



**SIVILAŞIR YADA SIVILAŞMAZ ZEMİNLERİN YİNELEMELİ  
GERİLME ORANINA BİR SEÇENEK**

**(AN APPROACH FOR CYCLIC STRESS RATIO OF LIQUEFIED OR  
UNLIQUEFIED SOILS)**

**Osman UYANIK\***

**ÖZET/ABSTRACT**

Bu çalışmada, yinelemeli (tekrarlı) yüklerin belirlenmesi için kullanılan deprem ile zemin parametrelerine, zeminin kayma dalga hızları ( $V_s$ ) ve deprem dalgasının hakim periyodu da ( $T$ ) eklenerek alternatif bir analitik ilişki geliştirilmiş ve kayma gerilme oranı (KGO) olarak isimlendirilmiştir. KGO 202 adet alan verisi üzerinde uygulanmış ve sonuçların daha önce kullanılan matematiksel bağıntının (CSR) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sıvılaştırılan zeminlerde hesaplanan yinelemeli gerilme oran değerlerinden KGO, CSR'den daha büyük, sıvılaştımayan zeminlerde ise daha küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca KGO ile CSR arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir.

*In this paper an alternative analytical relationship is developed that adds soil shear wave velocities ( $V_s$ ) and earthquake dominating period ( $T$ ) to an earthquake and soil parameters used in the determination of cyclic loads. This relation is named as shear stress ratio (KGO). KGO is applied to 202 field data and the results are compared in accordance with the results of mathematical relation (CSR) used before. Consequently, KGO value for liquefied soil is bigger than CSR. Whereas, KGO value of unliquefied soils is smaller than CSR. A linear relation is determined between KGO and CSR.*

**ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS**

Kayma dalga hızı, Yinelemeli gerilme oranı, Suyu doymuş zemin, Sıvılaştır zemin, Sıvılaştımayan zemin

*Shear wave velocity, Cyclic stress ratio, Water-saturated soils, Liquefied soil, Unliquefied soil*

## 1. GİRİŞ

Deprem bölgelerinde, sıvılaştıran yada sıvılaştırmayan zeminin yinelemeli gerilme yüklerinin önceden belirlenmesi, sıvılaşma çözümlenmesinde, mevcut yapıların güçlendirilmesinde ve yeni yapıların mühendislik tasarımında önemli bir adımdır. Suyu doygun zeminlerin sıvılaşma çözümlenmesinde en etkin parametre, depremin zeminlerde oluşturduğu yinelemeli yüklerin seviyesidir. Bu seviye depremin ivmesine, zeminlerin kalınlığına, yoğunluğuna ve yeraltı su seviyesine bağlıdır. Zeminlerde oluşan yinelemeli yüklerin bir başka kaynağı da depremle oluşan kayma dalgalarıdır. Bu nedenle, Depremin kayma dalgalarına benzer ve yapay olarak üretilen yerde küçük değişim yapan kayma dalgalarının da bu yüklerin belirlenmesinde bir parametre olabileceği düşünülmüştür.

Deprem bölgelerindeki suya doygun zeminlerin sıvılaşma çözümlenmesi için yinelemeli gerilme oranları geniş bir biçimde kullanılmaktadır. Depremin suya doygun zeminlerde oluşturduğu yinelemeli yükü, yinelemeli gerilme oranı olarak ifade etmiştir (Seed ve Idriss, 1971). Bu oran, zeminin sıkılığından, gevşekliğinden, yer altı suyunun yüzeye yakın yada derinde olmasından, boşluk oranından ve gerilme durumu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Yerde küçük değişim yapan kayma dalgaları da zeminde yayılırken bu faktörlerden benzer bir biçimde etkilenirler. Dolayısıyla büyük depremlerden sonra suya doygun gevşek zeminlerin sıvılaşmasını oluşturan yinelemeli gerilme oranının hesabında, yerde küçük değişim yapan kayma dalga hızından yararlanılabilir.

Arazide küçük deformasyonlu kayma dalgalarının kullanımının bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlüklerden birincisi, Kayma dalga ölçümlerinin tüm zemin tiplerinde, laboratuvar numuneleri üzerinde, sondajların yapılamadığı büyük kaya parçalı dolgu alanlarda ve çakıl karışıklı numune alımı zor olan alanlarda uygulanabilir olmasıdır. Hızlı sonuç almak istenen büyük alanlarda ise, kayma dalga ölçümleri için sismik kırılma yada tarafından geliştirilen yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) teknikleri diğer kolaylıklardır (Stokoe ve Nazarin, 1983; Nazarin ve Stokoe, 1984; Stokoe vd., 1994). Ayrıca yerde küçük değişimler yapan kayma dalga hızları, zeminin mekanik özelliğini ortaya koyan ve zemin yapı analizlerinde gerekli olan bir parametredir. Bu üstünlüklerin yanı sıra zeminin sıvılaşma değerlendirmeleri için gerekli olan yinelemeli kayma gerilmelerin belirlenmesinde, yerde küçük değişimler yapan kayma dalga hız ölçümlerinin kullanımının eksiklikleri de vardır. Bunlar; bu ölçümlerle numune alınamadığından zemin sınıflamasının yüzde yüz doğrulukla yapılamaması ve jeofon aralıklarının geniş tutulması durumunda ince tabakaların belirlenememesidir. Kayma dalga ölçümleri küçük gerilmelerle yapılır. Buna karşın gözenek suyu basıncı ve sıvılaşma yüksek gerilme olaylarıdır ve bu ancak tutturulmuş zeminler için önemli olabilir. Çünkü yerde küçük değişimler yapan kayma dalgaları zayıf tanecik ilişkili zeminlere çok duyarlıdır (Andrus ve Stokoe, 2000).

Yukarıda açıklanan nedenlerle suya doygun gevşek zeminlerde depremlerin oluşturduğu yinelemeli gerilme oranının yerde küçük değişimler yapan kayma dalga hızları ile Seed vd., tarafından geliştirilen deprem büyüklüğüne bağlı baskın dönemler kullanılarak elde edilebileceği gösterilmiştir (Seed vd., 1969; Uyanık, 2002). Bu çalışmada verilen bağıntının uygulanabilir olması, farklı bölgelerde meydana gelmiş 21 deprem verisi ile değişik bölgelerde ölçülen küçük değişimler yapan kayma dalga hızları ve diğer zemin parametrelerine ilişkin veriler düzenlenmiştir (Uyanık, 2002).

## 2. YİNELEMELİ YADA KAYMA GERİLME ORANI (CSR YADA KGO)

Suya doygun zeminlerde basınç dalgaların (boyuna dalga) yayılımını çok az basınç gerilmeleri oluşturmaktadır (Ishihara, 1996). Yani basınç dalgası gözeneklerdeki suda

yayılabildiği için bu dalga ile üretilen efektif gerilmelerde değişme olmayacaktır. Bundan dolayı basınç dalgalarının etkisi kayma gerilme oranı değerlendirmelerinde ihmal edilmektedir. Bu durumda, kayma dalgalarının yayınımına bağlı yatay kayma gerilmesi, potansiyel sıvılaşma çözümlemesi için gerilmenin temel bileşenidir. Bu amaç doğrultusunda Newton'un 2. yasasını ele alalım (Eşitlik 1).

$$\tau_{\max} = m \cdot a_{\max} \quad (1)$$

Burada  $\tau_{\max}$  : kayma gerilmesi,  $m$  : kütle ve  $a_{\max}$  : yatay yer ivmesi' dir. Zemini bir boyutlu düşünürsek kütle;  $m = \rho \cdot z$  şeklinde yazılır; ve bu değeri Eşitlik 1'de yerine koyarsak Eşitlik 2 elde edilir.

$$\tau_{\max} = \rho \cdot z \cdot a_{\max} \quad (2)$$

Burada  $\rho$ :zeminin kütle yoğunluğudur. Belirli bir  $z$  derinliğindeki zeminin üzerinde belirli bir kalınlığı olan dolgunun esnemez bir kütle olduğu kabul edilmektedir (Seed ve Idriss, 1971). Ancak bu dolgunun esnemez olmayıp deprem esnasında deformasyon gösterecek niteliktedir. Dolayısıyla zeminin etkin kayma gerilmesini belirlemek için gerilme azaltma faktörü ( $r_d$ ) ile en büyük kayma gerilmesi çarpılmaktadır (Eşitlik 3).

$$(\tau_{\max})_g = \rho \cdot z \cdot a_{\max} \cdot r_d \quad (3)$$

Burada zemin kütle yoğunluğu  $\rho = \gamma/g$  ve derinlik ( $z$ ) yerine, bir ucu özgür bir çubuğun baskın döneminden  $T = 4z/V_s \Rightarrow z = T \cdot V_s / 4$  ilişkileri Eşitlik 3'de yerine konursa Eşitlik 4'teki bağıntı elde edilir.

$$(\tau_{\max})_g = \gamma \cdot \frac{TV_s}{4} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot r_d \quad (4)$$

Burada;  $a_{\max}$ : yer yüzeyindeki yatay doruk ivmesi,  $g$ : yer çekim ivmesi ( $981 \text{ cm/s}^2$ ),  $\gamma$ : birim hacim ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ ),  $T$ (s) ve  $V_s$ (m/s) ise birim düzenlemesi sonucunda en büyük kayma gerilmesi (kPa) olarak Eşitlik 5'deki gibi ifade edilir.

$$(\tau_{\max})_g = 2.45 \cdot \gamma \cdot TV_s \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot r_d \quad (5)$$

Ayrı birim hacim ağırlıklarına ve kayma dalga hızları olan tabakalı ortamlarda Eşitlik 6 elde edilir.

$$(\tau_{\max})_g = 2.45 \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot r_d \cdot T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{si} \quad (6)$$

Dinamik düşey gerilme Eşitlik 7'deki gibi yazılırsa Eşitlik 6, Eşitlik 8'deki gibi belirlenir.

$$\sigma_{V_s} = 2.45T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{Si} \quad (7)$$

$$(\tau_{\max})_g = \sigma_{V_s} \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot r_d \quad (8)$$

Eşitlik 7 hesaplanırken kullanılan kayma dalga hızı, efektif gerilme ile düzeltilmiş kayma dalga hızıdır ve ( $V_s = V_{si} = V_{sd}$ ) simgeleri ile ifade edilmiştir.

Deprem sırasında zeminin herhangi bir noktasını etkileyen kayma gerilmeleri deprem süresi boyunca farklılık gösterecektir. Dolayısıyla farklı kayma gerilmeleri, tekrarlı gerilme oranının hesabında ortalama kayma gerilmesi olarak ifade edilir. Ortalama kayma gerilmesi ( $\tau_{av}$ ), en büyük kayma gerilmesinin %65 düzeyinde olduğu saptanmıştır (Seed ve Idriss, 1971). Bu kayma gerilmelerini, zemine ilişkin ortalama kayma dalga hızlarından ve yatay yer ivme değerinden elde edildiği için Eşitlik 8 ortalama kayma gerilmesi olarak kabul edilmiştir (Eşitlik 9) (Uyanık, 2002).

$$\tau_{ort} = \sigma_{Vs} \frac{a_{\max}}{g} r_d \quad (9)$$

Eşitlik 8'in her iki tarafı dinamik efektif düşey gerilmeye bölünmesi ile zeminin belirli bir derinliği için kayma gerilme oranı (KGO) Eşitlik 10'daki gibi elde edilir.

$$KGO = \frac{\tau_{ort}}{\sigma'_{Vs}} = \frac{\sigma_{Vs}}{\sigma'_{Vs}} \frac{a_{\max}}{g} r_d \quad (10)$$

Benzer olarak depremin suya doygun zeminlerde oluşturduğu yinelemeli gerilme oranını Eşitlik 11'deki bağıntıyla hesaplanmaktadır (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_V} = 0.65 \frac{\sigma_V}{\sigma'_V} \frac{a_{\max}}{g} r_d \quad (11)$$

Eşitlik 10 ve Eşitlik 11'deki farklılıklar düşey ve efektif gerilmenin farklı parametrelerden hesaplanması ve Eşitlik 10'un sabit bir katsayısının olmamasıdır. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında bu çalışmaya göre elde edilen tekrarlı gerilme oranı (KGO) ve Seed ve Idriss, (1971)'e göre elde edilen tekrarlı gerilme oranı (CSR) olarak ifade edilecektir. Eşitlik 10 ve Eşitlik 11'de;  $r_d$ :gerilme azaltma katsayısı,  $\sigma_{Vs}$ :dinamik düşey gerilme,  $\sigma'_{Vs}$ :dinamik efektif düşey gerilme,  $\sigma_V$ :Düşey gerilme ve  $\sigma'_V$ : Efektif düşey gerilmedir.

Eşitlik 10'da belirtilen parametrelerin açıklanması ile KGO daha iyi anlaşılacaktır. Dinamik düşey gerilme Eşitlik 7'de ifade edilmiştir. Burada;  $\gamma$  birim hacim ağırlıktır ve basınç dalga hızı ( $V_p$ ) ile birim hacim ağırlık arasındaki deneysel ilişki Eşitlik 12'deki bağıntı kestirilebilir (Gardner vd., 1974).

$$\gamma = 0.31V_p^{0.25} \quad (12)$$

Bu eşitlik de  $V_p$ 'nin birimi (m/s) kullanılır ve  $\gamma$  ( $\text{gr/cm}^3$ ) olarak bulunur.

## 2.1. Deprem Dalgasının Baskın Salınım Dönemi

Değişik deprem büyüklükleri için depremlerin odak uzaklığına bağlı ortalama baskın periyotları belirleyen bir abak geliştirmişlerdir (Seed vd., 1969). Deprem kayıtlarından bulunan periyotlar ile mikrotremor kayıtlarından elde edilen zeminin baskın salınım dönemleri arasında özellikle sığ derinliklerde iyi bir uyum olduğu Y.Ohsaki ve O.Sakaguchi tarafından verilmiştir (Taban ve Gençoğlu, 1975).

Bu çalışmada, farklı büyüklüklere ait deprem dalgasının baskın dönemlerini belirlemek için depremin odak uzaklığı 50 km ve daha küçük varsayılmıştır. Bu varsayım ile birlikte Seed vd., tarafından geliştirilen deprem büyüklüğüne bağlı olarak deprem kırığından uzaklık (R) ve deprem dalgasının baskın dönemi (T) arasındaki ilişkiler kullanılarak Çizelge 1

oluşturulmuştur (Seed vd., 1969; Uyanık, 2002). Bu çizelgede zeminler için varsayılan baskın dönemler Eşitlik 11'in hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Çizelge 1. Farklı büyüklüklü depremler için baskın titreşim periyotları  $50\text{km} \geq R$

M	T(s)
7.7	0.379
7.6	0.364
7.5	0.35
7.4	0.348
7.3	0.347
7	0.307
6.9	0.302
6.6	0.285
6.5	0.28
6.2	0.264
6.1	0.256
6	0.253
5.9	0.25

## 2.2. Dinamik Efektif Düşey Gerilme ( $\sigma'_{Vs}$ )

Yüzeyden belirli bir derinlikte ve yeraltı su tablasının altındaki bir zemin elemanının dinamik düşey gerilmesi tanımlanmıştır. Buna göre efektif düşey gerilme Eşitlik 13'deki gibi ifade edilmektedir (Terzaghi ve Peck, 1948).

$$\sigma'_V = \sigma_V - u \quad (13)$$

Burada  $u$  göz önüne alınan zemin içindeki gözenek suyu basıncı Eşitlik 14'teki bağıntılar ile verilebilir.

$$u = (z - z_w)(\gamma_{sa} - \gamma_w) \quad \text{yada} \quad u = (z - z_w)(\gamma_{sa} - \gamma_1) \quad (14)$$

Burada bazı araştırmacılar suyun birim hacim ağırlığını ( $\gamma_w$ ), bazıları ise yeraltı suyu üzerindeki birim hacim ağırlığını ( $\gamma_1$ ) kullanmışlardır. Bu eşitliği ( $kPa$ ) türünden belirlemek için  $z$  (m) ve  $\gamma$  ( $gr/cm^3$ ) alınır ve birim düzeltmesi yapılırsa Eşitlik 15 elde edilir.

$$u = 9.81(z - z_w)(\gamma_{sa} - \gamma_1) \quad (kPa) \quad (15)$$

Eşitlik 13 dinamik olarak ifade edilirse

$$\sigma'_{Vs} = \sigma_{Vs} - u$$

ve Eşitlik 7 ile Eşitlik 15 burada yerine konursa, dinamik efektif düşey gerilme Eşitlik 16'aki hale dönüşür.

$$\sigma'_{Vs} = 2.45T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{Si} - 9.81(z - z_w)(\gamma_{sa} - \gamma_1) \quad (16)$$

Birimi ise  $kPa$ 'dır. Burada  $z$ :araştırma derinliği (m),  $z_w$ :yeraltı su seviyesinin derinliği (m),  $\gamma_{sa}$ :yeraltı su seviyesinin altındaki ortamın birim hacim ağırlığı ( $gr/cm^3$ ), ve  $\gamma_1$ : yeraltı suyunun üstündeki ortamın birim hacim ağırlığıdır ( $gr/cm^3$ ).

### 2.3. Gerilme Azaltma Katsayısı ( $r_d$ )

Eşitlik 10 ve Eşitlik 11’de verilen  $r_d$  olarak gösterilen gerilme azaltma katsayısını Seed ve Idriss’de zemin şartları ve değişik deprem titreşimleri kullanarak deneysel olarak belirlemiştir (Seed ve Idriss, 1971). Bu  $r_d$  değerleri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak kestirilebilir (Eşitlik 17) (Liao ve Whitman, 1986; Robertson ve Wride, 1997).

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad z < 9.15\text{m} \quad (17a)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15 < z < 23\text{m}. \quad (17b)$$

$$r_d = 0.744 - 0.008z \quad 23 < z < 30 \quad (17c)$$

### 2.4. Efektif Düşey Gerilme İle Düzeltilmiş Kayma Dalga Hızı ( $V_{sd}$ )

Yerinde kayma dalga hızları bir çok sismik test ile bulunmaktadır. Karşıt kuyu, yüzey-kuyu, kuyu-yüzey, sismik konik penetrometre, Suspansiyon Log, yüzey dalgalarının spektral analizi ve sismik kırılma bu testlerden bazılarıdır. Testlerden elde edilen hızların doğruluğu, özenli çalışmaya, zeminin şartlarına ve yorumlama tekniklerine bağlıdır. Kayma dalga hızını etkileyen önemli faktörlerden biri de zemindeki mevcut gerilmedir (Hardin ve Drnevich, 1972). Ayrıca laboratuvar deney sonuçları, kayma dalga hızının, dalga yayılım ve tanecik titreşim yönündeki birincil gerilmelere bağlı olduğunu gösterir (Roesler, 1979; Stokoe vd., 1985). Kayma dalga hızının, referans gerilme ile efektif düşey gerilmeye bağlı düzeltilebileceğini Eşitlik 18’deki deneysel ilişkiyle gösterilmiştir (Sykora, 1987; Robertson vd., 1992).

$$V_{sd} = V \left( \frac{P_a}{\sigma_v} \right)^{0.25} \quad C_v = \left( \frac{P_a}{\sigma_v} \right)^{0.25} \quad (18)$$

Burada,  $V_{sd}$ : efektif düşey gerilme ile düzeltilmiş kayma dalga hızı,  $V$ :yerinde ölçülmüş kayma dalga hızı,  $C_v$ :düzeltme faktörü,  $P_a$ :100 kPa referans gerilme yada atmosfer basıncı ve  $\sigma_v$ :efektif düşey gerilme (kPa).

Eşitlik 10’da belirtilen dinamik düşey gerilme hesaplanırken kullanılan kayma dalga hızı efektif düşey gerilmeye bağlı düzeltilmiş kayma dalga hızlarıdır.

## 3. DEPREM VE SAHA VERİLERİ

Kayma dalga hız ölçümleri sıvılaşıp ve sıvılaşmamış bir çok zemin üzerinde uygulanmıştır. Değişik araştırmacılar tarafından çalışılan 20 deprem ve 70’den fazla bölgenin verileri kullanılmıştır (Uyanık, 2002). Çizelge 2’de bu 20 adet depremin listesi ve zemin tipleri verilmiştir.

Kayma dalga hızları, karşıt-kuyu, yüzey-kuyu, sismik koni, suspansiyon log, yüzey dalgalarının spektral analizi ve sismik kırılma ölçümleri ile tespit edilmiştir. Bu ölçüm teknikleri ve 20 deprem birleştirilerek toplam 202 saha verisi elde edilmiştir. Bu verilerin 144’ü ABD’den, 24’ü Tayvan’dan, 28’i Japonya’dan, 6’sı Çin’den dir. Tüm veriler, dünyada 95 yıl içerisinde meydana gelen depremlerden ve farklı topografyası olan arazilerden sağlanmıştır. Bu verilerin deprem büyüklükleri 5.9-7.7 aralığındadır (Şekil 1). En büyük yatay doruk ivmesi 0.01-0.65g arasında değişmektedir. Zeminler ise Holosen yaşlı, kil’den çakıla doğru değişik türde ve çimentolanmamış özelliklerdedir. Veri alınan arazilerde ortalama

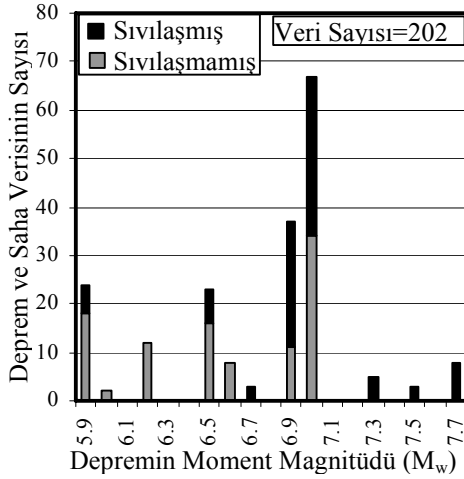
araştırma derinliği 20m'den az olup, yeraltı su seviyesinin derinliği 0.5-15m arasındadır (Şekil 2).

Değişik ölçü teknikleri ile elde edilen kayma dalga hız değerlerinin bazıları yeraltı su seviyesinin altında bazıları da yüzeyden derine doğru elde edilmiştir. Araştırmacılarca rapor edilen kayma dalga hızları efektif düşey gerilmeye göre düzeltilerek kullanılmıştır. Düzeltilmiş kayma dalga hızının ( $V_{sd}$ ) yeraltı suyu üzerinde ve altındaki dağılımı Şekil 3'de verilmiştir. Verilerin çoğunda  $V_{sd}$  için düzeltme katsayısı ( $C_v$ ) 1.4-0.9 aralığında bulunmuştur. Toplam gerilme ( $\sigma_v$ ) ve  $\sigma_v$  değerleri araştırmacılar tarafından belirlenen zemin birim hacim ağırlıkları kullanılarak hesaplanmıştır. Yeraltı su tablasının altındaki yoğunlukların yığınsal (kümülatif) dağılımı Şekil 4'de gösterilmektedir.

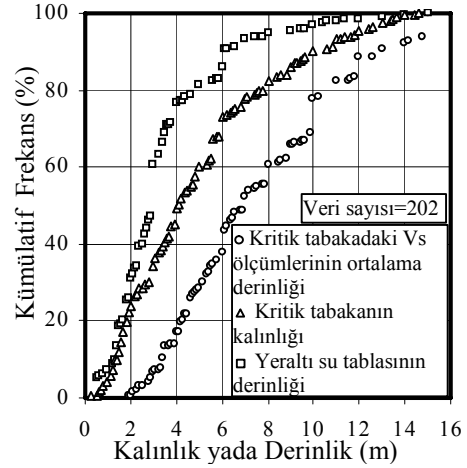
Çizelge 2. Yinelemeli yada kayma gerilme oran ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılan depremler ve zemin gözlemleri

Deprem ve Yeri	$M_w$	T	Zeminlerin Saha Gözlemleri *								
			Çakıl		Kum		Silt		Kil		
			E	H	E	H	E	H	E	H	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1906 San Francisco, Calif.	7.7	0.379	4	-	4	-	-	4	-	-	-
1964 Niigata, Japan	7.5	0.350	-	-	3	1	-	-	-	-	-
1975 Haicheng, China	7.3	0.347	-	-	1	1	2	-	2	-	-
1979 Imperial Valley, Calif.	6.5	0.280	-	-	3	1	1	6	-	-	-
1980 Mid-Chiba, Japan	5.9	0.250	-	-	-	2	-	-	-	-	-
1981 Westmorland, Calif.	5.9	0.250	-	-	1	3	5	2	-	-	-
1983 Borah Peak, Idaho	6.9	0.302	15	3	-	-	-	-	-	-	-
1985 Chiba-Ibaragi, Japan	6.0	0.253	-	-	-	2	-	-	-	-	-
1986 Event LSST4, Taiwan	6.6	0.285	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1986 Event LSST7, Taiwan	6.6	0.285	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1986 Event LSST8, Taiwan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1986 Event LSST12, Taiwan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1986 Event LSST13, Taiwan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1986 Event LSST16, Taiwan	7.6	0.400	-	-	-	-	-	4	-	-	-
1987 Elmore Ranch, Calif.	5.9	0.250	-	-	-	4	-	7	-	-	-
1987 Chiba-toho-oki, Japan	6.5	0.280	-	-	-	1	-	-	-	-	-
1987 SuperstitionHills, Calif.	6.5	0.280	-	-	-	4	3	4	-	-	-
1989 Loma Prieta, California	7.0	0.307	-	4	28	22	5	8	-	-	-
1994 Northridge, California	6.7	0.291	-	-	3	-	-	-	-	-	-
1995 Hyogo-ken-Nanbu, Jap.	6.9	0.302	2	3	4	-	5	5	-	-	-

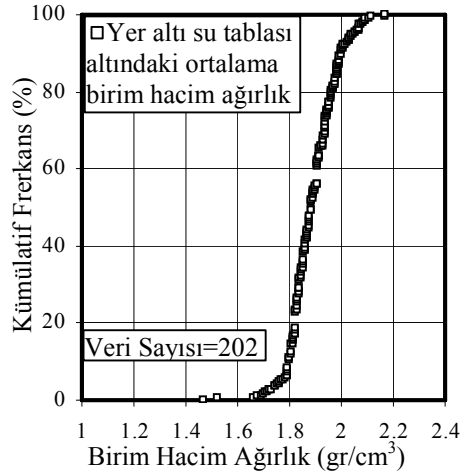
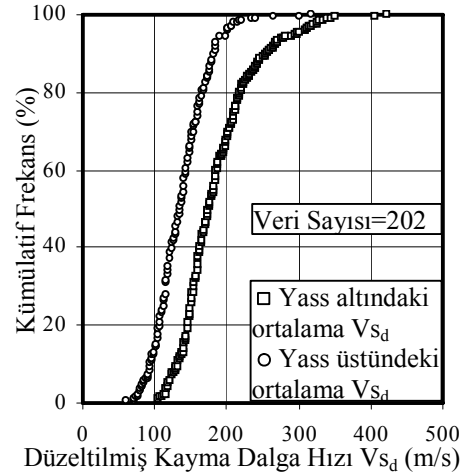
\* E: Sıvılaşır H: Sıvılaşmaz



Şekil 1. Deprem büyüklüğü ve saha verilerinin sayısı



Şekil 2. Saha Verilerinin Kümülatif Dağılımları

Şekil 3. Yass. üstünde ve altındaki ortalama  $V_{s_d}$  değerlerinin kümülatif dağılımları

Şekil 4. Yass. altındaki zemin yoğunluğunun kümülatif dağılımı

#### 4. TEKRARLI GERİLME ORANLARININ (KGO VE CSR) ÖRNEK HESAPLARI

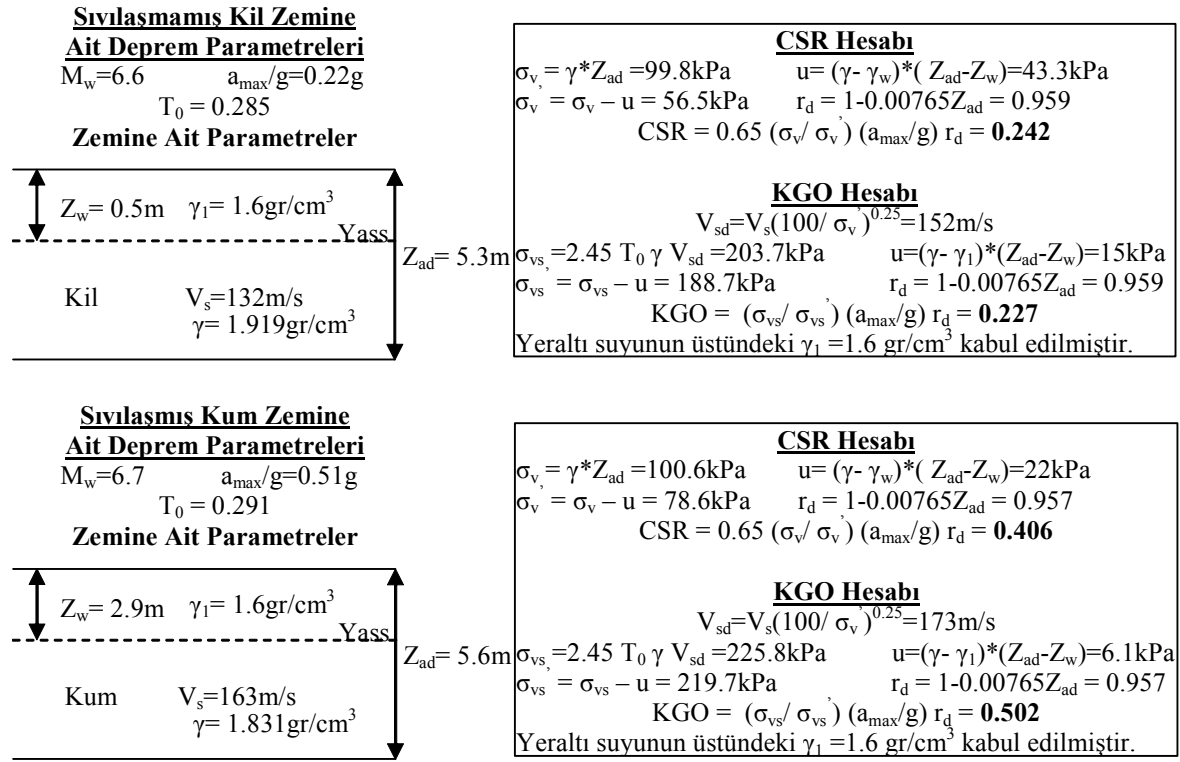
Farklı tekniklerle yapılan tekrarlı gerilme oran hesabını daha iyi anlamak için 1994 Northridge, California  $M_w=6.7$  olan deprem ve sıvılaşmış zeminin parametreleri, 1986 Event Lsst4, Taiwan  $M_w=6.6$  olan deprem ve sıvılaşmamış zeminin parametreleri ve bunlara ilişkin yinelemeli gerilme oran hesapları örnek olarak yapılmıştır (Şekil 5).

#### 5. TEKRARLI GERİLME ORANLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Deprem magnitüdü zemini etkileyen parametrelerden biridir. Yeraltı su seviyesinin altında suya doygun katman (Kritik katman) derinliğinin ve kalınlığının, yeraltı su seviye derinliğinin, zeminin yoğunluğunun ve kayma dalga hızının değişmediği bir ortama etki eden büyüklük arttıkça, o ortamdaki yinelemeli gerilme oran değeri de artar. Buna bağlı olarak çizelgeler hazırlanırken veriler moment büyüklüğüne göre ölçeklenmiştir. Sıvılaşan bir ortamın yinelemeli gerilme oranı, sıvılaşmama durumuna göre daha büyük değerdedir.



Böylece sıvılaştıran ve sıvılaşmayan bölgelere ilişkin verileri kullanarak hesaplanan CSR ve KGO değerlerinin karşılaştırılması için kayma dalga hızına bağlı olarak örnek şekiller oluşturulmuştur (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8). Sözü edilen şekillerde belirtilen KGO ve CSR değerleri aynı işaretlerle fakat farklı renklerle gösterilmiştir. Ayrıca sıvılaşmış verileri gösteren işaretlerin içi dolu, sıvılaşmamış verileri gösteren işaretlerin içi dolusuzdur.

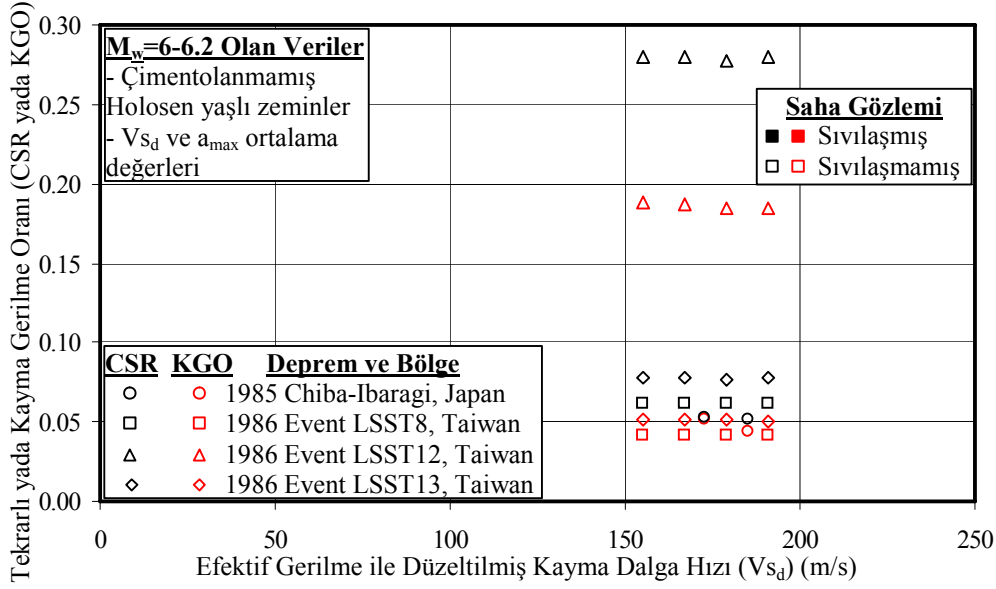


Şekil 5. Tekrarlı gerilme oranının (CSR yada KGO) farklı teknikler ile hesaplamaları

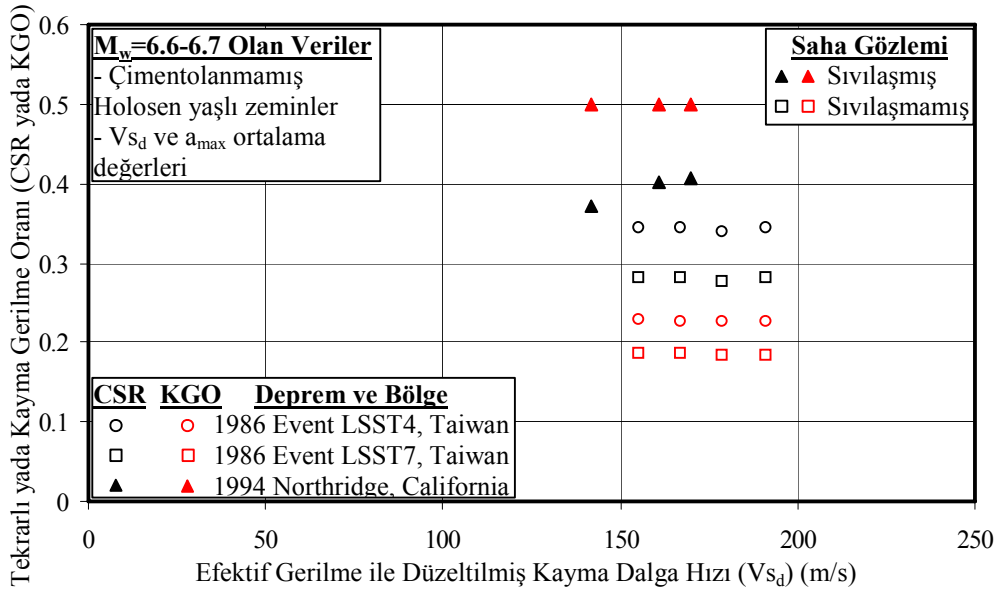
Çizelge 1’de belirtilen tüm depremler için bu çizelgeler hazırlanmış fakat burada en çarpıcı olanlar örnek olarak sunulmuştur. Şekil 6’da  $M_w=6,0$  olan 1985 Chiba-Ibaragi-Japan ve  $M_w=6,2$  olan 1986 Event LSST8, LSST12, LSST13-Taiwan, Şekil 7’de  $M_w=6,6$  olan 1986 Event LSST4, LSST7 Taiwan ve  $M_w=6.7$  olan 1994 Northridge California ve şekil 8’de  $M_w=7.6$  olan 1986 Event LSST16, Taiwan ve  $M_w=7.7$  olan 1906 San Francisco, California depremlerinin etkilediği bölgelerden elde edilen verilerden hesaplanan CSR ve KGO değerleri  $V_{sd}$  bağlı olarak işlenmiştir. Burada içi dolu işaretleri incelediğimizde KGO değerleri CSR’ye göre daha büyük ve içi boş işaretlerde ise çoğunlukla daha düşük yada eşit olduğu görülmektedir. Bu durum, sıvılaşma ayrımının KGO değerlerine göre daha net yapılabileceğini göstermektedir.

Genel olarak tüm şekiller incelendiğinde, düzeltilmiş kayma dalga hızı 200m/s’den daha düşük ise, sıvılaştıran verilerin KGO değerleri, CSR değerlerine göre daha büyüktür. Bunun nedeni sıvılaşmanın olduğu ortamların genelde gevşek ve suya doygun zeminler olması ve bu tip zeminlerde yüksek yinelenmeli gerilmelerin oluşmasıdır. Ayrıca suya doygun gevşek zeminlerin  $V_s$ ’de düşüktür.  $V_{sd}$ ’nin yüksek değerleri ortamın sıkı-sert, sağlam veya tutturulmuş olduğunu gösterir. Sıvılaşma ise tutturulmamış zeminlerde beklenir. Dolayısıyla  $V_{sd}$  değerlerinin yüksek olduğu zeminlerde sıvılaşma beklenmeyeceğinden KGO değerinin düşük çıkması doğaldır.

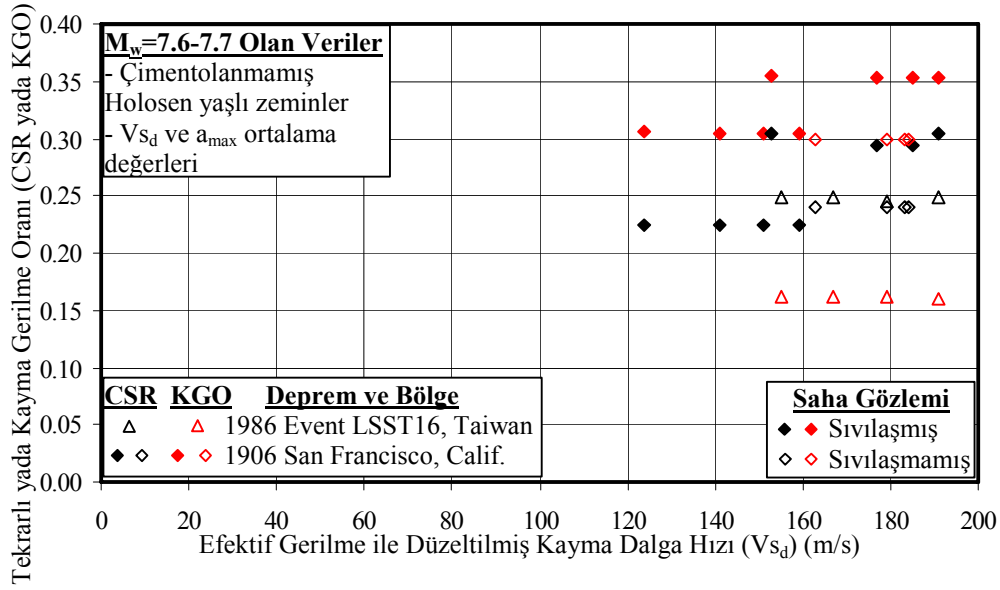
Çalışılan verilerde, deprem parametreleri sabit olan bir ortamın  $V_s$ 'i büyüdükçe yinelemeli gerilme oran değeri çok az küçülür. Eğer bu verilere daha geniş aralıklı  $V_s$  değerleri eklenirse tekrarlı gerilme oran değerleri ile arasındaki ters ilişki daha net görülebilir. Tekrarlı gerilmeler, depremin ivmesine, yeraltı su seviyesinin yüzeye yakınlığına, kayma dalga hızına ve zeminin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir.



Şekil 6.  $M_w=6-6.2$  olan depremlerin tekrarlı yada kayma gerilme oranlarının karşılaştırılması



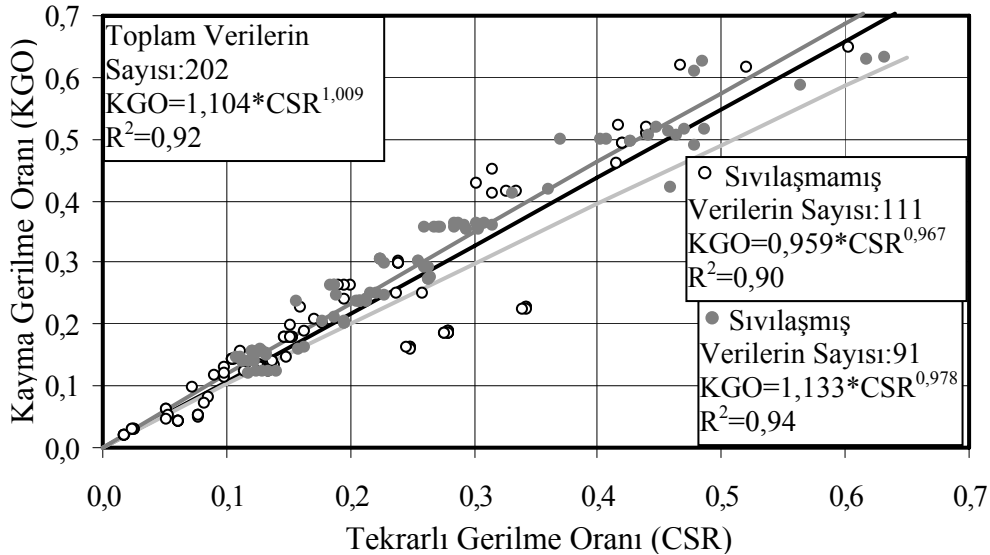
Şekil 7.  $M_w=6.6-6.7$  olan depremlerin tekrarlı yada kayma gerilme oranlarının karşılaştırılması



Şekil 8. M<sub>w</sub>=7.6-7.7 olan depremlerin tekrarlı yada kayma gerilme oranlarının karşılaştırılması

Şekil 8’de M<sub>w</sub>=7.7 olan 1906 San Francisco, California depreminde sıvılaşmayan verilerin KGO değerleri CSR değerlerinden daha büyük çıkmasının nedeni sıvılaşmanın yüzeyde gözlenmemesi derinlerde sıvılaşmanın olması olarak yorumlanır.

Bu şekillere ek olarak tüm verilerin KGO ve CSR değerleri Şekil 9’da karşılaştırılmıştır. Bu şekilde içi dolu gri renkli daireler sıvılaşmış verileri ve içi boş daireler ise sıvılaşmamış verileri simgeler. Sıvılaşmış verilerin eğrisi gri renkli, sıvılaşmamış verilerin eğrisi açık gri renkli ve tüm verilerin eğrisi siyah renklidir. Bu karşılaştırma sonuçları Şekil 9 üzerinde gösterilmektedir. Bu ilişkiler incelendiğinde sıvılaşmamış verilerin KGO değeri CSR değerinden daha düşük elde edilirken sıvılaşmış verilerde tam tersi sözkonusudur.



Şekil 9. Tekrarlı ve kayma gerilme oranları (CSR ve SSR) arasındaki ilişki

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

KGO ve CSR'ye göre hesaplanan yinelemeli gerilme oran değerleri arasında ortalama %92'ye varan bir uyum seviyesi elde edilmiştir.

KGO'ya göre hesaplanan tekrarlı gerilme oran değeri, deprem parametreleri olarak en büyük yatay doruk ivmesine ve deprem dalgasının baskın titreşim periyoduna, zemin parametreleri olarak da yeraltı su tablasının derinliğine, zeminin kayma dalga hızına ve yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca sabit bir katsayısı yoktur.

Sıvılaşma çözümlemesi için KGO ilişkisinin kullanımı ile sıvılaşır ve sıvılaşmaz bölgelerin ayrımı daha net yapılabilir.

Kritik katmanın yüzeye yakın olduğu ve sıvılaşmanın gerçekleştiği ortamlarda KGO'ya göre tekrarlı gerilme oran değeri, CSR'ye göre daha büyük değer verirken sıvılaşmanın oluşmadığı ortamlarda daha düşük değer vermektedir.

Bu çalışmadan sonra sıvılaşmış ve sıvılaşmamış verilerin ayrımını ortaya koyacak bir eğrinin (Kayma Direnç Oranı (KDO)) geliştirilmesi ve bu parametre ile birlikte KGO ve  $V_{sd}$  kullanılarak sıvılaşma çözümlenmesi yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Andrus R.D., Stokoe K.H. (2000): "Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (ASCE) 126, pp. 1015-1025.
- Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. (1974): "Formation Velocity and Density the Diagnostic Basics for Stractigraphic Traps", *Geophysics*, 39, pp. 770-780.
- Hardin B.O., Drenevich V.P. (1972): "Shear Modulus and Damping in Soils: Desing Equations and Curves", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)* 98, pp. 667-692.
- Ishihara K. (1996): "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics", Clarendon Press, Oxford p. 350.
- Liao S.S.C., Whitman R.V. (1986): "Overburden Correction Factors for SPT in Sands", *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 112, pp. 373-337.
- Nazarin S., Stokoe K.H. (1984): "In Situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Waves", *Proceedings of the 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Vol. III, pp. 31-38.
- Robertson P.K., Woeller D.J., Finn W.D.L. (1992): "Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa 29, pp. 686-695.
- Robertson P.K., Wride C.E. (1997): "Cyclic Liquefaction and Evaluation Based on the SPT and CPT, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Technical Report NCEER-97-0022* (Eds. Youd, T.L. and Idriss, I.M.) Buffalo, NY, 41-87.
- Roesler S.K. (1979): "Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy", *Journal Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, 105(7), pp. 871-880.
- Seed H.B., Idriss I.M. (1971): "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)* 97, pp. 1249-1273.
- Seed H.B., Idriss I.M., Kiefer F.W. (1969): "Characteristics of Rock Motion During Earthquakes", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)* 9 (SMS).

- Stokoe K.H.II, Lee S.H.H., Knox D.P. (1985): "Shear Module Measurements Under True Triaxial Stresses", Proceedings, Advancers in the Art of Testing Soil Under Cyclic Conditions (ASCE), 166-185.
- Stokoe K.H., Nazarin S. (1983): "Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves", Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, pp. 91-4.
- Stokoe K.H., Wright S.G., Bay J.A., Roesset J.M. (1994): "Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method", Geotechnical Characterization of Site, Special volume of ISSMFE TC10, New Delhi.
- Sykora D.W. (1987b): "Cretation of a Data Base of Seismic Shear Wave Velocities for Correlation Analysis", Geotechnical Laboratory Miscellaneous, Paper GL 87-26.
- Tabban A., Gencoğlu S. (1975): "Deprem ve Parametreleri", Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 11.
- Terzaghi K., Peck R.B. (1948): "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, New York, p.566.
- Uyanık O. (2002): "Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi", DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), s.190, İzmir (yayınlanmamıştır).