



Yeraltı suyunun spektral davranışa etkisi Effect of groundwater on spectral behavior

Ebru Civelekler^{1,*} , Kamil Bekir Afacan² 

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir Türkiye

Öz

Kuru ve doymun durumda olan zeminlerin çevrimsel yüklemeye esnasında göstereceği zemin davranışı farklıdır. Özellikle sismik yükler altında doymun olan zeminlerde meydana gelen tekrarlı gerilmeler sonucunda, zeminde sıvılaşma, büyütme ve taşıma gücü kaybı gibi zemin problemlerinden dolayı hasarlar meydana gelebilmektedir. Dinamik yüklerin etkisiyle oluşacak kayma birim şekil değişme seviyeleri de farklılık gösterecek ve sönümlenme seviyeleri de bu durumdan etkilenen olacaktır. Bu çalışmada aynı bölgede yer alan yeraltı suyu bulunmayan 2 sondaj ile yüzeye yakın yeraltı suyu seviyesine sahip doymun zemin tabakalarından oluşan 2 sondaj için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmış ve su seviyesinin etkisi tartışılmıştır. Çalışmada Eskişehir şehir merkezinde alüvyon zemin üzerinde yer alan 4 sondaj için 11 farklı istasyona ait gerçek ivme kayıt verileri kullanılmıştır. Kayma dalgası hızının etkisinin görülmemesi için kayma dalgası hızları yakın olan sondajlar tercih edilmiştir. Analizler hem frekans (eşdeğer doğrusal) hem de zaman tanım alanında (doğrusal olmayan) çözümler yapabilen Deepsoil 7.0 yazılımında yapılmıştır. Analizler sonucunda yeraltı suyu bulunan sondajlarda daha büyük spektral parametreler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yeraltı suyu, Zemin özellikleri, Bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz, Bir boyutlu doğrusal olmayan analiz

1 Giriş

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşakları arasında yer almakta ve aktif fay hatlarını bünyesinde barındırmaktadır. Bu nedenle bugüne kadar 1999 Kocaeli, 1999 Düzce, 2011 Van, 2020 Elazığ ve 2020 İzmir olmak üzere aletsel kayıtlara geçmiş; çok büyük kayıplar ve hasarlarla sonuçlanan birçok deprem yaşamıştır. İnceleme alanı olan Eskişehir, 1999 Kocaeli depreminden etkilenerek yapısal hasar ve can kayıpları yaşayan şehirlerden biridir. Ayrıca 20 Şubat 1956'da aletsel kayıtlara göre 6.4 büyüklüğünde Eskişehir merkezli kaydedilen bir deprem sonucunda bölgede büyük can ve mal kayıpları yaşanmıştır.

Dinamik yükler etkisinde farklılaşan zemin davranışları ilk olarak 1964 Niğata Depremi'nden sonra dikkat çekmeye başlamış; sonralarında 1985 San Francisco, 1989 Loma Prieta, 1995 Kobe, 1999 Kocaeli, 2011 Van ve 2020 İzmir depremleri gibi birçok depremde araştırmacılar tarafından

Abstract

The behavior of dry and saturated soils during cyclic loading is different. As a result of cyclic stresses that occur on soils, especially saturated soils under seismic loads, damage caused by ground problems such as liquefaction, amplification and loss of bearing capacity on the soil is expected. During stresses that generated under the effect of dynamic loads, the damping ratio levels may change due to the soil properties (dry sand or saturated sand). In this case, soil behavior analysis is performed in order to determine the amplification-liquefaction risk resulting from high strains. In this study, one-dimensional equivalent linear and non-linear analyzes were performed for two boreholes without groundwater and two boreholes consisting of saturated soil layers with near-surface groundwater levels in the same region. The soil profiles were excited by using real acceleration recording data of 11 different stations for 4 boreholes located on the alluvial ground in Eskişehir city center. For the study, boreholes with the same shear wave velocities were preferred. Analyzes were performed in Deepsoil 7.0 software, which can perform both frequency (equivalent linear) and time history (non-linear) solutions. As a result of the analyzes, larger spectral parameters were obtained in boreholes with groundwater.

Keywords: Groundwater, Soil properties, One-dimensional equivalent linear analysis, One-dimensional nonlinear analysis

daha fazla çalışılmaya başlanmıştır. Araştırmalarda depremler nedeniyle ortaya çıkan yapısal hasarlar incelendiğinde; deprem odak noktasına benzer uzaklıklarda olan hatta daha uzak olan yerleşim alanlarının depremden farklı derecede etkilenmesinin nedenleri incelenmiştir. Bu incelemede anakaya ile yer yüzeyi arasındaki zemin tabakalarının türlerine, kalınlıklarına, anakaya derinliğine ve hareketin özelliği gibi birçok etkene bağlı olarak hasar durumlarının değiştiği gözlemlenmiştir [1-3]. Zemin tabakalarının içerisinde sismik dalgaların yayılmasından kaynaklanan hareketin yoğunluğundaki ve frekans içeriğindeki değişiklik topoğrafik özellikleri ile birlikte zemin etkilerinin doğrudan yansımalarıdır [4]. Bu nedenle yüzeyde hissedilen hareket, anakaya hareketinin başlangıcından yüzeye ulaşmasına kadar saha özelliklerinin tamamından etkilenip oluşturduğu harekettir. Bu da saha koşullarının tüm özelliklerini (geoteknik ve jeolojik) göz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ecivelekler@gmail.com. (E. Civelekler)

Geliş / Received: 11.10.2022 Kabul / Accepted: 06.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1187363

önüne alarak dinamik davranışın ortaya konmasıyla açıklanmaktadır. Günümüzde depreme yakın sahalarda sismik risk, zemin amplifikasyonu, saha baskın periyodu ve spektral parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmüştür [5-8].

Zemin büyütmesi kavramı, geoteknik deprem mühendisliği çalışmalarında birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve zeminin büyütme faktörünün özellikle yumuşak zeminlerde deprem sırasında yapılarda oluşabilecek hasarı kontrol eden bir parametre olduğu kabul edilmiştir [9]. Bu nedenle deprem zararlarını en aza indirmeyi ve güvenli yapıların tasarımını amaç edinen geoteknik deprem mühendisliği çalışmaları için sahaya özel tasarım davranış spektrumlarının ortaya konması gerekmektedir. Bu çalışmalar kuvvetli yer hareketi etkisinde oluşan gerilme-birim deformasyonların ve bu bağlamda oluşabilecek büyütme-sıvılaşma risklerinin belirlenmesini amaç edinen zemin davranış analizleri ile yapılmaktadır.

Günümüzde bir boyutlu zemin davranış analizleri frekans alanı analizleri olarak bilinen eşdeğer doğrusal zemin davranış analizleri ve zaman alanı analizleri olarak bilinen doğrusal olmayan zemin davranış analizleri olarak iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Eşdeğer doğrusal zemin davranış analizleri; basitliği, pratikliği ve daha az hesaplama gerektirmesi nedeniyle daha fazla tercih edilmiştir [10, 11]. Fakat bir boyutlu eşdeğer doğrusal analizler, özellikle yüksek gerilmelerin olduğu sahalarda zeminin doğrusal olmayan (elastik olmayan) davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu durumlarda doğrusal olmayan zemin davranış analizlerinin yapılması önerilmektedir [10].

Bu çalışmada amaç; yeraltı suyunun yüksek seviyelerde olduğu 2 sondaj ve yeraltı suyu seviyesinin 30 metre derinlik için var olmadığı 2 sondaj örnekleri için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yaparak, yeraltı suyu seviyesinin zemin davranışına etkisini ortaya koymaktır.

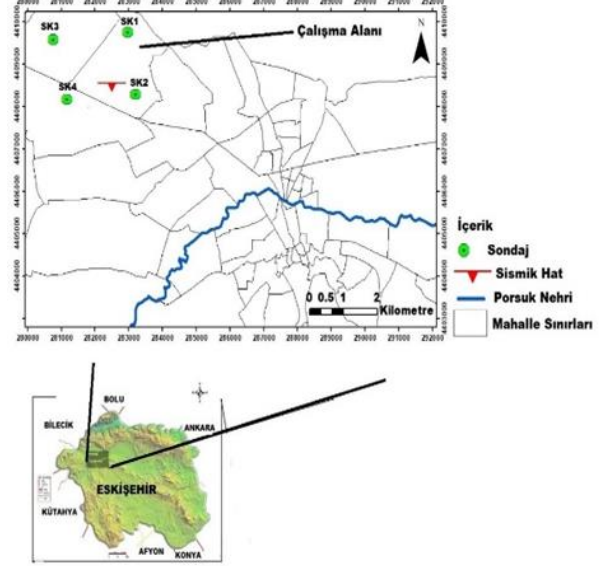
2 Materyal ve metod

2.1 İnceleme alanının özellikleri ve TBDY yaklaşımı

Eskişehir coğrafi olarak İç Anadolu Bölgesi'nde yer almakta ve deniz seviyesinden yaklaşık 790 m yüksekliktedir. 4 sondajın bulunduğu çalışma alanı bölgesi Eskişehir şehir merkezinde yer alan ve birbirine komşu olan alüvyon zemin üzerinde bulunan Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahalleleridir. Çalışma kapsamında yer altı su seviyesinin yüzey davranışına etkisini görebilmek amacıyla kayma dalgası hızı (V_s) değerleri birbirlerine yakın olan sondajlar tercih edilmiştir. Kayma dalgası hız profilleri arazide sismik yöntemler kullanılarak yapılan sismik kırılma-yansıma çalışmasından elde edilmiştir. Çalışma alanı lokasyon haritası Şekil 1'de gösterilmektedir.

Son yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY (2018) 2. bölümünde yapı taşıyıcı sistemlerinin deprem hesabında kuvvetli yer hareketinin özelliklerinin, tasarıma esas kuvvetli yer hareketi düzeyi ile uyumlu olacak şekilde kullanılmasını önermektedir. Bu da o saha için depremin büyüklüğü, sahanın faya uzaklığı, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin özelliklerinin dikkate alınarak

deprem kayıtlarının seçilmesi ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesini gerektirmektedir. Yönetmelik, yayınlanan sismik haritayla birlikte, noktasal olarak spektral davranışı vermekte ve tasarımcının kullanımına sunmaktadır. Fakat kayma dalgası hızı 180 m/s'den küçük ve sıvılaşma riski olan zeminler için sahaya özel analiz yapılmasını şart koşmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanı lokasyon haritası

2.2 Zaman tanım alanında deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi

Bu çalışmada zemin davranış analizlerinde (eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan) kullanılan 11 farklı istasyona ait kuvvetli yer hareketi verileri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi PEER veri tabanından (Pasific Ground Motion Database) elde edilmiştir [12].

Çalışmada $M_w > 6.0$ büyüklüğe sahip ve doğrultu atımlı fay üzerinde meydana gelmiş, zemin özellikleri ve sismik risk durumu göz önüne alınarak sahanın özelliklerine yakın olduğu varsayılan 11 kuvvetli yer hareketi tercih edilmiştir.

Analizlerde kullanılan 11 kuvvetli yer hareketi Tablo 1'de yer almaktadır. Ayrıca çalışmada analizlerin yapıldığı 4 sondajın bulunduğu Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahalleleri için AFAD'ın hazırladığı Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasına göre DD-2 (konut, işyeri tasarımı için kullanılan) yer hareketi düzeyi için deprem karakteristikleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Bu çalışmada bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapabilmek için Deepsoil 7.0 yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım; hem frekans alanlı çözümlenmeleri ile eşdeğer doğrusal hem de zaman tanım alanlı çözümlenmeleri ile doğrusal olmayan analizler yapılabilir [13].

4 sondaj üzerinde 11 farklı kuvvetli yer hareketi verisi kullanılarak, toplam 44 eşdeğer doğrusal ve 44 doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Çalışma alanındaki mahallelere yönelik AFAD'ın önerdiği PGA değerlerinin Batıkent mahallesinde 0.290 g, Aşağısöğütönü mahallesinde 0.282 g

ve Zincirlikuyu mahallesinde 0.283 g olarak verildiği görülmektedir (Tablo 2). Bu nedenle çalışmada kullanılan deprem kayıtları PGA =0.3g ve DD-2 durumuna göre ölçeklendirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ölçeklendirilmiş anakaya ivmeleri Şekil 2’de sunulmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere, seçilen depremler birbirlerinden hem frekans, hem süre hem de döngü sayısı olarak birbirlerinden çok farklıdır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan deprem kayıtları (PEER, 2006)

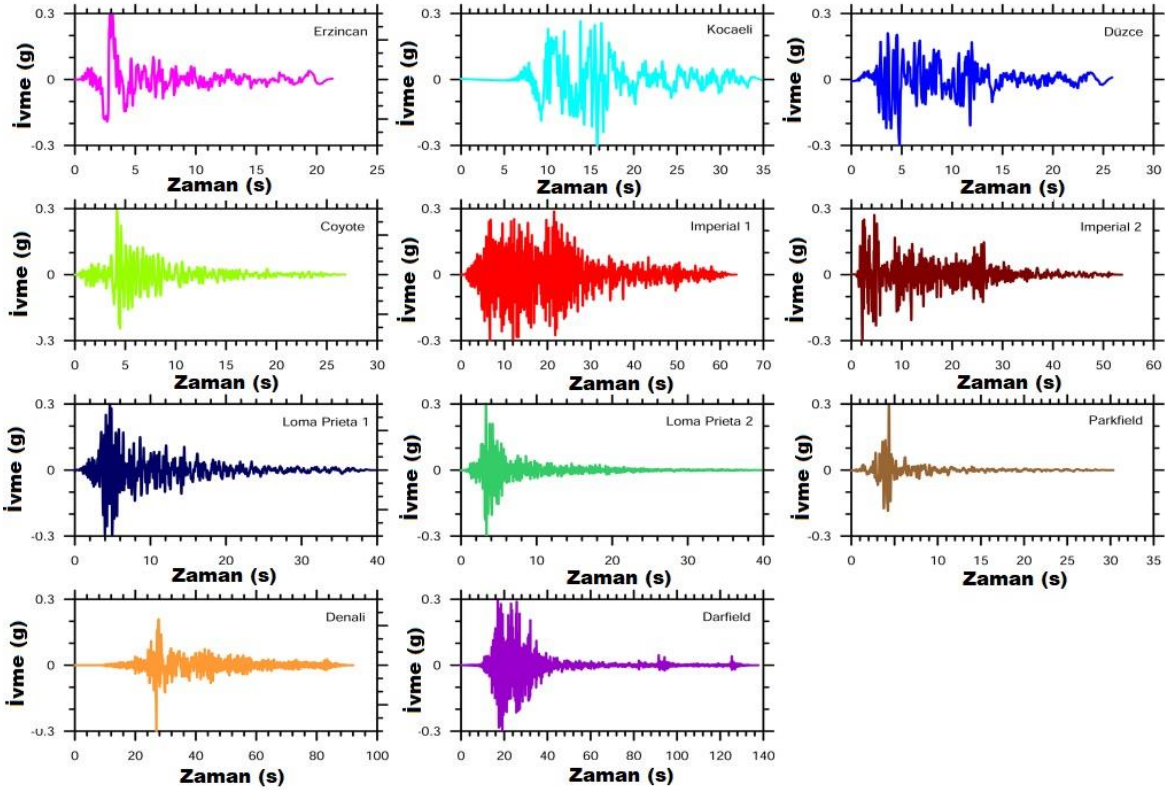
Deprem	Yıl	İstasyon	Büyükük	PGA	Vs30
Erzincan	1992	Erzincan	6.69	0.386	352
Kocaeli	1999	Yarımca	7.2	0.322	297
Düzce	1999	Düzce	7.14	0.404	282
Coyote Lake	1979	SJB	5.7	0.247	561
Imperial Valley	1940	El Centro	6.9	0.274	214
Imperial Valley	1979	Calipatria	6.5	0.282	206
Loma Prieta	1989	Gilroy 3	6.9	0.368	350
Loma Prieta	1989	Gilroy 4	6.9	0.418	222
Parkfield	1966	Benioff	6.1	0.330	493
Denali	2002	TAPS	7.9	0.227	425
Darfield	2010	DSLCL	7.0	0.350	296

Tablo 2. Çalışmada alanının AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen deprem karakteristikleri

Mahalle	Zemin Sınıfı	S _s	PGA(g)	PGV(cm/sn)
Batıkent	ZD	0.684	0.290	17.497
Aşağısöğütünü	ZD	0.667	0.282	17.082
Zincirlikuyu	ZD	0.668	0.283	17.118

2.3 Çalışmadaki sondajların zemin özellikleri

Çalışma alanı Eskişehir’in Tepebaşı bölgesinde yer alan 3 mahalleyi kapsamaktadır. Eskişehir ili Tepebaşı bölgesinin zemin özelliklerinin ayrıntılı laboratuvar testleri ve arazi deneylerinden sonra Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı EVS-MVS yazılımında 3 boyutlu görselleştirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmada sahanın zemin özelliklerinin ince daneli (killi-siltli) zeminlerden başlayarak derinlere doğru kaba daneli (kumlu-çakıllı) zeminlere geçiş yaptığı ve şehir merkezinde alüvyon zeminin yayılım gösterdiği ortaya konmuştur. Ayrıca yeraltı suyu seviyesi şehir merkezinde yüksek seviyelerde görülmektedir [14]. Çalışmamızda kullanılan SK1 ve SK3 sondajlarında yeraltı suyu bulunmamaktadır. SK1 sondajında 3.50 metreye kadar çakıllı zemin olarak GC, SK3 sondajında düşük plastisiteli kil (CL) yer almaktadır. SK1 sondajında killi seviyelerde plastisite indisi (PI) ilk 3.5-10.50 m arası 31-42 arasında değişmektedir. SK3 sondajında ise killi zeminlerde plastisite 15-20 arasında değişmektedir. Derinlere doğru zemin sınıfında killi seviyelerden kumlu zeminlere geçişin olduğu görülmektedir. SK2 sondajında ise yeraltı suyu seviyesinin 6.00 m, ilk 3 metresi PI=24 olan CH zemin sınıflarından oluşmaktadır.



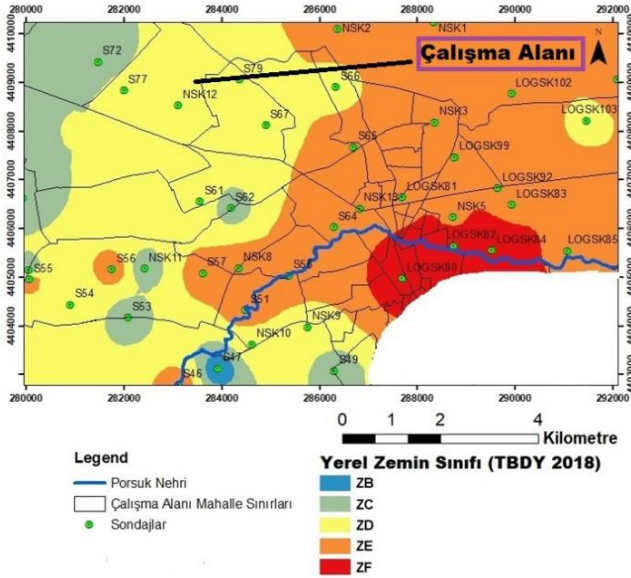
Şekil 2. Çalışmada kullanılan PGA: 0.3 g olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları

Derinlere doğru iri daneli zeminlere geçiş yapan; kumlu seviyelerin yer aldığı zemin profilinden oluşmaktadır. SK4 sondajında yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'dedir. İlk 3.00 m düşük plastisiteli zemin profilinden oluşmakta; derinlere doğru araldanmalı olarak siltli-killi-kumlu seviyelere geçiş yapmaktadır. Çalışmada eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı bu 4 sondajın zemin özellikleri Tablo 3'de sunulmaktadır.

Tablo 3. Çalışmada alanda yer alan sondajların zemin özellikleri

Derinlik (m) /Sondaj	SK1	SK2	SK3	SK4
0.00-3.50	GC	CH	CL	CL
3.50-7.00	CH	SC	SC	SM
7.00-10.50	CH	CL	CL	ML
10.50-14.00	SM	SP-SM	SM	SW-SM
14.00-17.50	SC	SM	CL	SM
17.50-21.00	SC	SM	SC	SP
21.00-24.00	SC	SC	SC	SM
24.0-27.50	ML	SM	CH	CL
27.50-30.00	ML	MH	CH	CH

Çalışma alanının da içinde bulunduğu Eskişehir şehir merkezinin belirli bir bölümünün yerel zemin özelliklerinin TBODY (2018)'e göre haritası Şekil 3'de sunulmaktadır. Bu haritada çalışma alanını da kapsayan Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahallelerinin ZD yerel zemin sınıflarında yer almakta olduğu gösterilmektedir [15].



Şekil 3. Çalışma alanı yerel zemin sınıfı haritası [15]

Çalışma alanını da kapsayan bölgede Güney vd. (2013) tarafından Eskişehir Havzası'nda alüvyon üzerinde P Tabancası kullanarak sismik kırılma-yansıma çalışmaları yapılmıştır. Burada P-Tabancada (sismik kaynak) belirli uzunluktaki hatlar (örneğin Söğütönü 480 m) için atışlar yapılarak sismik kaydediciden (Geometrics 24 Kanallı Geode Modülleri) zeminin kayma dalgası hız verileri elde

edilmektedir. Bu çalışmada yapılan eşdeğer doğrusal-doğrusal olmayan analizler için zemin tabakalarının kayma dalgası hız profilleri gerekmektedir. Bu gerçek değerler doğrudan Güney vd., (2013) tarafından sahada sondajlara yakın lokasyonda yapılan sismik kırılma-yansıma çalışmasından alınmıştır [16].

Çalışma alanına ait sismik-yansıma-kırılma profili Şekil 4'de sunulmaktadır. Deepsoil'de yapılan analizler sırasında her bir zemin profili için zemin katmanlarının geoteknik ve dinamik özellikleri tanımlanmıştır. Çalışma alanında yapılan arazi çalışmaları kapsamında 4 sondaj için kullanılan sismik hat verilerine göre kayma dalgası hız profiline 0-8 m arası 238 m/sn, 8-55 m arasının ise 622 m/sn olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmamızdaki her bir sondajın zemin tabakaları için 0-8 m arası 238 m/sn, 18-30 m arası 622 m/sn kayma dalgası hız değerleri kullanılmıştır.

2.4 Sahaya özel zemin davranışı

Sismik dalgaların zemin içerisinde oluşturduğu hareketi ve tabakaların bu hareket sırasında göstereceği davranışı inceleyebilmenin en temel prensibi tabakaları izotropik, homojen ve elastik; dalgaları da düşey kayma dalgaları olarak kabul eden bir boyutlu zemin davranışdır [17]. Sahaya özgü yapılan zemin davranış analizleri zemin içerisinde hareket eden sismik dalgaların zemin yüzeyinde oluşturacağı hareketin etkisini ortaya koymak amacıyla yapılmaktadır.

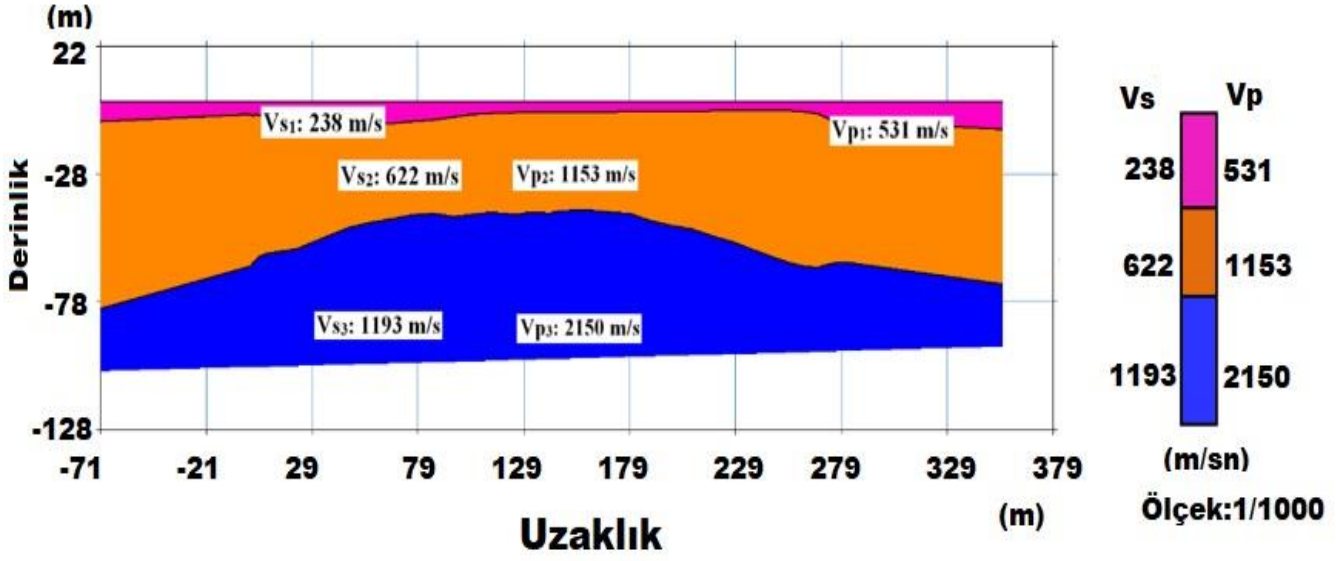
Menq (2003) çalışmasında kuru kum ile doymuş kum arasındaki farkı iyi görebilmek amacıyla zemin davranış analizleri yapmıştır. Bu analizlerde kumlu (iri daneli) zeminlerde, zemin içeriğindeki suyun artışıyla davranışın doğrusal olmama eğilimine yaklaştığını belirlemiştir. Bu nedenle referans gerilmenin artan su içeriği ile azaldığını öne sürmüştür. Çalışmasında farklı örnekler üzerinde değerlendirmeler yapmıştır. Bu değerlendirmelerde su içeriğinin küçük gerilimli kayma modülü üzerinde çok az etkisi olduğunu, ancak küçük gerilimli malzeme sönümleme oranı üzerinde önemli etkisi olduğunu belirlemiştir [18].

Bu çalışmada yapılan analizlerde kumlu zemin tabakaları için Menq (2003) ve killi zemin tabakaları için Darendeli (2001) modeli eğrileri [19] kullanılmıştır.

2.4.1 Bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz

Bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşım, zemin tabakalarının yatay ve sonsuz olduğu ve her bir zemin tabakasının sabit kayma modülü ve sönüm oranına sahip olduğu yaklaşımını kabul etmektedir. Eşdeğer doğrusal yaklaşımda zemin tabakaları doğrusal malzemeler olarak kabul edilir. Doğrusal olmayan yaklaşımda ise birim deformasyona bağlı zeminin kayma modülü ve sönümleme oranı dikkate alınmaktadır [18].

Bu çalışmada yer alan 30 metre derinliği temsil eden 4 sondaj için; birim hacim ağırlığı, zemin sınıfı, tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı değerlerini kullanarak zemin tabakalarının tanımlamaları yapılmıştır. Analizlerde birim deformasyon ve malzeme parametreleri için zemin sınıflarına göre her tabaka için ayrı model eğrileri tanımlanmıştır.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan sismik kırılma hattı hız kesiti [16]

2.4.2 Bir boyutlu doğrusal olmayan (nonlinear) analiz

Deprem dalgalarının yayılmaları sırasında oluşan tekrarlı gerilmeler sonucunda zemin davranışı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yaklaşımda zeminin histeretik gerilme-şekil değiştirme (kayma modülü-sönümleme) ilişkisi göz önüne alınmakta ve bu nedenle eşdeğer doğrusal yaklaşımdan farklı olarak daha gerçekçi kabul edilmektedir [20].

Bir boyutlu zemin davranış analizlerinde doğrusal olmayan modellerde, eşdeğer doğrusal yaklaşımda sabit kabul edilen gerilme-deformasyon ilişkisinin her bir zemin tabakasında değiştiği temel prensibine dayanmaktadır [17]. Çalışma kapsamında 30 m derinliğe sahip 4 sondaj için 11 farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak doğrusal olmayan (nonlinear) analizler yapılmıştır

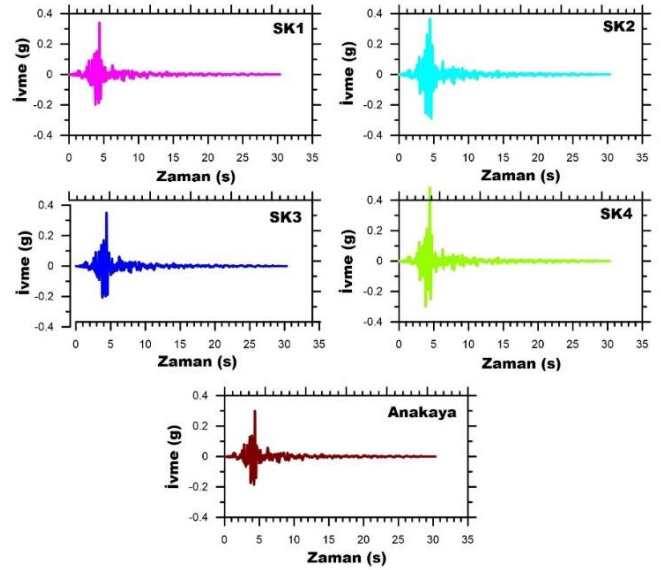
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları

3.1.1 Zemin yüzeyinde oluşan ivmeler

Eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için ivme-zaman değerleri elde edilmiş ve örnek bir grafik seti Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5 Parkfield 1966 depremi verisine göre elde edilen yüzey ivme zaman davranışını gösterilmektedir. Bu grafiklerde yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında maksimum pik ivmelerin 0.4 saniyede 0.3 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6.0 m'de olan SK2 sondajında 0.4 saniyede 0.38 g yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'de olan SK4 sondajlarında 0.4 saniyede yaklaşık 0.5 g maksimum pik ivme değerleri elde edilmiştir.

Pik ivmelerin görüldüğü süreçten bağımsız yüzey ivmesinden 1.5 kat farklılık görülmüştür. Zemin profillerinin tabaka farklılığının da etkisi olmasına rağmen, bu etkinin aynı Vs ile ana faktör olmadığı; bunun yerine yer altı su seviyesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Çalışmadaki sondajlar için Parkfield (1966) deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş ivme-zaman grafikleri

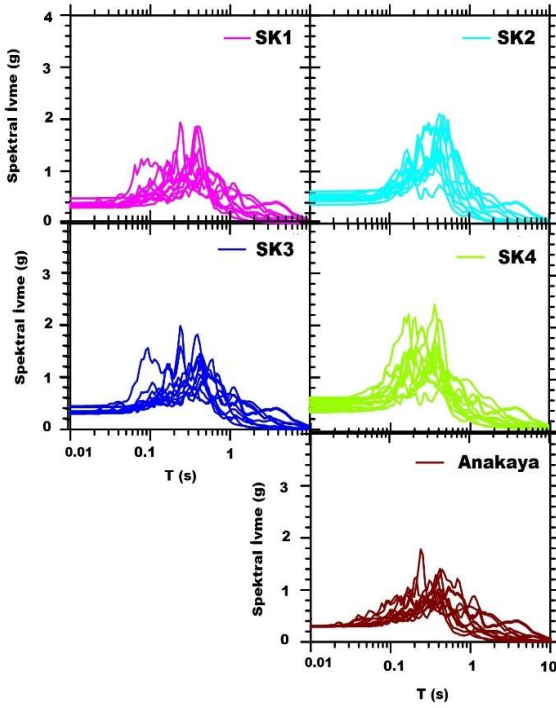
3.1.2 Zemin tepki spektrumu

Yerel zemin koşullarının belirlenerek sınıflandırılması ve sahanın mühendislik özelliklerinin ortaya konmasında zemin tepki spektrumu kullanılmaktadır. Ayrıca yapının dinamik analizinde en önemli parametrelerden biri olması nedeniyle depreme dayanıklı yapı tasarımı için kritik bir role sahiptir. Bu çalışma kapsamında 11 deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için zemin tepki spektrumları belirlenmiş ve spektral ivme (g)-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler Şekil 6'da sunulmaktadır.

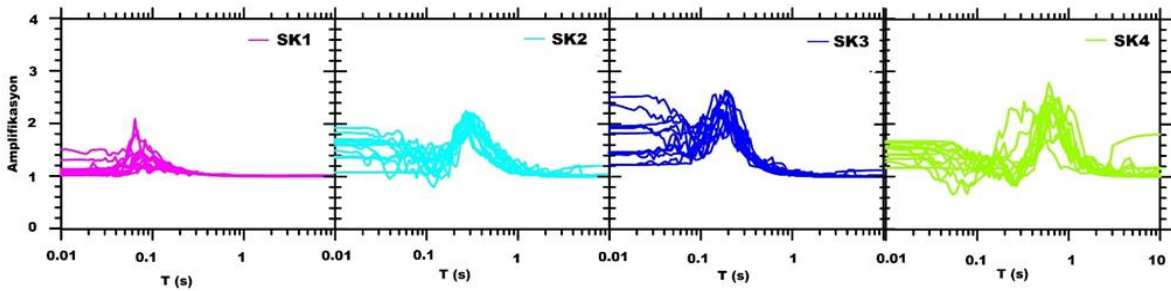
Şekil 6 dikkatlice incelenirse, başlangıç spektral ivmelerin yer altı su seviyesi olmayan profillerde daha dar

bir aralıkta seyrettiği fakat yer altı su seviyesi olan profillerde daha geniş aralıklara yayıldığı tespit edilmiştir. Bir deprem kaydı hariç bütün profillerde başlangıç bölgesinin 0.1 sn'lere kadar genel olarak düz bir eğilimde olduğu görülmüştür. Grafiklerde görülen pik ivmelerin büyüklüğü ve bu pik ivmelerin farklı zamanlarda oluşması deprem karakteristiğinin zemin profiline yansımalarıdır. Burada farklı davranış gösteren bir deprem kaydı SK1 ve SK3 sondajında farklı zemin parametrelerinin etkisiyle oluşmuştur.

Maksimum spektral ivme değerleri düşünüldüğünde, yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında 0.2 saniyede sırasıyla 1.9g ve 2.0g olarak elde edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 ve 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında ise pik spektral ivmelerin sırasıyla 0.2 saniyede 2.1g ve 2.4g olarak belirlenmiştir. Yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip SK4 sondajında daha büyük spektral ivme değerleri oluşmuştur.



Şekil 6. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş spektral ivme-periyot grafikleri



Şekil 7. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş amplifikasyon-periyot grafikleri

3.1.3 Zemin büyütme (amplifikasyon) oranı

Deprem dalgalarının hareketi neticesinde, dalgaların zemin tabakalarının içerisinde yayılarak yüze ulaştığında genliklerindeki artış zemin büyütmesi olarak tanımlanmaktadır [18]. Bu çalışmada yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için zemin büyütme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlerden amplifikasyon-periyot (s) grafikleri oluşturulmuş ve bu grafikler Şekil 7'de gösterilmektedir. Kısa periyotlarda su seviyesinin olmadığı profillerde daha dar alana sıkışmışken (iki kayıt hariç), SK2 ve SK4 büyütme oranları daha geniş bir banda yayılmıştır.

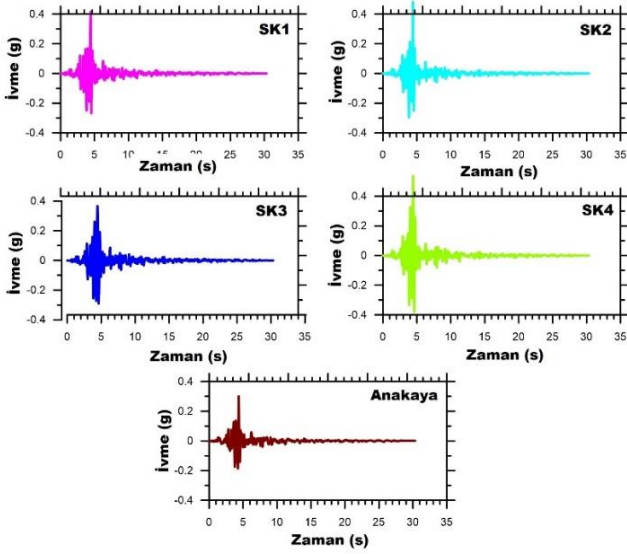
Pik spektral ivmeler göz önünde bulundurulduğunda, amplifikasyon oranlarının SK1 ve SK3 sondajlarında 2-2.1 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m olan SK2 sondajında amplifikasyon oranının 2.3, Yeraltı suyu seviyesi 1.5 m olan SK4 sondajında ise 2.6 olarak belirlenmiştir. Bu değerler birbirlerinden çok uzak değillerdir. Fakat oldukları periyotlar farklılık göstermektedir. SK1 ve SK3 için 0.07-0.2 sn'lerde görülen pik değerler, SK3 ve SK4 için 0.4-0.8 sn'lere çıkmaktadır. Bu da tasarımda büyük önem arz etmektedir.

3.2 Doğrusal olmayan (nonlinear) analiz sonuçları

3.2.1 Zemin yüzeyinde oluşan ivmeler

Yüksek genliklere sahip depremlerin yaşandığı sahalarda zemin tabakalarında farklılaşan kayma modülü-sönüm oranları nedeniyle zeminin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmalıdır [21]. Bu durum daha çok zemin tabakalarında düşük gerilme genliklerinde elastik, büyük gerilme genliklerinde ise elasto-plastik veya plastik davranışın oluşması ile açıklanmaktadır [22].

Bu çalışma kapsamında tamamlanan doğrusal olmayan analizler sonucunda 4 sondaj için Şekil 8'de gösterildiği gibi ivme- zaman değerlerini içeren grafikler oluşturulmuştur. Grafik yine Parkfield depremi için sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, yeraltı suyu seviyesi bulunmayan SK1 ve SK3 sondajlarında maksimum pik ivmelerin 0.4 saniyede sırasıyla 0.4 (g) ve 0.35 (g) değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6.0 m'de olan SK2 sondajında 0.4 saniyede 0.5 g, yeraltı suyu seviyesi 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında 0.4 saniyede yaklaşık 0.6 g maksimum pik ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre de daha büyüktür.



Şekil 8. Çalışmadaki sondajlar için Parkfield (1966) deprem verisi kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş ivme-zaman grafikleri

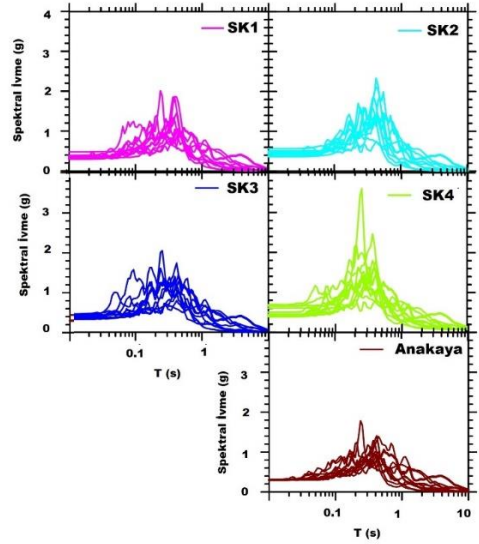
3.2.2 Zemin tepki spektrumu

Farklı zemin tabakalarından oluşan 4 sondaj için yapılan doğrusal olmayan analizler sonucunda 11 deprem verisi için tepki spektrumu değeri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden spektral ivme (g)-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler Şekil 9'da sunulmaktadır. Bu grafiklere göre pik spektral ivmelerin yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında 0.2 saniyede 2.1 (g) değeri olarak gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 ve 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında ise pik spektral ivmelerin sırasıyla 0.2 saniyede 2.4 (g) ve 3.6 (g) olarak belirlenmiştir. Yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip SK4 sondajında doğrusal olmayan analizlerde en yüksek spektral ivme değeri olmuştur.

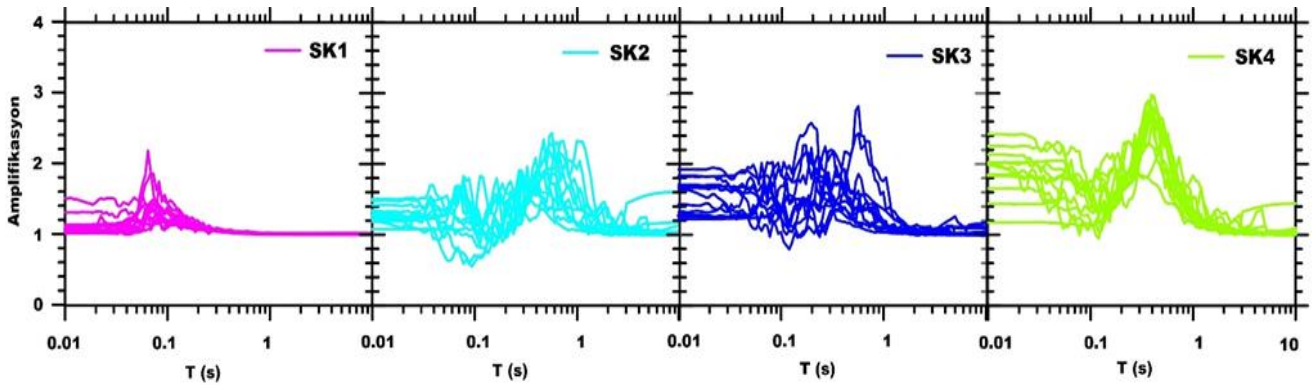
3.2.3 Zemin büyütme (amplifikasyon) oranı

Doğrusal olmayan analizler sonucunda çalışmada kullanılan 4 sondaj için amplifikasyon-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında oluşturulan bu

grafikler Şekil 10'da sunulmaktadır. Bu grafiklerde yeraltı suyu seviyesi bulunmayan ve ilk 3.50 m çakıllı zemin tabakasından oluşan SK1 sondajında eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına yakın olan 2.1 büyütme değeri elde edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi olmayan kum ve yüksek plastisiteli killi zeminlerden oluşan SK3 sondajında maksimum büyütme oranının 2.4 olduğu gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 sondajında maksimum büyütme değeri 2.6 olarak belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 1.5 m'de olan daha çok düşük plastisiteli kil ve kumlu tabakalardan oluşan SK4 sondajında ise maksimum büyütme oranının 3.2'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 10). Eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre, amplifikasyon değerlerinde farklılık görülmüştür. Özellikle su seviyesi en yüksek olan SK4 profilinde, deprem kaydının farklılaşmasının davranışa olan etkisi bariz bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bunun yanında SK1 profili için ise eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin yüzey büyütmesine etkisi çok farklı değildir.



Şekil 9. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş spektral ivme-periyot grafikleri



Şekil 10. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş amplifikasyon-periyot grafikleri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek ve yeraltı suyunun dinamik davranışa etkisini ortaya koymak amacıyla eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Çalışmada birbirine yakın lokasyonlarda yer alan 4 sondaj kullanılmıştır. Birbirine yakın sondajlar zeminin sismik özelliklerinin benzer olması nedeniyle tercih edilmiştir. Analizlerde kullanılan SK1 ve SK3 sondajlarında yeraltı suyu seviyesi bulunmamakta, SK2 ve SK4 sondajları ise farklı seviyelerde yeraltı suyu seviyesine sahiptir. 11 farklı deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden her bir sondaja ait spektral parametreler elde edilmiş ve elde edilen veriler grafikler ile sunulmuştur. Bu grafiklerde yeraltı suyu bulunan SK2 ve SK4 sondajlarında, yeraltı suyu bulunmayan SK1-SK3 sondajlarına göre %25 daha büyük spektral parametreler elde edilmiştir. En büyük spektral değerler yeraltı suyu seviyesi yüzeye yakın olan SK4 sondajında oluşmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında eşdeğer doğrusal analizler ve doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'de olan SK4 sondajında en büyük farklılık gözlemlenmiştir. SK4 sondajında doğrusal olmayan analizlerde diğer sondajlara göre daha büyük spektral ivme ve büyütme değeri elde edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında sahaya özgü dinamik karakterizasyonu belirlemek amacıyla yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu yumuşak zemin tabakalarından oluşan sahalar için doğrusal olmayan analizlerin yapılması önerilmektedir. Yeraltı suyu bulunmayan SK1 sondajında yüzeyde çakıllı zemin tabakasının olması ve derinlerde kumlu ve yüksek plastisiteli zeminlerden oluşması nedeniyle SK3'e göre daha küçük spektral ivme ve büyütme değerleri elde edilmiştir. Sahada farklılaşan zemin özelliklerinin zeminin dinamik özelliklerini oldukça etkilediği ve zeminlerde yüksek yeraltı suyu varlığının doğrusal olmayan zemin davranışındaki önemini açıkça göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] P. Y. Bard PY, Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. In: Duma, editor. 10th European conference on earthquake engineering. Rotterdam: Balkema p. 305–23, 1995.
- [2] G. A. Athanasopoulos, P. C. Pelekis, e. A. Leonidou, Effects of surface topography on seismic ground response in the Egeion (Greece) 15 June 1995 earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng* 18(1999):135– 149, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00041-4)
- [3] A. Roca, C. S. Oliveira, A. Ansal, S. Figueras S, Local site effects and microzonation, in assessing and managing earthquake risk, edited by Oliveira CS, Roca A, Goula X Springer, 67–89, 2008.
- [4] Y. M. A. Hashash, C. Phillips, D. R. Groholski, Recent advances in non-linear site response analysis. 5th International Conference on Recent Advances in

- Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, May 24–29, San Diego, Paper no. OSP 4, 2010.
- [5] M. K. Akın, T. Topal, S. L. Kramer, A newly developed seismic microzonation model of Erbaa (Tokat, Turkey) located on seismically active eastern segment of the north Anatolian fault zone (NAFZ). *Nat Hazards* 65:1411–1442, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0420-1>
 - [6] B. Sonmezer, S. Bas, S Isik, O Akbas, Linear and nonlinear site response analyses to determine dynamic soil properties of Kirikkale. *Geomech Eng* 16 (4):435–448, 2018. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.4.435>
 - [7] E. Garini, G. Gazetas, K. Ziotopoulou, Inelastic soil amplification in three sites during the Tokachi-oki MJMA 8.0 earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng* 110:300–317, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.017>
 - [8] E. Civelekler, K. B. Afacan, D. V. Okur, Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlara göre sismik yük etkisindeki zeminlerde davranış analizi. *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg.* 29(2), 158 – 171, 2021. <https://doi.org/10.31796/ogummf.839703>
 - [9] M. Vucetic and R. Dobry, Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117 (1): 89–107, 1991.
 - [10] C. Phillips and Y. M. Hashash, Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1143–1158, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.004>
 - [11] P. Arduino and S. L. Kramer, Site response. In: CEE 526 Geotechnical Earthquake Engineering lecture notes, University of Washington, Seattle, WA-USA, 2009.
 - [12] P. E. PEER, PEER ground motion database. Berkeley, 2006. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>
 - [13] Y. M. A. Hashash, M. I. Musgrove, J. A. Harmon, D. R. Groholski, C. A. Phillips, D. Park, **DEEPSOIL 6.1, User Manual**, Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.
 - [14] E. Civelekler and E. Pekkan, The application of GIS in visualization of geotechnical data (SPT-Soil Properties): a case study in Eskisehir-Tepebaşı, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7 (3), 302–313, 2022. <https://doi.org/10.26833/ijeg.980611>
 - [15] E. Civelekler, D. V. Okur, K. B. Afacan, A study of the local site effects on the ground response for the city of Eskişehir Turkey. *Bull Eng Geol Env*, 2021. <https://doi.org/10.1007/S10064-021-02285-4>
 - [16] Y. Güney, B. Ecevitöglu, E. Pekkan, U. Avdan, M. Tün, O. Kaplan, S. Mutlu, E. Akdeniz, ve ...; Eskişehir Yerleşim Yeri, CBS Teknikleri Kullanılarak Geoteknik, Yapı ve Jeofizik Bilgi Sisteminin Oluşturulması. Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi No:080240, 2013.

- [17] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 653 pp., 1996.
- [18] F. Menq, *Dynamic properties of sandy and gravelly soils*. Ph.D. Dissertation. University of Texas, Austin, TX, 2003.
- [19] M. Darendeli, *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, 2001.
- [20] C. Bolisetti, A. S. Whittaker, H. B. Mason, I. Almufti, M. Willford, *Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures*. *Nuclear Engineering and Design*, 275, 107–121, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.033>
- [21] J. P. Pruiksma, *Nonlinear and Equivalent Linear Site Response Analysis for The Groningen Area*, TNO Report, TNO 2016 R10460, 1-30, 2016.
- [22] P. Akdoğan, *Dynamic soil amplification in saturated soil profiles using effective stress based nonlinear methods*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2019.

