DERİN ALÜVYON DOLGUNUN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ EŞDEĞER LİNEER VE DOĞRUSAL OLMAYAN YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

B. Unutmaz[1], B. Siyahi[2], Y. Fahjan[3], B. Akbaş[3]

[1]*Yrd. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
[2] *Prof. Dr., Deprem ve Yapı Müh. Anabilim Dalı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli*
[3] *Doç. Dr., Deprem ve Yapı Müh. Anabilim Dalı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli*
Email: berna.unutmaz@kocaeli.edu.tr

ÖZET:

Zeminler maruz kaldıkları dinamik yüklemeleri (özellikle depremler sırasında) üst yapılara kendi özelliklerine bağlı olarak farklı şekillerde iletebilirler. Zemin profilinde yer alan farklı zemin yapıları, depremin kendi frekans özelliklerine de bağlı olarak, tekrarlı yüklerin (genellikle deprem yükleri) büyütülmesine (amplifiye olmasına) ya da küçülmesine (de-amplifiye olmasına) yol açabilir. Zemin yüzeyi üzerinde kaydedilen yer hareketleri, mevcut derin ve yumuşak alüvyon tabakalarının deprem sırasında gösterdiği doğrusal olmayan (nonlineer) davranış konusuna açıklık getirebilmektedir. Literatürde rastlanan bu tür örneklere çalışmada ele alınan saha profili oldukça iyi bir örnek teşkil etmekte, taban kayasındaki davranışı "de-amplification" yaparak yüzeyde küçültebilmektedir.
Çalışmada derin alüvyon bir sahada daha önce yapılan sondaj ve jeofizik deneylerden elde edilen verilerle idealize zemin profili hazırlanmıştır. Bu zemin profilinin öncelikle bir boyutlu eşdeğer lineer yöntemle 1-D zemin tepki analizi, SHAKE2000 (2009) yazılımı ile yapılmıştır. Çalışmada deprem kayıtları olarak bölgenin sismotektonik yapısına uygun olarak mevcut veri tabanından (Peer NGA Veri Bankası; 2006) 4096 adet yer hareketi kullanılarak seçilen 12 adet deprem kaydı (deprem moment büyüklüğü, M_W=6.6 – 7.5 arasında olan ve Zemin Sınıfı B olan deprem yer hareketleri) kullanılmıştır. Daha sonra, aynı zemin profili üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile doğrusal olmayan analiz yapan, FLAC-3D programında modellenmiştir. Zeminden beklenen doğrusal olmayan davranış her iki analizde de farklı biçimlerde gözlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Doğrusal Olmayan Zemin Davranışı, Eşdeğer Lineer Analiz, Sonlu Farklar

1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında, İzmir ili, Karşıyaka ilçesinde bulunan bir bölgede, sismik tehlike analizleri yapılmış ve bina temeli seviyesinde yer hareketi değerleri belirlenmiştir. Bu amaçla, mevcut geoteknik etütler ve jeofizik çalışmalar kullanılarak, ideal bir zemin profili oluşturulmuştur. Bir sonraki aşama olarak bu bölgede ve zemin koşulunda gerçekleşmesi muhtemel deprem senaryoları belirlenmiş ve kriterlere uygun 12 adet deprem kaydı seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtları kullanılarak, önceden geliştirilmiş zemin profilinde 1 ve 3 boyutlu zemin tepki analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. İDEALİZE ZEMİN PROFİLİ

2.1. Mevcut arazi ve laboratuvar deneyleri

Proje sahasında geniş kapsamlı zemin etüt çalışmaları yapılmıştır ve çok sayıda geoteknik ve jeofizik deneyler mevcuttur. Bu çalışmalarda açılan sondaj kuyularında plastik olmayan silt ve kumun hakim olduğu, bazı sondaj kuyularında plastik silt ve killere rastlandığı görülmektedir. Mevcut tabakaların üst seviyelerde çok gevşek veya çok yumuşak olabildiği, derinlere doğru gevşek, orta sıkılıkta veya yumuşak kıvamda oldukları gözlenmiştir. İTÜ (2008) raporunda sahada hakim genel zemin profili çıkarılmış, zemin yüzeyinden 4.0m ile 10.0m arasındaki gevşek-orta sıkı siltli kum tabakalarda sıvılaşma potansiyeli bulunmuştur. Bu çalışmada, derin temel sistemi için yerel zemin sınıfı Z3 olarak alınabileceği ifade edilmiştir.

Ege Temel Sondajcılık tarafından hazırlanan *Zemin ve Temel Etüt Raporu*'nda (2011) ise toplam uzunluğu 600 m olan 12 adet sondaj yapılmıştır. 1 adet 60 m derinliğinde sondaj kuyusu açılmış ve 50 m derinliğe kadar her 3.0 m'de bir pressiyometre deneyleri yapılmıştır. Sondajlar sırasında SPT deneyleri, ayrıca sahada 10 adet sismik kırılma, 9 adet rezistivite ve 9 adet mikrotremor ölçümü yapılmıştır. Bütün bu çalışmalardan sahada yüzeyden itibaren 3 m ile 7 m arasında bir dolgu tabakası, yaklaşık 25 m derinliğe kadar gri renkli kil, silt kum ardalanmalarından oluşan denizel kökenli alüvyon birimler, bunu takiben çakıllı kumlu kil tabakalarından oluşan karasal alüvyon tabakaların yer aldığını belirtmişlerdir. Yine aynı sahada daha önce yapılan çalışmalarda da toplam 1160 m sondaj yapılmış olup, 9 adet CPT, metan gazı analizleri ve 6 adet sismik kırılma ve 9 adet rezistivite ölçümü, 5 noktada mikrotremor ölçümleri mevcuttur (Ege Temel, 2008).

İnceleme alanında yapılan geoteknik değerlendirmelerin sonucunda 4.50 m – 10.50 m, 13.0 m – 14.0 m, 19.40 m – 23.0 m arasında sıvılaşma riski olduğu belirtilmiştir. Sahada yapılan tüm çalışmalar değerlendirildiğinde inceleme alanının hakim zemin cinsi olarak Kuaterner yaşlı alüvyonlar (Qa) birimi belirlenmiştir. Mevcut çalışmalardan yapılan genel değerlendirme sonucunda inceleme alanının temel zemin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden itibaren 3.0 m derinlikte yer almaktadır. Üst 50 m'lik zemin tabakası için zemin hakim periyotu 0.92 s olarak hesaplanmıştır (ELC, 2011) .

Tablo 1. Analizlerde kullanılan dinamik zemin özellikleri

Derinlik (m)	Zemin Tipi	γ (kN/m^3)	V_s (m/s)	G (MPa)	μ	E (MPa)	Modül Azalım	Sönümlenme
0 – 7	Dolgu	17	120	24	0.35	66	Seed vd. 1984, Kum, σ'<1.0 atm	Seed&Idriss, 1970, Üst Sınır
7 – 21	SM	17	130	29	0.35	78	Seed vd. 1984, Kum, 1<σ'<3 atm	Seed&Idriss, 1970, Ortalama
21 – 43	GC	19	325	201	0.35	542	Seed vd. 1984, Çakıl, Ortalama	Seed vd. 1984, Çakıl, Ortalama
43 – 60	CL	19	350 – 450	274	0.30	713	Vucetic&Dobry, 1991, PI=15	Vucetic&Dobry, 1991, PI=15
>60	Anakaya	20	500	500	0.35	1350	Schnabel, 1973 Kaya	Schnabel, 1973 Kaya

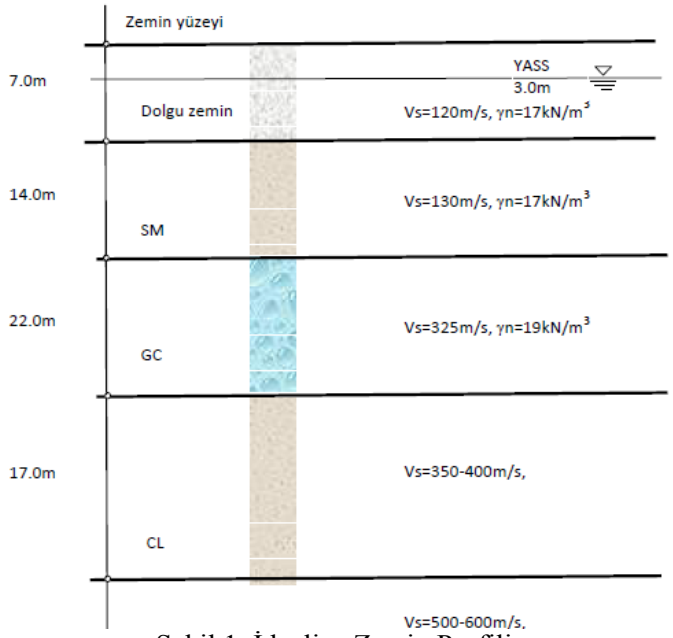
3. 1 BOYUTLU ZEMİN TEPKİ ANALİZLERİ

Deprem tehlikesine maruz bölgelerde, zeminlerde sahaya özel dinamik tepkileri (deprem sırasında oluşacak maksimum ivme, maksimum deformasyon, yüzeydeki ivme–zaman kayıtları vb.) tahmin edebilmek gerekmektedir. Farklı zemin grupları, maruz kaldıkları tekrarlı yükleri üst yapılara farklı şekillerde iletirler.

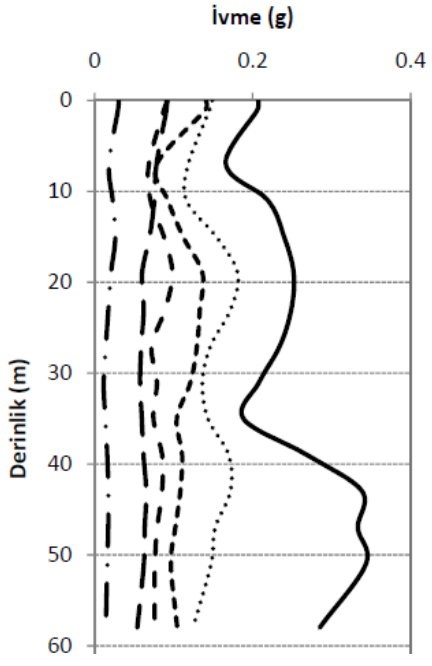
Zemin kesitlerindeki değişiklikler, frekans özelliklerine bağlı olarak, bu tekrarlı yüklerin (genellikle deprem yükleri) büyütülmesine (amplifiye olmasına) ya da küçülmesine (de-amplifiye olmasına) yol açabilir. Bu büyüme ve küçülmeler, zemin yüzeyinde farklı ivme–zaman değerlerine ve dolayısı ile farklı tepki spektrumlarının elde edilmesine sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında İzmir ili, Karşıyaka ilçesinde bir bölgede bulunan bir inşaat sahasına ait idealleştirilmiş zemin profili için zemin tepki analizleri yapılmıştır.

Üst yapı açısından çok fazla değişiklik getirmeyecek olan serbest zemin yüzeyi yer hareketi, temel altında mevcut derin ve yumuşak alüvyon tabakalarının olası deprem sırasında göstereceği doğrusal olmayan (nonlineer) davranış konusuna açıklık getirmektedir. Deprem yükleri bazı koşullarda üst yapının doğrusal olmayan davranış göstermesine neden olabildiği gibi, derin ve yumuşak zemin tabakalarının da doğrusal olmayan davranış gösterebilmesine sebep olabilmektedirler. Literatürde rastlanan bu tür örneklere çalışma sahası da oldukça iyi bir örnek teşkil etmekte, taban kayasındaki davranışı "de-amplification" yaparak yüzeyde küçülmektedir. Zemin tepki analizlerinde, ana kayadan gelen deprem hareketi çeşitli yöntemler kullanılarak, zemin yüzeyine iletilir, yani titreşimlerin farklı zemin tabakaları içerisinde yayılmaları modellenir. Bu modellemeler sonlu elemanlar, sonlu farklar gibi gelişmiş yöntemler ile yapılabileceği gibi, bir boyutlu (1D) eşdeğer doğrusal ya da doğrusal olmayan sayısal yöntemler ile de yapılabilir. Bu modellemeler sonucunda, mühendisler için gerekli olan, zemin yüzeyinde meydana gelen titreşimler (ivme–zaman değerleri) ve sonucu olarak da tepki spektrumu elde edilebilir. Zemin tepki analiz yöntemi olarak eşdeğer doğrusal analiz yöntemi seçilmiştir.

Analizler SHAKE2000 (2009) yazılımı yapılmıştır. Çalışmada idealleştirilmiş zemin profili sahada yapılan jeofizik deneylerden ve sondaj çalışmaları değerlendirilerek oluşturulmuştur. Tablo 1'de genel özellikleri verilen idealize zemin profili, ayrıca Şekil 1'de sunulmuştur.



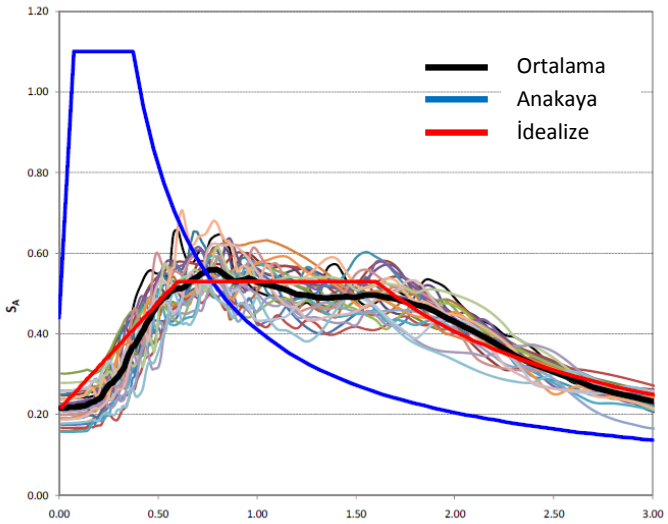
Şekil 1. İdealize Zemin Profili



Şekil 2. Çalışma Sahasında Derinliğe Bağlı İvme Genliklerinin Değişimi

Ana kaya seviyesi deprem yer hareketi olarak, bölgenin sismotektonik yapısına uygun olarak 4096 adet yer hareketi (PEER, 2006) arasından seçilen 12 adet deprem kaydı (deprem moment büyüklüğü, M_W=6.6 – 7.5 arasında olan ve Zemin Sınıfı B olan deprem yer hareketleri) kullanılmıştır.

Yapılan eşdeğer doğrusal analiz hesaplama açısından uygun olmasına ve pek çok problemde makul sonuçlar vermesine rağmen zemin tepkisinin doğrusal olmayan gerçek davranışını yaklaşık olarak veren bir yöntemdir. Sahadaki zemin tabakalarında derinliğe bağlı ivme genliklerinin değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden açıkça görülebildiği gibi zemin tabakaları anakayadan kendisine iletilen değişik deprem yer hareketlerini aynı eğilimi göstererek yüzeye doğru küçültmektedirler. Yapılan analizler sonucu temel seviyesi için elde edilen ortama ivme spektrumu, ana kaya seviyesindeki ivme spektrumu ile birlikte verilmiştir (Şekil 3). Şekil 3'den görüleceği gibi, temel seviyesindeki ivme spektrumunun plato değeri 0.5-1.8 saniye arasında değişmektedir, fakat ivmelerde beklenildiği gibi ciddi bir düşüş (de-amplification) vardır.



Şekil 3. Ana Kaya ve Temel Seviyesindeki Ortalama İvme Spektrumu

4. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ

Bu çalışma için spektrum uyumlu deprem yer hareketlerinin seçilmesinde İYBDY(2008)'de belirtilen kurallar aşağıdaki gibi uygulanmıştır:

a) Deprem yer hareketlerinin seçilmesinde PEER NGA Veri Bankası (PEER, 2006) (4096 adet yer hareketi) kullanılmıştır.

b) Deprem moment büyüklüğü, M_W=6.6 – 7.5 arasında olan ve Zemin Sınıfı B olan deprem yer hareketleri seçilmiştir.

c) Seçilen deprem yer hareketlerinin fay hattına en yakın mesafesi 1 km – 96 km arasında değişmektedir.

d) Bu çalışma kapsamında yapılacak olan yüksek katlı binaların periyotları 0.8 – 1.5 s aralığında tahmin edilmiştir. Buna göre, seçilen deprem yer hareketlerinden elde edilen bileşke spektrumun D2 deprem düzeyi için 0.2 s – 2.5 s periyotları arasındaki genlikleri İYBDY'ne (2008) uygun olarak ölçeklendirilmiştir (Fahjan, 2008).

e) Ölçeklendirilen deprem hareketleri içerisinden Deprem Tasarım Spektrumları'na en uygun olan 12 kayıt seçilmiştir.

f) Tüm tasarım spektrumları ve Bileşke spektrumlar, %5 sönüm oranı için elde edilmiştir.

g) Bileşke spektrum, deprem yer hareketinin iki bileşenine ait spektrumların karelerinin toplamının karekökü alınarak elde edilmiştir.

Deprem yer hareketinin zaman tanım alanındaki spektrum-uyumlu simülasyonları için yapılan analizlerde, Lilhanand ve Tseng (1987) tarafından zaman tanım aralığı için önerilmiş yöntem kullanılarak geliştirilmiş bir yazılım olan RSPMATCH (Abrahamson, 1998) programı tercih edilmiştir. Zaman tanım alanında çalışan bu yöntemde spektrum uyumlu yer hareketinin elde edilmesi için sonlu süreli dalgacık (wavelet) eklenmesi veya çıkarılması ile hedef spektruma uyumlu deprem kayıtları üretilmektedir. Bu yaklaşımla elde edilen kayıtların hedef spektruma oldukça yakın ve uyumlu olduğu görülmektedir. Dalgacıkların oluşturulması için RSPMATCH (Abrahamson, 1998) yazılımında iki model kullanılmaktadır. Bu temsili iki dalgacık modellerinin birincisi "zamanda tersinirilmiş tek dereceli sistem darbe davranış ivmesi" ikincisi ise "filtrelenmiş kosinüs dalgası" yöntemidir. Uygulanan her iki dalgacık modeli sonucunda istenilen frekans içeriğinde en büyük ivme değerlerine göre faz içeriğinde önemli bir değişiklik olmadan yer hareketleri elde edilebilmektedir. Çalışmada ilk olarak, PEER NGA Veri Bankasından (PEER, 2006) elde edilen 4096 adet yer hareketi kaydı incelenerek istenilen özelliklere sahip yer hareketi kayıtları seçilmiştir. Daha sonra seçilen kayıtlar RSPMATHC (Abrahamson, 1998) programı kullanılarak yukarıda belirtilen şartları sağlayan 12 adet yer hareketi kaydı belirlenmiştir.

İstenilen koşullara sahip 12 deprem yer hareketi kayıtları Tablo 2'de sunulmuştur. Bu tabloda seçilen kayıtların özellikleri, hangi tip zeminde gerçekleştikleri bulunmaktadır. Tablodan da anlaşılacağı üzere genellikle B sınıfı zemin üzerinde gerçekleşen deprem hareketleri seçilmiştir.

Tablo2. Seçilen yer hareketlerinin karakteristik özellikleri

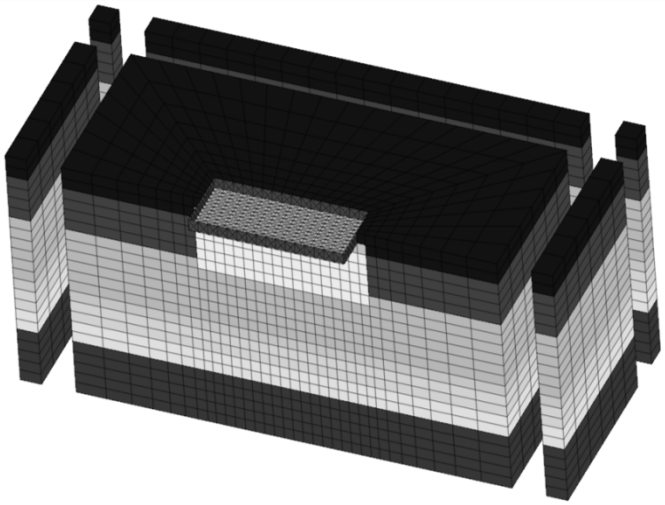
Deprem	M_w	Fay Mek.*	İstasyon	Bileşen (H1)	Bileşen (H2)	Epicentral Uzaklık (km)	En Kısa Uzaklık	Zemin (NEHRP)
Kobe, Japan	6.90	SS	Kobe University	KBU000	KBU090	25.40	0.92	B
San Fernando	6.61	R	Pacoma Dam	PUL164	PUL254	11.86	1.81	A
Tabas, Iran	7.35	R	Tabas	TAB-LN	TAB-TR	55.24	2.05	B
Loma Prieta	6.93	R – O	Los Gatos-Lexington D.	LEX000	LEX090	20.35	5.02	B
Northridge-01	6.69	R	Pacoima Dam (DS)	PAC175	PAC265	20.36	7.01	A
Northridge-01	6.69	R	Pacoima Dam (US)	PUL104	PUL194	20.36	7.01	A
Loma Prieta	6.93	R – O	Gilroy Array #1	G01000	G01090	28.64	9.64	B
Northridge-01	6.69	R	Vasquez Rocks Park	VAS000	VAS090	38.07	23.64	B
Northridge-01	6.69	R	LA-Griffith Park Obs.	0141-270	0141-360	25.42	23.77	B
Loma Prieta	6.93	R – O	SF-Pacific Heights	PHT270	PHT360	96.34	76.05	B
Kocaeli, Turkey	7.51	SS	İzmit	IZT180	IZT090	5.31	7.21	B
Kocaeli, Turkey	7.51	SS	Gebze	GBZ000	GBZ270	47.03	10.92	B

SS: Yanal Atımlı, R: Ters Atımlı, O: Eğri

5. 3 BOYUTLU SAYISAL MODEL

Bu çalışmanın ikinci bir ayağı olarak, bir boyutlu SHAKE2000 programı ile analizi yapılan zemin profili, üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile doğrusal olmayan analiz yapan, FLAC-3D programında modellenmiştir. Böylece zemin üzerine ya da içerisine yapılması planlanan yapıların da bu üç boyutlu modelin üzerinde modellenebilmesinin yolu açılmıştır.

Üç boyutlu modellemede, bütün zemin tabakalarının yatay olduğu varsayılmış ve Tablo 1'de verilen zemin özellikleri kullanılmıştır. Şekil 4'de FLAC-3D programında hazırlanan üç boyutlu model sunulmuştur.

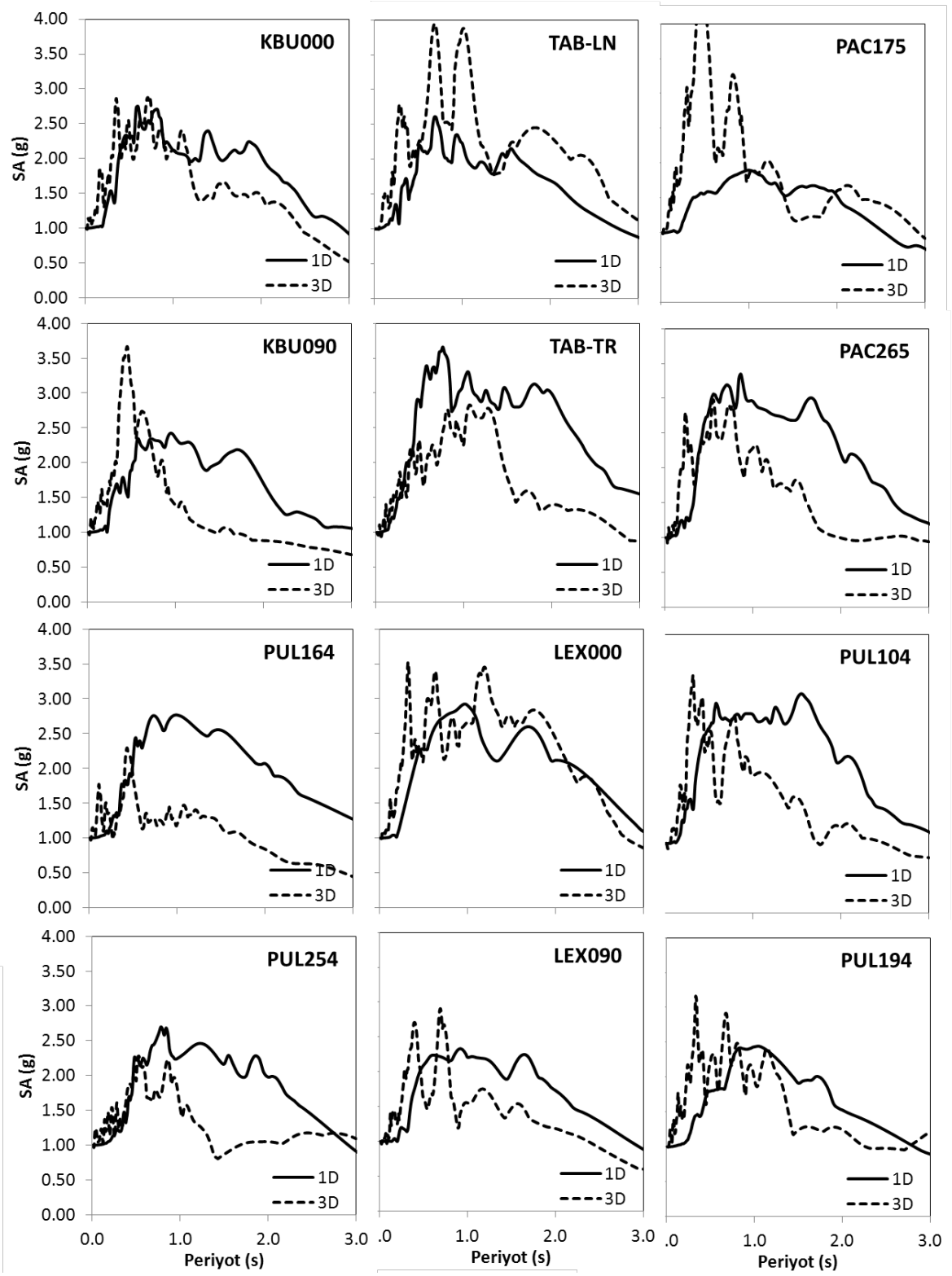


Şekil 4. Üç boyutlu sayısal model

Bu analizlerde Mohr-Coulomb zemin modeli seçilmiştir. Dinamik durumda sınır koşulları olarak, free field opsiyonu seçilmiş ve böylece model köşelerinde oluşacak etkilerin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bir boyutlu analizlerde olduğu gibi 12 adet deprem kaydı ile yapılan dinamik analizlerde yer hareketi ana kaya seviyesinden verilmiş ve sonuçları spektral ivme grafikleri cinsinden yine bir boyutlu analizler ile karşılaştırılmıştır.

6. 1 VE 3 BOYUTLU ANALİZLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

SHAKE2000 (1D)ve FLAC-3D (3D) yazılımları ile elde edilen normalize edilmiş spektral ivme grafikleri Şekil 5'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafiklerde genel olarak bir uyum görülmekle beraber, yer yer farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar analiz modellerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Örnek vermek gerekirse, SHAKE analizlerinde dalgaların doğrusal ve dik olarak hareket ettikleri varsayılırken, üç boyutlu analizlerde dalgalar her yöne yayılabilmektedir. 1 boyutlu analizlerde eşdeğer lineer zemin modeli kullanılırken, 3 boyutlu analizlerde Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Ayrıca zaman ve frekans uzaylarında yapılan analizler de birbirlerinden farklı sonuçlara yol açabilmektedir. Fakat iki tip analizde elde edilen sonuçlar birebir örtüşmese bile mertebe olarak uyum içerisindedir. Bu gerçek, üç boyutlu analizlerin üzerinde yapısal elemanlar bulunarak yapılması konusunda destek verici olmuştur. Daha önce de belirtildiği üzere üç boyutlu analizlerin yapılmasının sebebi, zemin üzerine (bina temeli, vb.) ya da içerisine (kazık vb.) herhangi başka bir yapısal eleman tanımlayabilmek ve böylece yapı – zemin etkileşimi sağlamaktır. Böylece, zemin iyileştirmesine gerek olup olmadığının karar verilmesi daha güvenilir bir şekilde yapılabilecektir.



Şekil 5. Bir ve üç boyutlu analiz sonuçlarının karşılaştırılması

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada derin alüvyon bir sahada sırası ile bir ve üç boyutlu zemin tepki analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde sırası ile SHAKE2000 ve FLAC-3D yazılımları kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak idealize zemin profili hazırlanmış ve mevcut veri tabanında yer alan 4096 adet yer hareketinden 12 adet deprem kaydı kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır.

Bu analizler sonrasında, elde edilen normalize edilmiş spektral ivme grafikleri sunulmuş ve bir ve üç boyutlu analizler arasında tutarlılık olduğu görülmüştür. Ayrıca, gerek bir boyutlu, gerekse üç boyutlu analizlerde zeminin doğrusal olmayan bir şekilde davrandığı ve mevcut deprem ivmesinin azaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Abrahamson, N.A. (1998). Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH. PG&E Internal Rep., San Francisco.

Ege Temel (2008), Zemin ve Temel Etüd Raporu. Ege Temel Sondajcılık Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.

Ege Temel (2011), Zemin ve Temel Etüd Raporu. Ege Temel Sondajcılık Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.

ELC (2008). Kazık Yükleme Deneyi Raporu.

Fahjan, Y. (2008). Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra. *Teknik Dergi*, **19:3**,4423-4444.

FLAC3.0 (2009). FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.0, Itasca Consulting Group.

İYBDY (2008). İstanbul Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı.

Lilhanand, K. ve Tseng W.S. (1987). Generation of synthetic time histories compatible with multiple design spectra. Transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, **K1**, 105-110.

PEER (2006), NGA database, http://peer.berkeley.edu/nga/index.html.

Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1973). SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report No. EERC/72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 88p.

Seed, H.B. ve Idriss, I.M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. Report No. EERC 7-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K. (1984). Moduli and damping factor for dynamic analyses of cohesionless soils. Geotechnical Engineering Report No. UCB/EERC-84/14, University of California at Berkeley.

SHAKE2000 (2009). A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems.

Vucetic, M., ve Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering Division* , **117:1**, 89-107.