

## Killi Zeminlerde İki Farklı Dinamik Kayma Modülü Yaklaşımın Sahaya Özgü Tepki Analizlerinde Karşılaştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 24.01.2024

Kabul/Accepted: 20.06.2024

Yayımlandı/Published: 20.08.2024

### Comparison of Two Different Dynamic Shear Modulus Approaches for Site-Specific Response Analyses in Clay Soils

Ebru CİVELEKLER\* 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Geoteknik deprem mühendisliğinde en büyük sorunlardan biri dinamik yükler etkisinde zemin davranışının ortaya konması gerekliliğidir. Günümüzde zeminlerin dinamik davranışını; özellikle kayma modülü ve sönüm oranını tahmin etmek için çok sayıda analitik modeller önerilmiştir. Bu modeller belirli zemin türü ve gerilme aralıklarını temsil etmek için kullanılır. Mevcut modeller evrensel değildir; bu da bir zemin türü için geliştirilen bir modelin tüm zemin türleri için kullanılamayacağı anlamına gelir. Bu çalışmada killi zeminlerde, normalleştirilmiş kayma modülü azalımı ve malzeme sönümleme eğrilerini tahmin etmek için Roblee ve Chiou (2004) ve Zhang vd. (2005) modelleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında aynı zemin türüne ve sismik özelliklere sahip 2 sondaj için bir boyutlu doğrusal olmayan analizler yapılarak spektral parametreler elde edilmiştir. Elde edilen bu spektral parametreler grafikler halinde sunulurken, kullanılan bu analitik modellerin karşılaştırılması yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal olmayan zemin davranışı, dinamik kayma modülü; sönümleme oranı, killi zemin

#### Abstract

One of the major problems in geotechnical earthquake engineering is the necessity to determine the soil behavior under dynamic loads. Nowadays, many analytical models have been proposed to predict the dynamic behavior of soils, especially the shear modulus and damping ratio. These models are used to represent specific soil types and stress ranges. Existing models are not universal, which means that a model developed for one soil type cannot be used for all soil types. In this study, Roblee and Chiou (2004) and Zhang et al. (2005) models were used to estimate the normalized shear modulus reduction and material damping curves for clayey soils. Within the scope of the study, one-dimensional nonlinear analyses were performed for 2 boreholes with the same soil type and seismic properties and spectral parameters were obtained. These spectral parameters are presented in graphs and a comparison of these analytical models are made.

**Keywords:** Nonlinear soil behaviour, Dynamic shear modulus; Damping ratio, Clayey soil.

#### 1. Giriş

Depremi odak noktasından yayılan sismik dalgalar farklı zemin tabakalarından geçerek yüzeye ulaşırlar. Zemin tabakalarının farklılaşması sismik dalgaların hareket özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler. Genel olarak her zemin tabakası farklı periyotlardaki sismik dalgalara benzer davranış göstermezler. Bu farklı davranış yerel zemin etkileri ile açıklanabilmektedir. Geçmiş ve günümüzde meydana gelen depremlerin çoğunda yerel zemin etkilerinin farklılaşmasının hasar dağılımı üzerinde büyük etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Kramer, 1996).

Gezeganimizde yaşanan en yıkıcı doğal afetlerin birinci sırasında depremler yer almaktadır. Deprem sırasında oluşabilecek hasarı önlemek amacıyla; sismik yükler etkisinde zemin davranışının belirlenerek güvenli yapıların tasarımı gerçekleştirilmelidir. Ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarımı için kullanılan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018)'de deprem eğilimli

sahalarda yerel zemin özelliklerinin belirlenerek sahaya özel zemin davranış analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Türkiye, bulunduğu konum nedeniyle Alp Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Bu nedenle günümüze kadar 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri gibi birçok büyük depremler yaşamıştır. 6 Şubat 2023'de Türkiye'nin güney doğusunda büyüklüğü 7'nin üzerinde olan iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremler sırasında 10000 binden fazla bina yıkılarak 50000'den fazla kişi hayatını kaybetmiştir. Bu bölgeyi inceleyen araştırmacılar deprem hasarlarının nedenlerini; TBDY (2018) yönetmeliğinden önce yapılan binalar, yapı kalitesinin kötü olması, yerel zemin etkileri, sıvılaşma gibi zemin problemlerinin göz ardı edilmesi olarak sıralamaktadırlar (Gücek vd., 2023). Yerel saha koşulları, sismik yükler etkisinde zemin davranışının ortaya çıkmasında etkili rol oynar. Zemin tabakalarının geometrisi, farklılaşan zemin profilinin deprem etkisinde

göstereceği davranış özelliklerinin değerlendirilmesi afet zararlarının azaltılması açısından çok önemlidir (Civelekler vd. 2021).

Zemin davranış analizlerinden olan eşdeğer doğrusal yöntemle göre tabakaların yatay ve sonsuz yönde olduğu ve her bir zemin tabakasının sabit kayma modülü (G)-sönüm oranı (D)'a sahip olduğu kabul edilmektedir. Ancak her zemin katmanı için sabit bir kayma modülü ve sönümlemenin sismik hareketin tüm süresi boyunca gerçekleşmeyeceği durumlar vardır. Örneğin, anakaya tabanındaki yüksek sismik yoğunluklar ve/veya zemin katmanlarındaki yüksek gerilme seviyelerinin olduğu durumlardır. Bu nedenle, tüm zemin katmanları için döngüsel yükleme sırasında farklı kayma modülü ve sönüm oranlarını dikkate almak için zaman tanımlı doğrusal olmayan deprem sahası tepkisi gerçekleştirilmelidir (Hashash vd. 2010) (Civelekler, vd. 2024). Tekrarlı yükler etkisinde zeminin şekil değiştirmesine bağlı olarak, değişken iki özelliği olan kayma modülü ve sönümleme oranı zemin davranış analizinin ana girdileridir. Çeşitli araştırmacılar; zeminin kayma modülü ve sönümleme oranı üzerine zemin türüne bağlı olarak modeller önermiştir. Her ne kadar bu modeller zemin türüne göre kullanıcıya kolaylık sağlamış olsa da, aynı zemin türü için birçok farklı modellerin varlığı sonuçların doğruluğu konusunda soru işaretlerine neden olmaktadır.

Deprem sırasında meydana gelen tekrarlı yükler nedeniyle zeminin davranışının doğrusal olmadığı kabul edilir. Doğrusal olmayan zemin davranışı sırasında histeretik gerilme-şekil değiştirme etkisi dikkate alınmakta (sönümleme-kayma modülü) ve bu davranışın eşdeğer doğrusal davranışa göre potansiyel olarak daha gerçekçi olduğu kabul edilmektedir (Bolisetti vd., 2014). Bu nedenle; bu çalışmanın amacı killi zemin türleri için önerilen; doğrusal olmayan analizlerde de sıklıkla tercih edilen iki farklı modelin benzer ve farklı özelliklerini tartışmak ve 2 sondaj üzerinde bu modelleri kullanarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını yapmaktır. Çalışmada Roblee ve Chiou (2004) ile Zhang vd. (2005) modelleri kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2. 1. Roblee ve Chiou (2004) Modeli

Roblee ve Chiou (2004) çalışmalarında dinamik özelliklerin belirlenmesi için "GeoIndex modeli" adı verilen yeni ve basit bir model önermektedirler. Bu model, öncelikle zemin tabakalarının üst 10 metresine karşılık gelen gerilmeleri sınırlandırmak için çok sayıda laboratuvar sonucuna dayanmaktadır. Vucetic ve Dobry (1991) çalışmasında killerin özelliklerine ilişkin verileri önemli

ölçüde genişleterek farklı plastisite indeksi (PI) aralıkları için derinlikten bağımsız altı tasarım eğrisinden oluşan bir model geliştirmiştir. Vucetic Dobry (1991)' nin çalışması yine nispeten düşük gerilmeler için yapılan testlere dayanmaktadır. Seed ve diğerleri (1986), daha çok kumlu zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için bir model sunmaktadırlar.

Stokoe (1993) çalışmasında üç yer hareketi kayıt sahasından geniş bir derinlik aralığında elde edilen doğal örnekler üzerinde yapılan kapsamlı test programının birleşimine dayanarak "EPRI eğrileri" olarak bilinen bir dizi derinliğe bağlı eğri geliştirmiştir. EPRI eğrileri zemin türleri arasında ayırım yapmaz, ancak daha derin çöktillerin daha doğrusal davranış sergilemesiyle ilgili önemli derinlik bağımlılığını öne sürmektedir. Roblee ve Chiou (2004) modelinde, derinlik bağımlılığını efektif sınırlama gerilmesinin sürekli bir fonksiyonu olarak ele almıştır ve zemin türleri değişimlerini plastisite indeksi (PI) ve aşırı konsolidasyon oranının (OCR) sürekli bir fonksiyonu olarak belirlemiştir.

Roblee ve Chiou (2004)'nun geliştirdikleri GeoIndex Model'inde üç farklı tür zemin sınıfı yer almakta ve model basitliği ile zemin türleri arasındaki farklılıkları göz önüne alarak uygun bir denge kurmaktadır. SHAKE91'de varsayılan modele benzer olarak bu modelde de kum ve kilin farklı davranışları tanımlanmaktadır. Ayrıca; GeoIndex Model'inde Vucetic ve Dobry (1991) tarafından tanımlanan plastisite ile dinamik özelliklerdeki eğilimleri de tanımlanmaktadır.

**Çizelge 1.** GeoIndex modeli Zemin Sınıfı Tanımı (Roblee ve Chiou, 2004)

GeoIndex Kısaltma	GeoIndex Zemin Tanımlaması	Geçen #200	Plastisite İndeksi
1-PCA	Öncelikle kaba taneli-tüm plastisite değerleri	<=30%	Tümü
2-FML	İnce taneli- düşük plastisite	>30%	<=15% <sub>c</sub>
3-FMHI	İnce taneli- daha yüksek plastisite	>30%	>15% <sub>d</sub>

Çizelge 1'de üç GeoIndex zemin sınıfı tanımlanmaktadır. Sınıf "1-PCA" için, %30 veya daha az ince taneli içeriğe ve herhangi bir miktarda plastisiteye sahip iri taneli zeminler tanımlanır. Zeminlerin %30'dan fazla ince tane içeriğinin olması durumunda ise davranışı yöneten ince taneli bir matrisle sahip olduğu kabul edilir. Bunlar sırasıyla düşük (<=%15) ve yüksek (>%15) plastisite indeksi temelinde "2-FML" ve "3-FMH" olmak üzere iki gruba ayrılır. GeoIndex modeli, daha çok düşük ila orta plastisiteye sahip kumlar,

siltler ve killer gibi nispeten yaygın zeminlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

Roblee ve Chiou (2004), GeoIndex modelinin geliştirilmesi için 28 sahadan elde edilen 154 doğal zemin numunesini kullanarak laboratuvar testleri yapmışlardır. Her bir test sonucu, gerininin bir fonksiyonu olarak laboratuvarında ölçülen modül, normalleştirilmiş modül ve sönümlenme oranı değerlerinden oluşmaktadır. Çalışmalarında, Darendelli (2001) ve Stokoe vd. (2002) tarafından özetlenen denklemler kullanılarak her bir normalleştirilmiş modül ve sönümlenme oranı eğrisi seti için eğri uyumları oluşturuldu. Her bir normalleştirilmiş modül ( $G/G_m$ ) ile kayma gerilmesi ( $\gamma$ ) eğrisini aşağıdaki gibi iki parametrelili bir modelle önermektedirler (Eşitlik 1).

$$\frac{G(\gamma)}{G_m} = \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_{ref})^a} \quad (1)$$

İki normalleştirilmiş modül eğrisi uydurma parametresi şunlardır:

Eşitlik 1'de  $\gamma_{ref}$  gerininin ekseninde hiperbolik eğrinin konumunu tanımlayan referans gerininin ve  $\alpha$  hiperbolik eğrinin eğriliğini değiştiren şekil parametresini ifade etmektedir.

Her bir sönüm oranına ( $D$ ) karşı kayma gerilmesi ( $\gamma$ ) eğrisi de aşağıdaki gibi 2 parametrelili bir modele uydurulmuştur (Eşitlik 2).

$$D(\gamma) = D_{min} + \beta * D_{Masing}(\gamma) * \left(\frac{G(\gamma)}{G_{min}}\right)^{0.1} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de yer alan  $D_{Masing}$ , Masing varsayımları kullanılarak hesaplanan sönümlenme oranıdır.

İki sönümlenme oranı eğrisi uydurma parametresi şunlardır:  $D_{min}$  = düşük gerininimde minimum sönümlenme oranı  $\beta$  = Masing sönümlenmesini ( $D_{Masing}$ ) deneysel verilere göre ölçeklendirmek için ayar sabiti.

$D_{Masing}$ ,  $G/G_m$  omurga eğrisinin ve şekil parametresinin ( $\alpha$ ) bir fonksiyonu olan bir histerezis döngüsünün dağılan enerjisinin depolanan gerininin enerjisine oranıdır. Darendelli'yi takiben,  $D_{Masing}$   $\alpha=1$  için kapalı form çözümünde hesaplanabilir, daha sonra aşağıdaki gibi bir polinom ifadesi kullanılarak  $\alpha$ 'nın diğer değerleri için yaklaşılabılır: (Eşitlik 3)

$$D_{Masing,\alpha=1.0}(\gamma) [\%] = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\gamma^2 + \gamma_r} \right] - 2 \quad (3)$$

ve  $\alpha$ 'nın diğer değerleri için polinom yaklaşımı ise:

$$D_{Masing} = C_1 D_{Masing,\alpha=1.0} + C_2 D_{Masing,\alpha=1.0}^2 + C_3 D_{Masing,\alpha=1.0}^3 \quad (4)$$

Burada;

$$C_1 = 0.2523 + 1.8618a - 1.1143a^2$$

$$C_2 = -0.0095 - 0.0710a + 0.0805a^2$$

$$C_3 = 0.0003 + 0.0002a - 0.0005a^2$$

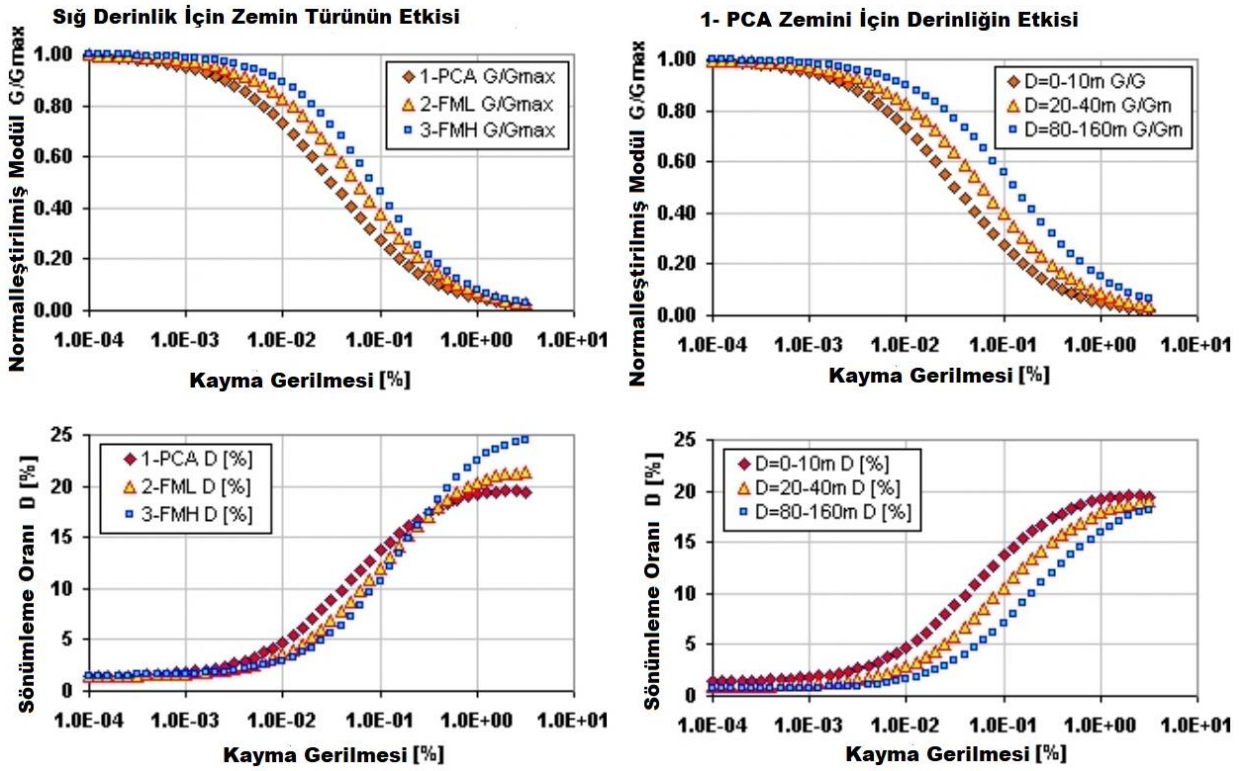
Roblee ve Chiou (2004), çalışmaları kapsamında gerçekleştirdiği regresyonlar sonucunda derinlik ve zemin türüne bağlı olarak referans gerininin, alfa,  $D_{min}$  ve beta için sabit bir değer içeren nihai katsayılar önermişlerdir (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** GeoIndex modeli için önerilen katsayılar (Roblee ve Chiou, 2004)

GeoIndex Modeli	1-PCA Zemin Türü				2-FML Zemin Türü				3-FMH Zemin Türü			
	Ref. Gerininin	Alfa	Dmin	Beta	Ref. Gerininin	Alfa	Dmin	Beta	Ref. Gerininin	Alfa	Dmin	Beta
<b>0-10 m</b>	0.032	0.85	1.30	0.62	0.057	0.90	1.30	0.62	0.085	0.98	1.30	0.62
<b>10-20 m</b>	0.044	0.85	1.15	0.62	0.065	0.90	1.15	0.62	0.097	0.98	1.15	0.62
<b>20-40 m</b>	0.061	0.85	1.02	0.62	0.074	0.90	1.02	0.62	0.111	0.98	1.02	0.62
<b>40-80 m</b>	0.085	0.85	0.90	0.62	0.085	0.90	0.90	0.62	0.126	0.98	0.90	0.62
<b>80-160 m</b>	0.130	0.85	0.80	0.62	0.130	0.90	0.80	0.62	0.130	0.98	0.80	0.62
<b>&gt;160 m</b>	0.200	0.85	0.70	0.62	0.200	0.90	0.70	0.62	0.200	0.98	0.70	0.62

Şekil 1, GeoIndex modelinin genel davranışını göstermektedir. Soldaki grafikler yüzeye yakın zemin türleri arasındaki farklılıkları göstermektedir. 1-PCA eğrileri, 2-FML ve 3-FMH zeminler için elde edilen eğriler artan doğrusallıkla birlikte en doğrusal olmayan eğrilerdir.

Daha büyük referans gerininine doğru hareket etmenin yanı sıra, normalleştirilmiş modül eğrilerinin şekilleri, elastik eşik gerininini geçtikten sonra en fazla eğriliği veya modülde en hızlı azalım oranını gösteren 3-FMH eğrisi ile biraz değişmektedir. Şekil farkı bu modele özgüdür.



Şekil 1. Farklı zemin türleri ve derinlik aralıkları için GeoIndex model davranışının gösterimi (Roblee ve Chiou, 2004)

Normalleştirilmiş modül eğrilerinin eğriliğindeki farklılık, sönümlenme eğrilerinin daha yüksek gerilme seviyelerinde kesişmesiyle açıklanabilir.

## 2.2. Zhang vd. (2005) Modeli

Zhang vd. (2005) çalışmalarında Kuvaterner, Tersiyer ve daha yaşlı zeminler ile kalıntı, saprolit zeminlerin normalleştirilmiş kayma modülü ve malzeme sönümlenme oranını tahmin etmek için öngörücü denklemler sunmuştur. Denklemler, modifiye edilmiş bir hiperbolik modele ve Güney Carolina, Kuzey Carolina ve Alabama'dan elde edilen 122 numune için mevcut Rezonans Kolon ve Burulma Kesme testi sonuçlarının istatistiksel analizine dayanmaktadır. Stokoe ve ark. (1999)'nın önerdiği model gibi, modifiye hiperbolik modeller kullanılarak test verileriyle daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + (\gamma/\gamma_r)^a} \quad (5)$$

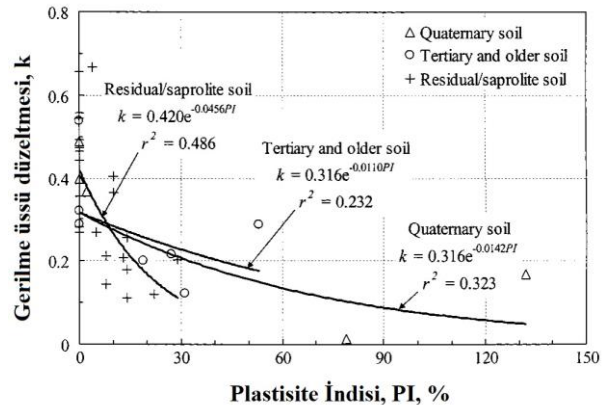
Burada  $\gamma$  verilen herhangi bir kayma gerilmesi,  $\gamma_r$  referans kayma gerilmesi (kayma modülüne göre) ve  $a$  eğrilik katsayısıdır.

$$\gamma_r = \gamma_{r1} \left( \frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^k \quad (6)$$

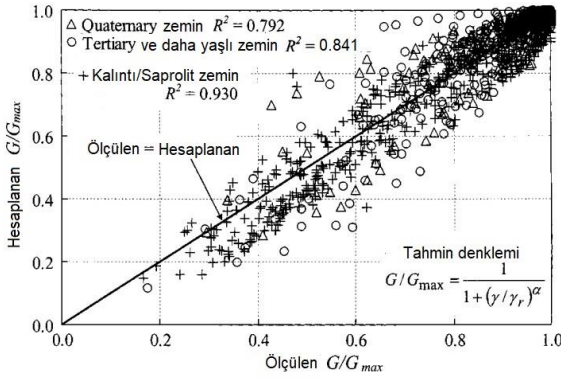
$\gamma_{r1}$ =100 kPa'lık ortalama efektif sınırlama gerilmesinde referans gerilim;  $P_a$ =100 kPa'lık referans gerilme ve  $k$ =gerilme üssü düzeltmesi.

Çalışmalarında Zhang vd. (2005); çoklu regresyon analizleri gerçekleştirerek, test edilen numuneler için  $k$  değerleri belirlemiştir. Hesaplanan  $k$  değerleri jeolojik yaşa göre ayrılarak Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca üç yaş grubu için en iyi uyum eğrileri de çizilmiştir. Çizilen veriler, her üç grup içinde  $PI$  arttıkça  $k$ 'nin azaldığını göstermektedir ( $k$ =gerilme düzeltmesi).

Eşitlik 5 ve 6 kullanılarak hesaplanan  $G/G_{max}$  değerleri Şekil 3'de ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çizilen veri noktaları "ölçülen=hesaplanan" çizgisi etrafında eşit olarak dağılmakta olduğu ve hesaplanan çoklu belirleme katsayısı  $R^2$  değerleri üç grup için 0,792 ile 0,930 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Plastisite indisi ve k arasındaki ilişki



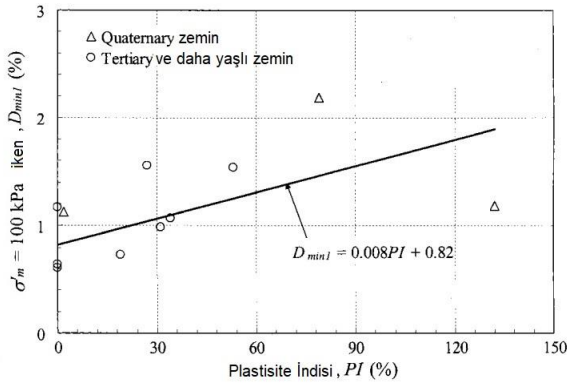
Şekil 3. Ölçülen ve hesaplanan  $G/G_{max}$  değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışma için benimsenen genel sönümlenme denklemi şöyledir;

$$D = f\left(\frac{G}{G_{max}}\right) + D_{min} \quad (7)$$

Burada  $f\left(\frac{G}{G_{max}}\right)$  normalleştirilmiş kayma modülünün fonksiyonu;  $D_{min}$ : laboratuvarında ölçülen sönümlenme

Zhang vd. (2005) Şekil 4'de önerdikleri gibi,  $PI$  ile  $\sigma'_m = 100k pA$  iken  $D_{min}$  küçük gerinim sönümlenmesi arasında olası bir doğrusal ilişki gözlenmektedir.



Şekil 4. Plastisite indisi ile  $PI$  ile  $\sigma'_m = 100k pA$  iken  $D_{min}$  arasındaki ilişki

Şekil 4'de gösterildiği gibi,  $PI$  ile  $\sigma'_m = 100k pA$   $D_{min}$  (küçük gerinim sönümlenmesi) arasında olası bir doğrusal ilişki gözlenmektedir. Zhang vd. (2005), mevcut  $D_{min}$  verilerinin sınırlı olması nedeniyle, bunları tek bir grup olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle buradaki doğrusal ilişkiyi şu şekilde ifade etmektedirler (Eşitlik 8).

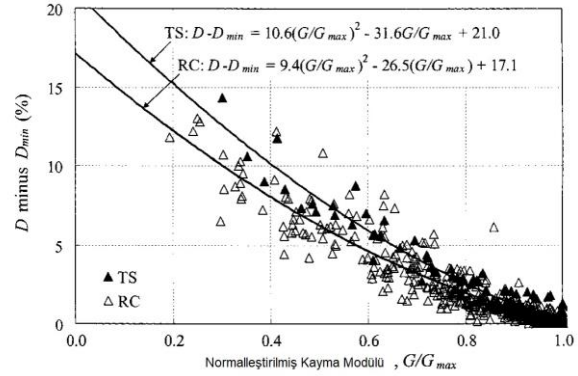
$$D_{min1} = a(PI) + b \quad (8)$$

Burada  $a$  ve  $b$  = uyum parametreleri sırasıyla yaklaşık 0.008 ve 0.82'ye eşittir.

Eşitlik 6'ya benzer şekilde,  $D_{min}$  1'i  $\sigma'_m = 100k pA$  dışında  $D_{min}$ 'e dönüştürmek için Stokoe ve ark. (1995)' ten değiştirilerek önerilen aşağıdaki eşitlik kullanılır (Eşitlik 9).

$$D_{min} = D_{min1} \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{-k/2} \quad (9)$$

Burada kullanılan  $k$ ; Eşitlik 6'da kullanılan ile aynı üstür. Zhang vd. (2005) çalışmalarında derlenen tüm test verilerinden  $D_{minus}$   $D_{min}$  değerlerine karşılık gelen  $G/G_{max}$  değerlerinin karşılaştırma grafiğini oluşturmuşlardır (Şekil 5).



Şekil 5.  $G/G_{max}$  ile  $D_{minus}$   $D_{min}$  arasındaki ilişki

$G/G_{max}$  ve  $D_{minus}$   $D_{min}$  test değerleri arasındaki en iyi uyum eğrisini şu şekilde ifade etmektedirler:

$$D - D_{min} = f(G/G_{max}) = 10.6(G/G_{max})^2 - 31.6(G/G_{max}) + 21.0 \quad (10)$$

Eşitlik 10' da Ishibashi ve Zhang (1993) tarafından önerilen ve  $D_{minus}$   $D_{min}$  yerine sadece  $D$ 'ye dayanan,  $PI$  üssü ile ölçeklendirilen denklemden farklıdır. Burada  $PI$  eşitliğe dâhil edilmemiştir. Çünkü Zhang vd. (2005) bu çalışmalarında Şekil 5'de çizdikleri grafiğin  $PI$  çok az bağımlılık gösterdiğini öne sürmüşlerdir. Eşitlik 7-10 arası bu çalışmada önerilen  $D$  (sönümlenme) ilişkilerini oluşturmaktadır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Çalışma Kapsamında Yapılan Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Analizlerinde Roblee ve Chiou (2004) ve Zhang vd. (2005) Modellerinin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında killi zeminlerden oluşan ve kayma dalga hızları aynı olan 2 sondaj verisi kullanılarak analizler yapılmıştır. Çalışmada yapılan analizlerde 11 farklı kuvvetli yer hareketi verileri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi PEER veri tabanından (Pasific Ground Motion Database) alınmıştır. Bu kuvvetli yer hareketi verilerinin seçimi için;  $M_w > 6.0$  büyüklüğe sahip, doğrudan atımlı fay üzerinde meydana gelmiş, zemin özellikleri ve sismik risk durumu (Fay uzaklığı: 0-40 km,  $V_s30$ : 360-760)



bölge özelliklerine yakın olduğu düşünülen 11 kuvvetli yer hareketi tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında tercih edilen 11 kuvvetli yer hareketi verileri Çizelge (3)'de sunulmaktadır.

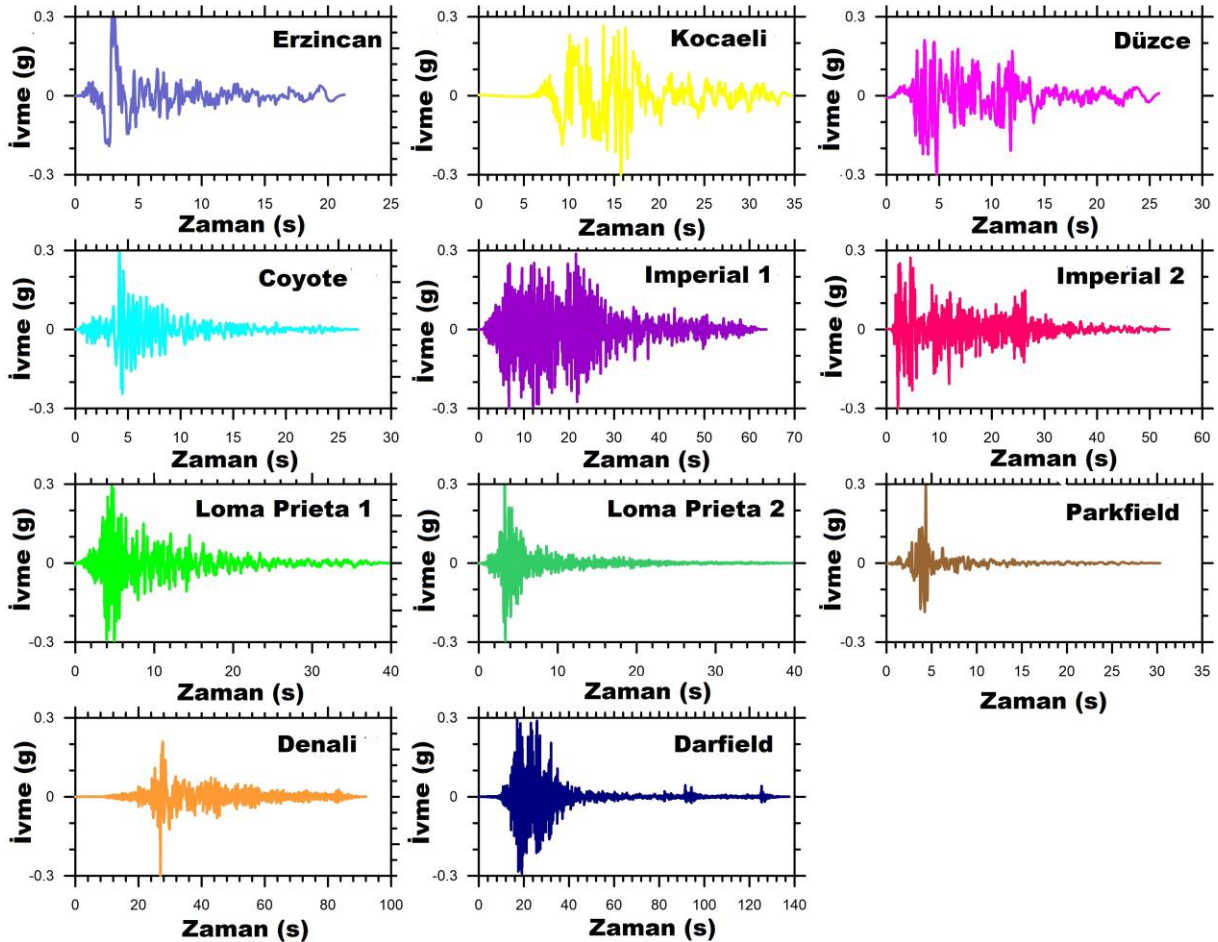
Bu çalışma kapsamında yapılan doğrusal olmayan analizler Deepsoil 7.0 yazılımı kullanarak tamamlanmıştır. Bu yazılım zaman alanlı çözümleri ile doğrusal olmayan analizleri yapabilmektedir (Hashash vd., 2016). Çalışmada kullanılan killi zeminler için önerilen Roblee ve Chiou (2004) ve Zhang vd. (2005) modelleri yazılımda yer almaktadır.

Çalışmada killi zemin tabakalarından oluşan 2 sondaj üzerinde 11 farklı kuvvetli yer hareketi verisi etkisinde oluşacak doğrusal olmayan davranışın karşılaştırmasını yapmak amacıyla 2 farklı model üzerinde doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan 11 farklı kuvvetli yer hareketi verisi AFAD İnteraktif Web Uygulamasında bölge için tanımlanan deprem karakteristiklerine göre  $PGA = 0.3g$  ve DD-2 durumuna

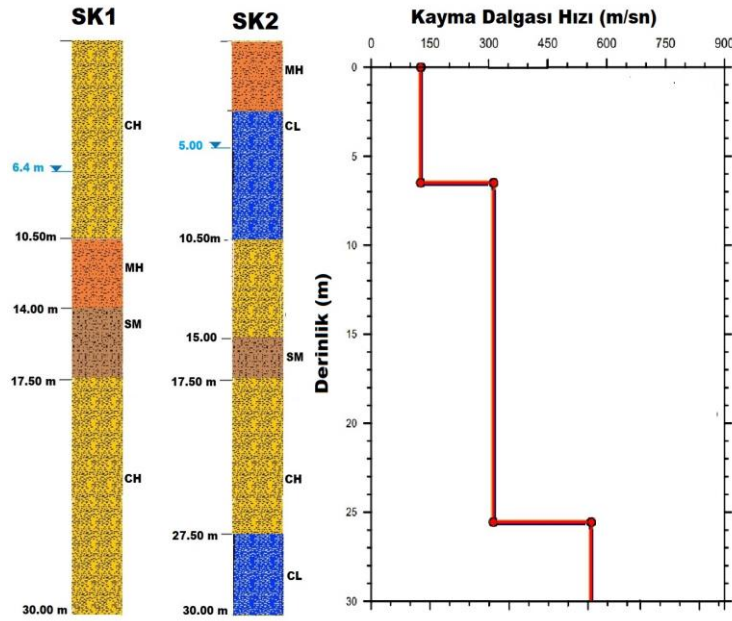
göre ölçeklendirilerek analizler tamamlanmıştır. Ölçeklendirilmiş yer hareketi verileri Şekil 6'da sunulmaktadır.

**Çizelge 3.** Çalışmada kullanılan kuvvetli yer hareketi verileri (PEER, 2006)

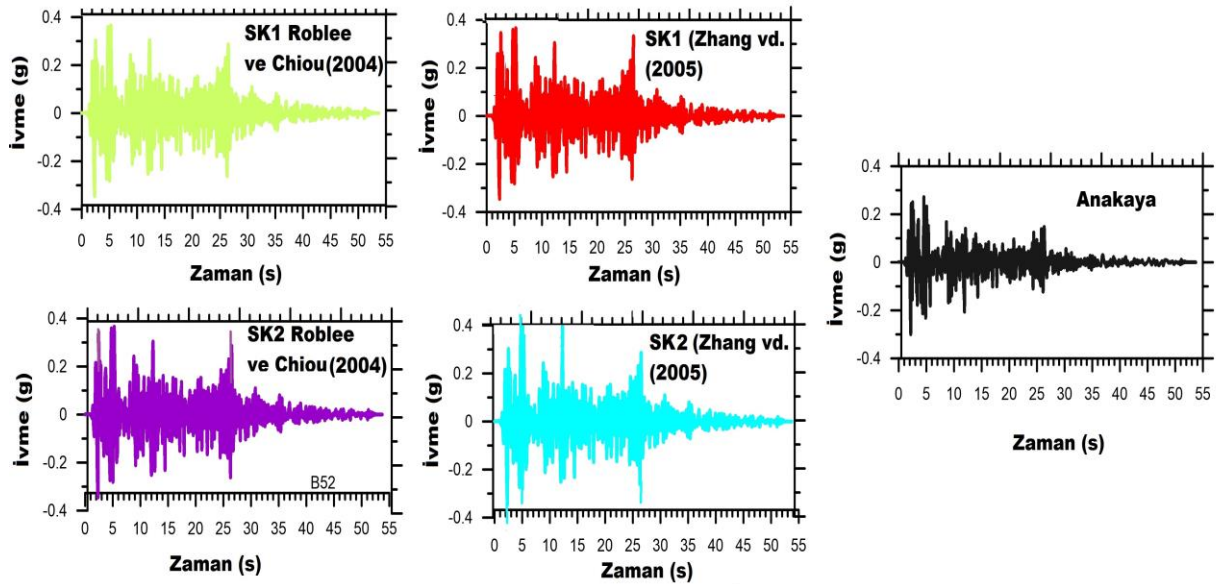
Deprem	Yıl	İstasyon	Büyüklik
Erzincan	1992	Erzincan	6.69
Kocaeli	1999	Yarımca	7.2
Düzce	1999	Düzce	7.14
Coyote Lake	1979	SJB	5.7
Imperial Valley	1940	El Centro	6.9
Imperial Valley	1979	Calipatria	6.5
Loma Prieta	1989	Gilroy 3	6.9
Loma Prieta	1989	Gilroy 4	6.9
Parkfield	1966	Benioff	6.1
Denali	2002	TAPS	7.9
Darfield	2010	DSLCL	7.0



**Şekil 6.** Analizlerde kullanılan  $PGA:0.3g$  olarak ölçeklendirilmiş kuvvetli yer hareketi kayıtları



Şekil 7. Çalışmada kullanılan iki sondajın zemin ve sismik özellikleri



Şekil 8. SK1 ve SK2 sondajına ait doğrusal olmayan analizler sonucu oluşan ivme-zaman grafikleri

Çalışmada doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı, daha çok killi tabakalardan oluşan sondajların zemin özellikleri şekil 7'de sunulmaktadır. Birbirine yakın olan, zemin ve sismik özellikleri benzer olan iki sondaj çalışma kapsamında kullanılmak üzere tercih edilmiştir.

### 3.1.1. Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan Zemin Davranış Analizleri Sonuçları

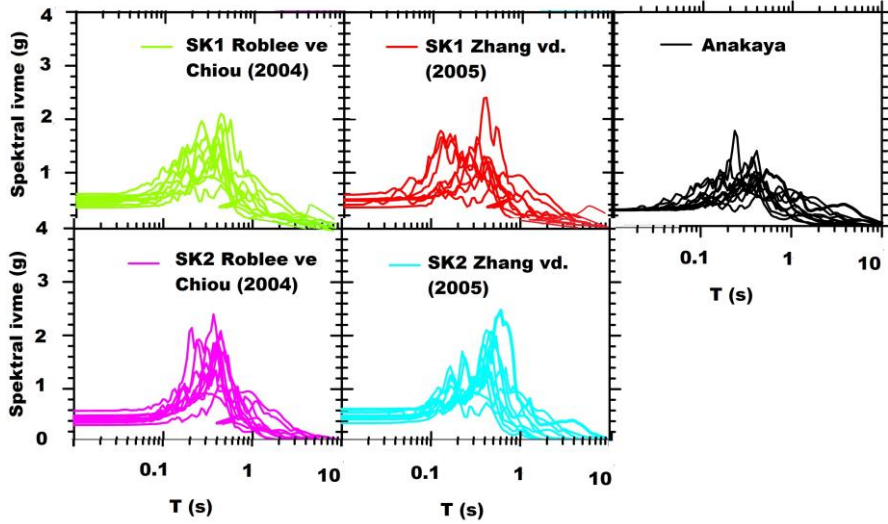
Bir boyutlu doğrusal olmayan analizler için 2 sondajda killi zemin tabakaları için ayrı ayrı Roblee ve Chiou (2004) ve Zhang vd. (2005) modelleri tercih edilerek analizler yapılmıştır. Kumlu zemin tabakaları için Seed ve Idriss (1970) eğrileri kullanılmıştır. Analizlerden bir boyutlu

zemin davranışına ait zemin yüzeyinde oluşacak ivme değerleri elde edilmiştir. Her iki sondaj içinde anakaya ile kıyaslandığında oldukça büyük ivme değerlerinin oluştuğu gözükmektedir. Çalışmada örnek olarak Imperial Valley 2 kuvvetli yer hareketine göre elde edilen ivme zaman grafikleri Şekil 8'de sunulmaktadır. Grafikler dikkatli incelendiğinde SK2 sondajında özellikle Zhang vd. (2005) modeli seçilerek yapılan analizlerde pik ivmelerin daha büyük olduğu görülmektedir.

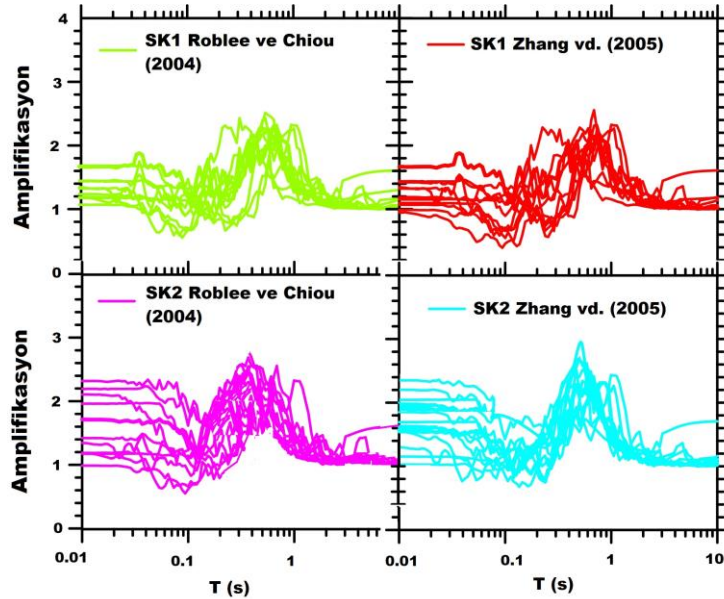
Zemin davranış analizlerinde ikinci parametre olan zemin tepki spektrumlarının ortaya konması için; çalışma kapsamında doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen verilerden her iki sondaja ait spektral ivme (Sa)-

periyot (sn) grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 9). Bu grafiklerde SK1 sondajında Roblee ve Chiou (2004) modeline göre maksimum spektral ivmenin 0.4 saniyede 2.1 (g) olduğu belirlenmiştir. Ancak SK1 sondajında Zhang vd. (2005) modeli kullanılarak elde edilen maksimum

spektral ivme ise 0.4 saniyede 2.4 (g) olduğu görülmektedir. SK2 sondajında elde edilen maksimum spektral ivme; Roblee ve Chiou (2004) modeline göre; 0.4 saniyede 2.4 (g); Zhang vd. (2005) modeline göre ise 0.4 saniyede 2.6 (g) olduğu görülmektedir.



Şekil 9. SK1 ve SK2 sondajına ait doğrusal olmayan analizler sonucu oluşan spektral ivme(g)-periyot (sn) grafikleri



Şekil 10. SK1 ve SK2 sondajına ait doğrusal olmayan analizler sonucu oluşan amplifikasyon-periyot (sn) grafikleri

Deprem mühendisliği çalışmalarında sismik yükler etkisinde tabakalı yumuşak zeminlerin genliklerinde ve hakim titreşim periyotlarında zemin özelliklerin farklılaşması nedeniyle büyütme oluştugu ve çok kısa mesafelerde dahi farklı yapısal hasarlara neden olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan doğrusal olmayan analizler sonucunda her iki sondaja ait büyütme oranlarının ortaya konduğu amplifikasyon- periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 10).

Burada maksimum büyütme; SK1 sondajında Roblee ve Chiou (2004) modeline göre 2.4; Zhang vd. (2005)

modeline göre ise 2.5 olarak elde edilmiştir. SK2 sondajında ise maksimum büyütme; Roblee ve Chiou (2004) modeline göre 2.8; Zhang vd. (2005) modeline göre yaklaşık 3.0 olduğu görülmektedir. Her iki sondajın daha çok killi tabakalardan oluşması benzerlik olarak görülse de farklı büyütme ve spektral ivme değerleri elde edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında kumlu zeminler için Seed ve Idriss (1970) ile killi zemin tabakaları için Roblee ve Chiou ile Zhang vd. (2005) modelleri kullanılarak doğrusal olmayan zemin davranış analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda



elde edilen parametreler ivme-zaman, spektral ivme (g)-periyot (s) ve amplifikasyon- periyot (s) olarak grafikler halinde sunulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde daha çok CH-MH gibi plastisitesi yüksek zemin tabakalarından oluşan ve yas seviyesi 6.4 m de olan SK1 sondajında daha küçük spektral ivme ve amplifikasyonların oluştuğunu söyleyebiliriz. Roblee ve Chiou (2004) ile Zhang vd. (2005) modelini karşılaştırdığımızda ise aynı sondaj için spektral ivme ve ampfikasyonlarda farklılıklar görülmektedir. Zhang vd. (2005) modelinden Roblee ve Chiou modeline göre daha büyük spektral ivme ve ampfikasyonlar elde edilmiştir. Yeraltısuyu seviyesi 5.0 m de olan ve düşük plastisiteli zemin tabakalarını da içeren SK2 sondajında SK1 sondajına göre Zhang vd. (2005) modelinden daha büyük spektral ivme ve amplifikasyon değerleri elde edilmiştir. Aynı sondaj için her iki model kullanılarak elde edilen spektral parametreler karşılaştırıldığında, Zhang vd. (2005) modelinde spektral parametreler arasındaki fark daha fazladır. Bunun nedeninin, jeolojik yaş-plastisite indisini gruplandırarak uyum ilişkileri sunması ve gerilme aralığının daha geniş olması ile açıklanabilir. Ayrıca Zhang vd. (2005), çalışmalarında karşılaştırma analizleri yaparak, geliştirdikleri öngörücü denklemlerin dünyanın benzer zemin koşullarına sahip diğer alanlarına uygulanabilir olduğunu öne sürmektedirler.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu araştırma Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: 080240)

#### 5. Kaynaklar

Bolisetti, C., Whittaker, A. S., Mason, H. B., Almufti, I., Willford, M., 2014. Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*, **275**, 107–121.

Civelekler, E., Afacan, K.B., Okur, D.V., 2021. Eşdeğer Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yaklaşımlara Göre Sismik Yük Etkisindeki Zeminlerde Davranış Analizi,

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **29(2)**, 158-171.

<https://doi.org/10.31796/ogummf.839703>

Civelekler, E., Afacan, K.B., Okur, D.V., 2024. Effect of site specific soil characteristics on the nonlinear ground response analysis and comparison of the results with equivalent linear analysis, *Journal of Applied Geophysics*, **220**, 105250.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105250>

Darendeli, M. B., 2001. A new family of normalized modulus Reduction and Material Damping Curves, PhD Dissertation, University of Texas at Austin, TX, USA. <http://hdl.handle.net/2152/10396>

Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Gilbert, R., Menq, F. Y., Choi, W. K., 2002. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Presentation to March 2002 PEER-LL Quarterly Coordination Meeting, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 1-10.

Gücek, S., Afacan, K. B., & Zorluer, İ., 2023. 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **23(3)**, 740-752.

<https://doi.org/10.35414/akufemubid.1298648>

Hashash, Y.M.A., Phillips, C., Groholski, D.R., 2010. 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, OSP 4.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D., 2016. DEEPSOIL 6.1, User Manual, Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 313-323.

Ishibashi, I. and Zhang, X. J., 1993. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found*, **33-1**, 182–191.

Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*, PrenticeHall, Upper Saddle River, New Jersey, 0-653.

Roblee, C., Chiou, B., 2004. A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. *In: Peer headquarters international workshop on uncertainties in nonlinear soil properties and their impact on modeling dynamic soil response*, University of California March, 1-29.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report No.

EERC 70-10, University of California, Berkeley, USA, 0-48.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K., 1986. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **112**, 11, 1016-1032.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:11\(1016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016)

Stokoe, K.H., 1993., Gilroy #2, California and Lotung, Taiwan. Appendices Dynamic Properties of Undisturbed Soils from Treasure Island, *EPRI 1993 Report on Guidelines for Determining Design Basis Ground Motions*, EPRI Early Site Demonstration Program, March, **IV**, California, 8.B1, 8.B2, and 8.B3,

Stokoe, K. H., Darendeli, M. B., Andrus, R. D., Brown, L. T., 1999. Dynamic soil properties: Laboratory, field and correlation studies. Proc., 2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 3, Lisbon, Portugal, 811–845.

Vucetic M., Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J Geotech Eng.* **117(1)**, 89–107.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89)

Zhang J., Andrus R. D, Juang C. H. 2005. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. *J Geotech Geoenviron Eng.* **131(4)**,453–464.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:4\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(453)

#### İnternet Kaynakları

1. Peer, P.E., 2006. PEER Ground Motion Database, Berkeley. <http://peer.berkeley>.