

# INS308

## Zemin Mekaniği II

*Zeminlerde Kayma Direncinin Ölçümü*

Doç. 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

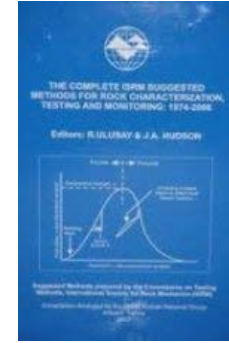
|           |                                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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. |



# KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin ve kayaların kayma direncini belirlemek için başvurulacak kitaplar ve standartlar

- ASTM (American Society for Testing and Material) Standartları
- TSE Standartları
- AASHTO standartları
- ISRM (The International Society for Rock Mechanics) test metotları (Kayalar için)
- Konu ile ilgili yazılmış çeşitli kitaplar

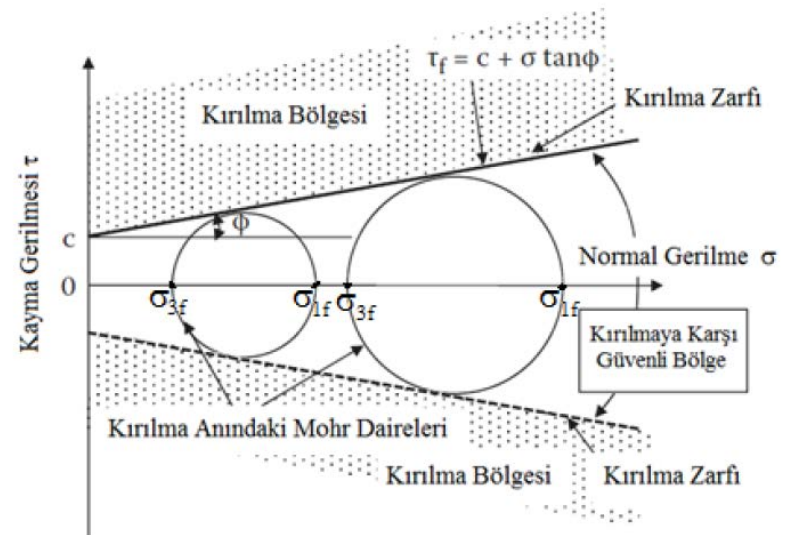
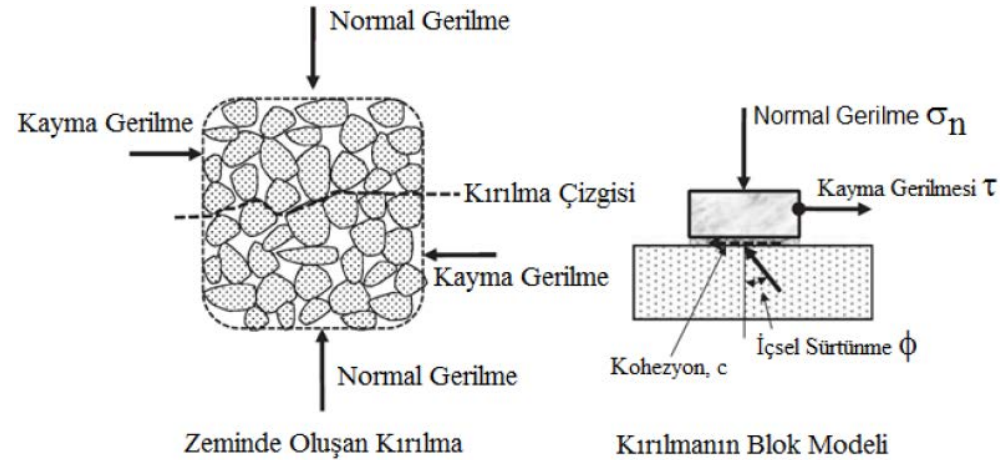


|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |  |  |  |
| TSE.NET                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Standard Arama                                                                        |  | Sisteme Giriş                                                                       |  |
| Standard Detayı                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| İptal Standard<br>TÜRK STANDARDI                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| TS No :                                                                           | TS 1901                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |  |                                                                                     |  |
| Kabul Tarihi :                                                                    | 25.04.1975                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Hazırlık Grubu :                                                                  | İnşaat İhtisas Grubu                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Doküman Tipi :                                                                    | ST                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Yürürlük Durumu :                                                                 | H (İptal Edilmiş Standard/Withdrawn standard)                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Başlık :                                                                          | İnşaat mühendisliğinde sondaj yolları ile örselenmiş ve örselenmemiş numune alma yöntemleri                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Başlık (İng) :                                                                    | Methods of and Obtaning of Disturbed and Undisturbed Samples for Civil Engineering Purposes                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Türü :                                                                            | Metot                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                       |  |                                                                                     |  |
| Kapsam :                                                                          | Bu standard, inşaat mühendisliği yönünden incelenmesi gereken, killi, kumlu veya çakıllı zeminler ile kayada sondaj yapılmasını, delinen yer katlamalarında laboratuvar deneyleri için örselenmiş veya örselenmemiş numune almasını kapsar. Zemin özelliklerinin yerinde saptanması amacıyla yapılan arazi deneylerini kapsamaz... |                                                                                       |  |                                                                                     |  |

## KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin kayma mukavemeti, sert bir yüzeye sahip katı bir plaka üzerinde bir blok ile modellenmiş ve zeminin mukavemeti, partiküller arasındaki içsel **sürtünme açısı** ve aralarındaki **kohezyon** direnci ile ifade edilmiştir.

Zeminlerin kayma mukavemeti sabit bir değer değildir. Kırılma durumunda kayma düzlemi üzerine etkiyen toplam veya efektif normal gerilmeye bağlıdır.



*Zeminlerde kırılma modellenmesi (Ishibashi and Hazarika 2010)*

# KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Zeminlerin kayma dayanımı; temellerin taşıma gücünün hesabında, karayolu ve hava alanlarının projelendirilmesinde, şevlerin denge analizlerinde, toprak dolgularda ve dayanma yapılarının inşasında, vb., çok önemlidir.

Zeminler üzerinde yapılan deneyler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

**Drenajsız Deneyler (UU):** Numuneler üzerine uygulanan hızlı yükleme ile drenaja müsaade edilmez ve böylelikle zeminlerin drenajsız kayma dayanımı belirlenir. *Toplam gerilmelere göre mukavemet elde edilir.*

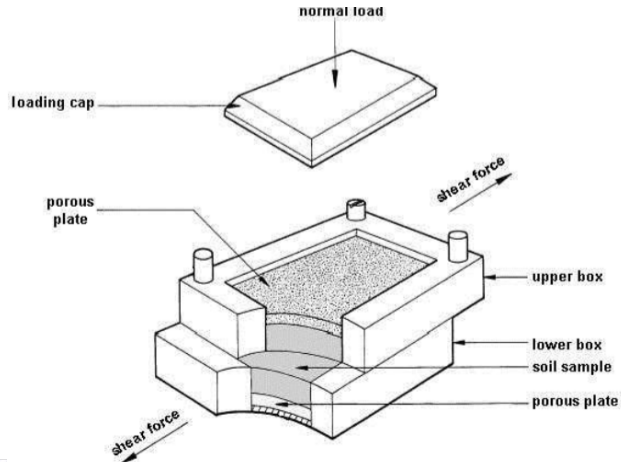
**Konsolidasyonlu-Drenajsız Deneyler (CU):** Numuneler, üzerlerine uygulanan normal gerilmeler altında konsolide edilir ve daha sonra hızlı bir yükleme ile drenaja izin verilmeden kesilir. *CU parametreleri, zeminlerin tamamen konsolide olduğu ve mevcut gerilme sistemi altında dengede olduğu stabilite problemlerinde kullanılır.*

**Konsolidasyonlu Drenajlı Deneyler (CD):** Numuneler, CU deneyinde olduğu gibi, konsolide edilir. Daha sonra zemin numunesi, boşluk suyu basıncı oluşumuna izin vermeyecek hızda **yavaş yükleme** ile kesilir. Bu bakımdan bu deneylerde toplam ve efektif gerilmeler birbirine eşittir. *CD parametreleri gerçek arazi koşullarını temsil eder. Toprak dolgu barajlarda uzun süreli stabilite ve sızma problemleri, katı killerde yapılan kazıların analizi bu tür parametrelere ihtiyaç duyar.*

# DİREKT KESME DENEYİ

Direkt kesme deneyi kayma direnci parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan ilk deney metodudur. Kare ve daire şekilli modelleri vardır.

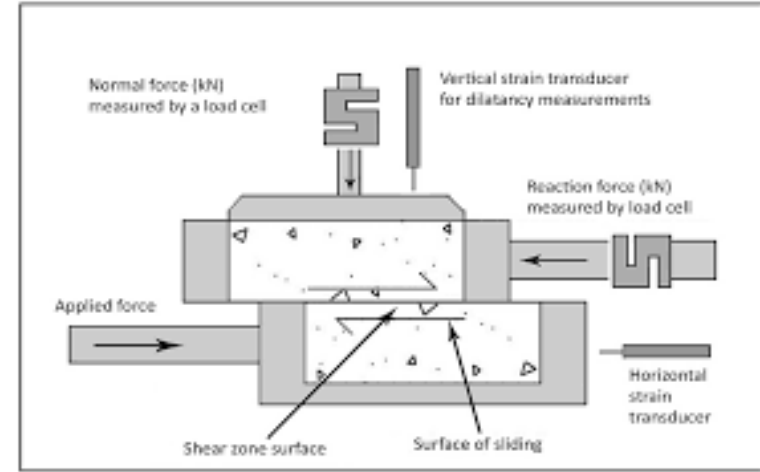
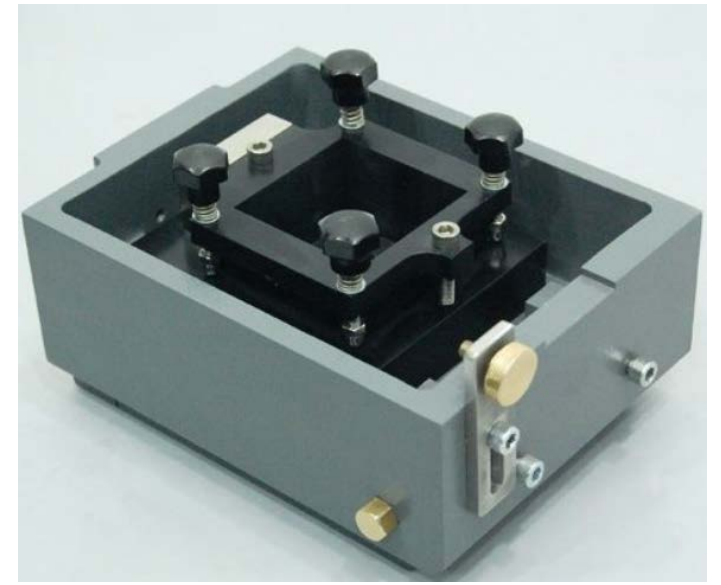
*Bu deney aleti ile kırılma düzlemi yatay olacak şekilde numune kırımı yapılır ve asal gerilmeler doğrudan elde edilmez.*



[https://www.youtube.com/watch?v=f\\_NAPV6obpo&ab\\_channel=UT-EST-MaterialTestingEquipment](https://www.youtube.com/watch?v=f_NAPV6obpo&ab_channel=UT-EST-MaterialTestingEquipment)

# DİREKT KESME DENEYİ

## Deneyin yapılışı



Yükleme başlığı ile 2, 6, 12 18, 36, 72 kg gibi sabit düşey N yükü ve düşey yük sabitken de aletin durumuna göre elle ya da otomatik olarak artırılan yatay bir P kesme kuvveti uygulanarak, 1 mm/dk'lık kesme hızıyla numune kesmeye tabi tutulur. Gittikçe artan kesme kuvvetine karşın, zemin örneği önce direnir, sonra iki parçayı ayıran düzlem boyunca kesilir. Uygulanan kayma kuvveti, bir yük halkası ile ölçülür.

# DİREKT KESME DENEYİ

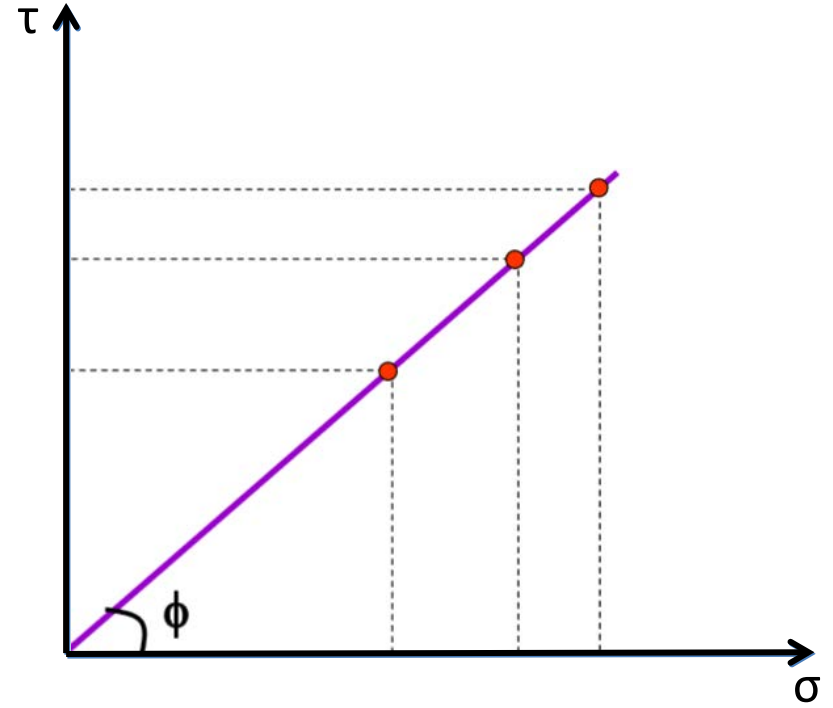
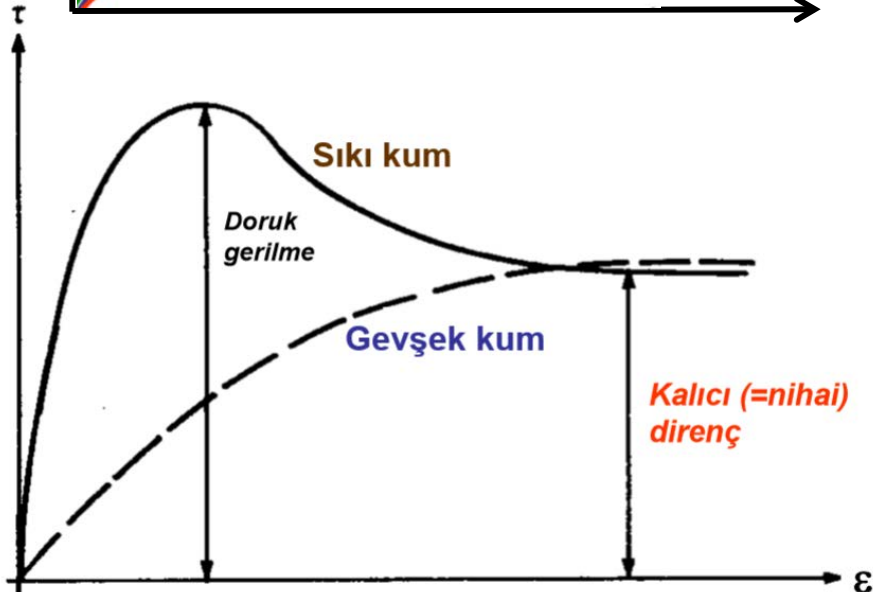
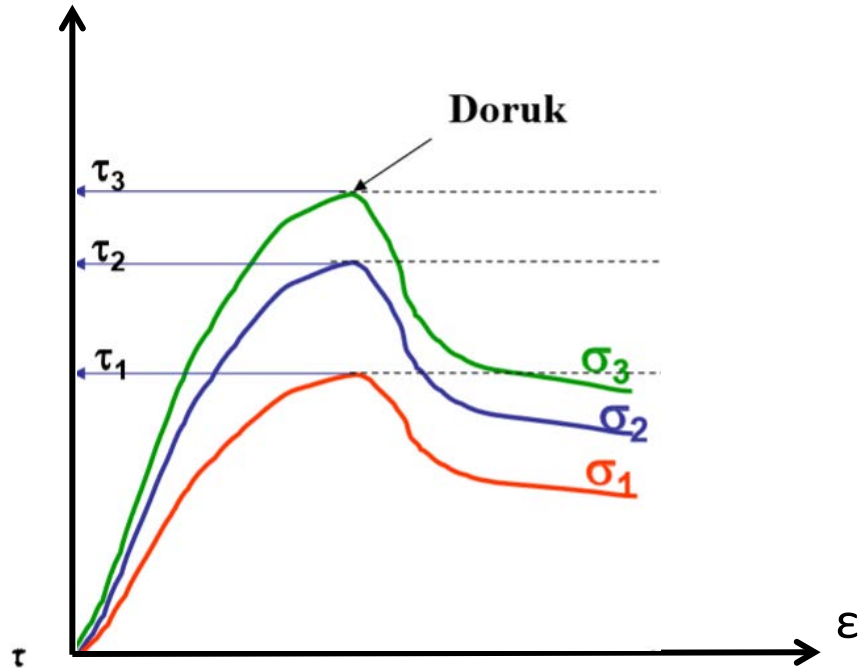
## *Deneyin Yapılışı*





# DİREKT KESME DENEYİ

*Hesaplamalar ve sonuçların gösterilmesi*



- Genellikle sadece göreceli olarak yavaş, drenajlı deneyler yapılır.
- Killer için kesme hızı artık boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde seçilir.
- Kumlar ve çakıllar üzerinde deneyler hızlı yapılabilir.
- Kumlar ve çakıllar üzerinde genellikle deneyler kuru olarak yapılır.

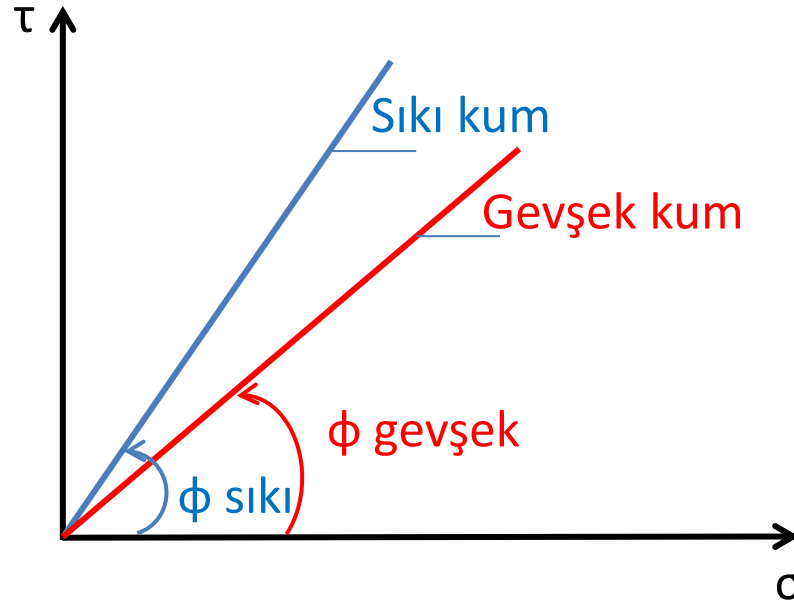
# DİREKT KESME DENEYİ

## Hesaplamalar ve değerlendirmeler

Kumlar üzerinde yapılan kesme kutusu deneyine göre, kumların rölatif sıkılığındaki artışa bağlı olarak içsel sürtünme açısı artmaktadır.

Kumlarda, içsel sürtünme açısı zeminin iyi yada kötü derecelenmiş olmasına tanelerin şekline bağlıdır. İyi derecelenmiş kumda içsel sürtünme açısı, kötü derecelenmişe göre daha büyüktür. Köşeli taneli kumlarda yuvarlak taneliye göre daha büyüktür.

Yatay bir düzlemde, serbest dökülerek oluşturulmuş bir kuru kum yığının şev açısı o kumun gevşek durumdaki içsel sürtünme açısına eşittir.





# DİREKT KESME DENEYİ

## *Dezavantajları - Avantajları*

### *Avantajları*

- Ucuz, hızlı ve basit bir deney
- Kesme yönünü değiştirerek büyük deformasyonlara ulaşılabilir.
- Bu zeminin rezidüel kayma mukavemetini bulmak için yararlıdır.
- Büyük örnekler üzerinde deneyler yapılabilir.

### *Dezavantajları*

- Kesilmeye zorlanan yüzeyin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabilir.
- Deney sırasında asal gerilmeler ve asal gerilme doğrultuları bilinmez.
- Zeminin en zayıf zon içerisinde yenilmesine izin verme yerine kesmenin belirli bir düzlem boyunca oluşmasına olanak sağlayabilir.
- Kesme sırasında kesme düzleminde gerilme yığılmaları oluşur (kesme düzleminde üniform olmayan gerilme dağılımı).
- Boşluk suyu basıncı ölçümleri doğru olmaz. Drenajsız deneylerden efektif gerilme parametreleri belirlenemez.
- Drenajsız kayma mukavemeti güvenli olmaz çünkü yüksek hız uygulanmazsa yerel drenaj önlenemez.
- Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebildiği deformasyona ulaşmak için deneyin durdurularak geriye alınması ve çevrimler halinde yapılması da birtakım sorunlar yaratabilmektedir.

# DİREKT KESME DENEYİ

## *Dezavantajları - Avantajları*

### *Unutma !*

Bu deney düzeni ile, kesme sırasında zeminin drenajını kontrol etmek ancak yükleme hızını zeminin permeabilitesine göre ayarlamak ile mümkün olmaktadır.

Permeabilitesi yüksek zeminlerde (kumlarda) drenajlı koşullar geçerli olurken, düşük permeabiliteli zeminlerde (killer gibi) normal yükleme hızlarında drenajsız, çok yavaş yükleme hızlarında drenajlı koşullar geçerli olmaktadır.

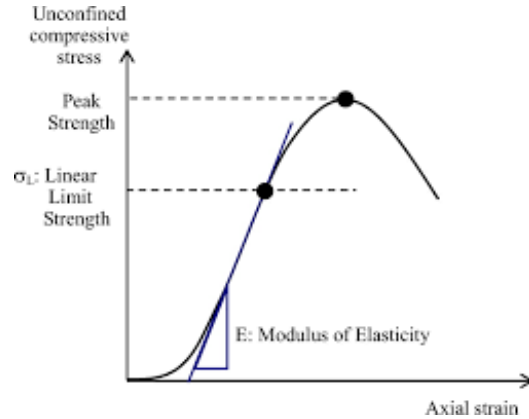
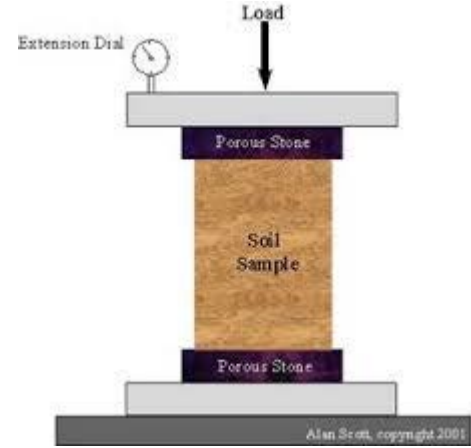
Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmenin mümkün olmaması, göçmeye ulaşılmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kurulma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır.

Uygulamada, kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemetini saptamak için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen kayma mukavemeti açısı  $\phi$  drenajlı yükleme durumları için olup, arazi koşulları ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. Deney numunesinin arazi boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmasına dikkat etmek gerekmektedir

# SERBEST BASINÇ DENEYİ

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır.

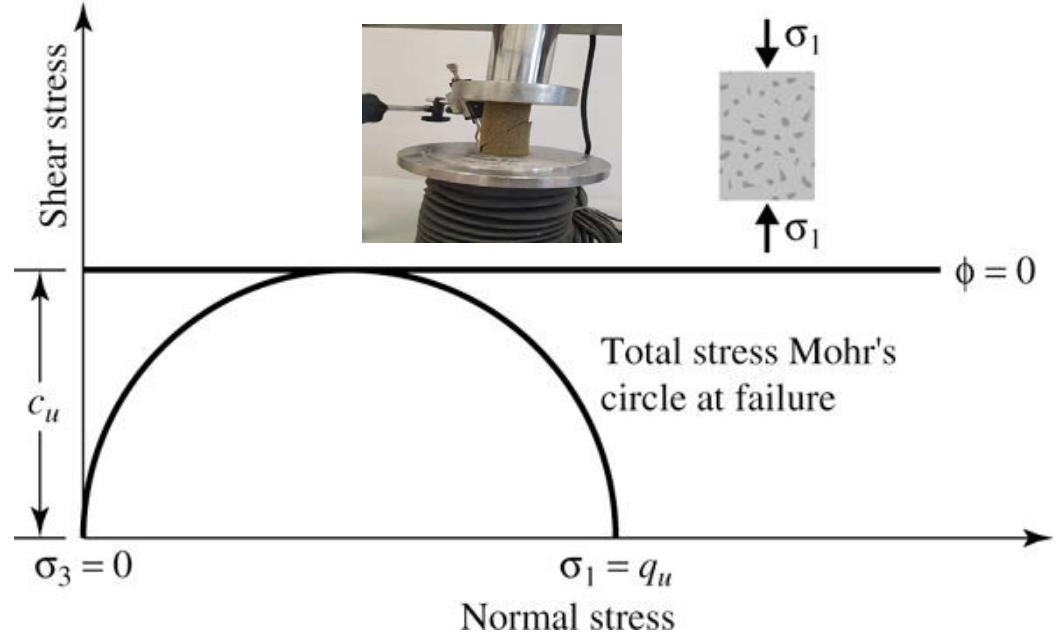
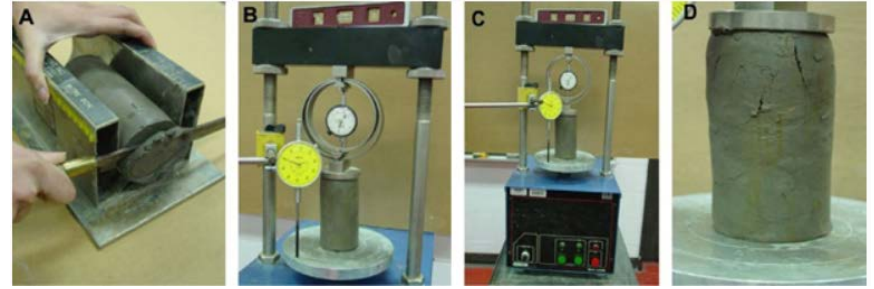
Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısalması (eksenel şekil değiştirmesi) ölçülmekte gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir.



[https://www.youtube.com/watch?v=z9F-zwDDHC8&ab\\_channel=Academicalgonquin](https://www.youtube.com/watch?v=z9F-zwDDHC8&ab_channel=Academicalgonquin)

# SERBEST BASINÇ DENEYİ

- Serbest basınç deneyi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanabilmektedir.
- Bu yönden yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır.
- Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilemediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir.
- Serbest basınç deneyi killerin drenajsız kayma mukavemetini belirlemekte yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır.



# SERBEST BASINÇ DENEYİ

## SERBEST BASINÇ DENEYİ

$$\text{Kuvvet} = (\text{Kuvvet Halkası okuması}) * (\text{Kuvvet Halkası})$$

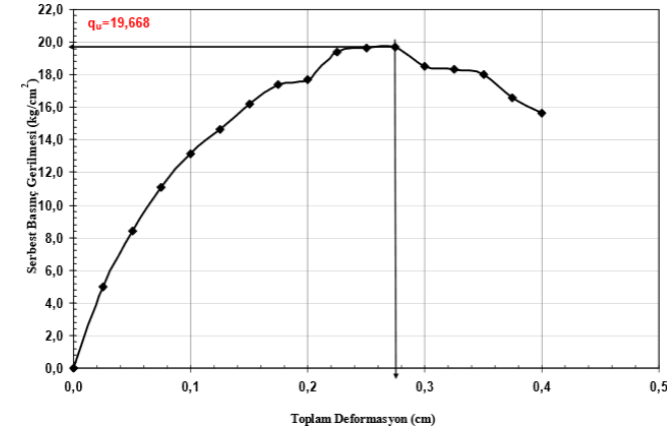
$$\text{Toplam Deformasyon} = (\text{Deformasyon Okuması}) * (\text{Deformasyon Okuması 1 Birimi}) / 10$$

$$\text{Birim Deformasyon } (\varepsilon) = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Düzeltilmiş Alan } (A_d) = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad \text{Serbest Basınç Gerilmesi } (\sigma_1) = \frac{P}{A_d} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Düzeltilmiş Alan}}$$

$\Delta L$ : Toplam Deformasyon: Boy kısalması

| Geçen Zaman (dk) | Kuvvet (Yük) Halkası Okuması | Kuvvet (Yük) (kg) | Deformasyon Okuması | Toplam Deformasyon (cm) | Birim Deformasyon ( $\varepsilon$ ) | Düzeltilmiş Alan ( $A_d$ ) ( $\text{cm}^2$ ) | Serbest Basınç Gerilmesi ( $\sigma_1$ ) ( $\text{kg/cm}^2$ ) |
|------------------|------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0,00             | 0                            | 0,000             | 0                   | 0,000                   | 0,000                               | 18,500                                       | 0,000                                                        |
| 0,25             | 53                           | 88,828            | 25                  | 0,025                   | 0,002                               | 17,751                                       | 5,004                                                        |
| 0,50             | 89                           | 149,164           | 50                  | 0,050                   | 0,003                               | 17,782                                       | 8,388                                                        |
| 0,75             | 118                          | 197,768           | 75                  | 0,075                   | 0,005                               | 17,813                                       | 11,102                                                       |
| 1,00             | 140                          | 234,640           | 100                 | 0,100                   | 0,007                               | 17,844                                       | 13,149                                                       |
| 1,25             | 156                          | 261,456           | 125                 | 0,125                   | 0,009                               | 17,876                                       | 14,626                                                       |
| 1,50             | 173                          | 289,948           | 150                 | 0,150                   | 0,010                               | 17,907                                       | 16,192                                                       |
| 1,75             | 186                          | 311,736           | 175                 | 0,175                   | 0,012                               | 17,939                                       | 17,378                                                       |
| 2,00             | 190                          | 318,440           | 200                 | 0,200                   | 0,014                               | 17,970                                       | 17,721                                                       |
| 2,25             | 208                          | 348,608           | 225                 | 0,225                   | 0,016                               | 18,002                                       | 19,365                                                       |
| 2,50             | 211                          | 353,636           | 250                 | 0,250                   | 0,017                               | 18,034                                       | 19,610                                                       |
| 2,75             | 212                          | 355,312           | 275                 | 0,275                   | 0,019                               | 18,066                                       | 19,668                                                       |
| 3,00             | 200                          | 335,200           | 300                 | 0,300                   | 0,021                               | 18,098                                       | 18,522                                                       |
| 3,25             | 198                          | 331,848           | 325                 | 0,325                   | 0,023                               | 18,130                                       | 18,304                                                       |
| 3,50             | 195                          | 326,820           | 350                 | 0,350                   | 0,024                               | 18,162                                       | 17,995                                                       |
| 3,75             | 180                          | 301,680           | 375                 | 0,375                   | 0,026                               | 18,194                                       | 16,581                                                       |
| 4,00             | 170                          | 284,920           | 400                 | 0,400                   | 0,028                               | 18,227                                       | 15,632                                                       |

| Aranan                                                   | Değer  | Birim            | Formül                   |
|----------------------------------------------------------|--------|------------------|--------------------------|
| Örselenmemiş Numunenin Serbest Basınç Dayanımı ( $q_u$ ) | 19,668 | $\text{kg/cm}^2$ | Grafikten                |
| Kohezyon (C)                                             | 9,834  | $\text{kg/cm}^2$ | $C = q_u / 2$            |
| İçsel sürtünme Açısı ( $\Phi$ )                          |        | Derece           | $\Phi = 2 * \theta - 90$ |



Kırılma sağlandığında serbest basınç dayanımı;

$$q_u = \sigma_{1max} = 2c = \frac{P_{max}}{A}$$

Deney drenajsız olduğu için yükleme sırasında boy kısalması olmasına rağmen hacim sabit kalır. Kesit alanı;

$$A = \frac{A_0}{1 - \frac{\Delta H}{H_0}}$$

$A_0$  (Deney başlangıç alanı),  $H_0$  Deney başlangıç boyu



# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ



Halka Conta (O-Ring)

YÜK,  $\sigma_{\text{deviator}}$

Yüklem Pistonu

Yüklem Başı

Plexiglas Hücre

Zemin Numunesi

Koruyucu Membran

Poröz Taş

Vana

Hücre Basıncı,  $\sigma_3$



Boşluk Suyu Basıncı Ölçümü  
( $u_w$ )

Drenaj

[https://www.youtube.com/watch?v=00adP96aats&ab\\_channel=IPCGlobal](https://www.youtube.com/watch?v=00adP96aats&ab_channel=IPCGlobal)

[https://www.youtube.com/watch?v=mUijZald\\_K8&ab\\_channel=UTEST-MaterialTestingEquipment](https://www.youtube.com/watch?v=mUijZald_K8&ab_channel=UTEST-MaterialTestingEquipment)

# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ







# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ

Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmişlerinden biri olmaktadır.

Bu deney düzeneği ile zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe en yakın olarak belirlemek mümkün olmaktadır.

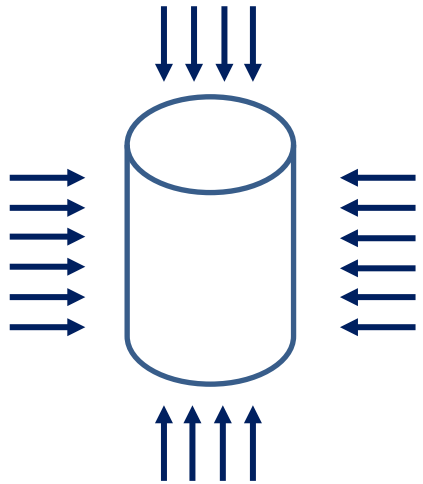
Üç eksenli basınç deneyinde;

- Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilmekte ve suyu doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve eksenel gerilmeler uygulamak sureti ile arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilir.
- Eksenel yükleme sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar geçerli kılınabilmektedir.
- Drenajsız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir



# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

Deviatör gerilme  
 $\Delta\sigma$



Çevre basıncı altında

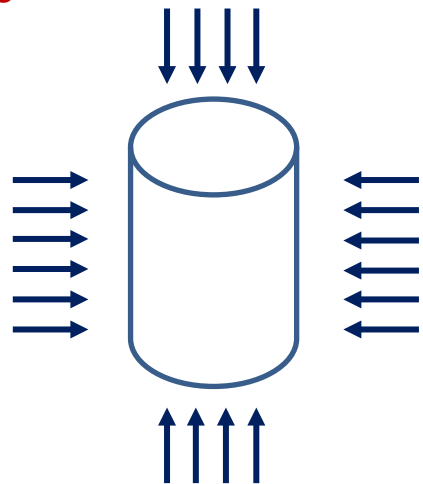
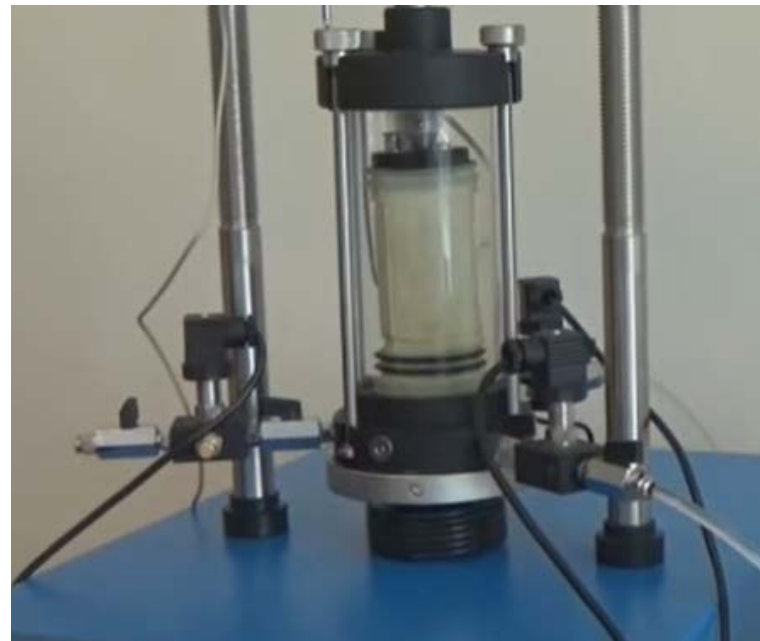


Drenaj kanalı açık

Drenaj kanalı kapalı

Konsolide edilmiş  
zemin

Konsolide edilmemiş  
zemin



Yükleme



Drenaj kanalı açık

Drenaj kanalı kapalı

Drenajlı yükleme

Drenajsız yükleme

# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

## Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deneyler (UU - *hızlı deney*)

Bu tür deneyde, gerek hücre basıncı uygulanmasında gerekse eksenel yükleme sırasında **zemin suyunun numuneden dışarı çıkmasına izin verilmemektedir**. Deney drenajsız şartlarda 15-20 dakika içerisinde bitirilir. **Pratikte deney sırasında numunede hiçbir drenaj veya hacim değişikliği oluşmadığı varsayılır**.

Silindirik aynı zemine ait üç farklı numune üç farklı çevre gerilmesine maruz bırakılır ve bu aşamada drenaja izin verilmez. **Örneklerde aşırı boşluksuyu basıncı oluşur**.

**\*Numuneler doygun ise kırılma zarfı yatay çıkmalıdır. Yatay çıkmamasının sebebi numunenin doygun olmaması ve gerilme altında hacminin azalarak, mukavemetinin bir miktar artmasıdır.**

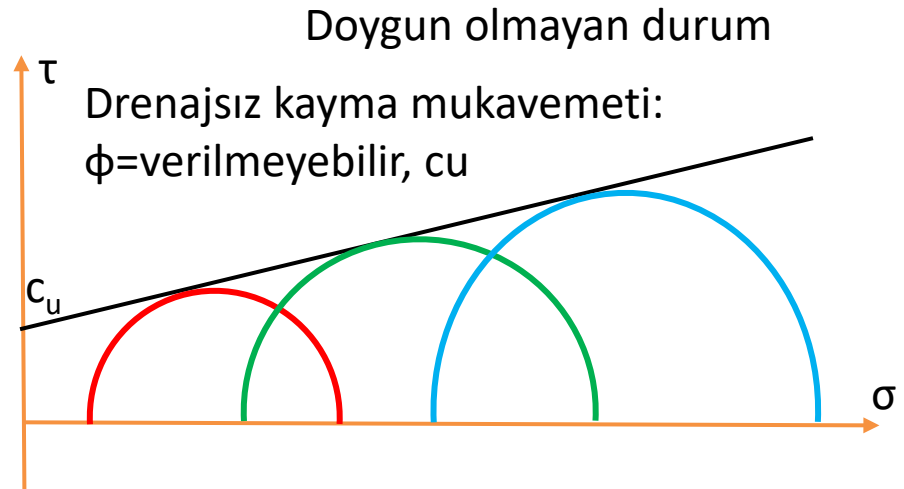
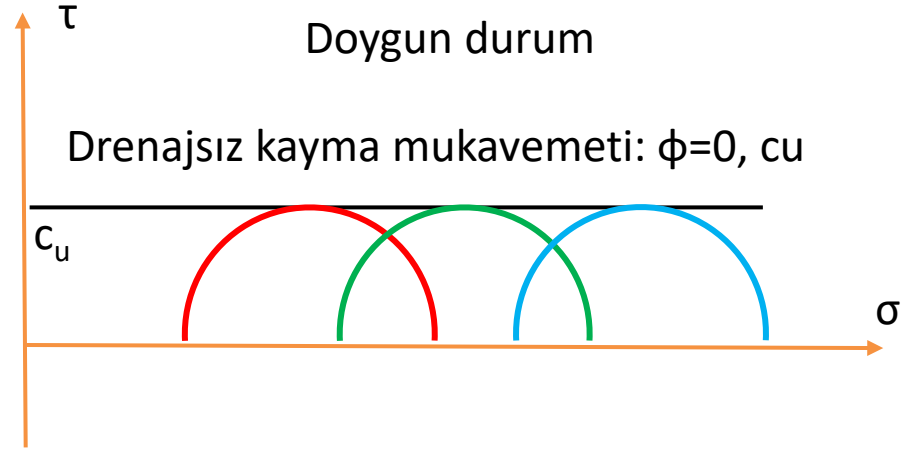
\*Kumlar, siltler ve killer için uygundur.

\*Elde edilecek parametreler  $\phi=0$ ,  $c_u$

**\*Kırılma zarfı açılı çıksa bile  $\phi=0$  verilmeli**

\*Hangi durumları kapsar;

- Bir dolgunun normal konsolide killer üzerine hızlı bir şekilde inşa edilmesi,
- Yumuşak bir zemin üzerinde hızlı bir şekilde temel inşa edilmesi

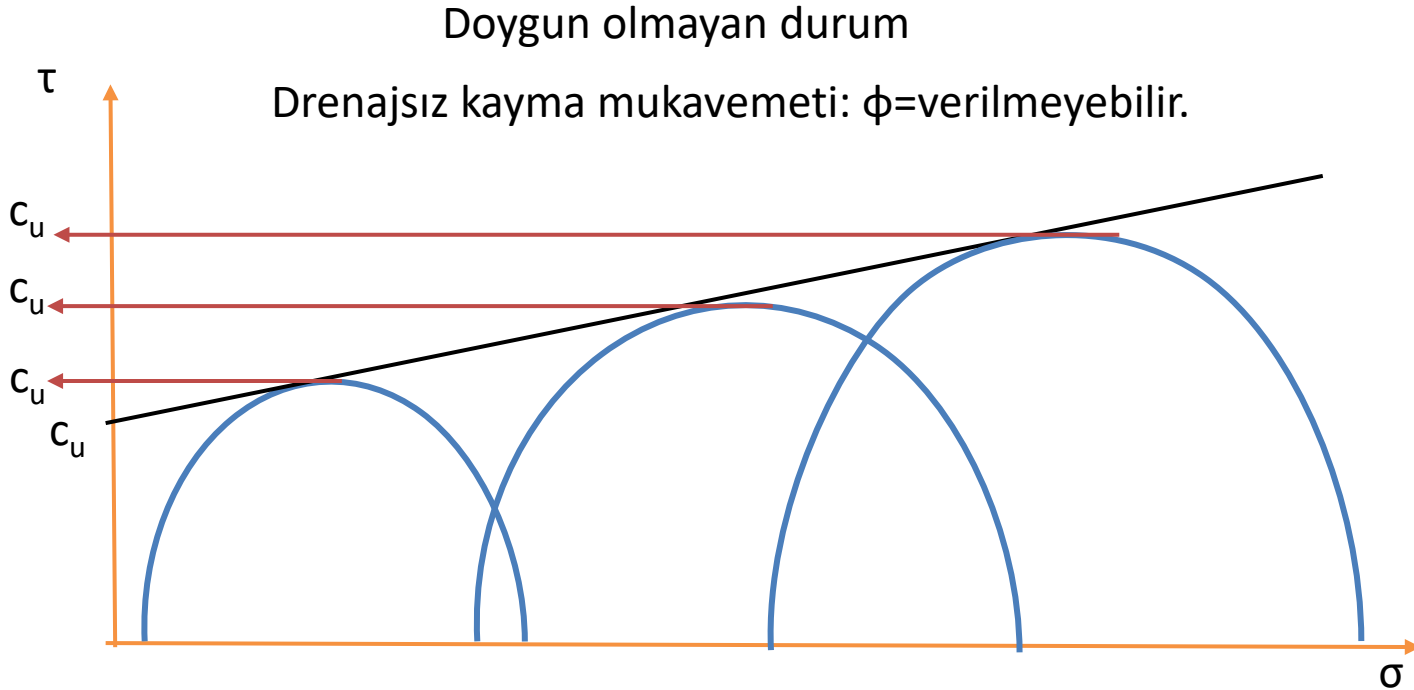


# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

## Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deneyler (UU - *hızlı deney*)

*UU deneylerde numuneler yumuşak killeri ve doymuş zeminler ise ve hızlı yükleme durumu söz konusuysa ise kırılma zarfı yatay çıkmalıdır. Ancak, deney sonuçlarında kırılma zarfı yatay çıkmadıysa bu durum numunenin doymuş olmaması ve gerilme altında hacminin azalarak, mukavemetinin bir miktar artmasına bağlıdır.*

*Bu deney sonucunda kırılma zarfı açılı olsa bile  $\phi=0$  verilmeli ancak her yüklem şartı için  $c_u$  verilmelidir.*



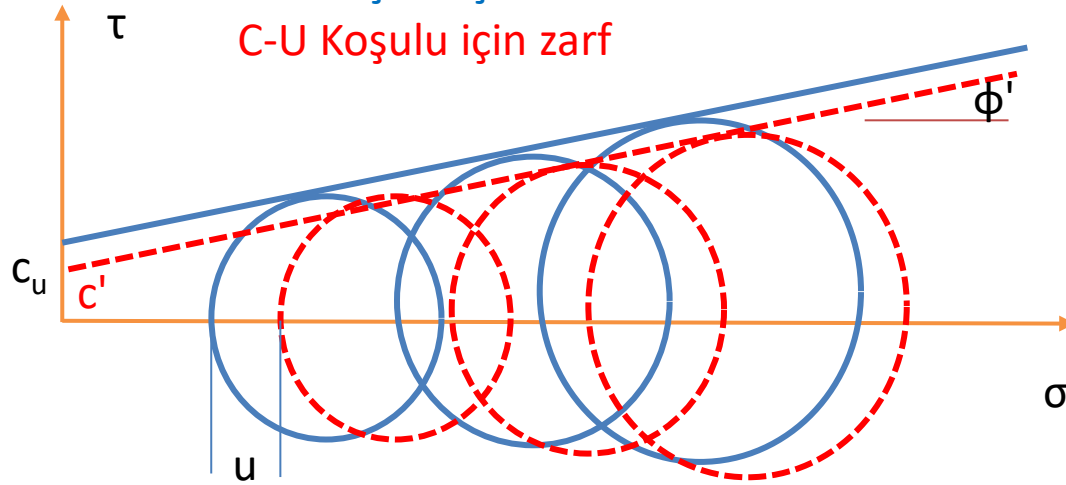
# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

## Konsolidasyonlu – Drenajsız Deneyler (CU – *yavaş deney*)

Birinci aşamada hidrostatik hücre basıncı altında zemin suyunun dışarı çıkmasına (numunenin konsolide olmasına) izin verdikten sonra, ikinci aşamada drenajsız durumda eksenel yükleme yapılan deneylerdir. Boşluk suyu basıncı ölçülebildiğinden **deney sonuçları toplam ve efektif gerilmeler cinsinden elde edilir.**

C-D Koşulu için zarf

C-U Koşulu için zarf



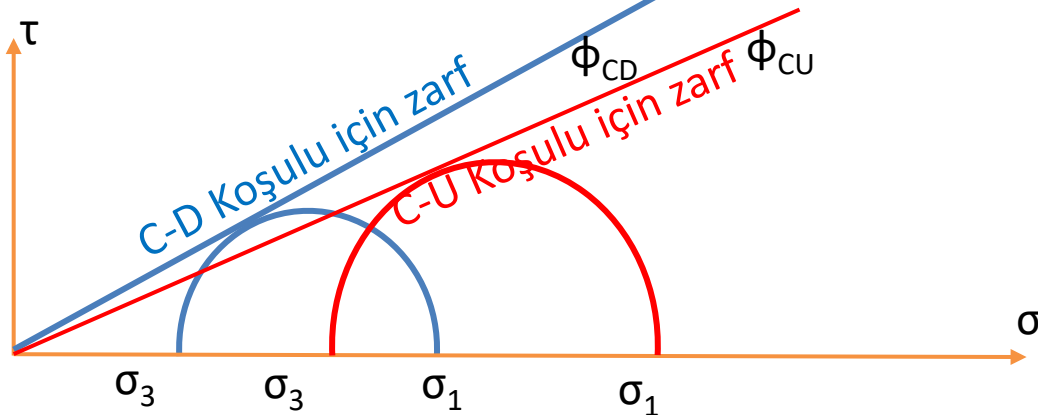
**Normal konsolide kilerde**  $c' \approx 0$

Efektif gerilme türünden;  $\tau_f = \sigma' \tan \phi'$

**Aşırı konsolide kilerde**,  $c' \neq 0$

Efektif gerilme türünden,  $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$

*Konsolidasyon süreci tamamlanmış bir dolgu üzerine hızlı bir şekilde ilave dolgu yapılması ve doğal bir yamaç üzerine hızlı bir dolgu oluşturulması durumunda zeminlerin özelliklerinin bu deney ile belirlenmesi uygundur.*

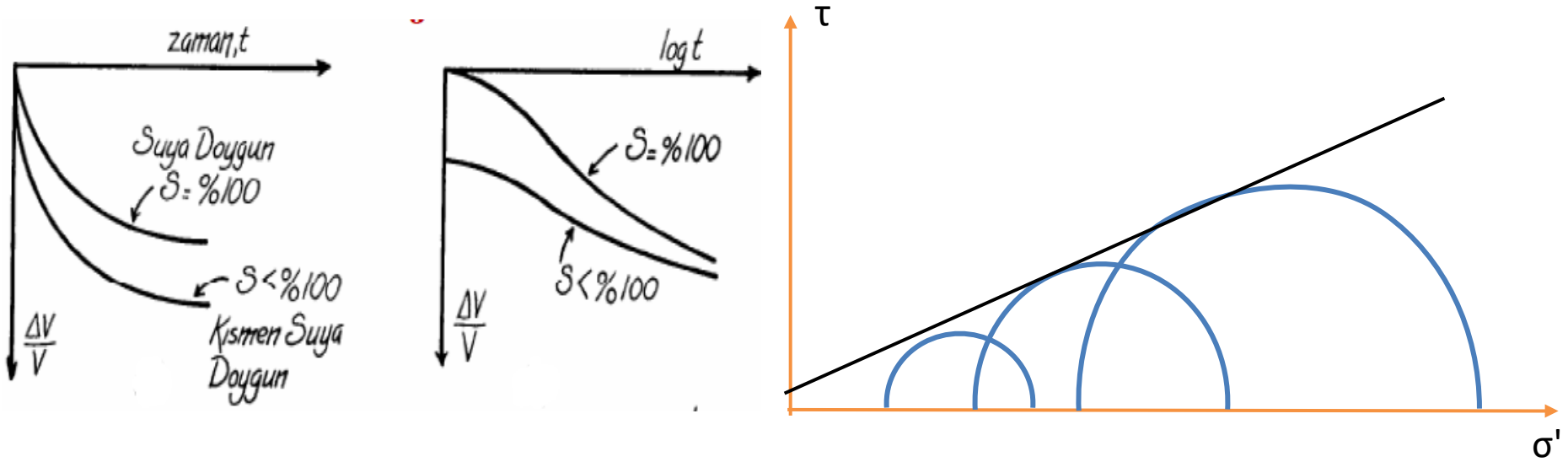


***Drenajsız deneylerde boşluk suyu basıncında artışlar meydana gelmektedir.***

# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

## Konsolidasyonlu – Drenajlı Deneyler (CD- *çok yavaş deney*)

Aynı zemine ait silindirik şekilli **üç farklı numune öncelikle suya doyurulur**. Sonraki aşamada numuneler üç farklı çevre gerilmesine maruz bırakılıp **drenaja izin verilerek konsolide edilir**. **Konsolidasyon tamamlandıktan sonra** drenajlı koşullarda zemin numunesi kırılır. İlave boşluk suyu basıncı sıfırdır ve ölçülen gerilmeler efektif gerilmedir.



\*Kademeli dolgu imalatı ve Doğal bir yamaçtaki mukavemet değerlerinin belirlenmesi durumlarında zemin özelliklerinin belirlenmesi niyetiyle yapılır.

\*Drenajlı deneylerde uygulanan hücre basıncı altında, zeminde hacim değişimleri (konsolidasyon) meydana gelir.

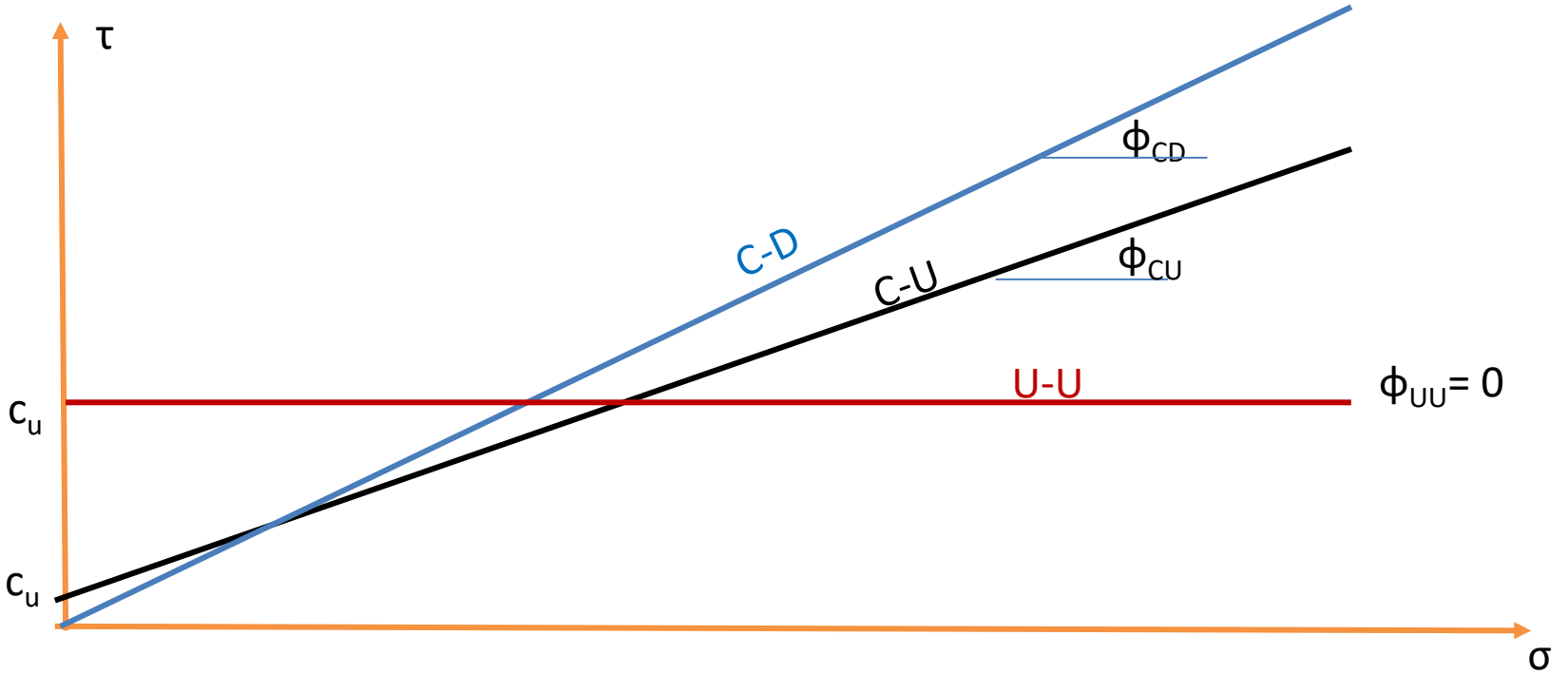
\*Efektif mukavemet parametreleri elde edilir ( $\phi'$ ,  $c'$ ). Deformasyon modülü ( $E$ ) elde edilir.



# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ/Deney Türleri

## UU - CU - CD deneyleri

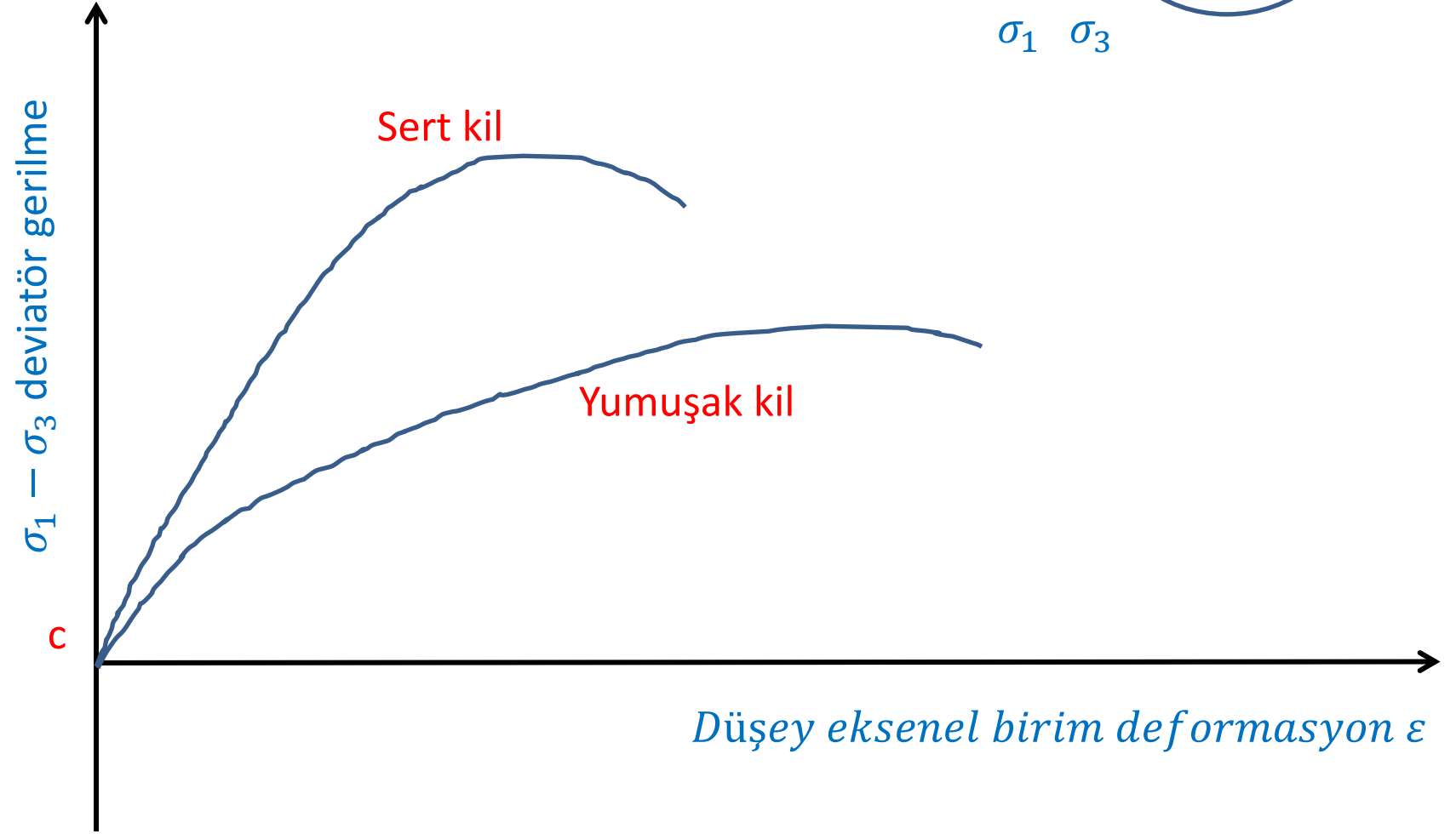
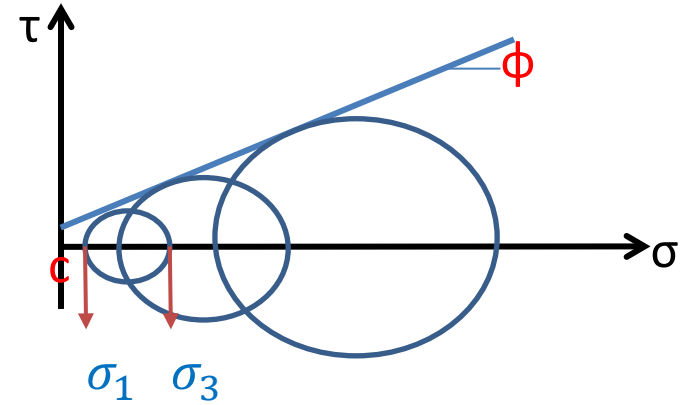
Bu üç deney koşulunun toplu değerlendirilmesi şekildeki gibidir.



Drenajlı deneylerde hacim değişikliği engellendiği için aşırı boşluk suyu basıncı oluşmakta ve bunun sonucunda da etkin gerilme ve kesme mukavemetinde azalma gözlenmektedir.

# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

Suya doymun killerde tipik deviator gerilme düşey eksenel gerilme ilişkisi



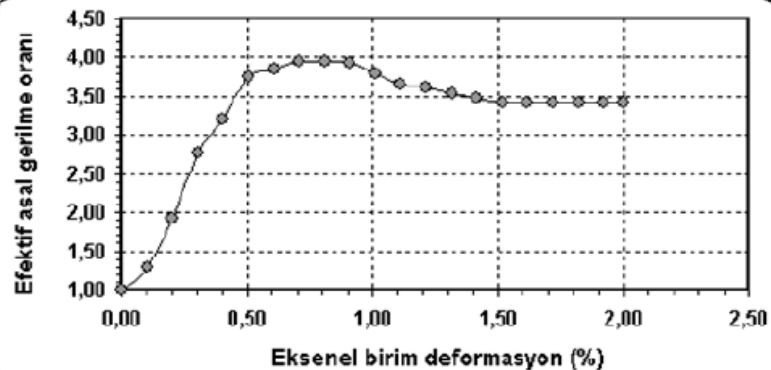
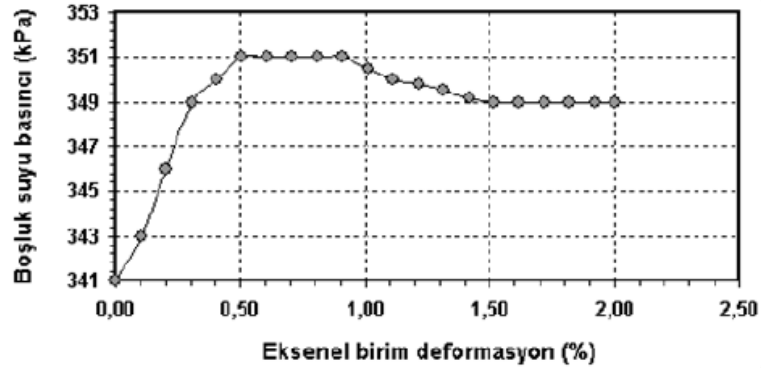
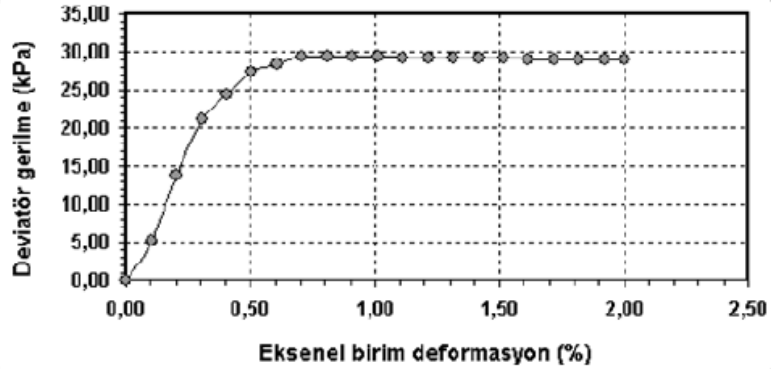
# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

| ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLİDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa)) |                     |                               |            |         |                                |                                              |                                                     |                                          |                                          |                                                         |            |            |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|------------|---------|--------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|------------|
| NUMUNEYİ KESME VERİLERİ                                              |                     |                               |            |         |                                |                                              |                                                     |                                          |                                          |                                                         |            |            |
| No                                                                   | Defor. Okuma (divs) | Birim Defor. $\epsilon$ , (%) | Yük (divs) | Yük (N) | Boşluk Suyu Basıncı (divs,kPa) | Dev. Gerilme $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ (kPa) | Düzel. Dev. Gerilme $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ (kPa) | Min. Efek. Asal Geril. $\sigma_3'$ (kPa) | Mak. Efek. Asal Geril. $\sigma_1'$ (kPa) | Efektif Asal Geril. Oranı $\sigma_1' / \sigma_3'$ (kPa) | $p'$ (kPa) | $q'$ (kPa) |
| 1                                                                    | 0                   | 0,000                         | 35         | 0,00    | 341                            | 0,00                                         | 0,00                                                | 20,00                                    | 20,00                                    | 1,00                                                    | 20,00      | 0,00       |
| 2                                                                    | 102                 | 0,102                         | 40         | 10,43   | 343                            | 5,31                                         | 5,30                                                | 18,00                                    | 23,30                                    | 1,29                                                    | 20,65      | 2,65       |
| 3                                                                    | 203                 | 0,203                         | 48         | 27,11   | 346                            | 13,80                                        | 13,77                                               | 15,00                                    | 28,77                                    | 1,92                                                    | 21,88      | 6,88       |
| 4                                                                    | 304                 | 0,304                         | 55         | 41,70   | 349                            | 21,20                                        | 21,16                                               | 12,00                                    | 33,16                                    | 2,76                                                    | 22,58      | 10,58      |
| 5                                                                    | 405                 | 0,405                         | 58         | 47,96   | 350                            | 24,36                                        | 24,30                                               | 11,00                                    | 35,30                                    | 3,21                                                    | 23,15      | 12,15      |
| 6                                                                    | 506                 | 0,506                         | 61         | 54,21   | 351                            | 27,51                                        | 27,44                                               | 10,00                                    | 37,44                                    | 3,74                                                    | 23,72      | 13,72      |
| 7                                                                    | 607                 | 0,607                         | 62         | 56,30   | 351                            | 28,54                                        | 28,45                                               | 10,00                                    | 38,45                                    | 3,85                                                    | 24,23      | 14,23      |
| 8                                                                    | 708                 | 0,708                         | 63         | 58,38   | 351                            | 29,56                                        | 29,47                                               | 10,00                                    | 39,47                                    | 3,95                                                    | 24,73      | 14,73      |
| 9                                                                    | 809                 | 0,810                         | 63         | 58,38   | 351                            | 29,53                                        | 29,42                                               | 10,00                                    | 39,42                                    | 3,94                                                    | 24,71      | 14,71      |
| 10                                                                   | 910                 | 0,911                         | 63         | 58,38   | 351                            | 29,50                                        | 29,38                                               | 10,00                                    | 39,38                                    | 3,94                                                    | 24,69      | 14,69      |
| 11                                                                   | 1011                | 1,012                         | 63         | 58,38   | 351                            | 29,47                                        | 29,34                                               | 10,50                                    | 39,84                                    | 3,79                                                    | 25,17      | 14,67      |
| 12                                                                   | 1112                | 1,113                         | 63         | 58,38   | 350                            | 29,44                                        | 29,29                                               | 11,00                                    | 40,29                                    | 3,66                                                    | 25,65      | 14,65      |
| 13                                                                   | 1213                | 1,214                         | 63         | 58,38   | 350                            | 29,41                                        | 29,25                                               | 11,20                                    | 40,45                                    | 3,61                                                    | 25,83      | 14,63      |
| 14                                                                   | 1314                | 1,315                         | 63         | 58,38   | 350                            | 29,38                                        | 29,21                                               | 11,50                                    | 40,71                                    | 3,54                                                    | 26,10      | 14,60      |
| 15                                                                   | 1415                | 1,416                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,35                                        | 29,16                                               | 11,80                                    | 40,96                                    | 3,47                                                    | 26,38      | 14,58      |
| 16                                                                   | 1516                | 1,517                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,32                                        | 29,12                                               | 12,00                                    | 41,12                                    | 3,43                                                    | 26,56      | 14,56      |
| 17                                                                   | 1617                | 1,618                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,29                                        | 29,08                                               | 12,00                                    | 41,08                                    | 3,42                                                    | 26,54      | 14,54      |
| 18                                                                   | 1718                | 1,719                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,26                                        | 29,04                                               | 12,00                                    | 41,04                                    | 3,42                                                    | 26,52      | 14,52      |
| 19                                                                   | 1819                | 1,820                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,23                                        | 28,99                                               | 12,00                                    | 40,99                                    | 3,42                                                    | 26,50      | 14,50      |
| 20                                                                   | 1919                | 1,920                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,20                                        | 28,95                                               | 12,00                                    | 40,95                                    | 3,41                                                    | 26,48      | 14,48      |
| 21                                                                   | 1999                | 2,000                         | 63         | 58,38   | 349                            | 29,18                                        | 28,92                                               | 12,00                                    | 40,92                                    | 3,41                                                    | 26,46      | 14,46      |

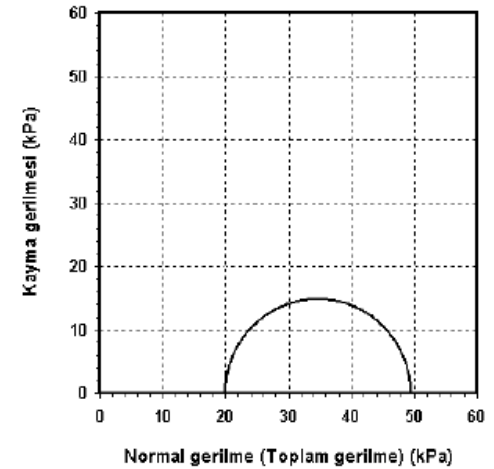
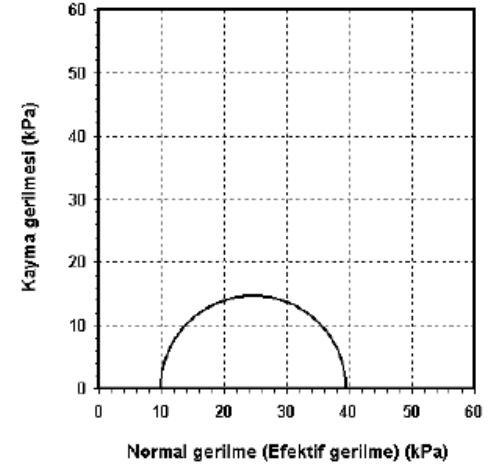
# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ SONUÇLARI

ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLIDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa))

GRAFİKLER



ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ (KONSOLIDASYONLU-DRENAJSIZ: CU-%2 (20 kPa))  
MOHR DAİRELERİ



# ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEYİ / Dezavantajları - Avantajları

## *Avantajları*

- Numuneler (yaklaşık) üniform gerilme ve şekil değiştirmelere maruz kalır.
- Gerilme-şekil değiştirme-mukavemet davranışı elde edilebilir.
- Drenajlı ve drenajsız deneyler yapılabilir.
- ***Drenajsız deneylerde boşluk suyu basıncı ölçülebildiğinden efektif gerilmeler belirlenebilir.***
- Hücre basıncı ve eksenel gerilmelerin farklı kombinasyonları uygulanabilir.
- Arazi yükleme ve drenaj koşullarına uygun yükleme ve drenaj yapılabilir.

# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Kumun Kayma Direnci



İri taneli yada kohezyonsuz olarak nitelendirilen zeminlerde kayma direnci birinci derecede içsel sürtünme açısına bağlı olmakla birlikte kayma direncini etkileyen başlıca özellikler aşağıdaki gibidir.

- Tanelerin minerolojik kökeni ve şekli; *köşeli zeminlerde kayma direnci açısı daha fazladır.*
- Tanelerin boyutu ve dağılımı; *sıkı iyi derecelenmiş kum, sıkı uniform kumdan daha yüksek kayma direnci açısına sahiptir.*
- Tane yüzey pürüzlülüğü
- Kuru birim hacim ağırlık ve bağıl sıkılık; *kayma direnci açısı doğrusal olmamakla birlikte boşluk oranı azaldıkça artar.*
- Kumun jeolojik tarihçesi
- Çimentolanma
- Doygunluk derecesi
- Aşırı konsolidasyon veya ön yükleme; *doğrusal olmamakla birlikte  $\sigma_3$  artarken  $\phi$  yükselir.*

Kum taneleri çoğunlukla kuvars mineralinden oluşmaktadır. Kuvars oldukça dayanıklı olduğu için olağan düzeyde normal ve kesme gerilmesi altında tanelerde kırılma ve ezilme olmayabilir. Ancak var olan diğer mineraller gerilmelere dayanıklı olmadıklarından taneler ezilebilir.

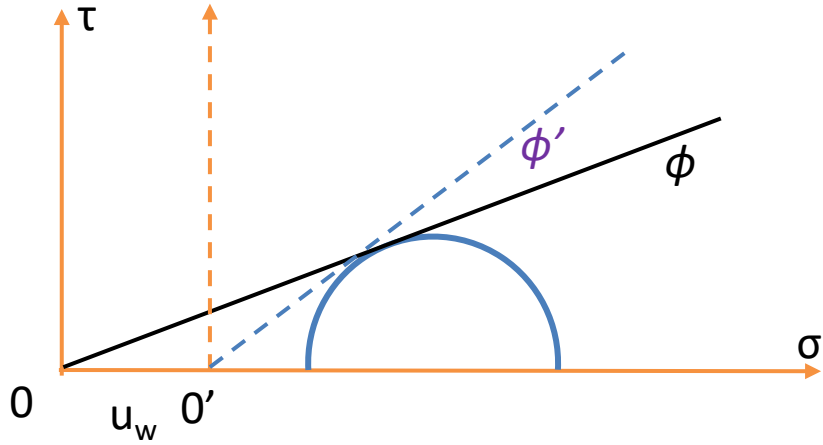
| FAKTÖR                              | ETKİ                                  |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Boşluk oranı, $e$                   | $e \uparrow, \phi \downarrow$         |
| Rölatif Sıkılık, $D_r$              | $D_r \uparrow, \phi \uparrow$         |
| Köşelilik, $A$                      | $A \uparrow, \phi \uparrow$           |
| Dane boyu dağılımı, $C_u$           | $C_u \uparrow, \phi \uparrow$         |
| Yüzey pürüzlülüğü, $R$              | $R \uparrow, \phi \uparrow$           |
| Su içeriği, $w$                     | $w \uparrow, \phi \downarrow$ hafifçe |
| Dane boyu, $D$                      | Etkisiz ( $e$ sabiti ile)?            |
| Aşırı konsolidasyon veya ön gerilme | Az etki                               |



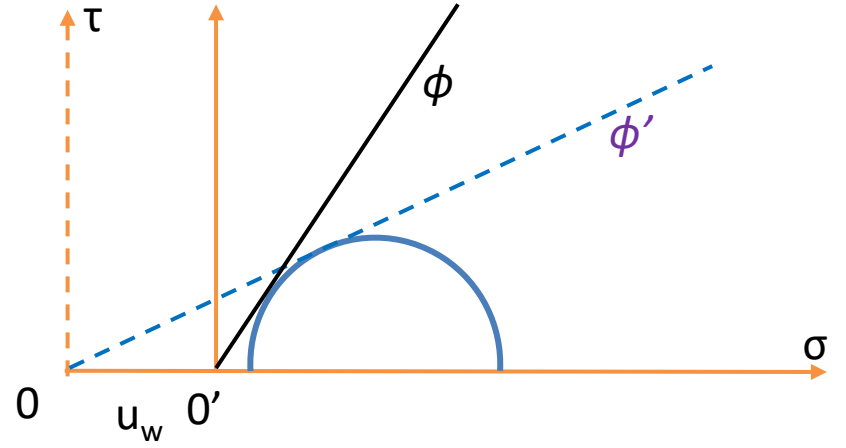
# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Kumun Kayma Direnci

Gevşek kum



Sıkı kum



Gevşek kum örneği kesildiğinde hacimsel azalma olacağı için boşluk suyu basıncı artar. Bu durumda pozitif boşluk suyu basıncı oluşur  $\phi' > \phi$  olur.

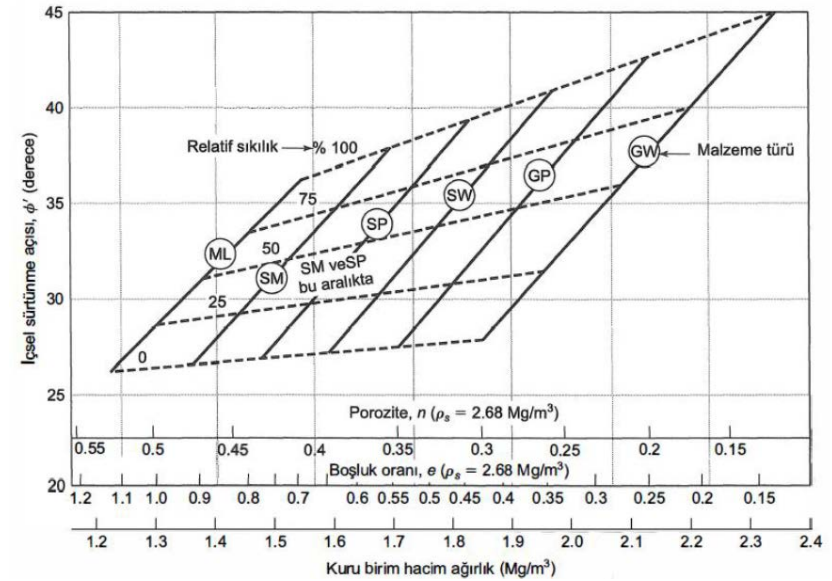
Sıkı kumda ise genleşme nedeniyle boşluk suyu basıncı azalır. Orjin sola kayar ve  $\phi' < \phi$  olur.

# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

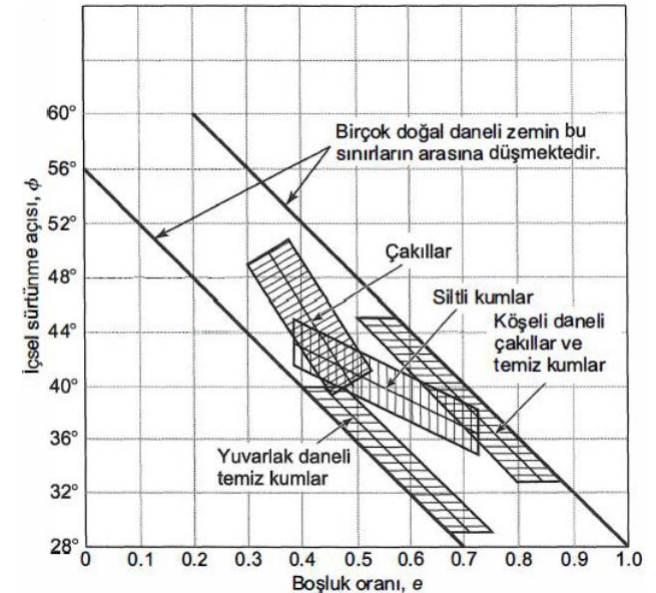
## Kumun Kayma Direnci

| Zemin Tipi            | $\phi'$ |
|-----------------------|---------|
| Kum (Yuvarlak Daneli) |         |
| Gevşek                | 27-30   |
| Orta                  | 30-35   |
| Sıkı                  | 35-38   |
| Kum (Köşeli Daneli)   |         |
| Gevşek                | 30-35   |
| Orta                  | 35-40   |
| Sıkı                  | 40-45   |
| Çakıllı Kum           | 34-48   |
| Kil                   | 15-35   |
| Silt                  | 26-35   |

Kum ve silt zeminler için efektif kayma mukavemeti açısı değerleri (Das 2010).



İçsel sürtünme açısı ile kuru birim hacim ağırlık ve boşluk oranı ile ilişkisi (U.S. Navy 1986, Holtz et al. 2010).



# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Killerin Kayma Direnci

*Kil zeminin sahip olduğu kesme mukavemeti, kil mineralinin türüne ve su içeriğine, kesme oluşmaya başladığında meydana gelebilecek boşluk suyu basıncı ve en önemlisi de geçmişte maruz kaldığı etkin gerilmelere veya konsolidasyon basıncına bağlıdır.* Kil ile CL, CH, MH ve Şeyl gibi kıvam özellikleri gösteren tüm malzemeler ifade edilmektedir.

Yapılan çalışma ve incelemeler, killerde kayma direncinin aşağıdaki özelliklere bağlı olduğunu göstermektedir.

- Efektif gerilme yüzeyi
- Kilin kıvamı (plastisitesi)
- Çimentolanma
- Taneler arası çekme ve itme
- Su içeriği
- Kesilme hızı
- Ortamın anizotropluğu
- Gevreklik
- Deneye tabi tutulan numunenin kalitesi
- Kullanılan ölçüm tekniği

# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Killerin Kayma Direnci

### *Normal Konsolide Killer*

*Normal konsolide killer/yumuşak killer üzerinde hızlı yapılan dolgu yada temelin hızlı yüklenmesi Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) koşulu ifade eder.* Hızlı artan gerilmeler sonucu ani artan boşluk suyu basıncı sistem dışına çıkamadan zeminin kayma gerilmesine maruz kalması ani yenilmelere neden olur. Dolayısıyla bu tip projelerde problem çözümünün toplam gerilmeler cinsinden yapılması uygun olacaktır.

- Drenajsız kayma direnci çevre basıncından bağımsız olup, Mohr dairelerinin çaplarının aynı olması anlamına gelir ve drenajsız kayma direnci yatay kırılma zarfı ( $\phi=0$ ) ile gösterilir.
- NC killer fiziksel/mekanik özellik olan gerçek kohezyona sahip değildir.
- NC killerde  $\phi$  açısının plastisite indisiyle azaldığı söylenebilir. Genel olarak  $\phi'$  için  $25^0-39^0$ ,  $\phi_{cu}$  için ise  $5^0-20^0$  temsil edici olabilir.

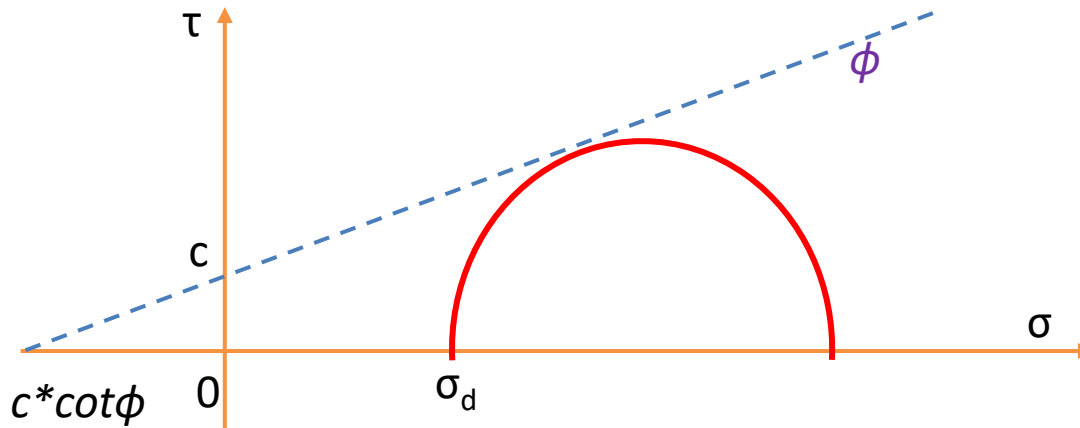
# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Killerin Kayma Direnci

### Aşırı Konsolide Killer

Aşırı konsolide killer, geçmişte üzerinde kalın katmanlar altında yüksek çevre basıncı ile dengeye gelen daha sonra aşınma sonucu güncel çevre basıncına maruz kalan killer olarak tariflenebilir ( $\sigma_c > \sigma_o$ ). Çoğunlukla su içerikleri plastik limitin altında dolayısıyla katı-sert kıvamda olup ve %100 doygun durumda değildir.

- AC killerin kayma direnci belirlenmesinde UU deney yada serbest basınç deneylerinin başarıyla sonuç vermedi kabul görmektedir.
- AC killerin kayma direncinin belirlenmesinde CU ve CD deneyler yanısıra kesme kutusu deneyinin uygulaması önerilmektedir.



# ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

## Killerin Serbest Basıncına Göre Ayrımı

*Killerin çoğu bozulmamış durumda yüksek dayanım gösterirken yoğurulmuş durumda dayanımları daha düşüktür.* Yapısı hassas olan su muhtevası değiştirilmeden yoğurulur ve tekrar sıkıştırılırsa direncin belirgin ölçüde düşük bir düzeye indiği görülür. Bu düşüşün ölçütü **Hassaslık Derecesi** ile ifade edilir.

$$S_t = \frac{(q_u) \text{ örselenmemiş}}{(q_u) \text{ yoğurulmuş}}$$

Olağan koşullarda hassaslık derecesi 2-4 arasında değişir. Orta derecede hassas killerde 4-8, akıcı killerde ise 8'den büyüktür.

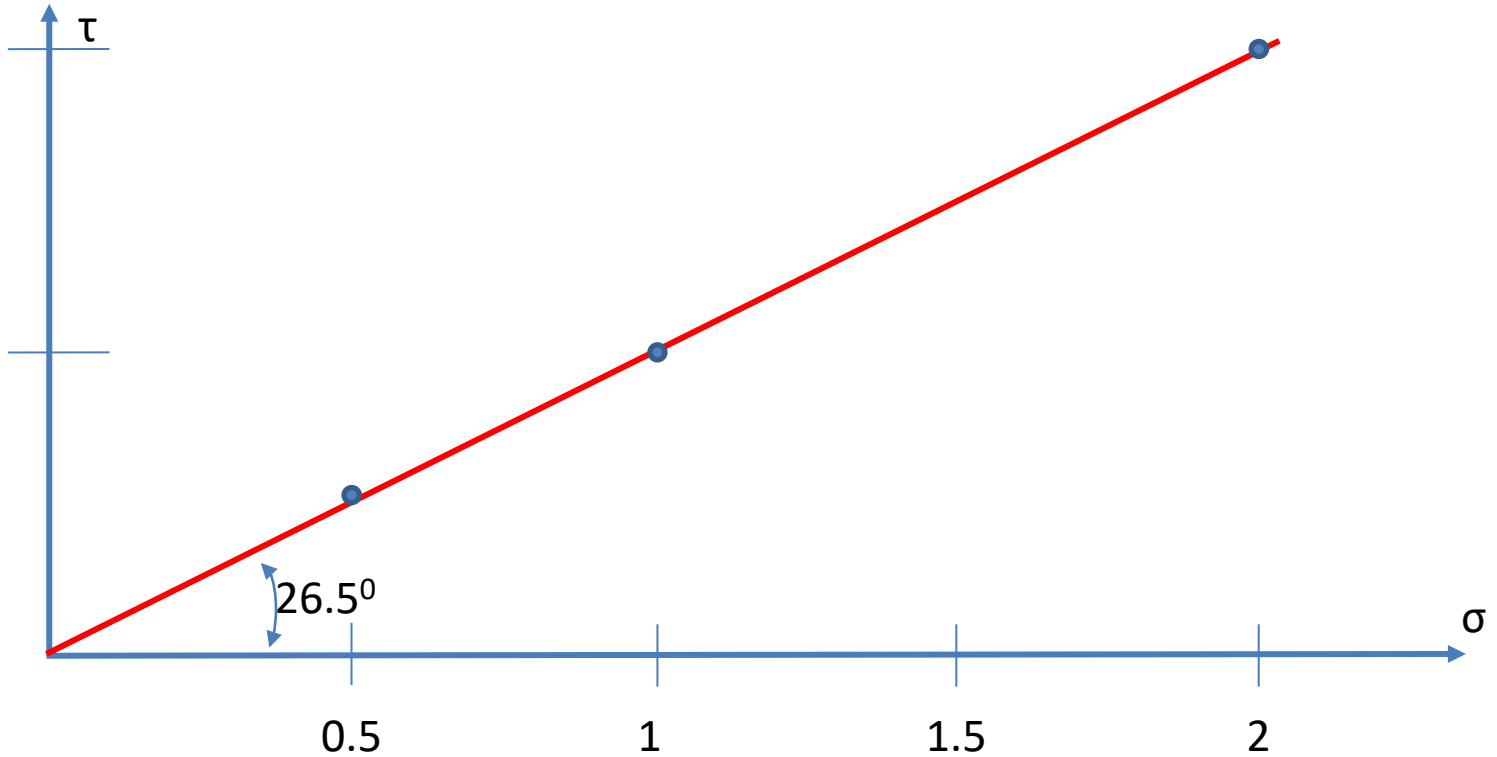
| KIVAM       | $q_u$ (kpa) |
|-------------|-------------|
| Çok Yumuşak | <25         |
| Yumuşak     | 25-49       |
| Orta Katı   | 50-96       |
| Katı        | 97-192      |
| Çok Katı    | 193-383     |
| Sert        | >384        |

# ÖRNEK SORULAR

## Soru

Bir kum üzerinde kesme deneyi yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur. Kumun içsel sürtünme açısını belirleyiniz.

| Deney No | Normal Kuvvet | Max. Kayma kuvveti | Normal Gerilme (kg/cm <sup>2</sup> ) | Max. Kayma Gerilmesi (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|---------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1        | 18            | 9,36               | 0.5                                  | 0.26                                       |
| 2        | 36            | 17.64              | 1                                    | 0.49                                       |
| 3        | 72            | 36.10              | 2                                    | 1                                          |



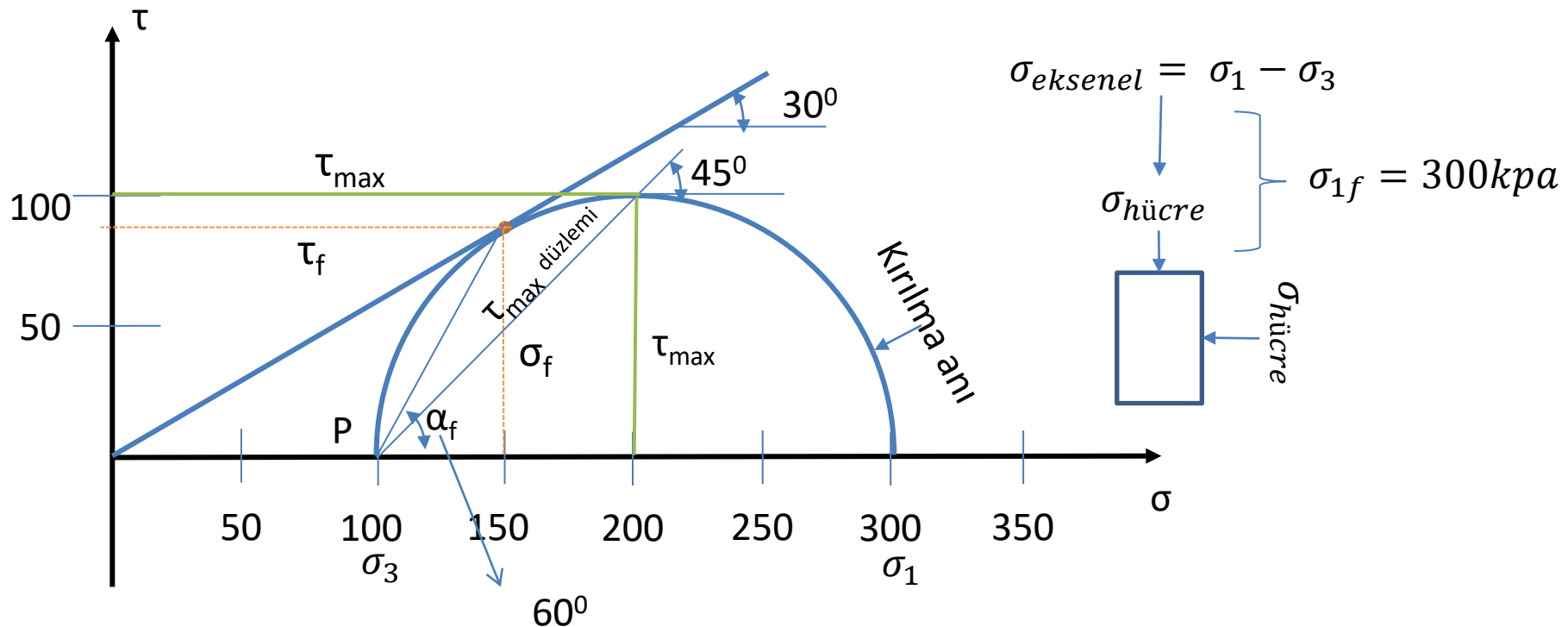


**Soru**

Bir kum örneği üzerinde geleneksel Konsolidasyonlu – Direnajlı (CD) üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Hücre basıncı 100 kPa ve kırılma anında uygulanan eksenel gerilme 200 kPa olduğuna göre

- Kırılma durumundaki mahr dairelerini çizin.
- İçsel sürtünme açısını hesaplayınız (kumun kohezyonunun 0 olduğunu varsayınız).
- Kırılma düzlemindeki kayma gerilmesini ve kırılma düzlemin teorik açısını belirleyiniz.

a



## ÖRNEK SORULAR

**b.** Grafiksel olarak  $\phi$  açısı  $30^\circ$  olarak bulunabilir. Ancak analitik çözüm ile de sorunun cevabına ulaşılabilir.

$$\sin\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \gg \phi = \arcsin \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \arcsin \frac{200}{400} = 30^\circ$$

**c.** Mohr kırılma hipotezinden Mohr kırılma zarfının ve kırılma anındaki Mohr dairesinin tanjant koordinatları  $\tau_{ff}$  ve  $\sigma_{ff}$  dir.

Analitik yoldan;

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2} - \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} \sin\phi = 200 - 100 \sin 30^\circ = 150 \text{ kpa}$$

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan\phi = 150 \tan 30^\circ = 87 \text{ kpa}$$

Kırılma düzleminin teorik eğim açısı grafiksel olarak kutup yöntemi ile yada analitik olarak bulunabilir. Grafik yöntemi ile  $60^\circ$  olarak bulunmuştur.

Analitik çözüm ise;

$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{\phi}{2} = 60^\circ$$