



Yer Tepki Analizlerinde Farklı Dinamik Kayma Modülü Yaklaşımları Kullanılarak Belirlenen Tepki Spektrumlarının Karşılaştırılması

Comparison of Response Spectrums Determined Using Different Dynamic Shear Modulus Approaches in Ground Response Analysis

Engin Nacaroğlu ^{1*}, Berk Yağcıoğlu ², Selçuk Toprak ³

^{1,2} Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, TÜRKİYE

³ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: enacaroglu@pau.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 13.10.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 08.03.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257507

Atıf şekli/How to cite: NACAROĞLU, E., YAĞCIOĞLU, B., TOPRAK, S. (2023). Yer Tepki Analizlerinde Farklı Dinamik Kayma Modülü Yaklaşımları Kullanılarak Belirlenen Tepki Spektrumlarının Karşılaştırılması. DEUFMD, 25(75), 597-609.

Öz

Deprem kaynaklı dinamik hareketlerin zemin içerisindeki dalga yayılımına bağlı olarak altyapı ve üst yapı sistemlerinde oluşturduğu etkilerin araştırılmasında kullanılan araçlardan biri tek boyutlu yer tepki analizleridir. Bu analizlerde zeminlerin dinamik özelliklerinin tanımlanmasında doğrudan çevrimsel yüklemeler ile gerçekleştirilen deneyler kullanılabilir. Fakat bu deneylerin maliyetleri ve deney aletlerinin ulaşılabilirliğindeki zorluklar nedeniyle bu deneylerin yerine genellikle araştırmacılar tarafından geliştirilen modül azalım ve sönüm eğrileri kullanılmaktadır. Eğrilerin farklı veri setleri ve teknolojilere sahip deney aletleri ile hazırlanması, zeminin dinamik etkiler altındaki davranışlarında farklılıklara sebep olmaktadır. Literatürde bu farklılıkların giderilmesi konusunda çeşitli düzeltme parametreleri geliştirilmiştir. Fakat düzeltme parametrelerine rağmen eğrilerin birbiri ile tam uyumlu olduğundan bahsetmek mümkün değildir. Bu çalışmada dinamik davranış eğrileri ile elde edilen sonuçlar, bir vaka kapsamında incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Dinamik eğrilerin yer tepki analizi ile elde edilen zemin davranış çıktılarına etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler neticesinde yüzeye yakın killi zeminlerde dinamik kayma modülü etkilerinin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Kumlu zeminler için ise tespit edilen uyumsuzluklar nedenleri ile birlikte açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yer Tepki Analizi, Modül Azalım Eğrileri, Deprem Tepki Spektrumu, Malzeme Sönüm Eğrileri

Abstract

One of the methods used to investigate the effects of earthquake-induced dynamic movements on substructure and superstructure is one-dimensional ground response analysis. In these analyzes, tests performed with direct cyclic loading can be used to define the dynamic properties of soils. However, due to the cost of these experiments and the difficulties in accessibility of the test equipment, modulus reduction and damping curves developed by the researchers are generally used instead of these experiments. The preparation of these curves with test tools with different data sets and technologies causes differences in the behavior of the soil under dynamic effects. Various correction parameters have been developed in the literature to eliminate these differences. However,

despite these correction parameters, it is not possible to say that the curves are fully compatible with each other. In this study, the results obtained with dynamic behavior curves were examined and evaluated within the scope of a case. The effect of dynamic response curves used in ground response analysis on soil response outputs has been evaluated comparatively. As a result of the evaluations, it has been determined that the dynamic shear modulus effects are compatible in clayey soils close to the surface. But for sandy soils, inconsistencies were determined and the detected incompatibilities were explained with their reasons.

Keywords: *Ground Response Analysis, Modulus Reduction Curves, Earthquake Response Spectrum, Material Damping Curve*

1. Giriş

Zeminlerin yer hareketi altındaki davranışı ve bu yer hareketi kaynaklı enerjinin zemin yüzeyine aktarımı geoteknik deprem mühendisliğinin incelediği önemli konulardan biridir. Bu konuda yer tepki analizleri, zemin büyütme, azalım ilişkileri vb. çalışmalar bulunmaktadır. Makalede değerlendirilmesi yapılan tek boyutlu yer tepki analizleri, Seed ve Idriss [1] ile Hardin ve Drnevich [2] tarafından zeminin çevrimsel yüklemeler altındaki davranışlarının modül azalım ve sönüm eğrileri (dinamik davranış eğrileri) ile belirlenmesi sonucunda kullanılmaya başlanmıştır. Dinamik davranış eğrileri günümüzde de çeşitli gelişmelerle birlikte hala en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak varlığını sürdürmektedir. Vucetic ve Dobry [3] plastisite indisinin dinamik davranış eğrilerine etkisi ile ilgili çalışmıştır. Ishibashi ve Zhang [4] kum ve yüksek plastisiteli killeri kapsayan bir dinamik davranış eğrisi formülü geliştirmiştir. Darendeli [5] dinamik davranış eğrisi hiperbolik denkleme yeni bir parametre ekleyerek, Hardin ve Drnevich [2] tarafından oluşturulan davranış eğrileri denkleminde daha uyumlu bir denklem elde etmiştir. Analizlerin tek boyutlu olarak gerçekleştirilmesi, bünyesinde çeşitli sınırlamalar barındırması dahi Tao ve Rathje [6] 34 bölge için gerçekleştirdiği çalışmada sonuçlardan %69'unun tek boyutlu analize uygun olduğu sonucuna varmıştır. Kumar vd. [7]'de ise hazır eğriler ve deneysel eğriler ile gerçekleştirilmiş yer tepki analizleri etkileri üzerinde çalışılmıştır.

Yer tepki analizleri yapılırken zemine ait bazı özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu özellikler; kayma mukavemeti parametreleri, kayma dalgası hızları, kayma modülü-birim deformasyon (modül azalım) eğrileri ve birim deformasyon-sönümlenme (sönüm oranı) eğrileridir [3]. Dinamik özellikleri belirlemek için kullanılan karmaşık laboratuvar testlerinin yüksek maliyetli olması, önemli ve büyük projeler dışında bu deneylerin yaygın olarak

kullanılmasını engellemektedir. Bununla birlikte kayma dalgası hızlarının belirlenmesi için pratik ve uygun maliyetli yöntemler mevcuttur [4]. Bu nedenle yer tepki analizleri çalışmalarında kayma dalgası hızı ve zeminin karakteristik özelliklerine bağlı oluşturulan hazır modül azalım eğrileri, laboratuvar deneylerine bağlı olarak elde edilen omurga eğrilerinden daha sık kullanılmaktadır. Bahsedilen dinamik davranış eğrilerinin belirlenmesi ile ilgili yaklaşımlar Seed ve Idriss [1] ile Hardin ve Drnevich [2]'den itibaren farklı parametrelere ve veri setlerine bağlı olarak başka araştırmacılar tarafından da geliştirilmiştir [1-5, 8, 9].

Bu çalışmada seçilen farklı modül azalım ve sönüm eğrilerinin analizler üzerindeki etkileri sonuçlar üzerinden karşılaştırılarak sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında, sahaya özel yer tepki analizinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli girdi parametreleri, saha ve laboratuvar deneylerinin yapıldığı bir vaka üzerinden elde edilmiştir. Parametrelerin belirlenmesinde uygulanan saha deneyleri, bölgeye ait 5 adet 20-30 metre arası standart penetrasyon testi (SPT) sondajı, 4 adet çok kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi (MASW) deneyi ve 6 adet presiyometre deneyinden oluşmaktadır. Laboratuvar deneyleri olarak 38 adet numuneye ait elek, kıvam ve su içeriği deneyleri, 9 adet drenajsız 3 eksenli monotonik basınç deneyi ve 5 adet monotonik kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Bölgede kullanılacak deprem spektrumunun elde edilmesi amacıyla zemin sınıfının belirlenmesi gerekmektedir. Zemin sınıfının belirlenmesi için SPT ve MASW deneyleri kullanılmıştır. Presiyometre, MASW ve SPT deneyleri birbirleri ile karşılaştırılarak standart bir deney verisi doğrulama süreci gerçekleştirilmiştir. Zeminin ince daneli veya iri daneli olarak ayrılması işlemi elek analizleri

sonuçlarına bağlı olarak yapılmıştır. Bu numunelere doğal su içeriklerinde 3 eksenli basınç ve kesme kutusu deneyleri uygulanarak malzeme kayma mukavemetleri belirlenmiştir. Kıvam limitleri ise killi numunelerin dinamik davranışlarında kullanılmak üzere plastisite indisinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca bölgenin depremselliği ve jeolojik yapısı bölgede yapılan akademik çalışmaların taranması ile elde edilmiştir.

2.1. Bölgenin jeolojik yapısı ve depremselliği

Analizlerin yapıldığı bölge Afyon-Akşehir grabeninde bulunmaktadır [10]. Bu graben aynı zamanda Akarçay havzası olarak da adlandırılmaktadır [11]. Akarçay havzasının Sadıkbey bölgesinde bulunan inceleme alanına yakın sondajlar ve bölgenin alüvyon yapısı incelendiğinde [10-12] derinlik boyunca bulunan alüvyona ait tüm parametrelerin belirlenemeyeceği görülmüştür ve ana kayaya ulaşılammıştır. Bölgede aletsel döneme ait en büyük depremler ise 03.02.2002 tarihli, 6.5 Mw büyüklüğündeki Çay depremi ve 01.10.1995 tarihli, 6.1 Mw büyüklüğündeki Dinar depremidir.

2.2. Zemin özellikleri

Yüzeyden itibaren 50 metre derinlikteki zemin tabakası, analizlerde kullanılacak zemin bölgesi olarak seçilmiştir ve bu bölgedeki zeminin indeks ve dayanım özellikleri, bahsedilen saha ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir (Şekil 1). Zeminde gözlenen mevsimsel yer altı suyu seviyesi (YASS) en kritik durum için 5 metre derinliğindedir. Her zemin katmanının kayma dayanımı (τ) Mohr-Coulomb teorisine göre hesaplanmıştır. Kayma dayanımının belirlenmesinde kohezyonsuz zeminler için içsel sürtünme açısı (ϕ) ve efektif gerilmeye (σ') bağlı Denklem 1 ve kohezyonlu zeminler için drenajsız kayma mukavemetine (c_u) bağlı Denklem 2 kullanılmıştır.

$$\tau = \sigma' \cdot \tan\phi' \quad (1)$$

$$\tau = c_u \quad (2)$$

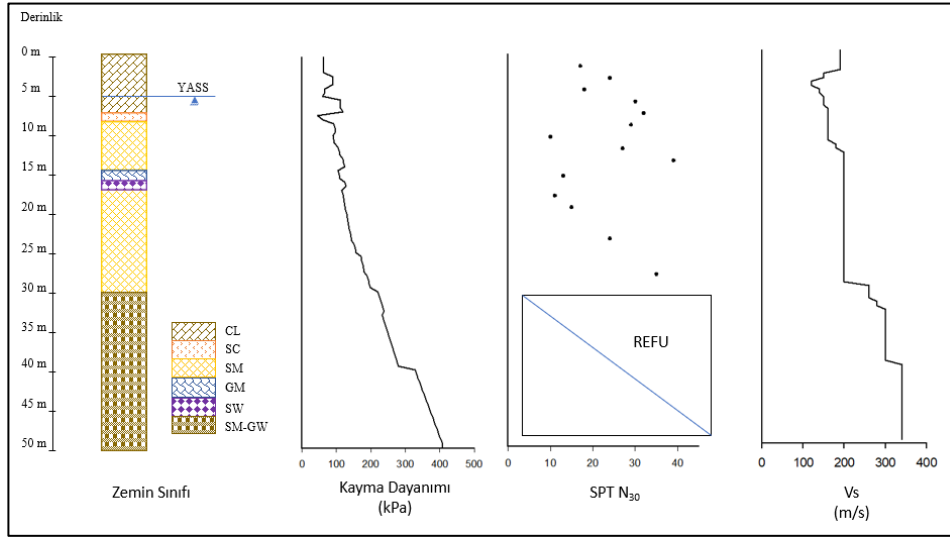
Bölgenin üst 30 metre ortalama kayma dalgası hızı (V_s)₃₀ ve ortalama standart penetrasyon darbe sayısı (N_{60})₃₀ değerlerine göre yerel zemin

sınıfı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine [13] göre ZD'dir.

2.3. Yer hareketleri bilgileri

Analizlerde tanımlanan zemin içi ana kayaya (mühendislik ana kayası), belirlenen 7 adet deprem, girdi yer hareketi olarak tanımlanmıştır (Tablo 1). Seçilecek deprem sayısı ile ilgili yönetmelikler farklı minimum deprem sayısını şart koymuşlardır. Örnek olarak Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliğinde [14] en az 5 deprem ivme zaman kaydının, TBDY-2018 ise en az 11 deprem ivme zaman kaydının yer tepki analizi sürecinde kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Tablo 1'de depremler ile ilgili deprem adı, kayıt istasyonu adı, deprem yılı, istasyon zeminine ait üst 30 metre ortalama kayma dalgası hızı, deprem büyüklüğü (M_w), deprem kaydının tepe yer ivmeleri (PGA) ve fay kırığının yüzeydeki projeksiyonu ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın yatay mesafeyi tarif eden Joyner-Boore mesafe birimi (RJB) verilmiştir. Depremleri oluşturan fay yapıları, depremlerin spektral davranışının benzerliği, depremlere ait büyüklükler, ivme kayıt istasyonunun deprem merkez üssüne yakınlığı ve ivme kayıt istasyonu zeminine ait (V_s)₃₀ değerlerinin sahaya yakın değerlerden seçilmesi depremlerin belirlenmesinde başlıca göz önünde bulundurulacak etkenlerdir. Fakat çalışmanın öncelikli amacının bölgenin olası davranışı değil, modül azalım ve sönüm eğrilerinin genel etkileri olması nedeniyle depremlerin seçiminde bazı şartlar (deprem büyüklükleri, spektral davranışları) esnetilmiştir. Kullanılan 7 adet depremde PGA değerleri 0.09g-0.83g, ve büyüklükler M_w 6.0-7.1 aralığında değişkenlik gösterecek şekilde seçilmiştir.

Deprem kayıtları, bölgenin karakteristik tasarım spektrumlarına uygunluk göstermesi için bölgeye ait olasılıksal deprem spektrumu ile eşlenmelidir. Bu eşleme işlemi için seçilen deprem ivme spektrumu, UDAP (Ulusal Deprem Araştırma Programı) bünyesinde hazırlanan ve Türkiye'nin bölgesel deprem riskinin olasılıksal olarak incelenmesiyle elde edilen coğrafi bilgi sistemi arayüzünden alınmıştır [15].



Şekil 1. Zemin sınıfları ve mukavemet özellikleri

Figure 1. Soil class and strength properties

Table 1. Analizlerde kullanılan deprem kayıtları.

Table 1. Earthquake records used in the analysis.

Deprem NO	Deprem Adı	İstasyon	V_{s30} (m/s)	Büyükük (Mw)	PGA (g)	R_{FB} (km)
E1	Duzce 1999	Lamont 1062	348	7.1	0.26	9.14
E2	Dinar 1995	Cardak	429	6.4	0.09	43.13
E3	Christchurch 2011	RHC	293	6.2	0.29	9.43
E4	Kobe 1995	KJMA	312	6.9	0.83	0.94
E5	Samos 2020	Kuşadası	369	6.9	0.18	41.98
E6	Parkfield-02, CA 2004	Hog Canyon	364	6.0	0.27	0.73
E7	Loma Prieta 1989	S. W ValleyColl	348	6.9	0.33	8.48

Depremin olduğu bölgeye ait tasarım ivme katsayıları, mühendislik ana kayasının TBDY-2018 tanımlanan zemin sınıfına göre alınmıştır [13,15]. Seçilen deprem kayıtlarındaki her periyoda karşılık gelen spektral ivmeler, bölgedeki ana kayaya göre belirlenmiş spektral ivmelerden az olmayacak şekilde eşlenmiştir. [15,16]

2.4. Anakaya özellikleri

Yer tepki analizlerinde depreme ait tasarım spektrumunun oluşturulması için ana kaya konumunun, zemin sınıfının ve kayma dalgası hızının belirlenmesi gereklidir. Tek boyutlu profili çıkarılan bölgede, sondajlara ve derinliğe

bağlı kayma dalgası hızına ait veriler incelendiğinde ana kaya belirlenmemiştir. Buna bağlı olarak 50 metre derinlikteki kayma dalgası hızı 360 m/s olan zemin, mühendislik ana kayası olarak seçilmiştir [13]. Ana kayanın doğrudan bulunamamasının sonucu olarak, mostra vermiş bölgeden seçilen deprem kayıtları yerine, incelenen bölge ile benzer karakteristiklere sahip zemin içi deprem kayıtları kullanılmıştır. Kwok ve diğ. [17] mostra veren bölgeden elde edilmiş deprem kayıtları için elastik taban sınır koşulu, zemin içinden elde edilmiş kayıtlar için ise rijit yarı uzay sınır koşulunun, model uzayı taban sınırı olarak kullanılmasını önermiştir. Zemin içi deprem kayıtlarının kullanılması

sonucuna bağlı olarak mühendislik ana kayasına ait sınır koşulu rijit yarı-uzay olarak seçilmiştir. [18]

2.5. Modül Azalım ve Çevrimsel Sönüm Eğrileri

Çalışmada depremlerin mühendislik ana kayasına girdi yer hareketi olarak tanımlanması sonucunda zemin profili içinde farklı derinliklerden alınan kalıcı yer ivmeleri ve tasarım spektrumlarının, çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen modül azalım ve sönüm eğrileri altında davranışlarının birbirleriyle ilişkileri incelenmiştir. İncelenen modül azalım ve sönüm eğrileri için 4 farklı yöntem seçilmiştir. Bunlar Darendeli [5], Roblee ve Chiou [9], Vucetic ve Dobry [3], Seed ve Idriss [1] tarafından geliştirilen yaklaşımlarıdır. Darendeli [5] ile Roblee ve Chiou'ya [9] ait yaklaşımlar hem kum hem de killler üzerinde uygulanabilmektedir. Vucetic ve Dobry [3] killerde, Seed ve Idriss [1] ise sadece kum ve çakıllarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada yaklaşımların kullanılabilirdiği zemin türleri göz önünde bulundurularak, olası tüm

kombinasyonlar 9 farklı analiz grubu olarak oluşturulmuştur (Tablo 2). Analizler Deepsoil (2020) [19] isimli bir boyutlu yer tepki analiz programı ile yapılmıştır. Sonuçlarda beklenenden düşük ivmelerin oluşmaması ve sapmalar ile karşılaşılması için [20] analizler zaman tanım alanında doğrusal olmayan şekilde gerçekleştirilmiştir. Modül azalım ilişkilerini oluşturan araştırmacılar bu modül azalım eğrilerini küçük birim deformasyon ve orta birim deformasyon deneyleri ile elde etmişlerdir. Bu nedenle yüksek birim deformasyon dereceleri için bir kayma mukavemeti düzeltme işlemi gereklidir [21]. Bu düzeltme için Groholski vd. [22] tarafından önerilen genel karesel/hiperbolik model kullanılmıştır. Aaqib vd. [23] bahsedilen düzeltme etkilerini 15 saha için 2 farklı ivmeye göre ölçeklenmiş kayıtlarda yaptığı analizlere göre değerlendirmiştir. Ayrıca bu düzeltmeler sonucunda modül azalım ve sönüm eğrilerinin birbirlerine benzediği gözlenmiştir. Özellikle killi zeminleri ifade eden modül azalım eğrileri arasındaki farklar ihmal edilebilecek düzeydedir.

Tablo 2. Modül azalım ve sönüm eğrileri kombinasyonları ile oluşturulmuş analiz grupları.

Table 2. Analysis groups created with modulus reduction and damping curves combinations.

Analiz Grubu No	Killere Ait Eğriler	Kumlara ait eğriler
Grup 1	Darendeli 2001	Darendeli 2001
Grup 2	Vucetic ve Dobry 1991	Darendeli 2001
Grup 3	Roblee ve Chiou 2004	Darendeli 2001
Grup 4	Roblee ve Chiou 2004	Roblee ve Chiou 2004
Grup 5	Darendeli 2001	Roblee ve Chiou 2004
Grup 6	Vucetic ve Dobry 1991	Roblee ve Chiou 2004
Grup 7	Darendeli 2001	Seed ve Idriss 1970
Grup 8	Vucetic ve Dobry 1991	Seed ve Idriss 1970
Grup 9	Roblee ve Chiou 2004	Seed ve Idriss 1970

Zeminin ve genel olarak yapı malzemelerinin tepki davranışı basit olarak düşünüldüğünde, gerilme ve gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirmeye bağlıdır. Fakat zemin çoğu malzemenin aksine çok düşük deformasyon değerlerinde bile doğrusal olmayan davranış göstermektedir. Zeminin deprem altındaki yüklemesi negatif ve pozitif gerilmeler olarak çevrimsel biçimde gerçekleştiği için düşük şekil değiştirmelerin gerçekleştiği her çevrimde

zeminin davranışı değişmektedir. Çevrime bağlı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ise döngüsel bir davranış içindedir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisini her çevrimi kapsayacak biçimde kullanabilmek amacıyla kayma modülü (G) ve sönüm oranından (D) oluşan iki parametre kullanılarak genelleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme grafiği elde edilebilir [2]. Bu prensip gereği zeminin dinamik davranışını tanımlamak için çeşitli araştırmacılar tarafından modül

azalım ve malzeme sönüm eğrileri geliştirilmiştir.

Analizlerde kullanılan Darendeli [5] ve Roblee ve Chiou'ya [9] ait modül yaklaşımları Denklem 3'te, Seed ve Idriss [1] ve Vucetic ve Dobry'ye [3] ait modül yaklaşımları ise Denklem 4'te verilen modül azalım eğrisi parabolik denklemini kullanmaktadır. Bu denklemlerde G (çevrim noktalarına bağlı omurga eğrisi teğeti eğimi) kayma modülü, G_{max} (elastik bölge gerilme-şekil değiştirme eğimi) küçük şekil değiştirme kayma modülü, γ şekil değiştirme, γ_r referans şekil değiştirmesi ve α eğrilik katsayısıdır.

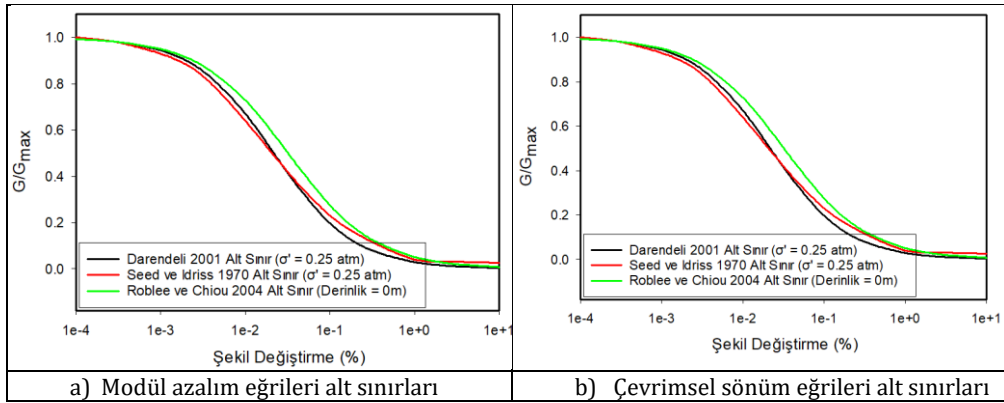
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha} \quad (3)$$

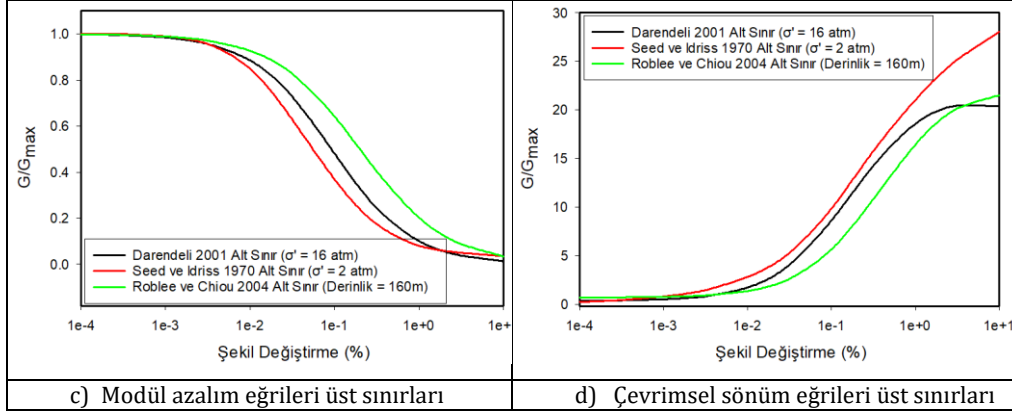
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (4)$$

Ayrıca zeminlere etkiyen enerji, zamana bağlı olarak daneler arası sürtünme ve viskozite kaynaklı azalmaktadır. Bunun yanı sıra zeminlerin çok düşük şekil değiştirmelerde dahi doğrusal olmayan davranış göstermesi nedeniyle fazladan enerji kayıpları yaşanmaktadır. Bu iki enerji ayrı ayrı hesaplandıktan sonra birbirine eklenerek sönüm eğrileri elde edilir. [5]

Vucetic ve Dobry [3] bu eğrileri, 1-15 arası aşırı konsolidasyon oranlı deney numunelerinden

alınan veriler doğrultusunda elde etmiştir ve bu eğriler üzerindeki hâkim parametrenin plastisite indisi olduğunu gözlemlemiştir. Seed ve Idriss'te [1] siltler, killer ve çakıllı zeminler için yeterince veri elde edilememiştir, fakat kumlu zeminler için sonuçların belirli bir aralıkta (Şekil 2 alt ve üst sınırlar) değiştiği belirlenmiş ve özellikle düşük deformasyonlara ait deneyler ile elde edilen durumlarda yüksek deformasyonlara ulaşılması için bir yöntem ortaya konulmuştur. Darendeli [5], Seed ve Idriss [1] ile Hardin ve Drnevich [2] tarafından geliştirilen modeli modifiye etmiştir. Bu modifikasyonla beraber eğriler üzerinde etkisi gözlenen parametreler, önem durumlarına göre derecelendirilmiş ve bu parametreler ile referans eğrileri oluşturulmuştur. Roblee ve Chiou [9] ise zeminleri, ince dane içerikleri ve plastisite indislerine göre 3 farklı ana gruba ayırmıştır. Bu 3 ana grubu ayrıca derinliklere göre düzenleyerek referans eğrileri oluşturmuştur. Bahsi geçen tüm modeller uygulamalarda aktif olarak kullanılsa da Darendeli [5] ve Roblee ve Chiou [9], laboratuvar test teknolojilerinin yıllara bağlı gelişmesi nedeni ile özellikle sahadan alınan derin numunelerde daha yüksek basınç imkânı bulunan deney düzenekleri kullanarak sonuçlar elde etmiştir. Dolayısıyla yeni modül azalım eğrileri özellikle derin zemin numuneleri için daha tutarlı sonuçlar vermektedir [9]. Kullanılan modül azalım ve çevrimsel sönüm eğrilerine ait alt ve üst sınır değerleri Şekil 2'de verilmiştir.



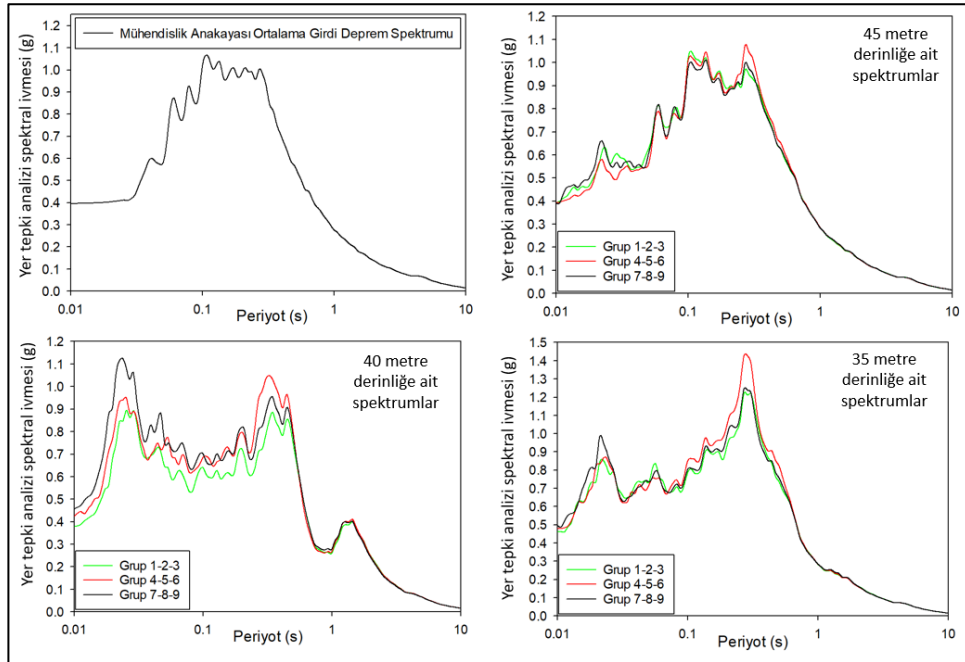


Şekil 2. Modül azalım ve sönüm eğrileri
Figure 2. Modulus reduction and damping curves

3. Bulgular

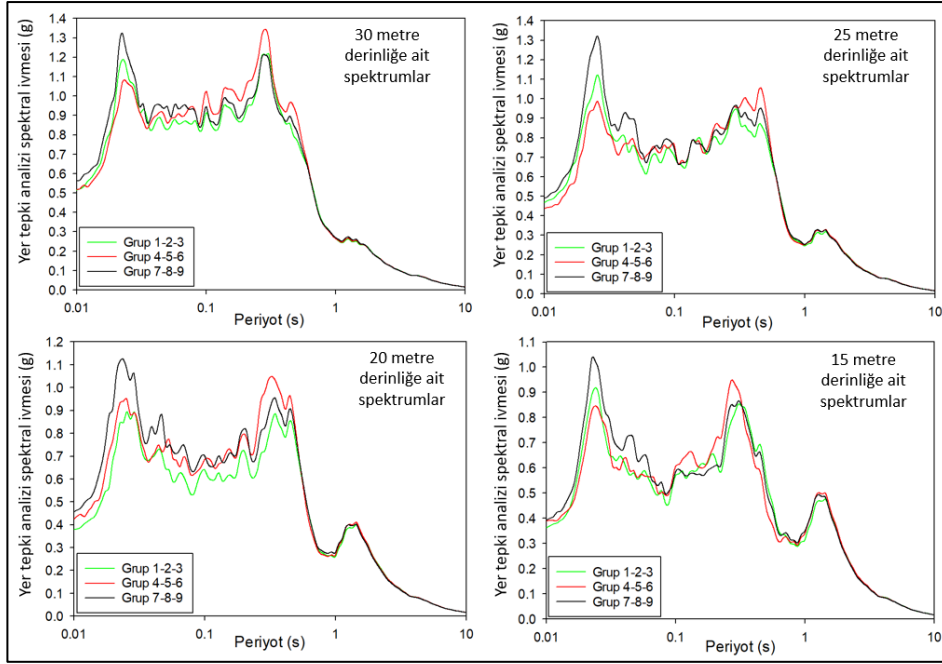
Bulgular farklı tasarım hedefleri doğrultusunda ivme spektrum davranışı, deprem tepe ivmeleri, yer değiştirme spektrum davranışı ve zemin deformasyonları gibi durumlar göz önüne

alınarak değerlendirilmiştir. Profil derinliği boyunca, tüm analiz grupları için deprem ortalamalarına ait sahaya özel spektrumlar oluşturulmuştur. Sahaya özel spektrumlar farklı derinlikler için Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir.



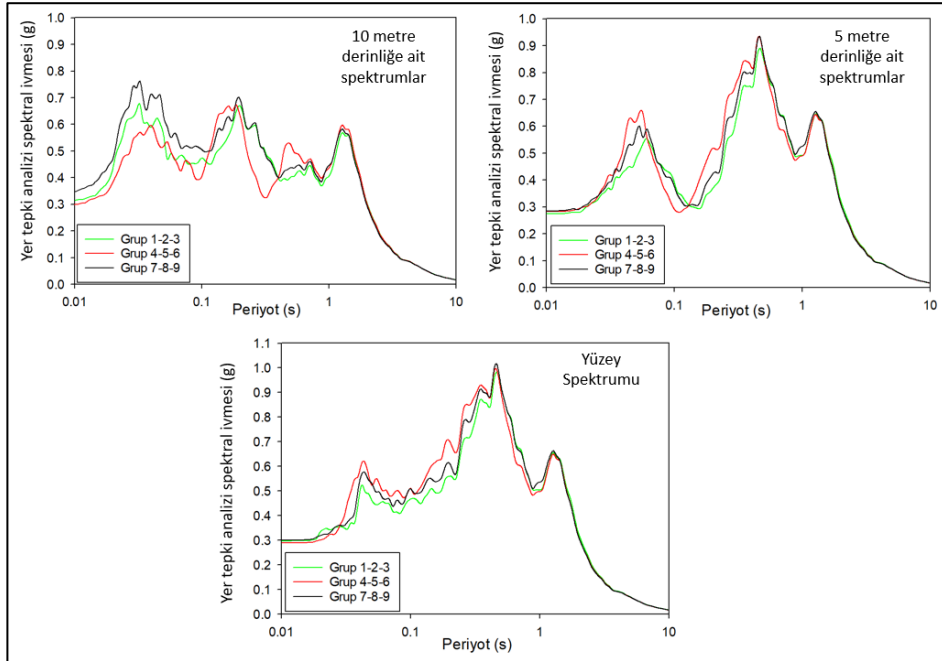
Şekil 3. Mühendislik anakayası- 35 metre arası derinliklerdeki deprem spektrumları

Figure 3. Earthquake spectra at depths between engineering bedrock - 35 meters



Şekil 4. 30 metre- 15 metre arası derinliklerdeki deprem spektrumları

Figure 4. Earthquake spectra at depths between 30 - 15 meters



Şekil 5. 10 metre – yüzey arası derinliklerdeki deprem spektrumları

Figure 5. Earthquake spectra at depths between 10 meters and surface

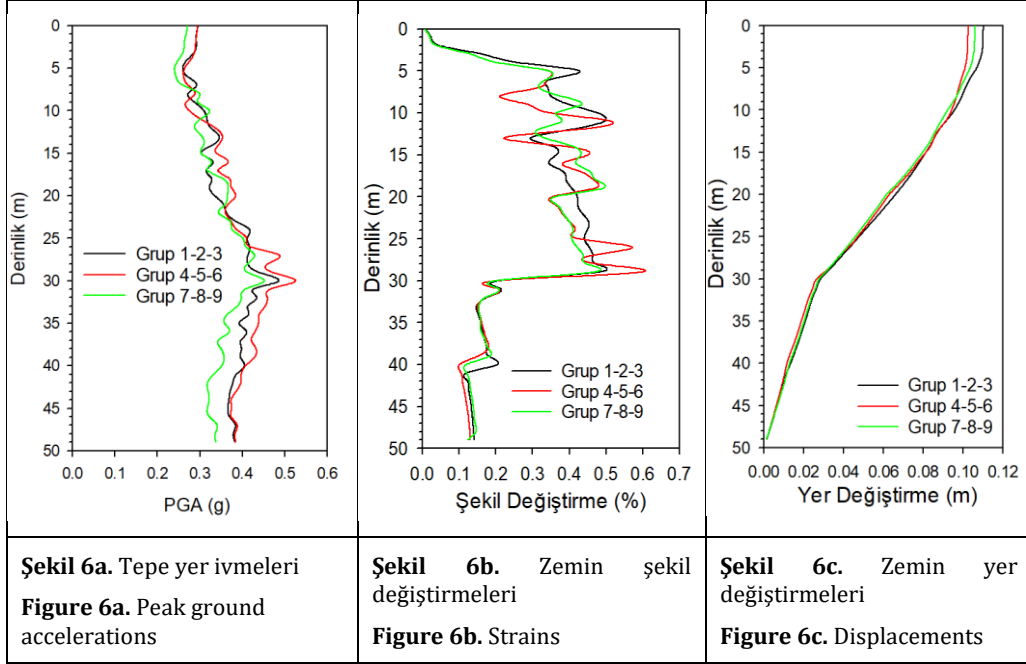
Deprem spektrumlarının yönetmelikler hakimiyetinde değil doğrudan modül azalım ve sönüm eğrilerine göre değerlendirilmesi amacıyla, derinliğe bağlı spektrumlarda, TBDY-2018 ve ASCE 7-22'de belirtildiği üzere her periyot için yerel zemin etki katsayısı (yüzeysel spektral ivmesi/tabana kayası spektral ivmesi) belirlenmesi ve ASCE 7-22'deki ivme periyotlarının belirlenmesi ile sahaya özel tasarım spektrumları oluşturulması yaklaşımları kullanılmamıştır ve spektrumlar analiz sonuçlarında ham olarak sunulmuştur [13, 14]. Ayrıca Türkiye deprem tehlike haritası (TDTH) spektrumuna ait her periyottaki ordinat değerlerinin (ivmelerin), sahaya özel spektrumdaki her periyoda karşılık gelen ivmelerden küçük alınmama şartı (ZF sınıfı için %90'dan küçük) spektrum davranışlarının tüm periyotlarda elastik olarak sabitlenmesinin engellenmesi ile daha hassas değerlendirme imkanı oluşması amacıyla uygulanmamıştır, Sonuçlarda killi zeminlere ait modül azalım ve sönüm eğrilerinin spektrumlar üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek kadar düşük olması nedeniyle sonuçlar analiz grubu 1-2-3, 4-5-6 ve 7-8-9 olarak 3 parça halinde verilmiştir. Yapılan analizlere ait derinliğe bağlı deprem spektrumları değerlendirildiğinde, 50-45 metre derinlikleri arasında kısa periyot bölgesinde ($T=0.20-0.36s$ arası) tüm gruplar için maksimum ivmeler oluşmuştur. Bu bölgedeki ivmelerin analiz grupları arasında karşılaştırılması yapıldığında analiz grubu 4-5-6'nın en yüksek, analiz grubu 1-2-3'ün en düşük ivmelere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz gruplarında 40 metre derinlikte düzensizlikler gözlemlenmiş ve düşük deformasyonların düzeltilmesi için kullanılan Groholski vd. [22] tarafından önerilen doğrusal olmayan analiz düzeltme parametrelerine ait katsayıların da aynı derinlik için düzensiz olduğu analiz girdilerinde tespit edilmiştir. Bu düzensizlik 40 metre derinlikteki zemin mukavemeti ve kayma dalgası hızlarındaki ani değişim ile ilişkilidir (Şekil 1). 39-33 metre derinlikleri arasında maksimum ivmeler, kısa periyot bölgesinde ($T=0.26-0.30s$ arası) gözlemlenmeye devam etmiştir. Analiz grupları ivme büyüklükleri sıralaması, 50-41 metre derinlikleri arasındaki ivme büyüklükleri sıralaması ile benzerlik göstermektedir.

Analizlerde kayma dalgası hızı değişiminin gerçekleştiği 33 metre derinliğinde, 40 metre derinlikte oluşan düzensizliğe benzer bir düzensiz davranış gözlemlenmiştir. 33-14 metre

derinlikleri arasında 50-33 metre derinlikleri arasında oluşan ivme tepesine ek olarak çok düşük periyotlarda ($T = 0.023-0.025s$ arası) başka bir ivme tepesi oluşmuştur fakat bu periyot aralığı yapıların tasarım sürecinde oldukça istisnai olarak değerlendirilebilecek bir periyot aralığıdır ve göz ardı edilebilir. Oluşan istisnai ivme tepesinin davranışı ise değerlendirilen analiz grupları arasında farklılıklar göstermiştir. Düşük periyotlarda oluşan tepe, Grup 7-8-9'da 29 metre derinlikten itibaren maksimum ivmenin olduğu tepe haline gelmiştir, Grup 1-2-3 ve Grup 4-5-6 için ise 33 metre derinlikte oluşan 2. tepe ivmeleri diğer grupların aksine ilk tepe ile yakın ivme değerlerine gelse dahi, ilk ivme tepesindeki ivme değerlerini geçmemiştir. Bu davranış Şekil 5'te verilen 20 metre derinliğe ait spektrumlarda görülmektedir.

15-5 metre derinlik aralığında tüm modeller için oluşan ikinci tepe küçülmüştür ($T=0.023-0.025s$) ve bunun yanında ilk tepenin gözlemlendiği periyot ($T=0.2-0.3s$) tekrar değiştirilerek hâkim tepe periyodu haline almıştır. Pehlivan vd. [24]'te kayma dalgasındaki geri dönüşlerin (azalmanın) 0.1 s periyodun altındaki tepki spektrumunu küçülttüğü belirtilmiştir ve bahsedilen küçülme bu çalışmada da gerçekleşmiştir. Ayrıca aynı derinliklerde tüm gruplar için hız hakimiyet bölgesinde ($T=1.3-1.6s$) ivme değerlerinde yükselmeler gerçekleşmiştir. Hız hakimiyet bölgesindeki yükselen ivmeler Şekil 5'te 5 metre derinlik için verilen spektrumlarda da gözlemlenebilir. 7 metre derinlikten itibaren killi bölgeye geçilmiştir. Düşük derinlikteki killere ait modül azalım ve sönüm eğrilerinin davranışlarındaki uyum nedeniyle deprem spektrumları bu bölgede birbirlerine benzeme eğilimine girmişlerdir. Hız bölgesinde ve çok düşük periyotlarda oluşmuş olan 2. tepe ivmeleri killi zeminde sönümlenmiştir. Baskın tepenin gözlemlendiği periyot ise 0.47-0.50s aralığına gelmiştir. Genel olarak Grup 7-8-9 diğer eğriler ile 50-20 metre arası uyumsuzluklar gösterirken, diğer gruplar birbirleri ile paralel ivme davranışlarına sahiptirler.

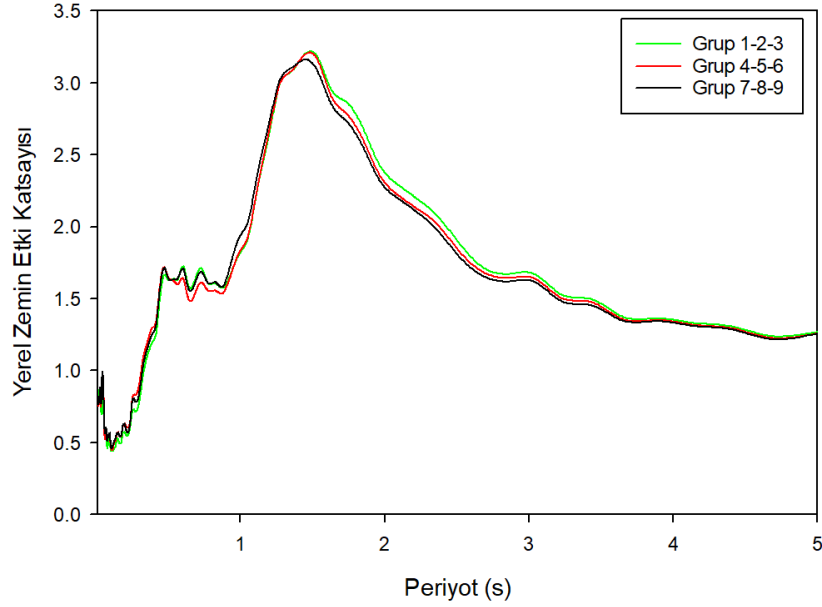
Derinliğe bağlı tepe yer ivmeleri (PGA) Şekil 6a'da gösterilmiştir. Zemine ait yer değiştirmeler Şekil 6b'de ve kazık, boru vb. altyapı elemanlarının tasarımında kullanılan kalıcı yer deformasyonları Şekil 6c'de üzerinde farklı analiz grupları için gösterilmiştir.



Diğer analiz çıktıları ile benzer olarak gruplardaki modül azalım ve sönüm eğrilerinin etkisi killi zeminler için sınırlı kalmıştır ve bu nedenle killer için oluşturulan gruplar, tek bir grup halinde sunulmuştur. Şekil 6a'da verilen maksimum yer ivmeleri incelendiğinde grup 7-8-9'un daha düşük ivme değerlerine sahip olduğu, grup 1-2-3 ve 4-5-6'nın ise birbirine yakın ivmelerde hareket ettiği ve yüzeyde en büyük ivme değerlerinin neredeyse eşitlendiği tespit edilmiştir. Şekil 6b'deki şekil değiştirmeler değerlendirildiğinde, incelenen zemin profilinin diğer kısımlarına göre sağlam olarak nitelendirilebilen 50-30 metre derinlikleri arasında ve kil olarak belirlenen 8-0 metre derinlikleri arasında 9 analiz grubu sonuçları birbirine yakın elde edilmiştir. Geriye kalan derinliklerde ise şekil değiştirmeler düzensiz bir şekilde değişmektedir. Farklı modül azalım ve sönüm eğrilerinin kullanılması, analiz gruplarında derinliğe bağlı yer değiştirmelerde ihmal edilebilir düzeyde değişiklik göstermektedir (Şekil 6c).

Deprem sahaya özel spektrumları ile tasarım spektrumu oluşturmak için yönetmeliklere göre farklı yaklaşımlar, sınırlamalar ve tasarım hedefleri göz önüne alınmaktadır. Yer tepki analizinde sahaya özel tasarıma geçebilmek için TBDY-2018'e göre yer tepki analizleri kullanılarak yerel zemin etki katsayısı belirlenmeli ve katsayılar mühendislik anakayası spektral ivmesi ile her periyotta çarpılmalıdır. Tasarım spektrumlarının oluşturulmasında Şekil 5'te verilen yüzey spektrumlarının, Şekil 3'te verilen anakaya girdi spektrumlarına her periyot için oranı ile elde edilmiş yerel zemin etki katsayıları kullanılmıştır. Belirlenen katsayılar analiz grupları için Şekil 7'de verilmiştir.

Yerel zemin etki katsayıları karşılaştırıldığında $T < 0.5$ s bölgesinde tüm eğriler yakın yerel zemin etki katsayılarına sahiptir. $0.5 < T < 1.0$ s bölgesinde grup 4-5-6 diğer gruplara kıyasla daha düşük katsayılara sahiptir. $T > 1.5$ s bölgesinde ise grup 7-8-9 düşük, 1-2-3 yüksek katsayı değerlerini oluşturmuştur.



Şekil 7. Yerel zemin etki katsayıları

Figure 7. Average surface-to-base response spectral ratios

4. Tartışma ve Sonuç

Modül azalım ve sönüm eğrilerinin yüzey bölgesindeki killi zeminlerde etkileri oldukça düşüktür.

Seed ve Idriss'e [1] ait çalışmada çok düşük periyotlarda ($T=0-0.05s$), yüksek ivmeler gözlenmiştir. Fakat sadece istisnai yapılar bu periyotlara sahiptir. Çok düşük olan bu periyotlardaki değerlendirmeler yerine, daha yaygın periyotlara sahip yapılar göz önüne alındığında yüzeyde en yüksek ivmeleri veren modül azalım ve sönüm eğrilerinin ivmeye bağlı tasarım için sırasıyla, Seed ve Idriss [1], Roblee ve Chiou [9] ve Darendeli [5] olduğu belirlenmiştir.

Boru, kazık vb., zemin yer değiştirmeleri ile doğrudan ilişkili olan yapılarda killi zeminler ve dayanımı nispeten yüksek ($V_s > 300$ m/s) kumlu zeminler için modül azalım ve sönüm eğrilerinin etkisi göz ardı edilebilir. Dayanımı daha düşük ($V_s < 300$ m/s) kumlu zeminlerde ise Seed ve Idriss [1] en yüksek yer değiştirmeleri vermektedir. Fakat bu yer değiştirmeler birbirine çok yakın olduğu için modül azalım ve sönüm eğrilerini etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Sonuçlarda verilen modül azalım ve sönüm eğrilerine ait düşük gerilmeler altındaki deformasyonların, Groholski ve diğ. [22]'a göre düzeltilmesi nedeniyle bu çalışma kapsamındaki bulgular aynı düzeltmelerin yapıldığı nümerik çözümler için geçerlidir. Düzeltme işlemleri gerçekleştirilmeden yapılan analizlerde belirlenen değerlerin birbiri ile benzerliklerinin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

Seed ve Idriss [1]'e ait eğrilerde 50 metre derinlik için üst sınırdaki değerler kullanılmış ve daha büyük derinlikler için çözümleme yapılmamıştır. Fakat Seed ve Idriss [1]'e ait üst sınırın, deney gerilmeleri dahilinde 2 atm'lik efektif gerilmeye karşılık gelmesi sebebiyle analizin derinliğinin artırılması sonucunda Seed ve Idriss [1]'e ait sonuçların diğer eğri sonuçlarından ayrılması beklenmektedir.

İncelenen durumlar değerlendirildiğinde kumlu zeminlerde Roblee ve Chiou [9] ve Darendeli [5] tek boyutlu yer tepki analizi için önerilen dinamik davranış yaklaşımıdır. Killi zeminlerde ise dinamik davranış eğrileri seçiminin sonuçlar üzerindeki etkilerinin yüzeyde sınırlı olması nedeniyle ilk 10 metrelik derinlik için tüm eğriler kullanılabilir kabul edilmiştir.

5. Discussion and Conclusion

The effects of modulus reduction and damping curves in clayey soils in the surface area are quite low.

In the study of Seed and Idriss [1], high accelerations were observed in very low periods ($T=0-0.05s$). But only exceptional structures have these periods. Considering the structures with more common periods, instead of the evaluations in these periods, which are very low for the acceleration-dependent design, it has been determined that the modulus reduction and damping curves that provide the highest accelerations on the surface are Seed and Idriss [1], Roblee and Chiou [9] and Darendeli [5], respectively.

The effect of modulus reduction and damping curves can be ignored for clayey soils and sandy soils with relatively high strength ($V_s > 300$ m/s) in structures that are directly related to ground displacements such as pipes, piles, etc. Seed and Idriss [1] give the highest displacements in sandy soils with lower strength ($V_s < 300$ m/s). However, since these displacements are very close to each other, the effect of the modulus reduction and damping curves is generally negligible.

Since the deformations under low stresses of the modulus reduction and damping curves given in the results are corrected according to Groholski et al. [22], the findings within the scope of this study are valid for numerical solutions with the same corrections. It has been observed that the similarity of the values determined in the analyzes made without performing the correction procedures has decreased to a great extent.

In the curves of Seed and Idriss [1], the upper limit values were used for 50 meters depth and no analysis was made for larger depths. However, since the upper limit of Seed and Idriss [1] corresponds to an effective stress of 2 atm within the test stresses, it is expected that the results of Seed and Idriss [1] will be separated from the other curve results if the depth of analysis is increased.

Considering the examined cases, Roblee and Chiou [9] and Darendeli [5] are suggested as shear modulus reduction and damping ratio curves in sandy soils. For clay soils, all curves are considered usable for the first 10 meters of depth since the effects of the choice of dynamic

behavior curves on the results are limited at the surface.

6. Teşekkür

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (PAUBAP) tarafından 2022FEBE016 nolu proje ile desteklenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] Seed, H. B., Idriss, I. M. 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. Report No.EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- [2] Hardin, B. O., Drnevich, V. P. 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects Terzaghi Lecture.J. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Cilt. 98, s. 603-624. DOI:10.1061/JSFEAQ.0001756
- [3] Vucetic, M., Dobry, R. 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. Journal of Geotechnical Engineering, Cilt. 117(1), s. 89-107. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89)
- [4] Ishibashi, I., Zhang, X. 1993. Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay. Soils and Foundations, 33(1), 182-191. DOI: 10.3208/sandf1972.33.182
- [5] Darendeli, M. B. 2001. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves. Texas University, Doktora Tezi, 362s, Austin, Texas.
- [6] Tao, Y., Rathje, E. 2020. Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 128, 105865. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105865
- [7] Kumar, S. S., Dey, A., Krishna, A. M. 2018. Importance of site-specific dynamic soil properties for seismic ground response studies: ground response analysis. International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE), 9(1), 78-98. DOI: 10.4018/IJGEE.2018010105
- [8] Zhang, J., Andrus, R. D., Juang, C. H. 2005. Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(4), s. 453-464. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(453)
- [9] Roblee, C., Chiou, B. 2004. A Proposed Geoindex Model for Design Selection of Non-linear Properties for Site Response Analysis. In International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, Mart, PEER Headquarters, UC Berkeley, s. 18-19.
- [10] Gürsoy, H., Piper, J. D. A., Tatar, O. 2003. Neotectonic Deformation in the Western Sector of Tectonic Escape in Anatolia: Palaeomagnetic Study of the Afyon Region, Central Turkey. Tectonophysics, Cilt. 374, 57-79. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00346-9
- [11] Ulutürk, Y., 2009. Ömer-Gecek (Afyonkarahisar) Dolayının Jeolojisi ve Suların Kökensel Yorumu. Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 179s, Isparta

- [12] Basaran, C., Yildiz, A., Duysak, S. 2020. Hydrochemistry and Geological Features of a New Geothermal Field, Bayatlık (Afyonkarahisar / Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, Cilt. 165, s. 103812. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103812
- [13] TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Tarih ve 30364 Sayılı Resmî Gazete, 395s.,
- [14] ASCE 2022. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE 7, Reston, VA.
- [15] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> (Erişim Tarihi: 21.08.2021)
- [16] Atik, L. A., Abrahamson, N. 2010. An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, *Earthquake Spectra*, Cilt.26(3), s. 601-617. DOI: 10.1193/1.3459159
- [17] Kwok, A. O., Stewart, J. P., Hashash, Y., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., Yang, Z. 2007. Use of Exact Solutions of Wave Propagation Problems to Guide Implementation of Nonlinear Seismic Ground Response Analysis Procedures. *J. Geotech. & Geoenviron. Engrg.*, 133(11), 1385-1398. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:11(1385)
- [18] Idriss, I. M., Seed, H. B. 1968. Seismic Response of Horizontal Soil Layers, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Cilt. 94, No. SM4, s. 1003-1031. DOI: 10.1061/JSFEAQ.0001163
- [19] Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D. 2020. DEEPSOIL 7, User Manual. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, s. 170
- [20] Kakkalamos, J., Bradley, B. A. 2018. Challenges in predicting seismic site response with 1D analyses: Conclusions from 114 KiK-net vertical seismometer arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A), 2816-2838. DOI: 10.1785/0120180062
- [21] Phillips, C., Hashash, Y.M.A. 2009. Damping Formulation for Nonlinear 1D Site Response Analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Cilt. 29 (2009), s. 1143-1158. DOI: 10.1016/j.soildyn.2009.01.004
- [22] Groholski, D. R., Hashash, Y. M. A., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., & Stewart, J. P. 2016. Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Cilt. 142(9), s. 4016042. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001496
- [23] Aaqib, M., Sadiq, S., Park, D., Hashash, Y. M., & Pehlivan, M. (2018). Importance of implied strength correction for 1D site response at shallow sites at a moderate to low seismicity region. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Seismic Hazard Analysis, Earthquake Ground Motions, and Regional-Scale Assessment* (pp. 445-453). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/9780784481462.043
- [24] Pehlivan, M., Hashash, YMA., Harmon, JA., Rathje, EM., Stewart, JP., Silva, SJ., Campbell, KW., Nikolaou, S 2015. Influence of shear wave velocity reversals on one-dimensional site response of spatially varied profiles. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November, New Zealand