

## ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

### SOIL LIQUEFACTION

Kutay ÖZAYDIN<sup>1</sup>

#### ÖZET

Depremler sırasında suya doymuş zemin tabakalarında çevrimli yüklemeler altında oluşan boşluk suyu basıncı artışları zeminde katı fazdan sıvı faza dönüşme olarak nitelendirilebilecek sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Uzun yıllar sadece kohezyonsuz zeminlerde olduğu düşünülen sıvılaşmanın yakın zamanlarda yapılan arazi gözlemleri ve laboratuvar araştırmaları sonucunda düşük kohezyonlu siltlerde ve su akımı engellenmiş çakıllı kumlarda da ortaya çıkabileceği anlaşılmıştır. Zeminlerin sıvılaşabilirliği dane boyutu ve dağılımı yanında, jeolojik yaşı ve çökme koşulları, başlangıç sıkılık derecesine bağlı hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği gibi özellikleri yanında depremin büyüklüğü, süresi, uzaklığı gibi sismik faktörlere bağlı olmaktadır. Arazideki sıvılaşma potansiyelinin analizi için yaygın olarak Seed vd. (1971) tarafından geliştirilmiş “Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi” yöntemi kullanılmakta, zemin tabakalarının sıvılaşma direnci ise genellikle arazi deneyleri sonuçları ile korele edilmektedir. Sıvılaşan zemin tabakalarında oluşan büyük şekil değiştirmeler ve yanal akımlar yanında, mukavemet ve rijitlik kaybı üzerindeki ve içerisindeki yapılarda oluşan deprem hasarlarının önemli ölçüde artmasına neden olabilmektedir. Sıvılaşan zeminin özellikleri ve neden olabileceği olumsuz etkiler son yılların önemli araştırma konularını oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, sıvılaşma analizi, nümerik modelleme, yanal yayılma

#### ABSTRACT

Pore pressure increases under imposed cyclic loadings during earthquakes can lead a change in state of soil termed as liquefaction. For many years only cohesionless soils are thought to be susceptible to liquefaction, but field observations in recent earthquakes and experimental studies have shown that silts of low plasticity and gravelly sands for which seepage is impeded can also be prone to liquefaction. The liquefaction susceptibility of soils are affected not only by their particle size and granulometric characteristics, but also factors such as geological age, deposition environment and conditions, the volume change potential controlled by their initial density and stress state, hydraulic conductivity, as well as seismic factors such as earthquake magnitude, duration and distance can have a major role in their susceptibility to liquefaction. The liquefaction potential of soil deposits are usually evaluated with the so called “simplified liquefaction analysis” method (Seed et.al.1971) and the liquefaction resistance is correlated to some field test results. Large deformations and displacements can develop in a liquefied soil deposit which can lead to substantial strength and stiffness losses, which in turn can have detrimental effects on building seated on or inside such deposits. The assessment of soil characteristics for liquefied soils and their adverse effects on its surroundings and earthquake damages on structures have been major subjects for research in recent years.

Keywords: Liquefaction, liquefaction analysis, numerical modelling, soil displacements

#### GİRİŞ

Depremlerde arazi zemin tabakalarında sıvılaşma durumunun ortaya çıkması üzerindeki ve gömülü yapılarda önemli hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle geoteknik deprem mühendisliğinde

<sup>1</sup> Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, ozaydin@yildiz.edu.tr

zeminlerde sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasına neden olan faktörlerin ve sıvılaşma tehlikesinin belirlenebilmesi ve olası zararlı etkilerinin tahmin edilebilmesi önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Bu bildiride zeminlerin sıvılaşabilirliği, konu ile ilgili laboratuvar ve arazi deneyleri, sıvılaşma analizleri ve sıvılaşmanın olası etkileri hakkında özet bilgiler sunulması amaçlanmaktadır.

## TANIMLAR VE TEMEL KAVRAMLAR

Sıvılaşma granüler bir zeminin artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucu katı durumdan sıvı duruma dönüşmesi olarak tanımlanabilmektedir. Boşluk suyu basıncı artışı çevrimli kayma şekil değiştirmelerine maruz kalan granüler zeminin sıkışma eğiliminden kaynaklanmaktadır. Yükleme çevrimlerinin hızlı olmasından dolayı boşluk suyu dışarı çıkamamakta ve sıkışmaya zorlanan suda basınç artışları meydana gelmektedir.

Katı durumdan sıvı duruma dönüşüm düşük geçirimli gevşek-orta sıkı yerleşimli siltli kumlar veya az geçirimli kaplama veya ara tabakalar ile boşluk suyunun drene olması engellenen kumlu çakıllı zeminlerde daha hızlı bir şekilde ortaya çıkmakta, sıvılaşma oluşunca zemin yumuşamakta ve büyük kayma şekil değiştirmeleri meydana gelmektedir.

Gevşek malzemelerde yumuşama ile birlikte kayma mukavemeti kaybı ortaya çıkarken bunun sonucunda büyük kayma şekli değiştirmeleri hatta akma göçmesi ve **akma sıvılaşması (flow liquefaction)** meydana gelebilmektedir. Orta sıkı malzemelerde ise sıvılaşma geçici yumuşamaya ve artan çevrimli kayma şekil değiştirmelerine yol açmakla birlikte, genleşme eğilimi mukavemet kaybını ve büyük şekil değiştirmeler meydana gelmesini sınırlamaktadır. Bu tür zeminlerde **çevrimli oynaklılık (cyclic mobility)** veya **çevrimli sıvılaşma (cyclic liquefaction)** durumu ortaya çıkabilmektedir.

Sıvılaşma oluşması durumunda temel altı zeminler ve şevlerde akma türü göçme meydana gelebilmekte, düz ve çok az eğimli arazilerde de yanal yayılma ve yer salınımı durumları ortaya çıkabilmektedir. Gevşek zeminlerde sıvılaşma sırasında artık boşluk suyu basınçları sönümlenirken kum kaynamaları ve sonrasında sıkışma (oturma) meydana gelebilmektedir.

**Akma sıvılaşması (flow liquefaction)** sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütlelerinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha az olması durumunda meydana gelmektedir. Bu durumda statik kayma gerilmeleri altında zeminde büyük şekil değiştirmeler oluşmakta ve akma göçmesi meydana gelmektedir. Akma sıvılaşması çok hızlı olarak ortaya çıkmakta ve sıvılaşan zemin çok büyük yer değiştirmeler göstermektedir.

**Çevrimli sıvılaşma (cyclic liquefaction)** statik kayma gerilmeleri sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetini aşmadığı durumlarda ortaya çıkmakla birlikte, kabul edilebilir seviyelerin üzerinde kalıcı şekil değiştirmelere yol açabilmektedir. Çevrimli sıvılaşmada deprem esnasında şekil değiştirmeler adımsal olarak artarak göçmelere yol açabilmektedir. Statik ve çevrimsel kayma gerilmelerinden kaynaklanan bu şekil değiştirmeler çok az eğimli arazilerde dahi yanal akma veya yayılmalara neden olabilmektedir. Düz sahalarda ise çevrimli sıvılaşma yanal akmalara yol açmasa da deprem sırasında zemin salınımları olarak bilinen hareketlere yol açabilmektedir.

Bir sahada oluşacak akma sıvılaşması veya çevrimli sıvılaşma durumlarının çeşitli zararlara ve hasarlara neden olabildiği bilinmektedir. Sıvılaşmanın olası zararlı etkilerini en aza indirebilmek için, arazideki zeminlerin sıvılaşabilirliği, sıvılaşmanın tetiklenmesine yol açacak koşullar ve sıvılaşma oluşması durumunda ortaya çıkabilecek hasarların değerlendirilmesi gerekmektedir.

## Zeminlerin Sıvılaşabilirliği

Sıvılaşmanın arazide bütün zemin tabakalarında oluşmadığı bilinmektedir. Bu nedenle sıvılaşma tehlikesi analizlerinde öncelikli olarak sıvılaşmanın meydana gelmesi için gerekli koşulların mevcut olup olmadığının incelenmesi gerekmektedir. Bu koşullar arasında en önemlilerinin deprem büyüklüğü ve merkezine uzaklık, zemin tabakasının kompozisyonu ve jeolojik tarihçesi ile zeminin arazi gerilme ve sıkılık durumu olduğu ifade edilebilir.

Geçmişte arazide gözlenmiş bütün sıvılaşma olayları incelendiğinde, sıvılaşabilirliğin sığ depremlerin büyüklüğü ve merkezine olan uzaklık arasındaki bir eğri ile sınırlandırıldığı

gözlenmektedir (Ambraseys, 1988). Bu gözlemler bölgesel sıvılaşabilirlik değerlendirmelerinde göz önüne alınmalıdır.

Bir zemin tabakasının jeolojik yaşı ile çökme ve hidrolojik koşulları sıvılaşabilirliği üzerinde önemli ipuçları vermektedir. Çökme sürecinde uniform dane dağılımına ve gevşek yerleşime yol açan jeolojik ortamlar ve genç çökellerin sıvılaşma riskinin çok daha yüksek olduğu, ayrıca yeraltı su tablası derinliğinin de önemli etkisi olduğu bilinmektedir.

Sıvılaşma çevrimli yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu basınçları sonucu meydana geldiği için, zeminin hacim değişim potansiyeli ve su geçirgenliği üzerinde etkili olduğu bilinen dane boyutu ve dağılımı özellikleri sıvılaşabilirlik değerlendirmelerinde önemli bir yer tutmaktadır. Uzun yıllar sıvılaşmanın sadece kohezyonsuz kumlu zeminlerde oluştuğu düşünülmeye karşın, son yıllarda yapılan çalışmalar ve gözlemler düşük kohezyonlu siltler (Ishiara 1984, 1985) ve çakıllı zeminlerde de (Youd vd. 1985; Yegian vd. 1994, Evans ve Seed, 1987) sıvılaşmanın ortaya çıkabileceğini göstermiştir.

Killi zeminlerde ise genel olarak sıvılaşma oluşmadığı kabul edilmektedir. Düşük plastisiteli, ince daneli zeminlerin sıvılaşabilirliği için yaygın olarak başvuru Çin kriterlerinde (Wang, 1979) zeminin kil yüzdesi ( $< 0.005\text{mm}$ ) ve likit limiti dikkate alınmaktadır. Daha sonra diğer arazi gözlemleri ile geliştirilen (Seed ve Idriss, 1982; Marcuson vd. 1990; Youd et.al., 2001) bu kriterlere göre zeminlerin sıvılaşabilmesi için  $LL < \%35$ , Kil Oranı  $< \%15$ ,  $w_n > 0.9LL$  ve  $LI \leq 0.75$  koşullarının sağlanması gerektiği genel kabul görmektedir. 1999 Kocaeli depreminden sonra Adapazarı siltlerinin sıvılaşabilirliğinin incelendiği araştırmalarda, Önalp ve Arel(2002) Çin kriterlerinin  $LL < \%30$ , Kil oranı  $< \%10$ ,  $w_n > LL$  ve  $LI < \%1$  olarak uygulanabileceğini; Önalp, Bol ve Ural(2006) ise  $LL < \%33$ , Kil Oranı  $< \%10$ ,  $LI < 0.90$  ve  $D_{50} < 0.02$  mm olarak uygulanmasının daha doğru olacağını öne sürmüşlerdir. Kumlu zemin tabakalarının sıvılaşabilirliğinin değerlendirilmesinde arazi sıklık derecesi ve gerilme durumunun da önemle dikkate alınması gerekmektedir. Sıvılaşma durumunun oluşmasına yolaçacak boşluk suyu basıncı artışları zeminin sıklık derecesi ve başlangıç gerilme durumu ile yakından ilişkilidir. Casagrande(1936) tarafından kumlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, drenajlı olarak kesilen kumlarda kayma gerilmeleri altında oluşan hacim değişimlerinin kumun sıklık derecesi ve çevre basıncı ile yakından ilişkili olduğunu, kritik boşluk oranı çizgisi olarak tanımlanan bir sınır durum eğrisi altındaki zeminlerde kesme sırasında genleşme, üzerindeki zeminlerde ise sıkışma olduğunu göstermiştir. Castro(1969) başlangıç gerilme durumu ve sıklığı, yaptığı drenajsız statik ve çevrimli üç eksenli deneyler sonucunda tanımladığı kararlı durum çizgisi(SSL) üzerinde kalan kumlarda ancak akma sıvılaşması oluşabileceğini, çevrimli sıvılaşmanın ise bu çizginin altında ve üstünde konumlanan zeminlerde oluşabileceğini göstermiştir.

Sıvılaşabilir özelliklere sahip bir zeminde sıvılaşma oluşması için kuvvetli bir sarsıntıya maruz kalması gerekmektedir. Sıvılaşma tehlikesi analizlerinde, depremin yolaçtığı yer hareketinin etkisinin nasıl dikkate alınacağı önemli bir yer tutmaktadır. Çevrimli yüklemeler etkisi altında zeminde oluşan efektif gerilme izi ile akma sıvılaşması çizgisi arasındaki ilişki sıvılaşma başlangıcının tanımlanmasında kullanılabilir. Bu nedenle depremin yolaçtığı çevrimli kayma gerilmeleri etkisinde oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının tanımlanabilmesi durumunda sıvılaşma başlangıcı tanımlanabilir. Zeminde ortaya çıkan boşluk suyu basıncı artışları deprem sırasında uygulanan çevrimli kayma gerilmelerinden (veya oluşan çevrimli kayma şekil değiştirmelerinden) kaynaklandığı için, sıvılaşma potansiyeli ile bunlar arasında bir ilişki kurmak yeterli olabilecektir. Dolayısıyla, deprem sırasında etkiyen çevrimli gerilmeler ile sıvılaşma direncinin karşılaştırılması sıvılaşmaya karşı bir güvenlik sayısı hesaplanmasını mümkün kılacaktır. Ancak bunun için deprem sırasında oluşan gelişigüzel çevrimli kayma gerilmeleri ile laboratuvar ve/veya arazi deneyleri ile belirlenecek sıvılaşma direncinin karşılaştırılmasını mümkün kılacak bir yaklaşımın geliştirilmesi gerekmektedir. Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntem bu konuda en yaygın kullanılan yöntem olmaktadır.

Kumlarda drenajlı yüklenmede hacim değişimi, drenajsız yüklenmede ise artık boşluk suyu basıncı artışlarının çevrimli gerilmelerden çok çevrimli şekil değiştirmelerden kaynaklandığı gözlemleri ışığında, sıvılaşma oluşumu ile çevrimli kayma şekil değiştirmeleri arasında ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır (Dobry vd.1982). Ancak bu yaklaşımın kullanılmasındaki en önemli güçlük deprem sırasında oluşacak çevrimli kayma şekil değiştirmelerinin belirlenmesi olmaktadır.

Sıvılaşmaya yol açacak çevrimli kayma şekil değiştirmelerini basitleştirilmiş bir yaklaşımla çevrimli kayma gerilmelerinden (Dobry vd. 1982) veya deneysel olarak belirlenebilecek yükleme çevrim sayısına bağlı boşluk suyu basıncı artışları ile ilişkilendirilerek (Vasquez-Herrera ve Dobry, 1988) belirlenmesi durumunda sıvılaşma potansiyeli hesaplanabilmektedir.

## SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Yeraltı su tablası altındaki sıvılaşmaya elverişli zemin tabakalarının sıvılaşma tehlikesinin analizinde farklı yaklaşımlar kullanılabilmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş analiz yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

### Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi

Depremin yol açtığı yer hareketinin etkisinin bir çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılarak göz önüne alındığı bu yöntemde (Seed ve Idriss, 1971; Youd vd., 2001) bu değerini sıvılaşma direncini tanımlamak için kullanılan çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ile karşılaştırması sonucu sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanmaktadır.

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

Burada,

- $a_{\max}$  = yüzeydeki en büyük yatay ivme
- $\sigma_v$  = toplam düşey gerilme
- $\sigma'_v$  = efektif düşey gerilme
- $r_d$  = gerilme azaltma katsayısı
- $r_d = 1 - 0.00765z$  ( $z \leq 9.15m$  için)
- $r_d = 1.174 - 0.0267z$  ( $9.15m \leq z \leq 23m$  için)
- $z$  = yüzeyden itibaren derinlik (metre cinsinden) olarak ifade edilmektedir.

Daha sonraki yıllarda yapılan pek çok çalışmada sıvılaşma tetiklenme potansiyelinin belirlenmesinde baz alınan CSR oranı yaklaşımı, düz serbest saha koşulları ve sık çökeller için geçerli olmaktadır. Eğimli sahalarda veya ağır yapılar altındaki tabakalarda başlangıç (statik) kayma gerilmelerinin mevcudiyeti sıvılaşma olasılığını etkilemektedir. Seed (1983) başlangıç kayma gerilmeleri ve yüksek çevre basınçlarının etkisini dikkate almak için CSR oranı üzerinde aşağıdaki düzeltmenin yapılmasını önermiştir.

$$(CSR_{arazi})_{\alpha, \sigma} = (CSR_{arazi})_{\alpha=0, \sigma < 100kPa} K_{\alpha} K_{\sigma} \quad (2)$$

Burada  $\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma'_{vo}}$  ve  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\sigma}$  düzeltme faktörleridir.

$K_{\alpha}$  değerinin gevşek ve sık çökellerde 1.0'den küçük, sıkı zeminlerde 1.0'den büyük alınması önerilmektedir (Seed ve Harder, 1990). Idriss ve Boulanger (2006)  $K_{\sigma}$  düzeltme faktörü için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left( \frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right) \quad (3)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{N_{1,60}}} \quad (4)$$

Burada,  $\sigma'_{vo}$  =düşey efektif gerilme

$N_{1,60}$ =düzeltilmiş SPT darbe sayısı olmaktadır.

Zeminlerin sıvılaşma direncini temsil ettiği düşünülen çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) arazi deneyleri ile korelasyon yolu ile veya laboratuvar deneyleri ile elde edilebilmektedir. Sıvılaşmaya elverişli zeminlerden örselenmemiş örnekler alınmasındaki zorluklardan dolayı genellikle arazi deneyleri ile korelasyonun daha sağlıklı sonuçlar verdiğine inanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan arazi deneyleri çoğunlukla Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) olmaktadır.

#### a) SPT deneyi verilerinden CRR değerinin bulunması

Bunun için öncelikli olarak SPT-N darbe sayılarında bazı düzeltmeler yapılması önerilmektedir.

$$N_{1,60} = N C_N C_R C_S C_B C_E$$

Burada, N= ölçülen SPT darbe sayısı

$C_N$ =efektif gerilmeye göre düzeltme faktörü,

$$\frac{2.2}{1.2 \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right)} \leq 1.7 \quad (5)$$

( $P_a = \sigma'_v$  birimleri cinsinden atm basıncı)

$C_R$ ,  $C_S$ ,  $C_B$  ve  $C_E$  sırası ile tij boyuna göre, standart olmayan numune alıcı için, sondaj kuyusu çapına göre ve tokmak oranına göre düzeltme faktörleri olmaktadır.

Ayrıca zeminin ince dane oranına (FC) göre aşağıdaki düzeltmenin yapılması önerilmektedir.

$$N_{1,60,C_S} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad (6)$$

Burada,

$$(FC) \leq \%5 \text{ için} \quad \alpha=0 \text{ ve } \beta=1.0 \quad (7)$$

$$\%5 < FC < \%35 \text{ için} \quad \alpha = \exp \left( 1.76 - \frac{190}{(FC)^2} \right) \quad \beta = \left[ 0.99 + \left( \frac{FC}{1000} \right)^{1.5} \right] \quad (8)$$

$$FC \geq 35 \text{ için} \quad \alpha=5.0 \text{ ve } \beta=1.2 \quad (9)$$

olarak alınmaktadır. Bu durumda  $M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sıvılaşma direnci

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60}} + \frac{N_{1,60}}{135} + \frac{50}{[10N_{1,60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (10)$$

bağıntısından bulunabilmektedir.

#### (b) CPT deneyi verilerinden CRR değerinin bulunması

Koni penetrasyon deneyi uç direncinin ( $q_c$ ) sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kullanılmasında da bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir.

$$q_{c1N} = C_Q(q_c/P_a), \quad C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \quad (11)$$

Burada,  $q_c$ =ölçülen koni uç direnci

$C_Q$ =koni uç direnci normalizasyon faktörü

$n=1.0$  (kil zeminler için)

$=0.50$  (temiz kumlar için)

$=0.50-1.00$  (silt ve siltli kumlar için)

Zemin cinsini tanımlamak için kullanılan zemin indeksi

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2} \quad (12)$$

Burada,

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma'_v}{p_a}\right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \text{ ve } F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma'_v}\right) \times 100 \quad (13)$$

$f_s$ =ölçülen sürtünme direnci

İnce dane oranına göre düzeltme

$$q_{c1N, CS} = K_C q_{c1N}$$

$$I_c = 1.64 \text{ için} \quad K_C = 1.0 \quad (14a)$$

$$I_c > 1.64 \text{ için} \quad K_C = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 \quad (14b)$$

Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c < 2.6$  ise zemin killi ve sıvılaşmayan zemin olarak kabul edilir. Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c > 2.6$  ise,  $C_Q$  ve  $Q$   $n = 0.5$  alınarak tekrar hesaplanır ve  $I_c$  değeri yeniden belirlenir, eğer  $I_c < 2.6$  ise sıvılaşma analizlerinde kullanılır, eğer  $I_c > 2.6$  ise  $n=0.7$  alınarak  $I_c$  tekrar hesaplanır ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır.

$M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sıvılaşma direnci

$$q_{c1N, CS} < 50 \text{ için} \quad CRR_{7.5} = \frac{0.833 q_{c1N, CS}}{1000} + 0.05 \quad (15)$$

$$50 \leq q_{c1N, CS} < 160 \text{ için} \quad CRR_{7.5} = 93 \left(\frac{q_{c1N, CS}}{1000}\right)^3 + 0.08 \quad (16)$$

bağıntıları kullanılarak bulunabilmektedir.

Sıvılaşma direnci (CRR) değerinin hesaplanmasında gerilme seviyesine göre düzeltilmiş kayma dalgası hızından korelasyon yolu ile yararlanmak ta mümkün olabilmektedir (Andrus ve Stoke, 2000).

Şekil 1'de sıvılaşma direnci ile düzeltilmiş SPT, CPT ve kayma dalgası hızı arasında korelasyonları gösteren eğriler verilmiştir.

### Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

Yukarıda tanımlanan CRR değerleri  $M=7.5$  büyüklüğünde depremler için geçerlidir. Eğer tasarım deprem büyüklüğü farklı ise, Deprem Büyüklüğü Derecelendirme Katsayısı (MSF) aşağıdaki gibi hesaplanarak sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) belirlenir.

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$$

$$FS = \left( \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) MSF \quad (17)$$

Sıvılaşma tehlikesi bulunan tabakalardaki güvenlik sayıları hesaplandıktan sonra yüzeyden 20m derinliğe kadar Sıvılaşma Tehlikesi Indisi (PL) hesaplanarak bölgesel sıvılaşma tehlikesi değerlendirmesi yapılabilir.

$$PL = \int_0^{20} (1 - FS) w(z) dz \quad (18)$$

Burada  $w(z)=10-0.5z$  ( $z= m$  cinsinden yüzeyden derinlik)

$FS= z$  derinliğindeki güvenlik sayısı

$PL \geq 15$  yüksek sıvılaşma olasılığını,  $5 < PL < 15$  orta derece olasılığı ve  $PL \leq 5$  düşük olasılığı gösterdiği kabul edilmektedir.

### Olasılıksal Yöntemler

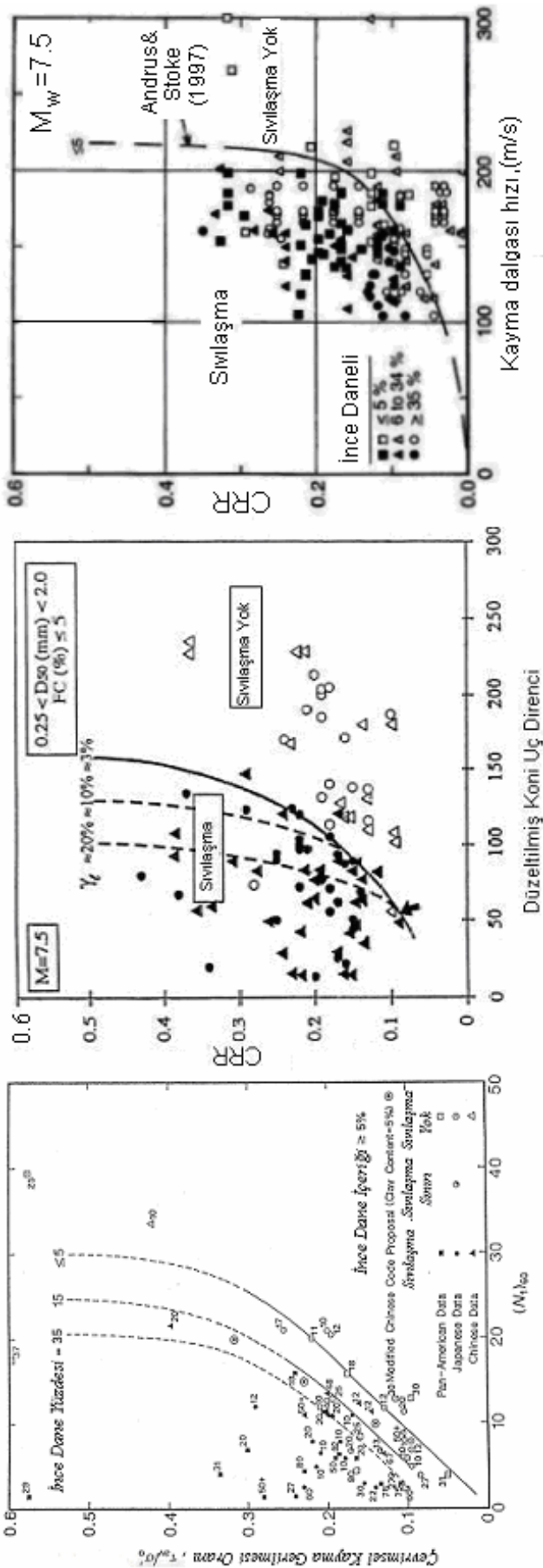
Basitleştirilmiş yöntem ile sıvılaşma analizi yaygın olarak kullanılmakla birlikte, son yıllarda benzer yaklaşımlar kullanılarak olasılıksal korelasyonlara dayalı bazı yöntemler geliştirilmiştir (Liao vd. 1988; Youd ve Noble, 1997; Toprak vd. 1999; Seed vd. 2001). Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen çevrimli kayma direnci oranı (CRR) ile düzeltilmiş SPT-N değeri arasındaki deterministik ilişki farklı sıvılaşma olasılıkları için tanımlanmıştır. Bu yöntemlerde daha fazla arazi verisi dikkate alınmakla birlikte, yararlanılan regresyon yöntemine bağlı olarak belirsizlik yüzdesi artabilmektedir. Ayrıca bazı yöntemlerde örneğin ince dane oranı gibi bazı önemli faktörler dikkate alınmamaktadır. Seed vd. (2001) tarafından önerilen olasılıksal yöntem, geniş bir arazi veri tabanı içermesi, sahaya özgü yer hareketlerini etkileyen bazı faktörlerin göz önüne alınması ve yüksek mertebeli olasılıksal yöntemlerin kullanılması nedeni ile, diğer yöntemlere göre bazı üstünlükler taşımaktadır. Çetin vd. (2004) SPT tabanlı olasılıksal zemin sıvılaşması bağıntısının sunulduğu bir başka çalışmadır. Olasılıksal sismik tehlike analizleri ile bütünleşik zemin sıvılaşması değerlendirilmesi çalışmaları da yürütülmektedir (Yumacı ve Çetin, 2007).

### Nümerik Analiz Yöntemleri

Depremler sırasında sıvılaşma oluşumu çevrimli kayma gerilmeleri altında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarından kaynaklanmaktadır. Boşluk suyu basıncı artışlarına ise zeminin hacim değişimi eğilimi neden olmaktadır. Dolayısıyla çevrimli kayma gerilmeleri altında zemin davranışının nümerik analiz yöntemleri ile hesaplanabilmesi durumunda boşluk suyu basıncı artışları ve sıvılaşma olasılığı belirlenebilmekte, ayrıca sıvılaşmanın tetiklenmesinden sonraki davranış (rijitlik kaybı, yanal zemin hareketleri, oturmalar vb) modellenebilmektedir.

Zeminlerde sıvılaşma davranışının analizi için geliştirilen ve sonlu elemanlar ve sonlu farklar tekniklerinin kullanıldığı nümerik gerilme-deformasyon analizi yöntemlerinde boşluk suyu basıncı değişimlerinin de modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş analiz yöntemlerinde kullanılan bünye modellerinde, çevrimli kayma gerilmeleri altında oluşan hacim değişimleri ve artık boşluk suyu basıncı ile yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişki yanında, deneysel gözlemler ışığında artık boşluk suyu basıncı-efektif gerilme izi-akma (göçme) yüzeyi arasındaki ilişkinin modellenmesi amaçlanmaktadır.

Seed vd.(1975) artık boşluk suyu basıncı- yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi kullanarak sıvılaşma davranışını açıklamaya yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Ishiara vd.(1976) laboratuvar deneyleri gözlemleri ışığında artık boşluk suyu basıncı ve efektif gerilme izi arasında ilişkiyi modellemeye çalışırken, Yoshimi ve Tokimatsu (1978) çevrimli kayma gerilmeleri etkisinde oluşan hacim değişimleri ile yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi modelleyen öncü çalışmalardan birini yapmışlardır.



Şekil 1. Sıvılaşma direnci ile arazi deneyleri sonuçları arasındaki korelasyonları



Nishi vd. (1986), Nishi ve Kanatani (1986) tarafından da benzer bir yaklaşım kullanılarak, çok boyutlu zemin ortamlarında yüksek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik davranışının analizi ve kum zeminlerde depremler sırasında oluşan oturmaların tahminine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, doğrusal olmayan (nonlinear) deformasyon davranışı tam olarak modellenememekle birlikte, basit ve pratik olması açısından oldukça yararlı yöntemler olarak literatürde yer almaktadırlar.

Diğer taraftan, yakın zamanlarda deneysel çalışmalar ile geliştirilen bünye modellerinden yararlanılan nümerik yöntemlerde hızlı gelişmeler gözlenmektedir. Bu yöntemlerde zeminlerin depremler sırasındaki davranışı, efektif gerilme değişimlerine bağlı kayma gerilmesi ve kayma modülü değişimleri göz önüne alınarak modellendiği için, doğruya yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Efektif gerilme analizine dayalı bu tür bünye modellerinde boşluk suyu basıncı oluşumunun hesaplanabilmesi için önerilen yöntemler aşağıdaki gibi iki gruba ayrılabilir:

1. Doğrusal olmayan bir kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirmesi ilişkisi ve artık boşluk suyu basıncı artışı veya hacimsel şekil değiştirmeler için deneysel gözlemlere dayalı bazı eşitlikler kullanan yöntemler
2. Genleşme etkisini de içine alan elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini kullanan yöntemler

İlk grupta yer alan yöntemlerde kayma gerilmesi-şekil değiştirme ilişkileri, efektif gerilmeye bağlı olarak hiperbolik eğrilerle veya Masing kuralını kullanan Ramberg-Osgood ilişkisinden yararlanan modeller ile ifade edilmektedir. Bu yöntemlerde artık boşluk suyu basıncı ve hacimsel şekil değiştirme, dinamik davranış analizlerinden belirlenen kayma gerilmesi-zaman, ya da kayma şekil değiştirmesi-zaman değişimlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Örneğin, Martin vd. (1975), Liou vd. (1977), Finn vd. (1977) ve Ishiara ve Towhata (1990) tarafından yapılan çalışmalarda gerilme-şekil değiştirme davranışı ve kum zeminlerde sıvılaşma oluşumu bu yaklaşımdan faydalanılarak incelenmiştir. İkinci grup içerisinde Sato vd. (1980), Oka vd.(1981a, 1981b), Hirari ve Satake (1985) tarafından önerilenler gibi bir boyutlu yöntemler yanında, Uchida ve Hasegawa (1987) ve Ohtsuki vd. (1986) tarafından önerilen iki boyutlu yöntemler de bulunmaktadır.

Ayrıca, endokronik teori ve deneysel eşitlikler kullanılarak, tekrarlı kayma gerilmeleri altında oluşan hacimsel şekil değiştirmelerden boşluk suyu basıncının hesaplandığı modeller de bulunmaktadır. Fakat bu modellerde genleşme elasto-plastik bünye eşitliklerinden doğrudan belirlenememektedir. Tanaka vd.(1983) ve Ghaboussi ve Momen (1982), Bazant ve Krizek (1976), Ansal (1978, 1980) ise bu yönde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Son zamanlarda geliştirilen ileri bünye modelleri sayesinde çok değişik yükleme şartları altındaki zemin davranışı daha iyi modellenabilmektedir. Bu modellerde drenajsız koşullarda birim hacim deformasyon sıfıra eşitlemek suretiyle, efektif gerilmelerdeki değişimler hesaplanabilmektedir. Örnek olarak bir boyutlu doğrusal olmayan zemin davranış analizi yapabilen DYNA 1D programı ile (Prevost, 1989) deprem sarsıntısı sırasında ve sonrasında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu, yeniden dağılımı ve sönümlenmesi doğrusal olmayan, anizotrop ve histeresis zemin davranışını göz önüne alan bir yenilme yüzeyli bünye modeli kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Yukarıda kısaca bilgi verilmeye çalışılan bünye modelleri numerik modellemelere temel oluşturan temel çalışmalar olup bir çok araştırmacı tarafından bu bünye modellerinin kullanıldığı çeşitli yazılımlar üretilmiştir. Bunlar arasında nonlinear toplam/efektif gerilme analizi (bir boyutlu) yapabilen LASSIII (1979); bir boyutlu nonlinear analiz yapan CHARSOIL (Streeter vd.,1973), DESRA (Lee ve Finn, 1978), 2 ve 3 boyutlu analiz yapabilen DYNAFLOW (Prevost, 2002), DIANA-SWANDYNE (Chan, 1988,1995; Zienkiewicz vd. 1990,1999), DIANA (TNO, 1998) sayılabilir.

## LABORATUAR ARAŞTIRMALARI VE ARAZİ DENEYLERİ

Depremlerin yer ve zaman olarak rastgele oluşan bir doğa olayı olması ve depremler sırasında zeminin davranışı ile ilgili arazi kayıtlarının ender bulunuşu, araştırmacıları zemin davranışını analiz etmek için deneysel çalışmalardan ve gözlemlerden faydalanma yoluna itmiştir. Depremlerde zeminlerde oluştuğu gözlenen sıvılaşma olayı ve etkili olan faktörler, sıvılaşmanın

gözlendiği arazilerdeki zemin koşulları incelenerek, arazi ve laboratuvar deneyleri yapılarak ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu amaçla laboratuvarde gerçekleştirilen dinamik üç eksenli ve burulmalı, dinamik basit kesme, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri gibi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Dinamik üç eksenli ve basit kesme gibi laboratuvar deneyleri için araziden örselenmemiş kum numuneleri alınmasında ve laboratuvarde deney numunesi hazırlamada bazı önemli güçlükler ile karşılaşılabilir. Kısmen bu güçlükleri aşmak kısmen de arazi davranışını daha iyi modelleyebilmek için dinamik yükler etkisi ile suya doygun kumlarda ortaya çıkan sıvılaşıma davranışının araştırılmasında sarsma tablası deneyleri geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Liu ve Qiao 1984, Finn vd., 1971, Yoshimi, 1967 ve Elgamal vd., 1989). Model deneyleri nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yönünden de faydalı olmaktadır. Ayrıca, prototip gerilme davranışını daha iyi modelleyebilmek için santrifüj model deneylerinden de faydalanılmaktadır (Lambe 1981, Akiyama 1982, Arulandan vd., 1988, Hushmand vd., 1988). Laboratuvar deneylerine paralel olarak arazi deneyleri ve bu alandaki gelişmeler de sıvılaşıma ve sıvılaşımayı etkileyen faktörlerin anlaşılması bakımından oldukça faydalı olmaktadır.

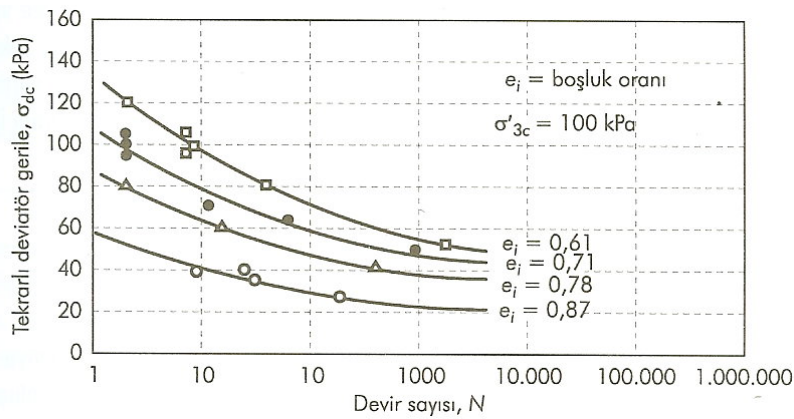
### Laboratuvar Araştırmaları

Zeminlerin sıvılaşıma davranışını araştırmak amacı ile laboratuvarde

- İzotropik ve anizotropik konsolidasyonlu dinamik üç eksenli basınç deneyleri
- Dinamik basit kesme deneyleri
- Burulmalı kesme deneyleri
- Laboratuvar model deneyleri (sarsma tablası deneyleri, santrifüj deneyleri)

yapılmaktadır.

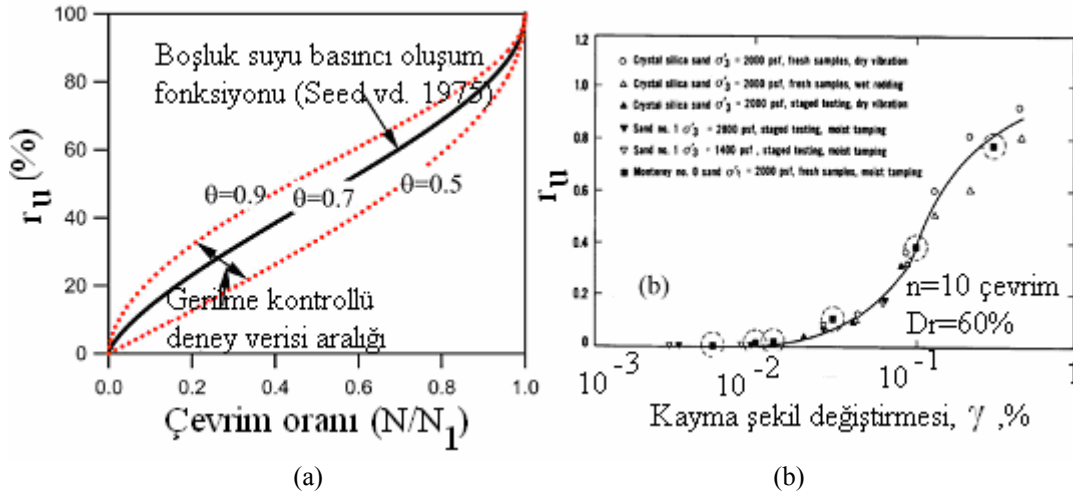
Gerilme ve şekil değiştirme kontrollü dinamik üç eksenli basınç, dinamik basit kesme ve burulmalı kesme deneyleri yardımı ile zeminlerin sıvılaşmasına yol açacak çevrimsel kayma gerilmesi ve çevrim sayısı deneysel olarak belirlenebilmektedir. Bu deneylerde, farklı sıklık derecelerindeki kumlarda belirli bir kayma gerilmesi ve artan yükleme devir sayısı ile oluşan kayma şekil değiştirmesi ve artık boşluk suyu basıncı belirlenmektedir. Seed ve Lee (1965), Yoshimi vd., (1977), Seed (1966, 1979) ve Finn (1981) gerçekleştirdikleri öncü çalışmalar neticesinde sıvılaşıma direncinin (çevrimsel kayma gerilmesi ve uygulanan devir sayısı arasındaki ilişki ile temsil edilmektedir) başlangıç çevre gerilmesinden ve sıklık derecesinden etkilendiğini belirlemişlerdir. Şekil 2’de izotropik olarak konsolide edilmiş farklı sıklıklardaki kum numunelerinde başlangıç sıvılaşması ve %20 eksenel birim deformasyon oluşumu için gerekli çevrimsel gerilmeler gösterilmiştir.



Şekil 2 İzotropik olarak konsolide edilmiş Sacramento kumunun üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından elde edilmiş çevrimsel dayanım eğrileri (Seed ve Lee, 1965)

Laboratuvar deneylerinde gözlemlenen boşluk suyu basıncı oluşumu davranışı, dinamik yüklemeler sırasında boşluk suyu basınçlarının tahminine yönelik bazı basit modellerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu modellerde temel olarak boşluk suyu basıncı ile yükleme çevrim sayısı veya kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmaktadır. Şekil 3’ de gösterildiği gibi Seed vd. (1975) gerçekleştirdiği drenajsız gerilme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler ile artık boşluk

suyu basıncı oranı ile çevrim sayısı arasında, Dobry vd. (1982) ise drenajsız şekil değiştirme kontrollü dinamik üç eksenli deneyler ile boşluk suyu basıncı oranı ile kayma şekil değiştirmesi arasında ilişkiler kurmuştur.



Şekil 3 Boşluk suyu basıncı oluşum modelleri a) Seed vd.(1975) b) Dobry vd. (1982)

Sıvılaşma direncinin laboratuarda numune hazırlama yöntemlerinden ileri gelen zemin yapısındaki farklılıklardan etkilendiği belirlenmiştir (Ladd, 1974; Mulilis vd., 1975; Toki vd., 1986; Tatsuoka vd., 1986). Ayrıca, deneysel araştırmalar geçmişteki sismik yüklemeler, aşırı konsolidasyon oranı, yanal yoprak basıncı katsayısı gibi faktörlerin sıvılaşma direncini etkilediğini göstermiştir (Finn vd.1970; Seed vd. 1975; Seed ve Peacock, 1971).

Sıvılaşma davranışı araştırmaları sarsma tablası ve santifüj deney sistemlerinden yararlanılarak yapılabilen fiziksel model deneyleri ile de gerçekleştirilmektedir. Özellikle santrifüj model deneyleri kullanılarak sıvılaşma ve sıvılaşmaya neden olan faktörler üzerinde bir çok araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda en geniş çalışma VELACS (Verification of Liquefaction Analysis using Centrifuge Studies, Arulanandan vd., 1993) adı verilen bir araştırma projesinde ileri ölçüm yöntemleri ile fiziksel ve nümerik modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sıvılaşmadan dolayı meydana gelen göçme mekanizmalarının anlaşılabilmesi ve sıvılaşma ile ilgili problemleri inceleyebilmek amacı ile üretilen çeşitli nümerik analizlerin doğrulanabilmesi için veri tabanı oluşturmak amacı ile gerçekleştirilmiştir.

Doğada tabakalı olarak çökelen kumların sıvılaşma ve sıvılaşma sonrasındaki davranışları da sarsma tablası ve sentrifüj deneyleri ile araştırılmış ve çevrimsel yüklemeler etkisinde kum tabakaları arasında yer alan ve permeabilitesi kuma göre daha küçük olan silt tabakaları altında bir su filmi olduğu gözlenmiştir. Bu su filminin depremler sırasında yanal yer hareketlerini tetiklediği yönünde sonuçlara ulaşılmıştır (Scott ve Zuckerman, 1972; Huishan ve Taiping, 1984; Arulanandan vd., 1988; Elgamal vd., 1989; Adalier, 1992; Kokusho ve Watanabe, 1997; Kokusho 1999). 1964 Niigata ve 1995 Kobe depreminde oluşan yanal zemin hareketlerinin oluşan bu su filminden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir (Kokusho, 2000).

### Arazi Deneyleri

Sıvılaşma direncinin arazide ölçülmüş parametreler cinsinden karakterize etmek için Whitman (1971) tarafından arazide önceden meydana gelmiş sıvılaşma olayları değerlendirilerek, sıvılaşma direnci ile çevrimsel gerilme arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşım daha sonra zeminin sıklık derecesi ve boşluk suyu basıncı oluşturma karakteristiklerini yansıtan yerinde deney parametreleri ile daha da geliştirilmiştir. Sıvılaşma direnci ile korele edilen en yaygın arazi deneyi **Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) olmaktadır**. Sıvılaşma direncini artıran sıklık derecesi, daha önce maruz kaldığı sismik deformasyonlar, aşırı konsolidasyon oranı, yanal zemin basınç katsayısı gibi faktörler SPT direncini de artırmaktadır. Seed vd. (1983) belirli bir SPT direncine sahip zeminde sıvılaşma oluşturmaya beklenen minimum çevrimsel gerilme oranını belirlemek için,

M=7.5 olan depremlerde sıvılaşmanın gözlemlendiği temiz kum ve siltli kum sahalarındaki düzeltilmiş SPT direnci ile depremde olduğu varsayılan çevrimsel gerilme oranını karşılaştırmıştır.

**Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)** uç direnci de sıvılaşma direncinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Sıvılaşmanın gözlemlendiği ve gözlenmediği sahalar için CPT direnci ölçülerek oluşturulmuş veri tabanı halen genişlemekte olup, bu veriler SPT ile CPT dirençleri arasındaki korelasyonlarla desteklenmekte ve belirli bir CPT direncine sahip zeminlerde sıvılaşma oluşturabilecek minimum çevrimsel gerilme oranı belirlenebilmektedir (Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve DeAlba, 1986).

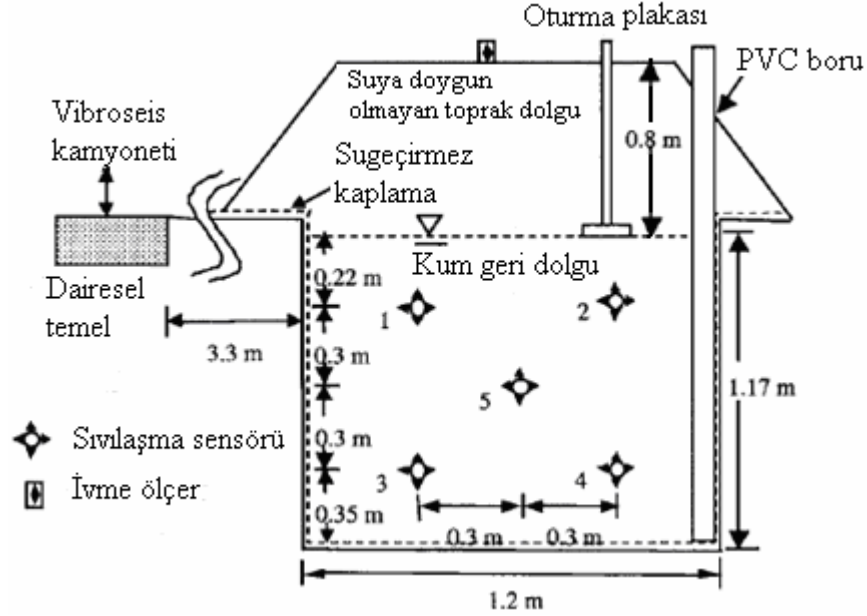
**Kayma Dalgası hızı** ölçümünde sağlanan gelişmeler ve tekrarlı birim kayma şekil değiştirme yaklaşımının sıvılaşma davranışı ile ilişkilendirilmesi çalışmaları, kayma dalgası hızının sıvılaşma direnci kestiriminde faydalı bir değerlendirme yöntemi olduğunun anlaşılmasına katkı sağlamıştır (Stokoe vd. 1988). Tokimatsu vd. (1991) laboratuvar deney sonuçlarını kullanarak düzeltilmiş kayma dalgası hızı ile sıvılaşma direnci arasında ilişki kuran eğriler geliştirmiştir. Bununla birlikte, sıvılaşma potansiyelini değerlendirmede kayma dalgası hızı ölçümlerinin tek başına yeterli olmayabileceği düşünülmektedir.

Gerilme ve boşluk suyu basıncı artışlarının arazide ölçüldüğü durumlar çok ender olmakla birlikte yakın zamanlarda arazide depremler sırasında boşluk suyu basıncı oluşumu ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Tablo 1’de arazide deprem sarsıntısı sırasında ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı verileri içeren çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1 Arazide sıvılaşma sırasında boşluk suyu basıncı ölçümü yapılan daha önceki çalışmalar (Chang vd., 2007)

Yer	Zemin tipi	Veri	Kaynak	Referans
Owi Island (Japonya)	Siltli ince kum	SPT, CPT, boşluk suyu basıncı, yüzey ivmesi	Mid-Chiba depremi, $a_{maks}=0.1g$	Ishihara vd. (1981)
Sunamachi (japonya)	İnce kum	SPT, $V_s$ , boşluk suyu basıncı, aşağı kuyu ivme ölçümü	Chiba-Toho-Oki depremi, $a_{maks}=0.12g$	Ishihara vd. (1989)
Lotung bölgesi (Taiwan)	Kum	$V_s$ , CPT, boşluk suyu basıncı, aşağı kuyu ivme ölçümü	1985-1986 arasındaki 18 deprem	Shen vd. (1991)
Wildlife bölgesi (ABD)	Siltli kum	SPT, CPT, $V_s$ , boşluk suyu basıncı, aşağı kuyu ivme ölçümü	Superstition Hills depremi, $a_{maks}=0.21g$	Youd ve Holzer (1994)
South Platte River (ABD)	İri kum	SPT, CPT, $V_s$ , boşluk suyu basıncı, partikül hızı, oturma	Aşağı kuyu patlatma yöntemi	Charlie vd. (1992)
Boundary Körfezi (Kanada)	Kumlu silt	CPT, $V_s$ , boşluk suyu basıncı, yüzey ivmesi, oturma	Aşağı kuyu patlatma yöntemi	Gohl vd. (2001)
Treasure Island (ABD)	Kum ve siltli kum	SPT, CPT, boşluk suyu basıncı, oturma	Aşağı kuyu patlatma yöntemi	Rollins vd. (2003)
Vancouver (Kanada)				

Deprem sırasında ölçülen boşluk suyu basıncı ölçümüne dayanan çok az çalışmadan (Ishihara vd.1981, 1989; Shen vd. 1991; Youd ve Holzer, 1994) elde edilen bilgiler arazide boşluk suyu basıncı davranışının açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Depremlerin zamanlamasının tahmin edilememesi ve arazide yerleştirilecek ölçüm aletlerinin uzun bekleme süreleri sırasında güvenilirliklerinin azalması gibi nedenlerden dolayı, arazide yapay dinamik yükleme oluşturarak bu esnada boşluk suyu basınçlarının ölçülmesini hedefleyen çalışmalar yapılması yoluna başvurulmaktadır. Bu çalışmalarda dinamik kaynak olarak genellikle aşağı kuyu patlatma yöntemi kullanılmıştır (Charlie vd. 1992; Gohl vd. 2001; Rollins vd. 2003). Ancak, kullanılan bu patlatma yönteminde oluşan dinamik yükleme hızının depremin yükleme hızına uygun olmaması ve patlatma sonrası boşluk suyu basınçlarının kaydedilmesinde karşılaşılan zorluklar neticesinde dinamik yükleme kaynağında yeni teknolojilerin kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda Chang vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada yüksek enerjili bir dinamik yükleme kaynağı (Rathje vd. 2005) kullanılmıştır. Şekil 4 ’te kesiti gösterilen deney sahasında sıvılaşma meydana getirilerek, bu sırada oluşan boşluk suyu basınçları ve kayma şekli değiştirmeleri ölçülmüş ve sonuçlar mevcut boşluk suyu basıncı oluşum modelleri ( Seed vd. 1975; Dobry vd. 1982) ile karşılaştırılmış, ayrıca boşluk suyu basıncı ile kayma şekil değiştirmelerinin ilişkisi ve sıvılaşma davranışına etkisi araştırılmıştır.



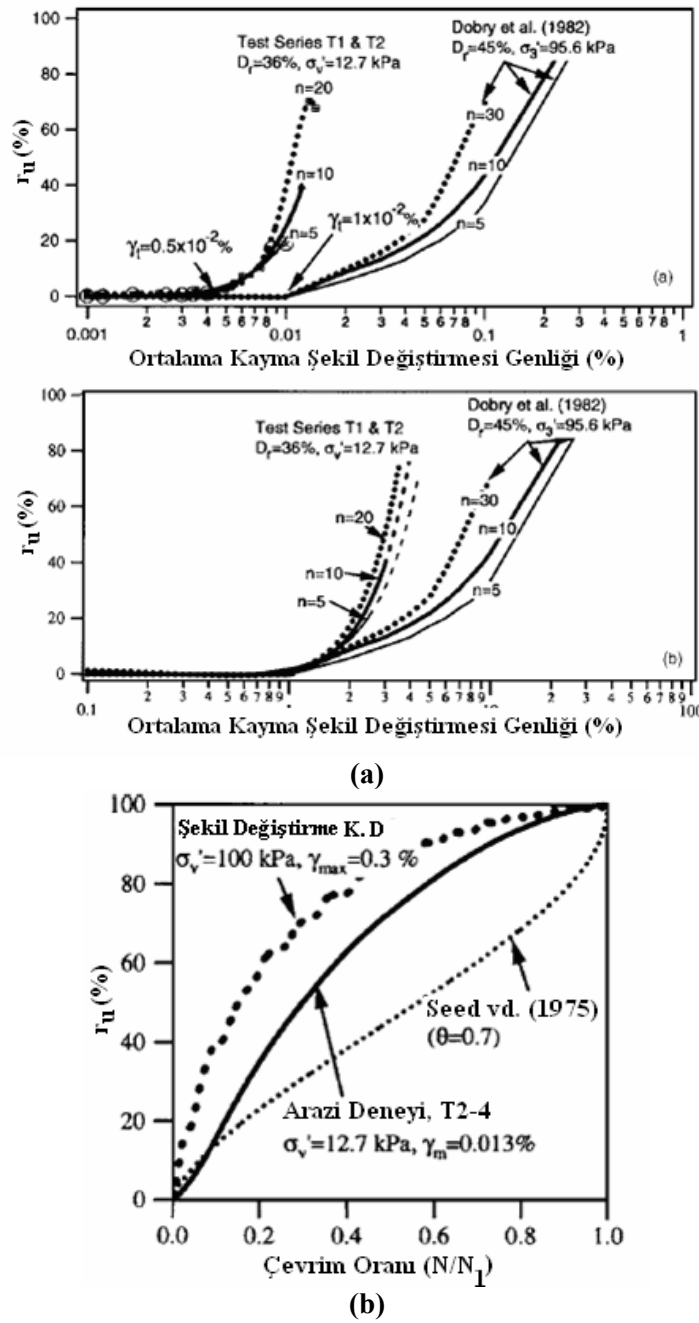
Şekil 4 Sıvılaşma deney sahası kesiti (Chang vd., 2007)

Elde edilen deney sonuçları boşluk suyu basıncının hidrodinamik ve rezidüel olmak üzere iki bileşenden oluştuğunu, rezidüel bileşenin plastik şekil değiştirmelerden kaynaklandığını ve esas olarak kum tabakasının sıvılaşmasına ve rijitliğinin azalmasında esas neden olduğunu göstermiştir.

Şekil 5’de gösterilen arazide ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı eğrileri, hızlı boşluk suyu basıncı artışının  $0.5 \times 10^{-2}\%$  ile  $2 \times 10^{-2}\%$  arasında kayma şekil değiştirmelerinde meydana geldiğini göstermiştir. Dobry vd. (1982) tarafından elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum eğrileri ile yapılan karşılaştırmalarda görülen farklılıkların yapılan arazi ölçümlerinin düşük gerilme seviyelerinde gerçekleşmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Seed vd. (1795) tarafından yapılan gerilme kontrollü ve şekil değiştirme kontrollü deneylerden elde edilen eğriler ile yapılan karşılaştırmalar ise arazide oluşan boşluk suyu basıncı davranışının şekil değiştirme kontrollü deneylerde yapılan gözlemlere daha yakın olduğunu ve boşluk suyu basıncı oluşumunun kayma gerilmelerinden ziyade kayma şekil değiştirmeleri tarafından kontrol edildiğini göstermiştir.

### SIVILAŞMANIN ETKİLERİ

Depremler sırasında zemin tabakalarında sıvılaşma oluşması, yer hareketinin özellikleri ile zeminin rijitlik ve mukavemet özelliklerinde yol açtığı değişiklikler ve oluşan şekil değiştirmelerden dolayı, zemin üstündeki ve içindeki yapılarda, toprak dolgularda ve şevlerde bir çok olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Mühendislik yapıları açısından en önemli olumsuz etkilerin, zeminde mukavemet ve rijitlik kaybı ile aşırı şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler sonucu oluşan, temellerin taşıma gücü kaybı, aşırı toplam ve farklı oturmalar, yanal akmlar ve şev göçmeleri, zemin yapıları ve istinat yapılarında hasarlar, kazıklar üzerinde ek yüklemeler ve yanal destek azalması, gömülü yapılar üzerinde basınçlar ve kaldırma etkisi olduğu ifade edilebilir. Bu etkilerin bir çoğunun henüz tasarım için gerekli doğrulukta ve güvenilirlikte tanımlanabildiğini söylemek zordur. Aşağıda bazıları hakkında kısa bilgiler verilmekle yetinilecektir.



Şekil 5. Arazi sıvılaşma deneyinde ölçülen boşluk suyu basıncı artışları ve (a) Dobry vd.(1982) şekil değiştirme kontrollü laboratuvar deney sonuçları (b) Seed vd. (1975) gerilme kontrollü laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılması

### Sıvılaşmış Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Sıvılaşmış zeminler üzerinde oturan veya sıvılaşan zeminler içeren şevler ve toprak dolgular gibi yapıların deprem sonrası stabilitelerinin değerlendirilmesi için sıvılaşmış zeminlerin artık (rezidüel) kayma mukavemetlerinin bilinmesi gerekmektedir. Son yıllarda, depremin yol açtığı boşluk suyu basıncı artışlarından kaynaklanan hidrolik eğimler sonucu ortaya çıkan su akımlarının sıvılaşmış zeminlerde “boşlukların yeniden dağılımı”na yol açtığı kavramının geliştirilmesi (Whitman, 1985), laboratuvar araştırmaları ve arazi gözlemlerinin yeniden değerlendirilmesi ile, sıvılaşmış zeminlerin rezidüel mukavemeti konusunun açıklığa kavuşturulmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle, Şekil 6a’da gösterildiği gibi sıvılaşabilir zemin üzerinde geçirgenliği düşük bir zemin olması (yukarı doğru su akımının engellenmesi) durumunda, az geçirimli tabakanın hemen

altındaki sıvılaşmış zeminde gevşeme ve genleşme, tabaka alt seviyelerinde ise sıkışma oluşması sonucu, drenajsız koşullarda zemin içinde boşlukların yeniden dağılımı ve buna bağlı olarak kayma mukavemetinde büyük azalmalar ortaya çıkabilmektedir. Şekil 6b’de alttan su akımının boşluk suyu basıncı ve sıvılaşma oluşumu üzerinde etkisi ve takip eden drenaj sonrası hacim şekil değiştirme davranışı, Şekil 6c’de ise sıvılaşma sonrası drenaj ve hacimsal sıkışma davranışı gösterilmiştir. Bu konuda yapılan fiziksel ve analitik modelleme çalışmaları (Kokusho, 2000; Kulasingam vd. 2004; Malvick vd. 2004; Tohumcu Özener, 2007) sıvılaşmış zeminde boşluk dağılımı değişimi ve hatta az geçirimli tabakanın hemen altında bir su filmi oluşabildiğini göstermiştir.

Seed (1987), Seed ve Harder (1990), Stark ve Mesri(1992), Ishihara (1993), Wride vd.(1999) ve Yoshimine (1999) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ışığında, Idriss ve Boulanger (2007) arazi verilerini değerlendirerek sıvılaşmış zeminin drenajsız rezidüel kayma mukavemeti ( $S_r$ ) ile eşdeğer düzeltilmiş temiz kum SPT darbe sayısı ( $N_{1,60, C_s-S_r}$ ) ve CPT uç direnci ( $q_{c1N, C_s-S_r}$ ) arasında korelasyonlar önermişlerdir (Şekil 7). Bu korelasyonlara bağlı olarak, sıvılaşmış zeminde boşlukların yeniden dağılımı oluşması beklenen ve beklenilmeyen durumlar için ayrı ayrı olmak üzere, efektif düşey jeolojik gerilmeye göre normalize edilmiş rezidüel kayma mukavemeti bağlantıları geliştirmişlerdir (Şekil 7).

### **Zemin Sıvılaşmasının Spektral İvmeler Üzerinde Etkisi**

Depremlerin yol açtığı sıvılaşma zeminde göçme veya aşırı şekil değiştirmelere yolaçabildiği gibi, zeminde meydana gelen yumuşama yer hareketi özelliklerini de etkileyebilmektedir. Sıvılaşmadan kaynaklanan zemin yumuşamasının yapılar etkiyecek yer hareketleri üzerinde etkileri depremlerde sıvılaşma oluşmuş bazı sahalarda kaydedilen kuvvetli yer hareketleri incelenerek değerlendirilmeye çalışılmıştır (Youd ve Carter, 2005). Bu çalışmalardan,

- Zeminde yumuşamanın depremin erken aşamalarında meydana gelmesi durumunda küçük periyotlarda ( $T < 1.0s$ ) spektral ivmeler üzerinde azaltıcı etkisi olduğu,
- Zeminde yumuşamanın depremin geç aşamalarında meydana gelmesi durumunda küçük periyotlarda ( $T < 1.0s$ ) spektral ivmeler üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı,
- Zemindeki yumuşamanın uzun periyot ( $T > 1.0s$ ) spektral ivmelerde, özellikle zemin salınımları oluşması durumunda büyütücü etkisi olabileceği,
- Deprem yönetmeliklerinde verilen tasarım spektrumlarının sıvılaşma oluşan bölgelerde küçük periyotlarda güvenli yönde kaldığı, daha uzun periyotlu yapılar için yumuşak zemin koşulları dikkate alınmış ise güvenli olduğu ancak sert/sıkı zemin koşulları kabul edilmiş ise güvensiz yönde olabileceği, bu nedenle uzun periyotlu yapılar için araziye özel tepki analizleri yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

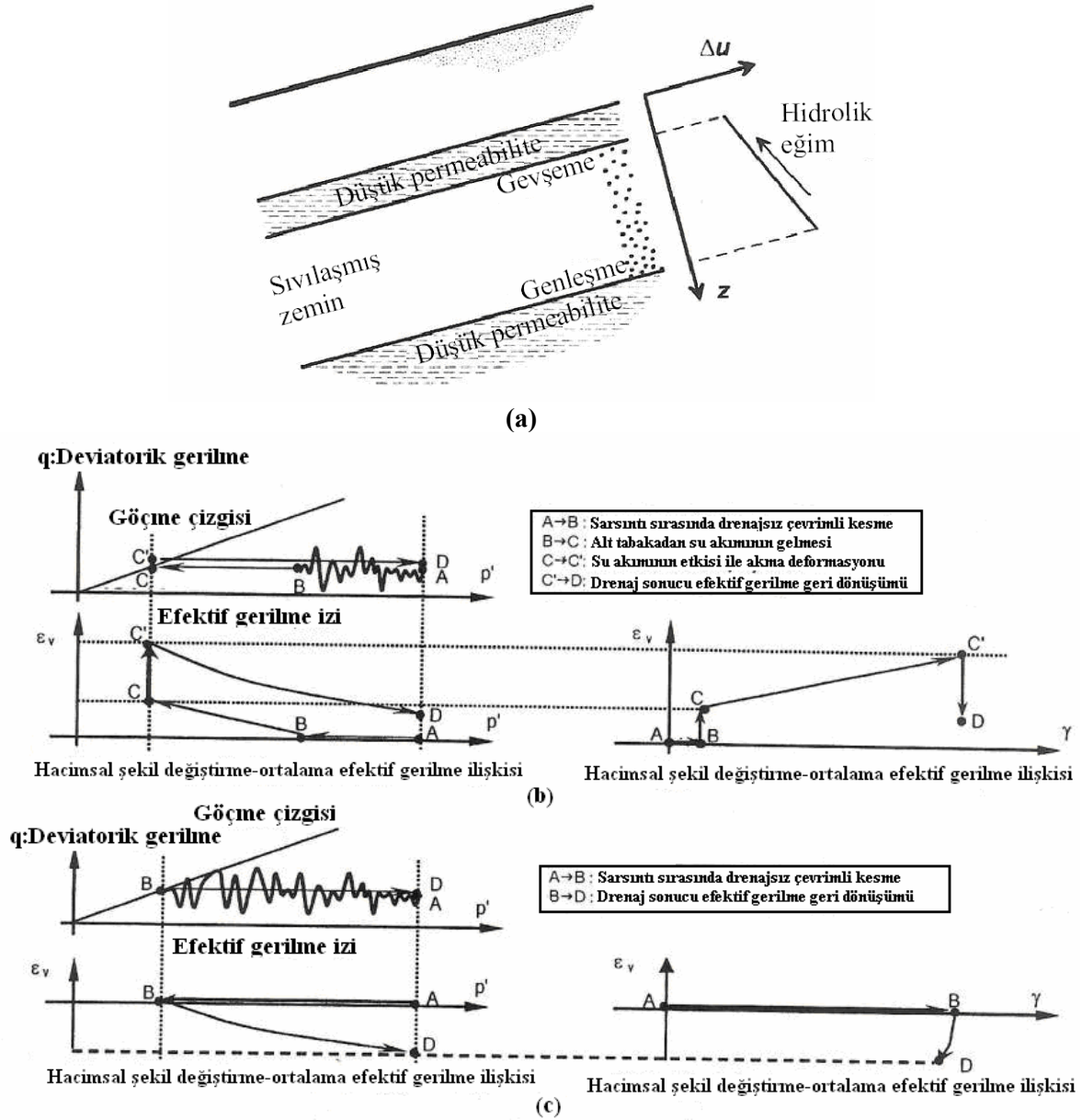
### **Yüzeysel Temellerin Altında Sıvılaşmış Zemin Davranışı**

Sıvılaşma oluşan zemin tabakaları üzerine oturan yüzeysel temelli binaların batması ve yana eğilmesi örnekleri birçok depremde gözlenmiştir. Genellikle bu batma ve eğilme deprem sona erdikten sonra da devam etmektedir. Bununla birlikte santrifüj model deneyleri gözlemleri temeller altındaki zeminde deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının serbest arazidekinden daha az olduğunu göstermektedir (Liu, 1992; Dobry vd. 1995). Ancak, sarsıntı sona erdikten sonra temel altı zeminde boşluk suyu basıncı artışları devam etmektedir. Bunun oluşan hidrolik basınç eğiminden dolayı daha alt tabakalardan ve civar serbest arazi altındaki tabakalardan temel zeminine doğru su akımından kaynaklandığı düşünülmektedir (Dobry ve Abdoun, 1988). Efektif gerilmelerin azalması ile taşıma gücü azalmakta ve bina batmaya devam etmektedir. Bu nedenle, oldukça karmaşık olan bu soruna karşı güvenli yönde kalmak üzere temel altı zemini için de serbest arazi sıvılaşması durumunu göz önüne almak daha uygun olmaktadır.

Deprem sarsıntısı sırasında sıvılaşmadan kaynaklanan zemin oturmalarının temel zemininde oluşan plastik göçmeden kaynaklanması durumunda, temel altı zemininde serbest arazidekinden daha fazla oturma meydana gelecektir. Dolayısıyla sadece hacimsal zemin sıkışmasını gözönüne alan yaklaşık oturma hesapları yeterli olmayabilmektedir.

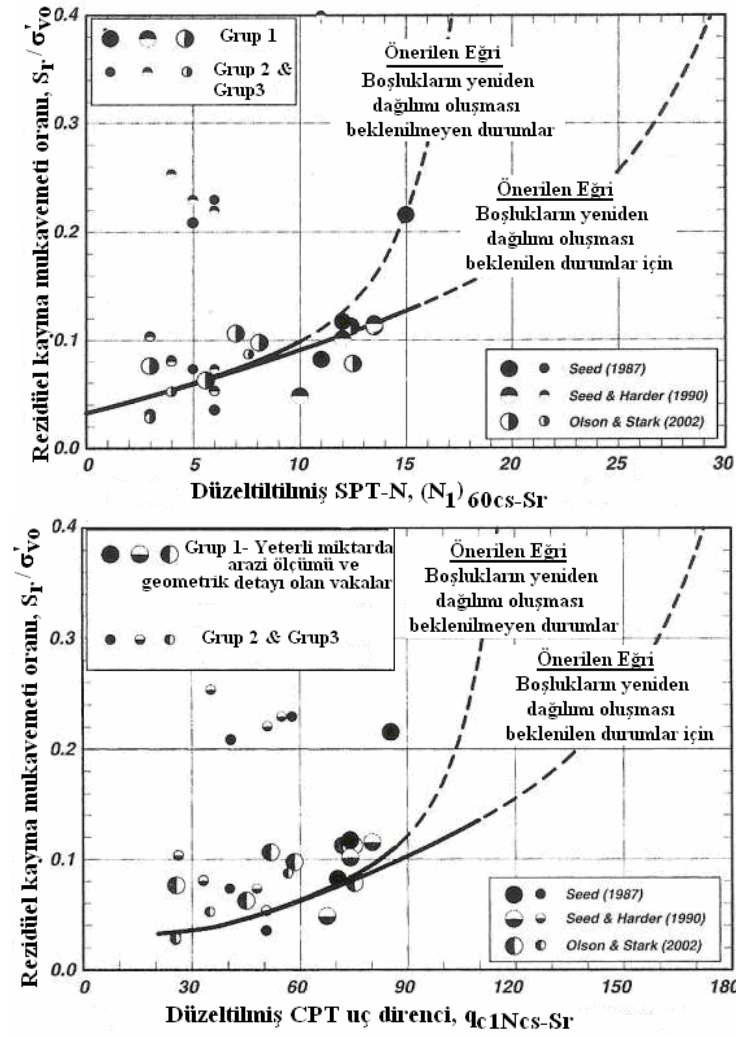


Temel altında sıvılaşmayan bir kabuk (örneğin bir kil tabakası) olmasının, taşıma gücü azalması ve oturmalar üzerinde çok olumlu etkisi olduğu gözlenmektedir. Ishihara (1985) düz arazilerde sıvılaşmadan kaynaklanan hasarların oluşmaması için gerekli üst (sıvılaşmamış) tabaka kalınlığı ile sıvılaşan tabaka kalınlığı ve maksimum yüzey ivmesi arasında ilişkiler geliştirmiştir. Kabuk tabakasının kritik bir kalınlığı aşması durumunda taşıma gücü sıvılaşan tabakadan etkilenmemektedir. Kritik kalınlık kabuk tabakasının kayma direnci, temel taban basıncı ve sarsıntı şiddetine bağlı olmakla birlikte, temel genişliğinin şerit temellerde 2.6 katını, kare temellerde 1.3 katını geçmediği hesaplanmıştır (Bouckovalas ve Dakoulas, 2007). Temel altında sıvılaşmayan bir kabuk tabakasının mevcut olması, sıvılaşmadan kaynaklanan oturmaların olumsuz etkisini de oldukça sınırlamaktadır.



Şekil 6. (a) Sıvılaşmış zeminde boşlukların yeniden dağılımı (b) Çevrimli gerilmeler altında boşluk suyu basıncı artışları ve alt tabakalardan su akımının etkisi ile sıvılaşma oluşumunu takiben drenaj ile hacimsal sıkışma (Sento vd. 2004) (c) Çevrimli gerilmeler altında boşluk suyu basıncı artışı ile sıvılaşma oluşumu ve sıvılaşma sonrası drenaj ile hacimsal sıkışma (Sento vd. 2004)





Şekil 7 Sıvılaşmış zeminin normalize kayma mukavemeti ile düzeltilmiş SPT-N ve CPT-q sonuçları arasında korelasyonlar (Idriss ve Boulanger, 2007)

### Kazıklı Temeller Üzerinde Sıvılaşma Etkileri

Kazıkların etrafındaki zeminde sıvılaşma ve yanal akma oluşması, kazıklar üzerinde ek ötelenme, dönme ve eğilme zorlamalarına ve ağır hasarlara yol açabilmektedir. Bu etkilerin mühendislik tasarımında dikkate alınması oldukça karmaşık olmakla birlikte, etkileyen başlıca faktörlerin: depremde oluşan açık arazi zemin yer değiştirmesi, sıvılaşan ve sıvılaşmayan tabakaların zemin özellikleri ile temel ve üst yapı özellikleri yanında, kazıkların uç kısmında ve temel etrafındaki sıvılaşmayan zemin tabakalarının özellikleri olduğu bilinmektedir.

Sıvılaşan ve yanal akma gösteren zeminlerde kazıklı temellerin performansı ve tasarımı konusunda son yıllarda yoğun çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kazıkların etrafındaki zemin için yay katsayısı modelleri ve parametrelerin seçimi konusunda bir çok öneri geliştirilmiştir (Martin vd. 2002; Boulanger vd. 2003; Dobry vd. 2003, Tokimatsu, 2003; Liyanapathriana ve Poulos, 2005). Şekil 8'de sıvılaşan zemin ortamında kazık-zemin etkileşiminin modellenmesi yanında, farklı araştırma ve uygulamacılar tarafından sıvılaşan zeminin yanal rijitliği için önerilen azaltma faktörleri gösterilmiştir. Analiz yöntemi olarak nonlinear Winkler kirişi modeli seçilmesi durumunda, sıvılaşmış zemin için azaltma faktörleri ile çarpılmış zemin yayları kullanılması, açık arazi  $r_u$  değerlerinin %100'den az olması durumunda  $r_u=0$  ve %100 arasında lineer enterpolasyon ile azaltma katsayılarının seçilebileceği belirtilmektedir (Dobry vd. 1995; Boulanger vd. 2007). Serbest arazi zemin yerdeğistirmeleri ve yapısal atalet kuvvetlerinin superempoze edilmesi ile

Winkler kirişi modeli kullanılarak yanal akma maruz kazıkların davranışını modellemede santrifüj deneyleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

### Sıvılaşmadan Dolayı Meydana Gelebilecek Zemin Hareketleri

Depremlerde meydana gelen kalıcı zemin deformasyonları, mukavemet kaybı, akma, hacimsal sıkışma, kum konileri oluşması, yanal yayılma veya yer yarılmaları gibi bir çok nedenden kaynaklanabilmektedir. Kumlarda ortaya çıkan büyük zemin deformasyonları çoğunlukla sıvılaşma sonucu meydana gelmektedir. Bu deformasyonların en önemlileri hacimsal sıkışmadan kaynaklanan zemin yüzü oturmaları ve yanal zemin yer değiştirmeleri (akma ve yayılma) olmaktadır.

Sıvılaşma sonrası meydana gelen zemin oturmaları, çevrimli yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının suyun drene olması ile sönümlenmesine bağlı olarak meydana gelmektedir. Tokimatsu ve Seed (1987) hacimsal sıkışma miktarını belirlemek için kumun sıkılığını temsil eden düzeltilmiş SPT darbe sayısını  $N_{1,60}$  ve depremde etkiyen çevrimli kayma gerilmesi oranını (CSR) göz önüne alan ilişkiler geliştirmişlerdir. Ayrıca, Ishihara ve Yoshimine (1992) kumun rölatif sıkılığı, oluşan maksimum kayma şekil değiştirmesi ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının dikkate alındığı, sıvılaşma sonrası hacimsal sıkışma miktarını elde etmeye yarayan bir abak oluşturmuşlardır. Bu araştırmacılar tarafından geliştirilen abaklar kullanılarak sıvılaşabilir bir tabakada meydana gelecek oturmaları hesaplamak mümkün olmaktadır. Zhang vd. (2002) ise sıvılaşmayı takip eden oturmaları düzeltilmiş CPT uç direnci ile korele eden bazı grafikler oluşturmuşlardır (Şekil 9).

Sıvılaşma sonucu ortaya çıkan yanal zemin hareketleri bazı durumlarda büyük yapısal hasarlara neden olabilmektedir. Bu tür zemin hareketlerinin hesaplanması için geliştirilmiş arazi gözlemlerine dayanan bazı amprik yöntemler ve bunlara göre kalibre edilebilen bazı nümerik analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Hamada vd. (1986) geçmiş depremlerde sıvılaşan zeminlerde gözlenen yanal zemin hareketlerini dikkate alarak, sıvılaşma sonrası zemin deformasyonları (D) ile sıvılaşan tabaka kalınlığı (H) ve taban zemini eğimi ( $\theta$ ) arasındaki ilişkiyi basit bir amprik bağıntı ile tanımlanmıştır.

$$D = 0.75\sqrt{H}\sqrt[3]{\theta} \quad (19)$$

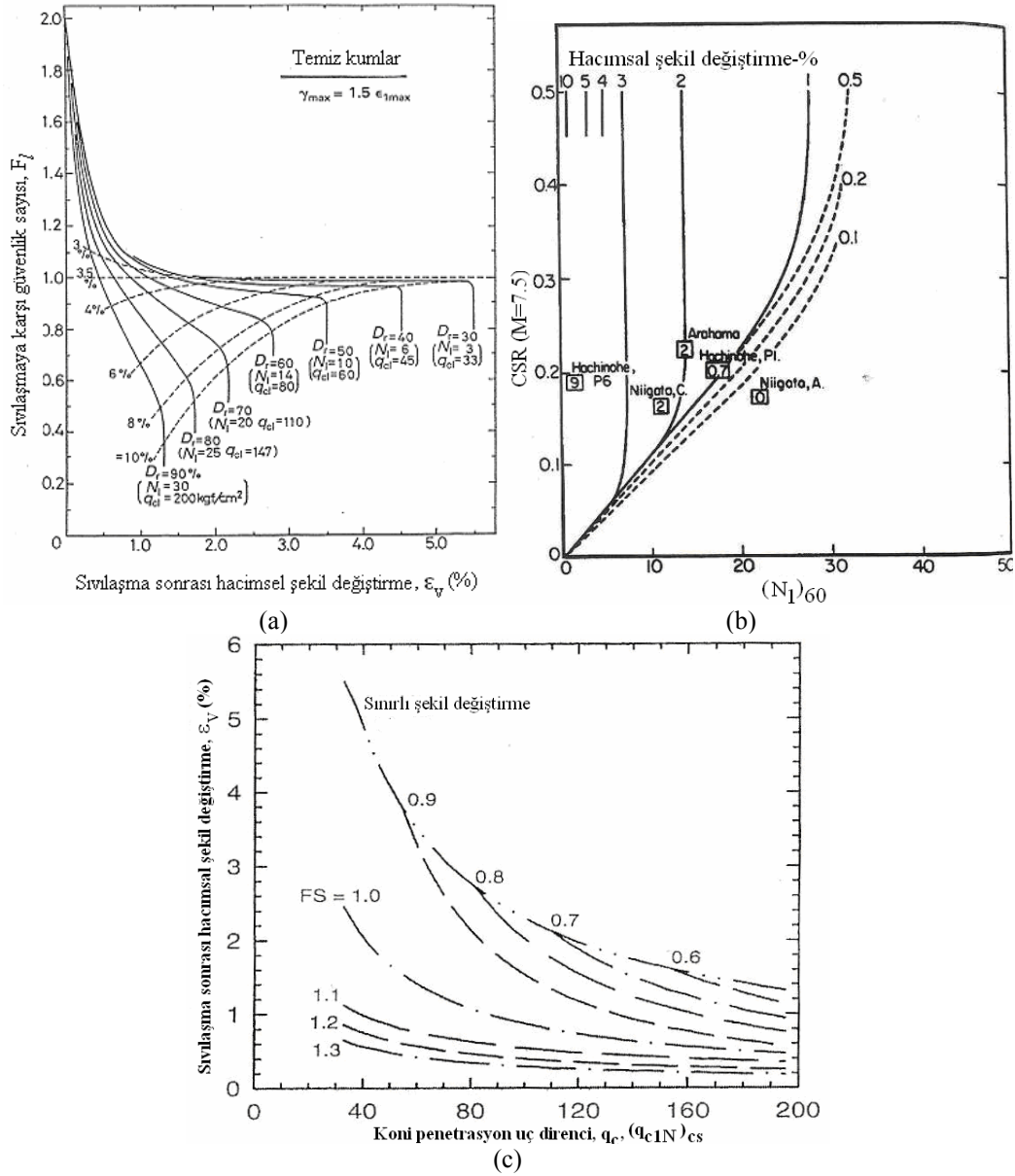
Barlett ve Youd (1995) sekiz depremden elde edilen arazi verilerini kullanarak ve jeolojik, topografik, sismik ve zemin parametrelerini göz önüne alan, kenarı serbest düz alanlar ve eğimli araziler için geçerli iki ayrı model önermişler ve çoklu lineer regresyon analizi (MLR) kullanarak çok sayıda parametreyi dikkate alan iki amprik bağıntı elde etmişlerdir.

### SONUÇLAR

Depremlerde, bazı jeolojik ortamlarda ve zemin koşullarında, büyük yapısal hasarlara ve zemin hareketlerine yol açan zeminlerde sıvılaşma oluşumu henüz bütün yönleri ile açıklığa kavuşturulamamıştır. Özellikle, arazideki zemin tabakalarında çevrimli yüklemeler altında boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma oluşumuna ilişkin araştırmalara gerek bulunmaktadır. Büyük boyutlu arazi deneylerinde depremlerde beklenen seviyelerde titreşimler uygulamakta zorluklar vardır. Sıvılaşabilirliği belirlenmiş sahalarda ölçüm cihazları yerleştirmek ve büyük bir deprem oluncaya kadar işler durumda tutabilmekte de sorunlarla karşılaşmaktadır. Laboratuvar model deneyleri bu zorlukları kısmen aşmakta bir çıkış yolu olarak görülebilir.

Sıvılaşmış zeminlerin rijitlik ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi diğer önemli bir araştırma konusunu oluşturmaktadır. Sıvılaşmış zemine ilişkin stabilite, yer değiştirme (akma-yayılma) ve zemin- yapı etkileşimi problemlerinin çözümü için sıvılaşmış zemin özellikleri yanında, davranış modellerinin de geliştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada mühendislik tasarımlarında sıvılaşmanın depremlerde yapısal davranış üzerinde etkilerinin tam olarak gözönüne





Şekil 9 Sıvılaşma sonrası zeminde hacimsel sıkışma miktarının kestirimi için önerilen abaklar a) Tokimatsu ve Seed (1987); (b) Ishihara ve Yoshimine (1992) (c) Zhang, Robertson ve Brachman (2002)

## KAYNAKLAR

- Adalier K (1992) "Post-Liquefaction Behavior of Soil Systems," Rep. Dept. of Civil Engineering and also MS Thesis dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.
- Akiyama T (1982) "Evaluation of Martin-Seed Simplified Procedure Using Data From Dynamic Centrifuge Tests" MIT, Dept. of Civil Engineering., Research Report R82-28.
- Ambraseys NN (1988) "Engineering Seismology", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 17, 1-105.
- Andrus RD, Stokoe KH II (2000) "Liquefaction Resistance of Soils from Shear Wave Velocity," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 126 (11):1015-1025.
- Ansal AM, Krizek RJ ve Bazant ZP (1978) "Endochronic Constitutive Law for Soils", Proceedings of 6th European Conf. on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, V.3, 9-14
- Ansal AM, Krizek RJ, Bazant ZP (1980) "Prediction of Soil Behavior by Endochronic Theory" Limit Equilibrium, Plasticity, and Generalized Stress-Strain Behavior in Geotechnical Engineering, ASCE, 286-327.

- Arulanandan K, Muraleetharan KK (1988) "Level Ground Soil-Liquefaction Analysis Using in-Situ Properties:II" *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 114(7), 771-790.
- Arulanandan K, Scott RF (1993) "VELACS: Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies", Vol.1, 2, Conference Proceedings, Davis, California, October, Balkema, Rotterdam.
- Bazant ZP, Kriecek RJ(1976) "Endochronic Constitutive Law for Liquefaction of Sand", ASCE, Vol. 102, No. EM2, pp. 225-238.
- Bouckovolas G, Dakoulas P (2007) "Liquefaction performance of shallow foundations in presence of a soil crust" 4<sup>th</sup> International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Invited Lectures:245-276.
- Boulanger RW, Kutter BL, Brandenburg SJ, Singh P, Chang D (2003) "Pile foundations in liquefied and laterally spreading ground: Centrifuge experiments and analyses. Report UCD/CGM-03/01, Center for Geotechnical modelling, University of California, Davis, 205 pp: <http://cgm.engineering.ucdavis.edu/>
- Brandenburg SJ, Boulanger RW, Kutter BL, Chang D (2007) "Static pushover analyses of pile groups in liquefied and laterally spreading ground in centrifuge tests" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, in press.
- Chang WJ, Rathje EM, Stokoe KH II, Hazırbaba K (2007) "In situ pore pressure generation behavior of liquefiable sand" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8): 921-931.
- Charlie WA, Jacobs PJ, Doehring DO (1992) "Blast-induced liquefaction of an alluvial sand deposit" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 15(1): 14-23.
- Çetin KÖ, Seed RB, Der Kiureghian A, Tokimatsu K, Harder LF. Jr, Kayen RE, Moss RES (2004) "SPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12): 1314-1340.
- Dobry R, Ladd RS, Yokel FY, Chung RM, Powell D (1982) "Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method", U.S. Natl. Bureau of Standards, Building Science Series 138, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Dobry R, Taboada V, Liu L (1995) "Centrifuge modelling of liquefaction effects during earthquakes" *Proc. 1<sup>st</sup> Intl Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, K. Ishihara ed Tokyo, Japan, Vol.3, 1291-1324.
- Dobry R, Abdoun T (1988) "Post-Triggering response of liquefied sand in the free field and near foundations" *Proc. of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, GEESD, III, edited by Panos Dakoulas, Mishac Yegian, Robert D. Holtz, ASCE Special Publication No:75, 270-300.
- Dobry R, Abdoun T, O'Rourke TD, Goh SH (2003) "Single pile in lateral spreads : Field bending moment evaluation" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129 (10):879-889.
- Elgamal AW, Dobry R, Adalier K (1989) "Small-scale Shaking Table Tests of Striated Layered Sand-Silt Deposits", 2nd U.S-Japan Workshop on Soil Liquefaction, Buffalo, N.Y., NCEER Rep. No. 890032, 233-245.
- Evans MD, Seed HB (1987) "Undrained cyclic triaxial testing of gravels: the effect of membrane compliance" report UCB/EERC-87/08, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Finn WDL, Bransby PL and Pickering DJ (1970) "Effect of strain history on liquefaction of sands" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 96(6): 1917-1934.
- Finn WDL., Emery JJ, Gupta YP (1971) "Liquefaction of Large Samples of Saturated Sand on a Shaking Table" *Proceedings of the 1st Canadian Conference on Earthquake Engineering*, 97-110.
- Finn WDL, Lee KW, Martin GR (1977) "An Effective Stress Model for Liquefaction", ASCE, Vol. 104(3): 517-533.
- Ghaboussi J, Momen H (1982) "Modelling and Analysis of Cyclic Behavior of Sands" *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads*, John Wiley and Sons, Ltd. New York, N.Y., 313-342.
- Gohl WB, Howie JA, Rea CE (2001) "Use of controlled detonation of explosives for liquefaction testing" *Proc., Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D Liam Finn*, San Diego.
- Hamada M, Yasuda S, Ito Y, Emoto K (1986) "Observation of permanent ground displacements induced by soil liquefaction" *Proc. of Japan Society of Civil Engineers*, No.376, 211-229.
- Hirari H, Satake M (1985) "Dynamic Analysis of Level Ground By an Elastic-Plastic Constitutive Model" *Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Japan, Vol.1., April, 365-372.
- Houshian L, Taiping Q, (1984) "Liquefaction Potential of Saturated Sand Deposits underlying foundation of Structure" *Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.3, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Husmand B, Scott F, Crouse CB (1988) "Centrifuge Liquefaction Tests in a Laminar Box" *Geotechnique*, 38(2): 253-262.

- Idriss IM, Boulanger RW (2006) "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.26, 115-130.
- Idriss IM, Boulanger RW (2007) "SPT and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils" 4<sup>th</sup> International Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Invited Lectures:1-22.
- Ishihara K, Lysmer J, Yasuda S, ve Hirao H (1976). "Prediction of Liquefaction in Sand Deposits During Earthquakes", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.16, No.1.
- Ishihara K, Shimizu K, Yamada Y (1981) "Pore water pressure measured in sand deposits during an earthquake" *Soils and Foundations*, 21(4): 85-100.
- Ishihara K. (1984), "Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit", *Proceedings of International Conference of Case Histories in Geotechnical Engineering*, University of Missouri, St. Louis, Vol.3, 1129-1143.
- Ishihara K. (1985), "Stability of natural deposits during earthquakes" *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, 321-376.
- Ishihara K, Muroi T, Towhata I (1989) "In situ pore water pressure and ground motions during the 1987 Chiba-Toho-Oki Earthquake" *Soils and Foundations* 21(4):85-100.
- Ishihara K, Towhata, I (1990) "One Dimensional Soil Response Analysis During Earthquakes Based on Effective Stress Method", *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo*, Vol. 35, No.4, 665-700.
- Ishihara K, Yoshimine M (1992) "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes", *Soils and Foundations*, 32: 173-188.
- Ishihara K (1993) "Liquefaction and flow failure during earthquakes" *Geotechnique* 43(3): 351-415.
- Ishihara K, Cubrinovski M (1998) "Problems associated with liquefaction and lateral spreading during earthquakes" *Proc. of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, GEESD, III, edited by Panos Dakoulas, Mishac Yegian, Robert D. Holtz, ASCE Special Publication No:75, 301-312.
- Kokusho T, Watanabe K (1997) "Water Film Effect on Lateral flow in Liquefied Ground" *Proc. of Earthquake Engineering Symposium*, Japan Society for Civil Engineers, 545-548.
- Kokusho T (1999) "Water Film in Liquefied Sand and Its Effect On Lateral Spread", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 125(10):817-826.
- Kokusho T (2000) "Mechanism For Water Film Generation and Lateral Flow in Liquefied Sand", *Soils and Foundations* Vol.40(5): 99-111.
- Kulasingam R, Malvick EJ, Boulanger RW, Kutter BL (2004) "Strength loss and localization at silt interlayers in slopes of liquefied sand" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130 (11):1192-1202.
- Ladd R.S (1974) "Specimen preparation and liquefaction of sands" *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 100 (10): 1180-1184.
- Lambe PC (1981) "Dynamic Centrifuge Modelling of a Horizontal Sand Stratum", Sc.D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass. USA.
- Lee MKW, Finn WDL (1978) "DESR-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential" *University of British Columbia*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Liou CP, Streeter VL, Richart FE. Jr. (1977) "Numerical Model for Liquefaction", *ASCE*, 103(6):589-606.
- Liu H, Qiao T (1984) "Liquefaction potential of saturated sand deposits underlying foundation of structure" *Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Vol.3, 199-206.
- Liu L (1992) "Centrifuge earthquake modeling of liquefaction and its effect on shallow foundations" Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- Liao SCC, Veneziano D, Whitman RV (1988) "Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 114(4):389-411.
- Liyanapathirana DS, Poulos HG (2005) "Pseudostatic approach for seismic analysis of piles in liquefying soil" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131 (12):1480-1487.
- Malvick EJ, Kutter BL, Boulanger RW, Kulasingam R (2006) "Shear localization due to liquefaction-induced void redistribution in a layered infinite slope" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132 (10):1293-1303.
- Martin GR, March ML, Anderson DG, Mayes RL, Power MS (2002) "Recommended design approach for liquefaction induced lateral spreads" *Proc. 3<sup>rd</sup> National Seismic Conf. and Workshop on Bridges and highways*, MCEER-02-SP04, Buffalo, NY.
- Mulilis JP, Chan CK, Seed HB (1975) "The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behavior of sands" *Report EERC 75-18*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

- Nishi K, Kanatani M, Matsui I, Tohma J (1986) "Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 1)- Development of Estimation Method of Stability of Sandy, Gravely Ground Based on Dynamic Analysis", CRIEPI Report, No. U86002.
- Nishi K, Kanatani M (1986) "Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 2)- Settlement and Bearing Capacity of Sandy, Gravely Ground Structure Under Earthquake Motion", CRIEPI Report, No. U86003.
- Ohtsuki A, Watanabe K, Takewaki N (1986) "Two-Dimensional Effective stress Analysis of Liquefaction of Irregular Ground Including Soil Structure Interaction", Proc. of JSCE, Vol. 368/I-5, pp.363-372.
- Oka F, Murase T (1981) "Liquefaction Analysis of Sand Deposits Based on Cyclic Elasto-plasticity" Proc., Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Vol. 1, 151-154.
- Oka F, Sekiguchi K, Goto H (1981) "A Method of Analysis Earthquake-Induced Liquefaction of Horizontally Layered Sand Deposits", Soils and Foundations Vol.21(3): 1-7.
- Özener Tohumcu P (2007) "Depremde tabakalı kum zeminde oluşan sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışın model deneylerle araştırılması" Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Önalp A, Arel E (2002) "Siltlerin Sıvılaşma Yeteneği: Adapazarı Kriteri" Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Cilt 1, Eskişehir 363-372.
- Önalp A, Bol E, Ural N (2006) "Siltlerin Sıvılaşabilirliği: Adapazarı Kriterinin Geliştirilmesi" Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Prevost JH (1989) "DYNA 1D: A computer program for nonlinear seismic site response analysis" Technical documentation. Report NCEER-89-0025, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- Rathje EM, Chang WJ, Stokoe KH II (2005) "Development of an In situ dynamic response measurements" Proc. 13<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Robertson PK and Campanella RG (1985) "Liquefaction potential of sands using the CPT" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1): 35-50.
- Rollins KM, Anderson J, McCain A, Goughnor R (2003) "Vertical composite drains for mitigating liquefaction hazard" Proc. 13<sup>th</sup> Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Honolulu, 498-505.
- Sato T., Shibata, T., Kasaka, M., (1980) "Dynamic Behavior and Liquefaction of Saturated Sandy Soil", International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, Vol.2, 513-522.
- Scott RF, Zuckerman KA (1972) "Sandblows and Liquefaction in the Great Alaskan Earthquake of 1964." Engineering Publication 1606, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 170-189.
- Shen CK, Wang Z, Li XS (1991) "Pore pressure response during 1986 Lotung Earthquake" Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, March 11-15.
- Seed HB and Lee, KL., (1965) "Studies of liquefaction of sands under cyclic loading conditions" Report TE-65-65, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Seed HB and Idriss, IM. (1971) "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97(9), pp. 1249-1273.
- Seed HB and Peacock WH (1971) "Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97 (8): 1099-1119.
- Seed HB, Martin PP. and Lysmer J (1975) "The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction" Rep. No. UCB/EERC 75-26. Earthquake Engineering Research Center, UC-Berkeley, California.
- Seed HB, Idriss IM (1982) "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes" Earthquake research Institute, Berkeley, California.
- Seed HB (1987) "Design problems in soil liquefaction" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113(8):827-845.
- Seed HB, Idriss IM, Arango I (1983) "Evaluation of liquefaction potential using field performance data", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, 109(3):458-482.
- Seed RB, Harder LF (1990) "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength" in J.M Duncan ed., Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, Vol.2, 351-376.
- Seed RB, Cetin KO, Moss RES, Kammerer AM, Wu J, Pestana JM, Riemer MF (2001) "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation" 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, March 28-31.
- Seed HB and De Alba P (1986) "Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of soils" Proceedings, In-situ 86, ASCE.



- Sento N, Kazama M, Uzuoka R, Ohmura H, Ishimaru M (2004) "Possibility of postliquefaction flow failure due to seepage" *Journal of Geotechnical&Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(7):707-716.
- Stark TD, Mesri G (1992) "Undrained shear strength of sands for stability analysis" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 118(11):1727-1747
- Stokoe KH, Roesset JM, Bierschwale JG, Aouad M (1988) "Liquefaction Potential of Sands from Shear wave Velocity." *Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. III: 213-218.
- Streeter, VL, Wylie EB, Richard FE (1973) "Soil Motion Computations by Characteristics Methods", *Proceedings, ASCE National Structural Engineering Conference*, San Francisco, California.
- Tanaka T, Yasunaka M, Tani N, Kawaguchi N, Koga Y (1983) "Shaking Table Tests and Liquefaction Analysis of Soil Structures" *Symposium on Earthquake Damage of Soil Layers and Foundation*, 71-84.
- Tatsuoka F, Ochi K, Fujii S and Okamoto M (1986) "Cyclic undrained and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods" *Soils and Foundations*, 26(3):23-41
- Toki S, Tatsuoka F, Miura S, Yoshimi Y, Yasuda S, Makihara Y (1986) "Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program" *Soils and Foundations*, 26 (3),117-128.
- Tokimatsu K, Kuwayama S, Tamura S (1991) "Liquefaction potential evaluation based on Rayleigh wave investigation and its comparison with field behavior" *Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol.1:357-364.
- Tokimatsu K, Seed HB (1987) "Evaluation of Settlements in Sands Due to Earthquake Shaking" *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 113 (8): 861-878.
- Tokmatsu K (2003) "Behavior and design of pile foundations subjected to earthquakes" *Proc. 12<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Singapore.
- Toprak S, Holzer TL, Bennett MJ, Tinsley JC(1999) "CPT-and SPT based probabilistic assessment of liquefaction potential" *Proc. of seventh U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction*.
- Casagrande A (1936) "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills", *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, v.23, n1, p13-32; Reprinted in *Contributions to Soil Mechanics 1925-1940*, BSCE, P257-276.
- Castro G (1969) "Liquefaction of Sands", *Harvard Soil Mechanics Series 87*, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Uchida K, Hasegawa T (1987) "Dynamic plastic deformation analysis of embankment structures" *Proc. 8th Asian Regional Conf. ISSMFE*, 273-276.
- Vasquez-Herrera A, Dobry R (1988) "The behavior of undrained contractive sand and its effect on seismic liquefaction flow failures of earth structures" *Report to U.S Army Corps of Engineers*, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, Newyork.
- Wang W (1979) "Some findings in soil liquefaction" *Water conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute*, Beijing, Chiana.
- Whitman RV (1985) "On liquefaction" *Proc. of 11<sup>th</sup> International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Balkema, 1923-1926.
- Wride CE, McRoberts EC, Robertson PK (1999) "Reconsideration of case histories for estimating undrained shear strength in sandy soils" *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 907-933.
- Yegian MK, Gharaman VG, Harltunyan RN (1994) "Liquefaction and embankment failure case histories, 1988 Armenia earthquake" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE,117(1), 35-50.
- Youd TL., vd., (1985), "The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983-liquefaction" *Earthquake Spectra*, Vol.2 (1): 71-89.
- Youd TL, Noble SK (1997) "Liquefaction Criteria Based on Statistical and Probabilistic Analysis", *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Technical Report NCEER-97-0022, T.L. Youd and I.M. Idriss, eds., National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, pp. 201-215.
- Youd TL, Idriss I.M., et al. (2001), "Liquefaction Resistance of Soils", *Summary Report from the NCEER and NSF Workshops*, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 127 (10): 817-833.
- Youd TL, Holzer TL (1994) "Piezometer performance at Wildlife liquefaction site, California" *Journal Geotech. Engrg.*, 120(6): 975-995.
- Youd TL, Carter BL (2005) "Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131 (7):811-825.
- Yoshimi Y, Tokimatsu K (1978) "Two-dimensional pore pressure changes in sand deposits during earthquakes" *Proc., 2nd International Conf. on Microzonation*, 2, 853-863.
- Yoshimi Y (1967) "An Experimental Study of Liquefaction of Saturated Sands" , *Soils and Foundation*, 7(2):20-32.



- Yoshimine M, Robertson PK, Wride CE (1999) "Undrained shear strength of clean sands to trigger flow liquefaction" Canadian Geotechnical Journal, 36: 891-906.
- Yunatçı A, Çetin KÖ (2007) "Olasılıksal sismik tehlike analizleriyle tümleştirilmiş, sahaya özel sismik tepki ve zemin sıvılaşması değerlendirilmesi" Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İTÜ Süleyman Demirel Kongre Merkezi, 16-20 Ekim 2007
- Zhang G, Robertson PK, Brachman RWI (2002) "Estimating liquefaction-induced ground settlement from CPT for level ground" Canadian Geotechnical Journal, 39: 1168-1180.

