

Kayma Dalga Hızı ve Etkin Titreşim Periyodundan Sıvılaşma Çözümlemesi için Yeni Bir Yöntem

Osman UYANIK^{1*}, Ata Güngör TAKTAK²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü / ISPARTA

²Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü-Buca / İZMİR

Alınış Tarihi:20.11.2008, Kabul Tarihi:23.03.2009

Özet: Bu çalışmada kayma dalga hızı ve deprem dalgasının hakim periyodu kullanılarak zeminlerin sıvılaşma çözümlemesini yapabilmek için yeni bir yöntem açıklanacaktır. Bu yöntem Seed-Idriss'in sıvılaşma çözümlemesinin genel biçimine benzerdir. Önerilen yöntem, temiz ince kumdan kumlu çakılla ve siltli kil tabakalarını içeren zeminlerde, farklı araştırmacılar tarafından 22 deprem ve alınan saha ölçüm verileri ile doğrulanmıştır. Bu yöntem, yerinde yapılan çalışmalar sonucunda bulunan verilerden, sıvılaşmanın gözlemlendiği sahaların tümünün sıvılaşma potansiyelini doğru tahmin etmektedir. Önerilen yöntemde uygulamaların genişletilmesi için daha güçlü yer hareketleri ile sarsılmış ($a_{max}>0.48g$), daha yoğun zeminlerden ($V_s>250m/s$) ve özellikle daha derin tortullarda ($z_{sd}>10m.$) sıvılaşmanın olduğu yada olmadığı tüm zemin tipleri için ek saha çalışmaları gerekmektedir. Bu yöntem bölgesel çalışmalarda uygulamacılar için zeminin potansiyel sıvılaşma değerlendirmelerinde oldukça kolaylık sağlar ve araştırmacılar için bir kaynak doküman olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Kayma Dalga Hızı, Sıvılaşma, Kayma Direnç Oranı, Tekrarlı Gerilme Oranı, İncelik İçeriği

A New Method for Liquefaction Analysis From Shear Wave Velocity and Predominant Resonance Period

Abstract : In this study, a new liquefaction analysis method based on shear wave velocity and predominant periods of earthquake waves for evaluating the liquefaction analysis of soils is presented. This method follows the general format of the simplified procedure developed by Seed and Idriss.

The proposed procedure was confirmed by case history data by various researchers from 22 earthquakes and measurement sites in soils ranging from clean fine sand to sandy gravel to profiles including silty clay layers. This method correctly predicts liquefaction potential of the liquefaction case histories. To extension the practice of the proposed procedure, additional case histories are required with all soil types that have and have not liquefied, especially deeper deposits ($z_{sd}>10m.$) and from denser soils ($V_s>250$) shaken by stronger earthquakes ($a_{max}>0.48g$). This procedure, while providing practice in potential liquefaction evaluation of soils, can be used as a resource document for researchers.

Key words: Shear Wave Velocity, Liquefaction, Shear Resistance Ratio, Cyclic Stress Ratio, Fines Content

Giriş

Deprem bölgelerinde zeminin sıvılaşma direncinin önceden tahmini, mevcut yapıların güçlendirilmesinde ve yeni yapıların mühendislik tasarımında önemli bir adımdır. Seed ve Idriss 1802 ve 1887 yıllarında meydana gelen Niigata, 1891'de Mino Ovari, 1925'de Santa Barbara, 1940'da El Centro, 1944'de Tohankai, 1948'de Fukui, 1957'de San Francisco, 1960'da Chile ve 1964'de Niigata ve Alaska depremlerinden zeminin sıvılaşma direnç değerlendirmeleri için 1960'lı yılların sonuna doğru basit bir yöntem geliştirmişlerdir (Seed ve Idriss, 1971). Bu yöntem zeminin sismik yükünü yansıtan doruk ivme ile göreceli sıklık arasında ilişkiler kullanılarak geliştirilmiştir. 1971'den günümüze, bu yönteme bağlı olarak zeminin sismik yükünü belirleyen tekrarlı gerilme oranı ile SPT'den elde edilen darbe sayıları arasındaki ilişkilerle güncelleştirilmiştir (Seed, 1979; Seed ve Idriss, 1982; Seed vd., (1983; 1985); Youd vd., (1997; 2001)). Sismik dalga hızlarının ölçümleri SPT'ye bağlı yöntemi destekler yada alternatif oluşturur. Özellikle kayma dalga hızı (V_s) sıvılaşma direncinin yada sismik yükün belirlenmesinde bir parametre olarak kullanımı

kaçınılmazdır. Çünkü V_s , sıvılaşma direnci ve sismik yük gibi parametreler; zeminin boşluk oranından, gerilme durumundan, yaşından, efektif basıncından, bağlı sıklığından benzer bir biçimde etkilenmektedir. Bunlara ek olarak V_s 'in kullanımının bazı avantajları (Dobry vd.,1981; Seed vd., 1983; Stokoe vd.,1988a; Tokimatsu ve Uchida, 1990; Kayen vd., 1992; Türker, 1996; Kayabali, 1996; Andrus ve Stokoe II, 2000; Uyanık, 2002) araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur. Bunlar;

-SPT'nin uygun olmadığı çakıllı zeminlerde V_s ölçümleri yapılır.

- V_s ölçümleri laboratuarda numuneler üzerinde de uygulanabilmesinden dolayı zeminin laboratuvar ve saha davranışları arasında doğrudan karşılaştırma yapmak mümkündür.

- V_s zeminin mekanik özelliğini, zemin-yapı analizi ve depremin yer cevabı için gerekli olan kayma modülü ile doğrudan ilişkilidir.

-Vs sondajların uygulanmadığı kaya dolgu alanlarda, çakıl karışımı numune alımı zor olan alanlarda, hızlı değerlendirmelerin gerekli olduğu çok geniş alanlarda sismik kırılma, yüzey dalgalarının spektral analiziyle belirlenebilir.

Bu çalışma, Seed ve Idriss (1971) sınıflama yönteminin genel biçimini izlemektedir. Fakat bu çalışmada, depremlerden etkilenen zeminin sismik yükünü ifade eden tekrarlı gerilme oranı (KGO), Seed ve Idriss (1971)'den farklı olarak deprem dalgasının etkin periyodu (T) ve zeminin kayma dalga hızı kullanılarak belirlenmiştir (Bkz. eşitlik 2 ve 3). Seed ve Idriss (1971)'de KGO değerini hesaplarırken depremin ivmesini kullanmıştır. Bu çalışmada ise KGO değeri hesaplanırken depremin ivmesine ek olarak deprem dalgasının etkin periyodu ve zeminin kayma dalga hızı da kullanılmıştır. Ayrıca sınıflama riski taşıyan zeminin Vs'i efektif düşey gerilme ile düzeltilmiştir (Bkz. eşitlik 4). Bunlara ek olarak zeminin sınıflama direncini (KDO) belirlemek amacı ile Andrus ve Stokoe II (1997) analitik ilişkisi kullanılarak güncelleştirilmiştir (Bkz. eşitlik 5). Bu sınıflama çözümlene yöntemi, Uyanık (2002)'de sınıflandırılan 22 adet deprem ve 200 den fazla Vs ölçümünü içeren verilerle denetlenmiştir. Sonuç olarak kayma dalga hızı ve deprem dalgasının etkin periyoduna bağlı geliştirilen sınıflama çözümlene yöntemi, kullanılan veriler içerisinde sınıflanan verilerin tamamının sınıflama bölgesinde ve sınıflanmayan verilerin %66'dan fazlasının sınıflanmayan bölgede çıkmasını sağlamıştır (Bkz Şekil 2).

Kayma Dalga Hızından Sınıflama Direnci

Yinelemeli yada Kayma Gerilme Oranı (CSR-KGO)

Yeraltı suyunun altındaki zemin malzemesinin yinelemeli gerilme oranı (CSR) eşitlik 1 ile ifade edilir (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (1)$$

Burada; τ_{av} : Depremin neden olduğu yinelemeli kayma gerilmesinin ortalama değeridir ve 0.65 katsayısı en büyük gerilmenin %65 olduğu kabul edilmektedir, a_{max} : En büyük (doruk) ivme, g: Yer çekimi ivmesi, σ_v : İncelenen tabaka derinliğindeki toplam düşey gerilme, σ'_v : Aynı derinlikteki efektif gerilme ve r_d : Kayma gerilmesi azaltma katsayısıdır.

Bu çalışmada, Seed ve Idriss (1971)'de belirlediği eşitlik 1 yerine Uyanık (2006)'ın önerdiği eşitlik 2 kullanılmıştır. Eşitlik 2'nin eşitlik 1'den farklılığı deprem dalgasının etkin periyodunu ve zeminin kayma dalga hızını kullanarak hesaplanmasıdır. Bu parametreler ile depremin zeminde oluşturacağı kayma gerilme oran değeri daha doğru hesaplanır. Çünkü zemine etki eden kuvvet, deprem kuvvetidir. Dolayısıyla depremin ivmesinin yanı sıra etkin periyodunun ve zeminde yayılma hızının kullanılması daha doğru sonuçlar üretmektedir. Bu durum, Uyanık (2006)'daki şekiller incelendiğinde görülecektir.

$$KGO = \frac{\tau_{ort}}{\sigma'_v} = \frac{\sigma_{Vs}}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (2)$$

Burada; σ_{vs} : Kayma dalga hızı ve deprem dalgası periyodundan hesaplanan incelenen derinlikteki dinamik düşey gerilme, σ'_v : Aynı parametreler ile hesaplanan ve aynı derinlikteki efektif dinamik düşey gerilmedir.

Bu çalışmada, depremin zeminlerde oluşturabileceği tekrarlı yada kayma gerilme oran (KGO) değeri eşitlik 2 den hesaplanmıştır. Eşitlik 2 de belirtilen dinamik düşey gerilme ve efektif dinamik düşey gerilme aşağıdaki matematiksel ifadeler ile kPa biriminde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{Vs} = 2.45T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{Si}$$

$$\sigma'_{Vs} = 2.45T \sum_{i=1}^n \gamma_i V_{Si} - 9.81(z - z_w)(\gamma_{sa} - \gamma_1) \quad (3)$$

Burada; γ : birim hacim ağırlık (gr/cm^3), γ_{sa} : suya doygun birim hacim ağırlık (gr/cm^3), T : Deprem dalgasının periyodu (s), z : incelenen tabaka derinliği (m) ve z_w : yeraltı suyu derinliğidir (m).

Efektif Gerilme ile Düzeltilmiş Kayma Dalga Hızı

Standart penetrasyon test (SPT) darbe sayısını efektif gerilme ile düzeltmek için bilinen eşitliğe benzer olarak Vs'de efektif gerilme ile aşağıdaki eşitlik 4 kullanılarak düzeltilir (Sykora, 1987; Robertson vd., 1992). Eşitlik 4 uygulamasında Vs partikül titreşiminin her iki yönünde ölçüldüğü ve dalga yayılımı birincil gerilme yönleri boyunca polarize olduğu ve bu yönlerden birinin düşey yönde olduğu kabul edilmiştir (Stokoe II vd., 1985).

$$V_{sc} = V_s \left(\frac{Pa}{\sigma'_v} \right)^{0.25} \quad (4)$$

Burada; V_{sc} : efektif gerilme ile düzeltilmiş kayma dalga hızı ve Pa : atmosferik basınç olarak bilinen referans bir gerilmedir.

Kayma Direnç Oranı (KDO)

Yapılan saha çalışmalarından elde edilen kayma dalga hızının (Vs) yada SPT darbe sayısının düzeltilmiş değerleri için sınıflama ve sınıflanmama durumunu ayıran KDO değeri kayma direnç oranı olarak isimlendirilir. KDO fiziksel olarak zeminin doğal direncidir.

Andrus ve Stokoe II (1997; 1999; 2000), Uyanık (2002) ve bu çalışma KDO ve V_{sc} arasında aşağıdaki ilişkiyi önermektedir.

$$KDO = \left[a \left(\frac{V_{sc}}{100} \right)^2 + b \left(\frac{1}{V_{s_{max}} - V_{sc}} - \frac{1}{V_{s_{max}}} \right) \right] MSF \quad (5)$$

Burada; V_{s_c} : Düzeltilmiş kayma dalga hızı, $V_{s_{max}}$: Sıvılaşmanın oluşabileceği düzeltilmiş kayma dalga hızının üst sınır değeri, a ve b: Eğriye uygun parametreler ve MSF: Magnitüd skala faktörüdür.

Eşitlik 5'in ilk terimi Dobry vd. (1982) tarafından önerilen ortalama tekrarlı kayma deformasyon sabiti için V_{s_c} ve KGO arasındaki ilişkiyi yansıtan yenilenmiş bir ilişkidir. İkinci terim, düzeltilmiş kayma dalga hızının düşük değerlerinde küçük bir değer ile ve V_{s_c} nin yüksek değerlerinde $V_{s_{max}}$ sınır değerini gösteren bir hiperboldür. Üçüncü terim ise deprem büyüklüğünün KDO üzerindeki etkisini hesaplayan magnitüd skala faktörüdür ve aşağıdaki ilişki ile ifade edilir (Youd vd., 1997).

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^n \quad (6)$$

Burada; M_w : Moment magnitüd ve n: üstel bir sabittir.

Bu üstel sabit $M_w > 7.5$ depremler için -2.56 ve $M_w \leq 7.5$ depremler için -3.3 olarak tanımlanır (Andrus ve Stokoe II, 1997). Youd vd. (1997) de moment magnitüdü mühendislik uygulamaları için kullanılan en yaygın skala olduğunu belirtmekte ve sıvılaşma direnci hesabında kullanmayı önermektedirler. Bu çalışmada da magnitüd skala faktörü Andrus ve Stokoe II (1997)'nin önerdiği şekliyle kullanılmıştır.

Kayma Direnç Eğri Parametrelerinin Belirlenmesi

Şekil 1 deki analitik çözüm eğrilerinin gelişimi Dobry vd. (1982) önerdiği ortalama kayma deformasyon sabiti için tekrarlı gerilme oranı ve kayma dalga hızı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu çalışmada kayma direnç eğrisinin $V_{s_{max}}$ ile asimptot olduğu ve bu asimptotun standart penetrasyon testine bağlı sıvılaşma yöntemlerinde elde edilen asimptota eşit olduğu görülmüştür. SPT ye bağlı sıvılaşma analizinde, düzeltilmiş SPT darbe sayısının $(N_1)_{60} > 30$ değerlerinde sıvılaşma olmasının mümkün olmadığı belirtilir (Seed vd., 1985; Youd vd., 1997). Darbe sayıları ve kayma dalga hızının üst sınır değerinde negatif gözenek suyu basıncı oluşmaktadır (Andrus ve Stokoe II, 2000). Bu zeminin yoğun olmasıyla açıklanır. Yoğun zeminlerde iç gerilmeye yakın gözenek suyu basıncının oluşması mümkündür. Büyük deformasyonlar, zemine uygulanırsa oturma esnasında çıkan suyun miktarı sıkı zeminlerde, gevşek zeminlere göre daha az oluşmaktadır. Dobry (1989) yoğun zeminlerde oturmaların önemsiz olduğunu ve kum fişkirmaları yada çatlaklardan su çıkışının az olmasından dolayı oluşmadığını belirtmektedir. Bunun önemi, penetrasyona yada kayma dalga hızına bağlı sıvılaşma yöntemi kadar geçmiş deprem verilerinin sınıflandırılmasındaki yüzey görüntülerine de bağlı olmaktadır. Bu sonuçlara ek olarak Andrus ve Stokoe II (1997;2000) deprem ve saha verilerini kullanarak eşitlik 5 deki $a=0.03$, $b=0.9$ ve $V_{s_{max}}=220\text{m/s}$ ve 2000 yılında hazırladıkları çalışmalarında deprem ve saha verilerine yenilerini ekleyerek $a=0.022$, $b=2.8$ ve $V_{s_{max}}=220\text{m/s}$ olarak belirlemişlerdir.

Bu çalışmada ise Andrus ve Stokoe II (1997; 2000) çalışmalarında kullandıkları verilere, 1995 Dinar ile 1999

Kocaeli depremleri ve saha çalışmalarından elde edilen veriler eklenmiştir. Eşitlik 5 den elde edilen eğrinin uygun parametreleri belirlenirken tüm sıvılaşan verilerin sıvılaşma bölgesinde, sıvılaşmayan verilerinde en az sıvılaşma bölgesinde olan eğri sınırını bulana kadar a, b katsayıları ve $V_{s_{max}}$ değişimi yineleme işlemi içerisinde belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda $a=0.025$, $b=4$ ve $V_{s_{max}}=250\text{m/s}$ elde edilmiştir. Ancak zeminin incelik içeriğine bağlı olarak $V_{s_{max}}=220-250\text{m/s}$ arasında değişmektedir. $V_{s_{max}}$ ve zeminin incelik içeriği (FC) arasındaki ilişki aşağıda ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} V_{s_{max}}=250\text{m/s} & \quad FC \leq \%5 \quad \text{Kum} \\ V_{s_{max}}=250 - (FC-5)\text{m/s} & \quad \%5 < FC < \%35 \quad \text{Kum} \quad (7) \\ V_{s_{max}}=220\text{m/s} & \quad FC \geq \%35 \quad \text{Kum ve silt} \end{aligned}$$

Literatür V_{s_c} – KGO yada KDO Eğrilerinin Karşılaştırılması

Kayma dalga hız değerleri için oluşan sıvılaşma ve sıvılaşmama sınırındaki kayma gerilme oranı (KGO), tekrarlı direnç yada kayma direnç (KDO) oranı olarak adlandırılmaktadır. Kayma dalga hızı ve kayma direnç oranı arasındaki literatür ilişkileri ve bu çalışmadan elde edilen ilişki Şekil 1'de karşılaştırılmaktadır. Bu eğriler arasındaki farklılıkların çoğu aşağıdaki üç faktör ile açıklanmaktadır.

- Tokimatsu ve Uchida, (1990)'nın en uygun eğrisi ortalama eğriden daha fazladır,
- Araştırmacıların önerdiği eğrilerin ayrımları sınırlı verilere bağlıdır ve araştırmacılar farklı seviyeleri kabul etmektedirler,
- Bölge ve düzeltme faktörlerinin seçimindeki yöntemler araştırmacıya göre değişmektedir.

Şekil 1'de gösterilen Tokimatsu ve Uchida (1990) eğrisi laboratuarda tekrarlı yükü 15 ve incelik içeriği %10 dan daha az kumlar için üç eksenli deney sonuçlarından belirlenmiştir. Robertson vd. (1992) tarafından belirlenen eğri sınırı, Kaliforniya da Imperial Valley bölgesinde ve 4 farklı alanda saha verilerini kullanarak geliştirmişlerdir. Bu bölgelerdeki kum, farklı incelik içeriğine sahiptir. Kayma dalga hızını efektif gerilmeye göre düzeltmişlerdir.

Ayrıca farklı magnitüdü depremleri $M_w=7.5$ göre düzeltmek için Seed (1979) önerdiği magnitüd skala faktörünü kullanmışlardır. Kayen vd. (1992) magnitüdü 7 olan 1989 Loma Prieta Kaliforniya depremi sonrasında sıvılaşma olan yada olmayan 4 farklı bölgede çalışmışlardır. Bu bölgelerdeki zeminlerin incelik içeriği %15-%57 aralığındadır. Kayma dalga hızının değerleri sismik konik penetrasyon testi (SCPT) ile ölçülerek efektif düşey gerilme ile düzeltilmiştir. Şekil 1 de belirtilen eğri magnitüd 7.5'a göre $MSF=1.19$ kabul edilerek düzeltilmiştir. Lodge (1994), Kayen vd. (1992)'nin çalıştığı aynı bölgelerde ayrıca Loma Prieta depremi ile sarsılan diğer bölgeleri de çalışmıştır. Lodge (1994)'de KDO eğrisini geliştirirken ilk olarak her bölgedeki zemin profili için tekrarlı gerilme oranlarını hesaplamıştır. İkinci olarak SPT darbe sayısı, efektif düşey gerilme ve enerji düzeltmeleri ile düzeltilmiştir.

Saha Verileri ve Değerlendirmeleri

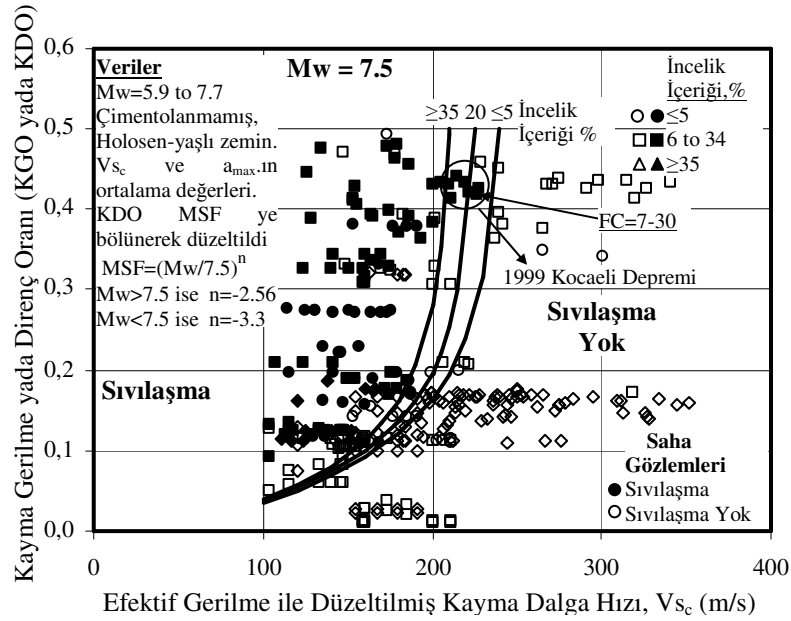
Önerilen yöntemin sıvılaşma çözümlemesi, farklı büyüklüklerde meydana gelmiş 22 adet deprem verileri, bu deprem bölgelerindeki zemin parametreleri ve yerinde V_s değerleri göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada, Uyanık (2002)'nin sıvılaşma çözümlemesine zeminin incelik içerikleri de bir parametre olarak eklenmiştir. Bu parametrelere bağlı önerilen sıvılaşma çözümlemesinde kullanılan veriler NISTIR (1999); Türker vd. (1996; 1999) raporlarından alınmıştır (Çizelge 1).

Bu çalışmada, kayma direnç oran (KDO) eğrisini belirlerken eşitlik 5'deki $a=0.025$, $b=4$, $V_{s,max}=250\text{m/s}$ ve eşitlik 6'da $M_w>7.5$ ise $n=-2.56$, $M_w<7.5$ ise $n=-3.3$ parametreleri kullanmıştır. KDO parametrelerine ek olarak eşitlik 7'den incelik içeriğine (FC) bağlı $V_{s,max}$ değerleri $FC\leq\%5$ verilerde $V_{s,max}=250\text{m/s}$, $\%5<FC<\%35$ arasındaki verilerde $FC=\%20$ eğrisi için $V_{s,max}=235\text{m/s}$ ve $FC\geq\%35$ verilerde $FC=\%35$ eğrisi için $V_{s,max}=220\text{m/s}$ olarak hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak hesaplanması

gereken kayma gerilme oran (KGO) değeri eşitlik 2 den belirlenmiştir. Sıvılaşma yada sıvılaşmama durumunun gözlemlendiği $M_w=5.9-7.7$ arasında oluşan tüm deprem ve saha verileri kullanılarak hesap edilen KGO, KDO ve $V_{s,c}$ değerlerine bağlı sıvılaşma çözümleme sonuçları Şekil 2 de verilmiştir. Bu şekilde farklı magnitüdlere elde edilen KGO ve KDO değerleri eşitlik 6 kullanılarak $M_w=7.5$ göre düzeltilmiştir. Şekil 2 de incelik içeriği $\%5$ 'den küçük olan, $\%5-\%35$ arasında ve $\%35$ den büyük olan verilerin sıvılaşma analiz sonuçları toplu olarak sunulmaktadır. Şekil 2 de incelik içeriği $\%5$ den küçük veriler daire, $\%5-\%35$ arasındaki veriler kare ve $\%35$ den büyük veriler ise üçgen sembolleri ile gösterilmiştir. Bu sembollerin içi dolu olanlar sıvılaşan verileri içi boş olanlar ise sıvılaşmayan verileri göstermektedir. Aynı şekilde sıvılaşma ayırımı gösteren sırasıyla incelik içeriği $\%35$, $\%20$ ve $\%5$ eğrileri çizilmiştir. Şekil 2 de tüm sıvılaşan veriler sıvılaşma bölgesinde, sıvılaşmayan veriler ise çoğunlukla sıvılaşmayan bölgede çıktığı görülmektedir.

Çizelge 1. Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Depremler ve Zemin Gözlemlerinin Verileri

Deprem ve Yeri (1)	M_w (2)	T (3)	Sıvılaşır(E) yada Sıvılaşmaz (H) Zeminlerin Saha Gözlemleri							
			Çakıl		Kum		Silt		Kil	
			E (4)	H (5)	E (6)	H (7)	E (8)	H (9)	E (10)	H (11)
1906 San Francisco, Kaliforniya	7.7	0.379	4	-	4	-	-	4	-	-
1964 Niigata, Japonya	7.5	0.350	-	-	3	1	-	-	-	-
1975 Haicheng, Çin	7.3	0.347	-	-	1	1	2	-	2	-
1979 Imperial Valley, Kaliforniya	6.5	0.280	-	-	3	1	1	6	-	-
1980 Mid-Chiba, Japonya	5.9	0.250	-	-	-	2	-	-	-	-
1981 Westmorland, Kaliforniya	5.9	0.250	-	-	1	3	5	2	-	-
1983 Borah Peak, Idaho	6.9	0.302	15	3	-	-	-	-	-	-
1985 Chiba-Ibaragi, Japonya	6.0	0.253	-	-	-	-	2	-	-	-
1986 Event LSST4, Tayvan	6.6	0.285	-	-	-	-	-	4	-	-
1986 Event LSST7, Tayvan	6.6	0.285	-	-	-	-	-	4	-	-
1986 Event LSST8, Tayvan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-
1986 Event LSST12, Tayvan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-
1986 Event LSST13, Tayvan	6.2	0.264	-	-	-	-	-	4	-	-
1986 Event LSST16, Tayvan	7.6	0.400	-	-	-	-	-	4	-	-
1987 Elmore Ranch, Kaliforniya	5.9	0.250	-	-	-	4	-	7	-	-
1987 Chiba-toho-oki, Japonya	6.5	0.280	-	-	-	1	-	-	-	-
1987 SuperstitionHills, Kalifor.	6.5	0.280	-	-	-	4	3	4	-	-
1989 Loma Prieta, Kaliforniya	7.0	0.307	-	4	28	22	5	8	-	-
1994 Northridge, Kaliforniya	6.7	0.291	-	-	3	-	-	-	-	-
1995 Hyogo-ken-Nanbu, Japonya	6.9	0.302	2	3	4	-	5	5	-	-
1995 Dinar, Türkiye	6.1	0.256	-	-	11	40	-	-	-	30
1999 Kocaeli, Türkiye	7.4	0.348	-	-	-	-	16	16	-	-



Şekil 2. $M_w=5.9-7.7$ arasındaki depremler ve incelik içeriği %1-90 arasındaki tüm saha verilerinin önerilen yöntemle göre sıvılaşma analiz sonuçları.

Sonuçlar

Bu çalışma kayma dalga hızı ve deprem dalgasının etkin periyoduna bağlı sıvılaşma çözümlenmeleri için yeni bir yöntem önermektedir. Bu yöntem üç ana parametre hesabına bağlıdır. Birinci parametre depremin zeminde oluşturacağı sismik yük (KGO), ikinci parametre zeminin doğal direnci (KDO) ve üçüncü parametre ise KGO ve KDO karşılaştırması yapan güvenlik faktörüdür. Birinci parametre, Seed ve Idriss (1971)'den farklı olarak zeminin kayma dalga hızı ve deprem dalgasının etkin periyodunu kullanılarak hesaplanır. İkinci parametre, efektif gerilmeye göre düzeltilmiş kayma dalga hızına bağlı hesaplanır. Üçüncü parametre, ilk iki parametrenin karşılaştırılması sonucunda elde edilir. Bu karşılaştırmada, eğer birinci parametre (KGO) ikinci parametreden (KDO) büyük bir değer ise zemin sıvılaşır, küçük ise zemin sıvılaşmaz.

Kayma dalga hızı ve deprem dalgasının etkin periyoduna bağlı sıvılaşma kriteri, değişik bölgelerde oluşan farklı büyüklükteki depremleri, bu depremlerin en büyük ivmelerini ve etkin periyotlarını, farklı zemin birimleri (kum, çakıl, silt ve kil) içeren ortamlardan elde edilen saha verilerinden geliştirilmiştir.

Önerilen yöntem deprem parametreleri olarak moment magnitüde, deprem dalgasının etkin periyoduna ve en büyük yer ivmesine, saha parametresi olarak da yeraltı su seviyesine, zeminin incelik içeriğine, zeminin kalınlığına, zeminin birim hacim ağırlığına ve zeminin kayma dalga hızına bağlıdır.

313 deprem ve saha verisi içerisinde 116 adet sıvılaşmış verinin tamamı sıvılaşma bölgesinde bulunmuştur. 197 adet sıvılaşmamış verinin 130 adeti sıvılaşmayan bölgede geri kalanı sıvılaşan bölgede çıkmıştır. Sıvılaşan bölgede

çıkan bu veriler için, derinlerde sıvılaşma olduğu ancak yüzeyde bir belirtisinin olmadığı düşünülmektedir.

Bu çalışma sonucunda, düzeltilmiş en büyük kayma dalga hızı 250m/s sınır değerine kadar sıvılaşma olabileceği ortaya konmuştur. Meydana gelecek depremler sonucunda, oluşan sıvılaşma alanlarında elde edilecek düzeltilmiş kayma dalga hızının 250m/s'den büyük bir değer olması durumunda, önerilen yöntemin en büyük kayma dalga hızı sınır değeri daha büyük olabilir.

Gelecek çalışmalar için deprem esnasında sıvılaşan ve sıvılaşmayan tüm zemin tiplerine ait özellikle düzeltilmiş kayma dalga hızının 250m/s'den ve yer ivmesinin 0.48g'den büyük ek saha verilerine ihtiyaç duyulur.

Kaynaklar

Andrus, R.D., Stokoe II, K.H. 1997. Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance Of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, T.L.Youd and I.M. Idriss, (Eds.), Held (1996), Salt Lake City, UT, Buffalo, NY, 89-128.

Andrus, R.D., Stokoe II, K.H. 1999. A Liquefaction Evaluation Procedure Based on Shear Wave Velocity. Wind and Seismic Effects US/Japan Natural Resources Development Program Joint Meeting 31st Technical Memorandum of PWRI 3653 Proceedings 71-78.

Andrus, R.D., Stokoe II, K.H. 2000. Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (ASCE) 126, 1015-1025.

- Dobry, R., Stokoe, K.H.II, Ladd, R.S., Youd, T.L. 1981. Liquefaction Susceptibility from S-Wave Velocity. Proceedings, In Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention, held 1981, St. Louis, MO.
- Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M., Powell, D. 1982. Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method. NBS Building Science Series 138, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 152.
- Dobry, R. 1989. Some Basic Aspects of Soil Liquefaction during Earthquakes. Earthquake, Hazards and the Design of Constructed Facilities in the Eastern United States, K.H. Jacob and C.J. Turkstra (Eds.) New York Academy of Science, 558, 172-182.
- Kayabali, K. 1996. Soil Liquefaction Evaluation Using Shear Wave Velocity. Engineering Geology, New York, 44, 121-127.
- Kayen, R. E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., Coutinho, R. 1992. Evaluation of SPT-CPT and Shear Wave-Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data. Proceedings, Fourth Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction. Technical Report NCEER-92-0019, M. Hamada and T.D. O'Rourke, (Eds.), Honolulu, Hawaii, Buffalo, NY, 1, 177-204.
- Lodge, A.L. 1994. Shear Wave Velocity Measurements for Subsurface Characterization. Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley.
- NISTIR, 1999. Draft Guidelines for Evaluating Liquefaction Resistance Using Shear Wave Velocity Measurements and Simplified Procedures. Gaithersburg, Md 6277: Andrus, R.D., Stokoe, K.H., II & Chung, R.M.
- 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, 686-695.
- Seed, H.B., Idris, I.M. 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM9, 1249-1273.
- Seed, H.B. 1979. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, GT2, 201-255.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. 1982. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- Seed, H.B., Idris, I.M., Arango, I. 1983. Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, No. 3, 458-482.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M. 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111, No.12, 1425-1445.
- Stokoe II, K.H., Nazarian, S. 1985. Use of Rayleigh Waves in Liquefaction Studies. Measurement and Use of Shear Wave Velocity for Evaluating Dynamic Soil Properties, R.D. Woods, (Ed.), ASCE, 1-17.
- Stokoe II, K.H., Nazarin, S., Rix, G.J., Sanchez-Salinero, I., Sheu, J.C. Mok, Y.J. 1988a. In Situ Seismic Testing of Hard-to-Sample Soils by Surface Wave Method. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground-Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication No.20, J.L. Von Thun (Ed.), ASCE 264-289.
- Sykora, D. W. 1987b. Creation of a Data Base of Seismic Shear Wave Velocities for Correlation Analysis. Geotechnical Laboratory Miscellaneous Paper GL-87-26, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Tokimatsu, K., Uchida, A. 1990. Correlation Between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 30, No. 2, 33-42.
- Türker, E. 1996. Zemin Sıvılaşması Analizlerinin Sismik Hızlar Yardımıyla Yapılması. Geosound, No.28, ISSN 1019-1003, 203-214.
- Türker, E., Kaya, M.A., Kamacı, Z., Uyanık, O., Büyükköse, N., Mutlutürk, M., Yalçın, A., Özkan, F. 1996. Dinar Afet Bölgesi Jeoteknik Etüdü, Afet İşleri Genel Müdürlüğü-SDÜ. (Yayınlanmamış).
- Türker, E., Uyanık, O., Işık, H., Özalpaydın, C. 1999. Gölcük Donanma Üssü Yerleşim Alanının Jeolojik ve Jeoteknik Etüdü Projesi, MTA-SDÜ. (Yayınlanmamış).
- Uyanık, O. 2002. Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, DEU. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 200s.
- Uyanık, O. 2006. Sıvılaşır yada Sıvılaşmaz Zeminlerin Yinelemeli Gerilme Oranına Bir Seçenek, DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt:8, Sayı: 2, 79-91.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F.Jr., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W. F.III, Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H. 1997. Summary Report, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, T.L. Youd and I.M. Idriss, (Eds.), Buffalo, NY, 1-40.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder Jr, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcusan III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.k., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H. 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127, 10.