



**ÇORUM BELEDİYESİ**

Yapı Kontrol Müdürlüğü



**EĞİTİM SEMİNERLERİ**

**Sıvılaşma ve Analizi**

**Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA**

*KTÜ Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Geoteknik Anabilim Dalı*

*[osivrikaya@ktu.edu.tr](mailto:osivrikaya@ktu.edu.tr)*

**13 Temmuz 2023, Çorum**

# İÇERİK

## 1. GİRİŞ

## 2. SIVILAŞMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

## 3. SIVILAŞMA ANALİZLERİ

- \* Kohezyonsuz Zeminler
- \* Kohezyonlu Zeminler

## 4. SIVILAŞMANIN ETKİLERİ

- \* Yer Hareketinin Değiştirilmesi
- \* Kum Kaynamalarının Gelişmesi
- \* Oturma
- \* Duraysızlık

## 5. SIVILAŞMAYA KARŞI ÖNLEMLER

## 6. TBDY (2018) GÖRE SIVILAŞMA



# 1. GİRİŞ

- Sıvılaşma, deprem gibi hızlı yüklemeler altında, daneli zeminlerde (kumlu zeminler) görülen bir olaydır.
- **Sıvılaşma**, ani yükleme sonucunda suya doymun daneli zeminin yapısının bozulması ile oluşur. Ayrık daneler arasındaki temas kuvvetinin azalması boşluk suyu basıncının yükselmesi ve zeminin direncini kaybetmesiyle oluşur.

## Sıvılaşma Ortam Koşulları

- Daneli yapıların olması (Kumlu zemin, Kohezyonlu zeminlerde özel şartlar)
- Daneler arası bağın kuvvetli olmaması (Çok gevşek, Gevşek, Orta-sıkı)
- Daneler arası boşlukta su olması (YASS/Suya doymun olması)
- Deprem gibi ani bir kuvvetin bulunması ( $M \geq 5$ ,  $a_{maks} \geq 0.1g$ )

- ❖ Zemin sıvılaştıktan sonra boşluk suyu basıncı sönümlenmeye başlar.
- ❖ Sıvılaşmış halde kalan zeminin süresi, iki ana faktöre bağlıdır.

1. Deprem nedeniyle oluşan **sismik sarsıntının süresi**
2. Sıvılaşan **zeminin drenaj şartları**

- Depremden kaynaklanan **devirsel (tekrarlı) kayma gerilmelerinin** uygulaması **ne kadar uzun ve güçlü** ise sıvılaşma durumu da o kadar uzun sürer.
- Sıvılaşan katman üstten ve alttan zemin tabakası ile sınırlanmış ise, sıvılaşan zeminden su akışı ile boşluk suyu basıncının sönümlenmesi daha uzun zaman alır.

- **Sıvılaşmaya duyarlı zeminin durumu**, zemin yüzeyine yakın yer altı su seviyesine sahip yeni çökelmiş veya yerleştirilmiş gevşek kumdur.

Suya doygun kohezyonsuz zeminler (temiz kumlar, kumlu zeminler) ve plastik-olmayan siltli zeminlerde, deprem dalgaları gibi dinamik yüklerin neden olduğu ani tekrarlı gerilmeler nedeniyle oluşan boşluk suyu basıncı, yüklemenin hızlı olması nedeniyle sönmelenemez.

Yüklemenin şiddeti ve süresine bağlı olarak, boşluk suyu basıncı sürekli artarak nihayetinde çevre basıncına (toplam gerilmeye) eşit bir değere ulaşır ise efektif gerilmeler sıfırlanır.

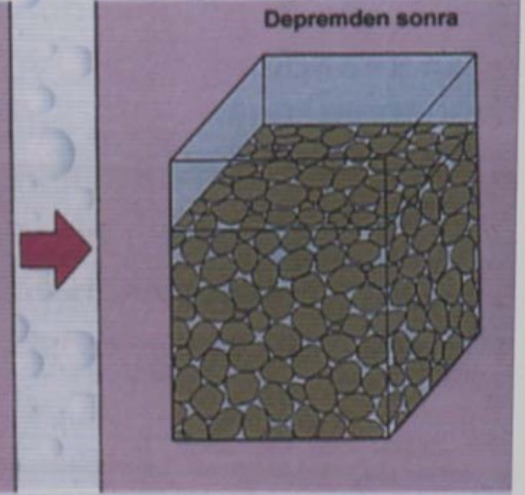
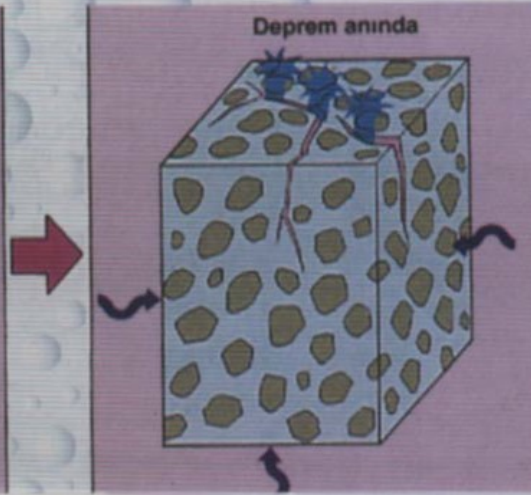
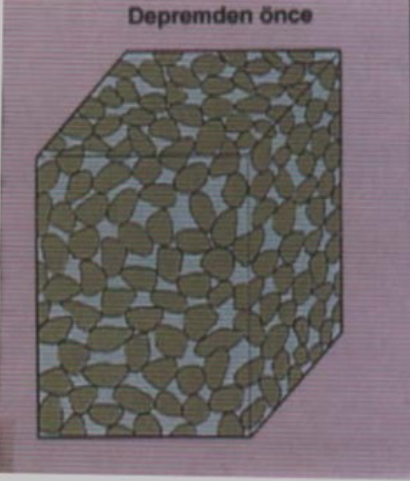
Bunun sonucunda zemin mukavemeti neredeyse tamamen ortadan kalkar ve şekil değıştirmeler çok yüksek değerlere ulaşır.

Zeminin adeta bir sıvı gibi davrandığı bu olaya **sıvılaşma** denir.

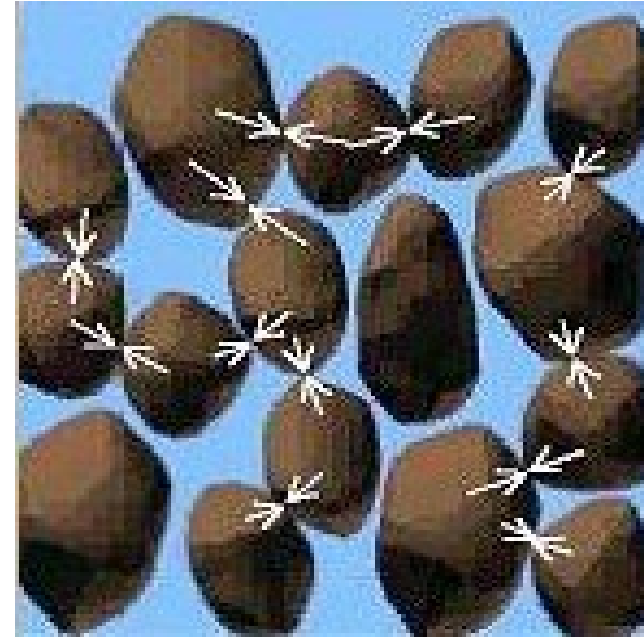
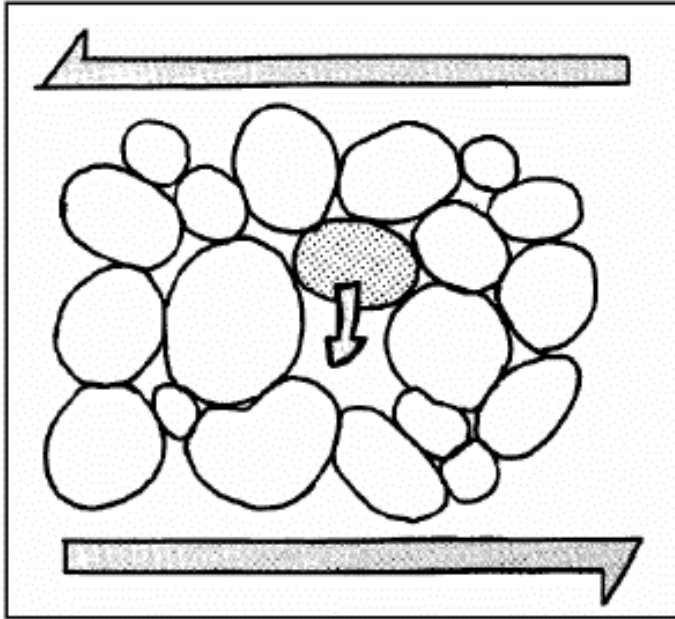
**Sivilaşma Öncesi**  
Taneler  
birbirlerine  
dokunmaktadır

**Sivilaşma Anı**  
Kum taneleri yeraltı suyu  
içinde yüzmeye başlamakta  
ve yeryüzüne doğru fıskır-  
maktadır.

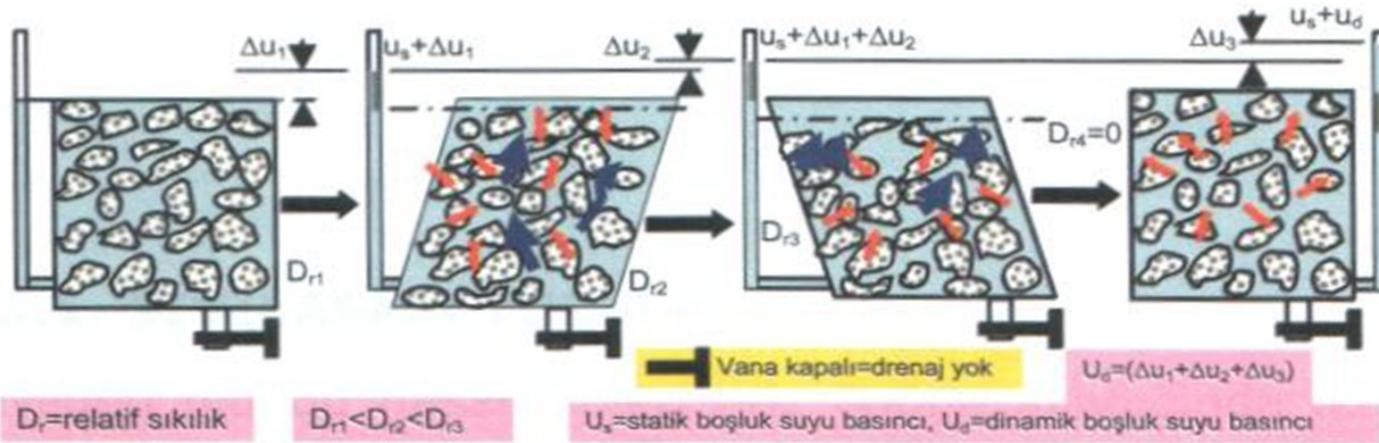
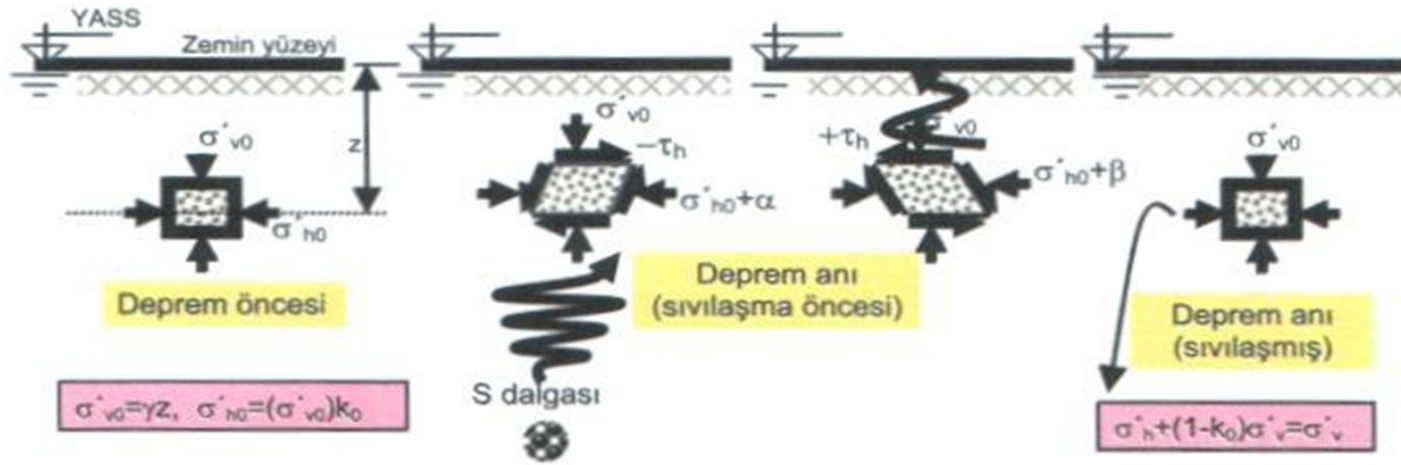
**Sivilaşma Sonrası**  
Kum taneleri arasındaki  
boşluklardaki sular boşal-  
mış ve taneler daha çok bir-  
birlerine yaklaşmışlardır;  
Zemin çökmüştür.



- ❑ Gözeneklerin suyla doymun olması, danecikler üzerinde basınç oluşturur (boşluk suyu basıncı).
- ❑ Basınç, danecikler arası bağı denetler.
- ❑ Normal koşullarda denge söz konusudur ve “iç” basınç düşüktür.
- ❑ Depremın neden olduğu yük dengeyi bozar ve iç basıncı artırır.



Boşluk suyu basıncının  
bağıl olarak artması



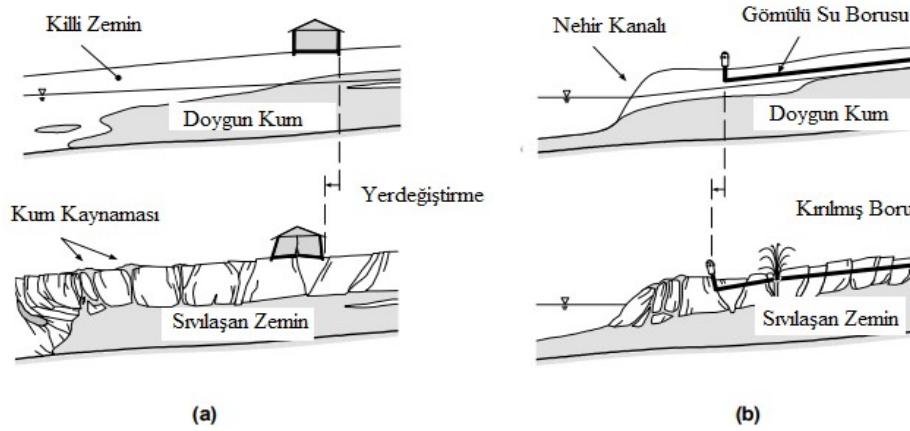


- ❑ Daneler arası dengenin bozulması, suyun dışarı atılmasına yol açar.
- ❑ Su hareketi daneler arası bağı ortadan kaldırır.
- ❑ Bağımsız kalan daneler suyla birlikte dışarı atılır.
- ❑ Ortamdan ayrılan daneler ortamın taşıma gücünü azaltır.
- ❑ Mühendislik yapılarının ek yükleri karşısında yerin taşıma gücü ortadan kalktığından yapı döner, eğilir veya yere batar.



- ❑ **Ön Sıvılaşma:** Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının artarak bir yükleme çevrimi sonunda efektif çevre basıncına eşit olması durumu ön sıvılaşma olarak adlandırılmaktadır. Ön sıvılaşmanın olması, zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerinin boyutları ile ilgili bilgi vermemekle birlikte, zemin elemanının tekrarlı yükler altındaki davranışının adlandırılmasında ve sıvılaşma sonrası davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.
- ❑ **Gerçek (Akma Türü) Sıvılaşma:** Boşluk suyu basıncının tekrarlı veya statik yükler altında sürekli olarak artması ve bir noktadan sonra sabit bir değerde korunması ile efektif çevre basıncının çok küçük bir değere düşmesi sonucu zemin kayma mukavemetinin kaybolması ve çok büyük şekil değiştirmeler ve akmaların olduğu bir durumdur.
- ❑ **Sınırlı Ön (Kısmi) Sıvılaşma (Çevrimsel Hareketlilik):** Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonunda bir ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında bir artık dayanım bulunmasından veya hacim kabarmasından dolayı boşluk suyu basıncının düşmesi ile şekil değiştirmelerin sınırlı kalması ve zemin elemanının tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelmesi durumuna **sınırlı sıvılaşma** ya da **çevrimsel hareketlilik** denmektedir. Bu durum, genelde orta sıkı ve sıkı kumlarda meydana gelmektedir.

- **Akma sıvılaşması** veya **devirsel sıvılaşma** durumlarının çeşitli zararlara ve hasarlara neden olabildiği bilinmekte ve sıvılaşmanın sonunda oluşacak zararlı etkileri en aza indirmek için zeminlerin sıvılaşabilirliği, sıvılaşmaya neden olacak durumlar ve sıvılaşmanın meydana gelmesi durumunda ortaya çıkabilecek hasarların değerlendirilmesi gerekmektedir.



### Sıvılaşma ve yanıl yayılma durumu

- a) Serbest yüzeyin bulunmadığı yamaçlarda  
b) Serbest yüzeylerde

- Sıvılaşma olayının oluşum mekanizması gözönüne alındığında görülmektedir ki **akma türü sıvılaşmada**, zemin danecikleri arasındaki temas kuvvetlerini ifade eden efektif gerilme değeri sıfıra eşitlenmektedir. **Devirsel mobilitede** ise danecikler arasındaki temas kuvvetleri azalmakta fakat tamamen yok olmamaktadır. Bu tespit gözönüne alınarak, **akma türü sıvılaşma için tam sıvılaşma**, **devirsel mobilite için ise kısmi sıvılaşma** ifadelerini kullanmayı önermektedir.

## 2. SIVILAŞMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

|   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Deprem büyüklüğü ve süresi         | <input type="checkbox"/> Drenaj şartları     |
| <input type="checkbox"/> Yer altı su seviyesi               | <input type="checkbox"/> Çevre basınçları    |
| <input type="checkbox"/> Zemin tipi                         | <input type="checkbox"/> Dane şekli          |
| <input type="checkbox"/> Zeminin relatif sıkılığı ( $D_r$ ) | <input type="checkbox"/> Yaş ve çimentolanma |
| <input type="checkbox"/> Dane boyu gradasyonu               | <input type="checkbox"/> Tarihsel ortam      |
| <input type="checkbox"/> Yerleştirme ve çökme ortamı        | <input type="checkbox"/> Bina yükü           |

### 1. Deprem şiddeti ve süresi:

Zemin sıvılaşmasının gerçekleşmesi için bir yer sarsıntısı olmalıdır. Zemin partiküllerinin hacimsel büzülmesine ve aşırı boşluk suyu basıncının gelişmesine neden olan kayma deformasyonlarını belirleyen şey, yer hareketinin ivme ve sarsıntı süresi gibi özellikleridir. Sıvılaşmanın en yaygın nedeni, deprem anında açığa çıkan sismik enerjidir. Deprem şiddeti ve sarsıntı süresi artarken, sıvılaşma için potansiyel de artmaktadır. Yüksek büyüklüklü depremler, hem büyük yer ivmesi hem de daha uzun süreli yer sarsıntı süresi üretir (bkz. Tablo 2.2).

Veriler her ne kadar az olsa da, sıvılaşmanın oluşması için gerekli eşik bir sarsıntı değeri olsa gerektir. Bu eşik değerler, pik yer ivmesi ( $a_{max}$ ) için yaklaşık 0,10g ve yerel büyüklük  $M_L$  için yaklaşık olarak 5'dir (National Research Council, 1985; Ishihara, 1985). Böylece, 0,10g den daha küçük bir pik yer ivmesinin ( $a_{max}$ ) veya 5'den daha küçük bir yerel büyüklüğün ( $M_L$ ) söz konusu olduğu yerler için tipik olarak bir sıvılaşma analizine gerek yoktur.

Depremlerden başka yeraltı patlatmaları, kazık çakımı ve tren trafiğinden kaynaklanan titreşimler gibi diğer koşullar da sıvılaşmaya neden olabilir.

$$M \geq 5 \text{ ve } a_{maks} \geq 0.1g$$

**2. Yeraltı su seviyesi:** Sıvılaşma için en elverişli koşullar yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olduğu zaman ortaya çıkmaktadır. Yeraltı su seviyesi üzerinde yer alan ve suya doymun olmayan zeminlerin sıvılaşması söz konusu değildir. Halihazırda yeraltı su seviyesi üzerinde bulunan zeminler, hidrolojik rejimde oluşabilecek muhtemel değişimler de yüksek olasılıkla bu kuşakta doymunluk oluşmayacağını gösteriyorsa, genellikle sıvılaşma potansiyeli için değerlendirilmeye alınmaz.

Yeraltı su seviyesinin zaman içinde alçalıp yükseldiği yerlerde, sıvılaşma potansiyeli de paralel şekilde düşer ve artar. Diğer bilgi kaynakları su seviyesinde daha yüksek veya düşük bir seviyeyi işaret etmediği sürece, sıvılaşma analizinde geçmişte kaydedilmiş en yüksek yeraltı su seviyesi kullanılmalıdır (Division of Mines and Geology, 1997).

Poulos vd. (1985) sıvılaşmanın, boşluklardan havanın kaçışını sınırlayacak kadar hızlı yüklenmiş kuru ve gevşek çok büyük kum veya silt kütlelerinde de oluşabileceğini belirtmektedir. Kuru ve gevşek kumların böyle hareketinden *akıcı kum* veya *akıcı zemin* olarak söz edilir. Böyle zeminlerin sıvılaşmış zemin gibi akabilmesine rağmen, bu gibi zemin deformasyonları burada sıvılaşma olarak tanımlanmayacaktır. Doğru olanı, sıvılaşmanın yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminler için oluşacağını göz önünde bulunduraktır.

- ❑ **TBDY (2018)'e göre**, zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ( $I_p < \% 12$ ) zeminler
- ❑ Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.

**3. Zemin tipi:** Ishihara (1985) sıvılaşımaya en duyarlı zemin türleri için şunu belirtmektedir: "Depremler esnasında zemin sıvılaşması ile ilişkili tehlikenin ince ve orta kum ile düşük plastisiteli ince taneler içeren kum çökellerinde karşılaşıldığı bilinmektedir. Bununla birlikte, sıvılaşmanın zaman zaman çakıllı zeminlerde de olduğu durumlar rapor edilmiştir."

Böylece, sıvılaşımaya duyarlı zemin türleri; plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminlerdir. Kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşımaya karşı en az dirençliden en çok dirençliye kadar olan bir sıralaması kabaca; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar olarak verilebilir. Bu sıralamanın birçok istisnası olabilir. Örneğin, Ishihara (1985, 1993) madencilik endüstrisinden elde edilen, gerçekte öğütülmüş kayalardan oluşan ve kaya unu olarak sınıflandırılan atıkların durumunu tanımlamıştır. Ishihara (1985, 1993) kaya ununun suya doygun halde iken önemli bir kohezyona sahip olmadığını ve temiz bir kum gibi davrandığını belirtmektedir. Bu maden atıklarının sıvılaşımaya karşı direncinin bir temiz kumdaki kadar düşük olduğu gösterilmiştir.

Seed vd. (1983) laboratuvar deneyi ve arazi performansına dayalı olarak, kohezyonlu zeminlerin büyük çoğunluğunun depremler esnasında sıvılaşmayacağını belirtmiştir. Başlangıçta Seed and Idriss (1982) tarafından açıklanan ve sonradan Youd and Gilstrap (1999) tarafından pekiştirilen kriterler kullanılarak, kohezyonlu bir zeminin sıvılaşması için, aşağıdaki üç kriterin tamamının karşılanması gerekmektedir:

- 0,005 mm'den daha ince partiküllerin zemindeki kuru ağırlıkça yüzdesi 15'den daha az olmalıdır (yani, 0,005 mm'de geçen yüzde <15).
- Zeminin likit limiti (LL) 35'den küçük olmalıdır (yani, LL<35).
- Zeminin su muhtevası ( $w$ ) likit limitin 0,9'undan daha büyük olmalıdır [yani,  $w > 0,9(LL)$ ].

Kohezyonlu zeminin bu üç kriterin tümünü karşılamadığı durumda zeminin genellikle sıvılaşımaya duyarlı olmadığı düşünülür. Kohezyonlu zeminde sıvılaşma olmasa da, sismik sarsıntılan dolayı yine de önemli bir drenajsız kayma direnci kaybı olabilir.

**4. Zeminin relatif sıklığı,  $D_r$ :** Arazi çalışmalarından bilindiği kadarıyla, relatif sıklık olarak gevşek durumdaki kohezyonsuz zeminler sıvılaşmaya duyarlıdır. Gevşek ve plastik olmayan zeminler, aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmesine neden olan sismik salınım esnasında hacimsel olarak büzülür. Altbölüm 6.2'de belirtildiği gibi, başlangıç sıvılaşmasına erişildiğinde gevşek kumlar için kayma deformasyonunda ani ve anormal bir artış olur.

Sıkı kumlarda başlangıç sıvılaşma durumu, devirsel kayma gerilmesi tersine çevrildiği zaman kumun hacimsel artış eğiliminde olmasından dolayı, büyük deformasyonlara neden olmaz. Poulos vd. (1985) arazideki zeminde hacimsel artış olduğu gösterilebildiği takdirde, sıvılaşmaya duyarlı olmayacağı için, sıvılaşma açısından değerlendirmeye gerek olmadığını belirtmektedir. Esasen, hacimsel artışlı zeminler sıvılaşmaya duyarlı değildir. Çünkü, bunların drenajsız kayma direnci, drenajlı kayma direncinden büyüktür.

**5. Tane boyu gradasyonu:** Üiform derecelenmiş plastik olmayan zeminler, dengesiz tane dizilimi oluşturma eğilimindedirler ve bunların sıvılaşmaya duyarlılığı iyi derecelenmiş zeminlerden daha fazladır. İyi derecelenmiş zeminler, büyük taneler arasındaki boşlukları dolduran küçük taneler de vardır. Bu durum, deprem esnasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncında daha az artışa neden olmak suretiyle, zeminin potansiyel hacimsel büzülmesini azaltma eğilimindedir. Kramer (1996) sıvılaşma yenilmelerinin çoğunun üniform derecelenmiş granüle zeminlerde geliştiğini gösteren arazi kanıtlarının bulunduğunu belirtmektedir.

**6. Yerleştirme ve çökme ortamı:** Hidrolik dolgular (su altında yerleştirilmiş dolgu), su içinde düşen zemin partikülleri ile oluşturulan gevşek ve dağınık zemin yapısı nedeniyle sıvılaşmaya oldukça duyarlı olma eğilimindedir. Göllerde, nehirlerde veya denizlerde oluşan doğal çökeller gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturma eğiliminde olup, sıvılaşmaya daha duyarlıdır. Sıvılaşmaya özellikle duyarlı zeminler gölsel, alüviyal ve denizel çökme ortamlarında oluşur.

**7. Drenaj şartları:** Aşırı boşluk suyu basıncının hızlı sönümlenmesi durumunda zemin sıvılaşmayabilir. Böylece, çok yüksek geçirimli çakıl drenler veya çakıl tabakalar bitişik zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltabilir.



**8. Çevre basınçları:** Çevre basıncı ne kadar büyükse, zeminin sıvılaşmaya duyarlılığı daha azdır. Daha yüksek çevre basıncı oluşturan koşullar; daha derin bir yeraltı su seviyesi, zemin yüzeyinden aşağı daha derine yerleştirilmiş zemin ve zemin yüzeyine uygulanmış bir sürşarjdir. Arazi incelemeleri, olası sıvılaşma bölgesinin genellikle zemin yüzeyinden yaklaşık 15 m'lik bir derinliğe indiğini göstermektedir. Daha derin zeminler genellikle daha yüksek çevre basınçlarından dolayı sıvılaşmaz. Bu durum, 15 m'den daha derindeki zeminlerde sıvılaşma analizi yapılmayacağı anlamına gelmez. Bir çok durumda, 15 m'den daha derin zeminler için bir sıvılaşma analizi yapmak gerekebilir. Buna bir örnek olarak, bir sahil yapısının önündeki banket veya bir toprak dolgu barajın eğimli kaplaması gibi eğimli bir zemin gösterilebilir (bkz. Şekil 3.38). Ayrıca, su içine gevşekce dökülmüş herhangi bir zemin çökeli için bir sıvılaşma analizi yapılmalıdır (yani, kalınlığı 15 m'yi aşsa bile, su içine gevşekce dökülmüş dolgunun tüm kalınlığı için sıvılaşma analizi yapılmalıdır). Benzer şekilde, alüvyonun hızlıca çökeldiği bir saha için de 15 m'den derin seviyeler için sıvılaşma analizi gerekebilir. Bir sıvılaşma analizinin hangi derinlikte sonlandırılması konusunda büyük tecrübe ve vargı gereklidir.

**9. Tane şekli:** Zemin tane şekli de sıvılaşma potansiyelini etkileyebilir. Örneğin, yuvarlak taneli zeminler köşeli zemin tanelerinden daha kolay sıkışma eğilimindedirler. Dolayısıyla, yuvarlak zemin partikülleri içeren bir zemin sıvılaşmaya karşı köşeli zemin partikülleri içeren bir zeminden daha duvarlıdır.

**10. Yaş ve çimentolanma:** Yeni çökelmiş zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı eski zemin çökellerinden daha fazladır. Bir zemin çevre basıncına ne kadar uzun süreyle maruz kalırsa, sıvılaşma direncinin o kadar büyük olduğu gösterilmiştir (Ohsaki, 1969; Seed, 1979a; Yoshimi vd., 1989). Tablo 6.1'de çökellerin jeolojik yaşına göre tahmini bir sıvılaşma duyarlılığı verilmiştir.

Sıvılaşma direncinde zamanla meydana gelen artış, deformasyon veya zemin partiküllerinin daha duraylı dizilimde sıkışmasından ileri gelebilir. Tanelerin temasında çimentolanma nedeniyle zaman içinde adezyon gelişimi de olabilir.

**11. Tarihsel ortam:** Zeminin tarihsel ortamının sıvılaşma potansiyelini etkileyebileceği de belirlenmiştir. Örneğin, daha önce sismik sarsıntıya maruz kalmış eski zemin çökelleri, yeni oluşturulmuş aynı sıklığa sahip aynı zemin numunesine kıyasla artan bir sıvılaşma direncine sahiptir (Finn vd., 1970; Seed vd., 1975).

Aşırı konsolidasyon oranında (OCR) ve sukünetteki zemin yanıl basınç katsayısındaki ( $k_0$ ) bir artış da sıvılaşma direncinin artmasına yol açar (Seed ve Peacock, 1971; Ishihara vd., 1978). Buna bir örnek, erozyon nedeniyle zeminin üst tabakasının aşınması gösterilebilir. Altındaki zemin ön yüklemeye maruz kaldığından dolayı, aşırı konsolidasyon oranı ve sukünetteki zemin yanıl basınç katsayısı yüksek olacaktır. Ön yüklemeye maruz kalan böyle bir zeminin sıvılaşmaya direnci, ön yüklemeye maruz kalmamış aynı zeminden daha fazla olacaktır.

**12. Bina yükü:** Bir kum çökeli üstüne ağır bir binanın inşası, zeminin sıvılaşma direncini azaltabilir. Örneğin, zemin yüzeyinde bir radye temel in ağır bir binayı desteklediğini varsayalım. Radye temel altındaki zemin bina yükünün neden olduğu kayma gerilmelerine maruz kalır. Bina yükünün zeminde neden olduğu bu kayma gerilmeleri zemini sıvılaşmaya karşı daha duyarlı yapabilir. Bunun nedeni; zeminin hacimsel büzülmesi ve dolayısıyla sıvılaşması için gerekli deprem kökenli ilave kayma gerilmesinin daha küçük olmasıdır. Bu bölümde tartışılan düz yüzevli zemin sıvılaşması için, bina yükünün etkisi ihmal edilmiştir. Bu bölümdeki sıvılaşma analizinde bina yükleri dikkate alınmasa da, bina yükleri Bölüm 7, 8 ve 9'da tartışıldığı gibi, sıvılaşma kökenli oturma, taşıma gücü ve stabilite analizlerinin tümünde dikkate alınmalıdır.

## Sıvılaşmaya En Duyarlı Saha Koşulları ve Zemin

### Saha Türü

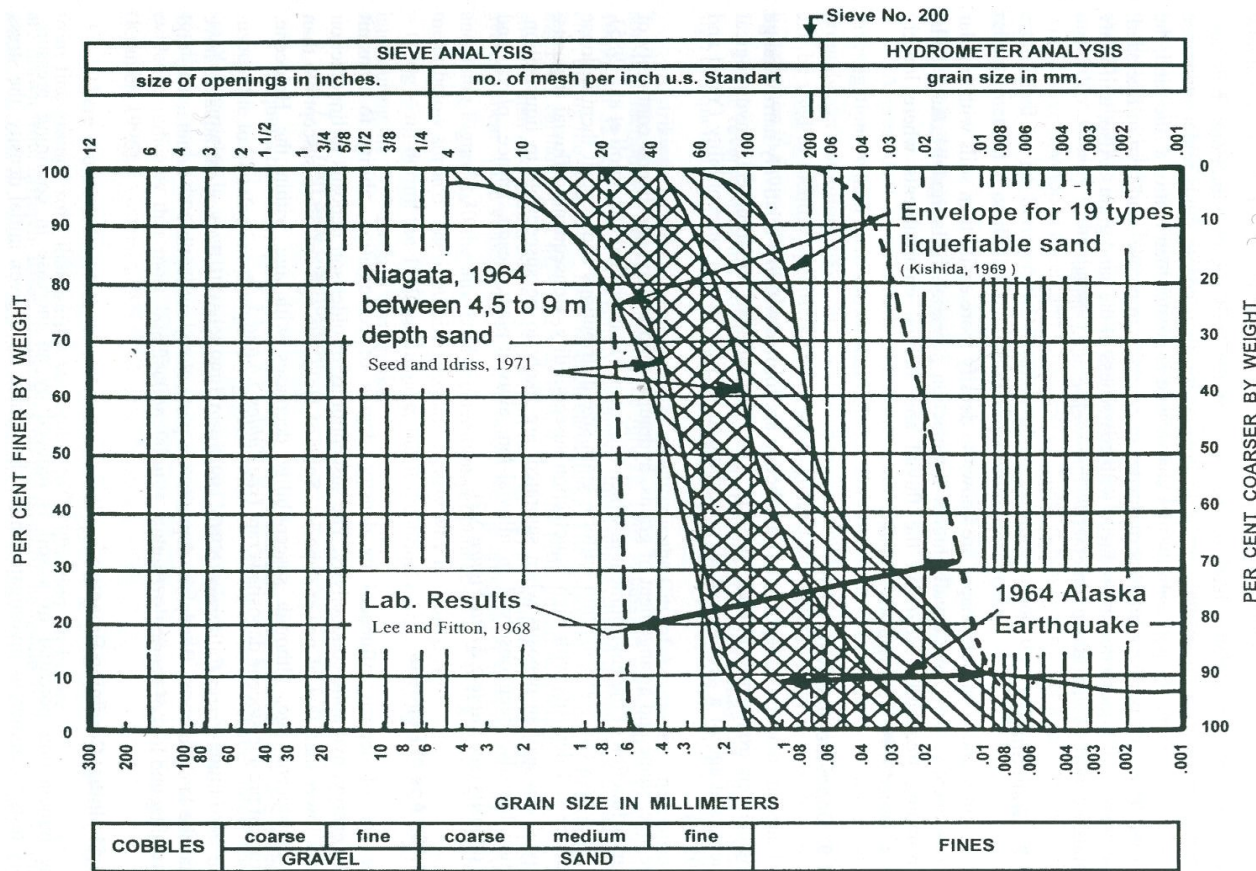
- ✓ Dışmerkeze veya büyük bir depremin fay yırtılma yerine yakın saha, YASS'nin yer yüzeyine yakın olduğu saha

### Zemin türü

- ✓ Çok gevşek veya gevşek halde, zemin daneleri arasında çimentolaşma olmayan, ön yükleme veya sismik sarsıntıya maruz kalmamış, yakın zamanda çökelmiş, üniform gradasyonlu ve daneleri yuvarlak kumdan oluşan zemin

# 3. SIVILAŞMA ANALİZLERİ

## □ Dane Boyutu Dağılımına Bağlı Sivilaşma Kriteri



## 3.1. KOHEZYONSUZ ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

### ANALİZİ

- Sıvılaşma analizinde ilk iş, deprem anında zeminin sıvılaşmaya elverişli olup olmadığını belirlemektir. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerin büyük çoğunluğu kohezyonsuz zeminlerdir. Sıvılaşma potansiyelini belirlemede en yaygın analiz türü, Standart Penetrasyon (SPT) deneyinin kullanılmasıdır.

Seed vd. (1985) standart penetrasyon deneyi ve arazi performans verilerine dayanarak tanımlanabilecek üç yaklaşık potansiyel hasar dağılımı olduğu sonucuna varmıştır:

| $(N_1)_{60}$ | Potansiyel hasar |
|--------------|------------------|
| 0-20         | Yüksek           |
| 20-30        | Orta             |
| >30          | Önemsiz hasar    |

### □ Tekrarlı Gerilme Oranı Yöntemi

**Uygun Zemin Tipi:** Zeminin sıvılaşmaya uygun olup olmadığı belirlenmelidir.

**Yeraltı su seviyesi:** Zemin yeraltı su seviyesi altında olmalıdır ve Yüzeyden 20 m'ye kadar derinlik dikkate alınmalıdır.

**Deprem nedenli CSR:** Yukarıdaki 2 şart sağlanıyorsa Devirsel Kayma Gerilmesi Oranı (CSR) her bir derinlik için hesap edilmelidir.

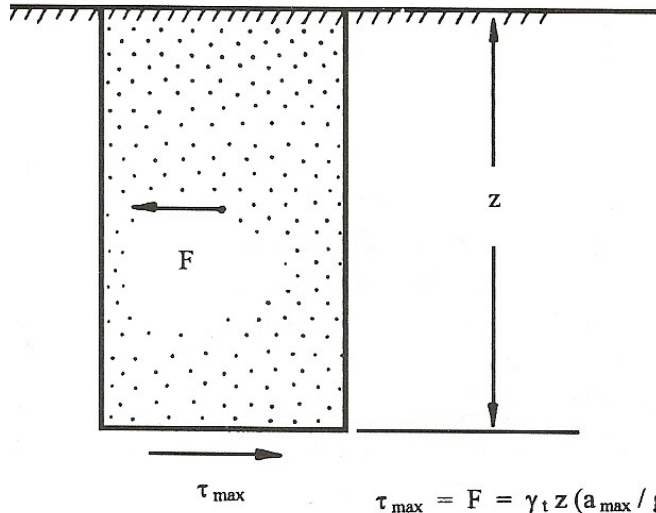
**CRR:** Devirsel Kayma Dayanımı Oranı (CRR) her bir derinlik için hesap edilmelidir.

**Güvenlik sayısı ( $G_s$ ):** Son adım güvenlik sayısı,  $G_s = CRR/CSR$  belirlenmelidir. Deprem neden olduğu CSR, CRR'den büyük olması durumunda deprem anında sıvılaşma olması muhtemeldir.

# CSR: Deprem Neden Olduğu Devirsel (Tekrarlı) Kayma Gerilmesi Oranı

CSR deprem denklemini geliştirmek için

- ❑ Zemin yüzeyinin düz olduğu
- ❑ Birim genişlik ve uzunlukta bir zemin kolonu olduğu
- ❑ Zemin kolonunun deprem ile zorlanan maksimum yatay ivmeye ( $a_{maks}$ ) tepki verirken sınırlı devirildiği



$$\tau_{max} = F = \gamma_t z (a_{maks} / g) = \sigma_{vo} (a_{maks} / g)$$

**F:** Birim genişlik ve uzunlukta zemin kolonu üzerine etkiyen yatay deprem kuvveti (kN)  
**M:** Zemin kolonunun kütlesi (kg)  
**W:** Zemin kolonunun toplam ağırlığı (kN)  
 $\gamma_t$ : Zeminin toplam birim ağırlığı (kN)  
**Z:** Zemin kolonunun derinliği (m)  
 **$a = a_{maks}$ :** Deprem nedeniyle maksimum yatay ivme ( $m/s^2$ )  
 **$\sigma_{vo}$ :** Zemin kolonu tabanındaki toplam düşey gerilme (kPa)

- ❑ Zeminin birim taban genişliği ve uzunluğuna sahip olduğu varsayıldığından, şekilde yatay kuvvetler toplandığında,  $F = \tau_{maks}$  olur.

$$\tau_{maks} = \sigma_{vo} \left( \frac{a_{maks}}{g} \right)$$

Denklemin iki tarafı efektif gerilmeye ( $\sigma_{vo}$ ) bölündüğünde

$$\frac{\tau_{maks}}{\sigma'_{vo}} = \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \left( \frac{a_{maks}}{g} \right)$$

Deprem esnasında kolon rijit davranmayıp deforme olması nedeniyle Seed ve Idriss (6.3) eşitliğinin sağ tarafına **derinlik azaltma faktörü ( $r_d$ )** eklenmiştir.

$$\frac{\tau_{maks}}{\sigma'_{vo}} = r_d \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \left( \frac{a_{maks}}{g} \right)$$

Derinliğe karşı  $r_d$ 'nin doğrusal bir şekilde değiştiği kabul edilerek,  **$r_d = 1 - 0.012z$**  formülü ile hesaplanabilir (Kayen vd. 1992).

$$CSR = \frac{\tau_{dev}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 r_d \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \left( \frac{a_{maks}}{g} \right)$$

Sadeleştirilmiş yöntemde Seed vd. (1975), kabulünü yaparak deprem kaydını, üniform gerilme devirlerinin eşdeğer serisine dönüştürmüştür. depremin üniform devirsel kayma gerilmesi genliğidir (kPa).

**CSR:** Devirsel (tekrarlı) gerilme oranı (boyutsuz)

**$a_{maks}$ :** Depremin neden olduğu zemin yüzeyindeki maksimum yatay ivme ( $m/s^2$ )

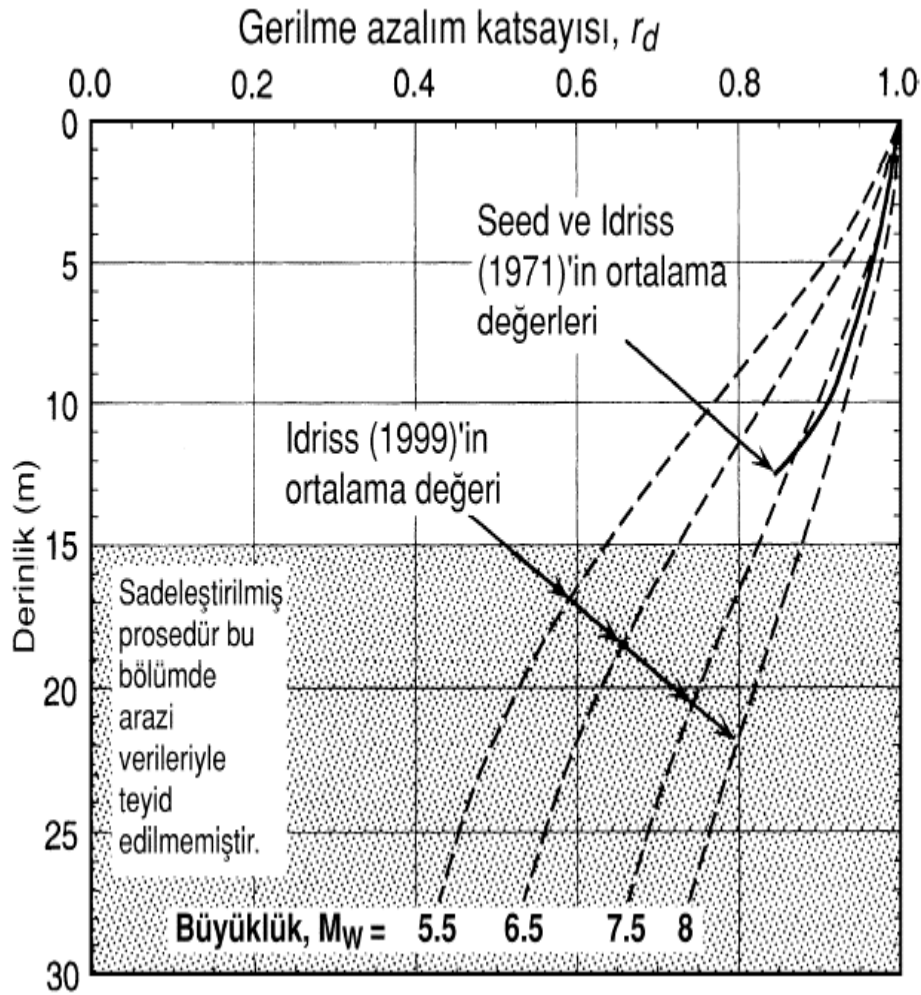
**$g$ :** Yer çekim ivmesi ( $9.81 m/s^2$ )

**$z$ :** Derinlik (m)

**$\sigma_{vo}$ :**  $z$  derinliğindeki toplam düşey gerilme (kPa)

**$\sigma'_{vo}$ :**  $z$  derinliğindeki düşey efektif gerilme (kPa)

**$r_d$ :** Derinlik azaltma faktörü



## TBDY (2018)'e göre

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| $z \leq 9.15$ m için                | $r_d = 1 - 0.00765z$    |
| $9.15 \text{ m} < z \leq 13$ m için | $r_d = 1.174 - 0.0267z$ |
| $13 \text{ m} < z \leq 30$ m için   | $r_d = 0.744 - 0.008z$  |
| $z > 30$ m                          | $r_d = 0.50$            |

## **CRR: Devirsel (Tekrarlı) Kayma Direnci**

### **Oranı**

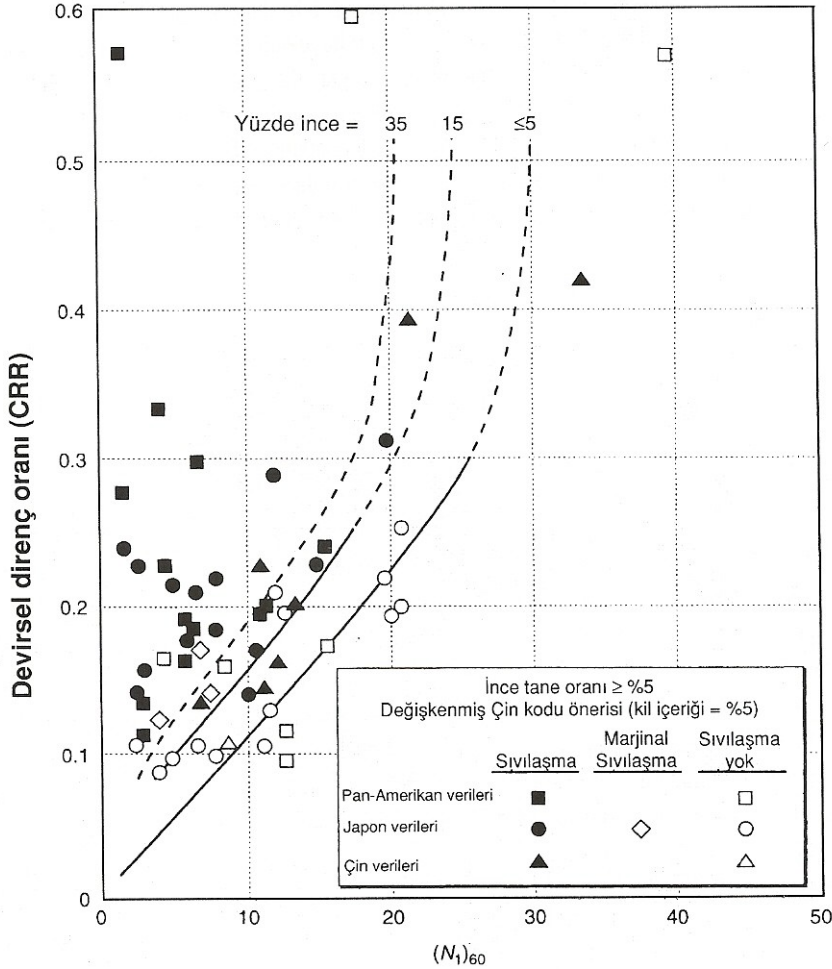
Devirsel direnç oranı (CRR), arazideki zeminin sıvılaşmaya karşı direncini temsil eder.

### **□ Standart Penetrasyon (SPT) Deneyinden CRR**

Sıvılaşma direncini belirlemek için en yaygın kullanılan yol, Standart Penetrasyon Deneyinden elde edilen verileri kullanmaktır. Bunun nedenleri:

1. Yeraltı su seviyesi: SPT deneyi için sondaj kuyusu açma zorunluluğu vardır. Sondaj kuyusu açılırken de yeraltı su seviyesinin pozisyonu belirlenebilir.
2. Zemin Türü: SPT numune alıcısı temiz kumlar hariç, diğer zemin türlerinin çoğunda numune alabilmektedir.
3. N değeri ve sıvılaşma potansiyeli arası ilişki: Genelde bir zeminin sıvılaşma direncini artıran faktörler, SPT deneyinden bulunan  $N_{1,60}$  değeridir.





Devirsel Direnç Oranı (CRR) hesaplama aşamaları:

1. SPT deneyinden  $N_{1,60}$  değeri hesaplanır.
2. Zeminin ince dane yüzdesi belirlenir.
3. Grafikte iki değer kesiştirilerek  $M=7.5$  büyüklüğündeki olası bir deprem için devirsel direnç oranı (CRR) belirlenir.
4. Aşağıdaki Tablo kullanılarak, diğer

| Deprem büyüklüğü | Büyükölçölçek faktörü ( $C_M$ ) |
|------------------|---------------------------------|
| 8                | 0,89                            |
| 7                | 1                               |
| 6                | 1.13                            |
| 6                | 1.32                            |
| 5                | 1.5                             |

$$CRR_M = C_M * CRR_{M=7.5}$$

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

## Deprem Neden Olduğu Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR)

$$CSR = \frac{\tau_{\text{tek}}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 r_d \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left( \frac{a_{\text{maks}}}{g} \right)$$

## TBDY (2018)'e Göre

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65 \sigma_{v0} (0.4 S_{DS}) r_d$$

$$CSR = 0.65 r_d \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) (0.4 S_{DS})$$

## Tekrarlı Mukavemet Oranı (CRR)

$$CRR_{M=7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(N_{1,60f} - 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

$$\alpha=0, \beta=1$$

İDO ≤ %5

$$\alpha = \exp \left[ 1.76 - \left( \frac{190}{\text{İDO}^2} \right) \right], \beta = 0.99 + \frac{\text{İDO}^{1.5}}{1000}$$

%5 < İDO ≤ %35

$$\alpha=5, \beta=1.2$$

İDO ≥ %35

$$\tau_R = CRR_{M7.5} C_M \sigma'_{v0}$$

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

$$G_s = \frac{CRR}{CSR}$$

z ≤ 9.15 m için

$$r_d = 1 - 0.00765z$$

9.15 m < z ≤ 13 m için

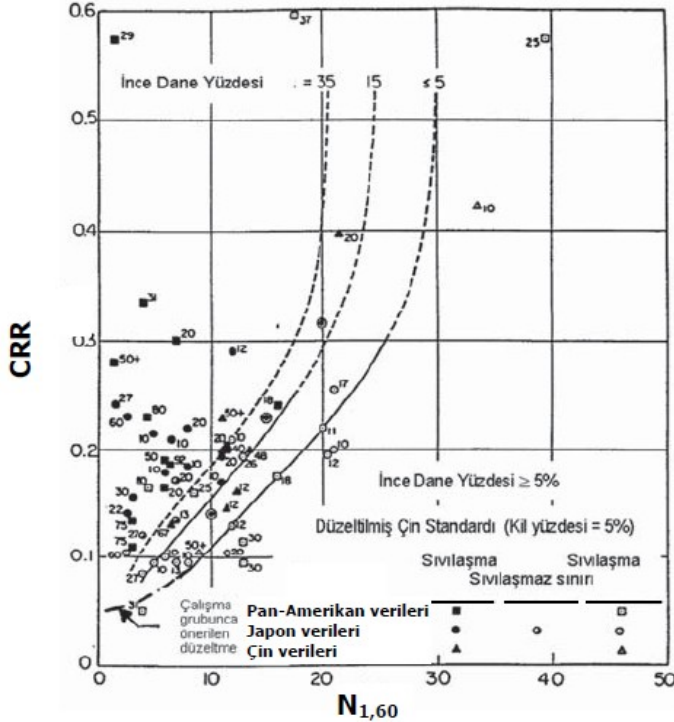
$$r_d = 1.174 - 0.0267z$$

13 m < z ≤ 30 m için

$$r_d = 0.744 - 0.008z$$

z > 30 m

$$r_d = 0.50$$



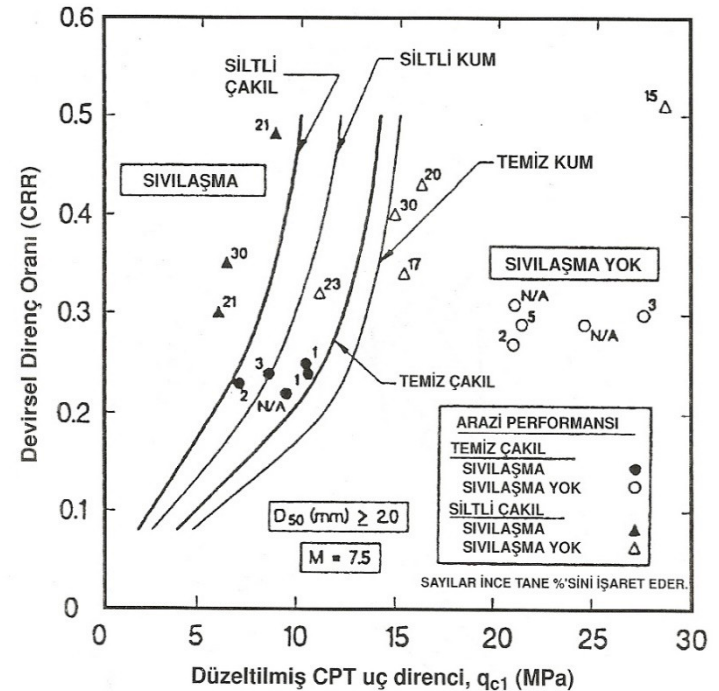
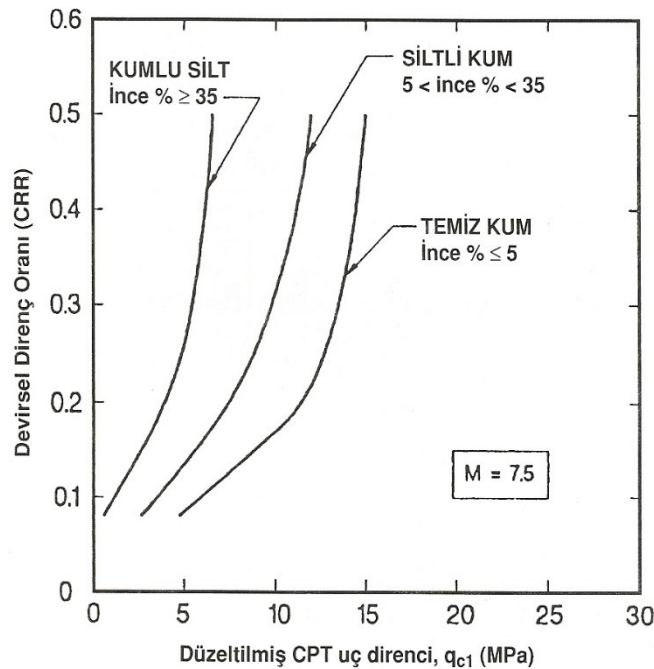
Şekil 3.30. Temiz kum - siltler ve  $M_w = 7.5$  için CRR grafiği (Seed ve diğ., 1985).

## □ Koni Penetrasyon (CPT) Deneyinden CRR

Arazideki zeminin devirsel direnç oranını belirlemede CPT'de kullanılabilir. Bunun için;

□ Düzeltilmiş CPT uç direnci ( $q_{c1}$ ) bulunur.

□ Arazideki zeminin devirsel direnç oranı (CRR) belirlemede, aşağıdaki Şekil'den yararlanılır.



$$CRR_M = CM * CRR_{M=7.5}$$

## Sıvılaşmaya Karşı Güvelik Sayısı ( $G_s$ )

- Sıvılaşma analizinde son adım, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının hesaplanmasıdır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı:

$$G_s =$$

- Güvenlik sayısı ne kadar yüksek ise zeminde sıvılaşmaya karşı direnç o kadar dirençlidir.
- Güvenlik sayısı  $G_s < 1$  ise zemin sıvılaşma potansiyeline sahip demektir.
- **TBDY (2018)**'e göre, Güvenlik sayısı  $G_s \geq 1.1$  ise zemin sıvılaşma potansiyeline sahip değildir.

## Rapor Hazırlama

### ○ Sıvılaşma analizi sonuç raporunun içermesi gereken hususlar:

|   |   |
|---|---|
| ○ Deney ekipmanlarının tanımı ve arazi ölçümlerinin işlemsel detayları            | ○ Devirsel direnç oranının (CRR) hesaplanmasında kullanılan yöntemin açıklaması                                 |
| ○ SPT deneyi yapılmışsa N değerini gösteren sondaj logları                        | ○ Tasarım depremi için Güvenlik sayısının ( $G_s$ ) belirlenmelidir   |
| ○ CPT deneyi yapılmışsa ham $q_c$ değerini gösteren CPT delgi logları             | ○ Çeşitli derinliklerde potansiyel sıvılaşabilir zemin birimleri için Güvenlik sayısı ( $G_s$ ) belirlenmelidir |
| ○ Ham SPT ve CPT değerlerinde kullanılan düzeltme yöntemleri                      | ○ Sıvılaşma potansiyeli ile ilgili sonuçlar   |
| ○ Düzeltilmiş SPT ve CPT değerleri ( $N_{1,60}$ ve $q_{c1}$ ) tablo ve grafikleri | ○ İyileştirme yöntemleri  |
| ○ Devirsel gerilme oranının (CSR) hesaplanmasında kullanılan yöntemin açıklaması  | ○ İyileştirme için kullanılacak SPT ve CPT tabanlı deney kriterleri   |

## 3.2. KOHEZYONLU ZEMİNLERDE SIVILAŞMA ANALİZİ

Çin kriterlerine göre (Wang, 1979):

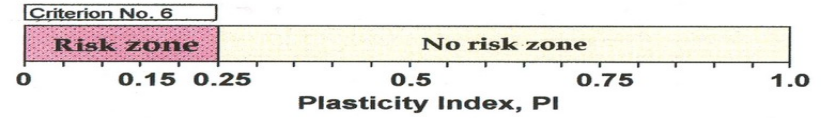
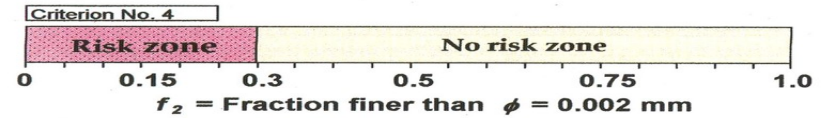
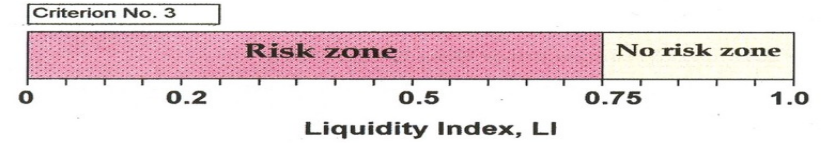
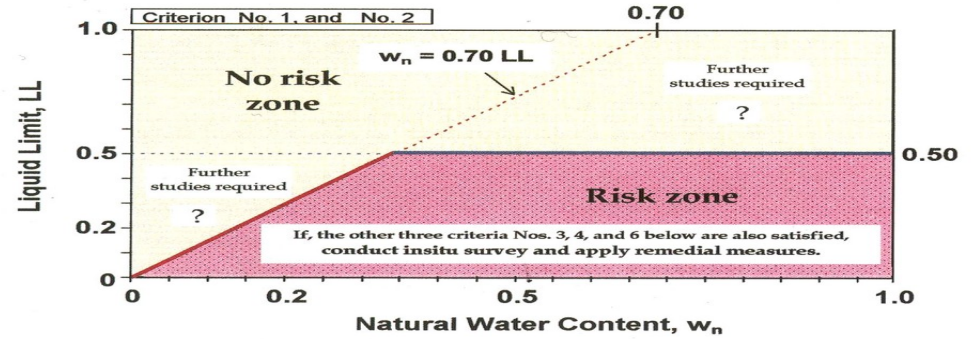
- ✓  $0.005 \text{ mm}'den \text{ daha ince dane oranı} \leq \%15$
- ✓  $w_L \leq \%35$
- ✓  $w_n \geq 0.9w_L$
- ✓  $I_L \leq 0.75$
- **Seed vd. (1983)** laboratuvar deneyi ve arazi performansına dayalı olarak, kohezyonlu zeminlerin büyük çoğunluğunun depremler esnasında sivilaşmayacağını belirtmiştir.

- Başlangıçta **Seed and Idriss (1982)** tarafından açıklanan ve sonradan **Youd and Gilstrap (1999)** tarafından pekiştirilen kriterler kullanılarak, kohezyonlu bir zeminin sivilaşması için, aşağıdaki üç kriterin tamamının karşılanması gerekmektedir:

✓  $0,005 \text{ mm}'de \text{ geçen yüzde } \%P < \%15$

✓  $w_L < \%35$

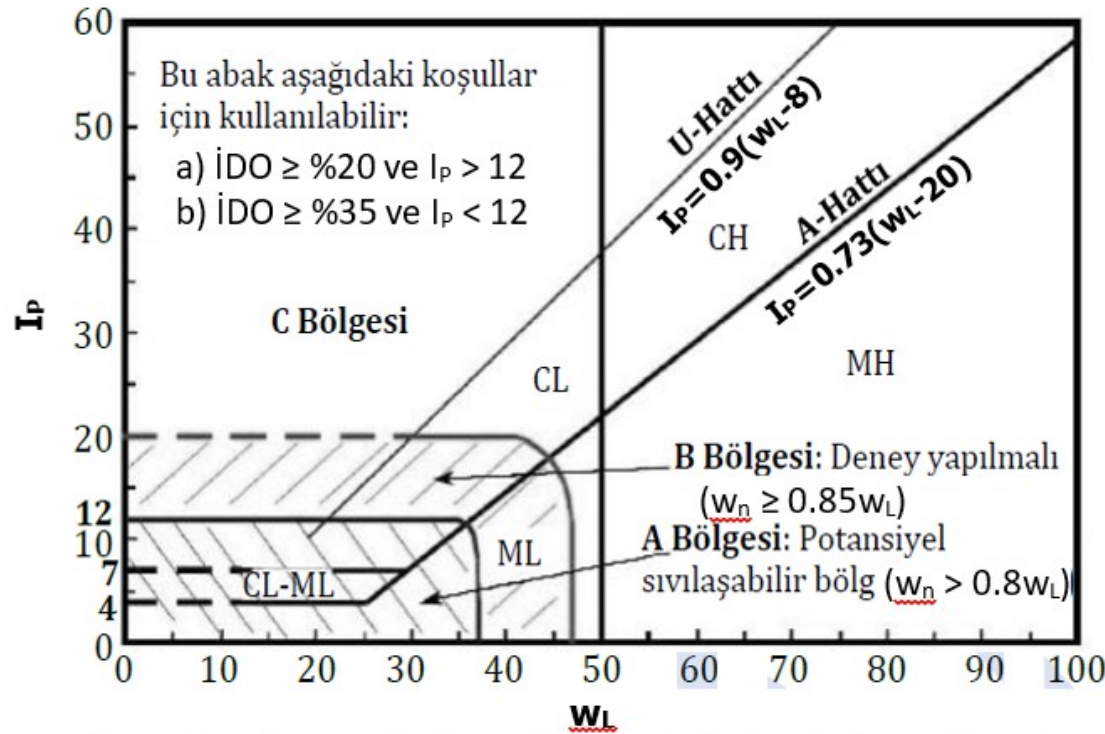
✓  $w_n > 0.9w_L$



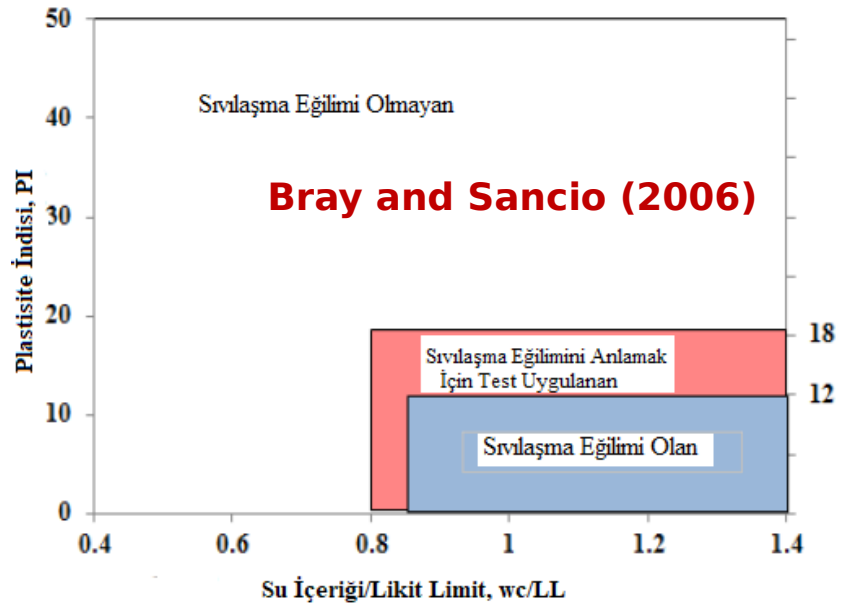
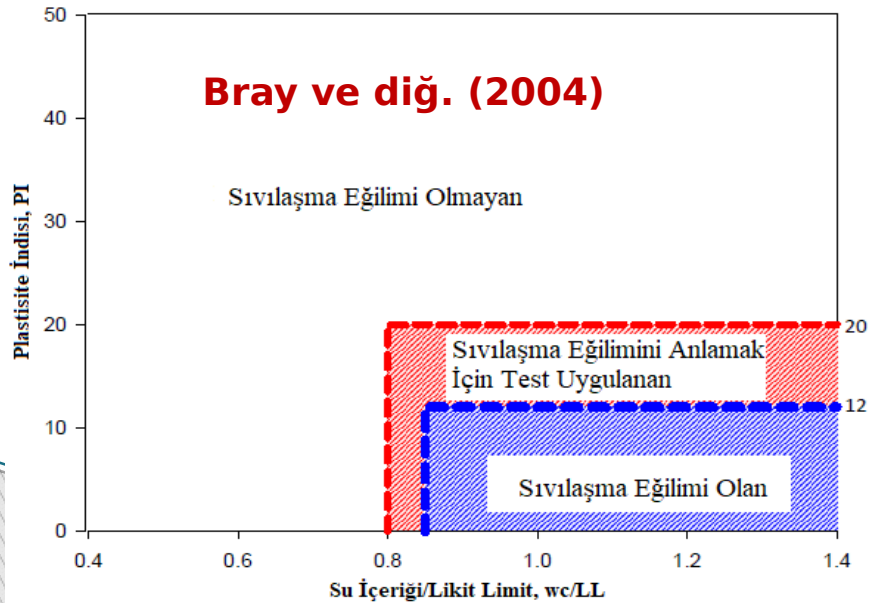
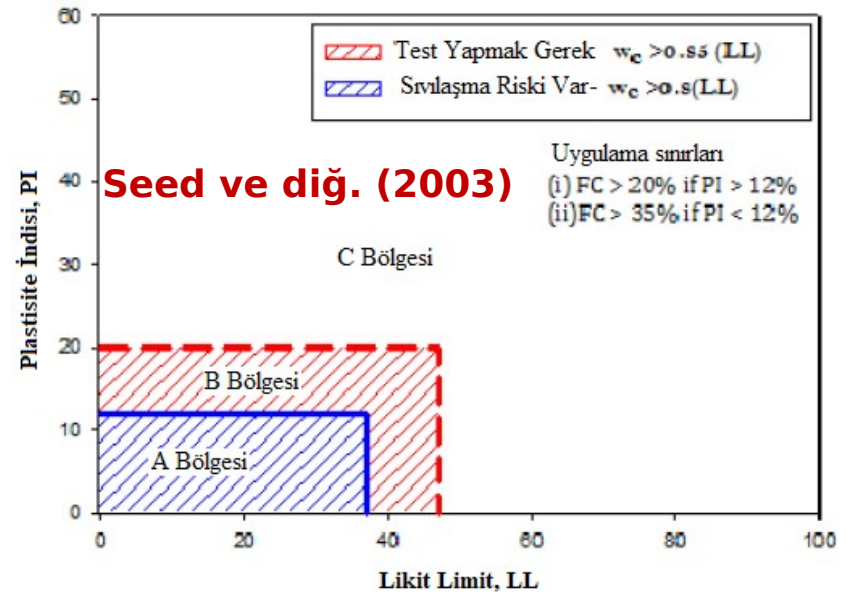
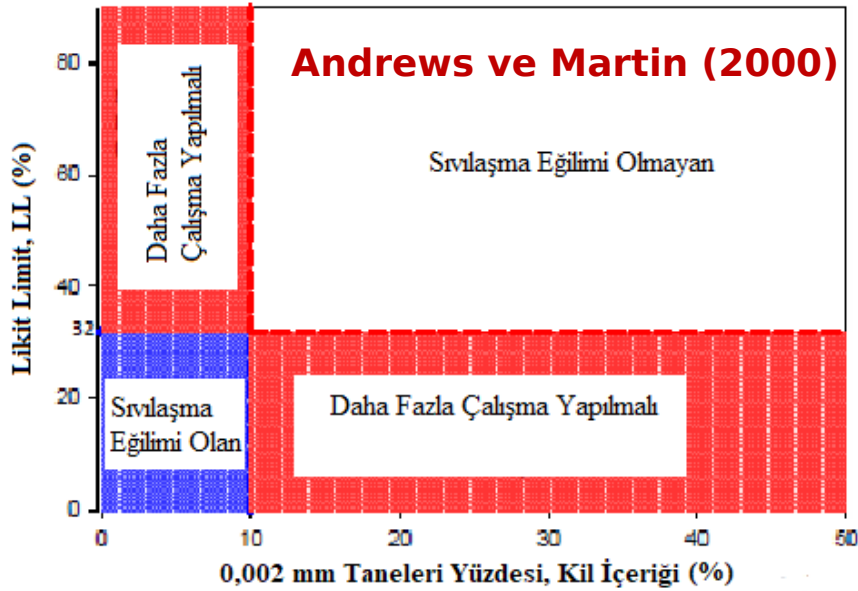
- Su muhtevası-Likit limit ( $w_n < \%50$  ve  $w_n = 0.7w_L$ )
- Sıvılık indeksi ( $I_L < 0.75$ )
- Kil oranı ( $C < \%30$ )
- Plastisite indisi ( $I_p < \%25$ )

Bu koşullar sağlanıyorsa, sivilaşma potansiyeli vardır.

Yeraltı su seviyesinin altında yer alan yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan ince daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için, zeminin doğal su muhtevası ve kıvam limitlerine bağlı olarak Seed ve diğ. (2003) tarafından önerilen Şekil 10.75'teki kriterler kullanılabilir. Bu abakta 3 farklı bölge tanımlanmıştır; A Bölgesindeki zeminler sıvılaşabilir zeminler, B Bölgesindeki zeminler sıvılaşma potansiyeli olmayan ancak yumuşama potansiyeline sahip zeminler ve C Bölgesindeki zeminler ise geçiş bölgesinde olup sıvılaşma potansiyeline ancak tekrarlı üç eksenli deneylerinin yapılması sonucunda karar verilebilecektir.



Şekil 10.75. İnce daneli zeminlerde sıvılaşma değerlendirilmesi (Seed ve diğ., 2003)



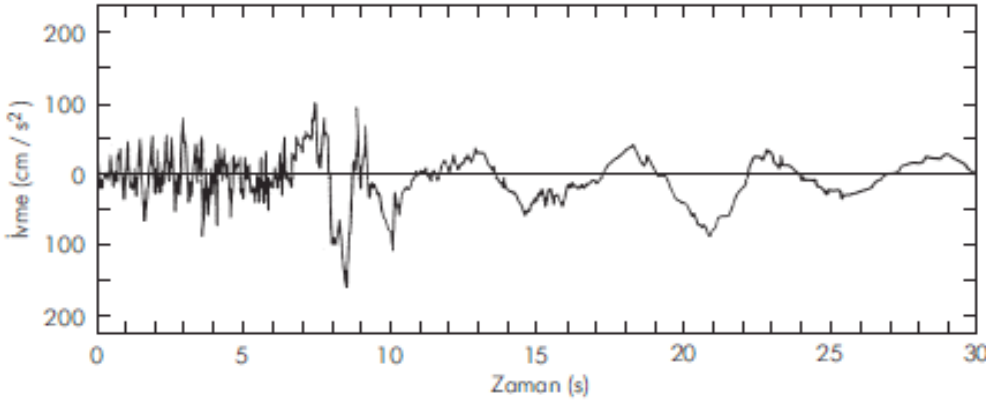


## 4. SIVILAŞMANIN ETKİLERİ

- **Sivilaşma olayları**, binaları, köprüleri, gömülü boru hatlarını ve diğer tesisleri birçok değişik şekilde etkileyebilmektedir. Sivilaşma ayrıca yer hareketinin karakterini de etkileyebilir.
- **Akma sivilaşması**, masif akma kaymaları oluşturarak ağır yapıların eğilmesine ve batmasına; gömülü hafif yapıların yüzmesine ve istinad yapılarının yenilmesine neden olabilir.
- **Devirsel hareketlilik** yamaçların kaymasına, binaların oturmasına, yan al yayılmaya ve istinad duvarı yıkılmasına neden olabilir. Düz zeminlerde yüzeyde önemli dalgalanma, zemin yüzeyi oturması, kum kaynamaları ve deprem sonrası duraylılık yenilmeleri gelişebilir.
  - ✓ **Yer Hareketinin Değiştirilmesi**
  - ✓ **Kum Kaynamalarının Gelişmesi**
  - ✓ **Oturma**
  - ✓ **Duraysızlık (Taşıma gücü yetersizliği)**

## A. Yer Hareketinin Değiştirilmesi

- Pozitif aşırı boşluk suyu basıncının gelişimi bir deprem sırasında zemin rijitliğinde azalmaya neden olur. Deprem başlangıcında nispeten rijit olan sıkılaşabilir bir zemin, hareketin sonuna kadar çok daha yumuşak bir hale gelebilir. Bunun sonucunda, yüzey hareketinin genliği ve frekans içeriği depremin başından sonuna kadar önemli şekilde değişiklik gösterir.
- En uç durumda ise, çok yüksek boşluk suyu basıncı oluşumları, çok ince bir zemin katmanının bile rijitliğinin (ve dayanımının) o kadar azalmasına neden olur ki, anakaya hareketinin yüksek frekans bileşenleri zemin yüzeyine iletilmez. Böyle bir etkinin bir örneği

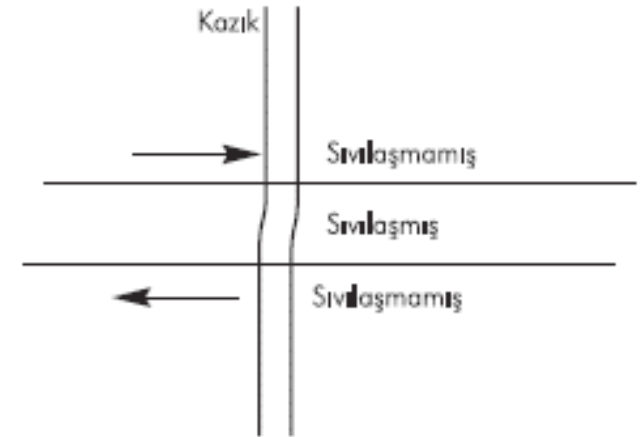
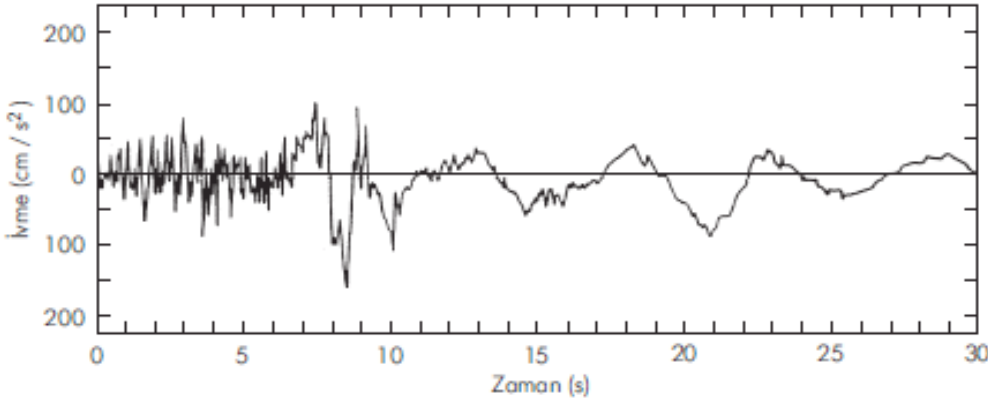


1964 Niigata depreminde sıvılaşabilir zemin üzerine oturan bir binanın yakınındaki bir sahaya ait akselerogram



1964 Niigata depreminde Kawagishi-cho sitelerinde sıvılaşmadan ileri gelen taşıma kapasitesi yenilmeleri

- ❑ Zemin içinde sıvılaşmadan kaynaklanan rijitlik azalımının hangi noktada başladığını tespit etmek zor değildir. Hem ivme genliği hem de frekans içeriği hareketin başlangıcından yaklaşık **7 saniye sonra** önemli derecede değişmiştir.
- ❑ Boşluk suyu basınçları büyük olduğu zaman, yüzey ivmelerinin genliğinin değiştiği gerçeği, düşük frekanslardaki düşük ivme genliklerinin büyük yerdeğiştirmeler oluşturmalarından dolayı hasar potansiyelinin azalacağı anlamına gelmemelidir.
- ❑ Bu yerdeğiştirmeler özellikle gömülü yapılar, yeraltı boru hatları ve kazık temellerle desteklenen ve kazıkların sıvılaşabilir zona kadar indiği yapılar için çok önemli olabilir (Şekil).



- Düz zemin yüzeyi altında belirli bir derinlikte gelişen sıvılaşma, sıvılaşan zemini yüzey zeminlerinden ayırarak büyük ve geçici zemin dalgalanmalarına neden olabilir. Yüzey zeminleri deprem sırasında açılıp kapanabilen fisürler vasıtasıyla çoğu zaman bloklara ayrılır (Şekil).

Depremden önce

☐

(a)

Depremden sonra

Kum kaynamaları

Sıvılaşmış

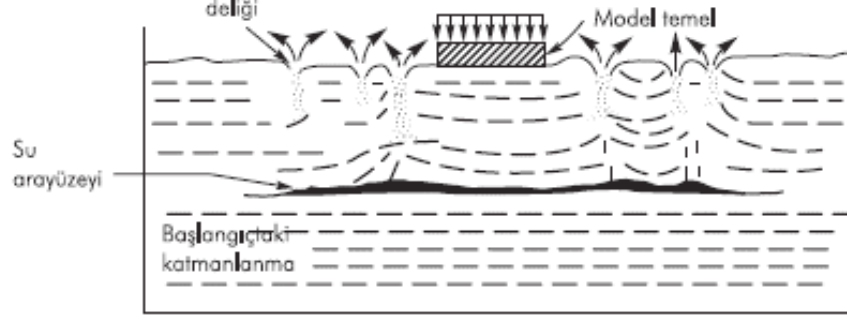
(b)

- Zemin dalgalanması sırasında genliği birkaç ft olan yer dalgaları gözlenmişse de, kalıcı deformasyonlar genellikle küçük olmaktadır. Youd (1993) 1989 Loma Prieta depremi sırasında San Francisco'nun Marina semtindeki kaldırımları kıran ve bükten dağınık yer hareketlerinin çoğunu zemin dalgalanmalarına atfetmiştir. Ayrıntılı doğrusal olmayan zemin tepki analizleri kaba tahminler verse de, belirli bir sığadaki zemin dalgalanmasının genliğinin kestirilmesi çok güçtür.

## B. Kum Kaynamalarının Gelişmesi

- ❑ Sıvılaşma olayları, çoğu zaman kum kaynamaları ile birlikte gelişir. Bir deprem sarsıntısı sırasında ve sonrasında, depremden kaynaklanan aşırı boşluk suyu basıncı çoğu zaman yukarı doğru akan gözenek suyu tarafından söndürülür. Bu akış şekli, zemin partiküllerinde yukarı doğru etkiyen kuvvetler oluşturur (bu kuvvetler çökelin üst kısmını gevşetmek suretiyle o zemini gelecekte oluşacak depremlerde sıvılaşmaya duyarlı hale getirebilir). Akışı sağlayan hidrolik eğimin kritik değere ulaşması halinde, düşey efektif gerilme sıfıra düşer ve zemin **akıcı** bir kıvama dönüşür. Böyle durumlarda, suyun hızı zemin partiküllerini yüzeye taşıyabilecek derecede olabilir.
- ❑ Arazide zemin şartlarının üniform olduğu durumlar çok nadir olup, kaçma eğilimindeki gözenek suyu, lokalize olmuş kırık veya kanallarda yüksek hızda akma eğilimindedir. Kum partikülleri bu kanallardan taşınarak zemin yüzeyine atılır ve sonuçta kum kaynaması gelişir.
- ❑ Kum kaynamalarının gelişmesi karmaşık ve biraz da rastgele bir süreçtir. Aşırı boşluk suyu basıncının büyüklüğüne ve yüksek aşırı boşluk suyu basınç zonunun üzerine gelen tabakanın kalınlığına, geçirgenliğine ve örselenmemişlik derecesine bağlıdır.

- Sıvılaşmanın kanıtı olarak kum kaynamalarına güvenmek aldatıcı olabilir. Büyük derinliklerde veya ince katmanlarda gelişen sıvılaşma, kum kaynamaları oluşturmayabilir. Fakat düşük aşırı boşluk suyu basıncı, sıg derinlikteki kalın katmanlarda sıvılaşma oluşturabilir. Ayrıca, yüksek aşırı boşluk suyu basınçları gelişse bile, siltli kumun düşük geçirgenliği kum kaynaması oluşturan gözenek suyunun çabucak akmasını engelleyebilir.



- Zemin yüzeyi oturmaları, depremden kaynaklanan boşluk suyu basıncının sönmülenmesi sırasında gelişen hacimsel birim deformasyonun sonucunda oluşur.



## C. Oturma

- ❑ Kumların deprem sarsıntısı sırasında maruz kaldığı yeraltındaki sıkılaşıma, yüzeydeki oturma şeklinde kendini göstermektedir.
- ❑ Depremden kaynaklanan oturma çoğu zaman sığ temel üzerine oturmuş yapıları etkilemekte; kazık temelli yapıların yeraltı hatlarına zarar vermekte ve genellikle sığ derinliğe gömülmüş olan yeraltı nakil hatlarında hasara yol açmaktadır.
- ❑ Doygun kumların deprem sonrası oturmasını etkileyen faktörler; kumun yoğunluğu, kumda oluşan maksimum kayma birim deformasyonu ve depremin oluşturduğu aşırı boşluk suyu basıncının miktarıdır. Laboratuvar deneyleri, ilksel sıvılaşmadan sonraki hacimsel birim deformasyonun, relatif sıkılık ve maksimum kayma birim deformasyonu ile değiştiğini göstermektedir.

## D. Duraysızlık

- Deprem tehlikeleri arasında en yıkıcı olanlardan biri de sivilaşmadan kaynaklanan duraysızlıklardır. Bunların etkileri dünyanın değişik yerlerindeki sayısız depremde **akma kaymaları, yanal yayılmalar, istinad duvarı yıkılmaları** ve **temel yenilmeleri** şeklinde gözlenmiştir.
- Duraysızlık yenilmeleri farklı sivilaşma olaylarından ileri gelebilir ve belirli bir yenilme durumunda tam anlamıyla bunlardan hangisinin sorumlu olduğu her zaman belirgin değildir. Ancak, bunların hepsi de sivilaşan zeminin kayma dayanımından etkilenmektedir.

## Sivilaşan Zeminin Kayma Dayanımı

- Bir zeminin dengesini sağlamak için gerekli kayma gerilmeleri, o zeminin kayma dayanımını aştığında duraysızlık meydana gelir. Duraylı bir konuma erişmek için gerekli deformasyon miktarı, denge için gerekli kayma gerilmeleri ile sivilaşan zeminin kayma dayanımı arasındaki farktan önemli ölçüde etkilenir.
- Sivilaşan zeminin kayma dayanımının denge için gerekli kayma gerilmesinden biraz küçük olması halinde, kalıcı deformasyonlar da muhtemelen küçük olacaktır. Kayma dayanımı ile kayma gerilmesi arasındaki farkın büyük olması halinde ise, büyük deformasyonlar gelişebilir. Sivilaşmadan kaynaklanan duraysızlıkların doğru bir şekilde değerlendirilmesi için, sivilaşan zeminin kayma dayanımının sağlıklı bir şekilde ortaya konması gerekir.

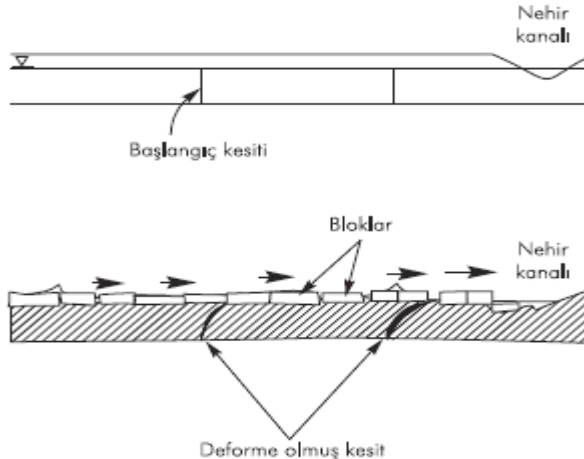


- Sıvılaştan zeminlerin kayma dayanımını hesaplamada üç farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Bunlardan biri, dikkatli şekilde **örselenmemiş numune alımına ve laboratuvar deneylerine** dayalıdır. Diğeri, **arazi deney parametrelerine ve bilinen sıvılaşma olaylarının yorumlanmasına** dayalıdır. Üçüncüsü de, **sıvılaştan zeminin kayma dayanımını normalize edilmiş dayanım** olarak almaktadır.

## 2- Akma Yenilmeleri

- Sıvılaşmadan kaynaklanan akma yenilmeleri, statik dengeyi sağlamak için gerekli kayma gerilmelerinin, sıvılaştan zeminin kayma dayanımından büyük olduğu durumlarda gelişmektedir. Bu durum birkaç değişik şekilde ortaya çıkabilir. Sıvılaşmadan kaynaklanan akma yenilmelerinin oluşturduğu deformasyonların hesaplanması son derece güçtür.

## 3- Deformasyon Yenilmeleri



- Sıvılaşmadan kaynaklanan yenilmelerin tamamında büyük yerdeğiştirmeler söz konusu değildir. **Devirsel hareketlilik**, depremin sonuna kadar büyüyerek geniş alanlara zarar verebilen küçük, artmalı ve kalıcı deformasyonlar oluşturabilir. **Yanal yayılma**, deformasyon yenilmesine bir örnektir. Şekil'de görüldüğü gibi, yanıl yayılma, deprem sırasında yüzey katmanlarının yamaç aşağı veya serbest bir yüzeye doğru giderek ilerleyen bloklara bölünmesine sebep olur.

## 5. SIVILAŞMAYA KARŞI ALINABİLECEK ÖNLEMLER

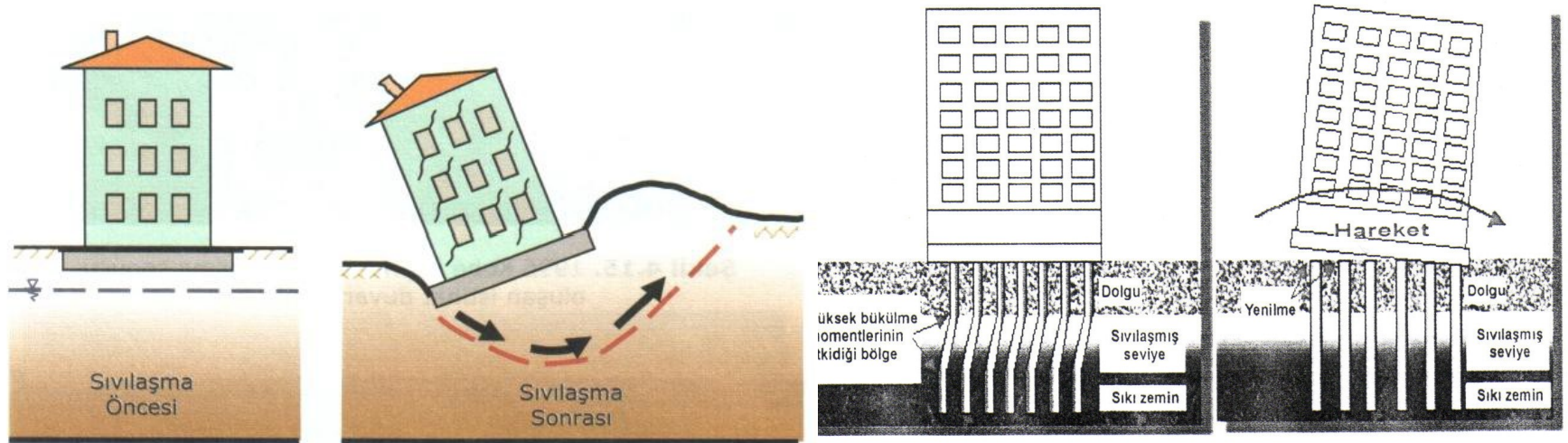
- ❑ Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde, yapı inşasından kaçınılması
- ❑ Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı tasarlanması
- ❑ Zemin iyileştirilmesi yoluyla sıvılaşma olasılığının ortadan kaldırılması

## A- Sıvılaşmaya Duyarlı, Zeminlerde Yapı İnşasından Kaçınılması

- Öncelikle sahanın jeolojik ve hidrojeolojik (yeraltı suyuna ilişkin) özellikleri, belirlenip daha sonra belirli teknikler ve ölçütler kullanılarak, zemin mekaniği biliminin esaslarından yararlanılarak zeminin sıvılaşmaya yatkın olup olmadığı tayin edilmelidir.
- Değerlendirme sonuçlarının zeminin sıvılaşma potansiyeline sahip olduğunu göstermesi halinde, planlanan yapının inşasının bu zeminlerde yapılmasından vazgeçilerek başka inşaat alanı seçenekleri araştırılır.

## B- Sıvılaşmaya Karşı, Dayanıklı Yapı Tasarlanması

- ❑ Sıvılaşmaya karşı dayanıklı yapı inşasında, yapının temelini oluşturan yapı elamanları sıvılaşmanın etkilerini karşılayabilecek şekilde tasarlanır.
- ❑ Temel tipi seçimine; üst yapıdan gelen **yükün nitelik ve niceliği**, **yapının önemi**, **zeminin özellikleri** göz önünde bulundurularak karar verilmelidir.
- ❑ Yüzeysel temellerde sıvılaşma tehlikesi için radye temel kullanılması en etkin çözümdür. Radye temel, yapı yükünü tüm alana eşit olarak verecektir. Sıvılaşmış zon üzerinde oturmalar oluşmayacaktır.
- ❑ Derin temel yapılması durumunda ise, kazık temeller sıvılaşma için etkin bir yöntem olarak uygulanabilir. Kazık temeller yanal yönde kuvvetlere de dayanıklı olarak yapılmalıdır.



## **C- Zemin İyileştirilmesi Yoluyla, Sıvılaşma Olasılığının Ortadan Kaldırılması**

- Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirilmesi tekniklerinin esas hedefi, deprem sırasında oluşan aşırı ilave boşluk suyu basınçlarının gelişmesini önlemektir.
- Sıvılaşmanın vereceği hasarlara karşı mühendislik projelerinin güvenliğini sağlamak amacıyla, sıvılaşma ihtimali olan zemin tabakalarında aşağıda ifade edilen zemin iyileştirme yöntemleri ile önlemler alınabilir:

- ❑ Sıvılaşacak zeminin sıvılaşmayacak bir zeminle yer değiştirilmesi
- ❑ Drenaj teknikleri
- ❑ Dinamik kompaksiyon
- ❑ Vibra flotasyon
- ❑ Taş kolonlar
- ❑ Sıkıştırma enjeksiyonu
- ❑ Jet kolon enjeksiyonu
- ❑ Derin karıştırma enjeksiyonu

# 6. TBDY (2018) SIVILAŞMA

## 16.6. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ZEMİNİN SIVILAŞMA RİSKİNİN DEĞERLENDİRMESİ

**16.6.1-** Deprem Tasarım Sınıfı DTS=1, DTS=1a, DTS=2 ve DTS=2a olan binalar için ZD, ZE veya ZF grubuna giren, sürekli bir tabaka veya kalın mercekler halinde bulunan ve **16.6.6**'da tanımlanan durumlar dışındaki kumlu zeminlerde sivilaşma potansiyeli'nin bulunup bulunmadığının, arazi ve laboratuvar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve analiz sonuçlarının ayrıntılı olarak rapor edilmesi zorunludur.

| DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı ( $S_{DS}$ ) | Bina Kullanım Sınıfı |            |
|--|----------------------|------------|
|  | BKS = 1              | BKS = 2, 3 |
| $S_{DS} < 0.33$  | DTS = 4a             | DTS = 4    |
| $0.33 \leq S_{DS} < 0.50$  | DTS = 3a             | DTS = 3    |
| $0.50 \leq S_{DS} < 0.75$  | DTS = 2a             | DTS = 2    |
| $0.75 \leq S_{DS}$   | DTS = 1a             | DTS = 1    |

| Bina Kullanım Sınıfı | Binanın Kullanım Amacı  | Bina Önem Katsayısı (I) |
|----------------------|---|-------------------------|
| BKS = 1              | <p><b>Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</b></p> <p>a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları)</p> <p>b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kıışlalar, cezaevleri, vb.</p> <p>c) Müzeler</p> <p>d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar</p> | 1.5                     |
| BKS = 2              | <p><b>İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</b></p> <p>Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.</p>   | 1.2                     |
| BKS = 3              | <p><b>Diğer binalar</b></p> <p>BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)</p>  | 1.0                     |

| Yerel Zemin Sınıfı | Zemin Cinsi   | Üst 30 metrede ortalama |                                 |                    |
|--------------------|---|-------------------------|---------------------------------|--------------------|
|                    |   | $(V_s)_{30}$ [m/s]      | $(N_{60})_{30}$ [darbe / 30 cm] | $(c_u)_{30}$ [kPa] |
| ZA                 | Sağlam, sert kayalar  | > 1500                  | -                               | -                  |
| ZB                 | Az ayrılmış, orta sağlam kayalar  | 760 – 1500              | -                               | -                  |
| ZC                 | Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar  | 360 – 760               | > 50                            | > 250              |
| ZD                 | Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları  | 180 – 360               | 15 – 50                         | 70 – 250           |
| ZE                 | Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ( $c_u < 25$ kPa) içeren profiller  | < 180                   | < 15                            | < 70               |
| ZF                 | <p>Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler:</p> <p>1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.),</p> <p>2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer,</p> <p>3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (<math>PI &gt; 50</math>) killer,</p> <p>4) Çok kalın (&gt; 35 m) yumuşak veya orta katı killer.</p> |                         |                                 |                    |

$$S_{DS} = f(\text{Yer, DD-2, Yerel zemin sınıfı})$$

$$DTS = f(\text{BKS, DD-2, } S_{DS})$$

$$BYS = f(DTS, H_N)$$

| Bina Yükseklik Sınıfı | Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m] |                        |                     |
|-----------------------|--|------------------------|---------------------|
|                       | DTS = 1, 1a, 2, 2a   | DTS = 3, 3a            | DTS = 4, 4a         |
| BYS = 1               | $H_N > 70$   | $H_N > 91$             | $H_N > 105$         |
| BYS = 2               | $56 < H_N \leq 70$   | $70 < H_N \leq 91$     | $91 < H_N \leq 105$ |
| BYS = 3               | $42 < H_N \leq 56$   | $56 < H_N \leq 70$     | $56 < H_N \leq 91$  |
| BYS = 4               | $28 < H_N \leq 42$   | $42 < H_N \leq 56$     |                     |
| BYS = 5               | $17.5 < H_N \leq 28$   | $28 < H_N \leq 42$     |                     |
| BYS = 6               | $10.5 < H_N \leq 17.5$   | $17.5 < H_N \leq 28$   |                     |
| BYS = 7               | $7 < H_N \leq 10.5$  | $10.5 < H_N \leq 17.5$ |                     |
| BYS = 8               | $H_N \leq 7$   | $H_N \leq 10.5$        |                     |



**16.6.2-** Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ( $I_p < \% 12$ ) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanacaktır.

**16.6.3-** Zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine yönelik olarak yapılacak zemin araştırma çalışmaları en az, standart penetrasyon deneyi, (SPT) ve/veya koni penetrasyon deneyinin (CPT)'nin yapımına ek olarak, ilgili zemin tabakalarındaki dane çapı dağılımı, su muhtevası ve Atterberg limit değerlerinin belirlenmesini içerecektir.

**16.6.4-** Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak tanımlanacaktır.

**16.6.5-** Temel altı zeminlerinin potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerden oluştuğu ve bu zemin tabakalarında düzeltilmiş SPT vuruş sayısının,  $N_{1,60}$  30 darbe değerinden küçük olduğu ( $N_{1,60} < 30$ ) durumlarda zemin sıvılaşması tetiklenme değerlendirilmesi yapılacaktır.

**16.6.6-** Deprem Tasarım Sınıfı'nın  $DTS=4$  olduğu ve aynı zamanda aşağıdakilerden en az birinin sağlandığı durumlarda sıvılaşma tetiklenme analizi yapılmayabilir:

**a)** Kil içeriğinin %20'den fazla ( $C > \%20$ ) ve plastisite indisinin %10'dan yüksek olduğu ( $I_p > 10$ ) kumlu zeminlerde;

**b)** ince dane yüzdesinin %35'den fazla ( $M+C > \%35$ ) ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısının  $N_{1,60}$  20 vuruş 'den yüksek olduğu ( $N_{1,60} > 20$ ) kumlu zeminlerde;

**16.6.7** - Zemin sıvılaşması değerlendirmesinde sıvılaşma tetiklenmesi riski yanında, sıvılaşma sonrası zemin mukavemeti ve rijitlik kaybı ile temel zemininde oluşabilecek yerdeğiştirmelerin dikkate alınması gereklidir.

**16.6.8** - Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin SPT deney sonuçları kullanılarak yapılmasına dayanan yöntem **EK 16B**'de verilmiştir. Değerlendirmenin CPT veya kayma dalgası hızına göre yapılması durumunda uygulamada genel kabul gören yöntemler kullanılabilir.

**16.6.9** - Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu **Denk.(16.3)**'te tanımlanmıştır.

$$\frac{\tau_R}{\tau_{\text{deprem}}} \geq 1.10 \quad (16.3)$$

Burada  $\tau_R$  ve  $\tau_{\text{deprem}}$ , sırası ile, sıvılaşma direncini ve zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir. **Denk.(16.3)**'te verilen koşulun sağlanamaması ( $G_s < 1.1$ ) durumunda, sıvılaşması beklenen tabakaların dayanım ve rijitlik özelliklerindeki azalma, olası taşıma gücü kayıpları, duraylılık bozuklukları ile oturma ve yanal yayılma türündeki zemin hareketleri değerlendirilecektir.

**16.6.10** - Belirlenen sıvılaşma sonrası yerdeğiştirmelerin üstyapı/altyapı davranışına etkileri değerlendirilerek, ihtiyaç duyulması halinde üstyapı ve/veya zemin iyileştirmeleri uygulanacaktır.

$$\tau_{\text{deprem}} = 0.65 \sigma_{\text{vo}} (0.4 S_{\text{DS}}) r_d$$

$$\text{CSR} = 0.65 r_d \left( \frac{\sigma_{\text{vo}}}{\sigma'_{\text{vo}}} \right) (0.4 S_{\text{DS}})$$

$$G_s = \frac{\text{CRR}}{\text{CSR}}$$

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| $z \leq 9.15$ m için                | $r_d = 1 - 0.00765z$    |
| $9.15 \text{ m} < z \leq 13$ m için | $r_d = 1.174 - 0.0267z$ |
| $13 \text{ m} < z \leq 30$ m için   | $r_d = 0.744 - 0.008z$  |
| $z > 30$ m                          | $r_d = 0.50$            |

$$\tau_R = \text{CRR}_{\text{M}7.5} C_M \sigma'_{\text{vo}}$$

$$\text{CRR}_{\text{M}7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(N_{1,60f} - 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

$$\alpha = 0, \beta = 1$$

$$\text{İDO} \leq \%5$$

$$\alpha = \exp \left[ 1.76 - \left( \frac{190}{\text{İDO}^2} \right) \right], \beta = 0.99 + \frac{\text{İDO}^{1.5}}{1000}$$

$$\%5 < \text{İDO} \leq \%35$$

$$\alpha = 5, \beta = 1.2$$

$$\text{İDO} \geq \%35$$

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_W^{2.56}}$$

## 16B.2. SPT VERİLERİNİN DÜZELTİLMESİ

### 16B.2.1. Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi

16B.2.1.1 – Araziden elde edilmiş ham SPT verileri,  $N$ , Denk.(16B.1) kullanılarak  $N_{1,60}$  değerine düzeltilcektir.

$$N_{1,60} = N C_N C_R C_S C_B C_E \quad (16B.1)$$

Burada  $C_N$  kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısını,  $C_R$  tij boyu düzeltme katsayısını,  $C_S$  numune alıcı tipi düzeltme katsayısını,  $C_B$  sondaj delgi çapı düzeltme katsayısını,  $C_E$  enerji oranı düzeltme katsayısını göstermektedir.

16B.2.1.2 – Derinlik düzeltme katsayısı  $C_N$  Denk.(16B.2)'de verilen bağıntı ile hesaplanacaktır.

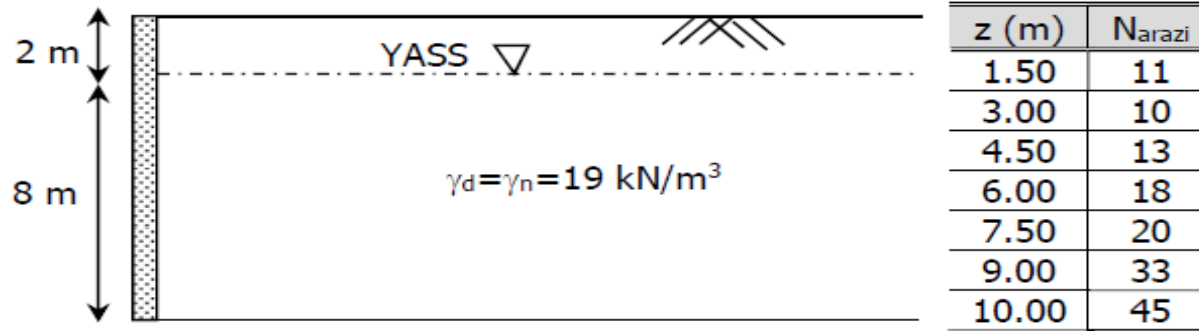
$$C_N = 9.78 \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{\text{vo}}}} \leq 1.70 \quad (16B.2)$$

Denk.(16B.2)'de verilen bağıntıda deney derinliğindeki efektif düşey gerilme  $\sigma'_{\text{vo}}$  ( $\text{kN/m}^2$ ), Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapıldığı durumdaki arazi koşullarına göre hesaplanmaktadır. Deney sonrasında yapılan ek dolgu, temel gerilmesi veya zemin kazısı ve benzeri nedenler ile oluşan efektif gerilme değişiklikleri dikkate alınmayacaktır.

Tablo 16B.1. SPT Düzeltme Katsayıları

| Düzeltilme Katsayısı | Değişken                             | Değer     |
|----------------------|--------------------------------------|-----------|
| $C_R$                | 3m ile 4m aralığında                 | 0.75      |
|                      | 4m ile 6m aralığında                 | 0.85      |
|                      | 6m ile 10m aralığında                | 0.95      |
|                      | 10m'den derin                        | 1.00      |
| $C_S$                | Standart numune alıcı (iç tüpü olan) | 1.00      |
|                      | İç tüpü olmayan numune alıcı         | 1.10-1.30 |
| $C_B$                | Çap 65mm-115mm arasında              | 1.00      |
|                      | Çap 150mm                            | 1.05      |
|                      | Çap 200mm                            | 1.15      |
| $C_E$                | Güvenli tokmak                       | 0.60-1.17 |
|                      | Halkalı tokmak                       | 0.45-1.00 |
|                      | Otomatik darbeli tokmak              | 0.90-1.60 |

**Örnek Problem 1:** Aşağıda Ordu ili merkezinde bir arazideki zemin profili verilmiştir. Zemin profili, siltli kum tabakasından oluşmakta olup ince dane oranı %3 ve  $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$  dir. YASS zemin yüzeyinden 2 m derinliktedir. Arazide 110 mm çapında sondaj kuyusunda halka tipi tokmağın, manuel ile kedi başına 2 turla düşürülerek yapılan standart numune alıcı ile yapılan SPT sonuçları aşağıda verilmiştir. Bu zemin tabakasının 10 m boyunca  $M=7.5$  için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (2018) göre sıvılaşma potansiyel analizini yapınız.



**Çözüm:** Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (2018) göre, Ordu merkez ilgili saha için Deprem Yer Hareket Düzeyi-2'ye (DD-2) göre kısa periyot harita spektral ivme katsayısı  $S_S=0.434$  olarak Türkiye Deprem Tehlike Haritalarının hazırlanmış olduğu <https://tdth.afad.gov.tr> internet sayfasından belirlenmiştir. Tablo 3.13'ten kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı  $F_S$ , zemine ait ortalama  $N_{60}=10$  olduğundan Tablo 3.14'ten yerel zemin sınıfı ZE ve kısa periyot harita spektral ivme katsayısına  $S_S=0.434$  bağlı olarak  $F_S=1.885$  olarak belirlenmiştir. Kısa periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı, (3.61) eşitliğinden  $S_{DS}=S_S \cdot F_S=0.818$  olarak hesaplanmıştır. Aşağıda  $z=3$  m için adım adım analiz yapılmıştır.

$z=3$  m için;

- $N_{arazi}=10$
- $\sigma_v=3*19=57$  kPa
- $\sigma_v'=3*19-3*10=47$  kPa
- $C_N=9,87*(1/\sigma_v')^{0.5}=9.87*(1/47)^{0.5}=1.44$
- Sondaj çapı 110 mm olduğundan  $C_B=1$ , standart numune alıcı olduğundan  $C_S=1$ , halka tipi tokmak olduğundan  $C_E=0.75$  ve tij boyu uzunluğu 3 m olduğu için  $C_R=0.75$  alınmıştır (İnşaat Mühendisliğinde Temel İnşaatı-I Bölüm 2.5.1.3'e bakınız).
- $N_{1,60}=C_N C_E C_R C_B C_S N_{arazi}=1.44*0.75*0.75*1*1*10=8.10$  olur.
- $z=3 < 9.15$  m için (3.45) eşitliğinden  $r_d=1-0.00765z=1-0.00765*3=0.98$  bulunur.
- (3.60) eşitliğinden,  
 $CSR=0.65*r_D*(\sigma_{v0}/\sigma'_{v0})*(0.4*S_{DS})=0.65*0.98*(57/47)*(0.4*0,818)$   
 $=0.25$  bulunur.
- İnce dane oranı (İDO)=% 3≤% 5 için,  $\alpha=0$ ,  $\beta=1$  belirlenmiş ve (3.64) eşitliğinden  $N_{1,60f}=\alpha+\beta N_{1,60}=N_{1,60}=8.10$  değerine karşı gelen değer, (3.68) eşitliğinden  $CRR=[1/(34-N_{1,60f})]+[N_{1,60f}/135]+[50/(10N_{1,60f}+45)^2]-[1/200]=0.10$  olarak hesaplanır.
- (3.54) eşitliğinden,  $G_s = \frac{CRR}{CSR} = 0.10/0.25=0.38$  bulunur.

Diğer derinliklerde ki hesaplar, her bir adım için yapılip topluca aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

| z<br>(m) | N <sub>arazi</sub> | r <sub>D</sub> | σ <sub>v0</sub><br>(kPa) | σ' <sub>v0</sub><br>(kPa) | CSR  | C <sub>N</sub> | N <sub>1,60</sub> | N <sub>1,60f</sub> | CRR  | G <sub>s</sub> |
|----------|--------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|------|----------------|-------------------|--------------------|------|----------------|
| 1.5      | 11.0               | 0.99           | 28.5                     | 28.5                      | 0.21 | 1.70           | 10.52             | 10.52              | 0.12 | 0.56           |
| 3.0      | 10.0               | 0.98           | 57.0                     | 47.0                      | 0.25 | 1.44           | 8.10              | 8.10               | 0.10 | 0.38           |
| 4.5      | 13.0               | 0.97           | 85.5                     | 60.5                      | 0.29 | 1.27           | 10.52             | 10.52              | 0.12 | 0.41           |
| 6.0      | 18.0               | 0.95           | 114.0                    | 74.0                      | 0.31 | 1.15           | 13.17             | 13.17              | 0.14 | 0.45           |
| 7.5      | 20.0               | 0.94           | 142.5                    | 87.5                      | 0.33 | 1.06           | 15.04             | 15.04              | 0.16 | 0.49           |
| 9.0      | 33.0               | 0.93           | 171.0                    | 101.0                     | 0.34 | 0.98           | 23.09             | 23.09              | 0.26 | 0.77           |
| 10.0     | 45.0               | 0.92           | 190.0                    | 110.0                     | 0.34 | 0.94           | 30.17             | 30.17              | 0.48 | 1.42           |

Ayrıca G<sub>s</sub>'nin derinlikle değişimi grafik olarak verilmiştir. Grafik ve Tabloya (G<sub>s</sub>'nin derinlikle değişimine) bakıldığında, Türkiye Bina Deprem Yönergesi'ne (2018) göre 2 m ile 9.5 m arasında G<sub>s</sub><1.10 olduğu için zeminin sıvılaşma eğilimi gösterdiği görülmektedir. YASS'nin üzerinde sıvılaşma olmayacağı gibi ilgili yönetmelik gereği, zemin yüzeyinden 20 m altındaki derinliklerde sıvılaşmanın meydana gelmeyeceği de unutulmamalıdır.

