

SIVILAŞMA ETKİLERİNİN YÜKSEK KAYMA MODÜLLÜ ZEMİN – ÇİMENTO KARIŞIMI KOLONLARLA AZALTILMASI THE MITIGATION OF LIQUEFACTION BY MEANS OF HIGH MODULUS SOILCRETE COLUMNS

Baran ÖZSOY¹, Turan DURGUNOĞLU²

¹Dr., Associate, Ove Arup & Partners International Ltd, West Yorkshire, UK.

²Prof.Dr., Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bebek, İstanbul.

ÖZ

Deprem durumunda, kohezyonsuz ve suya doymun kumlu ve siltli zeminlerde geçici ve tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artımı sonucu mukavemet kaybı oluşması olarak tanımlanan sıvılaşma, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrası ülkemizde çok sayıda hasara yol açmıştır. Makale kapsamında 'Jet Grouting' ve 'Deep Mixing' zemin ıslahı teknikleriyle bu sismik felaketin etkilerinin azaltılmasına yönelik yeni bir hesap metodu önerilmektedir. Deprem sebebiyle oluşan kayma gerilmelerinin tanımlanan birim alanlar üzerine dağılımı, zemin - çimento karışımı kolonlar ve çevrelerindeki zemin arasındaki kayma modülü farkı kullanılarak modellenmektedir. Önerilen metodun etkinliği Ford – Otosan Gölcük Tesisleri sahasında yapılan zemin ıslah çalışmaları ile karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, Zemin Islahı, Kocaeli Depremi

ABSTRACT

Liquefaction, which can be defined as temporary loss of strength of saturated sandy and silty deposits under transient and cyclic loading due to excess pore water pressure, caused many damages after 17th of August 1999 Kocaeli Earthquake. In the scope of this article, a new calculation technique to mitigate this seismic hazard by means of Jet Grouting and Deep Mixing techniques has been proposed. The distribution of earthquake-induced shear stresses on unit cells is modeled using shear modulus difference between the soilcrete columns and the surrounding soil. The efficiency of the proposed method has been tested on the soil improvement studies of Ford - Otosan Gölcük Plant.

Keywords: Liquefaction, Soil Improvement, Jet Grouting, Deep Mixing

1. GİRİŞ

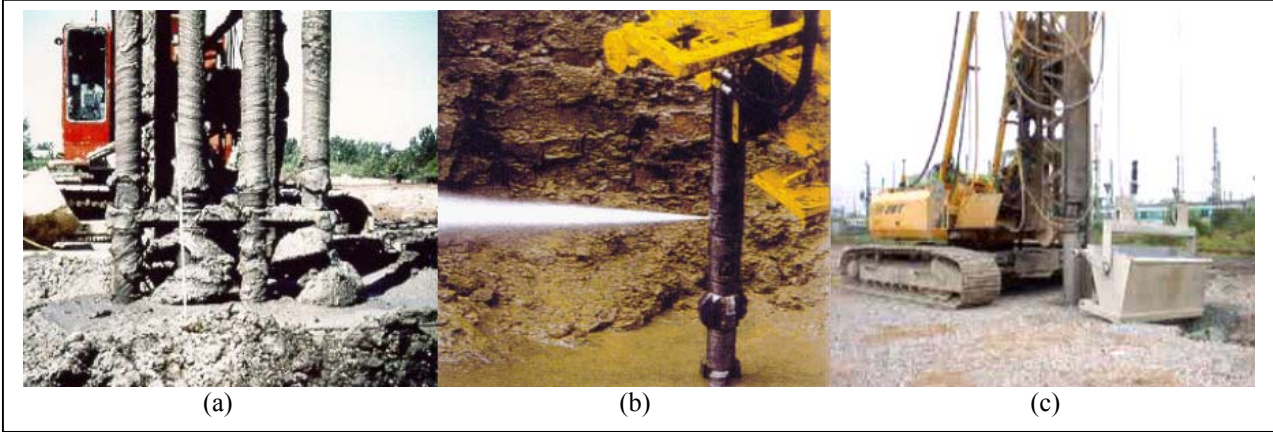
1.1. Sıvılaşmanın Tanımı ve Etkileri

Sıvılaşma kısaca deprem durumunda geçici ve tekrarlı yüklerle yeraltı su seviyesi altındaki kumlu ve siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak mukavemet kaybı olarak adlandırılmaktadır (Seed ve Idriss, 1971). Sıvılaşmanın belli başlı etkileri arasında deprem esnasında ve sonrasında oluşan zemin taşıma gücü kayıpları, oturmalar, şevli arazilerde yanal zemin ötelenmeleri, istinat duvarları arkasındaki toprak itkilerinde artış ve zemine gömülü boru ve servis hatlarının deformasyonları sayılabilir. Geçmişte Niigata ve Alaska (1964) depremlerindeki gözlemler akademik alanda ilgiyi bu konu üzerine çekmiş, sıvılaşma riskinin tespitine yönelik çalışmalar yapılmış ve Kobe (1995) depremi ile özellikle kullanılan zemin ıslah yöntemlerinin etkinliği gündeme gelmiştir.

1.2. Sıvılaştırma Etkilerini Azaltmakta Kullanılan Zemin İslah Metodları

Idriss (2002) sıvılaştırma riski olduğu açığa çıkarılan sahalar için alınabilecek kararları; öngörülen riskin kabul edilerek bir önleme gidilmemesi, tasarımın sıvılaştırmanın getirebileceği negatif tesirleri azaltacak yönde değiştirilmesi ve zemin ıslah çalışmaları ile sıvılaştırmanın önlenmesi ve/veya etkilerinin azaltılması olarak üç ana gruba ayırmaktadır.

Sıvılaştırma etkilerinin azaltılmasına yönelik metodlar arasında (1) sıvılaştırma potansiyeli olan zeminin kazılması ve/veya yer değiştirilmesi, (2) zemin sıkılaştırmasıyla mukavemet parametrelerinin artırılması (vibrokompaksiyon, taş kolon, dinamik kompaksiyon, patlatma vs.), (3) aşırı boşluk suyu basınçlarının taş kolon veya şerit drenler ile drenajı, (4) çimento ve diğer bağlayıcılarla zeminde mukavim kolonlar oluşturulması ('Jet Grouting', 'Deep Mixing' vs.), (5) çakma veya fore kazıklı temeller (kesme kuvvetlerini karşılayacak şekilde donatılarak), (6) yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, (7) diyafram duvar ve (8) radye temel uygulamaları sıralanabilmektedir.



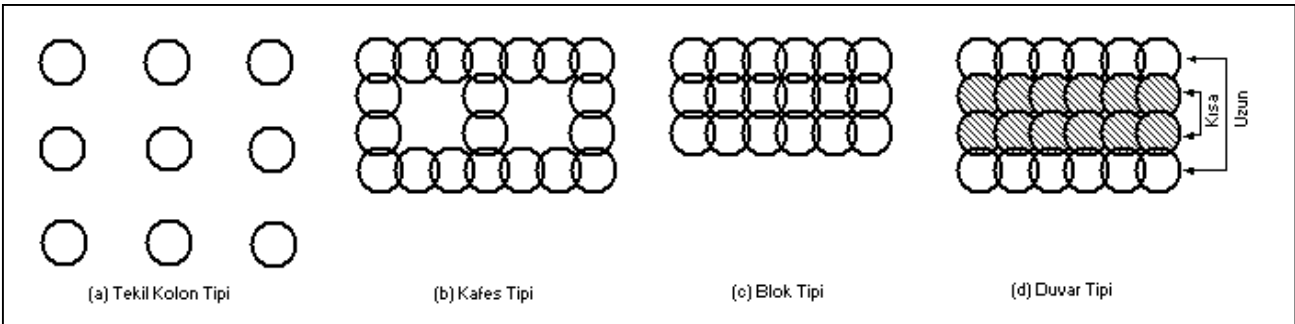
Şekil 1. Sırasıyla (a) 'Deep Mixing', (b) 'Jet Grouting' ve (c) Taş Kolon yöntemlerine ait uygulama örnekleri

Esas olarak bir ıslah metodunun seçiminde önemli etkenler metodun aplikasyon kolaylığı, tanımlanan sismik problemin çözümüne etkinliği, maliyeti ve çevresel etkilere duyarlılığı olarak sıralanabilir. Çimento ve diğer bağlayıcıların zemin içine yüksek veya düşük basınçlar altında enjekte edilmesine yönelik 'Jet Grouting' ve 'Deep Mixing' yöntemleri özellikle yüksek taşıma gücünün gerektiği, saha jeolojisi sebebiyle değişken zemin tiplerinde çalışma ihtiyacı duyulduğu ve inşaat süresinin kısıtlı olduğu durumlarda diğer yöntemlere göre daha avantajlı olmaktadır.

1.3. Zemin İslah Metodlarının Etkinliğinin Araştırılması

Vibrasyonla yapılan ıslah metodlarında en yaygın yöntem, ıslah öncesi ve sonrasında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Statik 'Koni' Penetrasyon Deneyi (CPT) ve/veya Presyometre Deneyi (PMT) uygulayarak zeminde gerçekleştirilen rölatif sıklık ve mukavemet artışını göstermektir. Sahada seçilecek deney alanlarında uygulama yapılarak metodun etkinliği araştırılır ve başarılması hedeflenen minimum SPT sayısı, koni uç direnci veya presyometre limit basıncı seçilir. Durgunoğlu vd. (1992) Borçelik sahasında yapılan taş kolon uygulamalarını, CPT ve bölge yükleme deneyleri ile yapılan kalite kontrol çalışmaları ışığında özetlemektedirler.

Çimento enjeksiyonu ile yapılan ıslah metodlarında yukarıdakilere ilave olarak yerinde alınacak karot numuneleri üzerindeki gözlemler ve basınç deneyleri, tekil veya grup yükleme deneyleri, kazı yapılıp uygulama çapının kontrolü, enjeksiyon karıştırma kazanlarından alınan numuneler üzerinde viskozite, yoğunluk, kür zamanı kontrolü ve uygulama sırasında basınç tahkiki gibi yöntemler daha ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2. Çeşitli çimento enjeksiyonu aplikasyon yöntemleri.

2. SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Laboratuvar analizlerine ve indeks özelliklerine dayanan kriterler haricinde Seed ve Idriss (1971) tarafından detayları verilen 'Basitleştirilmiş Hesap Yönteminin' ilkeleri aşağıda tanımlanmaktadır.

2.1. Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR)

Seed ve Idriss (1971) çalışmalarında yaklaşık 40ft (12m) derinliğe kadar deprem durumunda oluşabilecek maksimum kayma gerilmelerinin (τ_{max}) aşağıdaki şekilde hesaplanmasını önermişlerdir.

$$\tau_{max} = \frac{\gamma h}{g} a_{max} r_d \quad (1)$$

Burada, γ ; zemin birim hacim ağırlığını, h ; zemin elemanın derinliğini, g ; yerçekimi ivmesini, a_{max} ; maksimum yüzey ivmesini ve r_d ; derinliğe bağlı azalma faktörünü temsil etmektedir. Ortalama eşdeğer kayma gerilmelerinin (τ_{avg}) maksimum gerilmenin %65'inde oluştuğundan yola çıkarak ve bu değerleri efektif düşey gerilmeler (σ_{vo}) ile normalize ederek, aşağıdaki çevrimsel gerilme oranı (CSR) tanımlanmaktadır:

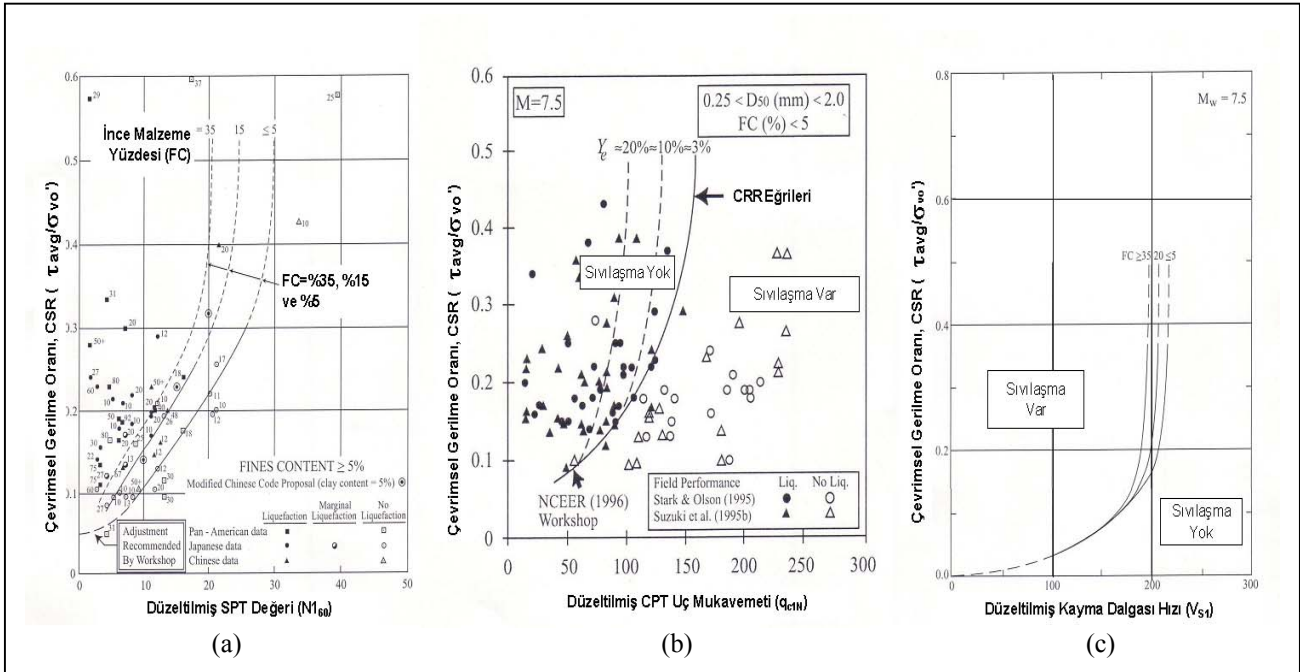
$$CSR = \frac{\tau_{avg}}{\sigma_{vo}} = 0.65 \times \frac{\tau_{max}}{\sigma_{vo}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} r_d \quad (2)$$

Yukarıdaki ifadede, σ_{vo} ; herhangi bir derinlikteki toplam düşey gerilmeyi temsil etmektedir. Derinliğe (z) bağlı olarak değişen azalma faktörü için Youd vd. (1997) aşağıdaki ifadeyi önermektedirler:

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 - 0.4117z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \quad (3)$$

2.2. Çevrimsel Mukavemet Oranı (CRR)

SPT, CPT ve kayma dalgası hızı (SWV) ölçümlerine dayanarak günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından sivilaşma görülen ve görülmeyen sahalar incelenmiştir. Farklı ince malzeme oranlarına (No.200 eleği geçen malzeme yüzdesi) ve $M_w=7.5$ deprem büyüklüğü seviyesine bağlı olarak Şekil 3'te gösterildiği şekilde çevrimsel mukavemet oranını temsil eden çeşitli sınır eğrileri tanımlanmıştır. Eğrilerde ifade edilen SPT darbe sayılarının, kayma dalgası hızlarının ve CPT uç dirençlerinin efektif gerilme, kullanılan ekipman tipi ve ince daneli malzeme yüzdesi gibi çeşitli kriterlere göre düzeltilmiş değerler alınarak verildiği unutulmamalıdır. Burada sadece yöntem olarak SPT darbe sayısına bağlı düzeltme katsayıları verilecektir. SWV ve CPT'ye bağlı olarak önerilen düzeltme faktörleri ile ilgili ayrıntılı bilgi Youd vd. (1997) tarafından verilmiştir ve günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3. Sırasıyla (a) Standard Penetrasyon Deneyi, (b) Kayma Dalgası Hızı ve (c) Statik (Koni) Penetrasyon Deneyine bağlı olarak çevrimsel mukavemet oranı (CRR) eğrileri (Youd vd., 1997).

Düzeltilmiş SPT değeri ile yukarıdaki grafiklerden CRR elde edilmesi için aşağıdaki prosedür takip edilebilecektir.

$$N_{160} = N_{60} \times \left[\frac{200}{100 + \sigma'_{vo}} \right] \quad (4)$$

Burada N_{160} , %60 enerji oranına ve efektif düşey gerilmeye (σ'_{vo} kPa olarak alınmak üzere) göre düzeltilmiş SPT sayısını ifade etmektedir. Sondaj delgi çapının 115mm'den büyük olması, farklı çekiç tipleri ve numune alıcı rodları kullanılması durumunda ilave düzeltme faktörleri gerekmektedir (Seed vd., 2001). Deney tipine ilave olarak $M_w=7.5$ 'den farklı deprem büyüklükleri de göz önünde bulundurularak sivilaşmaya karşı güvenlik faktörü (FS) aşağıdaki gibi hesaplanabilecektir (Youd vd., 1997):

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \times MSF$$

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (5)$$

Burada, MSF; deprem büyüklüğü düzeltme faktörünü ve M_w ; moment cinsinden deprem büyüklüğünü ifade etmektedir.

2.3. Deprem Kayma Gerilmelerinin Özel Saha Tepki Analizleri İle Belirlenmesi

Yukarıdaki Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen prosedüre bir alternatif olarak, zeminde oluşacak maksimum deprem kayma gerilmeleri, zemin – deprem tepki analizleri ile de (site response analysis) doğrudan hesaplanabilecektir. Bu durumda uygun zemin maksimum kayma modülü profilinin hesaplanması (G_s), bu kayma modüllerinin farklı şekil değiştirme yüzdelerinde azalım eğrilerinin tayini ve sahanın zemin profiline uygun deprem kaydının seçimi gerekmektedir. SHAKE (1992) veya benzeri bir analiz programı ve Formül 2'nin de yardımıyla, bu tip bir hesabın yapımı mümkündür. Maksimum deprem ivmesinin seçiminde deprem şartnamelerinden yararlanabileceği gibi sahaya yönelik özel inceleme yapıp olumsuz duruma göre analiz de yapılabilir. Deprem kaydının seçiminde önemli olan mümkünse sahaya yakın bir lokasyondan veya benzer sismik özelliklere sahip bir sahadan alınan verilerin kullanılmasıdır. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Merkezi Internet adresi (www.koeri.boun.edu.tr) bu bakımdan zengin bir içerik sunmakta ve faydalı bağlantılar içermektedir. Bu şekilde derinliğe bağlı azalım faktörlerinin (r_d) hesaplanmasındaki belirsizlikten kurtulmak ve uygun deprem ivmesinin seçimiyle gerçek davranışa daha yakın değerleri bulmak mümkündür (Özsoy, 2002).

3. ÖNERİLEN HESAP YÖNTEMİ ve ADIMLARI

3.1. Zemin Maksimum Kayma Modülünün Saptanması

Çimento – zemin karışımı ile elde edilen yüksek kayma mukavemetine sahip kolonlarla hesap için öncelikli adım zemin maksimum kayma modülünün tayini ve uygun giriş deprem büyüklüklerinin tesbitidir. Bu amaçla aşağı kuyu (Down-Hole) veya 'Suspension PS Logging' yöntemleri kullanarak doğrudan; veya SPT, CPT, PMT gibi arazi deneyleri sonuçlarından yola çıkarak dolaylı olarak zemin kayma hızı (V_s) profilinin tayini gerekir. Bu amaçla aşağıdaki formülasyon kullanılabilir (Ohta ve Goto, 1978):

$$V_s = 62.14 \times N^{0.219} \times H^{0.230} \times F \quad (6)$$

Burada N tashih edilmemiş SPT darbe sayısını, H; tabaka derinliğini ve F; zemin tipine bağlı bir düzeltme faktörünü temsil eder. F düzeltme faktörü killi zeminlerde 1.000, ince kumlarda 1.091, orta daneli kumlarda 1.029, kalın daneli kumlarda 1.073, kum ve çakıllılarda 1.151 ve çakıllı zeminlerde 1.485 alınabilecektir.

3.2. Birim Alan Oranı Metodu ve Deprem Kayma Gerilmelerinin Dağılımı

Yukardaki hesap adımlarının gerçekleştirilmesi sonrasında sivilaşma riskinin olduğunun anlaşılması durumunda tasarımcı ve işveren tarafından bu riskin gerçekleşmesi durumunda oluşabilecek muhtemel durumları (temel ve döşeme oturmaları, üst yapıda hasar, tesisin operasyonelliğinin kesintiye uğraması vs.) içeren bir risk analizi yapılmalıdır. Bu analiz sonucunda sivilaşma etkilerinin önlenmesi veya kısmen azaltılması durumuna gidilmesi yönünde bir karar çıkması durumunda saha için en uygun zemin ıslah metodunun seçimine gidilecektir. Hayden ve Baez (1994) burada açıkladığına benzer bir yöntemle taş kolon uygulamaları için hesap yöntemlerini sunmaktadırlar.

Yüksek kayma modüllü zemin – çimento karışımı kolonlar ile yapılan uygulamalarda ikinci adım olarak tasarımcının tecrübesine de bağlı olarak uygun bir kolon çapı ve aralığı seçilerek iterasyona başlanacaktır. Kolonların kayma modülleri tercihen arazide yapılacak aplikasyon deneyleri veya başlangıç olarak müteahhit firmaların benzer sahalarda elde ettiği tek eksenli silindirik basınç deneyi mukavemetlerinin (f_{jG}) yorumlanması ile elde edilebilecektir. Her halikarda bu verilerin inşaat aşamasında deneylerle doğrulanması zorunludur. Tercihen Jet Grout kolon karot

numunelerinden alınacak örnekler tek eksenli basınç deneyine tabi tutulacak ve geçici yükleme durumlarında Poisson Oranı (ν) 0.5 kabul edilerek, aşağıda açıklandığı şekilde elastisite (E_{JG}) ve kayma (G_{JG}) modülleri bulunabilecektir:

$$E_{JG} = 4730\sqrt{f_{JG}} \quad (MPa)$$

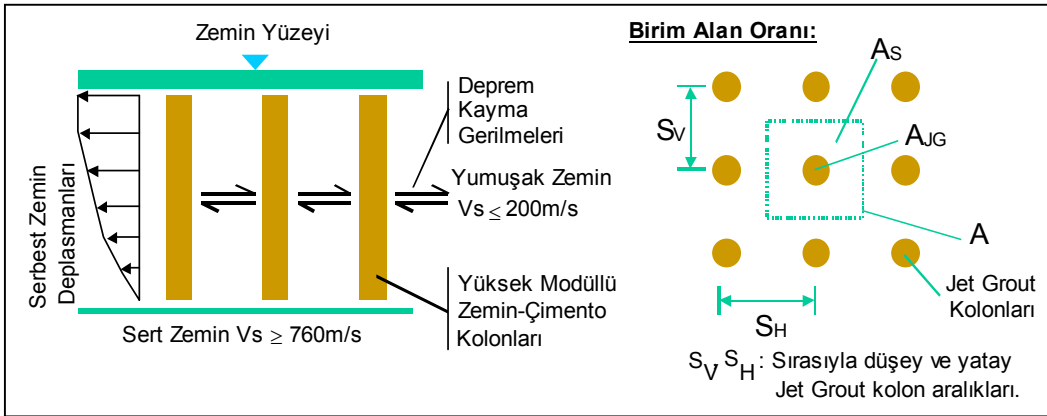
$$G_{JG} = \frac{E_{JG}}{2 \times (1 + \nu)} \quad (8)$$

Deep Mixing tekniğinde elde edilen numunelerin basınç mukavemeti değerleri Jet Grouting numunelerine kıyasla genelde daha düşük çıkabilmekte ve bu değerlere karşılık gelen elastisite modülleri numunenin tek eksenli basınç mukavemetinin 200 ila 1000 katı arasında değişmektedir. Tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına uygulanacak 2.0 mertebesinde bir güvenlik faktörü ile kayma modülünün alabileceği değer aralığının, daha önce elde edilen tecrübelerin ışığında, 1,000MPa ila 4,000MPa mertebesinde olabileceği görülmektedir. Uygulamada gerçekleştirilen zemin değiştirmesi miktarını tanımlamak üzere yüksek modüllü kolon alanının (A_{JG}) Şekil 4'te gösterilen birim hücre alanına (A) oranı olan, Alan Yer Değiştirme Oranı (a_r) aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$a_r = \frac{A_{JG}}{A}$$

$$a_s = \frac{A_s}{A} = 1 - a_r \quad (8)$$

Hesabın bundan sonraki adımları; deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak oluşturulan kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında, kayma modülleri oranında dağılacığı kabulüne dayanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli gösteren alüvyonal zeminlerde kayma dalgası hızının genelde 200m/s'den az olacağı düşünülürse burdan elde edilecek çimento karışımı kolonların kayma modülünün zemin kayma modülüne oranının (G_r) 15 ila 160 kat farklı olabileceği hesaplanmıştır. Bu durumda oluşacak kayma gerilmeleri uygun bir uygulama çapı ve aralığının seçimi ile kolonlar arası kalan zeminden ziyade kolonlar üzerinde yoğunlaşacaktır.



Şekil 4. Deprem kayma dalgalarının dağılım modeli ve birim hücrenin tanımlanması.

Yukarıda yapılan tanımların ışığında birim alan içerisindeki gerilme konsantrasyonu (n) aşağıdaki şekilde tanımlanabilecektir:

$$n = \frac{\tau_{JG}}{\tau_s} \quad (9)$$

Yukarıdaki ifadede, τ_{JG} ; çimento-zemin karışımı kolonlara ve τ_s ; kolonlar arasındaki zemine etkiyen kayma gerilmesini temsil etmektedir. Bu durumda birim alan üzerine etki eden gerilme (τ), herhangi bir derinlikte birim alan içerisindeki kayma gerilmesinin dengesinden yola çıkarak ve alan değişim oranı (a_r)'ye bağlı olarak şu şekilde hesaplanacaktır:

$$\tau = \tau_s a_s + \tau_{JG} a_r$$

$$\tau = \tau_s (1 - a_r) + \tau_{JG} a_r \quad (10)$$

Yukarıdaki eşitliklerin gerilim konsantrasyon oranına (n) bağlı olarak çözümü durumunda aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$\tau_s = \frac{\tau}{(1 + (n-1)a_r)} \Rightarrow \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{(1 + (n-1)a_r)}$$

$$\tau_{JG} = \frac{n\tau}{(1 + (n-1)a_r)} \Rightarrow \frac{\tau_{JG}}{\tau} = \frac{n}{(1 + (n-1)a_r)} \quad (11)$$

3.3. Çevrimsel Gerilim Azaltım Faktörü

Zeminde çimento-zemin karışımı kolonların veya herhangi başka bir donatılı elemanın olmaması durumunda ortalama kayma gerilmeleri Seed ve Idriss (1971) çalışmasında veya tercihen bölüm 2.3'te açıklandığı şekilde bulunabilecektir. Ortalama kayma gerilmesinin (τ_{avg}) yukarıdaki formüllerdeki birim alan üzerine etki eden gerilme (τ) yerine kullanılmasının sebebi, oluşacak şekil değiştirmelerin depremde genelde bu gerilme seviyesinde ortaya çıkmasından ileri gelmektedir. Bu durumda kolonlar ve onları çevreleyen zemin arasındaki gerilme paylaşımı kolon çapı ve aralığının bir fonksiyonu haline gelecektir.

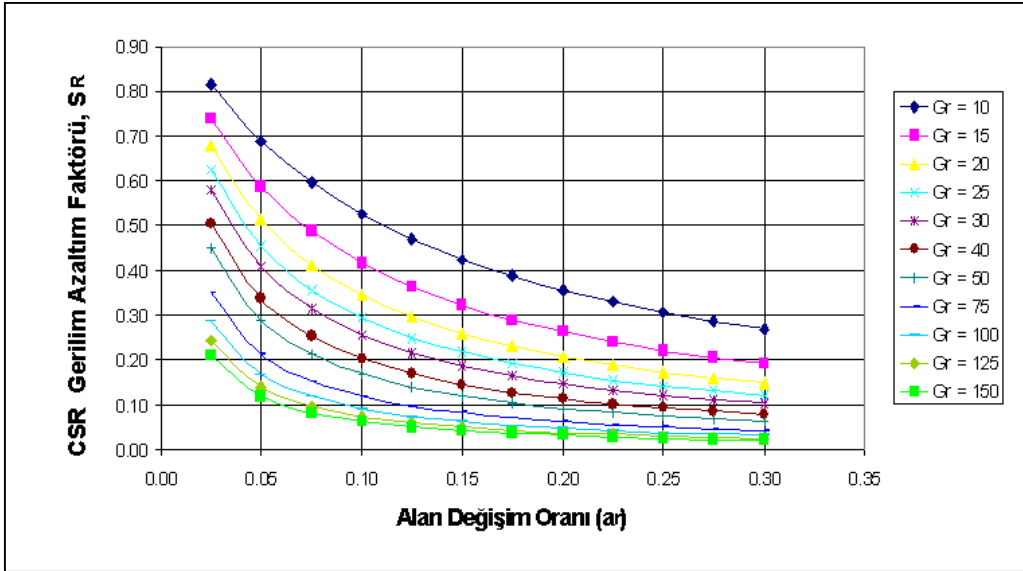
Çevrimsel gerilme oranı (CSR) üzerine etkiyecek azaltım faktörü (S_R), birim alan içerisindeki kolonlar ve bunları çevreleyen zemin arasında şekil değiştirme uyumu olduğu kabulüyle aşağıdaki gibi tanımlanabilecektir.

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_{avg}} = \frac{1}{(1 + (G_r - 1) \times a_r)} = \frac{1}{G_r} \times \left[\frac{1}{a_r + \frac{1}{G_r} (1 - a_r)} \right] \quad (12)$$

Bu formülde verilen S_R değeri, Seed ve Idriss'in 1971 tarihli çalışmasından bulunan çevrimsel gerilme oranını (CSR) azaltmakta ve dolayısıyla Formül 5'teki güvenlik faktörünün artırımında kullanılacaktır.

$$CSR_{tasarim} = CSR \times S_R \quad (13)$$

Zemin sıvılaşma kontrolü Formül 5'e göre, fakat bu sefer $CSR_{tasarim}$ değerleri kullanılarak, uygun güvenlik faktörü elde edilene kadar tekrarlanacaktır. Yukarıdaki formülasyonların daha önceki tecrübeler ışığında uygun tasarım aralıklarında çözümü durumda, Şekil 5'te ifade edilen tasarım eğrileri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5. Birim alan ve kayma modülü oranlarına bağlı olarak CSR azaltım eğrileri (S_R).

3.4. Yapısal Kontroller

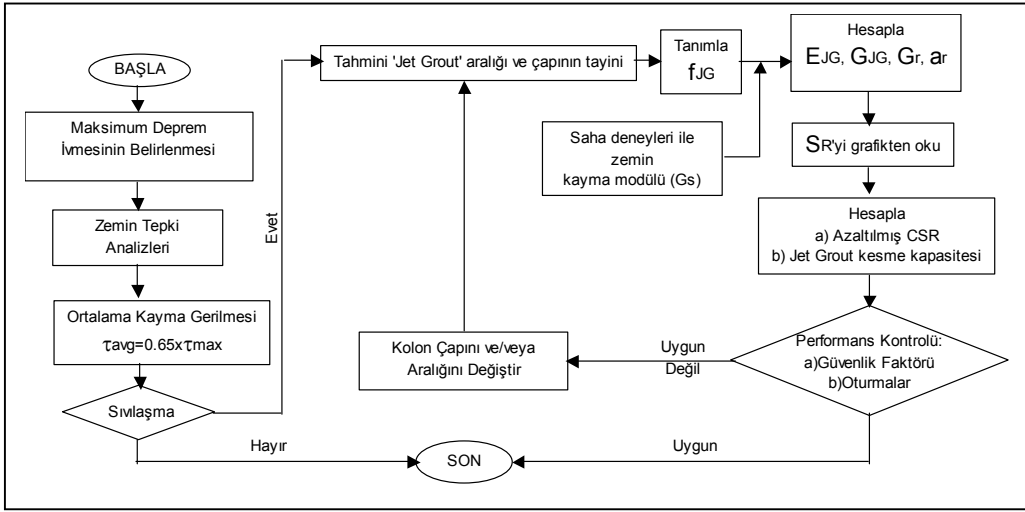
Kolonlar arasında kalan zeminin sıvılaşma riskinin azaltılması için yüksek kayma modüllü kolonların kendilerine gelecek kayma kuvvetini karşılayacak mukavemete sahip olması gerekmektedir. Kullanılan kolon kesitinin kayma kuvvetlerine (V_{JG}) karşı yeterli olup olmadığının kontrolü için, çimento karışımı kolonların donatısız olarak düşük duktiliteli elemanlar olduğu düşünülerek, aşağıdaki formülasyon kullanılabilir (International Navigation Association, 2001):

$$V_{JG} = 0.3 \sqrt{f_{JG}} A_{JG} \quad (14)$$

Burda kullanılan basınç mukavemetinin ilke tasarımı aşamasında daha önce yapılmış benzer araştırma sonuçlarından yola çıkılarak bulunması durumunda minimum 2.0 güvenlik faktörü basınç mukavemeti değerine (f_{JG}) uygulanmalıdır. Her durumda sonuçların uygulama sırasında elde edilen yerinde karot numuneleri ile kontrolü gereklidir.

3.5. Önerilen Hesap Algoritması

Yukarıda anlatılan hesap yönteminin ışığında aşağıda verilen uygulama algoritması kullanılabilir. Hesabın son adımı 'Jet Grout' veya 'Deep Mixing' aralık ve çaplarının sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörlerini karşılamının yanında statik ve dinamik etkiler altında üstyapı oturma kriterlerini de karşılayıp karşılamadığının kontrolüdür.



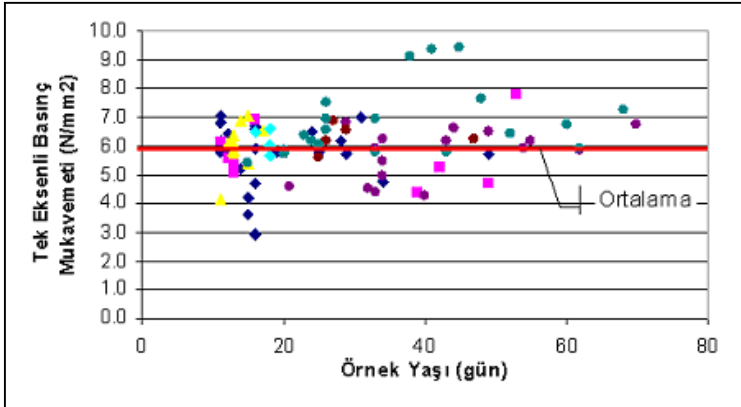
Şekil 6. Önerilen hesap algoritması.

4. BİR VAKA ANALİZİ OLARAK FORD – OTOSAN GÖLCÜK TESİSLERİ

Lokasyon olarak Gölcük Körfezi içinde yer alan saha jeolojik olarak İhsaniye deresinin getirdiği alüvyonal çökeltilerden oluşmaktadır. Sahanın geneli için tek bir zemin profili çıkartmak mümkün olmamakla beraber sahanın Kuzey kesimlerinin derenin denize açılan kısmına doğru daha çok siltli killi olduğu, güneyin ise genelde siltli kumlu çakıllı karakteristikte olduğu söylenebilir. Boğaziçi Üniversitesi tarafından yapılan Sismik Yansıma ve Kırılma Deneyleri bu alüvyonel tabakaların 200m'den derin olduğunu işaret etmektedir.

Saha içerisinde yapılan bazı sondaj sonuçlarından elde edilen SPT sayıları ve özel numune alıcılarıyla elde edilen örnekler, CPT deneyleri ve PS Logging yöntemi ile kayma dalgası hızı ölçümleri sayesinde saha için sıvılaşma analizleri yapılabilmektedir (Ove Arup & Partners, 2000). Burada analizlerin sayısının çokluğu sebebiyle sadece yapılan analiz sonuçlarından bazılarının yukarıda belirtilen yöntemle gerçekleştirilen simülasyonları sunulacaktır.

Sahada kalite kontrol deneylerinin bir parçası olarak başta $\phi 100\text{mm}$ çaplı karot numuneleri almak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda Şekil 7, alınan bazı karot numuneleri üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deneyi sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 7. Alınan 'Jet Grout' karot numunelerinin tek eksenli basınç mukavemeti sonuçları.

Hesapta tahkik edilecek 'Jet Grout' düzeni 800mm çapında 2.5mx2.5m aralıkta tekil kolon uygulamaları şeklindedir. Şekil 7'deki test sonuçlarının ortalama değeri 6.0MPa alındığında emniyetli basınç mukavemeti olarak, malzeme güvenlik faktörü olarak 2.0 kullanılması durumunda, 3.0MPa elde edilmektedir. Bu basınç mukavemeti değerine karşılık gelen elastisite ve kayma modülleri, Formül 7 yardımıyla sırasıyla 8,190MPa ve 2,730MPa'dır. Bu binada gerçekleştirilen kayma dalgası hızı ölçümleri ilk 10m'deki zemin tabakası için ortalama 220m/s kayma dalgası hızını işaret etmektedir. Bu durumda elde edilecek zemin maksimum kayma modülü (G_s) ve kayma modülü oranı (G_r) aşağıdaki şekilde hesaplanabilecektir:

$$G_s = \rho \times V_s^2 = 1.8 \times 220^2 = 87120 \text{ kPa}$$

$$G_r = \frac{2730}{87.12} \cong 31$$

(15)

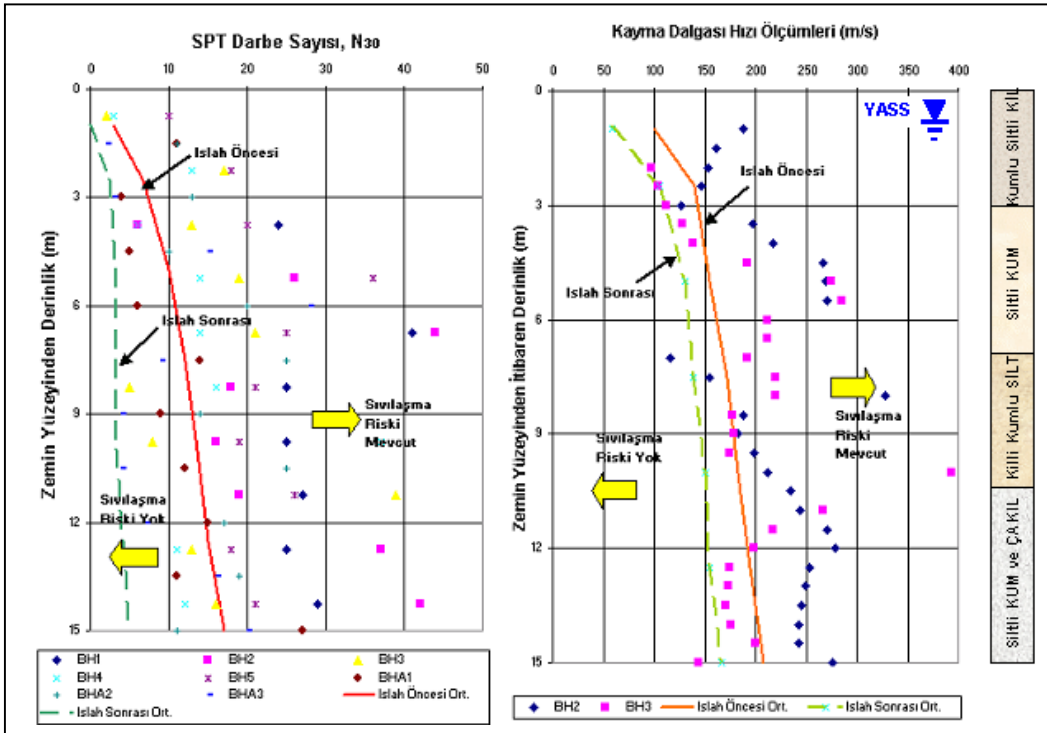
Burada, ρ ; ilgili zemin tabakalarının ortalama yoğunluğunu (t/m^3) temsil etmektedir. Birim alan oranından yola çıkarak alan yer değiştirme oranı da şu şekilde bulunabilecektir (Formül 8):

$$a_r = \left(\frac{\pi 0.8^2}{4} \right) / (2.5 \times 2.5) \cong \%8 \quad (16)$$

Burdan Şekil 5 yardımıyla %8 alan değişim oranı ve kayma modülü oranı 31'e karşılık gelen çevrimsel gerilim azalım oranı (S_R) 0.30 mertbesinde beklenmektedir. Bu durumda özet olarak depremden doğan zemin kayma gerilmelerinin %70'inin 'Jet Grout' kolonlarda yoğunlaşacağı ve ancak %30'unun kolonlar arası zemine aktarılacağı sonucu çıkmaktadır. Bu sondajlar için gerçekleştirilen özel tek boyutlu saha tepki analizlerinin bir ortalaması olarak, sıvılaşma potansiyeli görülen ilk 10m'lik tabakada, en olumsuz durumda 60kPa mertbesinde bir maksimum deprem kayma gerilmesi beklenmesi gerektiğini göstermektedir. Bu durumda Formül 2 yardımıyla, ortalama kayma gerilmesi bu maksimum değerinin %65'i mertbesinde, yani yaklaşık 40kPa civarındadır. Birim alana gelen $40kPa \times 0.70 \times 2.5m \times 2.5m = 175kN$ mertbesinde bir kayma kuvvetinin 800mm çapındaki kolon kesitince güvenli olarak taşınması gerekmektedir. Bu tahkik için Formül 14'ün kullanılması durumunda:

$$V_{JG} = 0.3 \sqrt{3.0} \times \pi 800^2 / 4 = 261187N = 261kN \geq 175kN \quad (17)$$

olduğundan sistem güvenlidir. Son aşamada statik yükler altında sistemin güvenilirliği yeterli bulunmuş ve kolon uygulama çapı ve aralığı uygun görülmüştür. Şekil 8 kapsamında da çevrimsel gerilme azaltım faktörü uygulanması durumunda sıvılaşma riskinin nasıl azaldığı gösterilmektedir. Kısaca yukarıdaki hesabın tekrarlanması halinde elde edilecek eşik değer SPT darbe sayısı ve kayma dalgası hızları (PS Logging) altında kalan bölgeler sıvılaşma riski olan noktaları ve üstünde kalanlar ise bu riskin uzaklaştırıldığı noktaları göstermektedir. Alınan zemin numunelerinden elde edilen elek analizi ve hidrometre sonuçları No.200 elek altında kalan malzemenin %15-75 aralığında ve silt yüzdesi daha yüksek olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki eğriler No.200 elek altında kalan malzemenin %35 olduğu durum için düzenlenmiştir. Analizlerde kullanılan çevrimsel gerilme oranları Ove Arup & Partners Ltd (2000) raporundan alınmıştır. Yapılan zemin ıslah çalışmaları yüzeyden maksimum 15m derinliğe kadar etki ettiğinden ve bu derinliğin altındaki zemin tabakalanmasında hidrometre analizleri %20'nin üzerinde kil muhtevası gösterdiğinden, bu derinliğin altında sıvılaşma riski görülmemiştir.



Şekil 8. Zemin ıslahı öncesi ve sonrası sıvılaşma güvenliği analizlerinin simülasyonu.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Günümüzde lojistik açıdan önemli bölgelerde boş yatırım sahalarının giderek azalması ve insanların barınma ve yatırım amaçları için belli bölgelerde yoğunlaşmaları inşaat sahası olarak kullanılabilir alanların girişimciler için giderek azalmasına sebep olmaktadır. Bu durumda ise sahaların zemin ve deprem mühendisliği açısından incelenmesini takiben çoğu zaman uygun bir zemin ıslah metodunun seçimi gerekmektedir.

Bu makalede vurgulanan iki zemin ıslah metodundan ‘Jet Grouting’ tekniği, ülkemizde özellikle son beş yılda önemli uygulama alanı bulmuş, bu ekipmanlara yatırım yapan ve tasarımlarında bu tekniği kullanan firma sayısında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Gene benzer bir mantıkla fakat düşük basınçla uygulaması gerçekleştirilen ‘Deep Mixing’ tekniği için gerekli ekipman altyapısı ülkemizde mevcut bulunup dünyadaki genel yönelimlere benzer şekilde onun da geniş uygulama alanı bulacağına inanılmaktadır.

Yukarıda önerilen hesap yöntemi kısaca, deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak, yüksek kayma modüllü kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında kayma modülleri oranında dağılacağı kabulüne dayanmaktadır. Bu bakımdan önerilen metodun uygulamada ekonomik ve güvenli sonuçların elde edilmesinde yararlı olacağı beklenmektedir. İki veya üç boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu veya Sonlu Farklar Metodu modelleri ile yukarıda yapılan kabullerin kontrolü faydalı olacaktır. Önerilen yöntemin pratikte kullanımı ile ilgili bir örnek Ford – Otosan Gölcük Sahasında yapılan zemin sondaj çalışmaları baz alınarak gösterilmiştir. Bu makalede geliştirilen yöntem gibi önerilerin gerçek davranışı ne kadar yansıttığının gösterilmesinde bilgisayar simülasyonları olduğu kadar benzer vaka analizlerinin incelenmesi de önemlidir.

Teşekkür

Bu makalede özetlenen çalışmalar Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü için hazırlanan bir doktora çalışmasından alıntılar yapılarak hazırlanmıştır (Özsoy, 2002). Yazarlar doktora tezi kapsamında yer alan vaka analizinde yararlanılan bilgi ve çalışmaların akademik amaçlarla kullanımında gösterdiği anlayış için Ford – Otosan Otomotiv Sanayi AŞ, Arup Mühendislik & Müşavirlik Ltd Şti ve Boğaziçi Üniversitesi’ne teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR

- ACI 318-89 (1992). Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, USA.
- Durgunoğlu, H.T., Kulaç, H.F., İkiz, S., Karadayılar, T. (1992). Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama. Zemin Mekaniđi ve Temel Mühendisliği 4. Kongresi, İTÜ, Cilt 2, p. 19-30.
- Hayden, R., Baez, J. (1994). State of Practice for Liquefaction Mitigation in North America, Tsukuba City, Japan.
- Idriss, I.M. (2001). Review of Field-Based Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes, ICE Meeting, London, UK, 31st of July.
- International Navigation Association. (2001). *Seismic Guidelines for Port Structures*, Working Group No.34 of the Maritime Navigation Commission, A.A. Balkema Publishers, Netherlands.
- Ohta, Y., Goto, N. (1978). Empirical Shear Wave Velocity Equations in terms of Characteristic Soil Indices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.6, p. 167-187.
- Ove Arup & Partners International Ltd. (2000). Geotechnical Interpretative & Foundation Design Report. Prepared by Bird, J. & Lubkowski, Z.A., ArupGeotechnics, London.
- Özsoy, M.B., 2002. The Mitigation of Liquefaction by means of Soil Improvement Techniques, *Ph.D. Thesis*, Boğaziçi University, İstanbul, Türkiye.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, p. 1249-1273.
- Seed, R.B., Çetin, K.O., Moss, R.E.S. (2001). Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation, *Seminar on Geotechnical Earthquake Engineering and Microzonation*, İstanbul, 23-24 August.
- Shake (1992). A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Site Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits, User Manual, University of California Berkeley.
- 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, K.H.II. (1997). Summary Report, *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Buffalo, USA.