Maden Tetkik ve Arama Dergisi

http://dergi.mta.gov.tr



Zemin sıvılaşmasının enerji yaklaşımıyla değerlendirilmesi

Assessment of souil liquefaction using the energy approach

Kamil KAYABALI[a]*, Pınar YILMAZ[b], Mustafa FENER[c], Özgür AKTÜRK[d] ve Farhad HABIBZADEH[e]

[a]*Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara. orcid.org/0000-0002-0228-0777.*
[b]*Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara. orcid.org/0000-0002-2749-8924.*
[c]*Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara. orcid.org/0000-0003-0491-3205.*
[d]*Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Antalya. orcid.org/0000-0001-7703-5779.*
[e]*Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı, Ankara. orcid.org/0000-0001-5672-5834.*

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma enerjisi, gerilme yöntemi, birim deformasyon yöntemi, enerji yöntemi, deprem enerjisi.

ÖZ

Depremler sırasında yapılarda oluşan hasar (kısmen veya tamamen) birkaç on yıl boyunca kapsamlı araştırmalara konu olan zemin sıvılaşmasından kaynaklanabilir. Kumlu tabakanın sıvılaşmaya duyarlılığı, zeminin sıvılaşma direncinin (kapasite) bir deprem tarafından uygulanan yük (talep) ile kıyaslanmasıyla ölçülür. Bu kapsamda gerilme temelli sıvılaşma değerlendirmesi en popüler yöntemdir. Bu yöntemin başlıca belirsizliği anakayadaki maksimum yatay yer ivmesinin (a_{max}) hesaplanmasıdır. Zemin seviyesinde de bir a_{max} belirlemek için yer tepki analizi veya basitleştirilmiş bir varsayım gereklidir. Gerilme temelli yaklaşıma dayalı olarak geliştirilen birim deformasyon temelli yaklaşımda da benzer kısıtlamalar bulunmaktadır. Kumlu zeminin birim hacim başına düşen sıvılaşma enerjisi kapasitesini belirlemek için burulmalı kesme halkası gibi laboratuvar teknikleri bulunmaktadır. Benzer şekilde, deprem kaydının enerjisi basit fizik ilkeleri kullanılarak hesaplanabilir. Herhangi bir deprem kaydının talebi hesaplanırken hız-zaman kaydı ve zeminin birim kütlesi kullanılır. Bu araştırmanın amacı zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesi için enerjiye dayalı yöntemin kullanılabilirliğini göstermektir. Ek olarak, gerilme ve birim deformasyon temelli yaklaşımların eksiklikleri genel hatlarıyla verilmiş ve enerji tabanlı yaklaşımın avantajları tartışılmıştır.

Geliş Tarihi: 01.08.2017
Kabul Tarihi: 28.09.2017

Keywords: Liquefaction, stress method, strain method, energy method, earthquake energy.

ABSTRACT

Damage to structures during earthquakes may be fully or partly caused by soil liquefaction, which has been the subject of extensive research for several decades. Liquefaction susceptibility of a sandy deposit is performed by comparing the resistance of a soil to liquefaction (i.e., capacity) to the load imparted by an earthquake (i.e., demand). In this regard, the stress-based method of liquefaction assessment is by far the most popular. It involves uncertainties mostly related to the computation of the maximum horizontal ground acceleration (a_{max}) at bedrock. A site response analysis or a simplified assumption is necessary to determine the a_{max} on the ground level as well. Developing from the stress-based approach, the strain-based approach has also similar constraints. There exist laboratory techniques such as torsional shear to determine the capacity of a sandy soil in terms of liquefaction energy per unit volume. Likewise, the energy of a strong motion record can be set by employing simple physics principles. For this, a velocity time history and the unit mass of the soil are employed to compute the demand of any strong motion record. The scope of this investigation is to illustrate the usability of the energy-based method for the evaluation of soil liquefaction. The deficiencies of the stress- and strain-based approaches are outlined and the advantages of the energy-based approach are discussed.

* *Başvurulacak yazar: Kamil KAYABALI, kayabali@ankara.edu.tr*
http://dx.doi.org/10.19076/mta.351179

1. Giriş

Gevşek kum, zemin sarsıntısına veya diğer türden tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında sıkılaşır; bu da boşluk suyu basıncında artışa yol açar. Bu ilave boşluk suyu basıncı etkin gerilmeye eşit olduğunda sıvılaşma olarak bilinen olay meydana gelir. Deprem esnasında doygun gevşek kumların sıvılaşması binalarda, dolgularda ve diğer inşaat mühendisliği yapılarında hasara yol açar. Zemin sıvılaşmasına bağlı yer hasarlarının en belirgin tezahürleri 1964 Niigata, 1989 yılında Loma Prieta ve 1999 Chi-Chi depremleri sırasında gözlemlenmiştir.

Sıvılaşma mekanizmasını etkileyen birçok faktör olduğundan dolayı, kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi karmaşık bir mühendislik problemidir. Bu faktörler depremin büyüklüğü ve şiddeti, sismik sönümleme özellikleri, iç merkezden uzaklığı, yayılım yolu etkileri, zemin tipi ve özellikleri, çevre basıncı, zemin katmanlarının geometrisi ve sahaya özgü diğer koşullardan oluşur (Law vd., 1990).

Son birkaç on yılda sıvılaşma konusunda kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Birçok araştırmacı laboratuvar yöntemleri (DeAlba vd., 1976; Ladd vd., 1989), arazi yöntemleri (Davis ve Berrill, 2001; Çetin vd., 2004) ve sayısal teknikler (Chen vd., 2005; Baziar ve Jafarian, 2007; Zhang vd., 2015; Kokusho vd., 2015; Kokusho ve Mimori, 2015) kullanarak zeminin sıvılaşma potansiyelini araştırmışlardır.

Arazideki kohezyonsuz zeminin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Değerlendirme araçları üç ana gruba ayrılabilir: 1) Gerilme temelli yöntemler, 2) Birim deformasyon temelli yöntemler ve 3) Enerji temelli yöntemler (Green, 2001; Zhang vd., 2015). Arazideki sıvılaşma değerlendirmesinde günümüze kadar en çok kullanılan teknik gerilme temelli yaklaşımdır (Seed ve Idriss, 1971).

Bu araştırmanın amacı, zemin sıvılaşması üzerine geliştirilen üç yaklaşımın temel ilkelerini özetlemek, gerilme ve birim deformasyon temelli yöntemlerin eksikliklerini ortaya koymak ve zemin sıvılaşmasının yeni gelişmeler doğrultusunda değerlendirilmesi için yeni ve pratik bir araç olarak enerji temelli yaklaşımı önermektir.

2. Zemin Sıvılaşma Değerlendirme Yöntemlerinin Geçmişi

Zemin sıvılaşmasını değerlendirme teknikleri açıkça iki faktörü belirlemeye çalışmaktadır: Birincisi, zeminin sıvılaşma oluşumuna karşı dayanımı veya "kapasitesi"dir. İkincisi ise, deprem tarafından zemine aktarılan yük veya "talep"tir (Green, 2001; Alavi ve Gandomi, 2012). Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü, kapasitenin talebe oranı olarak tanımlanır.

2.1. Gerilme Temelli Yöntem

Sıvılaşma değerlendirmesinde günümüze kadar en çok kullanılan yöntem gerilme temelli yöntemdir (Seed ve Idriss, 1971; Whitman, 1971). Genellikle arazi gözlemleri ve laboratuvar araştırmalarından edinilen ampirik verilere dayanmaktadır ve devam eden araştırmalar yeni katkılarla sürekli güncellenmektedir (örn., Youd vd., 2001; Çetin vd., 2004).

Seed'in basitleştirilmiş yöntemine dayanan gerilme temelli yaklaşımdaki talep, tekrarlı gerilme oranı (CSR, cyclic stress ratio) olarak tanımlanan, deprem tarafından aktarılan yükün genliğidir:

$$CSR = \frac{\tau_{ort}}{\sigma'_o} = 0{,}65\frac{a_{max}}{g}\frac{\sigma_o}{\sigma'_o}r_d \quad (1)$$

Burada CSR = tekrarlı gerilme oranı, τ_{ort} = deprem tarafından uygulanan ortalama kesme gerilmesi, a_{max} = Zemin yüzeyindeki maksimum yatay ivme, g = yerçekimi ivmesi, σ_o'= z derinliğindeki ilksel etkin düşey gerilme, σ_o = z derinliğindeki toplam düşey gerilme ve r_d = boyutsuz gerilme indirgeme faktörüdür. r_d miktarı derinliğe bağlı olarak değişir ve ortalama değeri aşağıdaki ilişkiden yararlanarak hesaplanır (NCEER, 1997):

$$r_d = \frac{(1{,}0-0{,}4113z^{0{,}5}+0{,}04052z+0{,}001753z^{1{,}5})}{(1{,}0-0{,}4117z^{0.5}+0{,}05729z-0{,}006205z^{1{,}5}+0{,}00121z^{2})} \quad (2)$$

Eşitlik (1) sadece M = 7,5 depremleri için geçerlidir. M = 7,5 dışındaki sismik olaylar farklı araştırmacılar tarafından sunulan birtakım ampirik formda önerilen "büyüklük ölçekleme faktörü" (MSF, magnitude scaling factor) getirilerek ele alınır. MSF ilişkilerinin en son sürümü, Idriss ve Boulanger (2006) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

MSF = 6,9 exp (-0.25M)-0,058 (MSF ≤ 1,8 olduğunda geçerlidir) (3)

M = 7,5 dışındaki depremler için CSR, Eşitlik (1)'in sonucunun Eşitlik (3)'ten elde edilen MSF'ye bölünmesiyle elde edilir.

Kohezyonsuz zeminin sıvılaşma direnci veya kapasite genellikle standart penetrasyon testinin $(N_1)_{60}$ değeri ile ifade edilir. Bu, %60 şahmerdan etkinliğinde ve 1 atm'lik örtü yükü altındaki standart penetrasyon testi (SPT) darbe sayısı anlamına gelmektedir. $(N_1)_{60}$'ın temiz kumlar için geçerli olduğuna dikkat edilmelidir. Eşdeğer bir temiz kum değeri $[(N_1)_{60cs}]$ elde etmek için ince tane içeriği (FC, fines content) dikkate alınarak aşağıdaki şekilde değiştirilmelidir (Youd vd., 2001):

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \exp\left[1{,}63 + \frac{9{,}7}{FC+0{,}1} - \left(\frac{15{,}7}{FC+0{,}1}\right)^2\right] \quad (4)$$

Gerilme temelli yaklaşımda Seed ve Idriss (1971) uygulanan tekrarlı yükün 15 döngüsü için maksimum kesme gerilmesinin %65'ini önermişlerdir. Niigata depreminin kayıtlarından ölçeklenen kesme gerilmesine ait zaman tanım alanı modelini kullanan Ishihara ve Yasuda (1972, 1975) eşdeğer kesme gerilmesini Seed and Idriss'in önerdiği %65'in yerine, maksimum kesme gerilmesinin %57'si olarak bulmuşlardır. Buna göre, sadeleştirilmiş Seed yaklaşımı deprem tarafından aktarılan kesme gerilimini yaklaşık %12 kadar yüksek tahmin etmektedir.

Ele alınması gereken diğer bir önemli husus da zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesidir (a_{max}). Sönümleme ilişkileri ise genellikle a_{max}'ı ana kaya seviyesinde hesaplamakta kullanılmaktadır. Hem büyüklük hem de mesafe için uygun değerlerin kullanılması son derece önemlidir; ancak, büyüklük, kullanılacak uzaklığın türü (örn. merkez üssüne uzaklık, iç merkeze uzaklık veya depreme neden olan faya uzaklık) ve hatta sönümleme ilişkisinin kendisi de bazı belirsizlikler içerir. Zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesinin hesaplanması için de proje sahasının zemin profiline ait küçük birim deformasyonlu kesme dalgası hızı, kalınlık, birim deformasyonla uyumlu modül ve sönümleme eğrileri ile zemin katmanlarının toplam yoğunluğu gibi ayrıntılı bilgi gerektiren yer tepki analizi yapılmalıdır. Bu işlem yüksek maliyetli bir işlemdir ve yaygın olarak belirli mühendislik yapıları (örneğin, enerji santralleri, yüksek binalar, vb.) için gerçekleştirilir. Zemin yüzeyindeki a_{max} değerinin yer tepki analiziyle belirlenmesinin alternatifi, Seed ve Idriss (1982)'in verdiği grafikler gibi grafiklerden yararlanılmasıyla uygulanan basitleştirilmiş yaklaşımdır. Bu yaklaşım sadece sığ kumlu zemin, derin kohezyonlu zemin gibi aşırı sadeleştirilmiş zemin kesitleri yüzeyinde a_{max}'ın hesaplanması için bir yaklaşım sağlar. Yer tepki analizi sonuçta "genliği büyütülmüş" bir kuvvetli yer hareketine neden olabilir ki, bu da daha yüksek bir CSR'ye neden olur.

İvme vektörel bir büyüklüktür ve yer ivmesinin üç bileşeni vardır. Gerilme temelli yaklaşım iki yatay a_{max}'dan sadece büyük olanını dikkate alır. Bazı araştırmacılar düşey bileşenin de dikkate alınması gerektiğini savunmaktadır (Atkinson, 1986; Law vd., 1990).

2.2. Birim Deformasyon Temelli Yaklaşım

Bu yöntem kesme birim deformasyonu eşik değerine ulaşıldığında boşluk basıncının oluşmaya başladığı hipotezine dayanır. İlk olarak Dobry vd. (1982) tarafından önerilmiştir. İki etkileşimli ideal hale getirilmiş kum tanesinin mekaniğinden türetilip daha sonra doğal zeminler için genelleştirilmiştir (Green, 2001; Baziar ve Jafarian, 2007; Alavi ve Gandomi, 2012). Deprem tarafından uyarılan tekrarlı kesme birim deformasyon genliği veya talep aşağıdaki ilişki ile belirlenir:

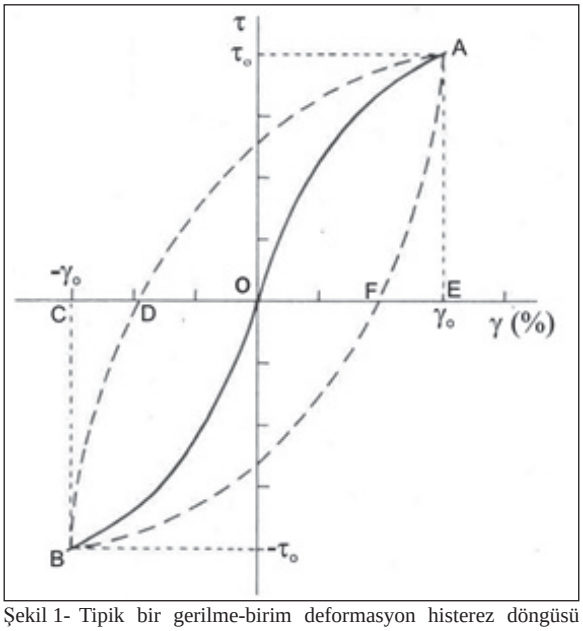
$$\gamma = \frac{0{,}65\frac{a_{max}}{g}\sigma_o r_d}{G_{max}\left(\frac{G}{G_{max}}\right)_\gamma} \quad (5)$$

Burada G_{max} terimi $\gamma = \%10^{-4}$ 'e karşılık gelen kesme modülü, G/G_{max} terimi de γ'ya ve $\gamma = \%10^{-4}$'e karşılık gelen kesme modüllerinin oranıdır (Green, 2001). Diğer değişkenler Denklem (1)'dekilerle aynıdır. Drenajsız doygun temiz kum numuneleri üzerinde bir dizi birim deformasyon kontrollü tekrarlı deney yapan Dobry vd. (1982) sıvılaşmanın başlaması için kapasite veya eşik kesme birim deformasyon değerinin (γ_{th}) yaklaşık %0,11 olduğunu göstermişlerdir.

Denklem (5)'in değişkenlerinin belirlenmesiyle ilgili pratik zorluklar esas olarak G_{max} ve kesme modülü oranıdır. İlki için saha testleri (örn. kuyu aşağı testi, kuyudan kuyuya testi, vb.) veya karmaşık ampirik formlar gereklidir. İkincisinde ise, her bir zeminin kendine has kesme modülü azalım ilişkisi vardır. Kesme birim deformasyonunun bir fonksiyonu olarak kesme modülü oranının laboratuvarda belirlenmesi zahmetlidir. Bir dizi kesme modülü azalım eğrisi yayınlanmış olmasına rağmen, bunlar sadece belirli bir zemin türünde hedeflenen eşik kesme birim deformasyonu için bir yaklaşım sağlar.

Birim deformasyon temelli yöntemin alternatifi ise, sıvılaşma başlangıcı için gerekli toplam birim deformasyon enerjisi kavramının laboratuvar

deneylerinden veya deprem kayıtlarından elde edilmesini gerektirir. Tipik bir tekrarlı yük testi gerilme, birim deformasyon ve boşluk basıncı verilerini sağlar. Kesme gerilmesi-birim deformasyon histerez çevrimi zamanın bir fonksiyonu olarak şekil 1'de gösterildiği gibi elde edilir. Her bir yükleme döngüsündeki birim deformasyon enerjisi şekil 1'deki BDAFB'nin histerez çevrimi içindeki alana eşdeğerdir (Ostadan, 1996; Green, 2001; Zhang vd., 2015). Anlık enerji ve anlık enerjinin zaman aralıklarına göre toplamı sıvılaşma başlangıcına kadar hesaplanır. O andaki enerjinin toplamı zemin örneğinin sıvılaşmaya karşı kapasitesinin ölçüsü olarak kullanılır (Alavi ve Gandomi, 2012). Bu gözlem, detayları aşağıdaki alt bölümde sunulan enerji temelli yaklaşımın formülasyonunu işaret eder.



Şekil 1- Tipik bir gerilme-birim deformasyon histerez döngüsü (Hardin ve Drenevich, 1972'den uyarlanmıştır).

Her ne kadar birim deformasyon temelli yaklaşım teorik olarak mantıklı olsa da, birim deformasyon yaklaşımı sadece sıvılaşma için gerekli olan ilave boşluk basıncının oluşumunu kestirdiğinden, gerilme temelli yaklaşıma göre daha az kullanılmaktadır. Ancak, bu sıvılaşmanın gerçekleşeceği anlamına gelmez. Bu yöntemin başlıca eksikliği, kesme birim deformasyonunu kestirmenin tekrarlı kesme gerilimesine kıyasla daha zor olmasıdır (Seed, 1980; Zhang vd., 2015).

2.3. Enerji Temelli Yöntem

Enerji kavramı kumu sıkılaştırma ve sıvılaşma analizinde ilk olarak Nemat-Nasser ve Shokooh (1979) tarafından ortaya atılmıştır. Kum parçacıklarının kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen, sıvılaşmaya yol açan belli koşullar altında enerji sabit bir değerdir. Parçacıklarının kalıcı olarak yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilen birim hacimde biriken enerji (J/m^3), bir döngü sırasında geliştirilen histerez çevrimi içindeki alan olarak verilir (Şekil 1). Numune tarafından sıvılaşmaya kadar absorbe edilen, birim hacimde biriken enerji (δW) aşağıdaki şekilde verilir (Figueroa vd., 1994; Liang vd., 1995):

$$\delta W = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2}(\tau_i + \tau_{i+1})(\gamma_{i+1} - \gamma_i) \qquad (6)$$

Burada, τ = kesme gerilmesi, γ =kesme birim deformasyonu ve n = sıvılaşma için kaydedilen döngü sayısıdır.

Sıvılaşmayı kestirmek için sıvılaşmayı başlatan birim deformasyon enerjisi, deprem sırasında kum tabakasına aktarılan birim deformasyon enerjisi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler, ilave boşluk basıncı oluşumunun ilk sıvılaşmaya kadar olan tüm yükleme döngüleri içindeki toplam birim deformasyon enerjisiyle orantılı olduğunu ortaya koymuştur (Alavi ve Gandomi, 2012). Davis ve Berrill (2001) deprem esnasında ilave boşluk basıncının ve saçılım enerjisinin saha doğrulaması için yaptıkları araştırmada, saçılım enerjisi yoğunluğunun, saha koşullarındaki boşluk basıncı artışıyla belirgin bir korelasyonu olabileceği sonucuna varmışlardır.

Figueroa vd. (1994) içi boş silindirli burulma kesme aleti kullanarak Reid Bedford kumu üzerinde bir dizi test yapmışlardır. Bu çalışmada, sıvılaşmaya ulaşmak için zemine aktarılan birim hacim başına enerji dağılımının, etkin çevre basıncı, rölatif sıkılık ve kesme birim deformasyonu genliği gibi parametrelerle arasında bir ilişki kurmuşlardır:

$$\log(W) = 2{,}002 + 0{,}00477\sigma'_{ort} + 0{,}0116D_r \qquad (7)$$

Burada W = Sıvılaşmayı tetiklemek için gerekli olan gerilme enerji (J/m^3), σ'_{ort} = başlangıçtaki ortalama etkin çevre basıncı (kPa), ve D_r = başlangıçtaki rölatif sıkılıktır (%).

Alavi ve Gandomi (2012) tarafından derlenen benzer ilişkilerin bazıları aşağıda verilmiştir:

$$\log(W) = 2{,}062 + 0{,}0039\sigma'_{ort} + 0{,}0124D_r \qquad (8)$$

(Liang, 1995)

$$\log(W) = 1{,}164 + 0{,}0124\sigma'_{ort} + 0{,}0209D_r \quad \text{(Dief ve Figueroa, 2001)} \quad (9)$$

$$\log(W) = 2{,}1028 + 0{,}004566\sigma'_{ort} + 0{,}005685D_r + 0{,}001821FC - 0{,}02868C_u + 2{,}0214D_{50} \quad \text{(Baziar ve Jafarian, 2007)} \quad (10)$$

Burada FC = ince tane içeriği yüzdesi, C_u = tekdüzelik katsayısı, ve D_{50} = ortalama tane boyudur (mm). Sıvılaşma için ölçülen gerilme enerjisi (W; kJ/m^3), başlangıç ortalama gerilmesi (P'_o; kPa biriminde) ve rölatif sıkılık (D_r; ondalıklı olarak) ile ilgili en son ampirik ifade Jafarian vd. (2012) tarafından sağlanmıştır:

$$W = 0{,}1363P'_o(D_r^{4{,}925}) + 5{,}375\,(10^{-3}P'_o) \quad (11)$$

Enerji temelli yöntem, gerilme temelli ve birim deformasyon temelli yaklaşımlarla kıyaslandığında başlıca avantajları; 1) enerjinin tek bir sayı ile ifade edilen skaler bir nicelik olması; 2) seçilen ortalama gerilme veya birim deformasyon seviyesine eşdeğer çevrim sayısını bulmak için kesme gerilmesinin zamansal ayrıştırılmasının gerekli olmaması; ve 3) kullanımının hem birim deformasyon hem de gerilmeyi ve aynı zamanda malzeme özelliklerini de kapsaması olarak gösterilebilir (Law vd., 1990; Liang vd., 1995). Arazi durumunda, zemin belirli frekans aralıklarında yer hareketini büyütür. Diğer frekans aralıklarında da sönümler. Bu, hareketin bir bölümünün büyütülmesi veya sönümlenmesine bakılmaksızın, zeminin içinde dolaşan ve dağılan toplam enerjinin değişmediğini gösterir (Law vd., 1990).

3. Önerilen Yöntem

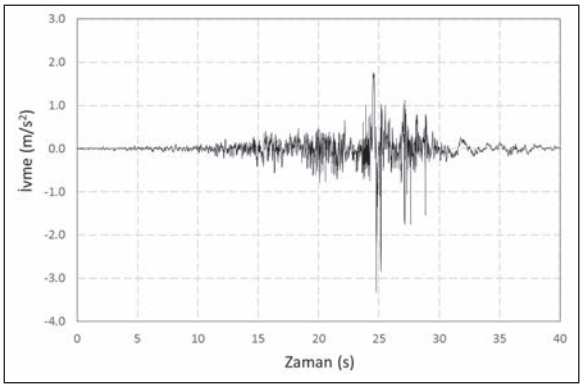
Deprem sırasında çıkan enerji miktarını (Joule cinsinden) hesaplamak mümkündür. Deprem sırasında açığa çıkan toplam enerji aşağıdaki şekilde verilir (Gutenberg ve Richter, 1956):

$$E = 10^{4{,}8 + 1{,}5M} \quad (12)$$

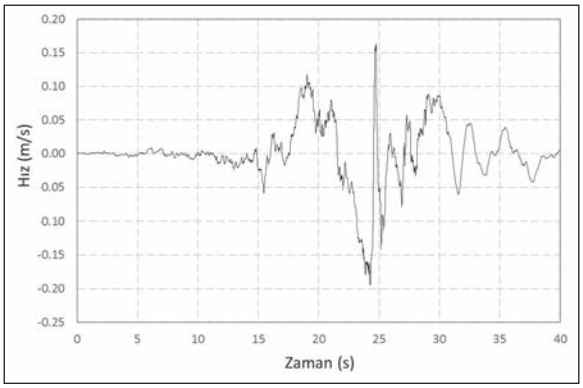
Burada M Richter ölçeğine göre büyüklüktür (Law vd., 1990). Bu enerjinin bir bölümü ışın yolları boyunca elastik olmayan sönümleme ile dağılır ve müteakip sönümleme geometrik yayılma ile oluşur (Davis ve Berrill, 1982). Bu enerjinin yalnızca çok küçük bir kısmı herhangi bir sahaya ulaşır. Aşağıdaki yöntem, bir birim kütleye depremle aktarılan enerjinin nasıl hesaplandığını açıklamaktadır. Bir sisteme aktarılan iş (W) aşağıdaki şekilde açıklanır (yaygın fizik kuralı):

$$W = 0{,}5mV^2 \quad (13)$$

Burada m kütle, V ise hızdır. Pratik olması açısından, sistem 1 m^3 zemin olarak tanımlanmaktadır. Deprem tarafından birim hacimdeki zemine aktarılan işi belirlemek için, ivme-zaman kaydı gibi bir deprem girdisine ihtiyaç duyulur. Bunu hız-zaman kaydına dönüştürmek için sadece zamana göre integralini almak yeterlidir. Birim zeminin kütlesinin (hacim 1 birim olduğu için aslında doymuş yoğunluğun değeri) bilinirse, iş-zaman kaydı ve zamana göre kümülatif işi elde etmek için doğrudan bir elektronik tablo programında kullanılır. Şekil 2 ve 3, 20 Eylül 1999

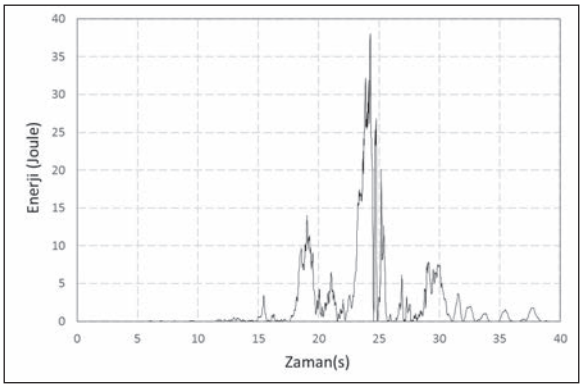


Şekil 2- Taichung (Miaoli-Shitan Okulu)/Tayvan'da kaydedilen 1999 Chi-Chi depreminin K-G yönlü ivme kaydı.

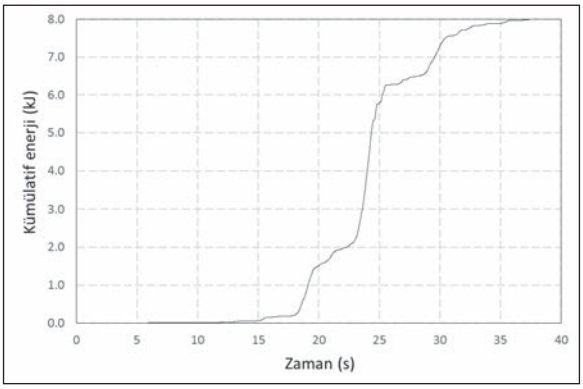


Şekil 3- Taichung (Miaoli-Shitan Okulu)/Tayvan ivme kaydından elde edilen hız-zaman kaydı.

tarihli Chi-Chi/Tayvan depreminin (M_w = 7,6) Taichung/Tayvan'da (İstasyon No.: TCU045) kaydedilen ivme ve hız-zaman kayıtlarını göstermektedir. Sismik olayın iş-zaman kaydı 2000 kg/m^3 yoğunluğundaki doygun bir zemin için hesaplanmıştır (Şekil 4). Şekil 5 aynı olay için kümülatif enerjiyi göstermektedir. Şekil 5'in de gösterdiği gibi, 40 saniye süren bir olay sırasında, 2000 kg kütleli 1 metreküp zemine aktarılan toplam iş 7,9 kJ'dür. Kolaylık sağlaması için 90 saniyelik kaydın yalnızca belirgin kısmı alınmıştır. Başka bir



Şekil 4- Taichung (Miaoli-Shitan Okulu)/Tayvan ivme kaydından elde edilen için iş-zaman kaydı.



Şekil 5- Taichung (Miaoli-Shitan Okulu)/Tayvan ivme kaydı için kümülatif enerji diyagramı.

deyişle, deprem kaydının başlangıç ve son kısmında enerjiye ciddi bir katkısı olmayan bölümler ihmal edilmiştir. Bu işlemi basit bir hesap tablosu programı ile gerçekleştirmek mümkündür.

Belirli bir deprem kaydının enerjisinin hesaplanmasından sonraki adım, zemin parametrelerinin belirlenmesini içerir.

Denklem (7-11) ile formüle edilen enerji denklemlerinin hepsi başlangıçtaki efektif ortalama çevresel basıncı (σ'_{ort}) kullanır. Sahada σ'_{ort} değerini belirlemedeki zorluk takdir edilmelidir. Arazi koşullarında temsilci kesme dayanımı için yaygın olarak σ'_{ort} veya P'_o etkin kesme mukavemeti yerine ilksel etkin örtü gerilmesi (σ'_v) kullanılmaktadır. Bu ikisi aşağıdaki şekilde ilişkilendirilmektedir (Seed vd., 1986):

$$\sigma'_{ort} = \left(\frac{1+2K_o}{3}\right)\sigma'_v \qquad (14)$$

Burada K_o = sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısıdır. Aşağıdaki genel biçimde ifade edilir:

$$K_o = 1 - \sin(\phi') \qquad (15)$$

Denklem (15)'teki etkin içsel sürtünme açısı (ϕ') aşağıdaki şekilde belirlenebilir (Hatanaka ve Uchida, 1996):

$$\phi' = (20N_{1,60})^{0,5} + 20 \qquad (16)$$

Son olarak rölatif sıkılık (Skempton, 1986) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$D_r = 15(N_{1,60})^{0,5} \qquad (17)$$

"Kapasite" belirlenirken kullanılacak zemin parametreleri karakterizasyonu aşağıdaki sıraya göre yapılır:

i) Düzeltilmiş darbe sayısı ($N_{1,60}$) standart penetrasyon deneyiyle belirlenir (standart penetrasyon testinin belirsizlikleri dikkate alındığında alternatif ve daha güvenilir bir yol olarak konik penetrasyon testi verileriyle rölatif sıkılık doğrudan da elde edilebilir)

ii) Başlangıçtaki etkin düşey gerilme (σ'_{vo}) arazi verileri kullanılarak hesaplanır,

iii) Denklem 16' dan ϕ' belirlenir,

iv) Denklem (15)'den K_o hesaplanır,

v) K_o ve σ'_{vo} Denklem (14)'de kullanılır. σ'_{ort} elde edilir.

vi) Temiz kumların rölatif sıkılığını hesaplamak için Denklem (17) kullanılır; ince tane içeren zeminlerin "eşdeğer" rölatif sıkılığı Denklem (4) kullanılarak bulunur.

vii) Denklem (7-11)'den herhangi birisi kullanılarak zeminin sıvılaşmaya karşı kapasitesi hesaplanır.

Ortalama etkin gerilme ve rölarif sıkılık elde edildiğinde zemin sıvılaşması için gereken enerji kolayca hesaplanabilir. Daha sonra depremin 1 m^3 doymuş zemine aktardığı enerjiyi elde etmek için toplam birim kütle M_t kullanılır. Son adımda sadece kapasite ve talebin karşılaştırılması yapılır.

Çizelge 1 düşey zemin kesitindeki herhangi bir noktada bir metreküp zemin üzerinde uygulanan tipik enerji hakkında fikir vermesi için hazırlanmıştır. Tüm hesaplamalarda doymuş yoğunluk 2000 kg/m^3 olarak kabul edilmiştir. Çizelge 1, dünyadaki bazı önemli olayların yanı sıra "kaynağa yakın (near-source)" deprem kayıtlarının bazı özelliklerini içermektedir.

Çizelge 1- Dünyadaki önemli sismik olayların bazı özellikleri ve bir metreküp zemine aktarılan enerji (M_w: Moment büyüklüğü; a_{max}: Maksimum yatay yer ivmesi; R: depreme neden olan faya olan uzaklık; W: yapılan işin tamamı; *: M_L).

Olay	M_w	İstasyon No.	a_{max} (g)	R (km)	W (kJ/m³)
Chi-Chi Taiwan 20 Eylül 1999	7,6	TCU045	0,34	25	7,9
Hollister (USA) 9 Nisan 1961	5,6*	USGS1028	0,18	21	3,0
Imperial Valley (USA) 15 Ekim 1979	6,5	USGS5115	0,37	16	3,0
Kobe (Japan) 16 Ocak 1995	6,9	CUE90	0,34	22	17
Kocaeli (Turkey) 17 Ağustos 1999	7,4	KOERI330	0,32	23	103
Landers (USA) 28 Haziran 1992	7,3	SCE24	0,73	2,0	12,4
Loma Prieta (USA) 18 Ekim 1989	7,0	CDMG47381	0,37	6,3	18,4
Northridge (USA) 17 Ocak 1994	6,7	CDMG24278	0,58	24	21,1

Bir metreküp hacmindeki zemine depremden aktarılan enerjinin uzaklık ve arazi koşullarıyla nasıl değiştiğini göstermek için, 18 Ekim 1989 Loma Prieta depremi sırasında elde edilen deprem kayıtları kullanılarak çizelge 2 hazırlanmıştır. Doygun yoğunluk önceki gibi kabul edilmiştir. Çizelge 1 ve 2'nin hazırlanmasında kullanılan tüm deprem verileri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi'nden (Pacific Earthquake Engineering Research Center) alınmıştır.

Önerilen yöntemin nasıl çalıştığını göstermek için 4 arazi uygulamasını kapsayan çizelge 3 hazırlanmıştır. Bu çizelgedeki olayların ikisinde Loma Prieta depremi sırasında sıvılaşma gözlenmiş ve diğer ikisinde ise gözlenmemiştir. Çizelge 3'deki verilerin bir kısmı [yani a_{max}, ilgili tabakanın ve su tablasının yüzeyden derinliği, tabakadaki toplam ve etkin düşey gerilme, $(N_1)_{60}$, ince tane içeriği ve $(N_1)_{60cs}$] Idriss ve Boulanger (2010)'den alınmıştır. γ_{sat} ve M_t değerleri aynı kaynaktaki su tablası derinliği, toplam ve efektif gerilme değerlerinden yola çıkarak hesaplanmıştır. σ'_{ort}, K_o, ϕ' ve D_r Eşitlik 14-17 kullanılarak hesaplanmıştır. Sıvılaşma kapasiteleri (W) uygun ortalama etkin gerilmeler ve rölatif sıkılıklar kullanılarak 4 değişik ampirik ilişki (Denklem 7, 8, 9 ve 11) için hesaplanmıştır.

Talebin hesaplanması için ilgi sahasına en yakın deprem kayıtları seçilmiştir. Şekil 6, iki vakıa için ivme, hız ve kümülatif işin zamana göre değişimlerini göstermektedir. İlk sıvılaşma yaşanan yer (1. Vakıa) Treasure Island'dır (kayıt istasyonu jeolojisi: alüvyon). Treasure Island'da bir tane sismik kayıt

Çizelge 2- Kaliforniya/ABD'nin farklı bölgelerinden elde edilen 1989 Loma Prieta depremi kayıtları için kümülatif işler.

Yer	İstasyon No.	R (km)	a_{max} (g)	Yerel Jeoloji	W (kJ/m³)
Capitola	CMG47125	16	0,47	Alüvyon/Bina	14,4
Hollister	CMG47189	25	0,07	Kaya/Açık alan	3,73
Fremont	CMG57064	35	0,10	Alüvyon/Bina	2,41
Hayward	CMG58219	45	0,08	Kaya/Bina	1,76
San Francisco	CMG58539	53	0,10	Kaya/Açık alan	0,74
Piedmont	CMG58338	64	0,08	Kaya/Açık alan	1,37
Point Bonita	CMG58042	73	0,07	Kaya/Bina	2,21
Larkspur	USGS1590	85	0,14	Bataklık/Bina	7,71
Olema	CMG68003	107	0,16	Alüvyon/Bina	4,04

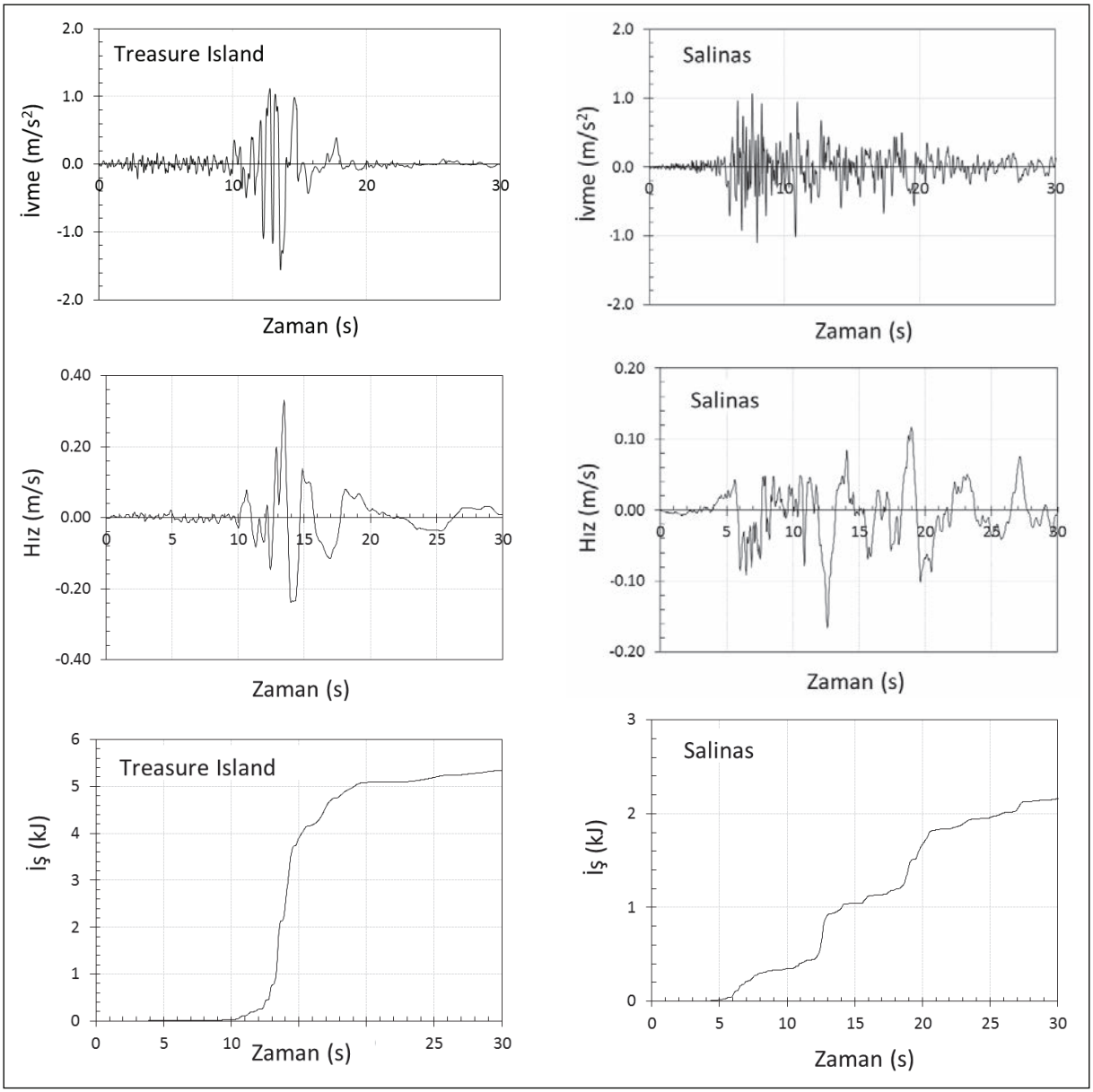
Çizelge 3- Dört farklı vakıa için hesaplanan sıvılaşma ve deprem enerjileri.

		Vakıa #1	Vakıa #2	Vakıa #3	Vakıa #4
Deprem ve saha		**Loma Prieta Treasure Island**	**Loma Prieta Sandboldt UC-B10**	**Loma Prieta Sandboldt UC-B10**	**Loma Prieta Alameda Bay Farm Dike**
M_w		6,9	6,9	6,9	6,9
a_{max} (g)		0,16	0,28	0,28	0,24
Sıvılaşma var/yok		Var	Yok	Var	Yok
Katman derinliği (m)		6,5	6,1	3,0	6,5
Su tablası derinliği (m)		1,5	1,8	1,8	3,0
σ_V (kPa)		116	115	55	125
σ'_V (kPa)		67	73	43	91
$(N_1)_{60}$		6,4	34,4	15,3	43,3
İnce tane içeriği (%)		20	5	2	7
$(N_1)_{60cs}$		10,8	34,4	15,3	43,4
γ_{sat} (kN/m^3)		18,0	19,0	18,0	19,5
M_t (kg)		1800	1900	1900	1950
ϕ' (°)		31,3	46,2	37,5	49,4
K_o		0,48	0,28	0,39	0,24
σ'_{ort} (kPa)		44	38	26	45
D_r (%)		49	88	59	99
W_{siv} (J/m^3)	Figueroa vd. (1994)	606	1596	638	2297
	Liang (1995)	698	1998	775	2891
	Dief ve Figueroa (2001)	546	2966	509	6080
	Jafarian vd. (2012)	236	2949	389	5983
W_{dep} (J/m^3)		5200	2200	2200	5600

(g_{sat} = birim ağırlık, M_t = 1 m^3 hacimli zeminin kütlesi, W_{siv} = Sıvılaşma için gereken enerji, W_{dep} = Deprem tarafından zemine uygulanan enerji. Veriler Idriss ve Boulanger, 2010'dan alınmıştır).

istasyonu bulunmaktadır. Bu arazi için zeminin birim kütlesi 1800 kg olarak alınmıştır. Bu değer Treasure Island'daki hız-zaman verisi ile Eşitlik 13 içerisinde kullanıldığında talep 5200 J/m^3 olarak bulunmuştur (Şekil 6). Treasure Island kaydından hesaplanan talep, 4 kestirim denklemi kullanılarak hesaplanan zemin kapasitelerinden daha büyük olduğu için, bu sahadaki sıvılaşma, önerilen yöntemin bakış açısıyla doğrulanmıştır. 2. Vakıa Loma Prieta depremi sırasında sıvılaşmayan bir araziyi kapsar. Bu arazi San Francisco'daki Moss Landing'de yer alır ve en yakın kayıt istasyonu Salinas/San Francisco'dadır (kayıt yeri jeolojisi: dolgu). Bu arazideki talep için (1900 kg'lık birim kütle kullanılarak) Dief ve Figueroa (2001) ve Jafarian vd. (2012) kestirimsel denklemleri kullanılarak hesaplanan kapasitelerden daha küçük olan 2200 J/m^3 değeri hesaplanmıştır (Şekil 6). Bu bulgu, önerilen yöntemin çerçevesi ile de uyumludur ancak Figueroa vd. (1994) ve Liang (1995)'ın kestirim denklemleri kullanıldığında, kapasite talepten daha küçük bulmuştur. Üçüncü konum (3. Vakıa), Moss Landing'de sıvılaşma yaşanan bir yerdir. Bu alandaki zeminin birim kütlesi de 1900 kg'dır ve bu nedenle kümülatif iş veya talep, 2. Vakıadaki durumla aynıdır; yani 2200 J/m^3'dür. Bu değer, bu araştırmada sunulan hipotezi destekleyen 4 kestirim denklemi kullanılarak hesaplanan tüm kapasitelerden daha büyüktür. Son yer (4. Vakıa), San Francisco'daki Alameda Bay Farm Dike'dır. Loma Prieta depremi sırasında bu bölgede herhangi bir sıvılaşma gözlenmemiştir. En yakın kayıt istasyonu Treasure Island'dadır. Bu saha için 1950 kg'lık birim kütlesi, Eşitlik (13) ve Treasure Island'daki hız-zaman verileri (Şekil 6) ile birlikte kullanıldığında 5600 J/m^3'lük bir kümülatif iş veya talep bulunmuştur. Bu denklemlerden ikisi sıvılaşma neticesi vermemiş; ikisi ise 2. Vakıa için sıvılaşma neticesi vermiştir.

Kapasite ve talepler arasında sınırlı sayıdaki vakıaya dayalı olarak yapılan karşılaştırma, önerilen yöntemin sıvılaşma analizinde kullanılabileceğini göstermektedir. Birim kütlesi ve hız-zaman geçmişi



Şekil 6- İncelenen vakıalar için ivme, hız ve kümülatif iş-zaman kaydı örnekleri.

kullanılarak hesaplanan talepler biraz belirgin olsa da, kapasitelerin hesaplanması bazı belirsizlik dereceleri içermektedir. Önerilen yöntemin zemin sıvılaşmasını öngörmede iki tahmin denkleminin kullanımındaki başarısızlığı bu belirsizliklere atfedilebilir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışma ile şu sonuçlar elde edilmiştir:

Kumlu bir zeminin sıvılaşmaya karşı direnci birim hacim başına düşen enerji olarak belirlenebilir. Bazı araştırmacılar bir dizi laboratuvar çalışmasına dayanarak, ilgili tabakada rölatif sıkılık ve efektif ortalama çevresel gerilme gibi basit zemin parametrelerini kullanarak sıvılaşma enerjisinin hesaplanmasını sağlayan ampirik ilişkiler kurmuşlardır.

Herhangi bir sismik olayın enerji seviyesi, kinetik enerji formülü kullanılarak kolay bir şekilde belirlenebilir. Deprem kaydının toplam enerjisini elde etmek için, doymuş zeminin birim kütlesi ile hız-zaman verileri birlikte kullanılır.

Kum zeminlerin sıvılaşmaya duyarlılığı “deprem enerjisi” kavramını kullanarak geniş bir yelpazedeki

büyüklük ve farklı uzaklıklar içeren bir dizi deprem kaydı ile kolaylıkla kontrol edilebilir.

Talebi belirlemek için kullanılan gerilme ve birim deformasyon temelli yöntemler ana girdi olarak zemin seviyesindeki a_{max}'a ihtiyaç duymaktadır. Sönümleme ilişkilerindeki belirsizliklerden dolayı, a_{max} değeri ciddi anlamda spekülatif olabilir. Dahası, anakaya seviyesindeki a_{max} değerini zemin seviyesindeki a_{max} değerine dönüştürmek için aşırı sadeleştirilmiş bir varsayım veya yer tepki analizi gerçekleştirilmelidir. Zemin içinden geçen ve yayılan toplam enerji değişmediği için, enerji temelli yöntemde ne anakaya seviyesindeki a_{max} ne de zemin seviyesindeki a_{max} değerini hesaplamaya gerek vardır. Bu durum muhtemelen diğer iki sıvılaşma değerlendirme yöntemine kıyasla enerji temelli yaklaşımın en belirgin üstünlüğünü oluşturmaktadır.

Talebi hesaplamak için hem gerilme temelli hem de birim deformasyon temelli yöntemler ortalama kesme gerilmesi değeri için %65'i kullanmaktadırlar. Bazı araştırmacılar bu değerin tutucu olduğunu savunmaktadır. Deprem kaydı enerjisinin hesaplanmasında böyle bir düzeltme işlemine gerek yoktur.

Hem gerilme hem de birim deformasyon temelli yaklaşımlar derinlik düzeltme faktörü r_d'yi kullanır ve önerilen yöntem bu yaklaşıma ihtiyaç duymaz.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sınırlı sayıdaki vakıaya aittir. Enerji temelli yöntemin sıvılaşma analizlerinde güvenle kullanılabilmesi için çok sayıda vakıa analizi yapılmalıdır. Yazarların bu konuda devam eden bir çalışması vardır.

Değinilen Belgeler

Alavi, A.H., Gandomi, A.H. 2012. Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction. Geoscience Frontiers 3(4), 541-555.

Atkinson, G. M. 1986. Ground motion for eastern North America. Ontario Hydro, Toronto, Ont., Report, 86353.

Baziar, M.H., Jafarian, Y. 2007. Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model, capacity energy. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 1056–1072.

Chen Y. R., Hsieh, S. C., Chen, J. W., Shih, C. C. 2005. Energy-based probabilistic evaluation of soil liquefaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25(1):55-68.

Davis, R.O., Berrill, J.B. 1982. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 59-68.

Çetin, K.O., Seed, R.B., Der-Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, Jr. L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S. 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 130(12),1314–1340.

Davis, R.O., Berrill, J.B. 2001. Pore pressure and dissipated energy in earthquakes-Field verification. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(3), 269-274.

DeAlba, P.S., Seed, H.B., Chan, C.K. 1976. Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, 102(GT9): 909–927.

Dief, H.M., Figueroa, J.L. 2001. Liquefaction assessment by the energy method through centrifuge modeling. In: Zeng, X.W. (Ed.), Proceedings of the NSF International Workshop on Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering. CWRU, Cleveland, OH.

Dobry, R., Ladd, R., Yokel, F., Chung, R., Powell. D. 1982. Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method. National Bureau of Standards Building Science Series, US Dept of Commerce, 138 p.

Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., Dahisaria, M.N. 1994. Evaluation of soil liquefaction by energy principles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(9): 1554–1569.

Green, R.A. 2001. Energy-based evaluation and remediation of liquefiable soils. PhD dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.

Gutenberg, B. Richter, C.F. 1956. Earthquake magnitude, intensity and acceleration. Bulletin of the Seismological Society of America, 46, 104-105.

Hardin, B.O., Drenevich, V.P. 1972. Shear modulus and damping in soils – design and curves. ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 94 (SM3), 689-708.

Hatanaka M., Uchida A. 1996. Empirical Correlation between Penetration Resistance and Internal Friction Angle of Sandy Soils. Soils and Foundations, 36(4): 1-9.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. 2006. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential

during earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 115-130.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. 2010. SPT-based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM-10-02, Center for Geotechnical Modeling Department, University of California Davis, California, USA, 136 pp.

Ishihara, K., Yasuda, S. 1972. Sand liquefaction due to irregular excitation. Soils and Foundations, 12(4), 65-77.

Ishihara, K., Yasuda, S. 1975. Soil liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation. Soils and Foundations, 15(1), 45-59.

Jafarian, Y., Towhata, I., Baziar, M.H., Noorzad, A., Bahmanpour, A. 2012. Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 35, 13-28.

Kokusho T., Mimori, Y. 2015. Liquefaction potential evaluations by energy-based method and stress-based method for various ground motions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 75, 130-146. Kokusho T., Mimori, Y., Kaneko, Y., 2015. Energy-based liquefaction potential evaluation and its application to a case history, 8th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, New Zealand.

Kokusho, T., Mimori, Y. Kaneko, Y. 2015. Energy-Based Liquefaction Potential Evaluation and its Application to a Case History. 6th Int'l. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, Christchuech, New Zealand.

Ladd, R.S., Dobry, R., Yokel, F.Y., Chung, R.M. 1989. Pore water pressure buildup in clean sands because of cyclic straining. ASTM Geotechnical Testing Journal, 12(1), 2208-2228.

Law, K.T., Cao, Y.L., He, G.N. 1990. An energy approach for assessing seismic liquefaction potential. Canadian Geotechnical Journal, 27, 320–329.

Liang, L. 1995. Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit. PhD dissertation, Department of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, OH.

Liang, L., Figueroa, J.L., Saada, A.S. 1995. Liquefaction under random loading: a unit energy approach. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 121(11). 776-781.

NCEER, 1997. Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. T. L. Youd and I. M. Idriss, eds., Technical Report NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, 276 pp.

Nemat-Nasser S., Shokooh, A.A. 1979. Unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing. Can Geotech J 1979; 16(4), 659-678.

Ostadan, F., Deng, N., Arango, I. 1996. Energy-based method for liquefaction potential evaluation - Phase I, feasibility study. U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory.

Seed, H.B. 1980. Closure to soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. J. Geotech. Eng. ASCE 106 (GT6), 724.

Seed, H.B., Idriss, I.M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J Soil Mech Found Div., ASCE, 97 (SM8): 1249–1274.

Seed, H.B., Idriss, I.M. 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Monograph Series, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 134 p.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K. 1986. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering, 112(GT11), 1016-1032.

Skempton, A.W. 1986. Standard penetration test procedures and the effects in sand of overburden pressure, relative density, particle size, aging, and overconsolidation. Geotechnique, 21, 305-321.

Whitman, R.V. 1971. Resistance of soil to liquefaction and settlement. Soils and Foundations, 11(4), 59-68.

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., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, 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 127(4), 817-833.

Zhang, W., Goh, A.T.C., Zhang, Y., Chen, Y., Xiao, Y. 2015. Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines: Engineering Geology, 188, 29-37.