

## DERİN ALÜVYON ZEMİNLERDE SAHAYA ÖZEL TASARIM İVME SPEKTRUMUNUN BELİRLENMESİNDE ROL OYNAYAN UNSURLAR

Mustafa Sahin<sup>1</sup> ve Gürkan Özden<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnş. Müh., İnşaat Müh. Bölümü, Methal Mühendislik Ltd. ti., Bornova- zmir

<sup>2</sup> Prof. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Buca- zmir  
e-posta: msahin@methal.com.tr & gurkan.ozden@deu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada, İzmir Körfezi'nin doğu kıyısında, derin alüvyon zemin profili üzerinde yer alan bir arazide tek boyutlu (1D) dinamik zemin davranışı analizleri yapılmıştır. Baskın olarak kalın kil tabakalarından oluşan profilde, kayma dalgasının derinlikle değişim verileri jeofizik arazi deneylerinden, diğer zemin parametreleri ise laboratuvar deneylerinden elde edilmiştir. Arazideki farklı lokasyonlardan ve derinliklerden elde edilen bütün parametreler idealize bir zemin profili oluşturulmasında kullanılmıştır. Zeminin doğrusal olmayan davranışı için literatürdeki parametrik malzeme modellerinden yararlanılmıştır. Bölgede yapılmakta olan dinamik analizlerde genelde DLH Yönetmeliği'nde tanımlanmış spektrumlar hedef spektrum tarzında kullanılmaktadır. Bu çalışmada bölgedeki aktif fayların özellikleri ile uyumlu, DLH artnamesi D1, D2, D3 deprem seviyeleri için, PEER yer hareketi veri bankasından deprem kayıtları seçilmiştir. Analizlere esas zemin profilleri; Mühendislik Kaya Seviyesi ( $V_s = 760$  m/s) ve Ana Kaya Seviyesi ( $V_s = 1500$  m/s) olmak üzere iki farklı derinlik ve özellikteki kaya türü için hazırlanmıştır. Ana kaya üzerindeki ayrılmış kaya birimlerinin, mühendislik kaya seviyesinden itibaren zemin yüzeyinde hesaplanan elastik ivme spektrumlarına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan yöntemler ile elde edilen serbest zemin yüzeyi tasarım spektrumu, diğer yöntemlerle elde edilen spektrumlarla karşılaştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Ters evrim, spektrum, alüvyon, ivme, ana kaya, deprem

### ABSTRACT

In this study, one-dimensional (1D) site response analysis was performed in an area located on the eastern coast of the Izmir Bay where of deep alluvial soils govern the local geology. The soil profile is predominantly composed of thick clay layers in the study area. Shear wave velocity variation with depth was obtained from the geophysical field tests and other soil parameters were obtained from the laboratory tests. All of the parameters which were utilized to generate the idealized soil profile were achieved at different locations and depths in the area. Parametric models in the literature were used to represent the nonlinear behavior of soil layers. The DLH Code spectrum is usually used as a target spectrum in dynamic analyses being carried out in this region. Earthquake records were selected from the PEER ground motion database in accordance with the characteristics of active faults in the region so that they represent target DLH D1, D2 and D3 acceleration spectra. Soil profiles with varying thickness and features were used in the analyses. These are; the engineering rock level ( $V_s = 760$  m/s), the bedrock level ( $V_s = 1500$  m/s) and they both consist of different rock properties. To examine the effect of the weathered rock which is located above the bedrock on the elastic acceleration spectrum 1D site response analyses were conducted using outcrop acceleration time histories. Moreover, the free field design spectra obtained by nonlinear methods were compared with those obtained by means of the equivalent linear method.

**KEYWORDS:** deconvolution, spectrum, alluvial, acceleration, bedrock, earthquake

## Giri

Zemin yapı etkile imindeki önemli a amalardan biri olan sahaya özel deprem spektrumu çalı maları, hızla ço alan çok katlı yüksek yapıların projelendirmesinde yararlanılan “teknik önermeler”de yerini almı tır. Sahaya özel deprem spektrumlarının elde edilmesinde, seçilen depremlerin özellikleri, bölge fay yapısı, ana kaya derinli i, analiz yöntemleri, dinamik malzeme modelleri gibi birçok etken rol oynar. Ana kayanın çok derinlerde bulundu u bazı özel arazilerde uluslararası bazı yönetmeliklerde oldu u gibi ülkemizde kullanılan teknik önermelerde de mühendislik kayası kabulü yapılmaktadır. Çalı mamızda, ana kayadan itibaren bütün zemin profilinin modellenmesi halinde tasarım deprem spektrumunun etkilenip etkilenmeyece i ve do rusal olmayan analizle e de er do rusal analizlerin kalın alüvyon profillerde elde edilen sonuçları ne ölçüde etkidi i incelenmi tir.

## Arazi Çalı maları

nceleme alanı 38.4347 enlem, 27.1635 boylam koordinatlarında yer almaktadır ( ekil 1). Arazi yüzeyi genel olarak düz olup, yüzeye bırakılmı hafriyatlardan ötürü yakla ık 1.5 m kot farkı vardır. Arazide yapılan jeofizik çalı malar unlardır:

- 80 m derinli e kadar downhole yöntemi,
- 50 m derinli e kadar MASW (Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi) yöntemi,
- 290 m derinli e kadar Mikrotremor Tek Nokta (Spatial Auto-Correlation) (SPAC) yöntemi ile kayma dalgası hızları ( $V_s$ ) hızları ölçülmü tür.

P dalgası hızları ( $V_p$ ) SPAC ölçümlerinden elde edilmi tir. Yer altı su seviyesi ortalama olarak 1.9 m derinlikte belirlenmi olup, arazi çalı malarında bir tanesi 240 m derinli inde olmak üzere 22 adet sondaj yapılmı tır. SPAC ölçümlerinde dairesel dizim kullanılarak (3 farklı yarıçaplı çember üzerine ölçüm yapılmı tır) elde edilen veriler ı ı nda P ve S dalgalarının derinlikle de i imi elde edilmi tir. MASW ölçümleri analizlerde toplamda 11 adet profil üzerinde gerçekte tirilmi tir.



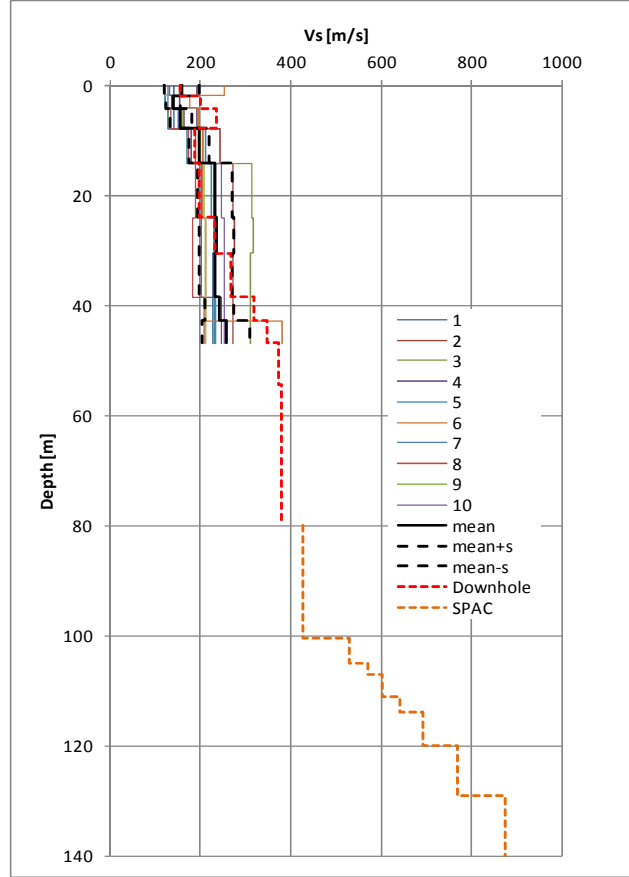
ekil 1. nceleme alanı uydu görünümü.

## dealize Zemin Profili

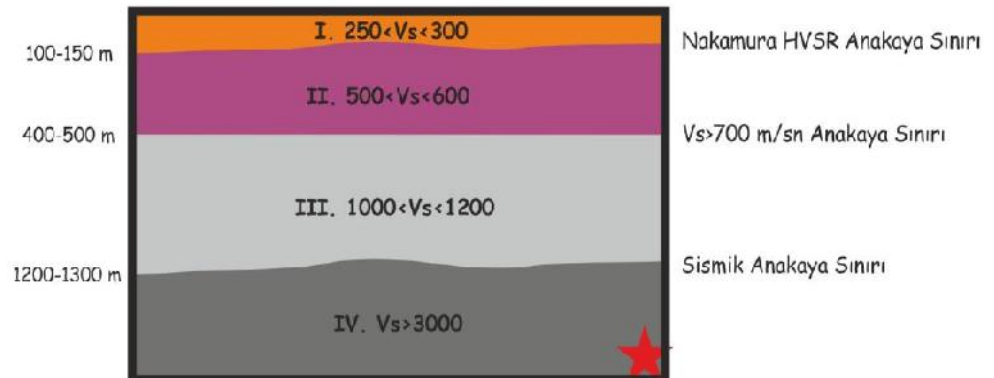
Zemin baskın olarak kil tabakalarından olu makta ve çakıl, kum ve silt içermektedir. Kalın kil tabaları arasında yine kil ile karı ık kum ve çakıl tabakaları mevcuttur. İlk 50 m derinlik içinde zayıf kil tabakaları bulunmaktadır. Bu tabakaların kayma dalgası hızlarının 150 ila 250 m/s ( ekil 2) aralı nda oldu u görülür. 0 ila 2 m derinlikleri arası dolgu zemin, arazi üzerinde düzgün yayılmayıp kot farklarına sahiptir. İlk 50 m derinlik için zemin profilinin olu turulmasında arazide yapılan SPT ve CPT deneylerinden faydalanılmı tır.

Sonraki 50 m boyunca zemin profilinin oluşturulmasında 100 m derinli inen sondajlardan, kalan 140 m kısım için 240 m derinli inen sondaj çalışmasından faydalanılmıştır. Daha derin seviyelerdeki kaya tabakalarına ait veri bölgede geçmiştendir. 1D dinamik zemin davranış analizlerinde 760 m/s hızının alındığı zemin tabakası (140 m derinlikte) mühendislik kayası olarak kabul edilmiştir.

Ekil 2’de görülen kayma dalgası – derinlik derinliği grafiği oluşturulurken ilk 30 m derinlik için MASW, sonraki 50 m için kuyu içi sismik (downhole), 80 m den büyük derinlikler için SPAC ölçümleri esas alınmıştır. Bu şekilde elde edilen ve hesaplamalara esas zemin modeli ekil 4’te verilmiştir.



ekil 2. Kayma dalgası hızı–derinlik derinliği (MASW, Downhole ve SPAC testlerine göre)



ekil 3. İzmir Yeni Kent Merkezi genel olarak zemin profili (Akgün ve diğerleri, 2013)

0 [m]								
1.9	n=18 kN/m <sup>3</sup> =1.83 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>DOLGU</b>	=0.44	V <sub>s</sub> =155 m/s V <sub>p</sub> =468				
		G.W.T					v <sub>v</sub> =	17.1
2.3	n=18.1 kN/m <sup>3</sup> =1.85 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.44	V <sub>s</sub> =155 m/s V <sub>p</sub> =468				
4.2		c <sub>u</sub> =27 kPa N <sub>60</sub> =6 N <sub>1-60</sub> =5		-No.200=82				
	G <sub>max</sub> =44 MPa w <sub>n</sub> =26.5 w <sub>LL</sub> =42 w <sub>PL</sub> =22 I <sub>p</sub> =20 I <sub>L</sub> =0.23						v <sub>v</sub> =	43.515
3.6	n=18.2 kN/m <sup>3</sup> =1.86 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>GM-GC</b>	=0.44	V <sub>s</sub> =155 m/s V <sub>p</sub> =475				
7.8		N <sub>60</sub> =17 N <sub>1-60</sub> =14		-No.200=8				
	G <sub>max</sub> =44.6 MPa						v <sub>v</sub> =	67.59
6.4	n=19 kN/m <sup>3</sup> =1.94 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.41	V <sub>s</sub> =195 m/s V <sub>p</sub> =506				
14.2		c <sub>u</sub> =48 kPa N <sub>60</sub> =8 N <sub>1-60</sub> =5		-No.200=84				
	G <sub>max</sub> =73.8 MPa w <sub>n</sub> =21 w <sub>LL</sub> =38 w <sub>PL</sub> =19 I <sub>p</sub> =19 I <sub>L</sub> =0.11						v <sub>v</sub> =	111.15
9.8	n=19.7 kN/m <sup>3</sup> =2.01 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.4	V <sub>s</sub> =230 m/s V <sub>p</sub> =565				
24		c <sub>u</sub> =94 kPa N <sub>60</sub> =11 N <sub>1-60</sub> =7		-No.200=68				
	G <sub>max</sub> =106.3 MPa w <sub>n</sub> =21 w <sub>LL</sub> =37 w <sub>PL</sub> =19 I <sub>p</sub> =18 I <sub>L</sub> =0.11						v <sub>v</sub> =	187.48
6.5	n=19.4 kN/m <sup>3</sup> =1.98 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>GC</b>	=0.42	V <sub>s</sub> =235 m/s V <sub>p</sub> =622				
30.5		N <sub>60</sub> =34 N <sub>1-60</sub> =20		-No.200=54				
	G <sub>max</sub> =109.3 MPa w <sub>n</sub> =18.6 w <sub>LL</sub> =38 w <sub>PL</sub> =19 I <sub>p</sub> =19 I <sub>L</sub> =-0.02						v <sub>v</sub> =	265.56
8	n=19.7 kN/m <sup>3</sup> =2.01 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CH</b>	=0.41	V <sub>s</sub> =268 m/s V <sub>p</sub> =698				
38.5		c <sub>u</sub> =72 kPa N <sub>60</sub> =16 N <sub>1-60</sub> =7		-No.200=90				
	G <sub>max</sub> =144.4 MPa w <sub>n</sub> =27.5 w <sub>LL</sub> =57 w <sub>PL</sub> =25 I <sub>p</sub> =32 I <sub>L</sub> =0.08						v <sub>v</sub> =	334.91
19.9	n=19.9 kN/m <sup>3</sup> =2.03 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>SM-SP</b>	=0.4	-No.200=38 V <sub>s</sub> =318 m/s V <sub>p</sub> =780				
42.8		G <sub>max</sub> =205 MPa N <sub>60</sub> =29 N <sub>1-60</sub> =12					v <sub>v</sub> =	395
20	n=20 kN/m <sup>3</sup> =2.04 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CH</b>	=0.4	V <sub>s</sub> =346 m/s V <sub>p</sub> =836				
46.8		c <sub>u</sub> =95 kPa N <sub>60</sub> =20 N <sub>1-60</sub> =10		-No.200=94				
	G <sub>max</sub> =244 MPa w <sub>n</sub> =27.5 w <sub>LL</sub> =51 w <sub>PL</sub> =22 I <sub>p</sub> =29 I <sub>L</sub> =0.19						v <sub>v</sub> =	436.28
20.3	n=20.3 kN/m <sup>3</sup> =2.07 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.4	V <sub>s</sub> =372 m/s V <sub>p</sub> =916				
54.4		c <sub>u</sub> =106 kPa N <sub>60</sub> =27 N <sub>1-60</sub> =16		-No.200=77				
	G <sub>max</sub> =286 MPa w <sub>n</sub> =23.8 w <sub>LL</sub> =42 w <sub>PL</sub> =19 I <sub>p</sub> =23 I <sub>L</sub> =0.21						v <sub>v</sub> =	495.42
20.5	n=20.5 kN/m <sup>3</sup> =2.09 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.42	V <sub>s</sub> =380 m/s V <sub>p</sub> =1009				
60.4		c <sub>u</sub> =113 kPa N <sub>60</sub> =43 N <sub>1-60</sub> =12		-No.200=94				
	G <sub>max</sub> =301 MPa w <sub>n</sub> =20.5 w <sub>LL</sub> =41 w <sub>PL</sub> =18 I <sub>p</sub> =23 I <sub>L</sub> =0.39						v <sub>v</sub> =	566.06
20.6	n=20.6 kN/m <sup>3</sup> =2.10 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.44	V <sub>s</sub> =380 m/s V <sub>p</sub> =1178				
80.4		c <sub>u</sub> =140 kPa		-No.200=91				
	G <sub>max</sub> =303 MPa w <sub>n</sub> =24 w <sub>LL</sub> =39 w <sub>PL</sub> =21 I <sub>p</sub> =18 I <sub>L</sub> =0.17						v <sub>v</sub> =	703.56
20.8	n=20.8 kN/m <sup>3</sup> =2.12 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>	=0.44	V <sub>s</sub> =426 m/s				
100.6		c <sub>u</sub> =183 kPa		-No.200=92				
	G <sub>max</sub> =347 MPa w <sub>n</sub> =24 w <sub>LL</sub> =39 w <sub>PL</sub> =21 I <sub>p</sub> =18 I <sub>L</sub> =0.17						v <sub>v</sub> =	918.64
21.1	n=21.1 kN/m <sup>3</sup> =2.15 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>		V <sub>s</sub> =528 m/s				
105							v <sub>v</sub> =	1052.14
20.6	n=20.6 kN/m <sup>3</sup> =2.01 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>GC</b>		V <sub>s</sub> =603 m/s				
107		G <sub>max</sub> =494 MPa					v <sub>v</sub> =	1087.16
21.1	n=21.1 kN/m <sup>3</sup> =2.15 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>		V <sub>s</sub> =639 m/s				
111		G <sub>max</sub> =626 MPa					v <sub>v</sub> =	1119.96
20.6	n=20.6 kN/m <sup>3</sup> =2.01 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>GC</b>		V <sub>s</sub> =691 m/s				
114		G <sub>max</sub> =723 MPa					v <sub>v</sub> =	1158.06
21.8	n=21.8 kN/m <sup>3</sup> =2.22 kN.s <sup>2</sup> /m	<b>CL</b>		V <sub>s</sub> =778 m/s				
140		G <sub>max</sub> =1282 MPa						1327.36

ekil 4. deialize edilmi zemin profili

### Malzeme Modeli

Önemli projelerde, araziye özel omurga e rilerinin laboratuarda tekrarlı kesme deneyi, tekrarlı üç eksenli kesme deneyleri vb. ile belirlenmesi mümkündür. Ancak her derinlik için örselenmemiş numune alınması ve bu testlerin yapılması her zaman mümkün olmadı ndan, omurga e rilerinin olu turulmasında deneysel verilere göre üretilmiş parametrik ilişkiler kullanılmaktadır. Örneğin; kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminler için Darendeli (2001), kohezyonsuz zeminler için Seed & Idriss (1991), iri daneli zeminler içinse Menq (2007) modelleri kullanılabilir. Darendeli (2001) modelinde:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\chi}{\chi_r}\right)^a} \quad (1)$$

Bu denklemde “a” sabiti e risellik katsayısı olup 0.9190 de erini almaktadır.  $\chi$ , kayma deformasyonunu,  $\chi_r$ , referans kayma deformasyonunu göstermektedir. Referans kayma deformasyonu de eri:

$$\chi_r = \left(\frac{\dot{\tau}_0}{p_a}\right)^{0.3483} \left(0.0352 + 0.001PIOCR^{0.3246}\right) \quad (2)$$

denklemden elde edilebilir. Burada  $\dot{\tau}_0$ , ortalama efektif gerilmeyi,  $p_a$ , atmosferik basıncı belirtir.  $\chi_r$  de eri genellikle %0.1 - %0.3 aralı nda alınmaktadır. PI sembolü plastisite indisine kar ı gelir.

Sönüm oranı minimum sönüm oranı (dü ük ekilli de i tirmelerdeki sönüm oranı) ile Masing (1926) davranı ndan ötürü olu an sönüm oranlarının toplanması ile elde edilmiştir.

$$D_{\min}(\%) = (\dot{\tau}_0)^{-0.2889} \left(0.8005 + 0.0129PIOCR^{-0.1069}\right) (1 + 0.2919 \ln f) \quad (3)$$

$f$  deprem hareketi hakim frekansını temsil etmekte olup genelde 1 Hz olarak alınır.

Masing sönüm oranı tekrarlı çevrim e risinin altındaki alanın integrasyonu ile elde edilebilir. Yaklaşık olarak bu integrasyonun de eri:

$$D_{\text{Masing}}(\%) = \frac{100}{f} \left\{ 4 \left[ \frac{\chi - \chi_r \ln \left( \frac{\chi + \chi_r}{\chi_r} \right)}{\frac{\chi^2}{\chi + \chi_r}} \right] - 2 \right\} \quad (4)$$

Toplam sönüm oranı ise:

$$D = b \left( \frac{G}{G_{\max}} \right)^{0.1} D_{\text{Masing}} + D_{\min} \quad (5)$$

Bu denklemde b de eri a a ıdaki ba ıntıdan elde edilir:

$$b = 0.6329 - 0.0057 \ln N \quad (6)$$

Denklem 6’ da N yinleme sayısını temsil etmektedir ve deprem hareketleri için yaklaşık olarak 10 alınabilir. Yukarıdaki denklemlere ba lı olarak olu turulan kayma modülü azalış grafikleri %0.3 ila %0.7 kayma deformasyonu mertebeleri arasında iyi sonuçlar vermektedir. Büyük kayma deformasyonlarının meydana geldi i durumlarda, olu turulan  $G/G_{\max}$  boyutsuz omurga e risinde düzeltmeler yapılması gerekir (Stewart

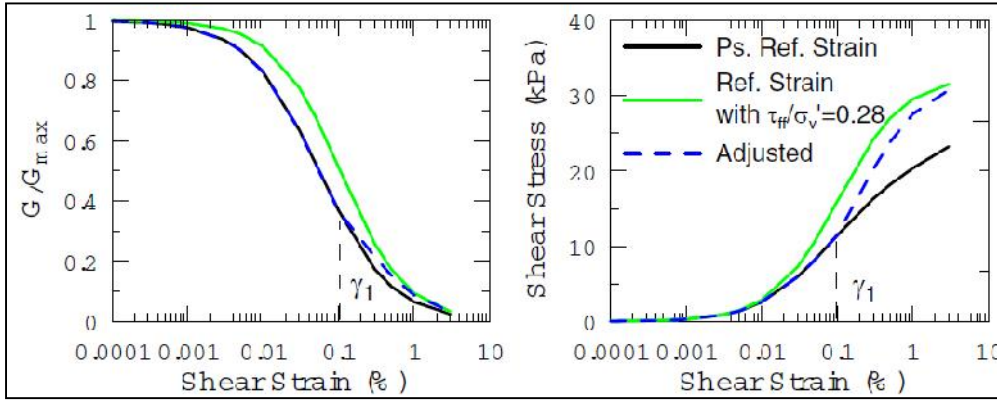
and Kwok, 2008). ekil 5’de verilen yöntemler kullanılarak hazırlanan e riler do rudan analizlerde kullanılabilir. Düzeltimi omurga e rileri kullanılmak istenirse 1~6 denklemlerindeki e riler hedef e ri olarak kabul edilip;

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + S(X/X_r)^a} \quad (7)$$

genel  $G/G_{\max}$  denkleminin (Hardin and Drnevich, 1972) ve  $a$  e ri uyarlama parametrelerine ba langıç de eri verilerek, hedef e ri ile genel  $G/G_{\max}$  arasındaki hata oranı tahmin edilir. Hata oranını minimize eden ve  $a$  parametreleri belirlendikten sonra Denklem 7 ile verilen e ri son eklini alır. Bu hata oranı tahmin edilirken de bir a ırlık fonksiyonu kullanılarak, özellikle hedef e rinin yüksek do rulu a sahip oldu u %0.3 - %0.7 kayma deformasyonu aralı ı dikkate alınabilir. Burada 3 ayrı uyarlama yöntemi mevcuttur:

- MR uyarlama:* sadece kayma modülü azalım grafi ine yapılır.
- MRD uyarlama:* aynı anda hem kayma modülü azalım grafi ine hem de sönüm grafi ine uygulanır.
- DC uyarlama:* sadece sönüm grafi ine uygulanır.

Bu uyarlamaların zemin dinamik davranı analizi üzerindeki etkileri ile ilgili Stewart ve Kwok (2008) tarafından çalı malar yapılmı tır. DC seçene inin tek ba ına kullanımı önerilmemektedir. Büyük kayma deformasyonlarının beklendi i analizlerde MR ve MRD yöntemleri kullanılarak daha iyi yakınsayan sonuçların elde edilebilece i önerilmektedir.



ekil 5. Stewart ve Kwok (2008) tarafından önerilen, büyük deformasyonlar için  $G/G_{\max}$  düzeltmesi

ekil 4’de verilen zemin modeli ve Darendeli (2001) tarafından önerilen parametrik formülasyonlara göre (Denklem 1~6), her tabaka için hedef kayma modülü azalım grafikleri olu turulmu tur. Killi zeminler için plastisite indeksi, kumlu zeminler için formülasyonlarda  $PI=0$  ve  $OCR=1$  alınmı tır. Analizlerde, MRD uyarlaması yapılmı ve hata miktarını minimize ederek ve  $a$  parametrelerine göre olu turulan  $G/G_{\max}$  ile sönüm omurga e rileri kullanılmı tır. Derin zemin analiz modelindeki kaya tabakası için Çizelge 1’de verilen  $G/G_{\max}$  ve Sönüm oranları kullanılmı tır.

Çizelge 1. Kaya için  $G/G_{\max}$  ve sönüm e rileri; sol taraftaki çizelgede 120 m derinli e kadar bulunan kaya birimi için, sa taraftaki tabloda ise 120 m derinlikten sonraki kaya tabakasına ait de erler verilmi tir.

Strain	G/Gmax	Damping
0.0001	1	1.8
0.0002	1	1.8
0.0005	1	1.8
0.001	0.99	1.9
0.002	0.985	2
0.005	0.98	2.2
0.01	0.96	2.4
0.02	0.91	3

Strain	G/Gmax	Damping
0.0001	1	0.8
0.001	1	0.8
0.003	0.99	0.9
0.01	0.98	1.1
0.03	0.94	1.6



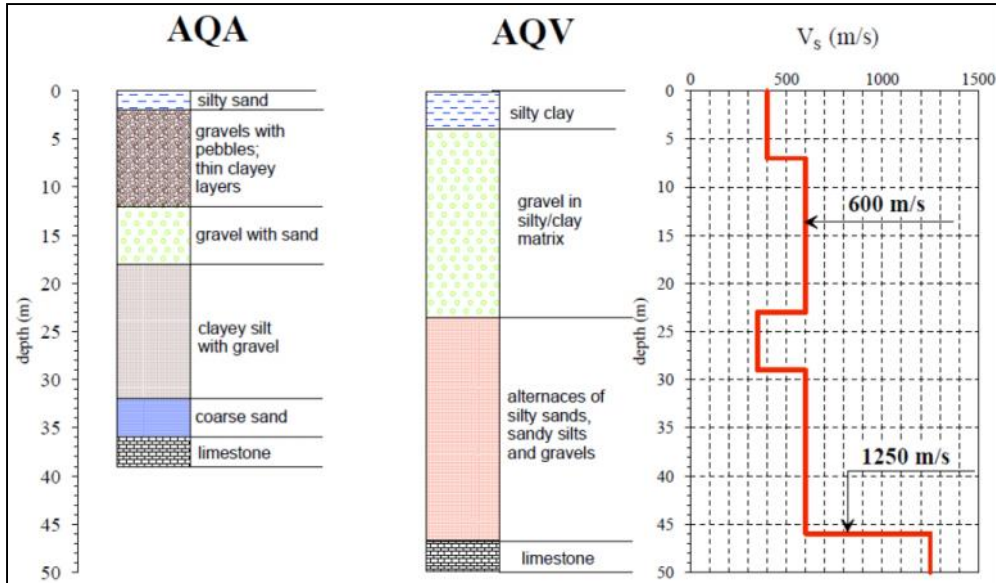
### Uygun Depremlerim Seçimi ve Ölçeklenmesi

DLH (2008) yönetmeliğine göre D1, D2 ve D3 deprem seviyelerine uygun hedef kaya spektrumları oluşturulmuştur. Seçilecek olan depremler, bu hedef spektrumu ile en iyi uyumu gösterecek şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, ara tırma alanına yakın faylar incelendiğinde, İzmir Fayı ile Tuzla Faylarının uzantılarının çalıştığı alanı yakınında birbirine yaklaştığı görülmektedir. Arazinin yaklaşık olarak bu faylara en yakın mesafesi 5 ila 7 km arasındadır. Ayrıca Karaburun Fayı yaklaşık 50 km, Foça Fayı ise 40 km mesafededir. Bu fayların mekanizmalarına bakıldığında, İzmir Fayının normal fay, diğer fayların ise yanal atımlı faylar olduğunu görüyoruz. Bu bilgiler ışığında seçilecek deprem kayıtlarının da benzer faylanma özelliklerine sahip olması çalıştığı alanının uygun şekilde temsil edilmesi açısından önemlidir.

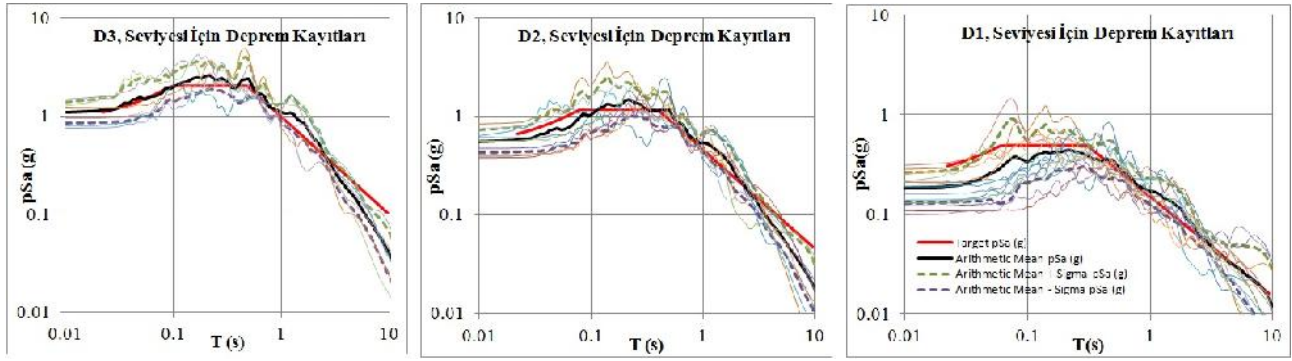
DLH hedef kaya spektrumlarına göre PEER deprem veritabanından seçilen kayıtlar dikkatle incelenip, uygun olan 3'er adet kayıt her deprem seviyesi için seçilmiştir. Seçilen kayıtlarda iki yöndeki bileşenlerinin her ikisi analizlerde kullanılmıştır. Bu kayıtların seçiminde aşağıdaki filtreleme işlemi uygulanmıştır:

- Ölçekleme oranının 0.5 ila 2.5 civarında olmayan depremler elenmiştir (Bommer ve diğerleri, 2003).
- TDY yönetmeliğinde belirtilen kriterlere uymayan kayıtlar elenmiştir.
- Fay hatlarına yakın depremler (0-10 km), orta mesafeli depremler (10-30 km) ve uzak fayların oluşturduğu depremlerin (40-60 km) etkileri dikkate alınacak şekilde seçilmiştir (Çizelge 2).

Seçilen depreme uygulanacak ölçekleme miktarının doğrusal olmayan analizlerde 0.5 ile 2.5 aralığında seçimine özen gösterilmiştir. Dolayısıyla seçilen depremlerin mümkün olduğunca az değerlendirilerek kullanılması sonuçların gerçeğe daha iyi yansıtması için gereklidir. Hiçbir deprem ivme kaydının frekans içeriğine müdahale edilmemiştir. Çizelge 7'de seçilen depremlerin spektrumları ile hedef spektrum bir arada gösterilmiştir. Çizelge 6 izleyen bölümlerde açıklanacaktır.



Çizelge 6. PEER Deprem veri tabanından seçilen 4480 ve 4510 RSN numaralı deprem ivme kayıtlarının alındığı istasyonların zemin profili (Monaco ve diğerleri, 2009)



ekil 7. PEER güçlü yer hareketleri veri tabanından D1, D2, D3 düzeyi deprem seviyeleri için elde edilen kayıtlar. (M=6-8, Vs30=550-1500 m/s, Fay tipi= normal/yanal atımlı, Mesafe=0-80 km)

Çizelge 2. Çalı ma için seçilen deprem kayıtları ve bazı özellikleri

Deprem Tanımı	RSN #	Tarih	Süre [s]	M	Mekanizma	R <sub>(rup)</sub> [km]	Zemin Sınıfı	V <sub>s30</sub> [m/s]	PGA [g]	Ölçek Çarpımı	PGA <sub>target</sub> [g]		
											D1	D2	D3
Irpina, ITALY-01	288	1980	34.9	6.9	Normal	22.56	B	561	0.22	0.9448	0.196	-	-
Sitka, Alaska	1626	1972	55	7.68	StrikeSlip	34.61	B	650	0.1	1.5968	0.196	-	-
Darfield, New Zeland	6891	2010	140	7	StrikeSlip	43.6	B	638.4	0.12	0.9448	0.196	-	-
Kobe, Japan	1111	1995	41	6.9	StrikeSlip	7.08	B	609	0.48	0.9075	-	0.468	-
Hector Mine	1787	1999	45.3	7.13	StrikeSlip	11.66	B	726	0.33	1.1129	-	0.468	-
L'Aquila, Italy	4483	2009	40	6.3	Normal	5.38	B	717	0.36	1.2811	-	0.468	-
Kobe, Japan	1111	1995	41	6.9	StrikeSlip	7.08	B	609	0.48	1.882	-	-	0.812
Hector Mine	1787	1999	45.3	7.13	StrikeSlip	11.66	B	726	0.33	2.2343	-	-	0.812
L'Aquila, Italy	4483	2009	40	6.3	Normal	5.38	B	717	0.36	2.5719	-	-	0.812

## Analiz Metodu

Yaygın olarak kullanılan e de er do rusal yöntem ile 1D dinamik zemin davranı analizleri, D1, D2 ve D3 deprem seviyeleri için Çizelge 2'de verilen ivme kayıtlarına göre DEEPSOIL (Hashash, 2015) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizleri gruplandırarak olursak;

### 1- Depremlerin Mühendislik Kayasından Uygulanması (Metod-I)

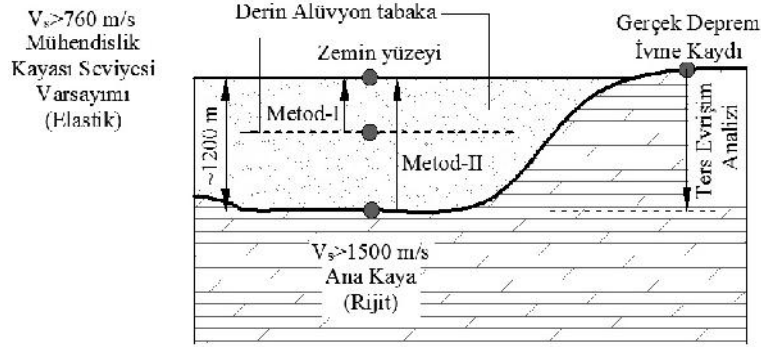
MCEER/ATC-49, ana kayanın çok derinde olduğu bazı zemin profilleri için analizde kullanılacak deprem kaydının V<sub>s</sub> 760 m/s olan zemin türüne denk gelen derinlikten uygulanmasına müsaade etmektedir. ekil 8'de görüldü ü gibi bu seviyeye mühendislik kayası adı verilir. Hesap modelimizde mühendislik kaya seviyesi 140 m derinliktedir. Bu seviyeden itibaren serbest zemin yüzeyine kadar 1D dinamik zemin davranı analizleri; a) Do rusal olmayan yöntemle, b) E de er do rusal yöntemle yapılmıştır. Her üç deprem seviyesi için de do rusal ve do rusal olmayan yöntemler kar ıla tırılmıştır ( ekil 10).

### 2- Depremlerin Ana Kayadan Uygulanması (Metod-II)

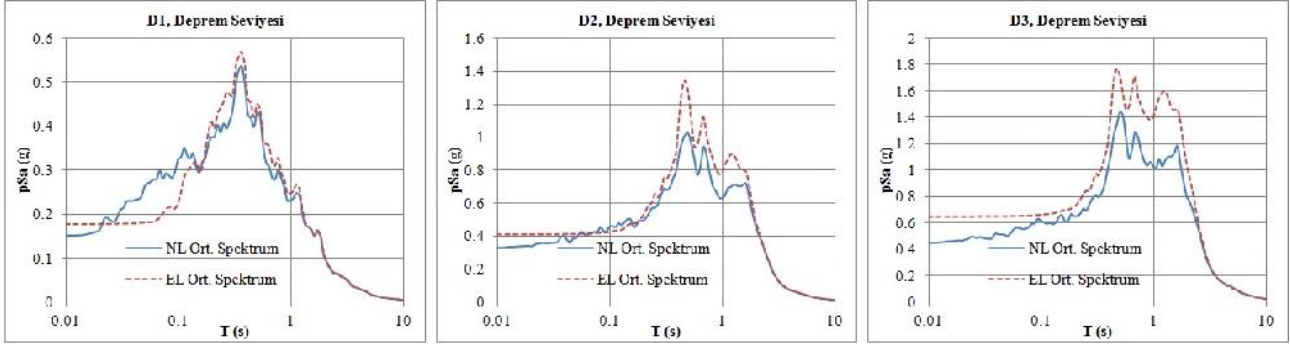
Zemin modelinde ana kaya yaklaşık 1200 m derinlikte bulundu u için (Akgün, 2013), ekil 3'te verilen idealize V<sub>s</sub>-derinlik ili kisine göre 140 m derinli inden sonrası için V<sub>s</sub> profili yaklaşık olarak elde edilmiştir. ekil 8'de görülen basitleştirilmiş modelde 140 m ile 1200 m arasındaki kalın ve ayrı mı kaya tabakasının (240 m derinli e kadar ayrı mı ve sert kil kıvamında kılta ı) analiz sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için L'Aquila depremi (İtalya, 2009) sırasında kayıt elde edilen AQV stasyonu (R<sub>jb</sub> 0 km) 4480 RSN numaralı ivme kaydı ile faydan 11 km mesafedeki artçı ok kaydı kullanılmıştır. Bu tercih ters evrim analizleri için gerekli olan istasyon zemin profil bilgilerinin ( ekil 6; Monaco ve di erleri, 2009)



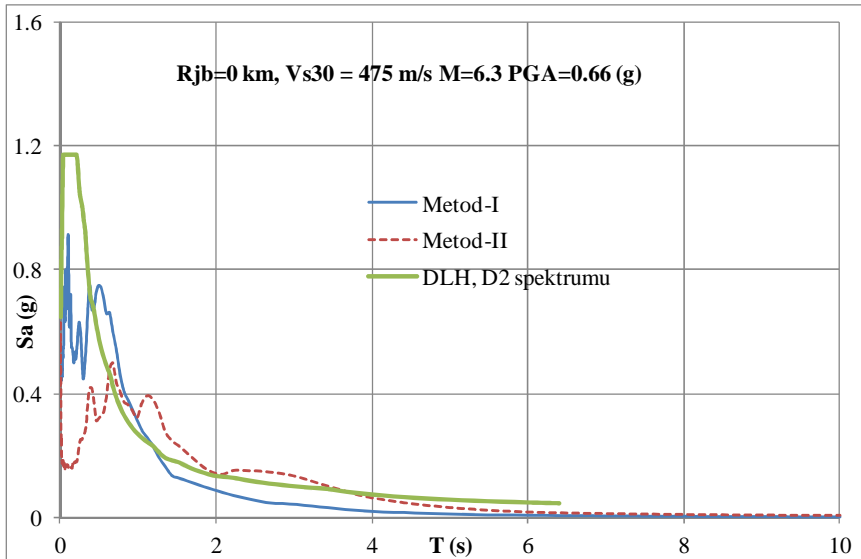
mevcut olması etkili olmu ; bu sayede zemin yüzeyinde alınmış olan kayıtlar ters evri m i lemi ile ana kayaya ta inabilmiştir. Ters evri tirilmi bu depremler, zmir Yenikent Merkezi arazi profilinde ana kaya seviyesinden uygulanmış ve 1D dinamik zemin davranış analizleri yapılmıştır. Aynı depremler (ters evri tirilmemi ), Metod-I ile Metod-II arasındaki farklı incelemek için mühendislik kayası seviyesinden zemin profiline uygulanmış ve zemin yüzeyinde hesaplanan ivme spektrumları karşılaştırılmıştır ( ekil 11).



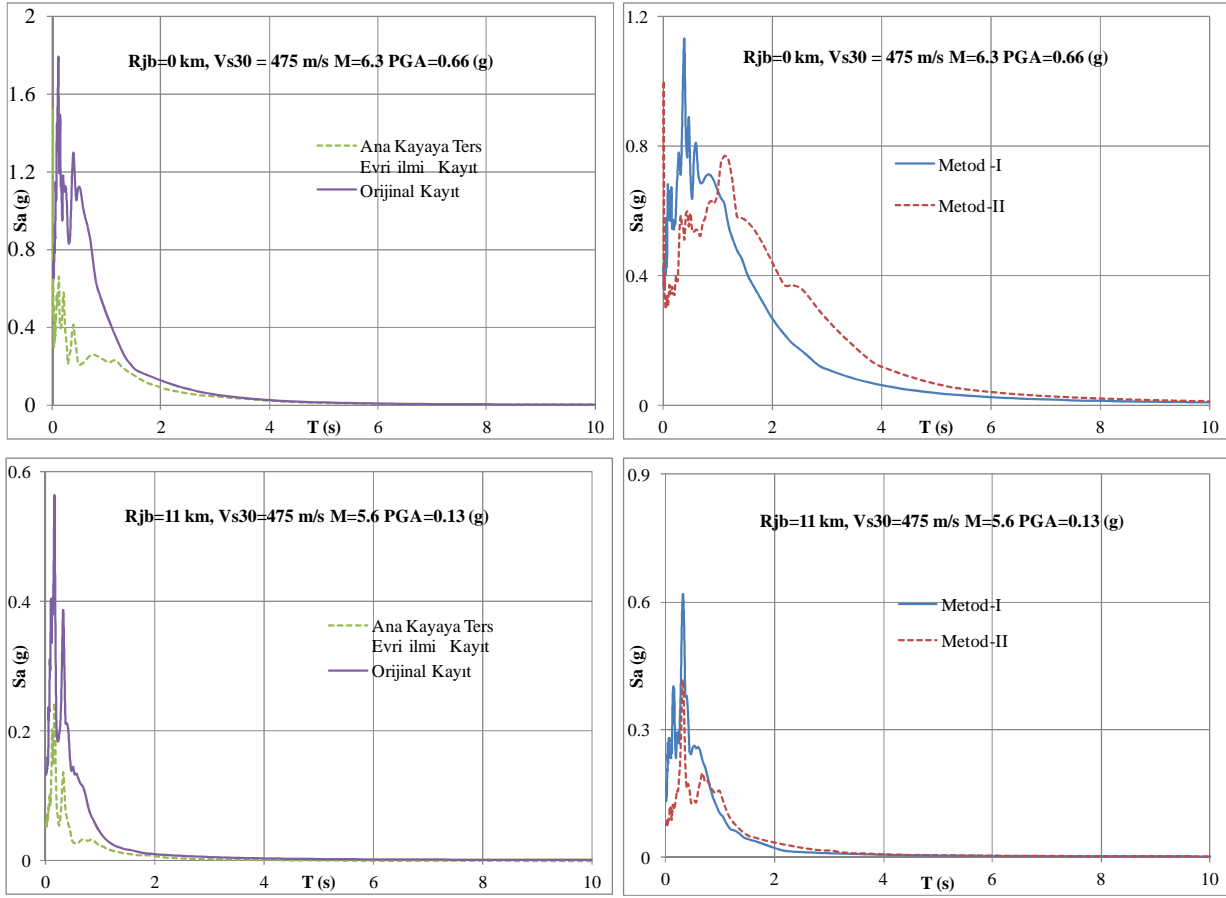
ekil 8. Ters Evrişim Analizinin elastik olarak ifade edilmiş analizlerde kullanılan Metod-I ve Metod-II nin ekil üzerinde gösterimi



ekil 9. Metod-I analizleri sonucunda serbest zemin yüzeyinde elde edilen ivme spektrumları.



ekil 10. DLH yönetmeliğindeki D2 spektrumu (B tipi zemin grubu) ve mühendislik kayası seviyesindeki Metod-I ve Metod-II spektrumları.



**ekil 11. Sol üst ve sol alttaki grafikler zemin yüzeyinde ölçülmüş deprem spektrumlarını ve bu depremlerin ters evriimli ile ana kayaya taşınmış spektrumlarını göstermektedir. Sa üst ve Sa alttaki grafiklerde ise sırasıyla; 0.66g pik ivmeli D2 Deprem Seviyesi için Metod-II analiz sonuçlarını göstermektedir.**

### Sonuçlar ve Tartımlar

ekil 9'da görüldüğü gibi, D1 depremleri için yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan 1D dinamik zemin davranış analizi bulguları her iki yöntemin de birbirine yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. Düşük periyot kısmında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının daha büyük çıkmasının sebebi ise doğrusal olmayan yöntemin analizlerde sekant (kiri) kayma modülünü kullanmasıdır (Kramer, 1996). Orta ve yüksek periyotlardaki benzerliklerin sebebi ivmenin 0.12g mertebesinde olmasından dolayı, düşük deformasyonların ortaya çıkmasıdır. D2 seviyesi depremi için ( $PGA \approx 0.5g$ ), zeminin doğrusal olmayan davranış özelliklerinin ortaya çıkmasından ötürü,  $T=0.2$  ile  $1.5$  s periyot aralıklarında doğrusal olmayan analiz sonuçlarının doğrusal analiz sonuçlarının altında kaldığı görülmektedir. D3 depremi içinse, D2 düzeyindeki depreme göre daha belirgin şekilde doğrusal analiz sonuçlarının altında kaldığı görülmektedir (Stewart and Kwok, 2008). Bunun sebebi ise doğrusal olmayan analizlerde her küçük zaman adımında doğrusal birim deformasyona karşılık gelen kayma modülünün kullanılmasıdır. Büyük deformasyonlarda tekrarlı çevrim ivmesinin yatkınlığı arttığından daha düşük kayma modülü elde edilmektedir.

Analizin ikinci aşamasında araştırılan derin alüvyon tabakalarının dinamik davranış üzerindeki etkisi ekil 10 ve ekil 11'de görülmektedir. D2 seviyesindeki orta şiddetteki depreme göre yapılan (Metod-II) analizler sonucunda mühendislik kayası seviyesinde ( $V_s = 760$  m/s) verilen DLH spektrumunun uzun periyot bölgesinin ağırlığı gözlenmiştir (ekil 10). Derin alüvyon tabakanın tamamı dikkate alındığında spektrumun sağa doğru ötelenmiş olduğunu araştırmacılar da belirlemiştir (Bartlett v.d., 2015). D1 seviyesindeki deprem için ise bu ötelenme miktarı oldukça küçük kalmıştır. Uzun periyot bölgesindeki bu ötelenme zemin yüzeyinde elde edilecek tasarım spektrumunu önemli ölçüde etkileyebilir (ekil 11).

#### KAYNAKLAR

- Bartlett, S. F., Ostadan, F., Abghari, A., & Farnsworth, C. "Development of Design Spectra for Deep and Soft Soil Sites", [www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6330/spectra.pdf](http://www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6330/spectra.pdf)
- Bommer JJ, Acevedo AB, Douglas J (2003) "The Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms for use in seismic Design and Assessment", Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit, American Concrete Institute)
- Darendeli, M. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves." *Ph.D. Dissertation*, Dept. of Civil Eng., Univ. Of Texas, Austin.
- DLH (2008), Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları n aatlarına li kin Deprem Teknik Yönetmeli i
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2015) "DEEPSOIL 6.0, User Manual" 116 p.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Masing, G. (1926). "Eigenspannungen and verfertigung beim messing." *Proc. 2nd Int. Congress on Applied Mech.*, Zurich.
- MCEER/ATC-49a, Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridges, Part I: Specifications, Applied Technology Council.
- MCEER/ATC-49b, Recommended LRFD guidelines for the seismic design of highway bridges, Part II: Commentary and Appnedicies, Applied Technology Council.
- Monaco P. Et al, "Geotechnical Aspects of the L'Aquila Earthquake", Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference XVIIth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering 2-3. 10. 2009, Alexandria, Egypt
- PEER Strong Motion Database, Pasific Earthquake Engineering Research Center. (2015, June 15). Retrieved from <http://ngawest2.berkeley.edu/>
- Seed, H.B. and I.M. Idriss (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," *Report EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Stewart, J.P. and Kwok, A.O. (2008). "Nonlinear seismic ground response analysis: code usage protocols and verification against vertical array data," in *Geotechnical Engineering and Soil Dynamics IV*, May 18-22, 2008, Sacramento, CA, ASCE Geotechnical Special Publication No. 181, D. Zeng, M.T. Manzari, and D.R. Hiltunen (eds.), 24 pages (electronic file).