

# ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN, YTÜ

## GİRİŞ

Depremlerde arazi zemin tabakalarında sıvılaşma durumunun ortaya çıkması üzerindeki ve gömülü yapılarda önemli hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle geoteknik deprem mühendisliğinde 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 sınırlandırmaktadır. Bu tür zeminlerde **çevrimli oynaklık (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 kaynakları ve sonrasında sıkışma (oturma) meydana gelebilmektedir.

**Akma sıvılaşması (flow liquefaction)** sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütlesinin 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 adimsal 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 sıklık 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 olduğu düşünülmesine karşın, son yıllarda yapılan çalışmalar ve gözlemler düşük kohezyonlu siltler (Ishihara 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 başvurulan 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 tanımlanabilmektedir. 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 karşılaştırılması 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 yüklenme 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 kullanılabilir. Bu amaçla geliştirilmiş analiz yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

#### Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi

Deprem 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 değer 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 sığ 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.

$$(CSR_{arazi})_{\alpha, \sigma} = \quad (2)$$

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

$$\text{Burada } \alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma_{vo}'} \text{ ve } K_{\alpha}, K_{\sigma}$$

düzeltilme faktörleridir.

$K_{\alpha}$  değerinin gevşek ve sığ 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 verdiği inandırılmaktadır. 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,

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

$\%5 < FC < \%35$  için

$$\alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{(FC)^2}\right) \quad (8)$$

$$\beta = \left[0.99 + \left(\frac{FC}{1000}\right)^{1.5}\right]$$

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

olarak alınmaktadır. Bu durumda  $M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sivilaşma 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 ( $q_c$ ) sivilaşma direncinin belirlenmesinde kullanılmasında da bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir.

$$q_{c1N} = C_Q(q_c/Pa),$$

$$C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \quad (11)$$

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,

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

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma'_v}\right) \times 100$$

$f_s$ =ölçülen sürtünme direnci  
 İnce dane oranına göre düzeltme

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

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

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

Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c < 2.6$  ise zemin killi ve sivilaşmayan 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 sivilaşma analizlerinde kullanılır, eğer  $I_c > 2.6$  ise  $n=0.7$  alınarak  $I_c$  tekrar hesaplanır ve sivilaşma analizlerinde kullanılır.

$M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sivilaşma direnci

$$q_{c1N, CS} < 50 \text{ için} \quad (15)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{0.833 q_{c1N, CS}}{1000} + 0.05$$

$$50 \leq q_{c1N, CS} < 160 \text{ için} \quad (16)$$

$$CRR_{7.5} = 93 \left(\frac{q_{c1N, CS}}{1000}\right)^3 + 0.08$$

bağıntıları kullanılarak bulunabilmektedir.

Sivilaşma 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 sivilaşma direnci ile düzeltilmiş SPT, CPT ve kayma dalgası hızı arasında korelasyonları gösteren eğriler verilmiştir.

### Sivilaşmaya karşı güvenlik sayısı

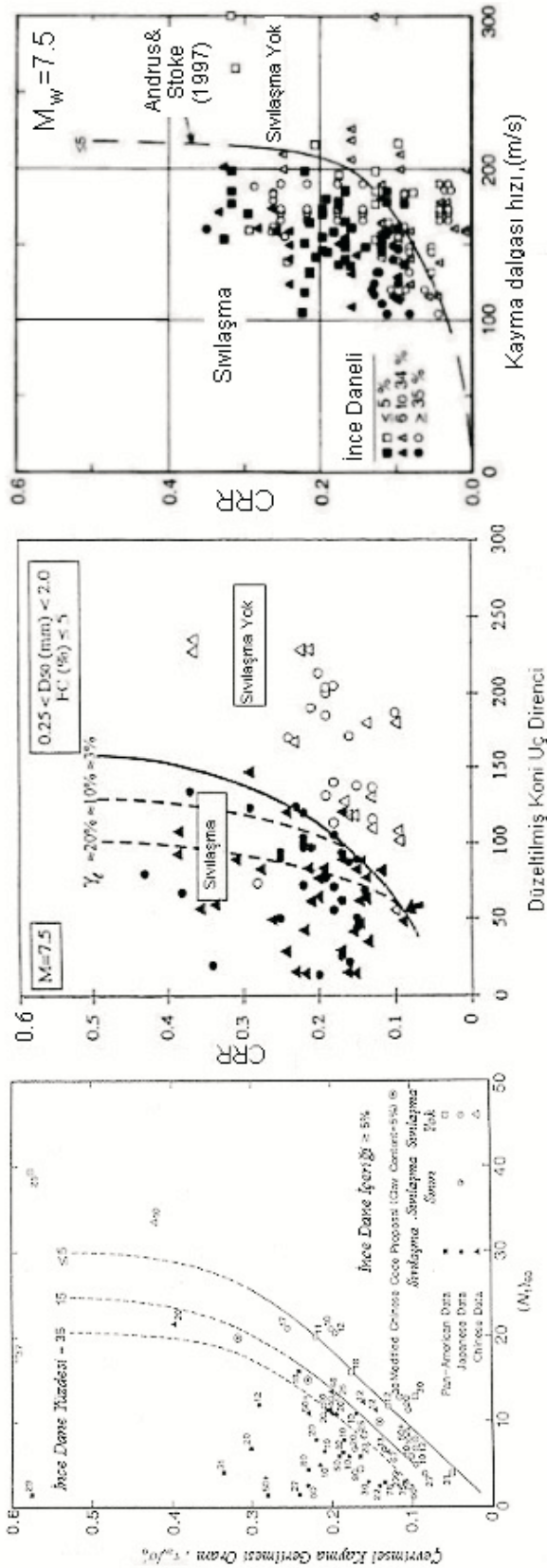
Yukarıda tanımlanan CRR değerleri  $M=7.5$  büyüklüğünde depremler için geçerlidir. Eğer tasarım deprem büyüklüğü farklı ise, Deprem Büyüklüğü Derecelendirme Katsayısı (MSF) aşağıdaki gibi hesaplanarak sivilaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) belirlenir.  $MSF = 10^{2.24/M_w^{2.56}}$

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

Sivilaşma tehlikesi bulunan tabakalardaki güvenlik sayıları hesaplandıktan sonra yüzeyden 20m derinliğe kadar Sivilaşma Tehlikesi Indisi (PL) hesaplanarak bölgesel sivilaşma tehlikesi değerlendirilmesi 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 sivilaşma olasılığını,  $5 < PL < 15$  orta derece olasılığı ve  $PL \leq 5$  düşük olasılığı gösterdiği kabul edilmektedir.



Şekil 1. Sıvılaşma direnci ile arazi deneyleri sonuçları arasındaki korelasyonları

## 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 (Yumatçı 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, yanıl 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 yüklemeye 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- yüklemeye 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 yüklemeye çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi modelleyen öncü çalışmalardan birini yapmışlardır.

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 yararlanan 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 kullanılan 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 yararlanılan 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 belirlenmemektedir. 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 yüklemeye şartları altındaki zemin davranışı daha iyi modellenmektedir. 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 nümerik 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 DYNFLOW (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 bulunması, araştırmacıları zemin davranışını analiz etmek için deneysel çalışmalardan ve gözlemlerden faydalanma yoluna itmiştir. Depremlerde zeminlerde oluştuğu gözlenen sivilaşma olayı ve etkili olan faktörler, sivilaşmanın gözlemlendiği 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. Kısım bu güçlükleri aşmak kısmen de arazi davranışını daha iyi modelleyebilmek için dinamik yükler etkisi ile suya doygun kumlarda ortaya çıkan sivilaşma davranışının araştırılmasında sarsma tablası deneyleri geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Liu ve Qiao 1984, Finn vd., 1971, Yoshimi, 1967 ve Elgamel 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 sivilaşma ve sivilaşmayı etkileyen faktörlerin anlaşılması bakımından oldukça faydalı olmaktadır.

### Laboratuvar Araştırmaları

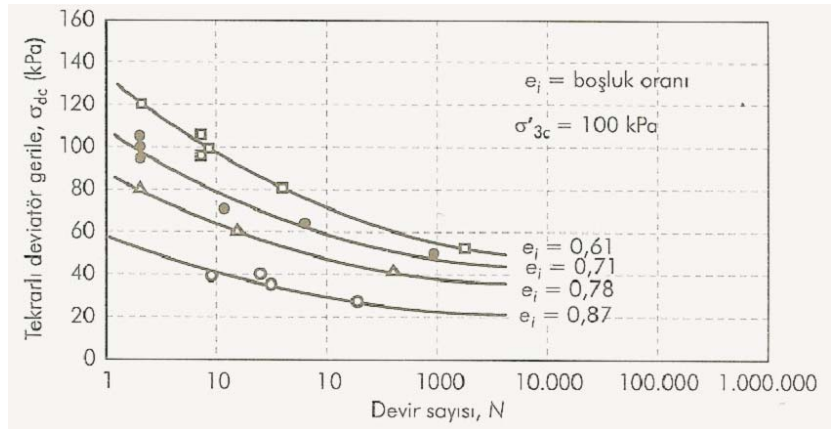
Zeminlerin sivilaşma davranışını araştırmak amacı ile laboratuvarde

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

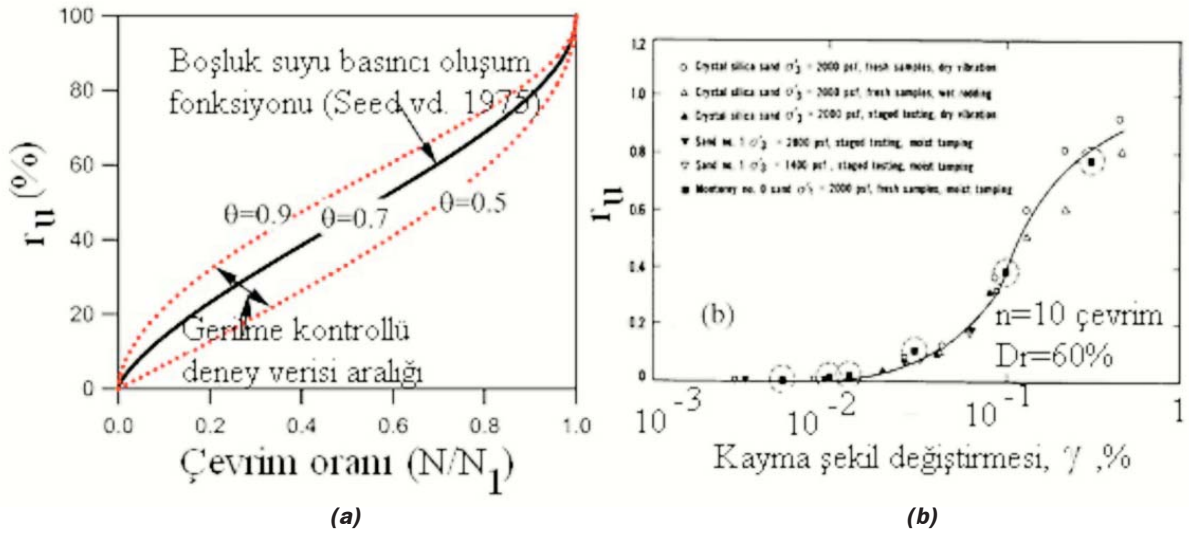
yapılmaktadır.

Gerilme ve şekil değiştirme kontrollü dinamik üç eksenli basınç, dinamik basit kesme ve burulmalı kesme deneyleri yardımı ile zeminlerin sivilaşmasına 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 sivilaşma 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 sivilaşması ve %20 eksenli birim deformasyon oluşumu için gerekli çevrimsel gerilmeler gösterilmiştir. 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 2. İzotropik olarak konsolide edilmiş Sacramento kumunun üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından elde edilmiş çevrimsel dayanım eğrileri (Seed ve Lee, 1965)**



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 sonrasında 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 sahalara 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.

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 yüklemeye oluşturarak bu esnada boşluk suyu basınçlarının

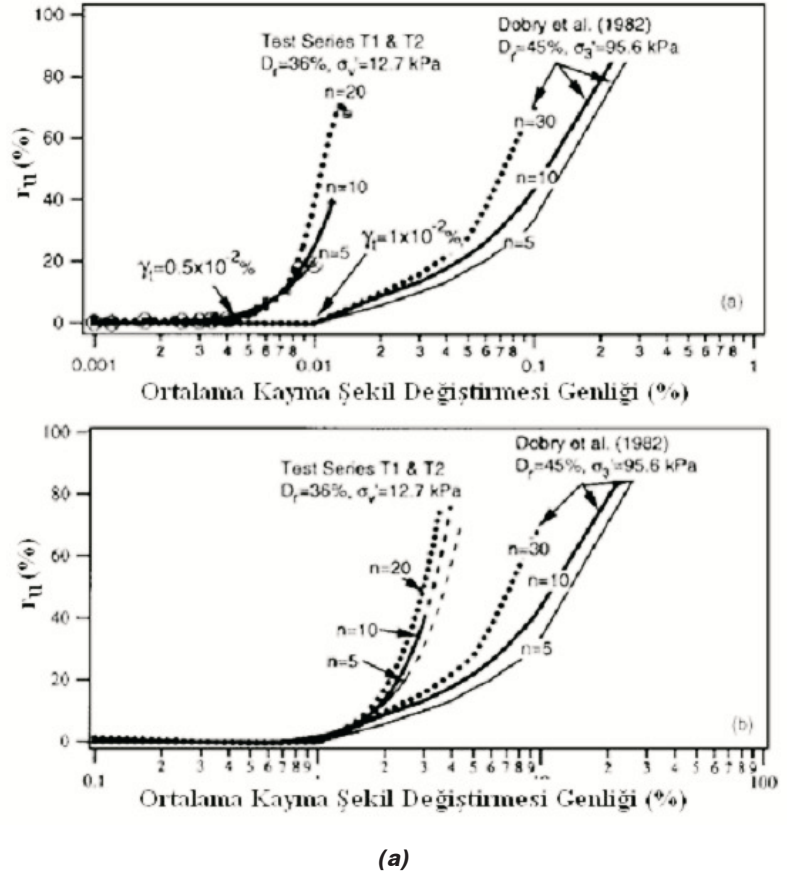
ölçülmesini hedefleyen çalışmalar yapılması yoluna başvurulmaktadır. Bu çalışmalarda dinamik kaynak olarak genellikle aşağı kuyu patlatma yöntemi kullanılmıştır (Charlie vd. 1992; Gohl vd. 2001; Rollins vd. 2003). Ancak, kullanılan bu patlatma yönteminde oluşan dinamik yüklemeye hızının depremin yüklemeye hızına uygun olmaması ve patlatma sonrası boşluk suyu basınçlarının kaydedilmesinde karşılaşılan zorluklar neticesinde dinamik yüklemeye kaynağında yeni teknolojilerin kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda Chang vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada yüksek enerjili bir dinamik yüklemeye 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 şekli değiştirmelerinin ilişkisi ve sıvılaşma davranışına etkisi araştırılmıştır.

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

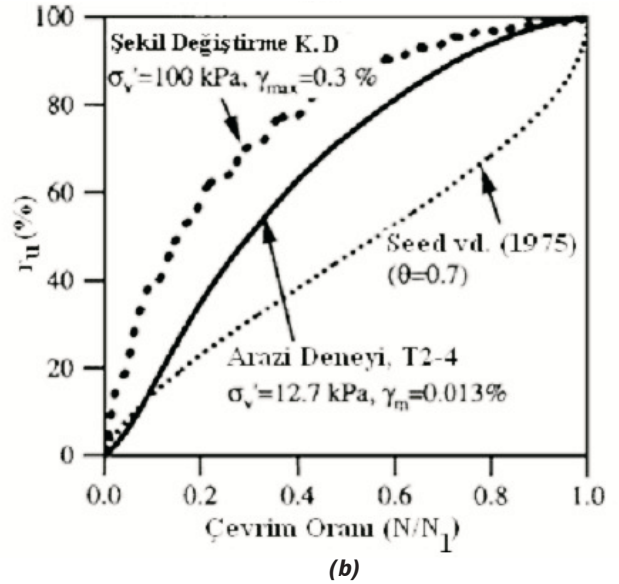
Yer	Zemin tipi	Veri	Kaynak	Referans
Owi Island (Japonya)	Siltli ince kum	SPT, CPT, boşluk suyu basıncı, yüzey ivmesi	Mid-Chiba depremi, $a_{maks}=0.1g$	Ishihara vd. (1981)
Sunamachi (japonya)	İnce kum	SPT, $V_s$ , boşluk suyu basıncı, aşağı kuyu ivme ölçümü	Chiba-Toho-Okı depremi, $a_{maks}=0.12g$	Ishihara 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)				

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. (1975) 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.

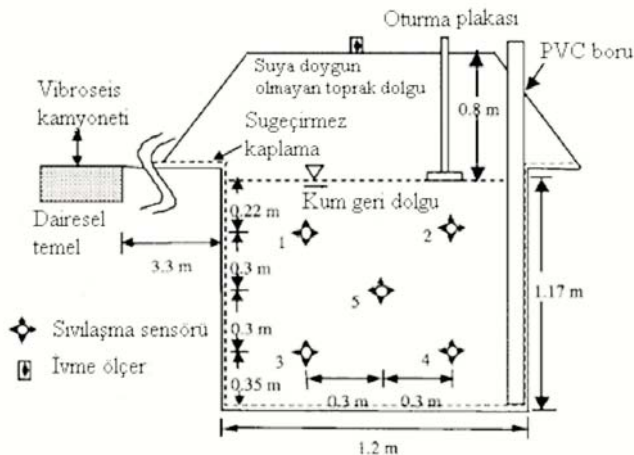


(a)



(b)

**Şekil 5.** Arazide 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



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

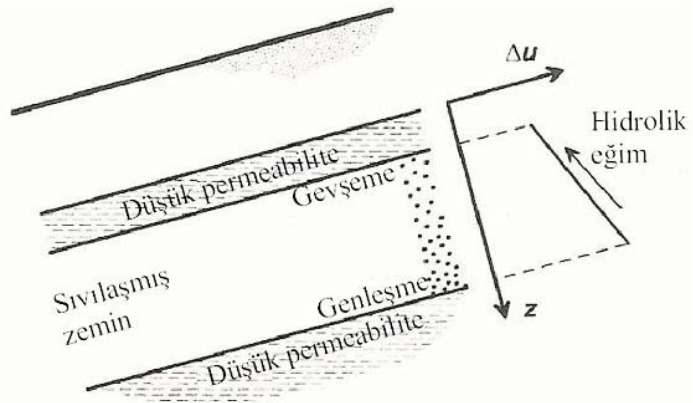
## SIVILAŞMANIN ETKİLERİ

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, yanıl akmlar ve şev göçmeleri, zemin yapıları ve istinat yapılarında hasarlar, kazıklar

üzerinde ek yüklemeler ve yanıl 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.

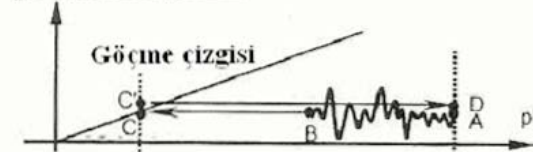
## Sıvılaşmış Zeminlerin Kayma Mukavemeti

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



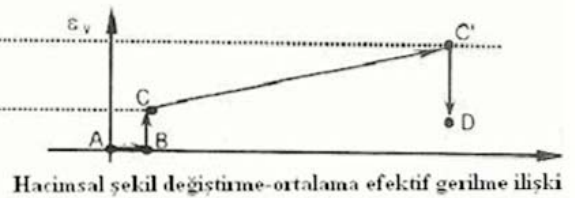
(a)

### q:Deviatorik gerilme



A→B: Sarsıntı sırasında drenajsız çevrimli kesme  
B→C: Alt tabakadan su akımının gelmesi  
C→C': Su akımının etkisi ile akma deformasyonu  
C'→D: Drenaj sonucu efektif gerilme geri dönüşümü

(b)

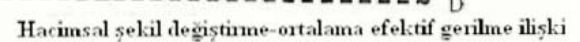
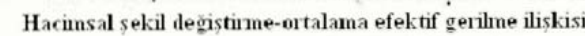


### q:Deviatorik gerilme



A→B: Sarsıntı sırasında drenajsız çevrimli kesme  
B→D: Drenaj sonucu efektif gerilme geri dönüşümü

(c)



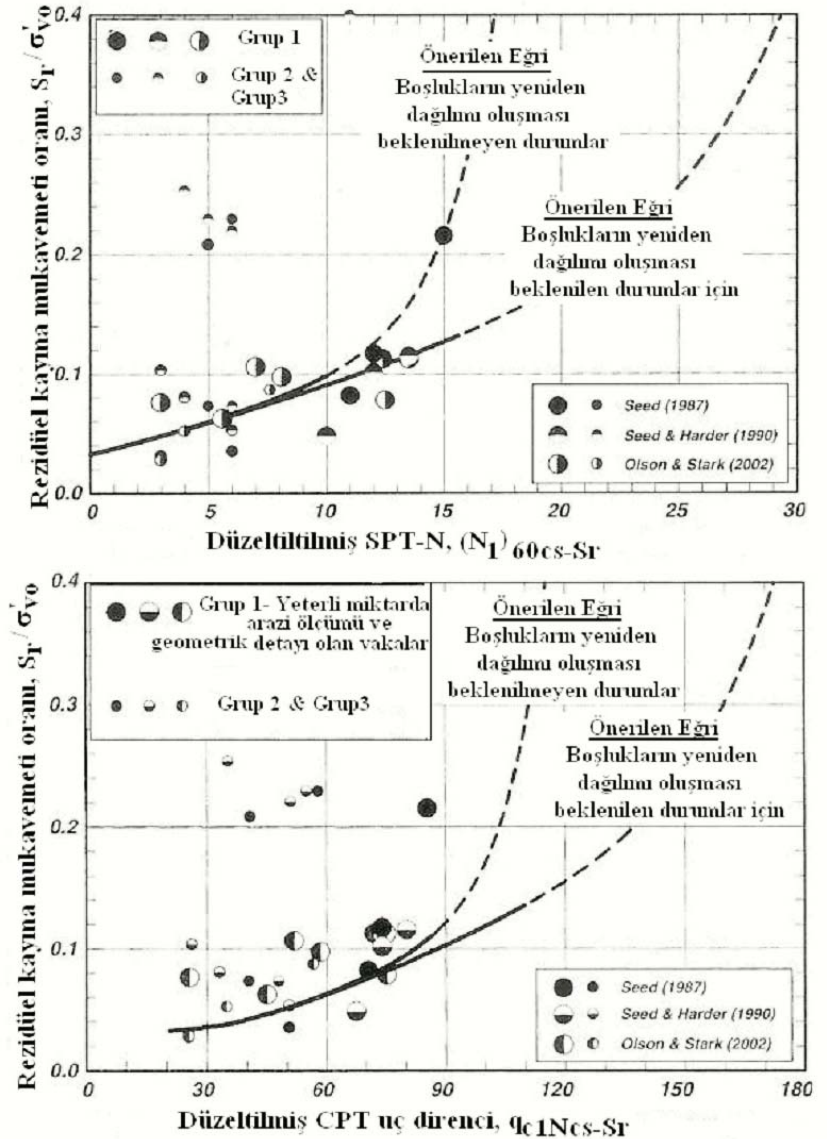
**Şekil 6. (a) Sıvılaşmış zeminde boşlukların yeniden dağılımı (b) Çevrimli gerilmeler altında boşluk suyu basıncı artışları ve alt tabakalardan su akımının etkisi ile sıvılaşma oluşumunu takiben drenaj ile hacimsel sıkışma (Sento vd. 2004) (c)Çevrimli gerilmeler altında boşluk suyu basıncı artışı ile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

bilinmesi gerekmektedir. Son yıllarda, depremin yol açtığı boşluk suyu basıncı artışlarından kaynaklanan hidrolik eğimler sonucu ortaya çıkan su akımlarının sivilaşmış zeminlerde “boşlukların yeniden dağılımı”na yol açtığı kavramının geliştirilmesi (Whitman, 1985), laboratuvar araştırmaları ve arazi gözlemlerinin yeniden değerlendirilmesi ile, sivilaşmış zeminlerin rezidüel mukavemeti konusunun açıklığa kavuşturulmasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle, **Şekil 6a**'da gösterildiği gibi sivilaşabilir zemin üzerinde geçirgenliği düşük bir zemin olması (yukarı doğru su akımının engellenmesi) durumunda, az geçirimli tabakanın hemen altındaki sivilaşmış zeminde gevşeme ve genişleme, 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 sivilaşma oluşumu üzerinde etkisi ve takip eden drenaj sonrası hacim şekil değiştirme davranışı, **Şekil 6c**'de ise sivilaşma sonrası drenaj ve hacimsel sıkışma davranışı gösterilmiştir. Bu konuda yapılan fiziksel ve analitik modelleme çalışmaları (Kokusho, 2000; Kulasingam vd. 2004; Malvick vd. 2004; Tohumcu Özener, 2007) sivilaşmış 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 sivilaşmış zeminin drenajsız rezidüel kayma mukavemeti ( $S_r$ ) ile eşdeğer

düzeltilmiş temiz kum SPT darbe sayısı ( $N_{1,60, Cs-Sr}$ ) ve CPT uç direnci ( $q_{c1N, Cs-Sr}$ ) arasında korelasyonlar önermişlerdir (**Şekil 7**). Bu korelasyonlara bağlı olarak, sivilaşmış zeminde boşlukların yeniden dağılımı oluşması beklenen ve beklenilmeyen durumlar için ayrı ayrı olmak üzere, efektif düşey jeolojik gerilmeye göre normalize edilmiş rezidüel kayma mukavemeti bağıntıları geliştirmişlerdir (**Şekil 7**).

### Zemin Sivilaşmasının Spektral İvmeler Üzerinde Etkisi

Depremlerin yol açtığı sivilaşma zeminde göçme veya aşırı şekil değiştirmelere yolaçabildiği gibi, zeminde meydana gelen yumuşama yer hareketi özelliklerini de etkileyebilmektedir. Sivilaşmadan kaynaklanan zemin yumuşamasının yapılar üzerindeki etkileri depremlerde sivilaşma oluşmuş bazı sahalarda



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

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 sivilaşma 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 Sivilaşmış Zemin Davranışı

Sivilaşma 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 zeminini için de serbest arazi sivilaşması durumunu göz önüne almak daha uygun olmaktadır.

Deprem sarsıntısı sırasında sivilaşmadan 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 sivilaşmayan bir kabuk (örneğin bir kil tabakası) olmasının, taşıma gücü azalması ve oturmalar üzerinde çok olumlu etkisi olduğu gözlenmektedir. Ishihara (1985) düz arazilerde sivilaşmadan kaynaklanan hasarların oluşmaması için gerekli üst (sivilaşmamış) tabaka kalınlığı ile sivilaşan tabaka kalınlığı ve maksimum yüzey ivmesi arasında ilişkiler geliştirmiştir. Kabuk tabakasının kritik bir kalınlığı aşması durumunda taşıma gücü sivilaşan 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

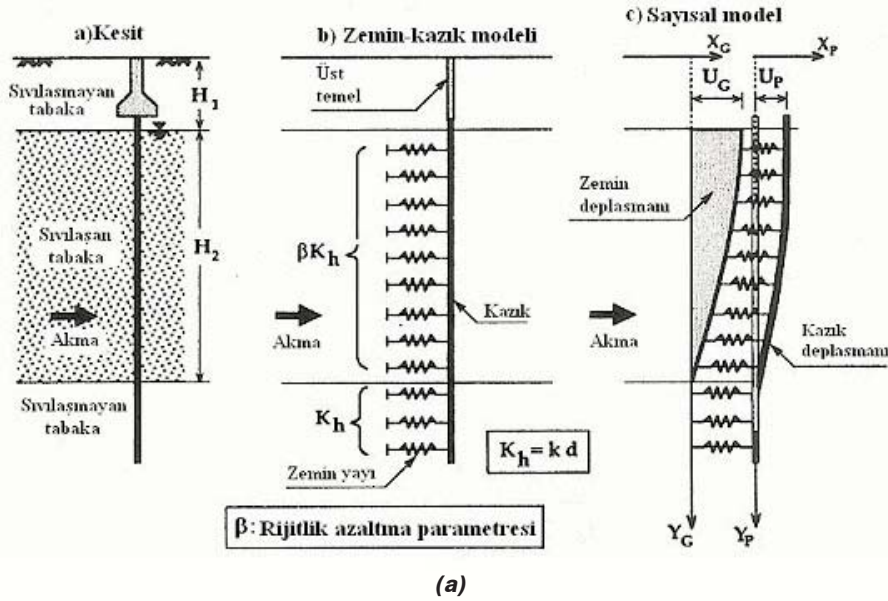
(Bouckovalas ve Dakoulas, 2007). Temel altında sivilaşmayan bir kabuk tabakasının mevcut olması, sivilaşmadan kaynaklanan oturmaların olumsuz etkisini de oldukça sınırlamaktadır.

### Kazıklı Temeller Üzerinde Sivilaşma Etkileri

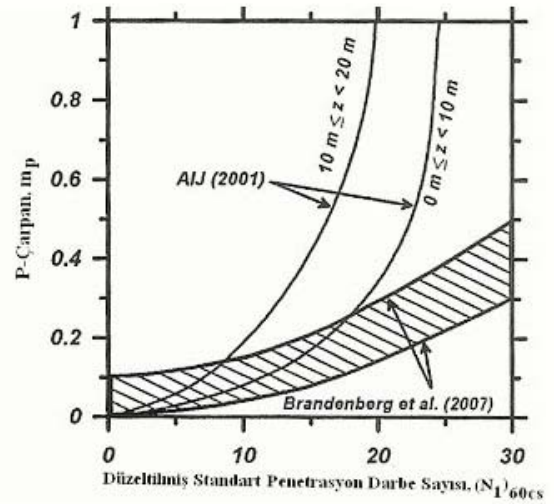
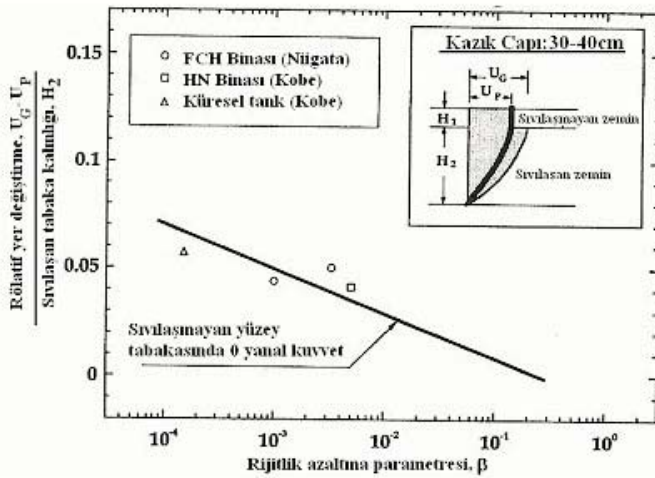
Kazıkların etrafındaki zeminde sivilaşma ve yanal akma oluşması, kazıklar üzerinde ek ötelenme, dönme ve eğilme zorlamalarına ve ağır hasarlara yol açabilmektedir. Bu etkilerin mühendislik tasarımında dikkate alınması oldukça karmaşık olmakla birlikte, etkileyen başlıca faktörlerin: depremde oluşan açık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

Sivilaşan 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 sivilaşan zemin ortamında kazık-zemin etkileşiminin modellenmesi yanında, farklı araştırma ve uygulamacılar tarafından sivilaşan zeminin yanal rijitliği için önerilen azaltma faktörleri gösterilmiştir. Analiz yöntemi olarak nonlineer Winkler kirişi modeli seçilmesi durumunda, sivilaşmış zemin için azaltma faktörleri ile çarpılmış zemin yayları kullanılması, açık arazi  $r_u$



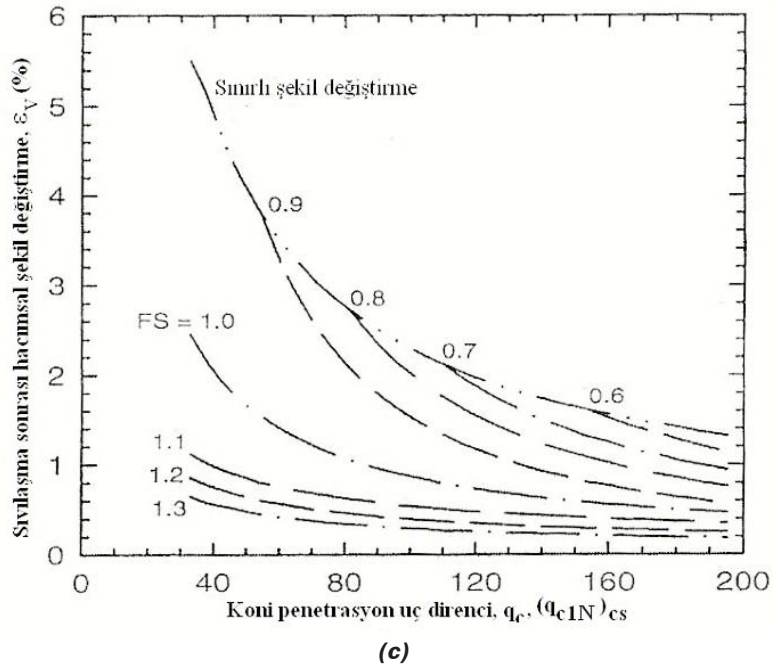
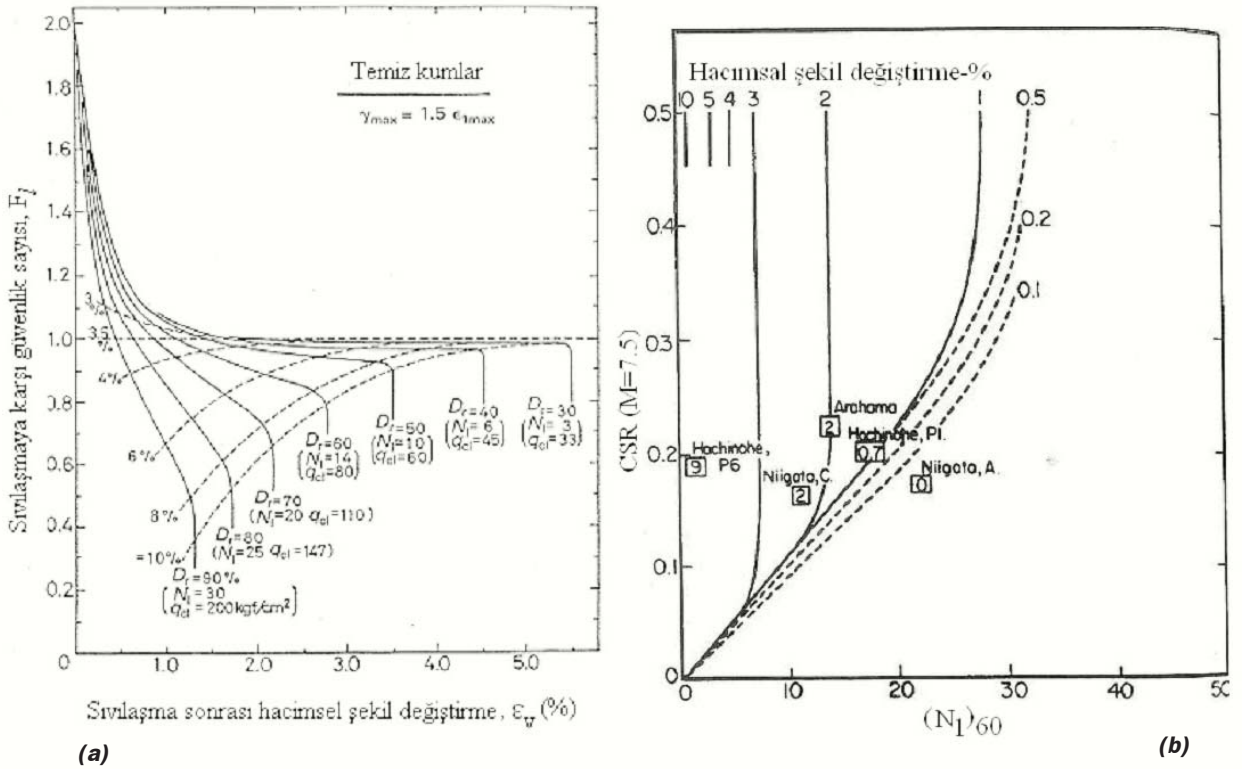
(a)



F <sub>L</sub>	Derinlik	Sıvılaşma direnci			
		R ≤ 0.3		0.3 < R	
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 1	Seviye 2
F <sub>L</sub> ≤ 1/3	0 ≤ x ≤ 10	1/6	0	1/3	1/6
	10 < x ≤ 20	2/3	1/3	2/3	1/3
1/3 < F <sub>L</sub> ≤ 2/3	0 ≤ x ≤ 10	2/3	1/3	1	2/3
	10 < x ≤ 20	1	2/3	1	2/3
2/3 < F <sub>L</sub> ≤ 1	0 ≤ x ≤ 10	1	2/3	1	1
	10 < x ≤ 20	1	1	1	1

(d)

**Şekil 8 (a) Sıvılaşan zeminde kazık-zemin etkileşimi modeli (b) Sıvılaşan zemin için rijitlik azaltma katsayısı (Ishihara ve Cubrinovski, 1988) (c) p-y yönteminde sıvılaşan zemin için p-çarpanları (Japon Bina Şartnamesi ve Brandenburg vd. 2007) (d) Japon köprü şartnamesinde sıvılaşan zemin için yanıl yatak katsayısı azaltma faktörleri (JRA)**



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)

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 yerdeğiştirmeleri ve yapısal atalet kuvvetlerinin superempoze edilmesi ile Winkler kirişi modeli kullanılarak yanıl akmaya 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, yanıl yayılma veya yer yarılması 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 yanıl 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 sönmelenmesine bağlı olarak meydana gelmektedir. Tokimatsu ve Seed (1987) hacimsal sıkışma miktarını belirlemek için kumun sıkılığı temsil eden düzeltilmiş SPT darbe sayısını  $N_{1,60}$  ve depremde etkiyen çevrimli kayma gerilmesi oranını (CSR) göz önüne alan ilişkiler geliştirmişlerdir. Ayrıca, Ishiara 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 yanıl 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 yanıl 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 geliştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada mühendislik tasarımlarında sıvılaşmanın depremlerde yapısal davranış üzerinde etkilerinin tam olarak gözönüne alınmasındaki güçlüklerden dolayı, inşaat alanlarının seçiminde sıvılaşabilir zeminlerle kaplı alanlardan sakınılması veya bu tür zeminlerin iyileştirilmesi gerekmektedir.

\* Şubemizin 16-20 Ekim 2007 tarihlerinde düzenlediği 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı'nda sunulan bu bildiriye esas olan kaynaklara, bildirin yayımlandığı 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı Çağrılı Bildiriler Kitabında yer verilmiştir.