

# INS308

## Zemin Mekaniği II

*Zemin Sıvılaşması ve Analizi*

Prof. Dr. İnan KESKİN

[inankeskin@karabuk.edu.tr](mailto:inankeskin@karabuk.edu.tr), [inankeskin@gmail.com](mailto:inankeskin@gmail.com)

[www.inankeskin.com](http://www.inankeskin.com)

# ZEMİN MEKANİĞİ

## Haftalık Konular

|           |                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hafta 1:  | Zemin Etütleri Amacı ve Genel Bilgiler                                                                                                         |
| Hafta 2:  | Kil Minarelleri ve Zemin Yapısı                                                                                                                |
| Hafta 3:  | Zeminlerde Kayma Direnci Kavramı, Yenilme Teorileri                                                                                            |
| Hafta 4:  | Zeminlerde Kayma Direncinin Ölçümü; Serbest Basınç Deneyi, Kesme Kutusu Deneyi, Üç Eksenli Basınç Deneyi, Vane Kanatlı sonda Deneyi            |
| Hafta 5:  | Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesine Yönelik Deneyler; Laboratuvar Uygulaması                                                            |
| Hafta 6:  | Zeminlerde Kayma Direncinin Belirlenmesine Yönelik Problem Çözümleri                                                                           |
| Hafta 7:  | Yanal Zemin Basınçları                                                                                                                         |
| Hafta 8:  | Yanal Zemin Basınçları; Uygulamalar                                                                                                            |
| Hafta 9:  | Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi; Temel Kavramlar                                                                                                 |
| Hafta 10: | Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Örnek Problemler                                                                                                 |
| Hafta 11: | Zeminlerin Taşıma Gücü; Sığ Temeller                                                                                                           |
| Hafta 12: | Zeminlerin Taşıma Gücü; Kazıklı Temeller                                                                                                       |
| Hafta 13: | Zemin Sıvılaşması ve Analizi                                                                                                                   |
| Hafta 14: | İleri Zemin Mekaniği Problem Çözümleri                                                                                                         |
| Hafta 15: | Bu ders için Ara Sınav, 7. ve 15. haftalar arasındaki bir tarihte yapılır. Sınavın yapıldığı tarihten itibaren konular bir hafta ileri alınır. |



# SIVILAŞMA

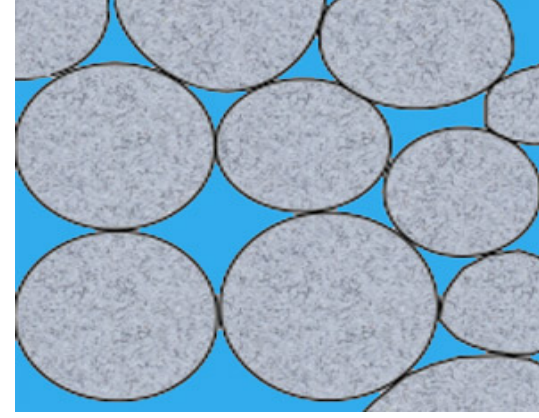
- Suyu doygun kohezyonsuz gevşek zeminlerin drenajsız koşullar altında tekrarlı yüklere maruz kaldığı durumlarda boşluk suyu basıncında ani artışlar olmaktadır. ***Bu ani artışın sebebi, kayma gerilmeleri altında hacimleri daralmaya zorlanan kohezyonsuz zeminlerdeki boşluk suyunun, hacim azalmasına karşı koymaya çalışmasıdır. Boşluk suyu basıncının artması, zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin azalmasına yol açar.*** Bunun sonucunda zemin kayma direncini kaybeder ve adeta bir sıvı gibi davranış göstererek büyük şekil değiştirmelere uğrar. Bu olay sıvılaşma olarak adlandırılmaktadır
- Sıvılaşma, deprem gibi dinamik yüklemeler etkisi altındaki gevşek taneli zeminlerde ortaya çıkan bir olaydır.

Sıvılaşma olgusu, pek çok depremde gözlenmesine karşın, mühendislik açısından ilk kez 1964 Niigata (Japonya) depreminden sonra dikkat çekmiştir.



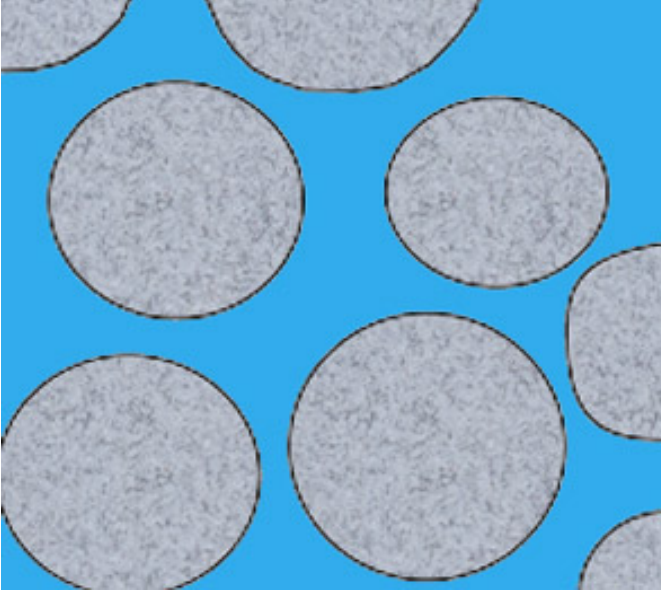
# ZEMİNDE SIVILAŞMA NEDEN GÖRÜLÜR ?

- Deprem sırasında, dalgalar özellikle kayma dalgalarının suya doymuş taneli tabakalardan geçerken, tane (zemin parçacığı) yerleşim düzenini değiştirir.
- Taneler, arasındaki bu yer değiştirme durumunda su kendine bir yol bulup kaçmaya çalışır. Fakat su zeminde hareketini sağlayacak yolu bulamaz ise boşluk suyu basıncını yükseltir.
- Boşluk suyu basıncı üstündeki tabakaların yakın bir seviyesine ulaştığında ise taneli tabaka geçici olarak sıvı gibi davranır ve sıvılaşma olayını meydana getirir.



## Statik Durum

Su taneler arası boşlukları doldurur. Taneler arasındaki sürtünme zemin tabakasını bir arada tutar. Zemin statik durumda yapı yükünü taşımaktadır.

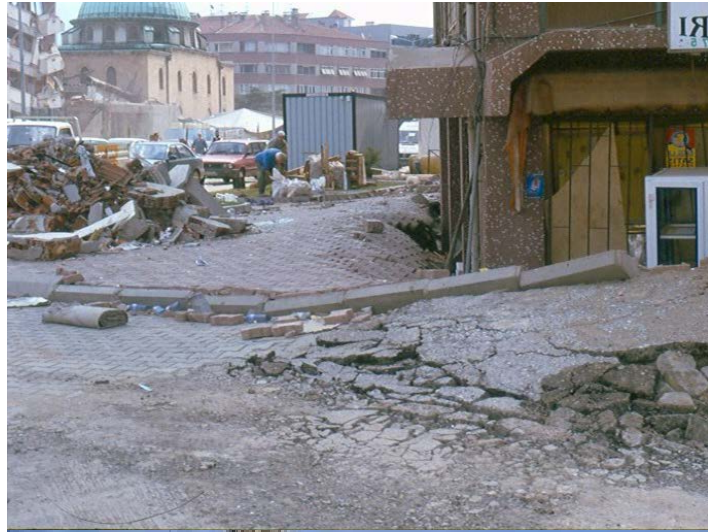


## Deprem Anında

Su zemin tabakasının içini tamamen doldurur. Deprem dalgası nedeni ile taneler yer değiştirir ve aralarında sürtünme olmayan zemin parçacıkları sıvı gibi davranmaya başlar.

Suyun sıkışamaz olması nedeniyle, çevrimsel yük altında **taneler arası temas azalacaktır. Taneler arası temas azaldıkça da efektif gerilme sıfır olmaktadır. Sonuç olarak da kayma direnci yok olacak ve zemin su gibi davranacaktır.**

# ZEMİNDE SIVILAŞMA ETKİLERİ NELERDİR ?



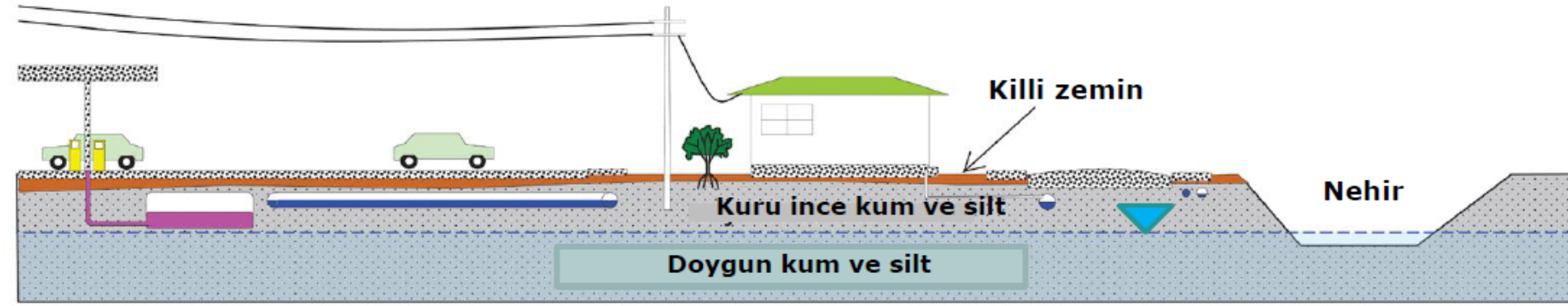
- Deprem sırasında zeminde sıvılaşma meydana gelmesi sonucunda zemin direncini geçici ve ya kısmen olarak yitirir.
- Zeminde gerçekleşen bu direnç kaybı ile yapılarda önemli hasarlar oluşmaktadır.
- Deprem sonrasında ise yapının yan yatmasına ve ya batmasına sebep olabilir.
- Bu batma ya da yana yatma olaylarının görüldüğü örneklerle ne yazık ki ülkemizde gerçekleşen 1999 Marmara Depreminde şahit olunmuştur.



# ZEMİNDE SIVILAŞMA ETKİLERİ NELERDİR ?

## Deprem Öncesi

Sığ su tablasının bulunduğu düz alanlar yapıları, yolları, boru ve tank gibi gömülü alt yapı elemanlarını normal koşullarda taşıyabilir



## Deprem Sırası ve Sonrası

İnce kum, silt ve su basıncı altında zemindeki çatlaklar ve diğer zayıf zonlar boyunca yüzeye, akarsu yakınlarında zemin akarsu kanalına doğru hareket eder.

### Kum Kaynamaları (Kum volkanları)

Kum, silt ve su basıncı altında çatlaklar boyunca yüzeye doğru yükselerek yüzeyi kaplar. Araç gibi ağır nesneler bu çatlaklara batar

Enerji hatları eğilir ve gömülü kablolar kopar

### Yanal Yayılma

Akarsu kıyıları birbirine doğru hareket ederler. Kıyılar boyunca çatlaklar oluşur ve bunlar yapılara doğru ilerleyerek hasara neden olurlar.



Gömülü tanklar, borular ve kanalizasyon şebekesi sıvılaşan zemin içinde yükselerek hasara uğrarlar

# ZEMİNİN SIVILAŞMASI NELERE BAĞLIDIR ?

## **Yeraltı suyu**

Yapı altında bulunan zeminde özellikle yüzeye yakın katmanlarda (ilk 3 metre çok önemli olup, 15-20 metreye kadar suyun varlığı değerlendirilmelidir.) yer altı suyuna rastlanması.

## ***Zemin tipi***

Zeminin kumlu-siltli yapıda ve gevşek durumda olması.

## ***Konum***

Yapının deprem riski yüksek bir bölgede inşaa edilmiş olması.

# ZEMİN SIVILAŞMA RİSKİ

- Sıvılaşma zemin arazisinin tümünde meydana gelmez.
- Arazinin çok iyi incelenip analiz edilerek etüd çalışmalarının yapılması çok önemlidir.



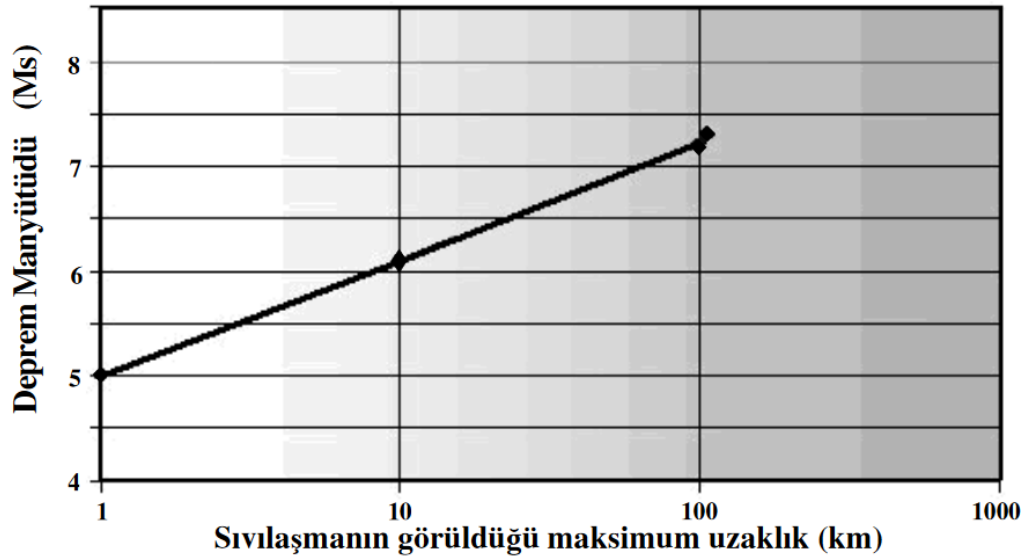
# SIVILAŞMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

**DEPREM  
KAYNAKLI  
FAKTÖRLER**

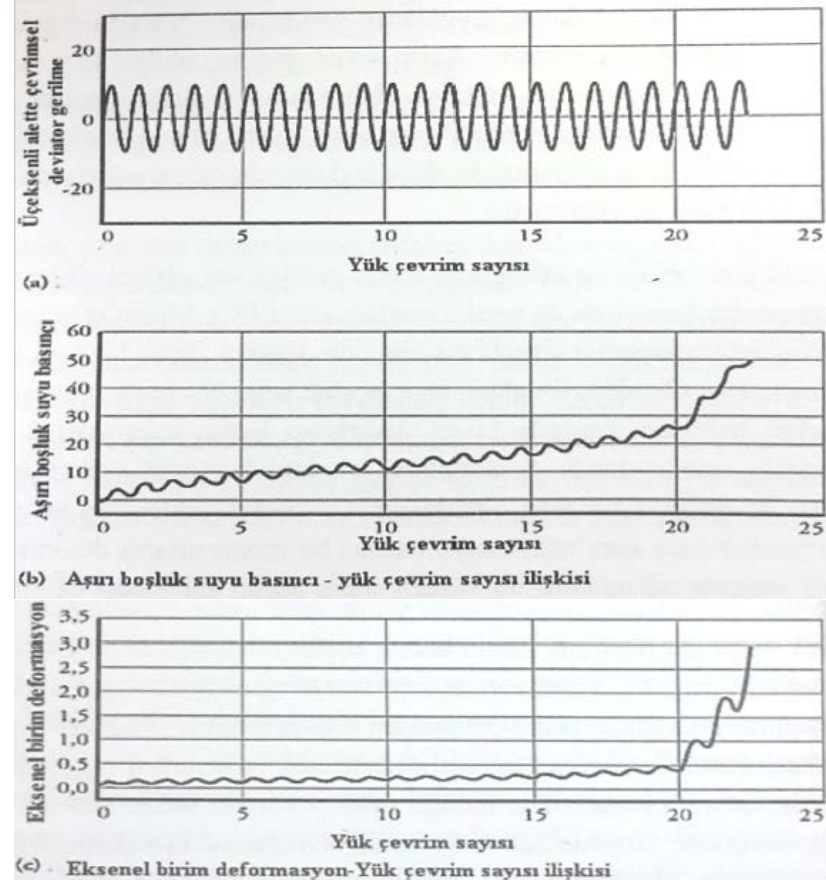
**YER KAYNAKLI  
OLAN  
FAKTÖRLER**

# DEPREM KAYNAKLI FAKTÖRLER

- Deprem büyüklüğü ve süresi: **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 üretir
- **Deprem dalgasının baskın salınım dönemi;** Değişik deprem büyüklükleri için depremlerin odak uzaklığına bağlı ortalama baskın periyotları sıvılaşma için önemli olmaktadır.



Çevrimsel yükün devam etmesi durumunda zemin sıvılaşmasa bile deformasyonlarda artış olacaktır.





# YER KAYNAKLI OLAN FAKTÖRLER

Yeraltı su seviyesi

Zemin Tipi

Zeminin Relatif Sıkılığı ( $D_r$ )

Tane Boyu Dağılımı

Yerleştirme ve Çökelme Ortamı

Drenaj şartları

Çevre Basınçları

Tane Şekli

Yaş ve çimentolanma

Tarihsel Ortam

Bina Yüğü

# ZEMİNDE SIVILAŞMA-YAPI İLİŞKİSİ



- Zemin sıvılaşması doğrudan yapıya hasar verebilen bir olay değildir.
- Zemin sıvılaşması sonucunda oluşan büyük yer değiştirmeler nedeniyle yapı temelinde göçmeler oluşur ve bu göçmeler sonucunda yapıda büyük ölçüde hasar meydana gelir.
- Zemin sıvılaşması sonucu ağır yapılarda batma olayının meydana gelmesi, hafif yapılarda ise yukarı doğru hareket etme (yüzme eğilimi) olayları görülmektedir.



# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

Kum  
Kaynaması

Akma  
Sıvılaşması

Yanal  
Yayıllma

İstinat Yapısı  
Yenilmesi

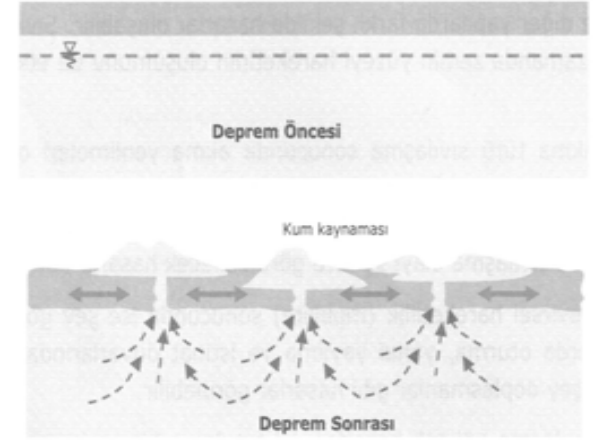
Taşıma Gücü  
Yenilmesi

Gömülü Yapı  
Yüzeylemesi

# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

## Kum Kaynaması

- Deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncının yukarı yönde hareket etmesine neden olur.
- Bu hareket sonucunda zemin taneciklerine yukarı yönde etki eden kuvvetler oluşturur.
- Bu kuvvetler etkisiyle bazı zemin partikülleri su ile birlikte yukarı doğru taşınır ve yüzeyde kum konileri oluşturur.
- Kum kaynaması çatlak ve ya yarıkları takip eder, genellikle bir hat üzerinde gözlenir.



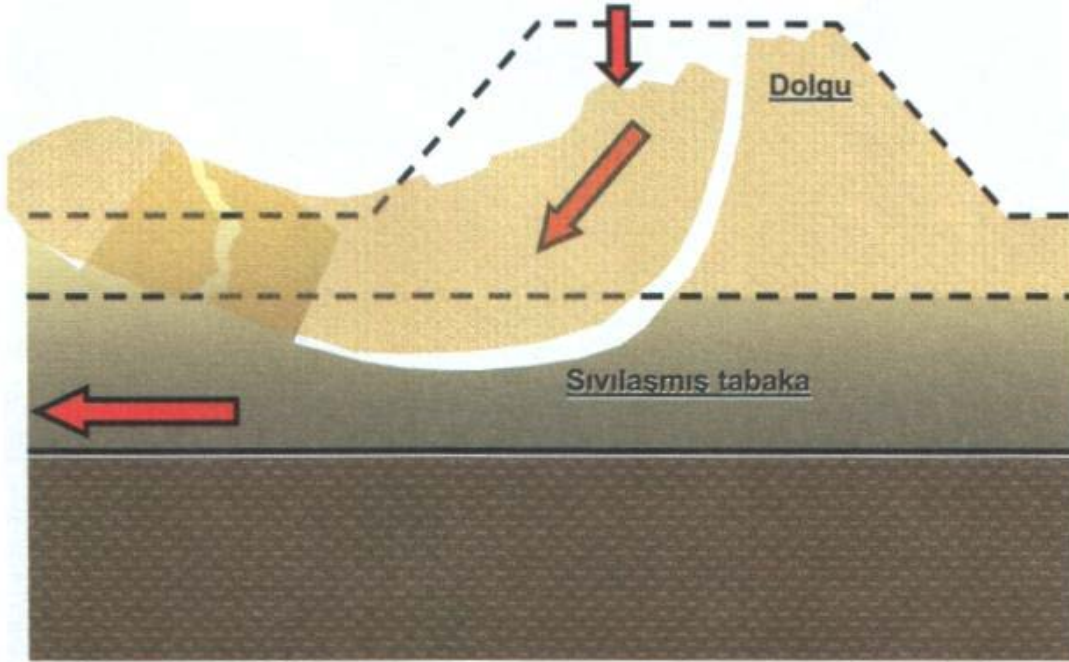
Sıvılaşma olayı genellikle kum kaynamasıyla birlikte düşünülür  
1999 Chi-Chi depreminde oluşan kum kaynaması



# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

## Akma Sıvılaşması

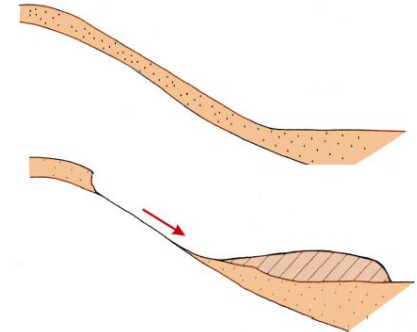
- Akma göçmeleri genellikle eğim derecesinin 3'ten fazla olduğu durumlarda meydana gelmektedir.
- Sıvılaşmanın neden olduğu büyük göçmelerdir. Bir anda gerçekleşirler.
- Zemin kütlelerinin geniş bir şekilde aşağı doğru hareket etmesi şeklinde oluşurlar.



1971 depreminde Lover san Fernonda barajında oluşan akma göçmesi



Deprem nedeniyle sığ konumdaki çökellerde gözenek suyu basıncının artışından dolayı veya sıvılaşmanın bir sonucu olarak, oldukça düşük eğimli topoğrafyayı oluşturan veya deniz, göl veya nehir gibi ortamlara komşu konumdaki zeminlerin yatay yöndeki yer değiştirmesi.



# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

*Akma Sivilaőması*





# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TIPLERİ

## Yanal Yayılma

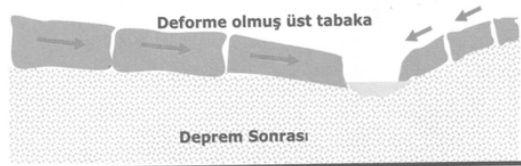
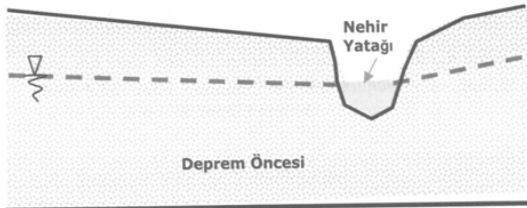
Genellikle çok az eğimli ( $0,3^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ) yamaçlarda ve ya su kütlelerine komşu düzlüklerde gelişmektedir.

Yanal yayılımlar altta bulunan zemin sıvılaşım ve yüzeysel sediment blokların yanal deplasmanını içerir.

Bu yayılımlar genel olarak birkaç metredir.

Yanal yayılma hareketleri genel olarak dolgular, liman tesisleri, boru hatları, köprü ve yüzeysel temele sahip olan yapılarda hasara neden olmaktadır.

2001 Nisqually depremi Green River boyunca oluşan yanal yayılma



Eğim  $\rightarrow$  % 0.1 - % 6

Gevşek kum

Yeraltısuyu tablası  $\rightarrow$  Sığ

# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

## *Yanal Yayılmanın Büyüklüğünün Kestirimi*

*Bartlett ve Youd (1992) Yöntemi*

### Serbest Yüzey Bileşeni

$$\text{Log}D_H = -16.713 + 1.532M_w - 1.406\log R^* - 0.012R + 0.592\log W \\ + 0.540 \log T_{15} + 3.413\log(100 - F_{15}) - 0.795\log(D50_{15} + 0.1)$$

### Topoğrafik Eğim Bileşeni

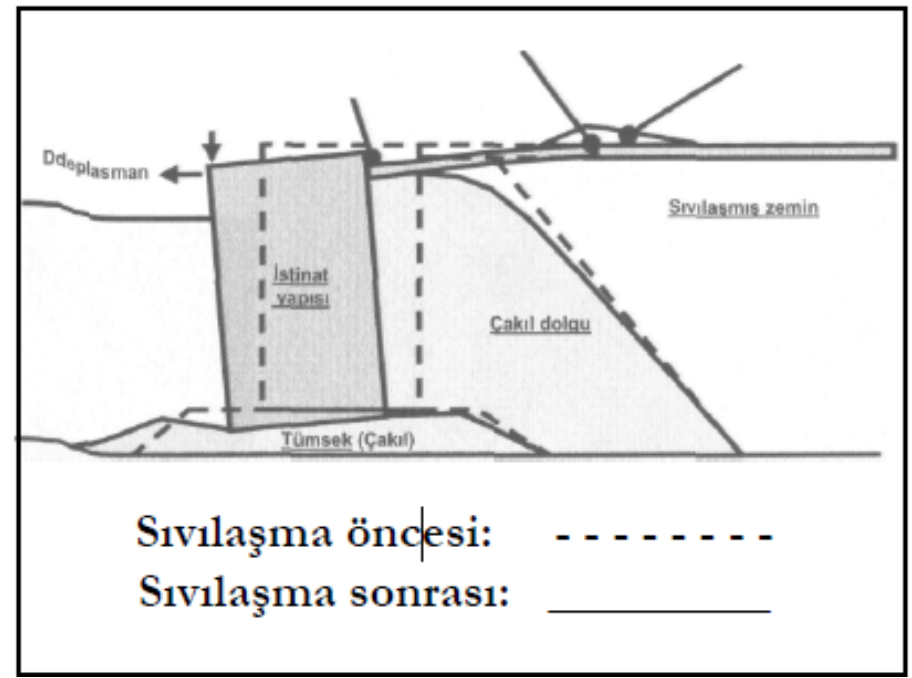
$$\text{Log}DH = -16.213 + 1.532M_w - 1.406\log R^* - 0.012R + 0.388\log S + \\ 0.540 \log T_{15} + 3.413\log(100 - F_{15}) - 0.795\log(D50_{15} + 0.1)$$

# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TİPLERİ

## *İstinat Yapısı Yenilmesi*

Sıvılaşmış temel zemininin destek kaybından veya istinat yapısı arkasındaki sıvılaşmış zeminden oluşan artan yanal yüklerden kaynaklanır.

Bu etkiler sonucu istinat yapısı düşey ve/veya yatay yönde deplasmanlara maruz kalır.



1995 Kobe depreminde sıvılaşma sonucu oluşan istinat duvarı yenilmesi (liman)

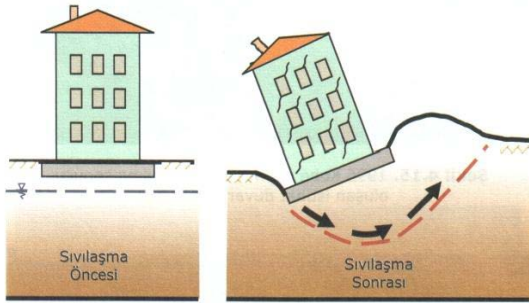
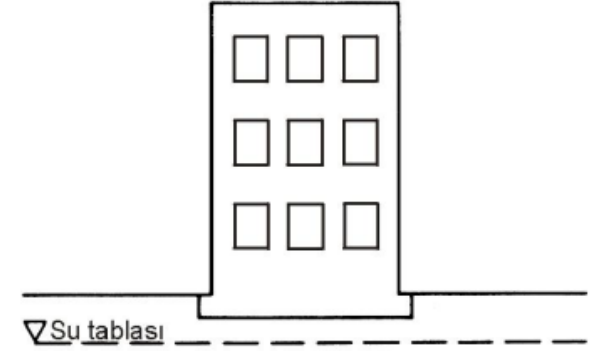


# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TIPLERİ

## Taşıma Gücü Kaybı

Sivilaşma her zemin ve ya her ortamda gerçekleşen bir olay değildir.

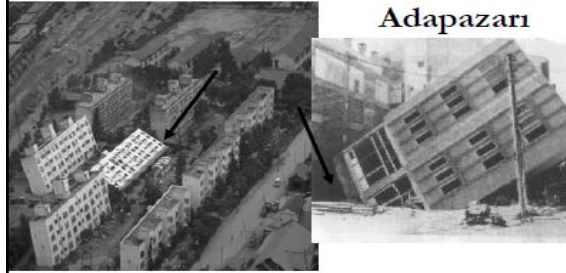
Özellikle kum ve siltli, gevşek ve jeolojik olarak genç çökellerin bulunduğu ve yer altı suyunun sık olduğu zeminlerde gelişir.



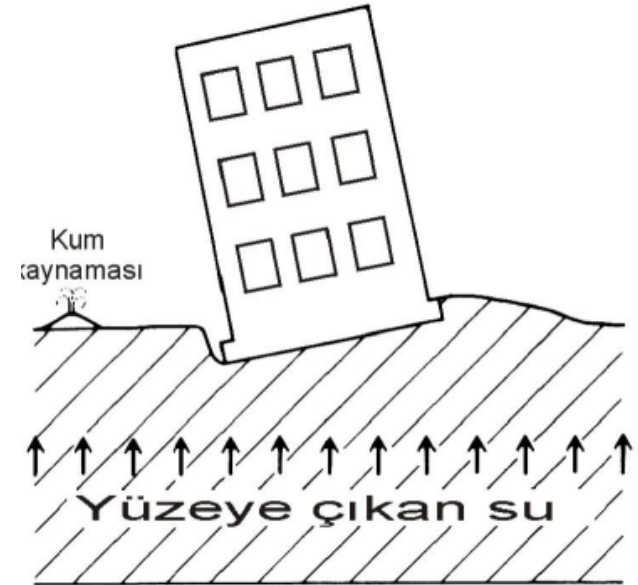
Hanshin (Japonya) expres yol



1964 Niiagata depremi



Sivilaşma, Adapazarı

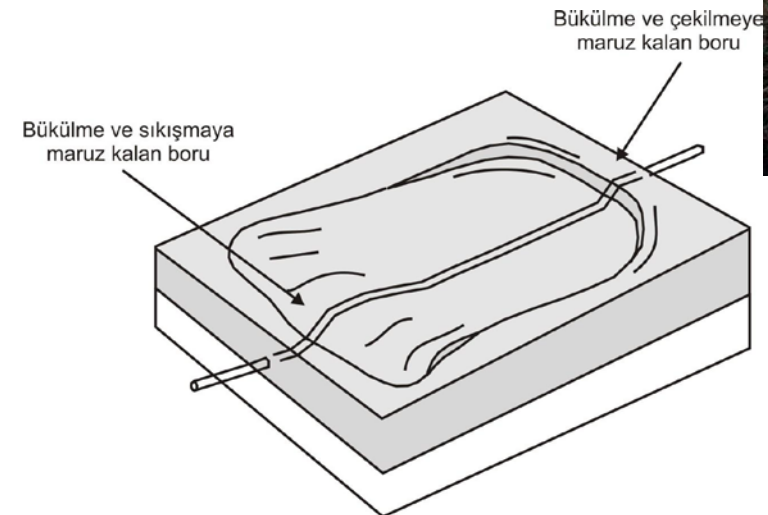
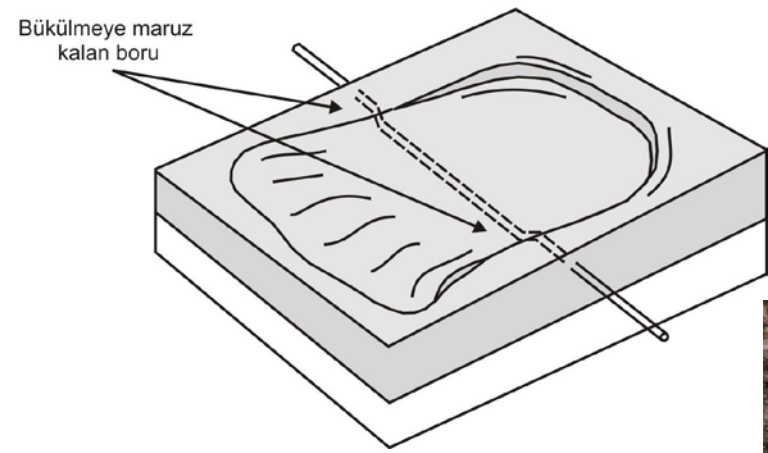




# SIVILAŞMA KÖKENLİ HASAR TIPLERİ

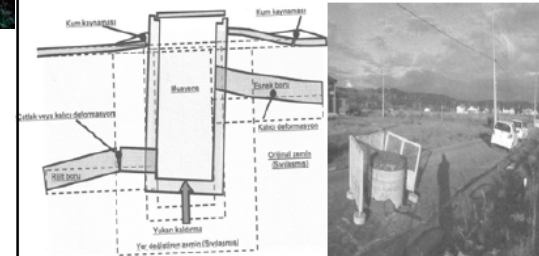
## Gömülü Yapı Yüzeylemesi

Sivilaşma esnasına kaldırma kuvveti etkisiyle, muayene bacası, tank, boru hatları ve benzeri hafif yapılar zemin yüzeyine yükselir.



Şekil 4.23. 2004 Niigata Chuetsu depreminde sivilaşma sonucu muayene bacası yükselmesi

## GÖMÜLÜ YAPI YÜZEYLENMESİ BİÇİMİ



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

İlk olarak zemin sivilaşma potansiyelinin olabileceği zemin tabakalarının bulunup bulunmadığının araştırılması yapılmalıdır.

*Peki hangi zeminler sivilaşma özelliğine sahiptir ?*

## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ

### A. JEOLJİK ÖLÇÜTLER

**Malzeme:** Genç ve gevşek çökeller (Holosen yaşlı)

Delta

Akarsu, taşkın ovası, taraça, kıyı çökelleri

İyi sıkıştırılmamış dolgular

Atık barajlarında çökeltilmiş ince maden atıkları

**Yeraltısuyu koşulları:** Sığ su tablası

0-10 m derinlik --> En kritik

> 20 m --> Ender olarak

**Dinamik etki:** Deprem

| SINIF | JEOMORFOLOJİK BİRİMLER                                                                                 | SIVILAŞMA POTANSİYELİ |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A     | Güncel ve eski akarsu yatakları, bataklık bölgeler, su altında iken yeniden kazanılmış alanlar, ovalar | Sivilaşma olabilir    |
| B     | Yelpazeler, kum barları, taşkın düzlükleri, plaj ve diğer düzlükler                                    | Sivilaşma olası       |
| C     | Teraslar, tepeler, dağlar                                                                              | Sivilaşma olmaz       |

*Jeomorfolojik açıdan sivilaşmaya karşı duyarlılık*

### B. ZEMİNİN BİLEŞİMİYLE İLGİLİ ÖLÇÜTLER

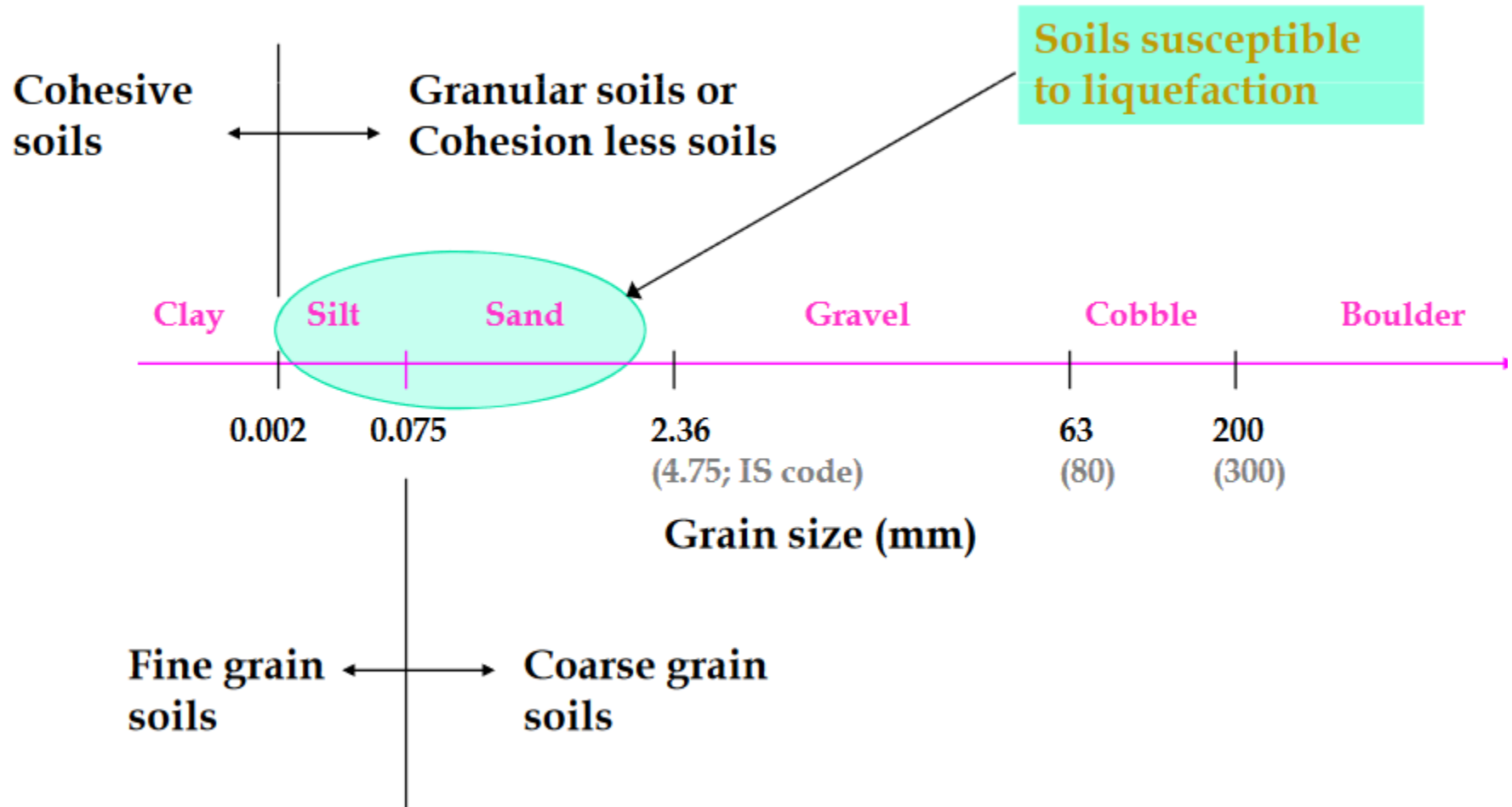
**Sivilaşmaya karşı duyarlılık:**

- Tane boyutuna
  - Zemin türüne
  - Tane şekline
- bağılıdır.

- İyi derecelenmiş zeminler, kötü derecelenmiş zeminlere oranla sivilaşmaya karşı daha dirençlidir (ince taneler aşırı gözenek suyu basıncının gelişmesini engeller).
- Yuvarlak tanelerden oluşan zeminler sivilaşmaya karşı daha duyarlıdır.



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ

Andrews ve Martin (2000)

| Kil yüzdesi | LL<32                                                                                                                                | LL≥32                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <10         | Duyarlı                                                                                                                              | İlave çalışma gerekir<br>(plastik ve kil boyutu<br>dışındaki taneler<br>incelenmeli) |
| ≥10         | İlave çalışma gerekir<br>(Plastik olmayan kil<br>tane boyutundaki<br>taneler – örneğin,<br>maden atıkları gibi-<br>dikkate alınarak) | Duyarlı değil                                                                        |

### Kohezyonsuz Zeminler:

- Çok az ince tane içeren temiz KUMLAR
- Siltli KUMLAR
- Küçük çakıllı zeminler --> Potansiyel olarak duyarlı
- Daha geçirimli »» Gözenek suyu basıncı daha hızlı sönümlenir
- Ender olarak gevşek durumdadırlar

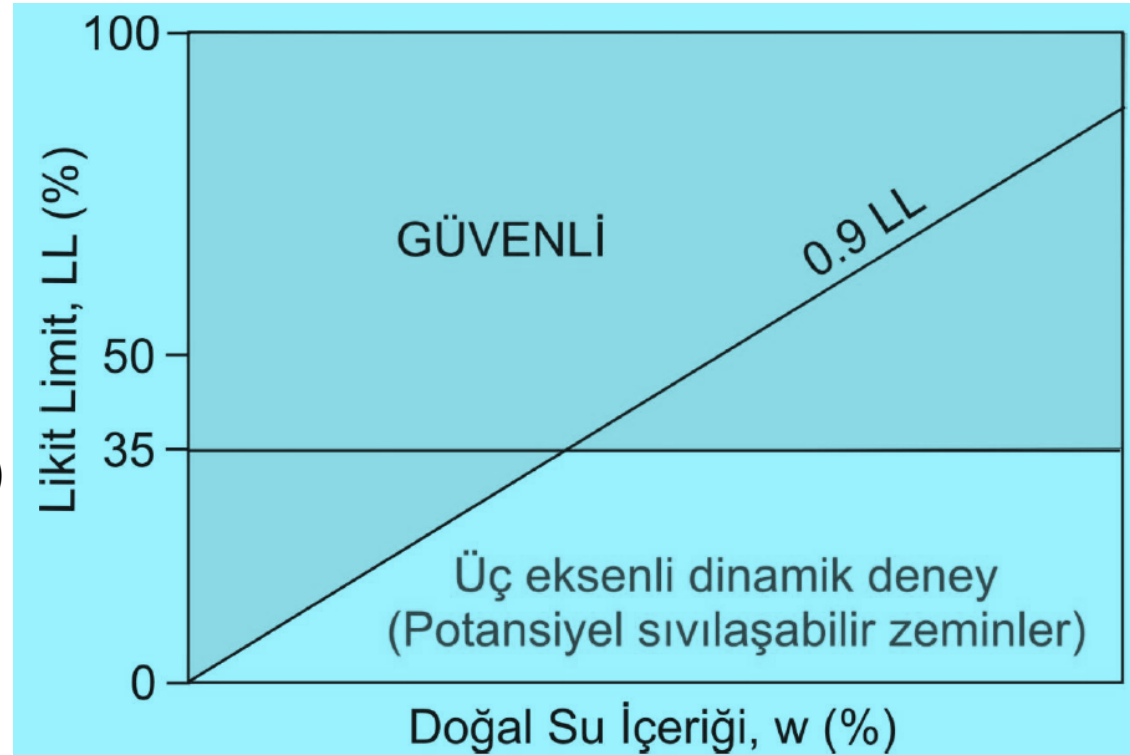
### Kohezyonlu Zeminler (Çin ölçütü):

0.005 mm'den ince tane yüzdesi <%15

Likit limit (LL) <35

Su içeriği (w) >0.9 LL

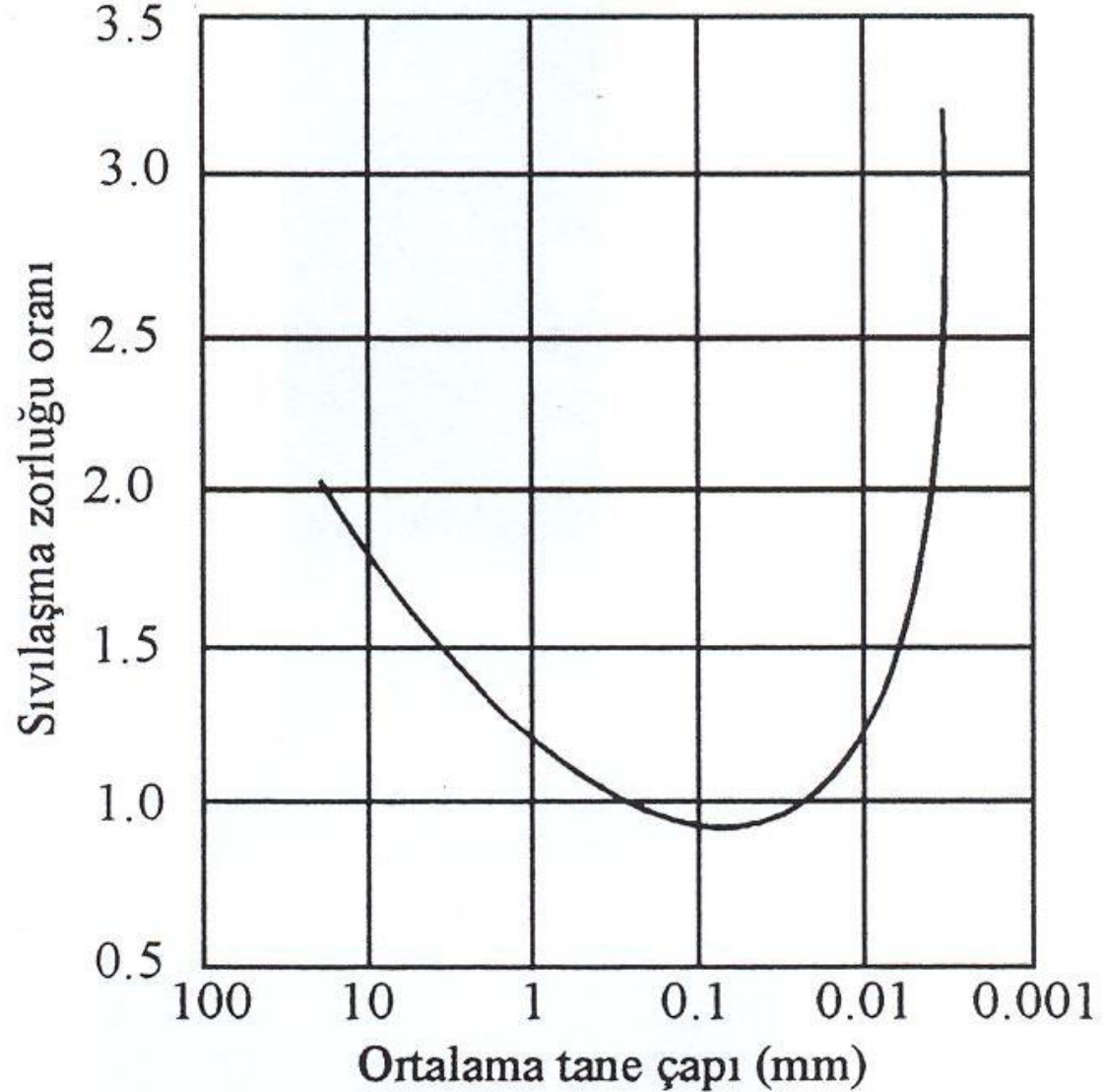
Çin ölçütü (Wang, 1979)



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

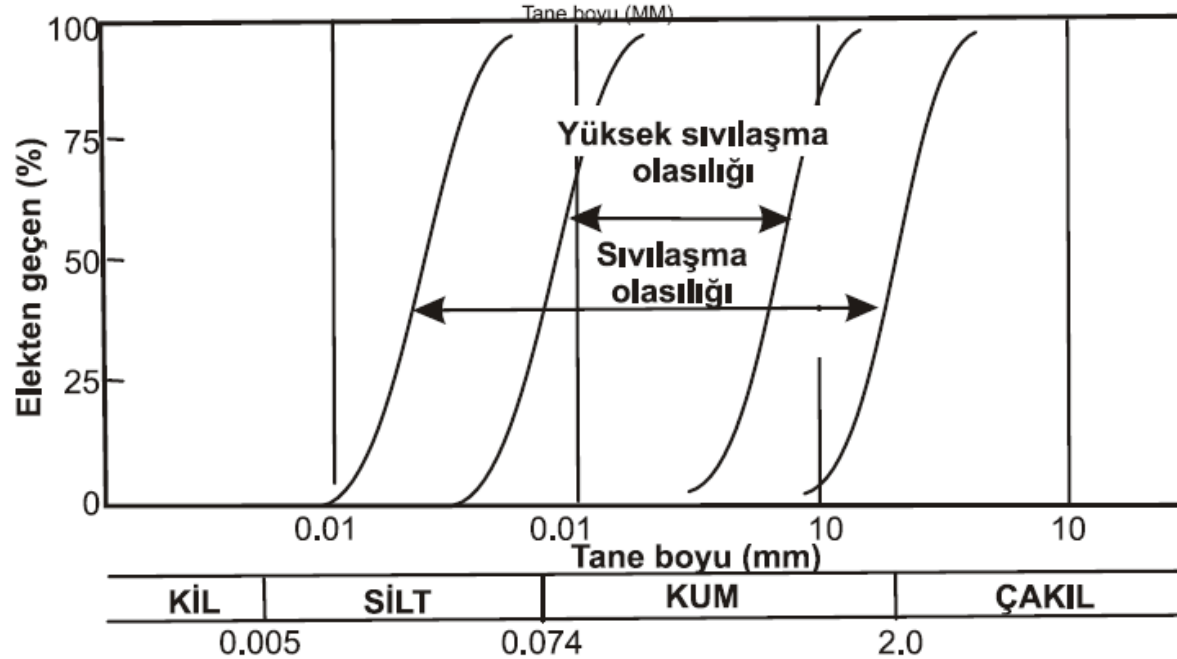
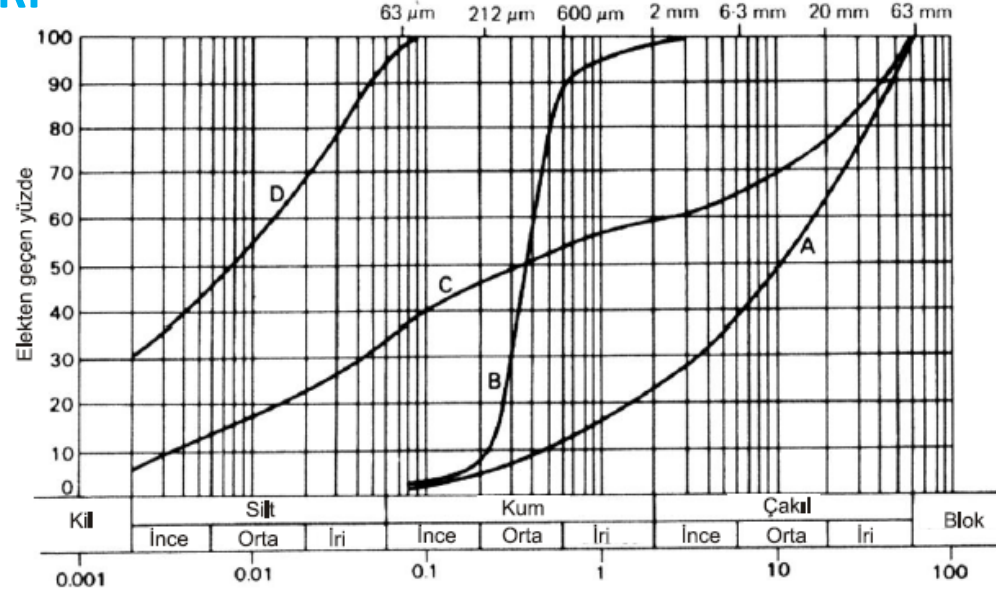
## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ

En kolay sıvılaştırılabilir tane boyu: 0.5-0.06 mm



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ

### Bağıl Sıkılık ( $D_r$ )

| Bağıl Birim Hacim Ağırlık | Ö z e l l i k |
|---------------------------|---------------|
| % 0 - 15                  | Çok Gevşek    |
| % 15 - 35                 | Gevşek        |
| % 35 - 65                 | Orta Sıkı     |
| % 65 - 85                 | Sıkı          |
| % 85 - 100                | Çok Sıkı      |

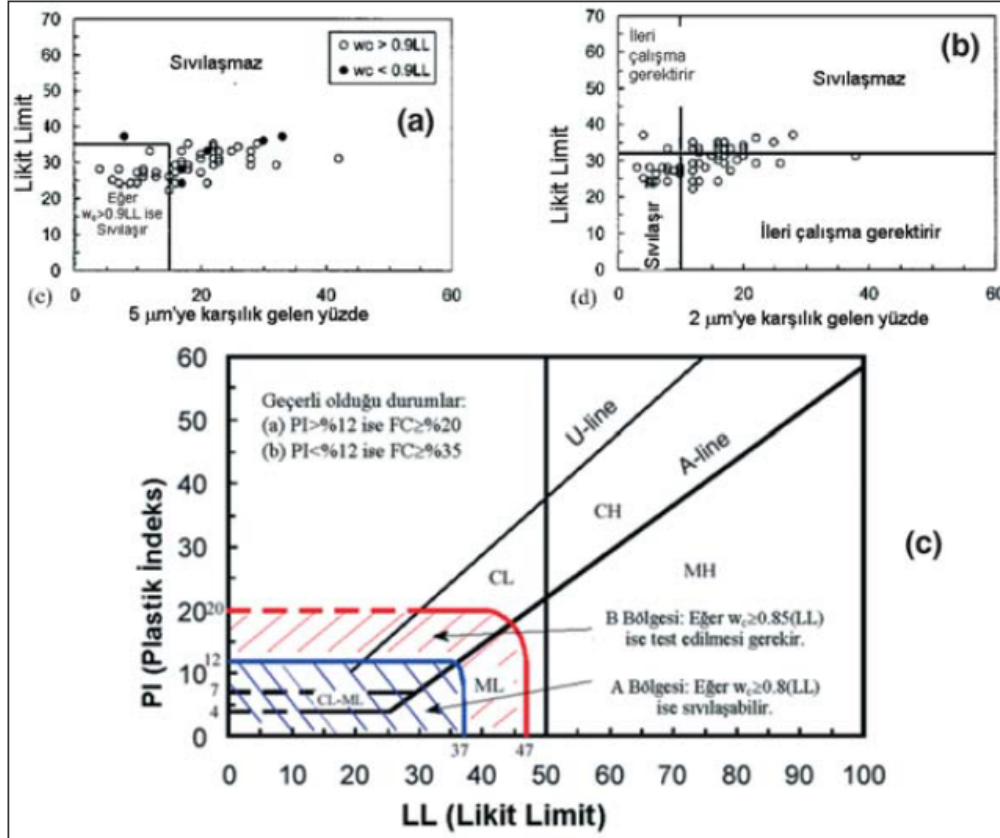
$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}}$$

| Maksimum Yer İvmesi, $a_{max}$ (g) | Sıvılaşma Riski |                     |              |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------|
|                                    | Yüksek          | Orta                | Düşük        |
| 0.10                               | $D_r < 0.33$    | $0.33 < D_r < 0.54$ | $D_r > 0.54$ |
| 0.15                               | $D_r < 0.48$    | $0.48 < D_r < 0.73$ | $D_r > 0.73$ |
| 0.20                               | $D_r < 0.60$    | $0.60 < D_r < 0.85$ | $D_r > 0.85$ |
| 0.25                               | $D_r < 0.70$    | $0.70 < D_r < 0.92$ | $D_r > 0.92$ |



# ZEMİN SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

## SIVILAŞMA ÖLÇÜTLERİ



Şekil 2 - 1999 Kocaeli Depremi sonucunda Adapazarı'nda elde edilmiş test sonuçları, Bray vd. (2004). (a) Çin Kriterleri, Seed ve Idriss (1982), Wang (1979), (b) Andrews ve Martin (2000) (c) Seed vd (2003)

Bu noktaya kadar tariflenmeye çalışılan sivilaşma kriterleri tüm zemin türlerinin sivilaşma davranışlarının belirlenmesi için yeterli değildir.

Bray ve diğerleri (2004) tarafından 1999 Kocaeli Depremi sonrasında Adapazarı'nda yapılan bir çalışmanın sonucunda, Çin kriterlerince sivilaşmayacağı düşünülen zeminlerin de sivilaşabileceğini göstermiştir (Çin kriterlerine göre ince daneli zeminlerde ( $FC > 35$ ) sivilaşmanın gerçekleşebilmesi için  $LL < 35$  ve  $w_c/LL > 0.9$  olması gerekmektedir).

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

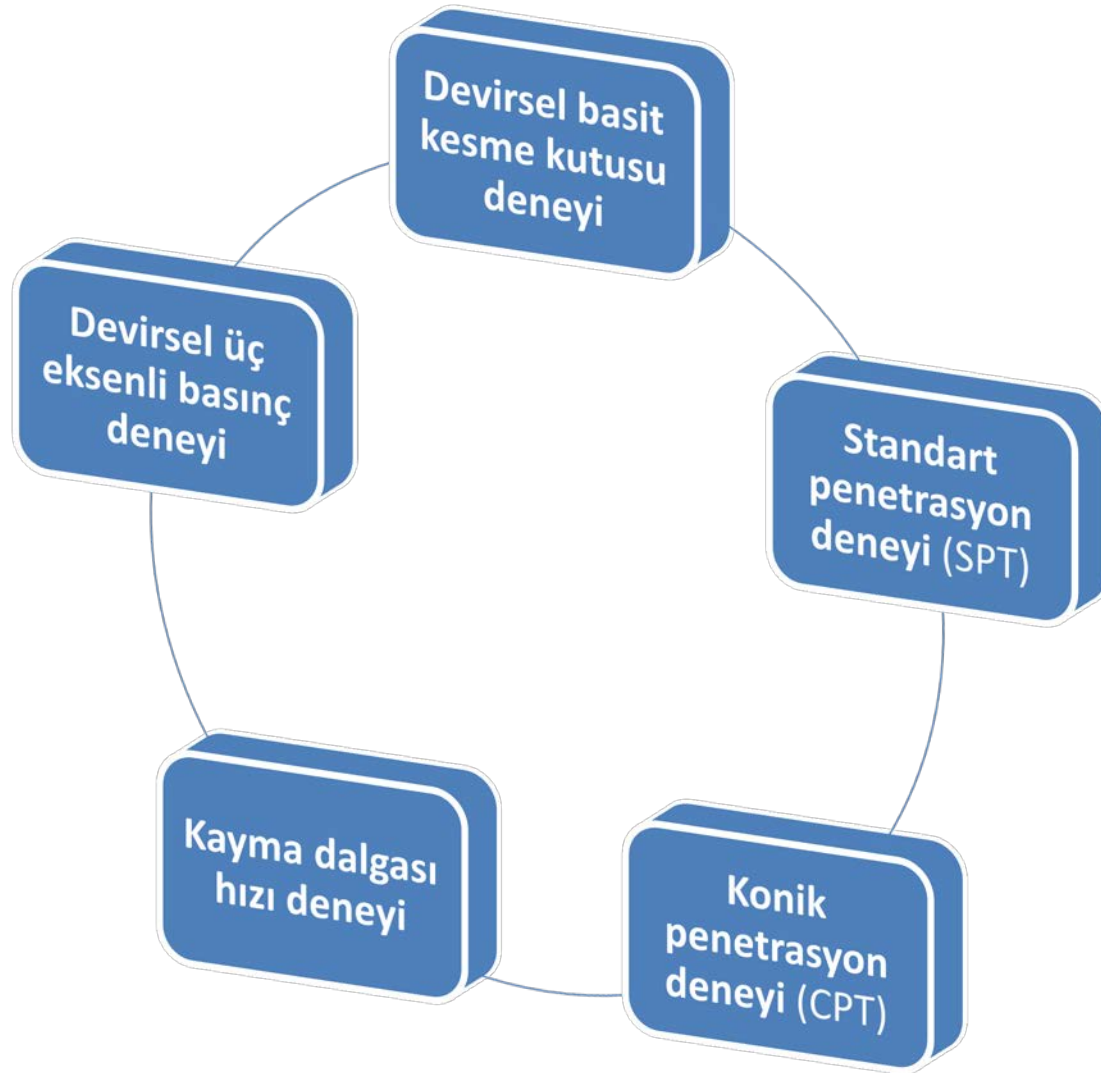
Sivilaşıma olabirliğinin sayısal yöntemlerle belirlenmesine yönelik 2 yöntem vardır:

“Örselenmemiş” numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesi

Arazi davranışları ile “indeks” test parametlerine dayalı ampirik bağıntıların kullanılması.

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Sıvılaşma Analizinde Kullanılan Laboratuvar ve Arazi Deneyleri



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Sıvılaşmayı Hesaplamak İçin Gerekli Ön Bilgiler

**Yeraltı su düzeyi :** Çoğunlukla ilk 3 m genellikle 20 m ye kadarki sular önemlidir

**Jeolojik birimler :** İlk 15 m ile 20 m arasında bulunan ve taşıma gücü düşük suya doymun kumlu, siltli kumlu birimler.

### Tane boyutu

- $D_{60}/D_{10} < 10$  olan kum – silt türü özellikle
- $D_{10}$  değerinin 0.005 ile 0.15 mm arasında olduğu zeminler.

**SPT sayısı** yüzeye yakın yerlerde  $N < 10$  ve 20 m derinlikte  $N < 20$  olan özellikle düşük göreceli sıkılıktaki kumlu yerler, sıvılaşabilir uygun ortamları oluşturur.

- O bölgede beklenen en büyük deprem büyüklüğü (**M**)
- Deprem oluşturabilecek kırığa en yakın uzaklık (**d**)
- O bölgede beklenen en büyük yer ivmesi (**a**)
- Yeraltısuyu düzeyi ve su tutan katman kalınlığı
- Yeraltı kesiti ve katmanların türü (Kum, Kil, Silt Oranı Tane Boyu).
- Katmanların (**V<sub>s</sub>**) kesme dalgası hızı ya da (**N<sub>30</sub>**) değeri
- Gözenek (boşluk) suyu basıncı (**U**).
- Yapının temel boyutu, ağırlığı ve oturuş biçimi
- Katmanların doğal birim hacim ağırlığı ( **$\gamma_n$** )
- Toplam düşey gerilme ( **$\sigma_v$** )
- Efektif düşey gerilme ( **$\sigma'_v$** )

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

Bir zeminin sivilaşmaya duyarlı olması gerçeği, bir depremin meydana gelmesi halinde sivilaşmanın oluşacağı anlamına gelmez.

Sivilaşmanın oluşması için, onu başlatacak önce kuvvetli bir örseleme veya tetikleme gerekir.

*Bu örselemenin karakterini tanımlamada birçok yöntem geliştirilmiştir.*

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Eşik İvme Kriteri (Dobry vd 1981)

Eşik ivme kriterinde emniyet katsayısı ( $F_a$ ) için aşağıdaki tanım yapılır

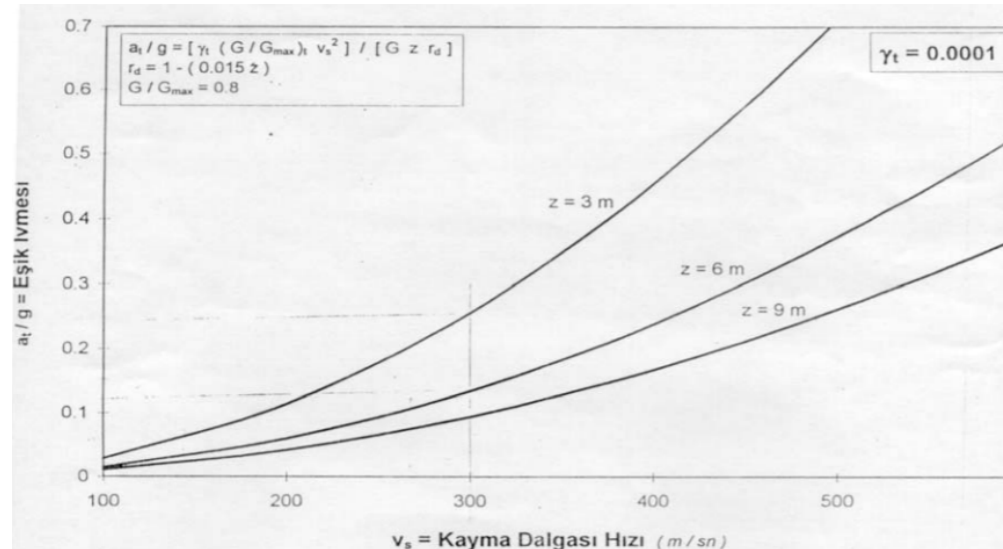
$$F_a = \frac{1.6 a_t}{a_{max}}$$

Burada,

$a_t$  = sivilaşmanın gerçekleşebilmesi için gerekli başlangıç (eşik) ivmesi,  
 $a_{max}$  = depremin meydana getireceği en büyük yer ivmesidir.

Eğer,

**$F_a \leq 1$  sivilaşma potansiyeli yüksek**  
 **$F_a > 1$  sivilaşma potansiyeli düşüktür**



Kayma dalgası hızı,  $V_s$  değeri kullanılarak sivilaşma potansiyelini belirleyen bu kriter Dobry vd., önermişlerdir.

*Eşik ivme değerleri önerisi, (Teri ve Tezcan 1996)*



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri (Seed vd 1981,1984 )

Kayma gerilmesi değerlerini kullanarak sivilaşma potansiyeli belirleyen yöntemdir. Kayma gerilmesini de standart penetrasyon testi (SPT) değerinden belirlemektedir. Bu kriterde sivilaşma emniyet katsayısı

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad z \leq 9.15m$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15 < z \leq 23m$$

$$r_d = 0.744 - 0.0082z \quad 23 < z \leq 30m$$

$$F_s = \frac{\tau_s}{\tau_0}$$

$$\tau_s = \alpha * \sigma'_v$$

$$\tau_0 = \frac{a_{max}}{1.6g} (\sigma'_v * r_d)$$

Burada;

$\tau_s$  = çalışma alanında sivilaşmanın başlayabilmesi için gerekli periyodik sınır kayma gerilmesi,

$\tau_0$  = aynı alanda bir depremin meydana getireceği ortalama kayma gerilmesidir.

**$F_s < 1$  sivilaşma olasılığı var.**

**$F_s > 1$  sivilaşma olasılığı yok**

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri (Seed vd 1981,1984 )

Çeşitli depremlerden elde edilen sivilaşma anındaki, periyodik yatay kayma gerilmesinin ( $\tau_s$ ) efektif düşey gerilmeye ( $\sigma'_v$ ) oranı ( $\alpha$ ) ile SPT arasındaki ilişkiler, grafik olarak Seed vd (1981, 1984) tarafından verilmiştir.

Düzeltilmiş SPT değerleri, ham veriler  $C_N$  düzeltme katsayısı ile çarpılarak elde edilir

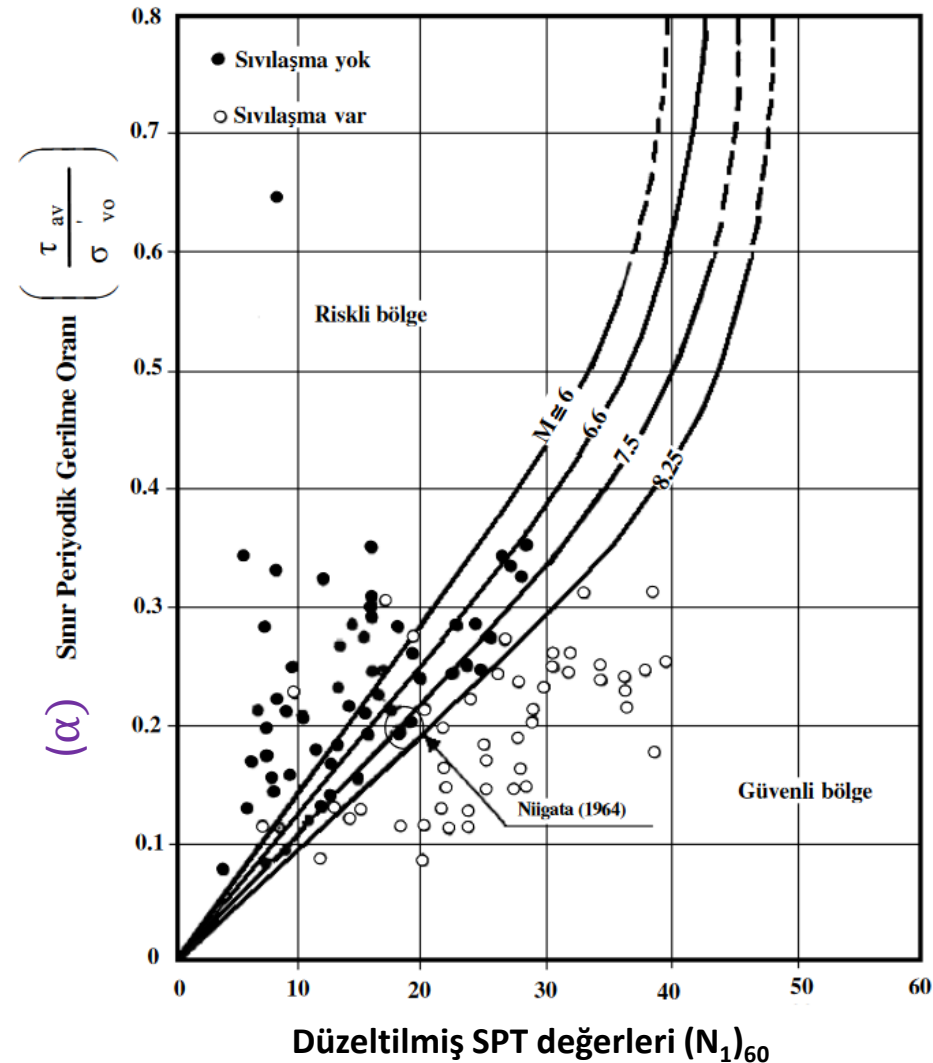
$$N_1 = C_N N$$

$N_1$  = düzeltilmiş SPT değerleridir.  
 $C_N$ , düzeltme faktörü; tekdüze bir efektif düşey basınca karşı gelen ve derinliğe bağlı olarak değişen bir katsayıdır

$$C_N = 0.85 \log(145 / \sigma'_v)$$

Burada  $\sigma'_v$  = efektif düşey basınç değeridir ve ton/m<sup>2</sup> alınmalıdır.

$\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma'_v}$  ile SPT arası ilişki (Seed et al.,1983)



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Periyodik Kayma Gerilmesi Kriteri (Seed vd 1981,1984 )

İstenen deprem büyüklüğü için,

$$\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma_v} \text{ oranı şekilden alınır.}$$

Bu orana, “periyodik sıvılaşma gerilmesi oranı” denilir.

Bu oran bulununca, sıvılaşma için gerekli yatay kayma gerilmesi,  $\tau_s$ , için

$$\tau_s = \alpha * \sigma'_v$$

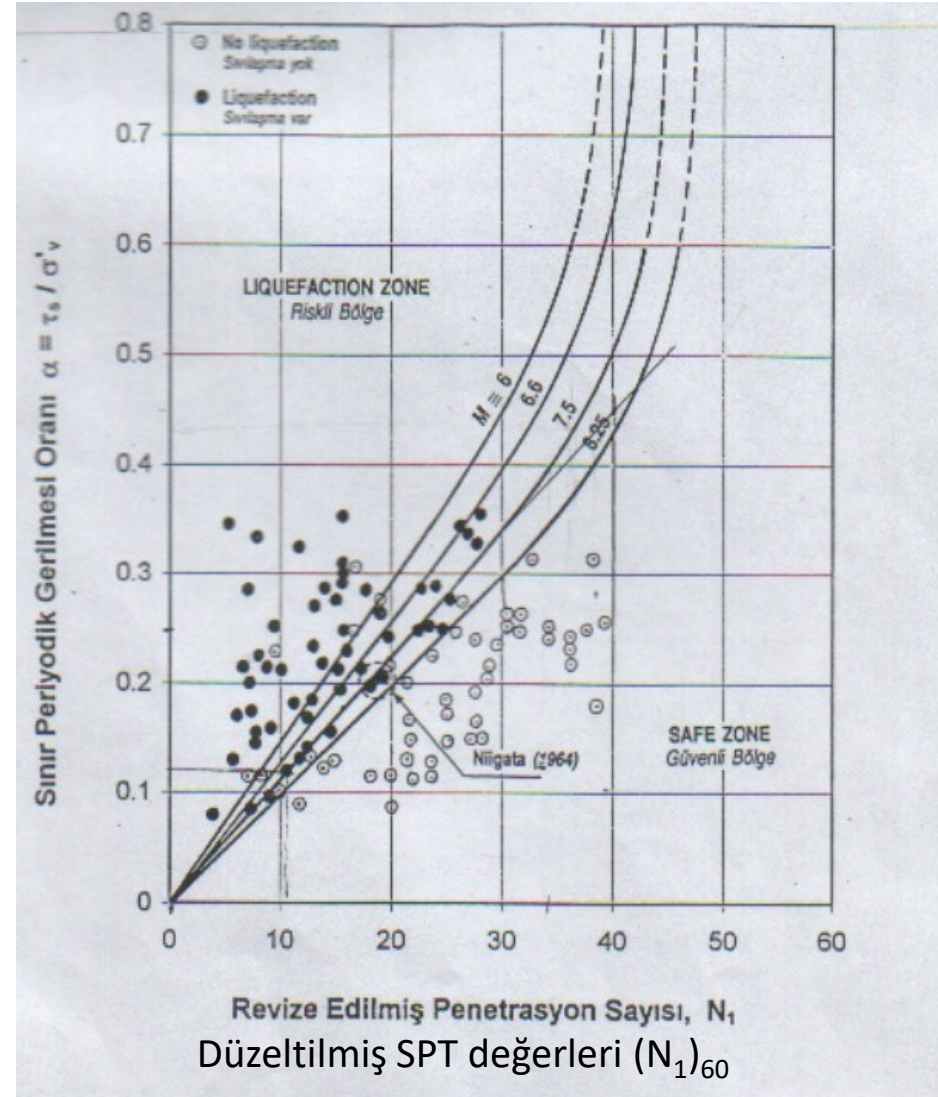
bağıntısı kullanılır.

Depremin oluşturacağı en büyük ivme  $a_{max}$ ' in etkisi ile meydana getireceği ortalama yatay kayma gerilmesi

$$\tau_0 = \left( \frac{a_{max}}{1.6g} \right) * \sigma'_v * r_d$$

bağıntısından hesaplanır.

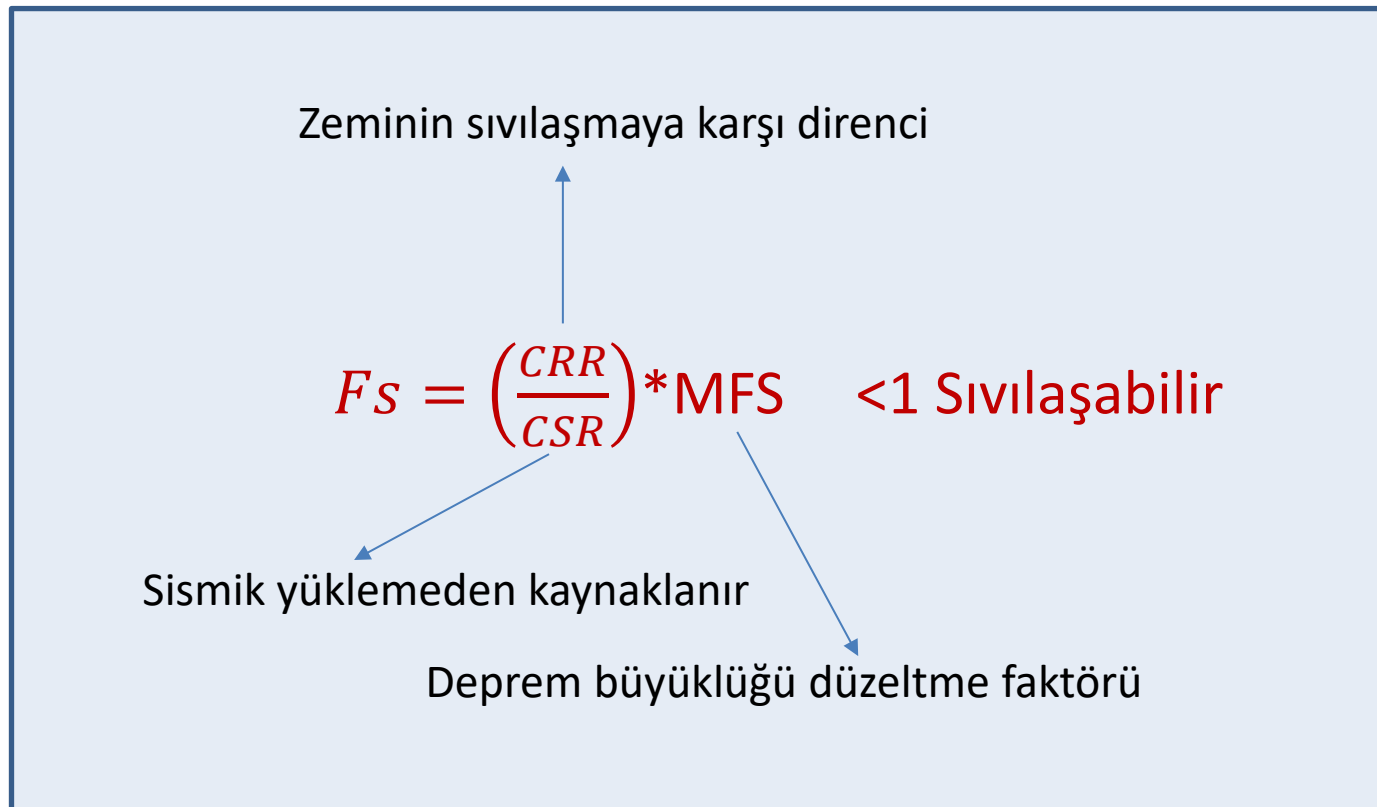
$$\alpha = \frac{\tau_s}{\sigma_v} \text{ ile SPT arası ilişki (Seed et al.,1983)}$$



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi (Seed ve Idriss, 1971; Youd vd., 2001)

Sıvılaşma direncini tanımlamak için kullanılan *çevrimsel kayma mukavemeti oranı* (**CRR**) ile depremin yol açtığı yer hareketinin etkisinin *çevrimsel kayma gerilmesi oranı* (**CSR**) ile karşılaştırması sonucu sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanmaktadır.



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

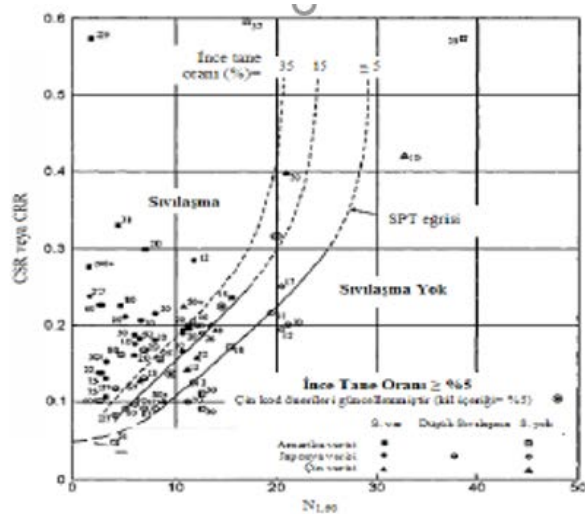
## CRR değerinin bulunması

**SPT deneyi verileriyle hesap:** Bunun için öncelikli olarak SPT darbe sayılarında bazı düzeltmeler yapılması önerilmektedir. (Denklem 4 ve 5).

Bu düzeltmeler enerji, derinlik, sondaj çapı gibi düzeltmelerdir. Ayrıca zeminin ince dane oranına (FC) göre aşağıdaki düzeltmenin yapılması önerilmektedir. (Denklem 6 ve 7).

Bu durumda  $M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sivilaşma direnci 8 numaralı bağıntı ile bulunur.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60,cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (8)$$



4. 7.5 büyüklüğündeki depremlerdeki verilerle çizilen SPT sivilaşma eğrisi.

$$N_{1,60} = N C_N C_R C_S C_B C_E \quad (4)$$

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

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

$$\dot{I}TO \leq \%5 \rightarrow \alpha = 0 \quad \text{ve} \quad \beta = 1.0$$

$$\%5 < \dot{I}TO < \%35 \rightarrow \alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{\dot{I}TO^2}\right) \quad (7)$$

$$\dot{I}TO \geq \%35 \rightarrow \alpha = 5.0 \quad \text{ve} \quad \beta = 1.2$$

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## CRR değerinin bulunması

**SPT deneyi verileriyle hesap:** Sıvılaşma analizi için SPT düzeltme faktörleri (Youd vd., 2001)

|                          |                          |       |                  |
|--------------------------|--------------------------|-------|------------------|
| <b>Kuyu çapı</b>         | 65-115 mm                | $C_B$ | 1.00             |
| <b>Kuyu çapı</b>         | 150 mm                   | $C_B$ | 1.05             |
| <b>Kuyu çapı</b>         | 200 mm                   | $C_B$ | 1.15             |
| <b>Tij uzunluğu</b>      | <3 m                     | $C_R$ | 0.75             |
| <b>Tij uzunluğu</b>      | 3-4 m                    | $C_R$ | 0.80             |
| <b>Tij uzunluğu</b>      | 4-6 m                    | $C_R$ | 0.85             |
| <b>Tij uzunluğu</b>      | 6-10 m                   | $C_R$ | 0.95             |
| <b>Tij uzunluğu</b>      | > 10 m                   | $C_R$ | 1.00             |
| <b>Örnekleme yöntemi</b> | İç tüp kullanıldığında   | $C_S$ | 1.00             |
| <b>Örnekleme yöntemi</b> | İç tüp kullanılmadığında | $C_S$ | 1.1-1.3<br>(1.2) |

$(N1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot (ER)$

ER: Enerji oranı



# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## CRR değerinin bulunması

**CPT deneyi verileriyle hesap:** Koni penetrasyon deneyi uç direncinin, sıvılaşma direncinin belirlenmesinde kullanılmasında da bazı düzeltmeler yapmak gerekmektedir. (Denklem 9 ve 10). Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c < 2.6$  ise zemin killi ve sıvılaşmayan zemin olarak kabul edilir. Eğer  $n=1$  alınarak hesaplanan  $Q$  kullanılarak hesaplanan  $I_c > 2.6$  ise,  $CQ$  ve  $Q$ ,  $n = 0.5$  alınarak tekrar hesaplanır ve  $I_c$  değeri yeniden belirlenir, eğer  $I_c < 2.6$  ise sıvılaşma analizlerinde kullanılır, eğer  $I_c > 2.6$  ise  $n=0.7$  alınarak  $I_c$  tekrar hesaplanır ve sıvılaşma analizlerinde kullanılır.

$M=7.5$  büyüklüğünde bir deprem için sıvılaşma direnci; bağıntıları kullanılarak bulunabilmektedir. (Denklem 17 ve 18).

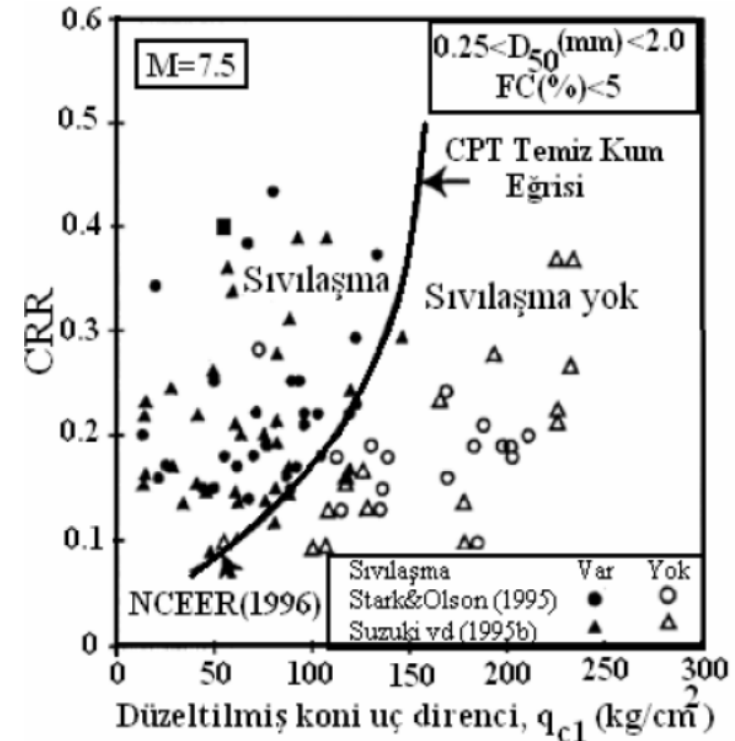
$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_c}{P_a} \quad (9)$$

$$C_Q = \left( \frac{P_a}{\sigma_v'} \right)^n \quad (10)$$

$n=1.0$  (kil zeminler için)  
 $=0.50$  (temiz kumlar için)

$$q_{c1N,cs} < 50 \rightarrow CRR_{7.5} = \frac{0.833 q_{c1N,cs}}{1000} + 0.05 \quad (17)$$

$$50 \leq q_{c1N,cs} < 160 \rightarrow CRR_{7.5} = 93 \left( \frac{q_{c1N,cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (18)$$

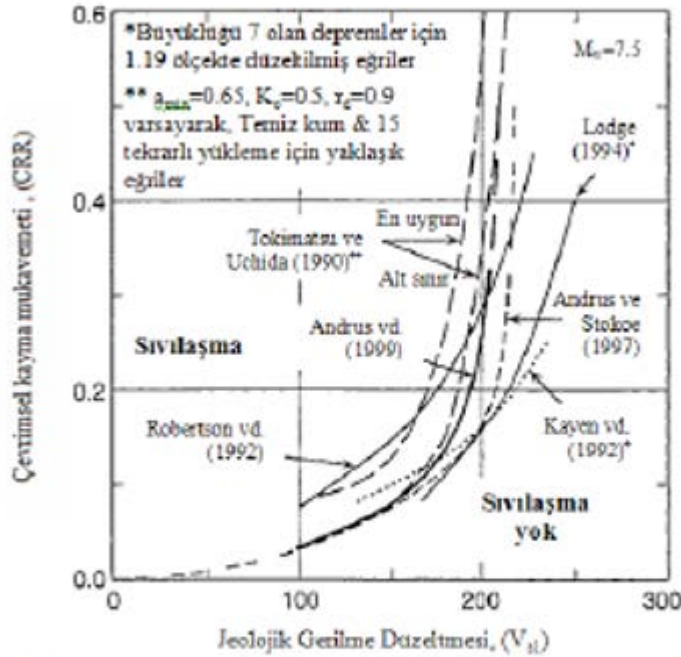


# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

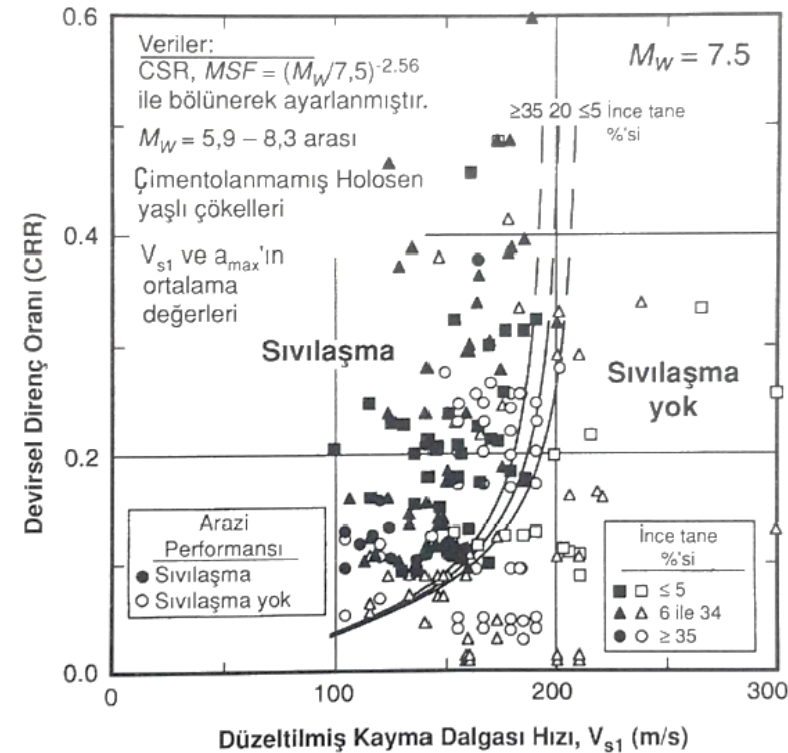
## CRR değerinin bulunması

**Kayma dalgası hızı verileriyle hesap:** 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.

Sıvılaşma direnci (CRR) değerinin hesaplanmasında gerilme seviyesine göre düzeltilmiş kayma dalgası hızından korelasyon yolu ile yararlanmak



Düsey toprak basıncı düzeltilmesi yapılmış kayma dalgası hızı ile CRR arasındaki ilişki.

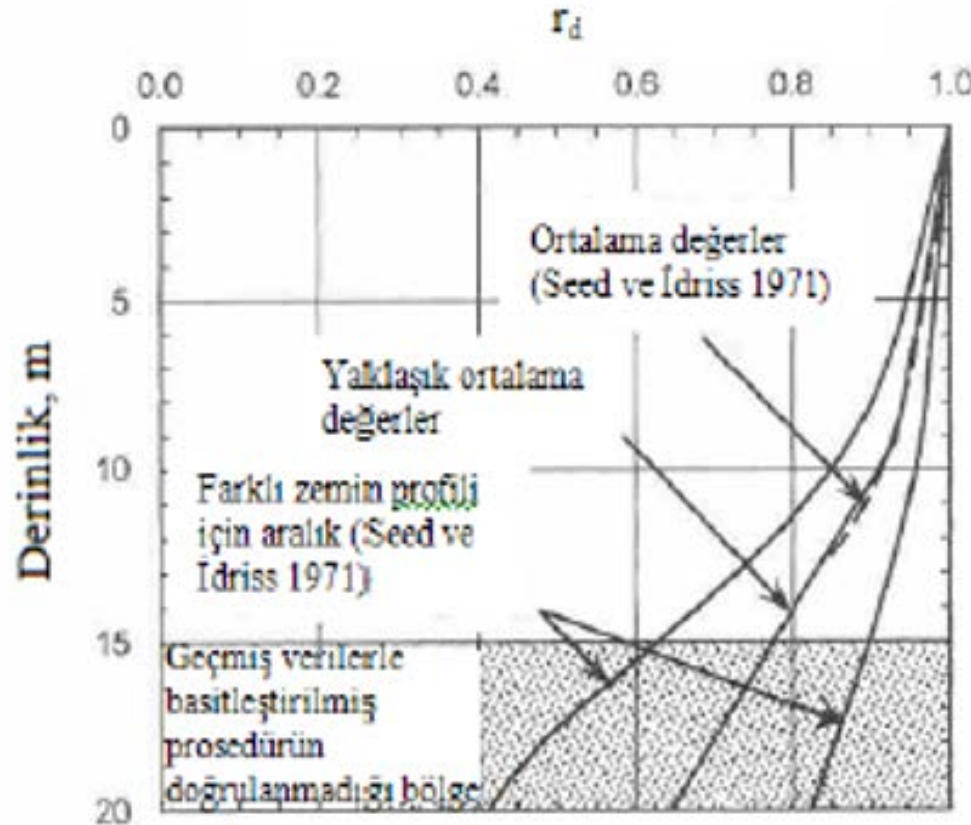


# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

## CSR değerinin bulunması

**Çevrimsel kayma gerilmesi değeri depremde oluşan en fazla ivme değerine bağlıdır. Ayrıca efektif gerilme, toplam gerilme ve gerilme azaltma katsayısını da içermektedir.** Gerilme azaltma katsayısı grafiği aşağıdaki Şekil'de gösterilmiştir. Gerilme azaltma katsayısı derinliğin 9.15 m'ye eşit ve az olması durumu ve 9.15 m'den fazla olması durumuna göre değişmektedir. Bu katsayı 23 m'ye kadar geçerli olmaktadır.

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



$a_{max}$  = yüzeydeki en büyük yatay ivme

$\sigma_v$  = toplam düşey gerilme

$\sigma'_v$  = efektif düşey gerilme

$r_d$  = gerilme azaltma katsayısı

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad z \leq 9.15m$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 9.15 < z \leq 23m$$

$$r_d = 0.744 - 0.0082z \quad 23 < z \leq 30m$$

$\tau/\sigma_0$  : devrimsel gerilim oranı

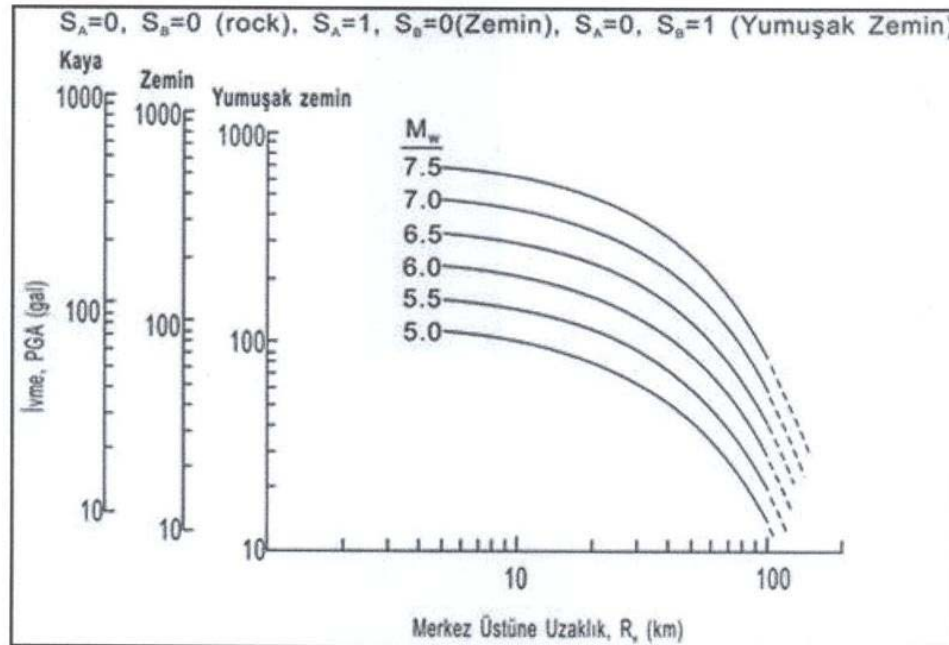
$\tau_{av}$  : sivilaşma analizi yapılan seviyeye etkiyen makaslama gerilimi

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

Türkiye için geliştirilmiş ivme azalım ilişkisi (Ulusay vd., 2004)

$$PGA = 2.18 e^{0.0218 (33.3 \frac{M_w}{e} + R_e + 7.8427 S_A + 189282 S_B)}$$

$M_w$ : Moment büyüklüğü  $R_e$ : Merkez üstüne uzaklık



Etkin (efektif) gerilmenin hesaplanması

$$\sigma = (h_1 + h_2) \gamma_s$$

$$\sigma'_0 = H \gamma_s - \gamma_w (H - h_1)$$

A noktasına etkiyen toplam  
ve efektif gerilimler

$\gamma, \gamma_w$ : zeminin ve suyun birim hacim ağırlıkları

# SIVILAŞMA OLASIĞININ BELİRLENMESİ

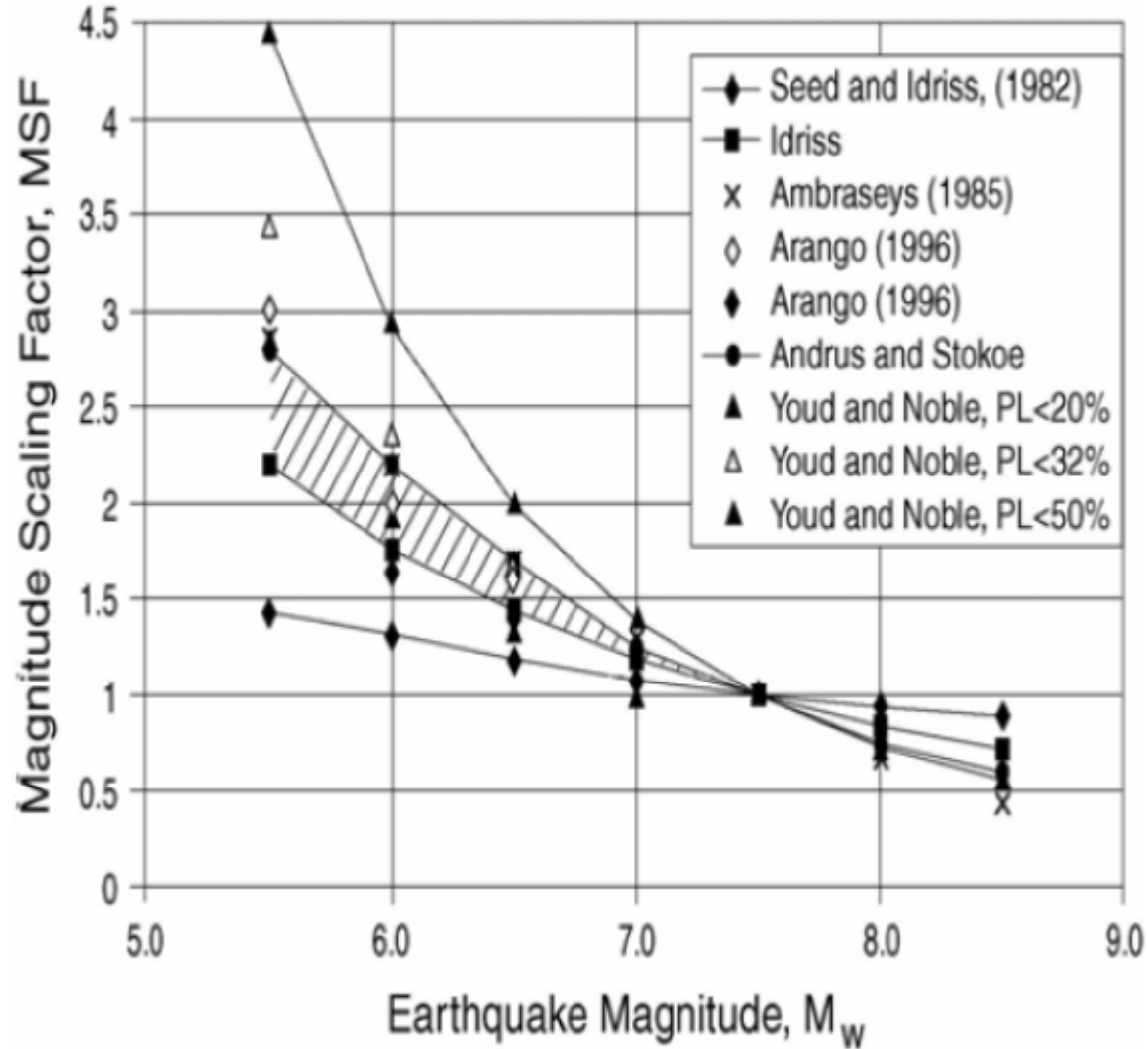
## Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü

Youd ve Noble 1997

| Magnitude, $M$ | MSF       |
|----------------|-----------|
| 5.5            | 2.20–2.80 |
| 6.0            | 1.76–2.10 |
| 6.5            | 1.44–1.60 |
| 7.0            | 1.19–1.25 |
| 7.5            | 1.00      |
| 8.0            | 0.84      |
| 8.5            | 0.72      |

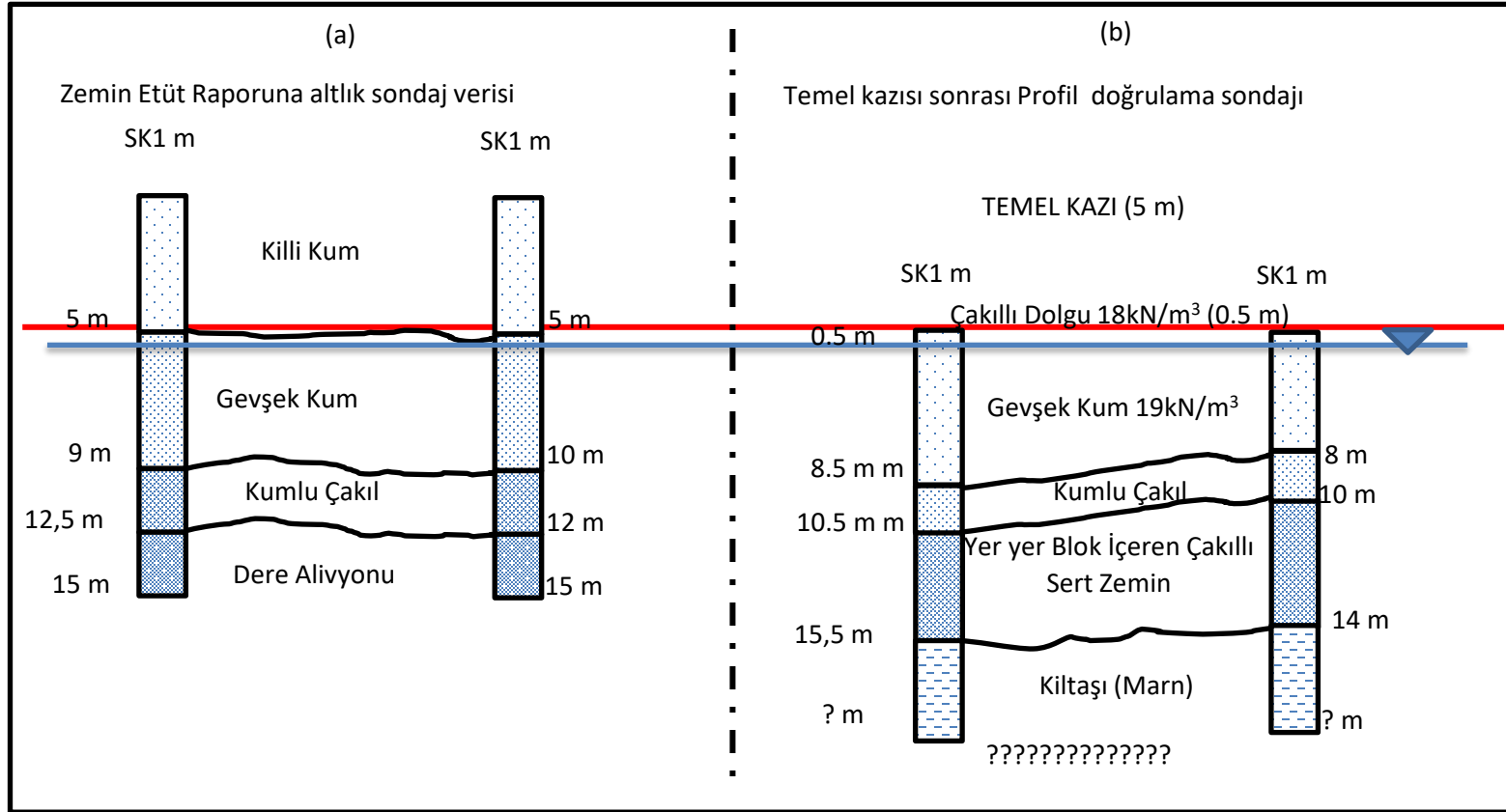
Bu düzeltme için Youd (2001) bir öneride bulunmuştur.

$$MSF = (M_w / 7.5)^n$$
$$n = -3.3 \quad M_w < 7.5$$
$$n = -2.56 \quad M_w > 7.5$$



# Uygulama

Zemin profili şekildeki gibi olan inşaat alanına yakın büyük bir aktif fay bulunmakta olup, mühendislik çalışmaları senaryo deprem için  $M_w=7.5$  magnitütlü deprem için pik ivmenin  $0.18\text{ g}$  olacağını göstermektedir. İnşaat alanı için sıvılaşma analizi yapınız ( $SPT=9$ ,  $C_u=73$ ,  $V_s=173\text{m/sn}$ ).



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



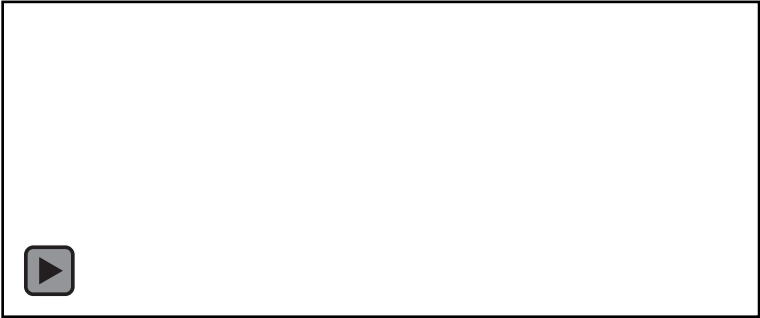
# SIVILAŞMADAN KAYNAKLANAN ZARARLARIN AZALTILMASINDA KULLANILAN TEKNİKLER

1. Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerde yapı inşasından kaçınılması
2. Sıvılaşmaya karşı uygun temel tipi seçimi ve dayanıklı yapı inşası
3. Zemin iyileştirmesi



# ZEMİN İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİ

| Genel Kategori                                                            | İyileştirme Yöntemi                                                                                                                                                                                                                  | Notlar                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Kazı ve/veya Sıkılaştırma                                              | (a) Sıvılaştırılabilir zeminin kazılması ve sahadan uzaklaştırılması<br>(b) Sıvılaştırılabilir zeminin kazılıp aynı zeminin sıkıştırılarak yeniden yerleştirilmesi<br>(c) Sıvılaştırılabilir zeminin yerinde sıkılaştırılması        | Sıvılaştırılabilir zeminin kazılması ve sahadan uzaklaştırılması genellikle ekonomik bir yöntem değildir.<br>Sıvılaştırılabilir zemin tabaka derinliğini aşan temel derinlikleri mümkünse düşürülmelidir.                           |
| II. Yerinde sıkılaştırma yöntemleri                                       | (a) Titreşimli sonda ile kompaksiyon<br>(b) Dinamik kompaksiyon (Ağırlık düşürme)<br>(c) Sıkılaştırma (kompaksiyon) kazıkları<br>(d) Patlatma ile derin sıkıştırma<br>(e) Sıkılaştırma Enjeksiyonu                                   | Titreşimle sıkılaştırma temiz kumlarda etkin bir yöntemdir ve çakıl kolonlarla beraber de kullanılabilir.<br>Sıkılaştırma kazıkları zemine iletilen kayma gerilmelerinde bir azalmaya yol açarak sıvılaşmaya karşı direnci artırır. |
| III. Diğer zemin iyileştirme yöntemleri                                   | (a) Sızma enjeksiyonu<br>(b) Yüksek Basıncılı Jet Enjeksiyonu<br>(c) Derin karıştırma<br>(d) Drenler <ul style="list-style-type: none"><li>- Çakıl drenler</li><li>- Kum drenler</li><li>- Şerit drenler</li></ul><br>(e) Ön yükleme | Sızma enjeksiyonu çakıllı ve temiz kum karışımlarında etkin olarak kullanılır.<br>Birçok dren kurulum işlemi sırasında aynı zamanda zemin de sıkılaşmaktadır.                                                                       |
| IV. Banket, hendek, sahil duvarı, ve diğer istinat yapıları ve sistemleri | (a) Serbest yüzeyde istinat duvarları veya destek yapıları ile büyük yanal yayılmaları önlemek                                                                                                                                       | Kıyı liman yapılarında ve sahil kenarındaki yapılaşmalarda sıklıkla tercih edilir.                                                                                                                                                  |
| V. Derin temeller                                                         | (a) Çakma kazıklar<br>(b) Fore kazıklar                                                                                                                                                                                              | Zemin sıkılaştırması sağladığı gibi zemine aktarılan kayma gerilmelerinde azalmaya sebep olarak sıvılaşmaya karşı direnci artırır.                                                                                                  |

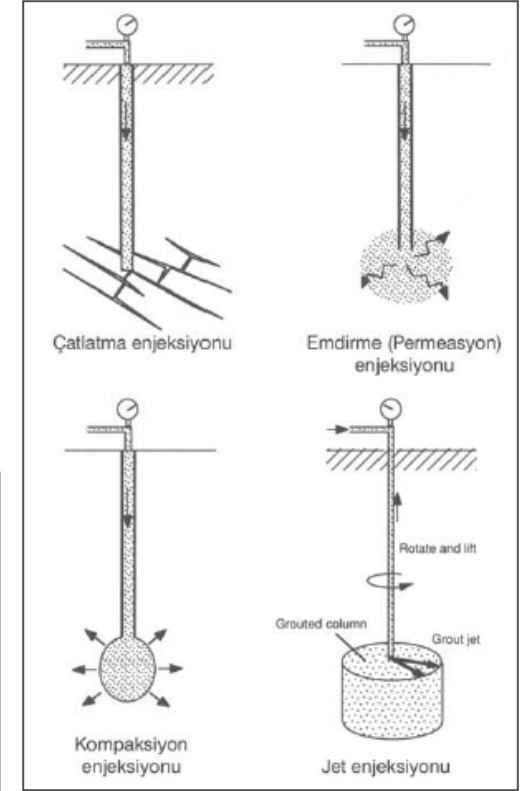


# ZEMİN İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİ

## *Enjeksiyon ve Karıştırma Teknikleri*

Zemin daneleri aralarındaki boşlukları doldurmak ve daneler arası teması güçlendirmek için zemine çimentolu malzemeler enjekte edilmesidir.

Performansı yüksek olmasına rağmen maliyeti yüksek olduğu için diğer iyileştirme tekniklerinin uygulanamadığı durumlarda kullanılmaktadır.



Şekil 1 - Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi

# KAYNAKLAR

- Ansal, A.M., İ.T.Ü. İnş. Fak., “Depremlerde Yerel Zemin Davranışları”, Bilim ve Teknik, Sayı: 384 - Deprem Makaleleri, İ.M.O., Ocak 2000.
- Ansal, A., Erken, A., Yıldırım, H., İyisan, R., Okur, V., Güllü, H., Bayraklı, Y., Özçimen, N., “Zeminlerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışları ve 17 Ağustos Kocaeli Depremi”, Türkiye Mühendislik Haberleri, İ.M.O., Sayı: 404, Aralık 1999.
- Arioğlu, E., Arioğlu N., Yılmaz, A.O., 2000, Zemin Sıvılaşması I. ve II. Hazırbeton Yıl:7, Sayı:38, Mart-Nisan Ayı
- Dobry, R., Stokoe, K.H., Ladd, R.S., and Yound, T.L., “Liquefaction Susceptibility from S-wave Velocity”, Preprint 81-544, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, USA, October 27, 1981.
- Özaydın, K. 2007, ZEMİNLERDE SIVILAŞMA Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul Sixth National Conference on Earthquake Engineering, 16-20 October 2007, İstanbul, Turkey
- Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K.I., 1984. Simplified Procedures for Assessing Liquefaction During Earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 49-58.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M., 1981. Evaluation of Liquefaction Potential of Sand Deposits Based on Observations of Performance in Previous Earthquakes, Preprint 81-544, ASCE National Convention, October 27 1981, St. Louis, Missouri, USA.
- Seed, H.B., 1979. Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground During Earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT2, pp. 201-255.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M and Arangi I 1983. evaluation of Liquefaction potential using field performance data. J.Geotech. Engrg. ASCE. Vol. 109, NO GTA, April, pp. 257-270
- Uyanık, 2002, Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analizi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.(Yayınlanmamış)
- Ulusay, R. Tuncay E. JEO469 JEOTEKNİK VERİ TOPLAMA VE DEĞERLENDİRME TEKNİKLERİ
- Wang J.G.Z.Q., and Law,K.J. 1994,New emprical relationship among magnitude, rupture length rupture width, rupture area and surface displacement, Bulletin of the seismological society of America, Vol 84, No:4 1984.