Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

DEPREM FREKANS İÇERİĞİNİN SAHAYA ÖZEL ZEMİN TEPKİSİNE ETKİSİ

EFFECT OF EARTHQUAKE FREQUENCY CONTENT ON SITE-SPECIFIC GROUND RESPONSE

Ersin GÜLER[1], Kamil Bekir AFACAN[2]

ÖZET

Bu çalışmada, sahaya özgü zemin büyütme davranışının deprem frekans içeriğine bağlı değişimi, DeepSoil programı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde, farklı mühendislik özelliklerine sahip iki ayrı zemin profili dikkate alınmış ve her bir profil için toplam 11 adet gerçek deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Sahaya özel zemin tepkisi analizleri doğrusal olmayan (nonlineer) yaklaşım ile gerçekleştirilmiş ve her bir analiz sonucunda yüzey ivme zaman geçmişleri, maksimum yer ivmesi (PGA), spektral ivme değerleri ve büyütme oranları elde edilmiştir. Fourier spektrumları incelenerek zemin profillerinin frekans bağımlı davranışı detaylı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin büyütmesinin yalnızca zemin özelliklerine değil, aynı zamanda deprem kayıtlarının frekans içeriğine de güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, sahaya özgü zemin büyütme analizlerinde deprem kaydı seçiminin kritik öneme sahip olduğu ve farklı frekans içeriklerine sahip kayıtların analiz sonuçlarında önemli farklılıklara yol açabileceği ortaya konmuştur. Bu durum, mühendislik tasarımında ve performans değerlendirmelerinde kayıt seçimi kriterlerinin dikkatle belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Sahaya özel analiz, Frekans içeriği, Deprem.*

ABSTRACT

In this study, the variation of site-specific ground amplification behavior depending on the frequency content of earthquake motions was investigated using the DeepSoil program. In the analyses, two different soil profiles with distinct engineering properties were considered, and a total of 11 real earthquake acceleration records were utilized for each soil profile. Site-specific ground response analyses were performed using a nonlinear approach, and surface acceleration time histories, peak ground acceleration (PGA), spectral acceleration values, and amplification factors were obtained from each analysis. Fourier spectra were also examined to evaluate the frequency-dependent behavior of the soil profiles in detail. The results indicate that ground amplification is not only governed by soil properties but is also strongly influenced by the frequency content of the earthquake records. Consequently, it is demonstrated that the selection of earthquake records is of critical importance in site-specific ground response analyses, as records with different frequency characteristics can lead to significantly different results. This highlights the necessity of carefully defining record selection criteria in engineering design and performance assessments.
Keywords: *Site-specific ground response,Frequency content,Earthquake.*

[1] Doç.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, eguler@ogu.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Doç.Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, kafacan@ogu.edu.tr

1. GİRİŞ

Deprem sırasında ana kayadan yüzeye doğru yayılan sismik dalgalar, geçtikleri zemin tabakalarının dinamik özelliklerine bağlı olarak değişime uğramaktadır. Kayma dalgası hızı, tabaka kalınlığı, birim hacim ağırlık, rijitlik ve sönüm özellikleri gibi parametreler yüzeyde oluşacak yer hareketinin genliğini ve frekans içeriğini doğrudan etkileyebilmektedir (Hardin ve Richart, 1963; Yalçınkaya, 2004; İyisan ve Haşal, 2011). Bu nedenle aynı deprem yer hareketi, farklı zemin koşullarında önemli ölçüde farklı yüzey hareketlerinin oluşmasına neden olabilmektedir (Yalçınkaya, 2004; İyisan ve Haşal, 2011).

Sahaya özel zemin tepki analizleri, yerel zemin koşullarının deprem yer hareketi üzerindeki etkisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ansal vd., 2011; Stewart vd., 2014). Bu analizlerde mühendislik anakayası seviyesinde tanımlanan deprem hareketinin zemin profili boyunca yayılımı modellenerek yüzeyde oluşacak ivme zaman geçmişi, tepki spektrumu ve zemin büyütmesi belirlenebilmektedir. Özellikle doğrusal olmayan analizlerde, deprem hareketinin oluşturduğu şekil değiştirme seviyelerine bağlı olarak zemin rijitliğinin azalması ve sönüm oranının artması dikkate alınabilmektedir (Vucetic ve Dobry, 1991; Darendeli, 2001; Afacan vd., 2019).

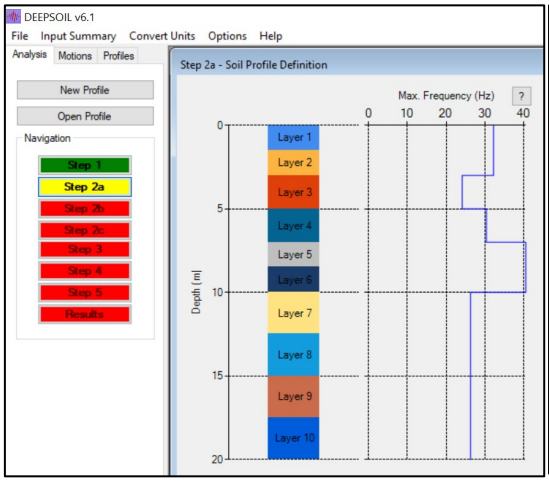
Zemin tepki analizlerinin sonuçları yalnızca zemin profilinin özelliklerine değil, analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özelliklerine de bağlıdır (Tönük, 2009; Stewart vd., 2014). Deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi, maksimum yer ivmesi, süre ve özellikle frekans içeriği, yüzey yer hareketinin oluşumunda etkili olabilmektedir. Deprem hareketinin baskın frekanslarının zemin profilinin karakteristik frekanslarıyla yakın olması durumunda belirli frekans veya periyot aralıklarında önemli büyütmeler meydana gelebilmektedir (Yalçınkaya ve Alptekin, 2003; Yalçınkaya, 2004). Bu nedenle benzer maksimum ivme değerlerine sahip deprem kayıtlarının dahi farklı frekans içerikleri nedeniyle aynı zemin profili üzerinde farklı yüzey tepkileri oluşturması mümkündür (Tönük, 2009; Güler, 2021).

Bu çalışmada, deprem kayıtlarının frekans içeriğinin sahaya özel zemin tepki analizleri üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda farklı mühendislik özelliklerine sahip iki zemin profili için 11 gerçek deprem kaydı kullanılarak DEEPSOIL programında doğrusal olmayan zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen yüzey tepki spektrumları ve büyütme davranışı, deprem kayıtlarının Fourier genlik spektrumları ve zemin profillerinin karakteristik frekansları dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

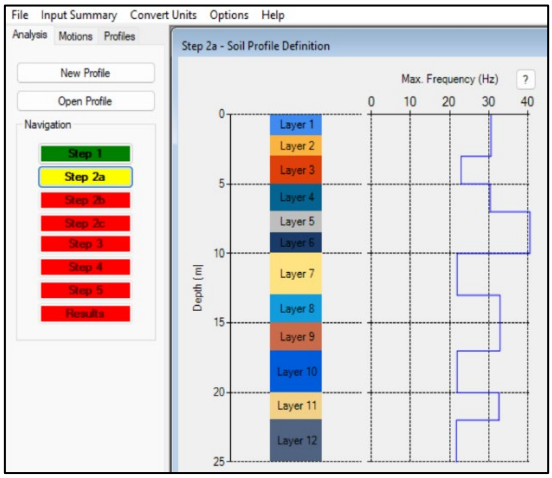
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1.Zemin Profilleri

Analizlerde kullanılan iki zemin profilinin geoteknik özellikleri tanımlanmıştır. Her bir profil için tabaka kalınlıkları, zemin türleri, birim hacim ağırlıkları, kayma dalgası hızları (Vs) ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılan dinamik zemin parametreleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Layer #	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m^3)	Shear Velocity (m/s)
1	Layer-1	1.50	15.27	193.08
2	Layer-2	1.50	15.27	193.08
3	Layer-3	2.00	15.27	193.08
4	Layer-4	2.00	15.41	242.80
5	Layer-5	1.50	15.41	242.80
6	Layer-6	1.50	15.41	242.80
7	Layer-7	2.50	18.06	262.88
8	Layer-8	2.50	18.06	262.88
9	Layer-9	2.50	19.02	263.00
10	Layer-10	2.50	19.02	263.00



Layer #	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m^3)	Shear Velocity (m/s)
1	Layer-1	1.5	16	183.36
2	Layer-2	1.5	16	183.36
3	Layer-3	2	16	183.36
4	Layer-4	2	16.3	242.8
5	Layer-5	1.5	16.3	242.8
6	Layer-6	1.5	16.3	242.8
7	Layer-7	3	17	262.88
8	Layer-8	2	17	262.88
9	Layer-9	2	17.5	263
10	Layer-10	3	17.5	263
11	Layer-11	2	17.9	260.52
12	Layer-12	3	17.9	260.52

Şekil 1. SK1 ve SK2 profil bilgileri

Zemin profillerinin yaklaşık temel periyotları ve karakteristik frekanslarının belirlenmesinde, tabaka kalınlıkları ve kayma dalgası hızları dikkate alınarak çeyrek dalga boyu yaklaşımı kullanılmıştır. Buna göre SK1 profili için yaklaşık temel periyot 0.34 s ve karakteristik frekans 2.96 Hz, SK2 profili için ise sırasıyla 0.42 s ve 2.38 Hz olarak hesaplanmıştır. İki profil benzer eşdeğer kayma dalgası hızlarına sahip olmakla birlikte, SK2 profilinin daha büyük toplam kalınlığa sahip olması temel periyodun artmasına ve karakteristik frekansın azalmasına neden olmaktadır. Analiz modelinde mühendislik anakayasının kayma dalgası hızı (Vs) 280 m/s olarak tanımlanmıştır. Zemin tabakalarının şekil değiştirmeye bağlı modül azalımı (G/Gmax) ve malzeme sönüm davranışlarının tanımlanmasında Darendeli (2001) modeli esas alınmıştır.

2.2. Deprem Kayıtları ve Frekans İçeriklerinin Belirlenmesi

Analizlerde farklı frekans özelliklerine sahip 11 gerçek deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Seçilen kayıtların ivme-zaman geçmişleri ve %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumları incelenmiş, kayıtların frekans içerikleri ise Fourier genlik spektrumları kullanılarak değerlendirilmiştir. Fourier spektrumları, kayıtların enerjisinin farklı frekans aralıklarında yoğunlaştığını ve kullanılan yer hareketlerinin frekans içeriği bakımından belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bazı kayıtların düşük ve orta frekans bileşenleri daha belirgin iken, bazı kayıtların daha geniş bir frekans bandına yayılan içeriğe sahip

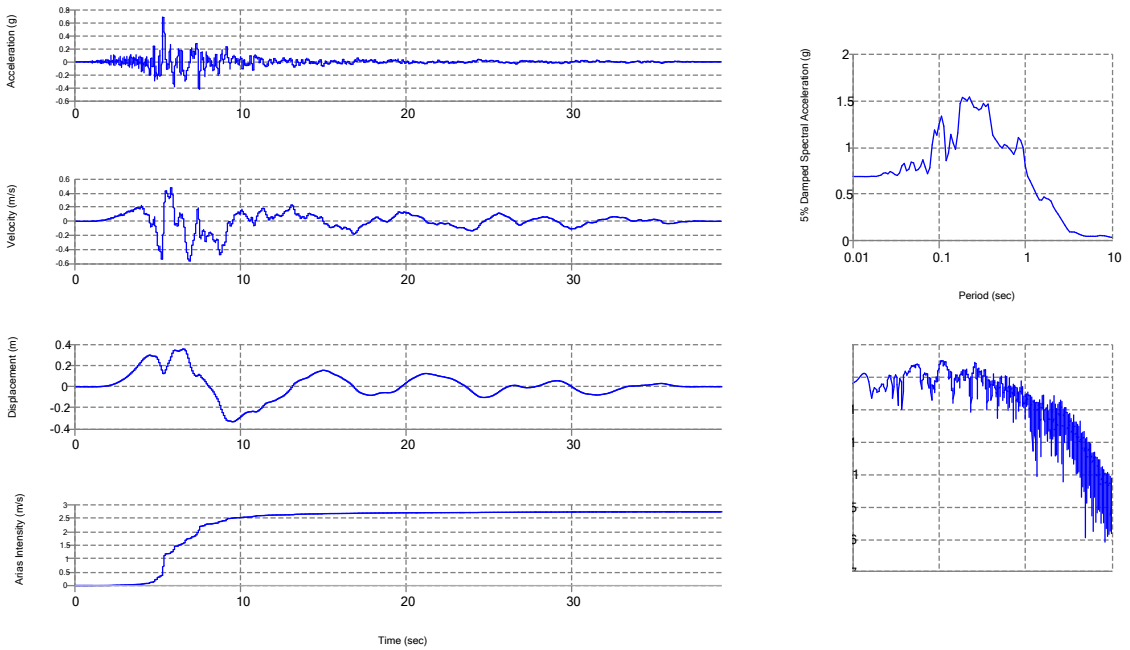
olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, deprem hareketinin frekans içeriği ile zemin profillerinin dinamik özellikleri arasındaki etkileşimin yüzey yer hareketi üzerindeki etkisinin araştırılmasına olanak sağlamaktadır. Deprem kayıtlarının başlangıç şiddet düzeylerindeki farklılıkların etkisini sınırlandırmak amacıyla tüm kayıtlar 0.689 g hedef PGA değerine basit ölçekleme yöntemiyle ölçeklendirilmiştir. Her bir kayıt için ölçek katsayısı, hedef PGA değerinin kaydın başlangıç PGA değerine oranı olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Deprem kayıtlarının Fourier spektrumlarından belirlenen yaklaşık etkin frekans aralıkları

No	**Deprem Kaydı**	**Fourier spektrumundan yaklaşık etkin frekans bölgesi**	**Genel karakter**
1	Imperial Valley-02	~0.5–5 Hz	Orta frekans ağırlıklı, geniş bant
2	Parkfield	~0.5–8 Hz	Orta frekans ağırlıklı
3	Managua, Nicaragua-01	~0.5–8 Hz	Geniş bant, orta frekans belirgin
4	Imperial Valley-06	~0.5–10 Hz	Geniş bant
5	Morgan Hill	~0.2–5 Hz	Düşük–orta frekans ağırlıklı
6	Kobe	~0.1–5 Hz	Düşük–orta frekans bileşenleri güçlü
7	Kocaeli	~0.1–5 Hz	Düşük frekans içeriği belirgin
8	Düzce	~0.2–5 Hz	Düşük–orta frekans ağırlıklı
9	Parkfield-02	~0.2–5 Hz	Düşük–orta frekans ağırlıklı
10	El Mayor-Cucapah	~0.1–10+ Hz	Oldukça geniş bantlı
11	Darfield	~0.1–10+ Hz	Geniş bantlı, düşük frekans bileşenleri de belirgin

Tablo 2. Seçilen depremler ve özellikleri

	Deprem	Yıl	İstasyon	Magnitüd (M)	Fay Tipi	PGA	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/sec)
1	"Imperial Valley-02"	1940	"El Centro Array #9"	6.95	Doğrultu atımlı	0.280	6.09	6.09	213.44
2	"Parkfield"	1966	"Cholame - Shandon Array #5"	6.19	Doğrultu atımlı	0.443	9.58	9.58	289.56
3	"Managua_ Nicaragua-01"	1972	"Managua_ ESSO"	6.24	Doğrultu atımlı	0.371	3.51	4.06	288.77
4	"Imperial Valley-06"	1979	"El Centro Array #4"	6.53	Doğrultu atımlı	0.484	4.9	7.05	208.91
5	"Morgan Hill"	1984	"Gilroy Array #4"	6.19	Doğrultu atımlı	0.224	11.53	11.54	221.78
6	"Kobe_ Japan"	1995	"Amagasaki"	6.9	Doğrultu atımlı	0.275	11.34	11.34	256.00
7	"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Yarimca"	7.51	Doğrultu atımlı	0.226	1.38	4.83	297.00
8	"Duzce_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.14	Doğrultu atımlı	0.404	0	6.58	281.86
9	"Parkfield-02_ CA"	2004	"Parkfield - Cholame 4AW"	6.0	Doğrultu atımlı	0.302	4.81	5.53	283.38
10	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	"CERRO PRIETO GEOTHERMAL"	7.2	Doğrultu atımlı	0.286	8.88	10.92	242.05
11	"Darfield_ New Zealand"	2010	"LINC"	7.0	Doğrultu atımlı	0.461	5.07	7.11	263.2



Şekil 2. Imperial Valley-02 deprem kaydının zaman ve frekans alanındaki özellikleri.

2.3. Sahaya Özel Zemin Tepki Analizleri

Bu çalışmada sahaya özel zemin tepki analizleri DEEPSOIL programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, farklı mühendislik ve dinamik özelliklere sahip iki ayrı zemin profili dikkate alınmış ve her bir profil 11 gerçek deprem ivme kaydı altında incelenmiştir. Böylece toplam 22 doğrusal olmayan zemin tepki analizi gerçekleştirilmiştir.

Zemin davranışının gerçeğe daha yakın temsil edilebilmesi amacıyla analizlerde doğrusal olmayan yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, deprem hareketi sırasında artan kayma şekil değiştirmelerine bağlı olarak zemin rijitliğinde meydana gelen azalma ve sönüm oranındaki artış dikkate alınmaktadır. Zemin tabakalarının dinamik özellikleri tanımlanarak deprem hareketlerinin mühendislik anakayasından yüzeye doğru yayılımı modellenmiştir.

Her bir deprem kaydı için elde edilen yüzey ivme zaman geçmişleri, maksimum yer ivmesi (PGA), %5 sönümlü elastik ivme tepki spektrumları ve spektral büyütme oranları değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde özellikle deprem kayıtlarının frekans içerikleri ile zemin profillerinin karakteristik frekansları arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Böylece farklı frekans özelliklerine sahip deprem hareketlerinin aynı zemin profili üzerindeki etkileri ile aynı deprem kaydının farklı zemin profillerinde oluşturduğu büyütme davranışı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma
3.1. Frekans İçeriğinin Zemin Büyütmesine Etkisi

Analizlerde kullanılan 11 gerçek deprem kaydının Fourier genlik spektrumları incelendiğinde, kayıtların frekans içerikleri bakımından belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Fourier spektrumları, deprem hareketlerinin tek bir frekanstan ziyade geniş bir frekans aralığında bileşenler içerdiğini ve bu bileşenlerin genliklerinin kayıtlar arasında önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır. Kayıtların büyük bölümünde belirgin Fourier genliklerinin yaklaşık 0.1–10 Hz aralığında yoğunlaştığı, 10 Hz'in üzerindeki frekanslarda ise genliklerin genel olarak azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, bazı kayıtlar daha dar bir frekans aralığında yoğunlaşırken, bazı kayıtların daha geniş bantlı bir frekans karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir.

SK1 ve SK2 profillerinin yaklaşık temel periyotları sırasıyla 0.34 s ve 0.42 s, bunlara karşılık gelen karakteristik frekansları ise 2.96 Hz ve 2.38 Hz olarak hesaplanmıştır. İki profilin eşdeğer kayma dalgası hızları birbirine yakın olmakla birlikte, SK2 profilinin daha büyük toplam kalınlığa sahip olması temel periyodunun artmasına ve karakteristik frekansının SK1'e göre daha düşük olmasına neden olmuştur.

SK1 ve SK2 için belirlenen karakteristik frekansların, deprem kayıtlarının önemli Fourier bileşenlerinin bulunduğu yaklaşık 0.1–10 Hz aralığı içerisinde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, özellikle 2–3 Hz civarındaki deprem hareketi bileşenlerinin her iki zemin profilinin dinamik tepkisi açısından önem taşıdığını göstermektedir. Deprem kayıtlarının Fourier genliklerinin bu frekans bölgesinde birbirinden farklı olması, aynı zemin profiline uygulanan farklı kayıtların farklı büyütme ve yüzey tepki davranışları oluşturabilmesinin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

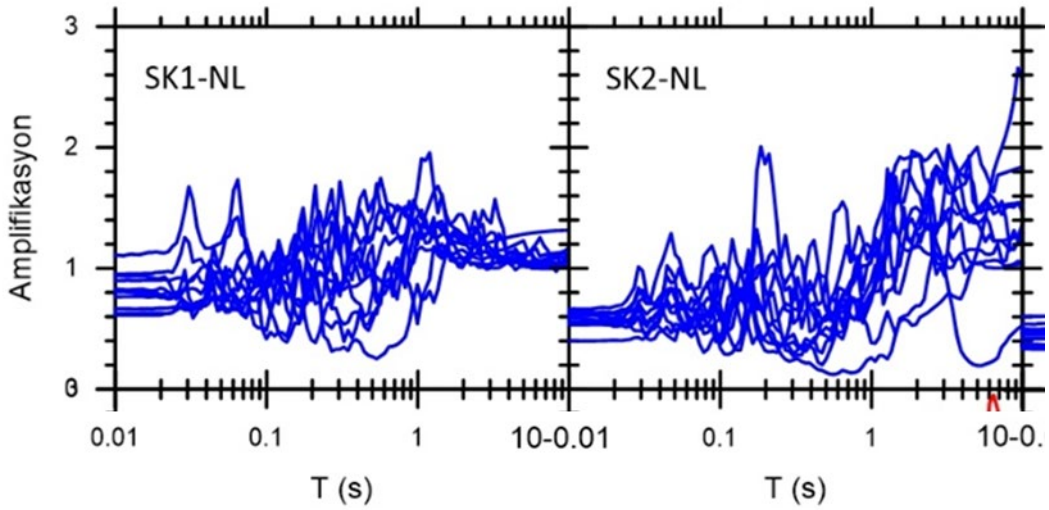
Doğrusal olmayan analizler sonucunda SK1 ve SK2 profilleri için elde edilen yüzey tepki spektrumlarında kayıtlar arasında belirgin farklılıkların meydana geldiği görülmüştür. Özellikle zemin profillerinin karakteristik periyotlarına karşılık gelen yaklaşık 0.3–0.4 s periyot bölgesinde spektral ivmelerde belirgin değişimler gözlenmiştir. Bu periyot aralığının SK1 ve SK2 için hesaplanan yaklaşık 0.34 s ve 0.42 s temel periyotlarla uyumlu olması, giriş hareketinin frekans içeriği ile zemin profilinin dinamik özellikleri arasındaki etkileşimin yüzey spektral tepkisinin oluşumunda önemli olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, zemin büyütmesinin yalnızca tek bir frekans bileşeniyle açıklanamayacağı dikkate alınmalıdır. Deprem kayıtlarının geniş bantlı frekans içeriği ile zeminin doğrusal olmayan davranışı birlikte yüzey hareketinin genlik ve spektral özelliklerini belirlemektedir. Bu nedenle deprem kayıtlarının yalnızca maksimum yer ivmesi (PGA) gibi tekil bir parametre üzerinden değerlendirilmesi, sahaya özel zemin tepki analizlerinde kayıtlar arasındaki farklılıkların açıklanması açısından yeterli olmayabilir.

Sonuç olarak, Fourier spektrumları ile zemin profillerinin karakteristik frekanslarının birlikte değerlendirilmesi, deprem kayıtlarına bağlı olarak ortaya çıkan farklı yüzey tepkilerinin açıklanmasına katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, sahaya özel zemin tepki analizlerinde deprem kaydı seçiminde deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi ve maksimum yer ivmesinin yanı sıra frekans içeriğinin de dikkate alınmasının önemli olduğunu göstermektedir.

SK1 ve SK2 zemin profilleri için gerçekleştirilen doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen spektral büyütme oranları Şekil 3'te verilmiştir. Her iki zemin profili için 11 farklı deprem kaydından elde edilen spektral ivme eğrileri, TBDY (2018) kapsamında tanımlanan tasarım spektrumu ile birlikte değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, kullanılan deprem kaydına bağlı olarak yüzey spektral ivmelerinin önemli ölçüde değiştiğini ve özellikle spektral ivmelerin maksimum değerlere ulaştığı periyot bölgelerinde kayıtlar arasındaki farkın arttığını göstermektedir.

SK1 ve SK2 zemin profilleri için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen spektral büyütme oranları Şekil 3'te verilmiştir. Büyütme oranları, yüzeyde elde edilen ivme tepki spektrumlarının giriş hareketine ait spektral ivmelere oranlanmasıyla belirlenmiştir. Sonuçlar, büyütme davranışının periyoda ve kullanılan deprem kaydına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. SK1 profilinde büyütme oranlarının genel olarak yaklaşık 0.3–1.5 s periyot aralığında belirginleştiği ve bazı kayıtlarda yaklaşık 2.0 seviyesine ulaştığı görülmektedir. SK2 profilinde ise kayıtlar arasındaki saçılımın daha belirgin olduğu ve özellikle yaklaşık 1 s'den daha büyük periyotlarda büyütme oranlarının artarak bazı kayıtlarda 2.0'ın üzerine çıktığı gözlenmektedir. Buna karşılık, bazı periyot aralıklarında büyütme oranının 1.0'ın altında kalması, zemin profilinin giriş hareketinin belirli frekans bileşenlerini büyütürken bazı bileşenlerini azaltabildiğini göstermektedir.



Şekil 3. SK 1 ve SK2 için spektral büyütme oranları

3.2. Spektral Tepkilerin Karşılaştırılması

SK1-NL ve SK2-NL sonuçları genel spektral dağılım açısından benzer bir eğilim göstermekle birlikte, kayıt bazında spektral ivme değerlerinde farklılıklar bulunmaktadır. Bu durum, zemin profillerinin mühendislik ve dinamik özelliklerindeki farklılıkların deprem hareketlerinin yüzeye iletilmesi sırasında spektral içeriği değiştirebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kayıtlar arasındaki farkın her iki zemin profilinde de belirgin olması, yüzey spektral tepkisinin yalnızca zemin özellikleri ile açıklanamayacağını ortaya koymaktadır.

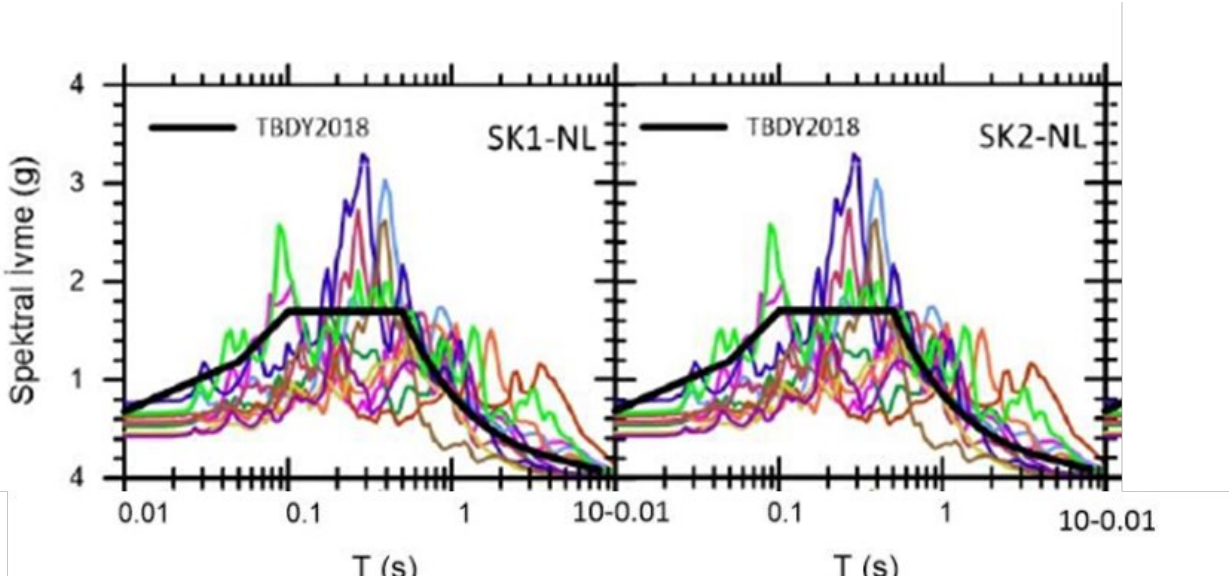
Önceki bölümde değerlendirilen Fourier genlik spektrumları ile yüzey tepki spektrumları birlikte ele alındığında, deprem kayıtlarının farklı frekans içeriklerinin yüzeyde oluşan spektral tepkinin değişmesinde etkili olduğu değerlendirilmektedir. Özellikle belirli frekanslarda önemli genliklere sahip kayıtların, bu frekanslara karşılık gelen periyot

bölgelerinde farklı spektral talepler oluşturduğu görülmektedir. Dolayısıyla sahaya özel zemin tepki analizlerinde deprem kayıtlarının yalnızca maksimum yer ivmesi açısından değil, frekans ve periyot içerikleri bakımından da değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Sonuçlar ayrıca, tek bir deprem kaydına dayalı değerlendirmelerin zemin profilinin olası yüzey tepkisini temsil etmekte yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Farklı frekans özelliklerine sahip birden fazla gerçek deprem kaydının kullanılması, zemin tepkisindeki değişkenliğin ve olası spektral taleplerin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 4'te doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen yüzey ivme tepki spektrumları, referans amacıyla TBDY (2018) yatay elastik tasarım spektrumu ile birlikte gösterilmiştir. Kullanılan TBDY spektrumu için S_{DS}=1.695, S_{D1}=0.851, T_A=0.100 s ve T_B=0.502 s'dir. Deprem kayıtları PGA düzeyi esas alınarak ölçeklendirildiğinden, bu karşılaştırma TBDY kapsamında kayıtların spektral uyumluluğunun değerlendirilmesi amacıyla değil, analizlerden elde edilen yüzey spektral taleplerinin referans tasarım spektrumu ile görsel olarak karşılaştırılması amacıyla sunulmuştur.

Bununla birlikte, SK1 ve SK2 profillerinin yaklaşık temel periyotlarının sırasıyla 0.34 s ve 0.42 s olması, iki profilin dinamik karakteristiklerinin birbirine görece yakın olduğunu göstermektedir. Bu nedenle profiller arasında gözlenen farklılıkların, belirgin biçimde farklı temel periyotlara sahip zemin koşullarına doğrudan genellenmemesi ve sonuçların incelenen iki zemin profili kapsamında değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4. SK1 ve SK2 zemin profilleri için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen yüzey ivme tepki spektrumlarının TBDY (2018) tasarım spektrumu ile karşılaştırılması.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, deprem hareketlerinin frekans içeriğinin sahaya özel zemin tepkisi üzerindeki etkisi, farklı dinamik özelliklere sahip iki zemin profili ve 11 gerçek deprem ivme kaydı

kullanılarak DEEPSOIL programında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerle incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kullanılan deprem kayıtlarının Fourier genlik spektrumları belirgin farklılıklar göstermiş; önemli frekans bileşenlerinin genel olarak 0.1–10 Hz aralığında yoğunlaştığı, bazı kayıtların ise diğerlerine göre daha geniş bantlı bir frekans karakteristiğine sahip olduğu belirlenmiştir.

- Çeyrek dalga boyu yaklaşımına göre SK1 ve SK2 zemin profillerinin yaklaşık temel periyotları sırasıyla 0.34 s ve 0.42 s, karakteristik frekansları ise 2.96 Hz ve 2.38 Hz olarak hesaplanmıştır. SK2 profilinin daha kalın olması, benzer eşdeğer kayma dalgası hızlarına rağmen daha uzun temel periyot ve daha düşük karakteristik frekans elde edilmesine neden olmuştur.

- Her iki zemin profilinin karakteristik frekanslarının deprem kayıtlarının etkin frekans aralığı içerisinde yer aldığı belirlenmiştir. Özellikle 2–3 Hz civarındaki frekans bileşenlerinin, SK1 ve SK2 profillerinin dinamik tepkisi açısından önemli olduğu değerlendirilmiştir.

- Doğrusal olmayan analizlerden elde edilen yüzey tepki spektrumlarında kayıtlar arasında belirgin farklılıklar meydana gelmiş ve bu değişimlerin özellikle yaklaşık 0.3–0.4 s periyot aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Bu periyot bölgesinin SK1 ve SK2 için hesaplanan 0.34 s ve 0.42 s temel periyotlarla uyumlu olması, giriş hareketinin frekans içeriği ile zemin profilinin dinamik özellikleri arasındaki etkileşimin yüzey spektral tepkisi üzerindeki önemini ortaya koymaktadır.

- Deprem kaydına bağlı olarak yüzey spektral ivmelerinde önemli saçılım meydana gelmiş ve bazı kayıtlar için maksimum spektral ivmeler 3 g seviyesinin üzerine çıkmıştır. Bu durum, aynı PGA düzeyine ölçeklenen kayıtların farklı frekans özelliklerinin yüzey spektral talebi üzerinde önemli farklılıklara yol açabileceğini göstermektedir.

- Fourier genlik spektrumları ve yüzey tepki spektrumlarının birlikte değerlendirilmesi, sahaya özel zemin tepkisinin yalnızca zemin özellikleri veya maksimum yer ivmesi (PGA) ile açıklanamayacağını; deprem hareketinin frekans içeriğinin de analiz sonuçlarını etkileyen önemli parametrelerden biri olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, sahaya özel zemin tepki analizlerinde deprem kaydı seçiminde yalnızca deprem büyüklüğü, kaynak-saha mesafesi ve maksimum yer ivmesi gibi parametrelerin dikkate alınması yeterli olmayabilir. Deprem kayıtlarının frekans içeriği ile zemin profilinin karakteristik frekanslarının birlikte değerlendirilmesi, yüzeyde oluşabilecek büyütme ve spektral talebin daha gerçekçi biçimde belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Farklı frekans özelliklerini temsil eden birden fazla gerçek deprem kaydının kullanılması, kayıt seçimine bağlı değişkenliğin daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan zemin profilleri ve ilgili geoteknik parametreler, Ersin GÜLER tarafından 2021 yılında yayımlanan "Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması" başlıklı doktora tezinde elde edilen veriler esas alınarak oluşturulmuştur

.

KAYNAKLAR

Afacan, K.B., Yniesta, S., Shafiee, A., Stewart, J.P. ve Brandenberg, S.J. (2019), "Total Stress Analysis of Soft Clay Ground Response in Centrifuge Models", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 145, No. 10, 04019061.

Ansal, A., Tönük, G. ve Kurtuluş, A. (2011), "Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi", 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 1-8.

Darendeli, M.B. (2001), "Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

Güler, E. (2021). "Zeminlerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Zemin Büyütme Analizlerinin Yapılması" Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, FBE. Doktora Tezi.

Hardin, B.O. ve Richart, F.E. (1963), "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 89, No. SM1, 33-65.

Hashash, Y.M.A.; Musgrove, M.I.; Harmon, J.A.; Groholski, D.; Phillips, C.A.; Park, D. DEEPSOIL V6.1, User Manual; Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, IL, USA, 2016.

İyisan, H. ve Haşal, M.E. (2011), "Zemin Büyütmesi ve Yerel Koşulların Spektral İvmeye Etkisi", İTÜ Dergisi/Mühendislik, Vol. 10, No. 4, 47-56.

Peer. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database. https://ngawest2.berkeley.edu/.

Stewart, J.P., Afshari, K. ve Hashash, Y.M.A. (2014), "Guidelines for Performing Hazard-Consistent One-Dimensional Ground Response Analysis for Ground Motion Prediction", PEER Report No. 2014/16, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

TBDY (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmî Gazete, 18 Mart 2018, Sayı: 30364 (Mükerrer), Ankara.

Tönük, G. (2009), "Saha Davranış Analizlerine Etki Eden Faktörler", Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Vucetic, M. ve Dobry, R. (1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 1, 89-107.

Yalçınkaya, E. ve Alptekin, Ö. (2003), "Dinar'da Zemin Büyütmesi ve 1 Ekim 1995 Depreminde Gözlenen Hasarla İlişkisi", Yerbilimleri, No. 27, 1-13.

Yalçınkaya, E. (2004), "Bir Boyutlu Modeller İçin Zemin Büyütmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi", İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, Vol. 17, No. 1, 47-56.