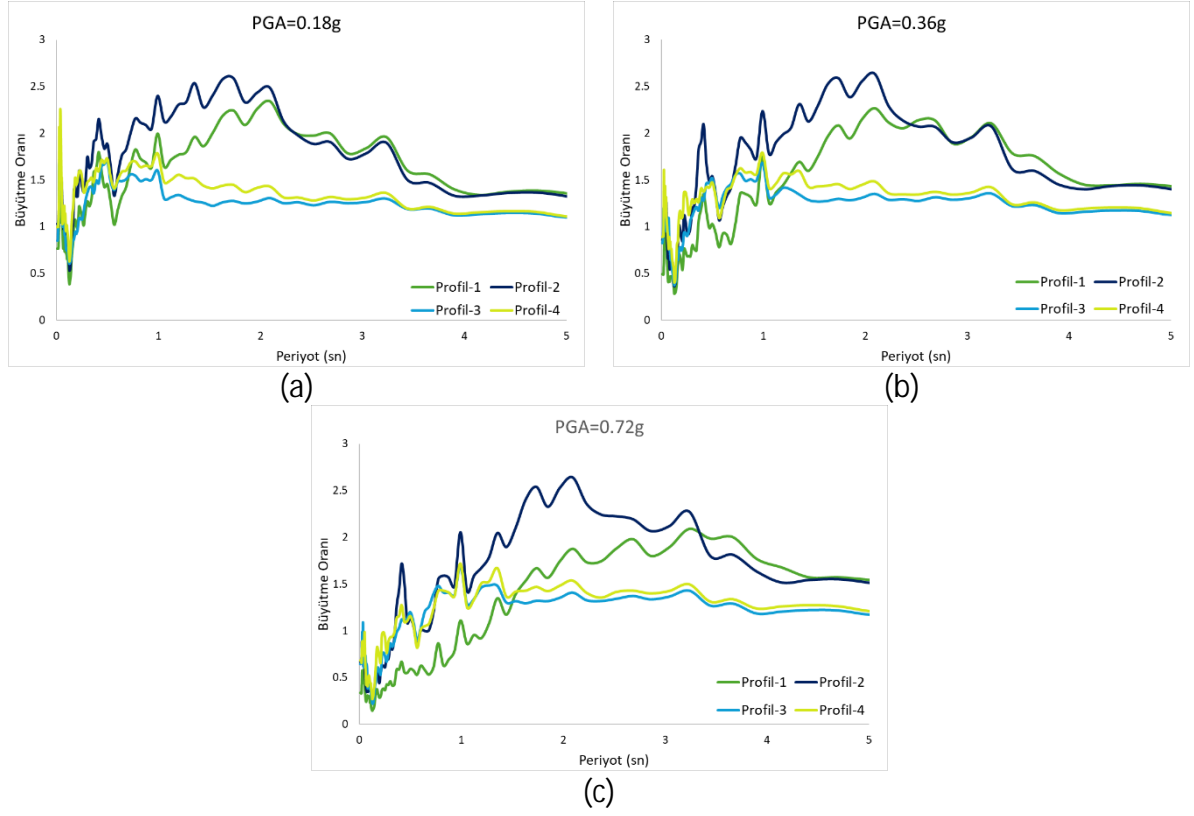
Bu çalışma kapsamında bir boyutlu ve doğrusal olmayan zemin modeline dayanan zemin büyütme analizleri DEEPSOIL programı ile yapılmıştır. Analizler kapsamında kullanılacak zeminin indeks ve mukavemet gibi parametrelerine ek olarak dinamik malzeme özelliklerine de (birim deformasyona bağlı modül azalım ve sönümlenme eğrilerine) ihtiyaç duyulmaktadır. Granüler zeminler (iri daneli) için Seed ve Idriss (1970) tarafından önerilen kayma modülü azalım eğrileri (G/G_{maks}) ve sönümlenme eğrileri seçilirken, kohezyonlu malzemeler (ince daneli) için Vucetic ve Dobry (1991) eğrileri ve ayrılmış kaya için Darendeli (2001) eğrileri kullanılmıştır.

PGA değerlerine göre ölçeklendirilen deprem kayıtlarına ait tepki spektrumları Şekil 4'te sunulmaktadır.



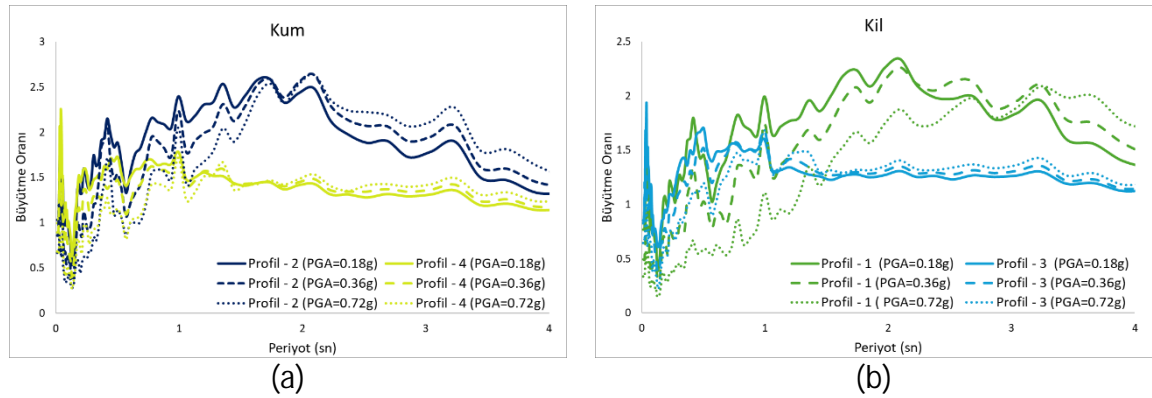
Şekil 4. Deprem ivme zaman kayıtlarının tepki spektrumları (a) Kum (b) Kil

Bu parametrik çalışmada, dört farklı zemin profili kullanılarak gerçekleştirilen zemin büyütme analizinden elde edilen sonuçlar her bir PGA değeri için ayrı ayrı Şekil 5'te ve farklı profiller için karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 5 ve Şekil 6'da görüldüğü gibi farklı deprem kayıtları ile yapılan analizler sonucunda spektral büyütme açısından farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu farklılıkların ana sebebi zemin profillerinin frekans içeriğinin farklı olması nedeniyle sahada büyütme miktarının daha fazla ya da daha az olduğu şeklinde yorumlanabilir. Zemin profillerindeki değişiklikler, zemin ve depremlerin frekans özelliklerine bağlı olarak, bu tekrarlı yüklerin (deprem yüklerinin) büyümesine (amplification) ya da küçülmesine (deamplification) neden olabilir.



Şekil 5. Zemin profillerinin yüzeyinde oluşan büyütme oranları (a) PGA=0.18g, (b) PGA=0.36g, (c) PGA=0.72g

Daha detaylı bir şekilde incelendiğinde ise, Şekil 5’de sunulan tepki spektrumları özelinde, öncelikle farklı PGA değerlerinin büyütme faktörleri üzerinde çok etkisi olmadığı görülmektedir. Her bir profilin artan PGA değerlerinde hesaplanan büyütme faktörü değerleri birbiri ile yaklaşık olarak aynıdır. Yukarıdaki şekiller incelendiğinde özellikle düşük periyotlarda zemin büyütme etkisinin 1’in altında olduğu, diğer bir deyişle depremin etkisini azalttığı, yüksek periyotlarda ise büyütme etkisinin arttığı görülmüştür.



Şekil 6. Zemin profillerinin yüzeyinde oluşan büyütme oranları (a) Kum (b) Kil

Ancak Şekil 6'da sunulduğu şekilde, kumlu ve killi profiller ayrı ayrı incelendiğinde, kum içeren profiller için (Profil 2 ve 4) gevşek kumlarda görülen büyütme etkisinin orta sıkı kumlarla kıyaslandığında özellikle 1 saniyeden daha yüksek periyotlarda önemli derecede farklılıklar gösterdiği, orta sıkı kumların neredeyse 1'e yakın değerler verirken, gevşek kumlarda büyütme etkisinin 2.5 mertebelerine ulaştığı görülmektedir. Aynı durum, killi profillerde (Profil 1 ve 3) de gözlenmektedir. Ancak bu profillerde büyütme değerleri birbirlerine daha yakındır. Yumuşak kil zemine sahip Profil 1'in yüksek PGA değerine sahip depremde (PGA=0.72 g) deprem yer hareketini diğer zeminlere, özellikle benzer özelliklere sahip kumlu zemine, Profil 2, göre daha fazla azalttığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu bildiri kapsamında, zeminlerin yer hareketini büyütme ve sönümlenme eğilimlerinin, yer hareketi parametreleriyle olan ilişkisini ortaya koymaya çalışılmıştır. Bu kapsam doğrultusunda 4 farklı zemin profili için farklı PGA değerlerine sahip deprem kayıtları kullanılarak 1 boyutlu zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda:

- Zemin profillerinin frekans değerlerindeki değişikliklerin deprem kayıtlarının büyütme ve küçültmesi üzerinde etkisi olduğu,
- Yumuşak zeminlerdeki büyütme etkisinin daha sert zeminlere göre daha fazla olduğu,
- Yumuşak kil zeminlerin yüksek PGA değerine sahip depremlerde deprem yer hareketini diğer zeminlere, özellikle benzer özelliklere sahip kumlu zeminlere göre daha fazla azalttığı görülmektedir.

görülmüştür. Ancak bu analizlerin sınırlı zemin profilleri ve sınırlı deprem kayıtları ile gerçekleştirildiği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

AFAD, The National Disaster and Emergency Management Presidency of Türkiye. <https://tadas.afad.gov.tr>. [Last accessed by September 1, 2024].

DEEPSOIL (2024, V7.1), A nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of 1-D Soil Columns, User Manual. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Darendeli, M. B. (2001). Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas.

Field, E. H. , J. P. A. , B. I. A. , Z. Y. (1997). Nonlinear ground-motion amplification by sediments during 1994 Northridge earthquake. Nature, 599–602.

- Hardin, Bobby O., Vincent P. Drnevich. "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves." *Journal of the Soil mechanics and Foundations Division* 98.7 (1972): 667-692.
- Hashash, Y.M.A., Phillips, C. and Groholski, D. (2010). "Recent advances in non-linear site response analysis", Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper no. OSP 4.
- Idriss, I. M. (1991). Earthquake "Ground Motions at Soft Soil Sites Earthquake Ground Motions at Soft Soil Sites." Second International Conference on Recent Advances In Geotechnical Earthquake Engineering and Soli Dynamics, 2265–2272. <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/02icrageesd/session12/3>
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970) "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses." Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 40p.
- Tcifunac, M. D., Todorovska, M. I. (1996). "Nonlinear Soil Response - 1994 Northridge, California Earthquake." *Journal of Geotechnical Engineering*, 122, 725–735.