

Şekil 8.1 Zemin Mekanlığında tipik uzun (2 boyutlu) durumlar

## 8. BÖLÜM

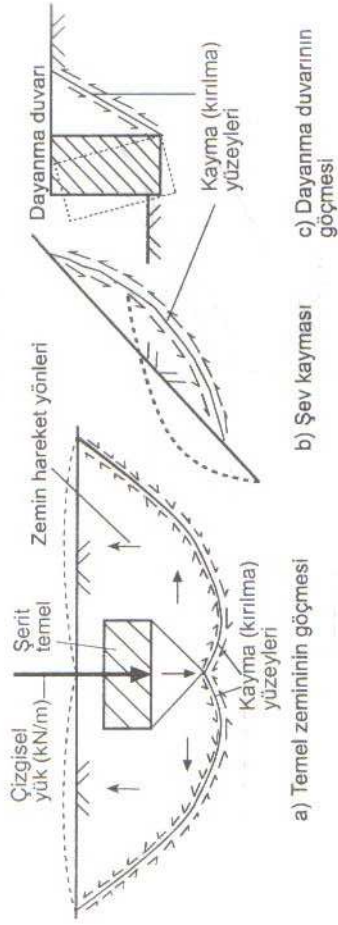
### ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİ

#### 8.1 Giriş

Zemin Mekanlığında iki boyutlu (uzun) durumlara sıkça rastlanılır. Böyle durumlarda problemin özellikleri uzunluk boyunca değişmez ve uzunluğa dik kalınlığı 1 birim (1 m vb.) olan bir kesiti incelemek yeterli olur. Diğer yandan iki boyutlu problemleri çözümlenmek daha kolaydır ve 3 boyutlu durumlara buradan bazı katsayılarla geçilir. Şekil 8.1'de bazı iki boyutlu durumlar görülmüştür.

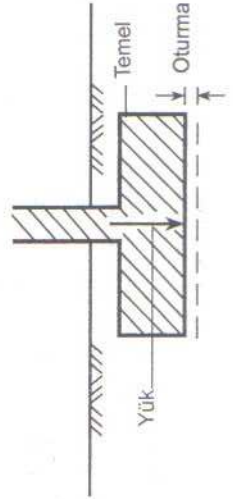
Zemin Mekanikğinde karşılaşılan problemler, iki ana gruba ayrılabilir.

**Stabilite (denge) problemlerinde**, zemin kitlesinin kırılması (göçmesi) anındaki durumuyla ilgilenilir. Yüklenen bir temel altındaki zeminin göçmesi (kırılması), bir şevın kayması, bir dayanma duvarının öne doğru devrilmesi vb. stabilite problemlerine örnek olarak verilebilir. Bu örneklerde, zemin kırılma yüzeyleri boyunca kesilir, makaslanır. Stabilite problemlerinde, zemin kitlesinin kırılmasına neden olan yükün (basıncın) vb. belirlenmesine çalışılır (Şekil 8.2).

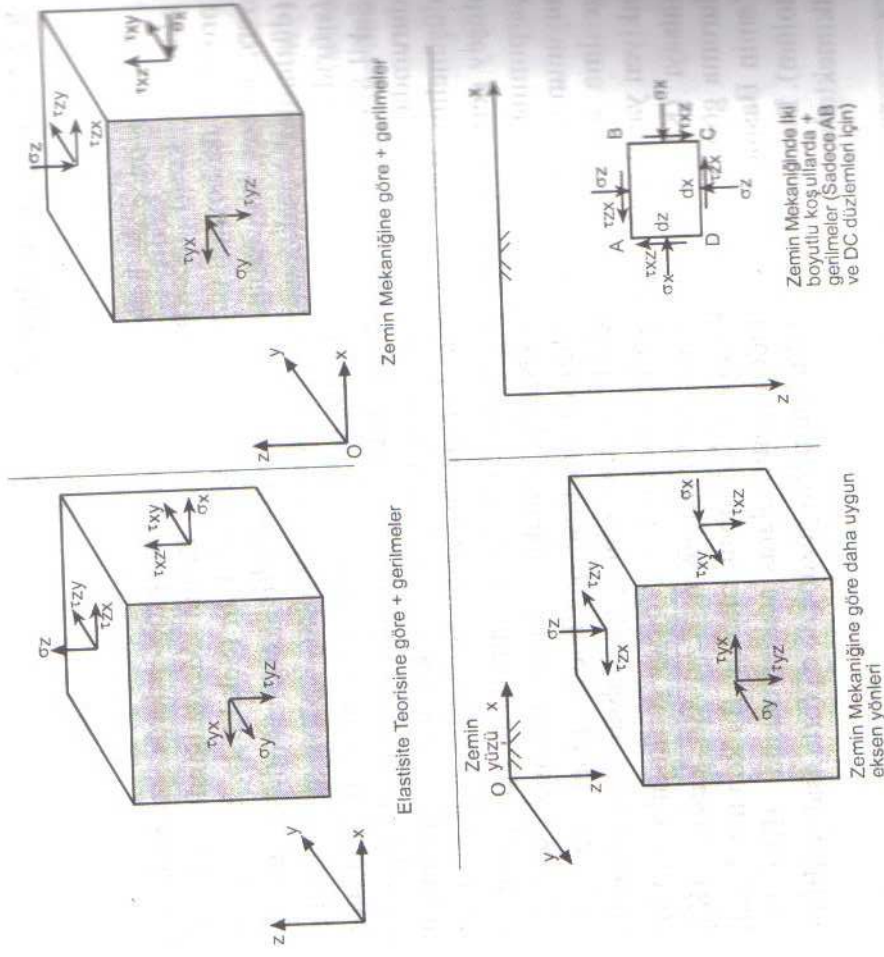


Şekil 8.2 Stabilite (denge) problemleri (iki boyutlu durumlar)

2. grup problemler, **deformasyon problemleridir**. Böyle problemlerde, zemin kitlesinin, kırılma veya göçmeye varılmadan önceki durumuyla ilgilenilir. Bu durumlardaki yer değiştirmeler, deformasyonlar veya gerilmelerin belirlenmesi istenilir. Bir temelin göçme olmaksızın yüklenmesi (temelin oturmasının veya zemin kitlesindeki yer değiştirmelerin, deformasyonların, gerilmelerin belirlenmesi vb.) deformasyon problemlerine örnek olarak verilebilir (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 Deformasyon problemlerine bir örnek



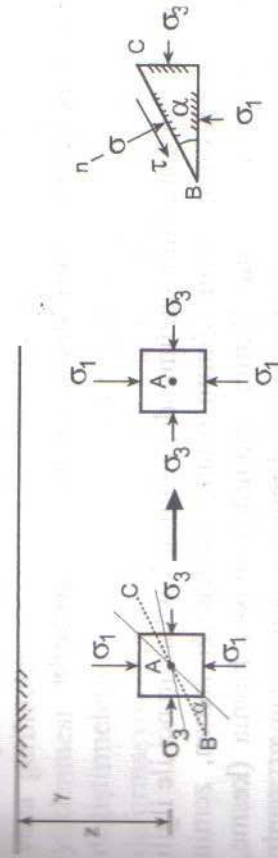
Şekil 8.4 Elastisite Teorisi ve Zemin Mekanikğinde eksenler, + gerilmeler

Stabilite problemlerinin çözümünde, zeminin kayma direnci ile ilgili bilgilerine gereksinim vardır. Zemin ortamı yüklendiği zaman, zeminin kitlesinde gerilmeler oluşur. Zemin ortamında oluşan kayma (kesme, makaslama) gerilmeleri, zeminin kayma direncine vardığı zaman, zeminin kitlesinde kırılma (göçme) meydana gelir. Zeminde kırılma, kayma (kesme, makaslama) deformasyonu biçiminde olur. Zeminin **kayma direnci** (dayanımı, mukavemeti), dayanabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, kayma direnci; kırılma (kayma) sırasında, kayma yüzeyi boyunca etkileyen kayma gerilmesidir.



## 8.2 Mohr gerilme dairesi

Daha önce de belirtildiği üzere, uzun problemlerde, uzunluğa dik olan bir kesiti incelemek yeterlidir. Zemin Mekaniğinde pek çok problem, iki boyutlu (uzun) olarak düşünülebilir (Şekil 8.1). Yatay yüzü yarı sonsuz bir zemin ortamında, genellikle yatay ve düşey kesitler (düzlemler), asal kesitler olup, bu kesitlerdeki kayma gerilmeleri 0 (sıfır)dır ve bu kesitlere büyük ve küçük asal gerilmeler ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) etkir. Şekil 8.5'de yatay yüzü yarı sonsuz bir zemin ortamında, iki boyutlu bir durumda, zemin yüzünden z derinliğindeki bir noktada bir asal elemanı düşünelim. Böyle bir elemanda zeminin kendi ağırlığından dolayı oluşan düşey gerilme (basınç),  $\sigma_d$ , derinlik ( $z$ ) ile zeminin birim ağırlığının ( $\gamma$ ) çarpımına eşittir ( $\sigma_d = z\gamma$ , kN/m<sup>2</sup>). Tabakalı zemin durumu, yer altı suyunun varlığı, yüzey yükleri vb. 'nde düşey gerilme hesaplanabilir ve bu gerilme toplam veya yatay gerilme (basınç),  $\sigma_y$ , düşey gerilmenin ( $\sigma_d$ ) bir etkiyen yanal veya yatay gerilme (basınç),  $\sigma_x = K\sigma_d = Kz\gamma$  Bu katsayı, ( $K$ ), duruma göre 1'den küçük veya 1'den büyük olabilir. Bu konular Yanal Zemin Basınçları Bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmaktadır (Bkz. 12. Bölüm). Bu elemanın şekil düzlemindeki yüzüne de  $\sigma_2$  (orta asal gerilme) etkimektedir.



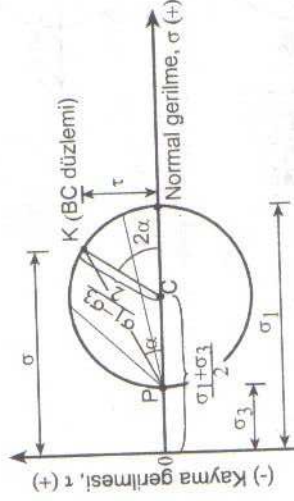
Şekil 8.5 İki boyutlu bir problemde bir eleman.

Bu elemanda;  $\sigma_1$  büyük asal gerilme düşey yönde,  $\sigma_3$  küçük asal gerilme ise yatay yönde etkisin (Tersi de olabilir.). Şekil 8.5'de yatayla  $\alpha$

açısı yapan BC düzlemindeki normal ve kayma gerilmeleri, analitik olarak hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad \text{ve} \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

Bu gerilmeler grafik olarak da belirlenebilir. Bu noktadaki gerilme durumu, yatayda normal gerilmenin ( $\sigma$ ), düşeyde kayma gerilmesinin ( $\tau$ ) gösterildiği bir eksen takımında,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  işaretlenerek, bunların farkını çap kabul eden bir daire ile temsil edilebilir. Bu daireye **Mohr (gerilme) dairesi** denilir (Şekil 8.6).

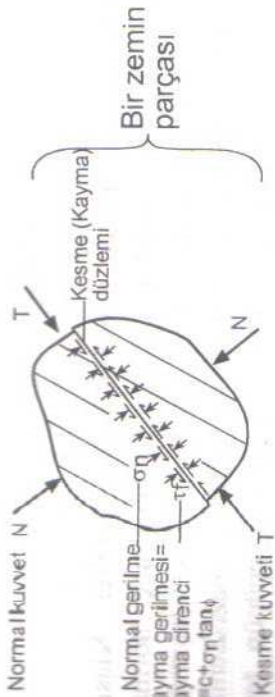


Şekil 8.6 Mohr (gerilme) dairesi.

Bu daire üzerindeki herhangi bir nokta ve bu noktanın koordinatları, zemin kütlesinde, A noktasından geçen bir düzlemdaki (bir kesitteki) gerilme durumunu gösterir. Örneğin, Şekil 8.5'de yatayla  $\alpha$  açısı yapan BC düzlemi üzerindeki gerilme durumu, Şekil 8.6'daki Mohr dairesi üzerinde, yatayla  $2\alpha$  açısı yapan bir nokta ( $K$ ) ile gösterilebilir. Bu noktanın koordinatları ( $\sigma, \tau$ ), BC düzlemi üzerinde etkiyen normal ve kayma gerilmelerini gösterir. Grafik çözüm için eksenlerin aynı ölçekle bölümlendirilmesi gerekir. Bunun gibi daire üzerindeki başka noktalar, bu noktadan geçen başka düzlemleri ve bunların koordinatları da bu düzlemlerdeki gerilmeleri verir. Şekil 8.7'de çeşitli durumlar görülmüştür.

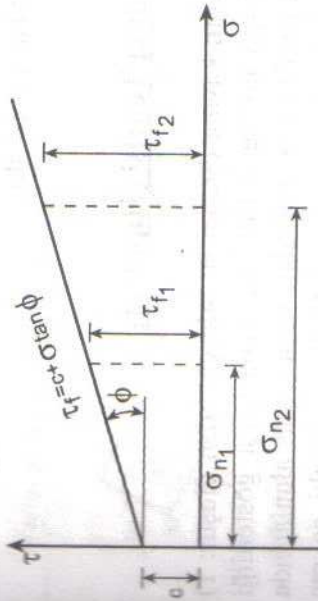






Şekil 8.9 Zeminin maksamlanmasının ve Mohr-Coulomb Hipotezimin şematik gösterimi

$\tau_f$ , kırılma (kayma) anında, zeminin kayma direnci (dayanımı) olup, kırılma yüzeyindeki kayma gerilmesine eşittir.  $c$ , kohezyon olup, zemin (özellikle ince taneli zemin) tanelerinin birbirini çekmesini, birbirine yapışmasını yansıtır.  $\phi$ , içsel sürtünme açısı (kayma direnci açısı) olup, yukarıda açıklanan 1. ve 2. bileşenin toplamını yansıtır. Mohr-Coulomb Hipotezi,  $\sigma$ - $\tau$  eksen takımında bir doğru ile gösterilir (Şekil 8.10).



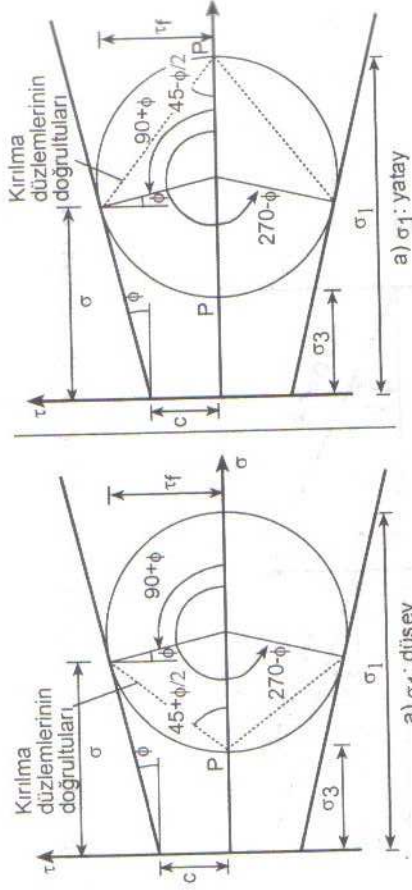
Şekil 8.10 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi

Bağıntı 8.1'de  $c$  ve  $\phi$ , kayma direnci parametreleri olup, zeminin sabitleri gibi düşünülebilirlerse de, konsolidasyon ve drenaj koşullarına vb.'e bağlı olarak aynı zemin için farklı değerler alırlar. Şekil 8.10 ve Bağıntı 8.1'e göre, zeminin kayma direnci sabit bir değer olmayıp, kırılma anında kayma düzlemine etkileyen normal gerilmeye bağlı olarak değişen bir değere (Zeminin kayma direnci sabit bir değere sahip değil, değişken değerli bir terim!) sahip olduğu söylenebilir. Mohr-Coulomb Hipotezi, asal gerilmeler cinsinden de ifade edilebilir (Şekil 8.11).

$$\sigma_1 = 2c \tan(45 + \phi/2) + \sigma_3 \tan^2(45 + \phi/2), \quad \tan^2(45 + \phi/2) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8.2)$$

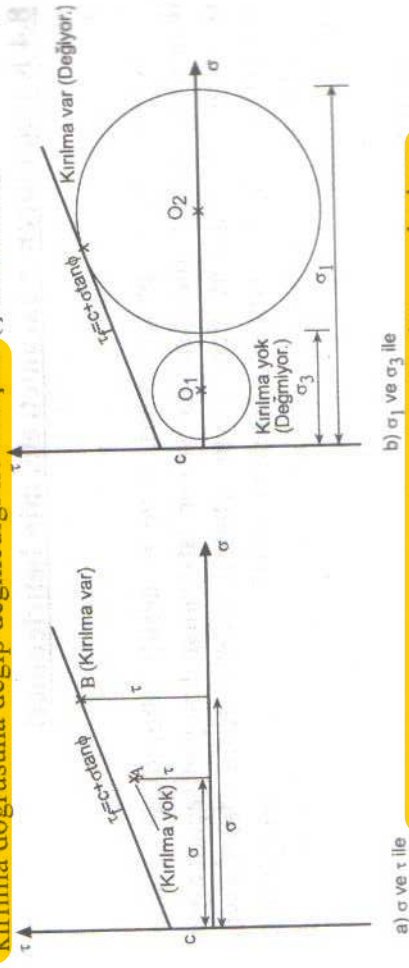
veya

$$\sigma_3 = -2c \tan(45 - \phi/2) + \sigma_1 \tan^2(45 - \phi/2) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (8.3)$$



Şekil 8.11 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi.

Zemin ortamında herhangi bir noktadaki herhangi bir düzlemde kırılma olup olmadığı; bu düzlemdeki kayma gerilmesinin, zeminin kayma direnci ile karşılaştırılmasıyla anlaşılır (Şekil 8.12a). Gene herhangi bir noktada kırılma olup olmadığı, bu noktaya ait dairenin kırılma doğrusuna değip değmediği ile anlaşılır (Şekil 8.12b)



a)  $\sigma$  ve  $\tau$  ile

b)  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  ile

Şekil 8.12 Bir noktadaki bir düzlemde kırılma olup olmadığının anlaşılması

Zeminler, kayma dirençlerine göre sınıflandırılabilir.

a) **Kohezyonlu zeminlerde**,  $c \neq 0$ ,  $\phi = 0$  dir (Şekil 8.13a). Kil gibi.

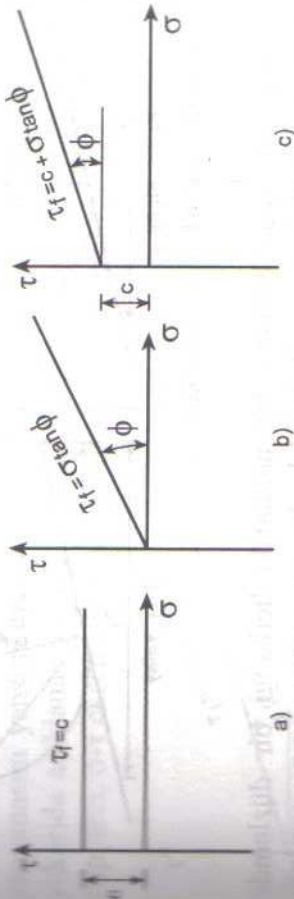
b) **Kohezyonsuz zeminlerde**,  $c = 0$ ,  $\phi \neq 0$  dir (Şekil 8.13b). Temiz kum,

çakıl gibi.

c) **Genel (karma) zeminlerde**,  $c \neq 0$ ,  $\phi \neq 0$  dir (Şekil 8.13c). Killi, siltli

kum veya çakıl gibi.

d)

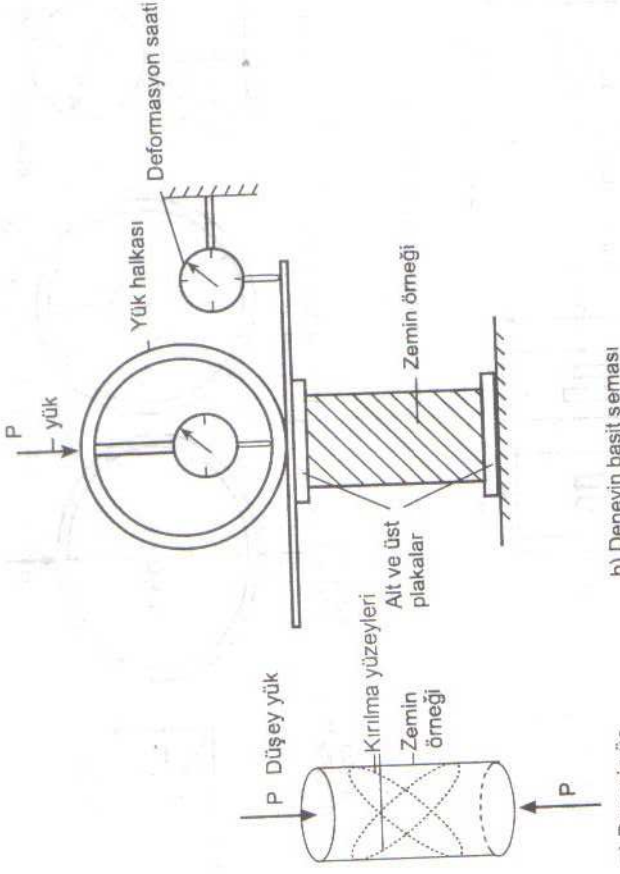


Şekil 8.13 Kayma direncine göre zeminler.

#### 8.4 Kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi

Kayma direnci parametreleri,  $c$  ve  $\phi$ , çeşitli laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenir. Aşağıda başlıca laboratuvar deneyleri açıklanıyor. Bu terimler, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), Presiyometre Deneyi (PMT) vb. arazi deneylerinin sonuçlarından bazı ampirik bağıntı, grafik, tablo vb.'nden de elde edilmektedirler.

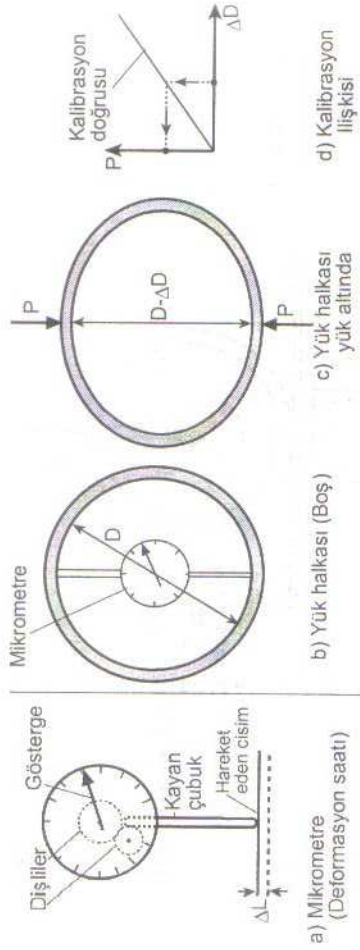
a) **Serbest basınç deneyi**



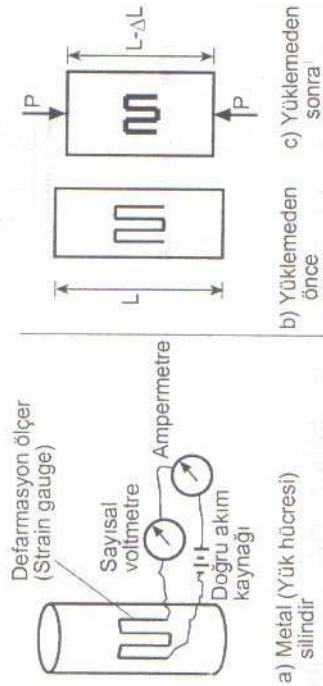
Şekil 8.14 Serbest basınç deneyi.

Örselememiş zemin örneklerinin alınabildiği kohezyonlu zeminler için uygun olan bir deneydir. Örselememiş silindirik ( $D=38$  mm,  $H=76$  mm) zemin örneği, yanal basınç olmaksızın ( $\sigma_3=0$ ), düşey basınç gerilmesine ( $\sigma_1$ ) tabi tutulur. Serbest basınç deney aleti, biri sabit, diğeri düşey yönde hareket ettirilebilen iki yuvarlak plakadan oluşur (Şekil 8.14). Zemin örneği bu iki plaka arasında yerleştirilir. Düşey yük, bir yük halkası (proving ring) (Şekil 8.15), yük hücre (Loading cell) vb. bir yük ölçme düzeni ile ölçülür ve düşey deformasyon biçiminde uygulanır. Yük halkası, elastik, lineer davranan, yuvarlak bir çelik halkadır (Şekil 10.15a). Halkanın yükün uygulandığı doğrultudaki çapında meydana gelen kısalma miktarı ( $\Delta L$ ), içindeki bir deformasyon saati (mikrometre (Şekil 8.15a), okuma saati, saat, dial gauge vb.) ile gözlenir.





Şekil 8.15 Mikrometre ve yük halkası şemaları

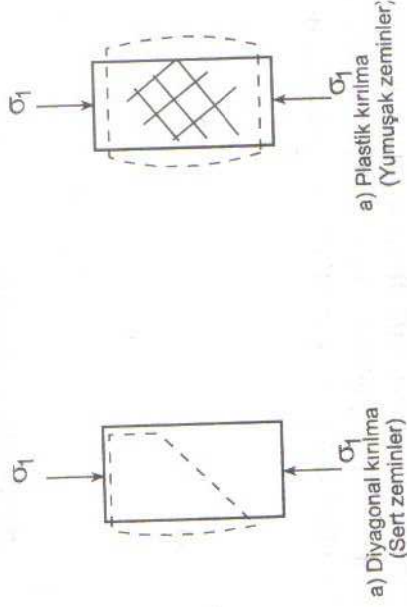


Şekil 8.16 Yük hücresinin şeması

Deformasyon saati, cep saatine benzer bir alet olup, aletten çıkan ve serbestçe kayabilen bir çubuğun hareketi, saat içindeki bir göstergenin dönmesine dönüşür ve hareket miktarı, bu göstergeden okunur (Şekil 8.15a). Yer değiştirmeyi elektronik olarak ölçen aletler de vardır. Daha önce bilinen yükler altında yük halkası kalibre edilerek, içindeki deformasyon saatinin bir taksimatının, ne kadarlık bir yüke (kuvvete) karşılık geldiği belirlenir (Kalibrasyon ilişkisi) (Şekil 8.15d).

Yük hücresi, bir metal silindir (Şekil 8.16a). Üzerine yapıtılan bir deformasyon ölçerinin direncinin değişmesi (Yük hücresi yük altında kısırlırken, deformasyon ölçer de kısalarak kalınlaşır ve böylece direnci değişir) ile yük elektronik olarak ölçülür (Şekil 8.16b ve c).

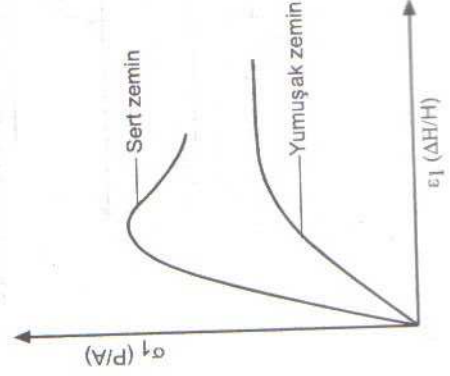
Zemin örneğinin düşey eksene boy kısalması, sabit yere takılmış aynı bir deformasyon saati ile ölçülür. Zemin örneğine, sabit bir düşey deformasyon hareketi ile gitikçe artan bir yük uygulanır. Örneğin kırılması, değişik biçimlerde olabilir (Şekil 8.17).



Şekil 8.17 Değişik kırılma biçimleri.

Kırılma anındaki en büyük yük ( $P_{max}$ ), zemin örneğinin  $A_f$  enkesit alanına bölünerek, **serbest basınç mukavemeti**,  $q_u$ , bulunur.

$$q_u = \sigma_1 = P_{max}/A_f \quad (8.4)$$



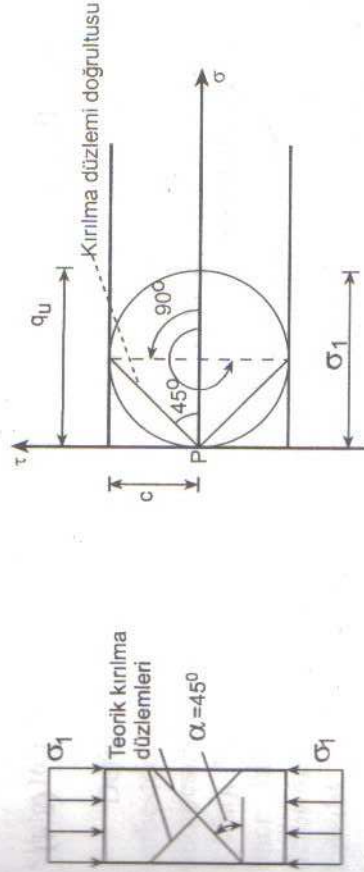
Şekil 8.18. Serbest basınç deneyinde deformasyon-gerilme ilişkileri

Serbest basınç deneyinde, yükleme, görelî olarak hızlıdır ve deney koşulları, drenajsız (Zemin örneğinden su çıkamaz.) olarak düşünülür. Kısaca zemin örneğinin hacmi, deney süresince sabit kalır. Kırılma sırasında, zemin örneğinin enkesit alanı,  $A_f$ , aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V = \text{sabit} = A_0 H_0 = A_f H_f, \quad H_f = H_0 - \Delta H$$

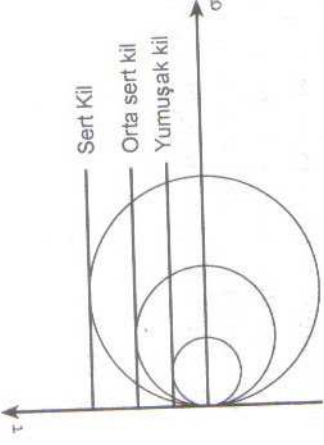
$$A_f = \frac{A_0}{1 - \frac{\Delta H}{H_0}} \quad (8.5)$$

$A_0$ ,  $H_0$ , sırasıyla, zemin örneğinin başlangıçtaki en kesit alanı ve yüksekliğidirler.  $\Delta H$ , kırılma anında, zemin örneğinin düşey boy kısalmasıdır. Deneye ait diyagram, Şekil 8.19'da görülmektedir. Serbest basınç deneyinde, kohezyon, serbest basınç mukavemetinin yarısına eşittir (Şekil 8.19). Drenajsız kohezyon değeri, killerde kıvama (sertlik-yumuşaklık) bağlıdır. Kıvama da zeminin su içeriğine bağlıdır. Kohezyon (c), sert zeminlerde yüksek, yumuşak zeminlerde düşüktür.



Şekil 8.19 Serbest basınç deneyi.

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (8.6)$$



Şekil 8.20 Killerde kıvam-serbest basınç direnci ilişkisi

Deney için, düşey deformasyon (yatay eksende)-düşey gerilme (düşey eksende) ilişkisi çizilebilir (Şekil 8.18). Bazı deney aletleri, bu ilişkiyi, deney sırasında çizerler. Killerde serbest basınç, mukavemeti (dolayısıyla da kohezyon), arazide cep penetrometresi denilen bir alet ile ölçülebilir. Avuç içine sığabilen bu aletin ucundaki yuvarlak metal silindirik çubuk zemine batırılır. Batırmaya karşı ölçülen dirençten (kuvvetten), serbest basınç mukavemeti belirlenir.

Kohezyonlu zeminler, serbest basınç mukavemetlerine göre sınıflandırılabilirler. Tablo 8.1'de böyle bir sınıflandırma görülmüştür.

Tablo 8.1 Serbest basınç mukavemetine göre killerin sınıflandırılması

Kıvam (ayrıntılı)	Serbest basınç mukavemeti $q_u$ , kN/m <sup>2</sup>	Kıvam (basit)
Çok yumuşak	<25	Yumuşak <50
Yumuşak	25-50	Orta sert 50-200
Yumuşak-orta sert	50-100	
Orta sert	100-200	Sert >200
Sert	200-400	
Çok sert	>400	

Killerde, hassaslık (duyarlılık) ( $S_t$ ) (sensitivity) aşağıdaki gibi tanımlanır.

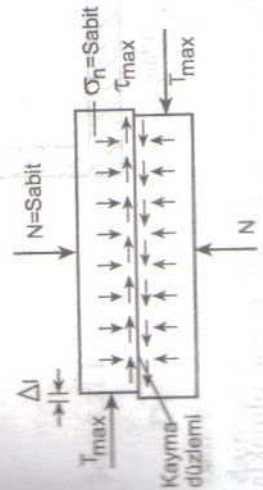




kutuya yerleştirilir. Zemin örneğinin alt ve üst yüzlerini iyi kavramak üzere, çıkıntuları, kesme hareketine dik olan iki metal plaka kullanılır. Drenajlı deneylerde, deney sırasında, zemin örneğinden suyun çıkabilmesi için, çıkıntılı plakanın alt ve üstüne geçirilmiş taş plakalar yerleştirilir. Çıkıntılı plakalar, drenajlı deneylerde delikli olurlar. Zemin örneği üzerine 90, 180, 360, 720 N luk gibi sabit bir düşey yük uygulanır. Düşey yük sabit iken, yatay olarak sabit bir kesme deformasyonu uygulanır. Bu elle veya bir elektrik motoru ile uygulanabilir. Gittikçe artan kesme kuvvetine karşı, zemin örneği önce direnir, sonra iki halkayı ayıran düzlem boyunca kesilir ( $T_{max}$ ). Uygulanan kesme kuvveti, bir yük halkası, bir yük hücresi (Yük hücresi elektronik olarak çalışır.) vb. ile ölçülür. Deney sırasında kesme deformasyonunu ( $\Delta l$ ) ölçmek için bir mikrometre kullanılır. Zemin örneğinin deney sırasındaki hacim değişmesini (sıkışma veya kabarma) izlemek üzere bir deformasyon saati, en üstteki yüklem plakası üzerine oturtulur. Deney başlangıcından itibaren, hem yük halkası ve hem de düşey deformasyon saatinin okumaları, belli zaman aralıkları ile okunarak, kaydedilir. Zemin örneği kesildikten bir süre sonra, deneye son verilir. Kırılma anındaki, normal ve kesme gerilmeleri, aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 8.24).

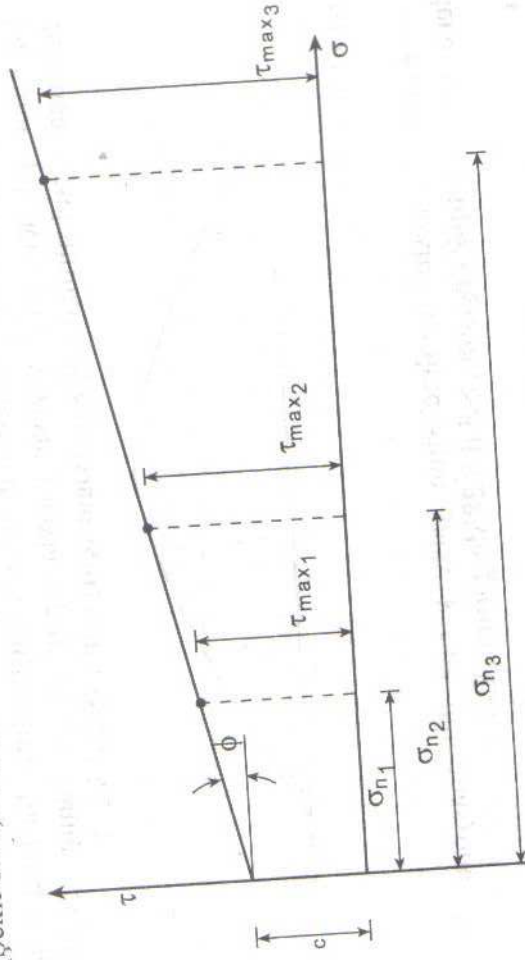
$$\sigma_n = N/A = \frac{N}{60 \times 60} = st, \quad \tau_{max} = \frac{T_{max}}{A} = \frac{T_{max}}{60 \times 60} \quad (8.8)$$

A alanı daha duyarlı olarak,  $60 \times (60 - \Delta l)$  olarak da alınabilir.  $\Delta l$ : Kesme anındaki yatay hareket miktarı (mm)



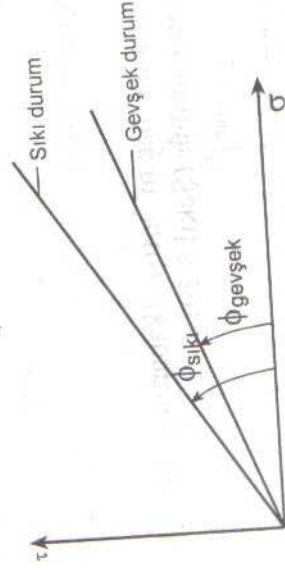
Şekil 8.24 Kesme kutusu deneyinde gerilmeler.

Deney, değişik düşey sabit yükler altında, bir kaç kez tekrarlanır ve deney sonuçları  $\sigma$ - $\tau$  eksen takviminde işaretlenerek, bir doğru geçirilir (Şekil 8.25). Buradan  $c$  ve  $\phi$  belirlenir.



Şekil 8.25 Kesme kutusu deneyinde  $c$  ve  $\phi$ 'nin belirlenmesi.

Kumlar üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerine göre, içsel sürtünme açısı, aynı kum için, rölatif sıklık arttıkça artar, azaldıkça azalır (Şekil 8.26).



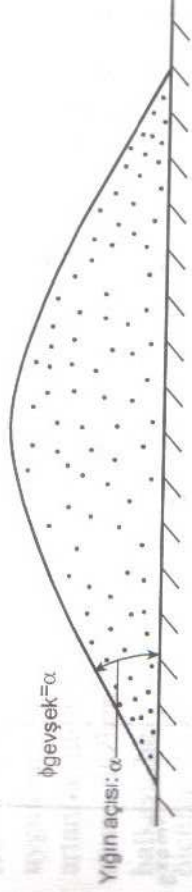
Şekil 8.26 Aynı kumda sıkı ve gevşek durumlardaki içsel sürtünme açıları

Kumlarda, içsel sürtünme açısı ayrıca, zeminin iyi veya kötü derecelenmiş olmasına, tanelerin şekline (köşeli, yuvarlak vb.) bağlıdır ( $20^{\circ}$ - $50^{\circ}$  vb.). İyi derecelenmiş kumda içsel sürtünme açısı, kötü



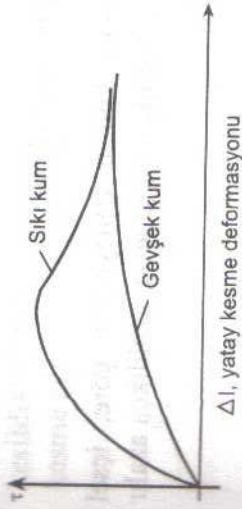
derecelenmişe göre daha büyük, köşeli taneli kumlarda yuvarlak taneliye göre daha büyüktür.

Yatay bir düzlemde, serbestçe dökülerek oluşturulmuş bir kuru kum yığınının şev açısı (eğik yüzeyin yatayla yaptığı açı), o kumun gevşek durumdaki içsel sürtünme açısına (yağın açısı) eşittir (Şekil 8.27).



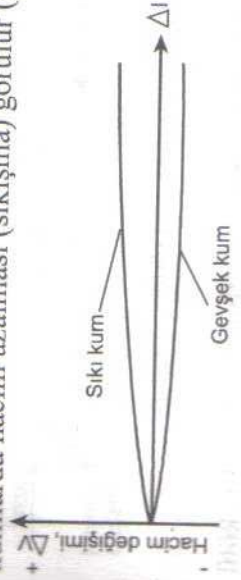
Şekil 8.27 Yağın açısı

Kumlarda, kesme gerilmelerinin yatay kesme deformasyonu ile deney sırasında tipik değişimi, Şekil 8.28'de görülmektedir.



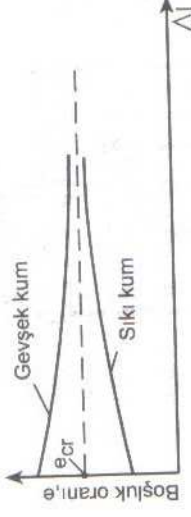
Şekil 8.28 Kumlarda kesme deformasyonu -  $\tau$  ilişkisi.

Deney sırasında, sıkı kumlarda hacim artışı (kabarma), gevşek kumlarda hacim azalması (sıkışma) görülür (Şekil 8.29).



Şekil 8.29 Kumlarda kesme deformasyonu - Hacim değişimi ilişkisi.

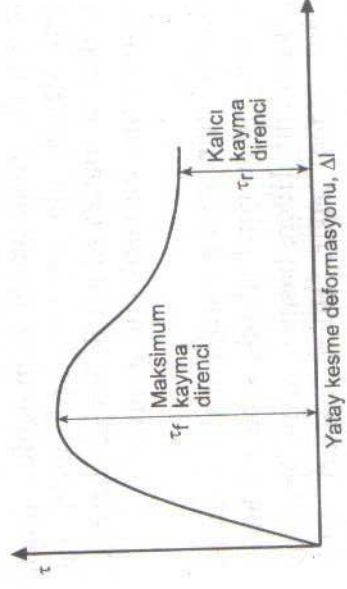
Kumlarda hacim değişimi, Şekil 8.30'da boşluk oranı cinsinden görülmektedir.



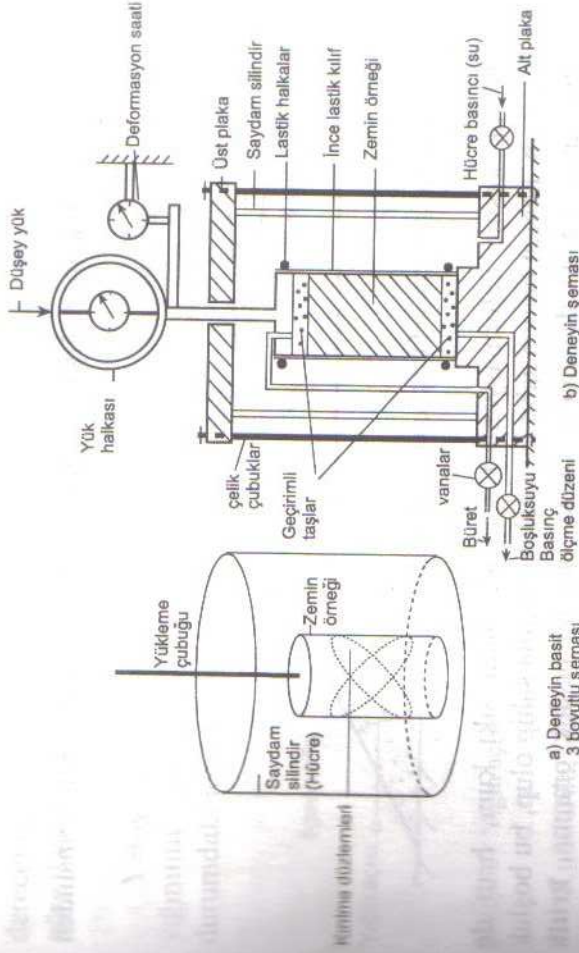
Şekil 8.30 Kumlarda kesme deformasyonu -  $e$  ilişkisi.

Büyük kesme deformasyonları sonunda, hem sıkı kum, hem de gevşek kum, hemen hemen sabit bir boşluk oranına sahip olup, bu boşluk oranında artık hacim değişimi olmaz. İşte bu boşluk oranına, **kritik boşluk oranı** ( $e_{cr}$ ) denilir (Şekil 8.30). Bu kavram **Kritik Durum Zemin Mekanığı**'nde sıkça kullanılır.

Killerde kesme deformasyonu devam ettikçe kayma direnci (drenajsız) azalarak sabit bir değere yaklaşır. Bu değere **kalıcı (kalıntı, artık) kayma direnci** (residual strenght) ( $\tau_r$ ) denilir (Şekil 8.31).



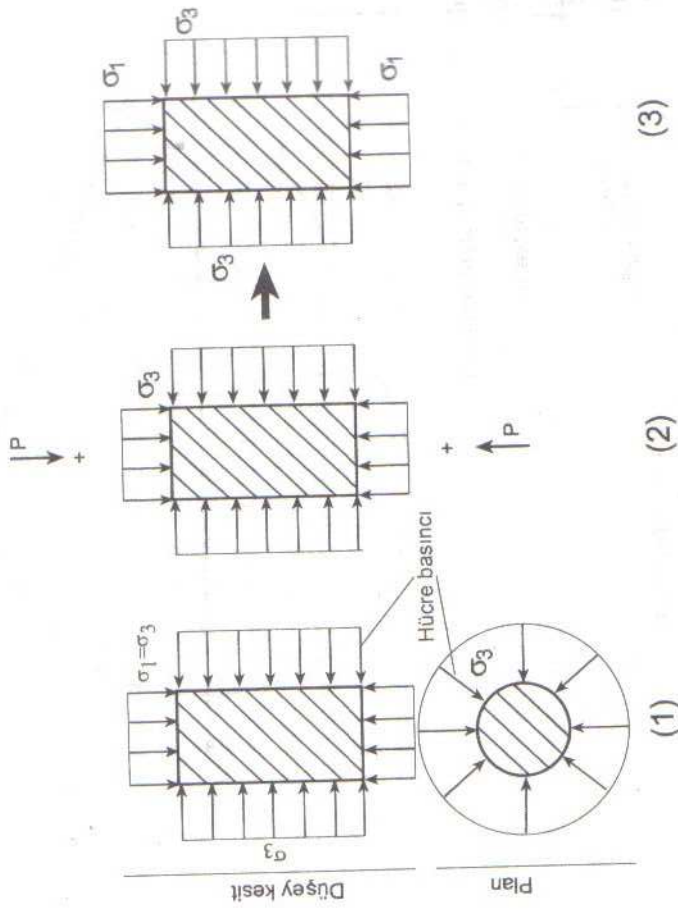
Şekil 8.31 Killerde kalıcı (rezidüel) direnç



Şekil 8.32 Üç eksenli deneyin şeması.

Deney düzeninin şeması, Şekil 8.32'de görülmüyor. Üç eksenli basınç deneyi, gelişmiş bir kayma direnci deneyi olup, her çeşit (kohezyonlu veya kohezyonsuz) için uygundur. Deney için silindirik zemin örnekleri kullanılıp, örneklerde boy/çap oranı 2/1 dir. Tipik örnek boyutları 76 mm/38 mm, 100 mm/50 mm vb. dir. Kohezyonlu zeminlerden alınan örnekler, taneli zeminlerden altı ve üstü açık metal bir silindirik kalıpta, belli bir sıklıkta hazırlanan silindirik örneğin üzerine, çevreden su girmesini önlemek üzere ince bir lastik kılıf geçirilir.

Drenaj koşullarını kontrol etmek için, zemin örneğinin alt ve üstüne birer geçirimsiz taş yerleştirilir. Hücreye su gönderilerek, sabit bir hücre basıncı (hidrosatik basınç,  $\sigma_3$ ) uygulanır. Hücre basıncı, zemin örneğine her yönden (yanlardan, alttan, üstten) etkir. Hücre basıncı sabit tutulurken; sabit bir hızla, düşey bir hareket vasıtasıyla, sıfırdan (0) başlayıp, gittikçe artan bir düşey yük uygulanarak, zemin örneği kırılır. Uygulanan düşey yük, yük halkası vb. ile ölçülür. Zemin örneğinin aksenel boy kısalması, bir deformasyon saati vb. ile ölçülür. Kırılma, Şekil 8.17'de gösterilen biçimlerde olur.



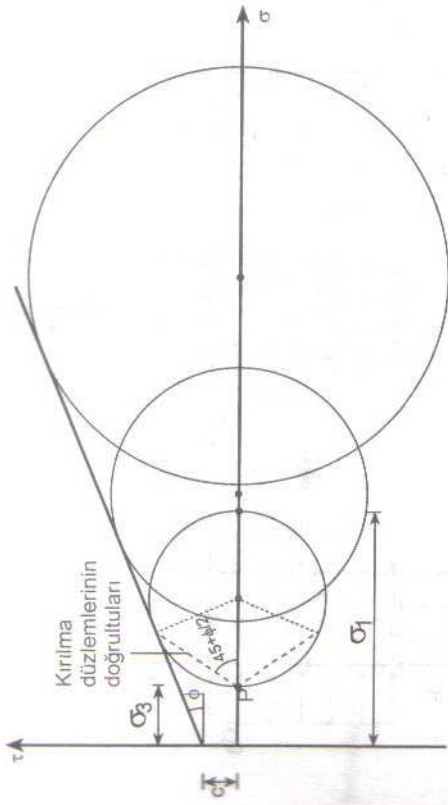
Şekil 8.33 Üç eksenli deneyde, örnek üzerindeki gerilmeler.

Sadece, sabit hücre basıncı varken, zemin örneği her taraftan sabit bir  $\sigma_3$  basıncına maruzdur (Şekil 8.33). Hücre basıncı sabit tutulurken, düşey yük artırıldığında, zemin örneği, yanal olarak  $\sigma_3 = \sigma_2 =$  sabit hücre basıncına ve düşey olarak da

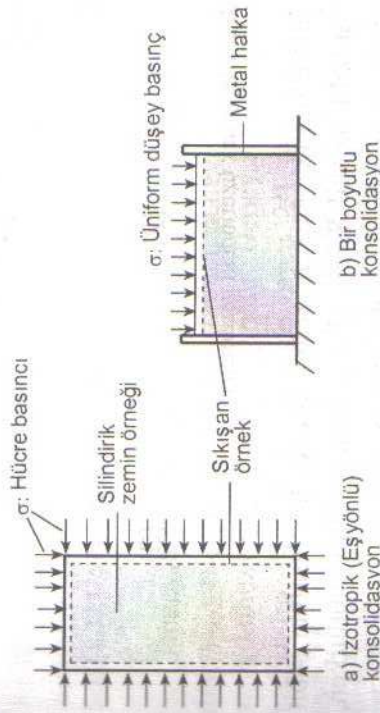
$$\sigma_1 = \sigma_3 + P/A_f \quad (8.9)$$

basıncına maruzdur.  $A_f$ , zemin örneğinin enkesit alanıdır. Kırılma anında, düşey yük maksimum olur. Deney, değişik hücre basınçları altında (50, 100, 150 vb.  $\text{kN/m}^2$ ) birkaç kez tekrarlanır. Deneylere ait Mohr daireleri çizilerek, bunların ortak tegeti (zarfı) belirlenir. Bu grafikten,  $c$  ve  $\phi$  parametreleri tayin edilir (Şekil 8.34).





Şekil 8.34 Üç eksenli deneyin sonuçları.



Şekil 8.35 İzotropik (Eşyönlü) ve bir boyutlu konsolidasyon

Üç eksenli deney aletinde, drenaj ve konsolidasyon koşulları açısından, başlıca üç çeşit deney yapılabilir. **Konsolidasyon**, sabit basınç altında, zamanla zeminden bir kısım suyun çıkarak, zeminin sıkışması (e-1) olayıdır (Şekil 8.35a ve b). **1) Konsolidasyonsuz-drenajsız deney (drenajsız deney, hızlı deney, UU deneyi)**'de, drenaj suyu vanaları kapatılarak, deney sırasında, zemin örneğinden su çıkışına izin verilmez. Hücre basıncı uygulandıktan hemen sonra, hızlı bir yükleme ile zemin örneği kırılır. Deney sırasında, zemin örneği içinde oluşan boşluksuyu basıncı ölçülmez. **2) Konsolidasyonlu-drenajsız deneyler (CU deneyi)**'de,

213

hücre basıncı uygulandıktan sonra, zemin örneği bu basınç altında konsolidasyona (sıkışma) tabi tutulur. Yani, hacimce bir miktar azalma yapması sağlanır. Bu safhada sıkışmaya olanak sağlamak üzere, drenaj vanaları açılır, zeminden bir miktar su çıkar. Konsolidasyon durduktan, tamamlandıktan sonra, drenaj vanaları kapatılarak drenajsız koşullarda zemin örneği yüklenerek kesilir. Drenajsız kesme sırasında, boşluksuyu basıncı uygun bir sistemle ölçülür. **3) Konsolidasyonlu-drenajlı deneyler (drenajlı deney, yavaş deney, CD deneyi)**'de, zemin örneği önce hücre basıncı altında konsolidasyona tabi tutulur. Sonra, örnek içinde ek boşluksuyu basıncı oluşmayacak şekilde, gayet yavaş düşey yükleme yapılır ve drenaja izin verilir. Drenaj suyu, hacim bölümlü bir cam boruda (büret) toplanır. Büretteki su düzeyinden, deney sırasında zemin örneğinin hacim değişimi ( $\Delta V$ ) izlenilir, ölçülür.

Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi toplam gerilmelere göre ifade edilebildiği gibi, efektif gerilmelere göre de ifade edilebilir.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{Toplam gerilmelere göre}) \quad (8.10)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (\text{Efektif gerilmelere göre}) \quad (8.11)$$

$c$  (veya  $c_u$ ): **Görünen kohezyon**,  $\phi$  (veya  $\phi_u$ ): **Görünen içsel sürtünme açısı**,  $c'$  **Efektif kohezyon**,  $\phi'$  **Efektif içsel sürtünme açısı**,  $u$ : kırılma anında, zemin örneği içindeki boşluksuyu basıncı. Üç eksenli deney sonunda, Mohr daireleri, toplam ve efektif gerilmelere göre çizilerek, kırılma zarfı belirlenir. Böylece bulunan  $c$  ve  $\phi$  parametreleri de görünen veya efektif adlarını alırlar. Daha ayrıntılı olarak, yukarıdaki 3 tür deney ile elde edilen kayma direnci parametreleri, UU deneyinde  $c_{UU}$  (veya  $c_u$ ),  $\phi_{UU}$  (veya  $\phi_u$ ), CU deneyinde  $c_{CU}$ ,  $\phi_{CU}$ , CD deneyinde  $c_{CD}$  (veya  $c'_d$ ),  $\phi_{CD}$  (veya  $\phi'_d$ ) şeklinde alırlar. Herhangi bir stabilite probleminde, hangi tür deneylerden elde edilen kayma direnci parametrelerinin kullanılacağı, incelenen problemin, konsolidasyon ve drenaj koşullarına uygun deney yapmakla çözümlenir. Örneğin, arazide incelenen stabilite probleminde, önce konsolidasyon, sonra da drenaja imkan vermeyecek hızlı bir yükleme meydana geliyorsa, araziden alınan zemin örneği üzerinde CU

deneysel yapılar, elde edilen kayma direnci parametreleri, analizde kullanılır.

Üç eksenli deney sırasında, zemin örneğinin A enkesit alanı değişir. Örneğin yükseklığı azalırken, çapı artar. Ayrıca, konsolidasyonlu veya drenajlı deneylerde de, zemin örneğinden bir miktar su çıkararak bürette (hacim bölümlü cam silindirik kap) toplanır. Bürette toplanan su, zemin örneği suya tam doygun olduğundan, hacim değişimini ( $\Delta V$ ) verir. Drenajsız deneylerde hacim sabit kaldığı için, serbest basınç deneyindekine benzer olarak,

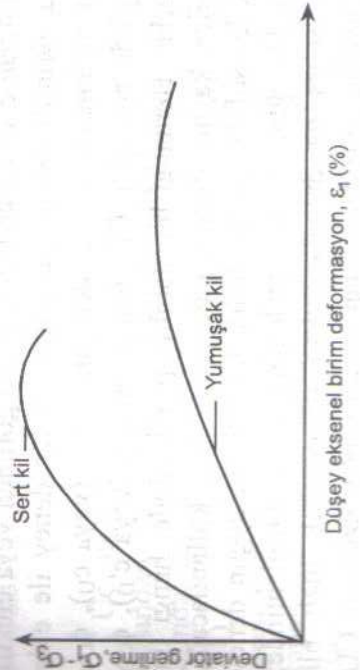
$$A_f = \frac{A_0}{1 - \Delta H / H_0} \quad (8.12)$$

olur.  $\Delta H$ , kırılma anında zemin örneğinin boy kısalmasını gösteriyor. Konsolidasyonlu ve drenajlı deneylerde ise, zemin örneğinin kırılma anındaki enkesit alanı,

$$A_f = A_0 \frac{1 - \Delta V / V_0}{1 - \Delta H / H_0} \quad (8.13)$$

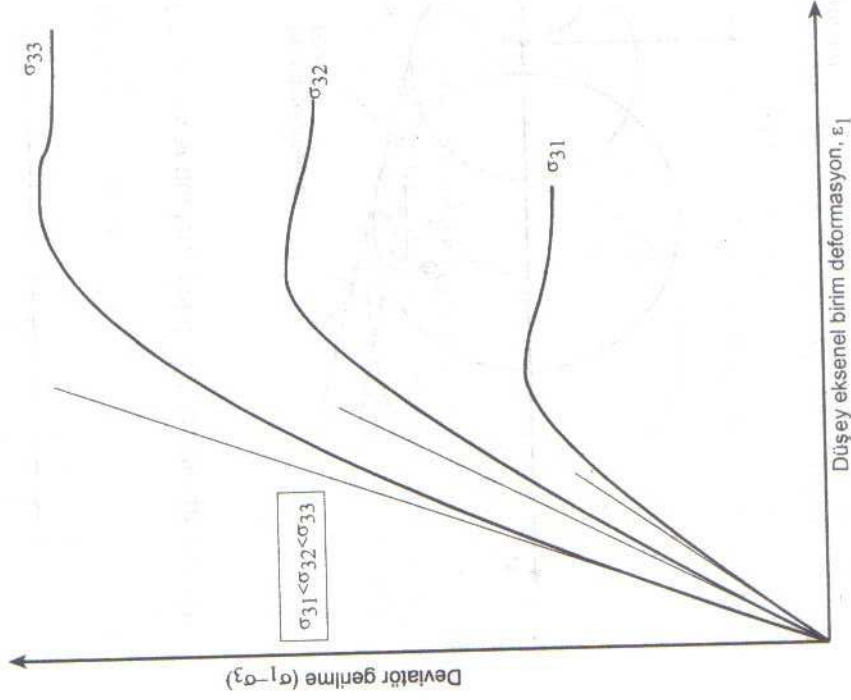
bağıntısıyla hesaplanır.  $V_0$ , örneğin ilk hacmidir.

Suya doygun killi zeminlerde, tipik deviator gerilme düşey eksenel deformasyon ilişkisi, Şekil 8.36'da görülmektedir. **Deviatör gerilme**, asal gerilmeler farkı ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) olarak tanımlanır.



Şekil 8.36 Deviator gerilme- $\epsilon_1$  ilişkisi

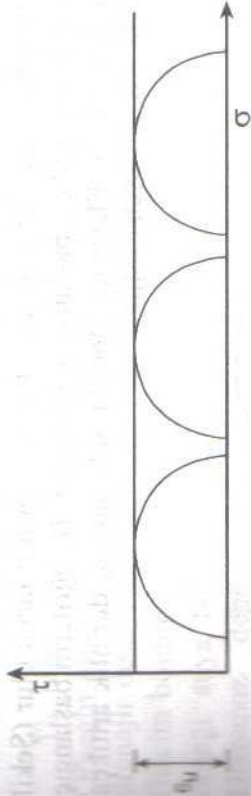
Aynı zeminde farklı hücre basınçları ile yapılan üç eksenli deneylerde eksenel birim deformasyon-deviator eğrileri farklı olur (Şekil 8.37). Hücre basıncı arttıkça, başlangıç eğimi artar. Bu eğrilerin başlangıç açılarının tanjantı bir tür Elastisite Modülü olduğundan, derinlik arttıkça bu modülün de artacağı söylenebilir.



Şekil 8.37 Aynı zeminde farklı hücre basınçlarında yapılan üç eksenli deneylerde  $\epsilon_1$  ve  $\sigma_1 - \sigma_3$  ilişkileri

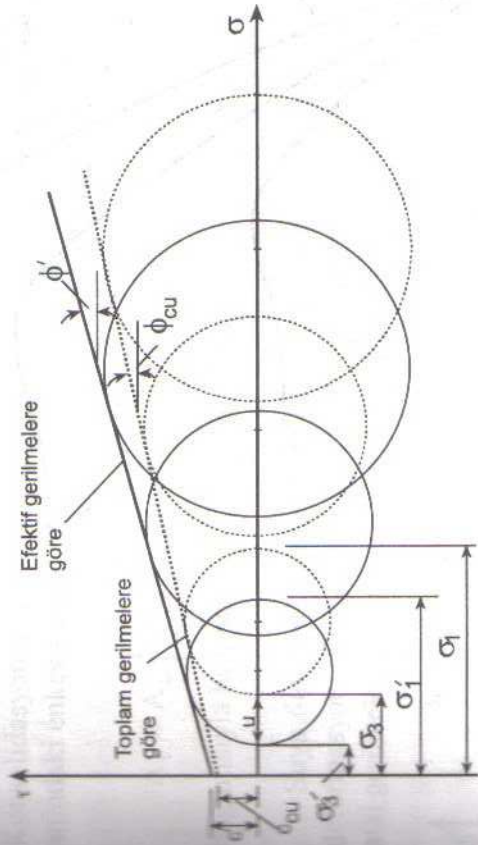
Killerde tipik UU deney sonuçları, Şekil 8.38'de görülmektedir.





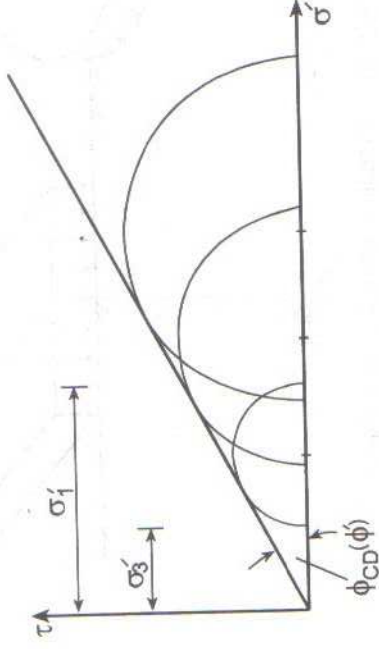
Şekil 8.38 K illerde tipik UU deney sonuçları.

K illerde, tipik CU deney sonuçları, Şekil 8.39'da görülmektedir.



Şekil 8.39 CU deney sonuçları.

Konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deneylerinde deney sonuçları, toplam ve efektif gerilmelere göre çizilebilir (Şekil 8.40). CD deneylerine ait tipik bir şekil, Şekil 8.40'da görülmektedir.



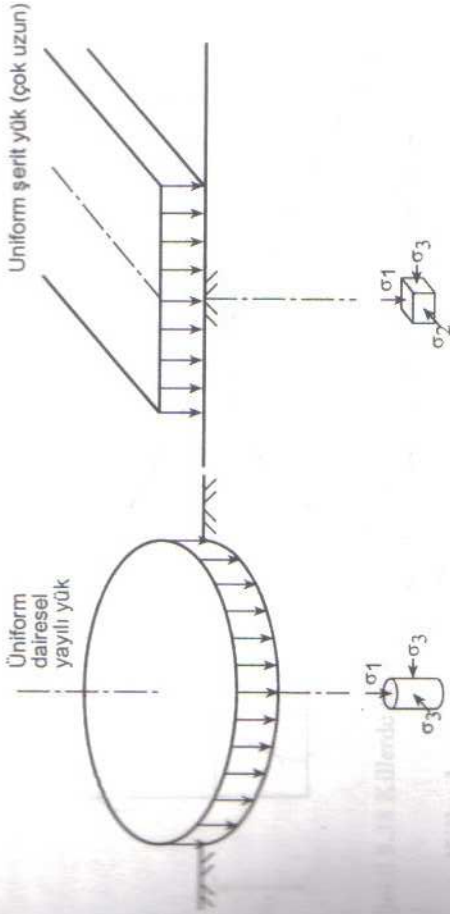
Şekil 8.40 CD deney sonuçları.

Kohezyonlu zeminlerde gerek arazide, gerekse üç eksenli deneyde drenajsız koşullarda, asal gerilmelerdeki artışlardan dolayı boşluksuyu basıncının ne kadar değiştiği, **boşluksuyu basıncı parametreleri, A, B** kullanılarak belirlenebilir. Üç eksenli deney koşullarında, asal gerilmelerdeki artışlar,  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$  ise, boşluksuyu basıncındaki artış  $\Delta u$

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (8.14)$$

olur. Burada A ve B Skempton boşluksuyu basıncı parametreleri adını alırlar. Bu parametreler, zeminin doygunluk derecesine ( $S_r$ ), zeminin gerilme geçmişine (normal veya aşırı konsolide olmuşluk durumuna) vb.'e bağlı olarak çeşitli değerler almaktadırlar. Bu parametreler, üç eksenli deneylerle belirlenebilir.

Diğer ilgili deneyler



a) 3 eksenli basınç deneyinin tam uygun b) Düzlem deformasyon deneyinin tam uygun olduğu eksenel simetrik durum

Şekil 8.41 3 eksenli (Eksenel simetrik) ve düzlem deformasyon (Plane strain) deneylerinin ideal karşılıkları

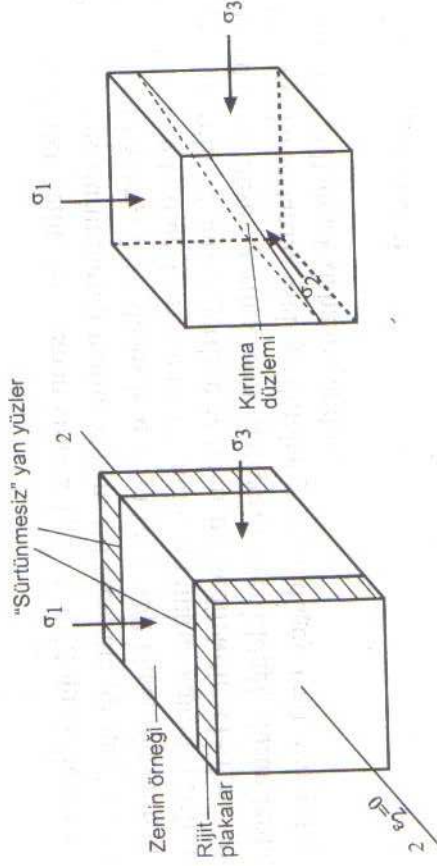
Bu 3 eksenli deney, özel bir 3 eksenli (eksenel simetrik) 3 eksenli deneydir. İdeal olarak eksenel simetrik 3 eksenli deney sonuçları, uniform daireysel bir yükün merkezi altındaki yerlerde kullanılır (Şekil 8.41a). Gerçek 3 eksenli deney, bir prizmatik veya kübik örneğe etkiyen 3 gerilme ile temsil edilebilir. Böyle bir deney, teknik olarak çok zor yapılabilir. Ancak iki boyutlu koşullarda (düzlem deformasyon durumu) bir deney yapılabilir (Şekil 8.41b ve 8.42). Düzlem deformasyon (plane strain test) deneyinde, zemin örneği, yanal olarak hareketi önlenmiş ve iç yüzeyleri neredeyse sürtünmesiz iki metal plaka arasında tutulur. Düzlem deformasyon deneyinde,  $\sigma_3$  sabit tutulurken,  $\sigma_1$  artırılarak örnek kırılır. Düzlem deformasyon deneyinde  $\sigma_2$  de vardır. İki boyutlu koşullardaki stabilite problemlerinde (şev, şerit temel vb.) (Şekil 8.1) bu deneyden elde edilen  $c, \phi$  kullanılmalıdır. Zira bunlar eksenel simetrik 3 eksenli deney sonuçlarından epeyce farklıdır (birkaç derece fazla).

Araştırmacılar aynı zemin için kesme kutusu ( $\phi_{kesme}$  kutusu), üç eksenli (Eksenel simetrik) ( $\phi_{0\phi}$  eks.) ve düzlem deformasyon ( $\phi_{düz. def.}$ ) deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açıları arasında bazı ampirik

ilişkiler (Bowles, 1988) ile büyüklük açısından sıralama (Cornforth, 1964) verilmiştir:

$$\phi_{kesme} kutusu < \phi_{0\phi} eks < \phi_{düz. def.} \quad (8.15)$$

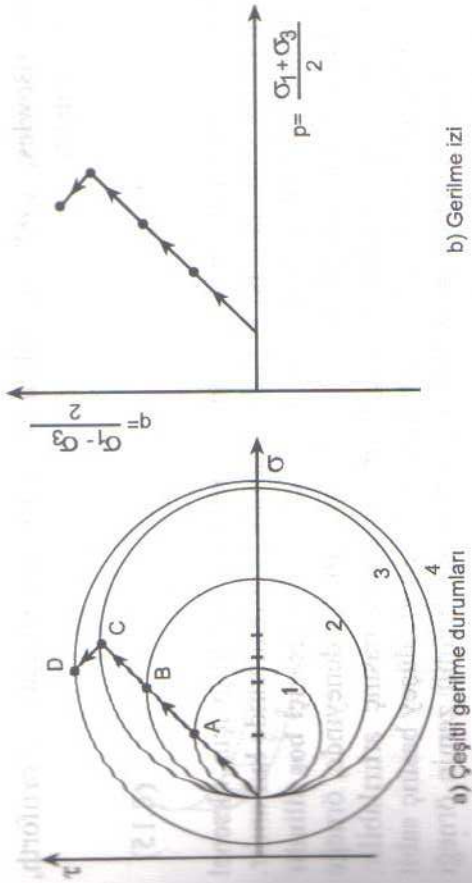
Düzlem deformasyon deney olanağı pek elde olmadığı için, eksenel simetrik deney sonuçları, iki boyutlu stabilite problemlerinde kullanılır. Bu da sonuçlarda bir miktar hata ortaya çıkarır. Ayrıca içi boş silindirik deneyi, halka kesme deneyi vb. vardır. İçi boş silindirik deneyinde, örneğe içte ve dışta farklı basınçlar uygulanırken, düşey basınç artırılabilir. Halka kesme deneyinde, halka biçimli zemin üzerinde düşey basınç sabit iken, bir halka diğerine göre döndürülerek halka biçimli zemin örneği ortadan kesilir.



Şekil 8.42 Düzlem deformasyon deneyinin şeması

Gerilme izi (stress path); bir zemin elemanında, elemanın maruz kaldığı çeşitli gerilme durumlarını birbirine bağlayan çizgidir. Diğer bir deyişle,  $\sigma$ - $\tau$  eksen takımında, Mohr dairelerinde, maksimum kayma gerilmesi noktalarını birbirine bağlayan çizgidir (Şekil 8.43). Bu kavram, zeminin gerilme geçişini açıklamakta veya deneyel olarak incelemekte kullanılır.





Şekil 8.43 Gerilme izi.

Şekil 8.43'deki gibi, bir eleman sırayla 1, 2, 3, 4 Mohr daireleri ile gösterilen gerilme durumlarına maruz kalsın. Bu elemana ait gerilme izi yatayda  $p$  veya  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  ve düşeyde  $q$  veya  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  eksen takımında, Şekil 8.43b'deki gibi olur. Gerilme izi ile elemanın maruz kaldığı gerilme durumları öğrenilir. 2 farklı gerilme izinden bahsedilebilir. Gerilme izi yönütemi, yatay ve düşey gerilmelerin asal gerilmeler olduğu durumlarda kullanılır. Bu durumlarda, asal gerilmeler yerine, düşey ( $\sigma_d$ ) ve yatay ( $\sigma_y$ ) gerilmeleri kullanmak daha uygundur.

a) Toplam gerilme izi

$$\frac{\sigma_d - \sigma_y}{2} \text{ ile } \frac{\sigma_d + \sigma_y}{2} \text{ veya } q - p \text{ arasında}$$

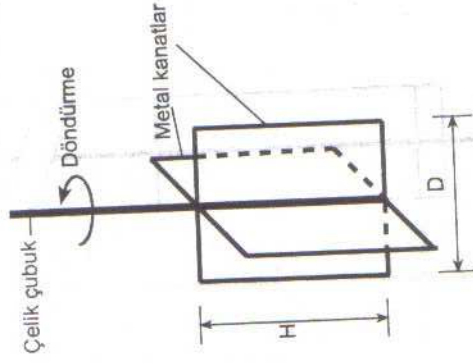
b) Efektif gerilme izi

$$\frac{\sigma'_d - \sigma'_y}{2} \left( \text{veya } \frac{\sigma_d - \sigma_y}{2} \right) \text{ ile } \frac{\sigma'_d + \sigma'_y}{2} \text{ arasında}$$

veya  $q' - p'$  (veya  $q - p'$ ) arasında

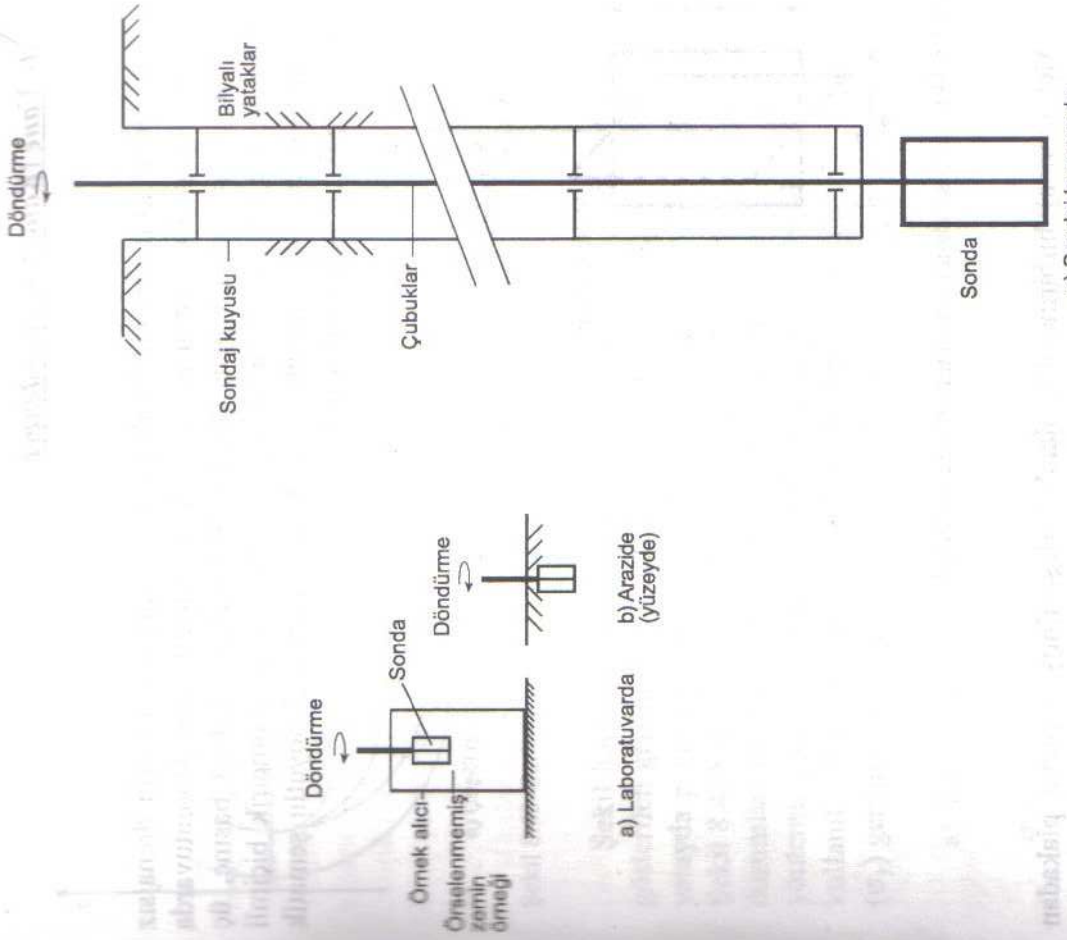
#### d) Vane (Kanatlı sonda) deneyi

Bu deney, killi zeminlerin, özellikle de yumuşak killerin drenajsız koşullarda, kayma direncini ( $c_u$ , kohezyon) ölçmek için, laboratuvarda veya arazide yapılan bir deneydir. Böyle killerden; serbest basınç, üç eksenli, kesme kutusu vb. deneyleri için hazırlanan geometrik biçimli örneklerde önemli örselenmeler olur. Deney aletinin 3 boyutlu şematik görünüşü, Şekil 8.44'de görülmüyor.



Şekil 8.44 Kanatlı sondanın 3 boyutlu şematik görünüşü

Alet (sonda) birbirine dik olarak birleştirilmiş 4 metal plakadan oluşur (Şekil 8.44). Laboratuvar sondasının çap ve yüksekliği 10-20 mm, arazi sondasının çap ve yüksekliği ise 100-200 mm kadardır. Laboratuvar sondası için, örnek alıcı (tüp) içinde bulunan örselenmemiş zemin örneğine veya düzlenmiş zemin yüzüne gerek vardır (Şekil 8.45 a ve b). Sonda zemine batırılır, sonra döndürme momenti uygulayarak, zemin, bir silindirin alt, üst ve yan yüzleri boyunca kesilir.

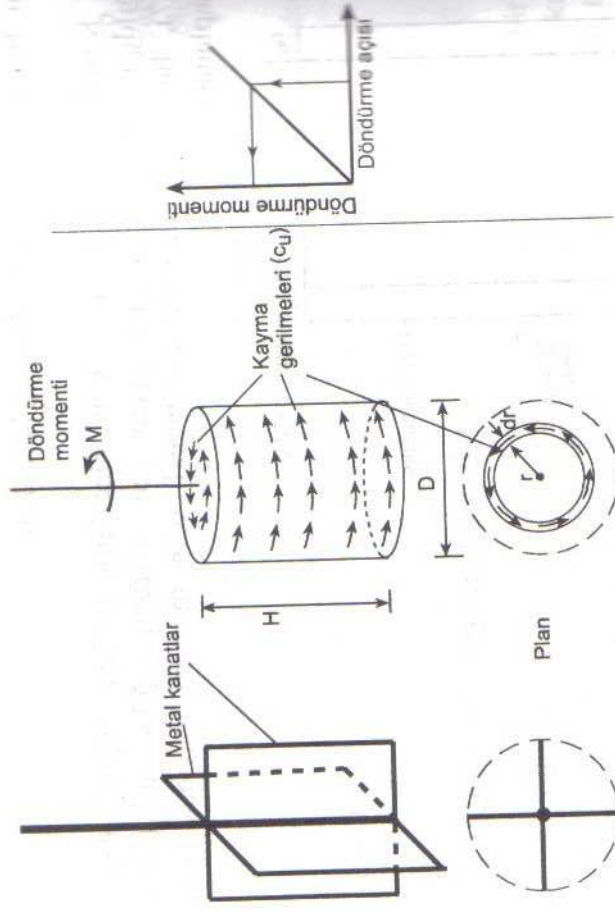


Şekil 8.45 Kanatlı sonda deneyinin yapılışı

(d) Araziye deney yapmak için, açılmış bir sondaj kuyusuna (deliğine) ihtiyaç vardır veya çakmalı tiplerde; sonda, koruyucunun içinde, zemine çakılır, sonda bir miktar aşağı sürülür, sonra döndürme momenti uygulanır, zemin kesilir. Kesme anında uygulanan döndürme momenti, bir ölçme düzeni ile ölçülür. Döndürme momentini ölçmek için

genellikle, döndürmeye karşı lineer, elastik davranan, kalibre edilmiş yaylar kullanılır. Deney sırasında, ölçülen döndürme miktarından (açı) kalibrasyon ilişkisi ile moment hesaplanır. Deney çeşitli derinliklerde yapılarak, c'nin derinlikle değişimi belirlenebilir.

Kayma gerilmelerinin, tüm kesme yüzeylerinde üniform bir şekilde yayıldığı kabul edilerek, yan yüzeyi kesmek için uygulanan moment,  $M_1$ ,



Şekil 8.46 Vane deneyi.

$$M_1 = \pi D H c_u \frac{D}{2} = \frac{1}{2} \pi D^2 H c_u \quad (8.16)$$

olarak yazılabilir (Şekil 8.46). Alt ve üst yüzleri kesmek için gerekli olan moment,  $M_2$  olsun. r yarıçaplı, dr kalınlıklı bir halka elemanı kesmek için gerekli olan moment,  $2\pi r dr c_u$  dir.  $M_2$ ,

$$M_2 = 2 \int_0^{D/2} 2\pi r dr c_u r = \frac{\pi c_u D^3}{6} \quad (8.17)$$



olur. Toplam moment,

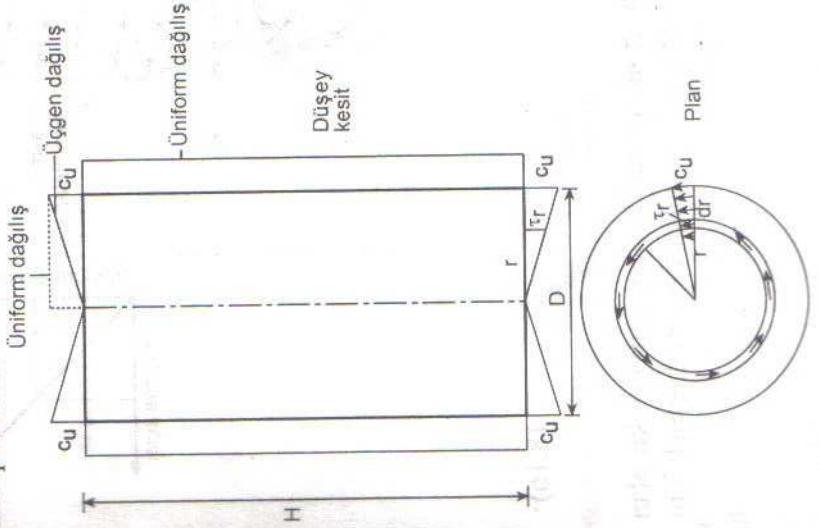
$$M = M_1 + M_2 = \pi D^2 c_u \left( \frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right) \quad (8.18)$$

olur. Eğer sondanın üst yüzü serbest ise (alet zemine H kadar batırılırsa),

$$M = \pi D^2 c_u \left( \frac{H}{2} + \frac{D}{12} \right) \quad (8.19)$$

olur. Bağntı 8.18 veya 8.19'dan  $c_u$  hesaplanır.

Kayma gerilmelerinin alt ve üst yüzeylerde üniform değil de, üçgen dağılıdğı kabul edilirse (Yan yüzde gene üniform dağılış var.) (Şekil 8.47), bu yüzleri kesmek için gerekli olan moment aşağıdaki gibi hesaplanabilir.



Şekil 8.47 Vane aletinde alt ve üst yüzlerde kayma gerilmelerinin dağılımları

$$\frac{\tau_r}{c_u} = \frac{r}{D/2}, \tau_r = \frac{2c_u r}{D}, M_{alt,üst} = 2 \int_0^{D/2} 2\pi r dr \frac{2c_u r}{D} = \frac{\pi c_u D^3}{8}$$

Sonuç olarak

$$M_{toplam} = \frac{\pi D^2 H}{2} + \frac{\pi c_u D^3}{8} = \pi D^2 c_u \left( \frac{H}{2} + \frac{D}{8} \right) \quad (8.20)$$

elde edilir.

Arazide killi zeminin kohezyonunu çabuk ölçmek için bir cep aleti (cep veyni) kullanılabilir. 30-50 mm gibi çapında, alt yüzünde radyal ince levhalar olan alet zemin yüzüne batırılır, döndürülür. Bu sırada ölçülen momentten kohezyon hesaplanır.

Bazı araştırmacılarca, ölçülen  $c_u$  için düzeltme (azaltma) katsayıları uygulanması önerilmiştir.

### 8.5 Cözümlü örnek problemler

**Problem 8.1)** 38.1 mm çapında, 76.2 mm yüksekliğindeki bir ayyıldaygın kil zemin üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve kırılma anında, düşey yük 81 N ve düşey eksenel kısılma 3.46 mm olarak ölçülmüştür. Zeminin serbest basınç mukavemeti ile, kohezyonunun bulunuz.

#### Cözüm

Kırılma anında, zemin örneğinin enkesit alanı, Bağntı 8.5'den

$$A_r = \frac{A_0}{1 - \Delta H/H_0} = \frac{\frac{\pi \times 38^2}{4} \times 10^{-6}}{1 - 3.46/76.2} = 11.94 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ bulunur.}$$

Serbest basınç mukavemeti ve kohezyon,  $q_u = 0.081 / (11.94 \times 10^{-4}) = 6.79 \text{ kN/m}^2$ ,  $c = 69/2 = 34.5 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunur.

**Problem 8.2)** Bir kum üzerine, kesme kutusu deneyleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur. Kumun içsel sürtünme açısını belirleyiniz.

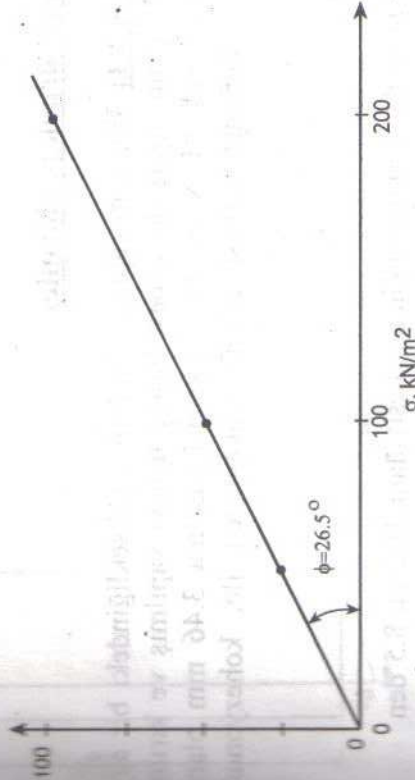
Tablo 8.2 Problem 8.2.

Deney No.	Normal kuvvet, kN	Maks. kayma kuvveti, kN	Normal gerilme $kN/m^2$	Maks. kayma ger., $kN/m^2$
1	0.18	0.0936	50	26
2	0.36	0.1764	100	49
3	0.72	0.361	200	100

Problem Çözüm

**Çözüm**

Normal ve maksimum kayma gerilmeleri Bağntı 8.8'den hesaplanır. Hesaplanan değerler, Tablo 8.2'de görülmektedir.  $\sigma$ - $\tau$  ilişkisi çizilerek,  $\phi$  açısı  $26.5^\circ$  olarak belirlenir (Şekil 8.48).



Şekil 8.48 Problem 8.2.

**Problem 8.3)** 38 mm çapında, 76 mm yüksekliğindeki suya doymuş zemin örnekleri üzerinde, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneyler yapılmış olup, deney sonuçları

Tablo 8.3'de verilmektedir. Zeminin kayma direnci parametrelerini belirleyiniz.

Tablo 8.3 Problem 8.3.

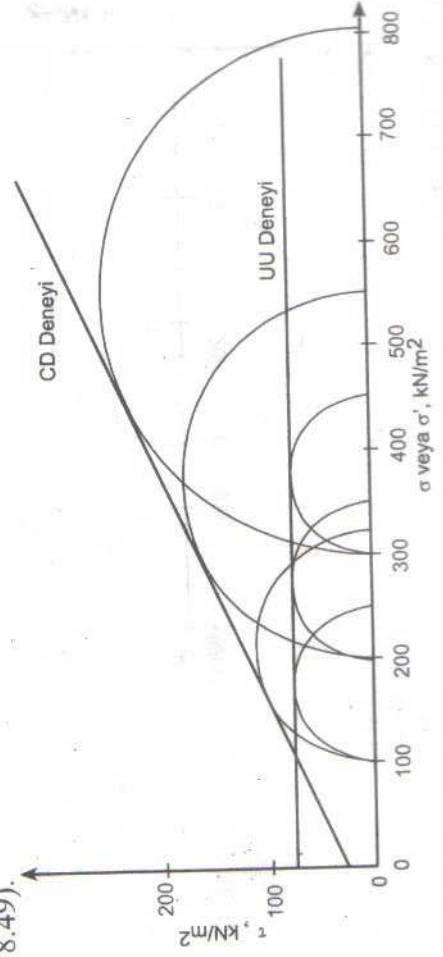
Deney Tipi	No.	$\sigma_3, \sigma'_3$ $kN/m^2$	$P_{max}$ $kN$	$\Delta H$ $mm$	$\Delta V$ $ml$	$A_f$ $\times 10^{-4} m^2$	$\sigma_1, \sigma'_1$ $kN/m^2$
UU	1	100	0.1863	6.21	-	12.34	251
	2	200	0.1865	7.19	-	12.52	349
	3	300	0.1936	8.14	-	12.70	452
CD	1	100	0.2620	7.43	5.3	11.80	322
	2	200	0.4064	8.56	7.9	11.61	550
	3	300	0.5909	9.75	8.2	11.77	802

Problem

Çözüm

$A_0 = \pi \times 38^2 \times 10^{-6} / 4 = 11.34 \times 10^{-4} m^2$ ,  $V_0 = 11.34 \times 10^{-4} \times 76 \times 10^{-3} = 86.14 \times 10^{-6} m^3$ . UU deneyinde, Bağntı 8.12'den  $A_f$  hesaplanır.  $\sigma_1$  ise, Bağntı 8.9'dan hesaplanır. Hesaplanan değerler Tablo 8.3'te görülmüştür. Bu toplam gerilmelere göre Mohr daireleri çizilirse,  $\phi_u = 0$ ,  $c_u = 75 kN/m^2$  olarak bulunur (Şekil 8.49).

CD deneyinde,  $A_f$ , Bağntı 8.13'den,  $\sigma'_1$  ise Bağntı 8.9'dan hesaplanır. Hesaplanan değerler Tablo 8.3'te görülmüştür. Bu efektif gerilmelere göre, Mohr daireleri çizilirse, efektif kayma direnci parametreleri,  $c_{CD} = c' = 25 kN/m^2$ ,  $\phi_{CD} = \phi' = 24.6^\circ$  olarak belirlenir (Şekil 8.49).



Şekil 8.49 Problem 8.3.



**Problem 8.4)** Örselenmemiş ve suya doygun yumuşak bir kil zemin örneği üzerinde, laboratuvar vane deneyi yapılmıştır. Kesme anında uygulanan döndürme momenti 86 Nm olarak ölçülmüştür. Kanatlı sondanın çapı 10 mm, yüksekliği 15 mm olduğuna göre, zeminin kohezyonunu hesaplayınız. Kanatlı sonda, zemine tamamen batırılmıştır.

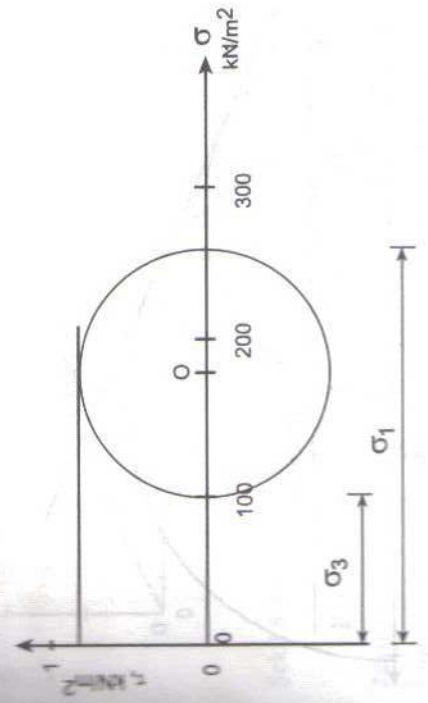
### Cözüm

Bağıntı 8.19'dan

$$86 \times 10^{-3} = \pi \times 10^2 \times 10^{-6} \times c \times \left( \frac{15 \times 10^{-3}}{2} + \frac{10 \times 10^{-3}}{6} \right), \quad c = 30 \text{ kN/m}^2$$

olarak bulunur.

**Problem 8.5)** İçsel sürtünme açısı sıfır ( $\phi=0$ ) ve fakat kohezyonu 80 kN/m<sup>2</sup> olan bir zemin üzerinde yapılan bir üç eksenli konsolidasyonsuz drenajsiz deneyde, hücre basıncı 100 kN/m<sup>2</sup> iken, zemin örneğine kırılma anında uygulanan yük (kuvvet) ne kadar olabilir (Şekil 8.50)? Zemin örneğinin başlangıç çapı, 38 mm, başlangıç yüksekliği 76.2 mm, kırılma anındaki yüksekliği 73.4 mm. dir.



Şekil 8.50 Problem 8.5.

### Cözüm

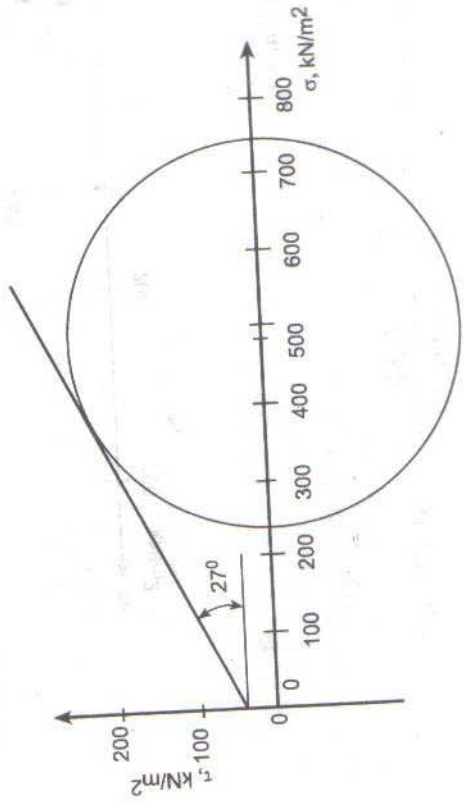
$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c, \quad \sigma_1 = 2 \times 80 + 100 = 260 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{P_{\max}}{A_f}, \quad A_f = \frac{\pi \times 38^2 \times 10^{-6}}{1 - \frac{76.2 - 73.4}{76.2}} \approx 11.774 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$260 = 100 + \frac{P_{\max}}{11.774 \times 10^{-4}}, \quad P_{\max} = 0.18838 \text{ kN}$$

**Problem 8.6)** Kohezyonu 40 kN/m<sup>2</sup>, içsel sürtünme açısı 27° olan bir zemin üzerinde yapılan üç eksenli deneylerden birinde; hücre basıncı 230 kN/m<sup>2</sup> iken, kırılma anında uygulanan yük ne kadar olabilir? Kırılma anında zemin örneğinin enkesit alanını 11.74x10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> olarak alınız (Şekil 8.51).

### Cözüm



Şekil 8.51 Problem 8.6.

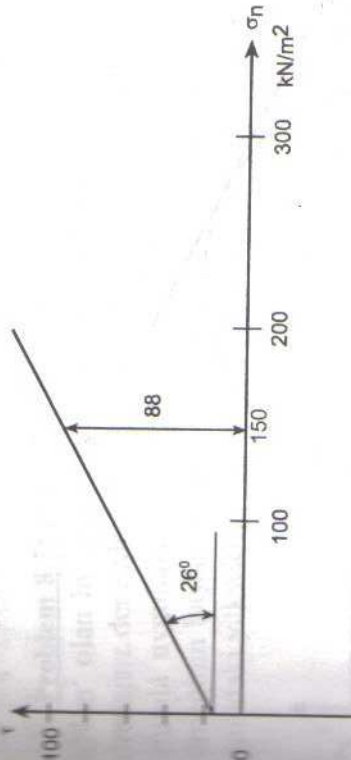
$$\sigma_1 = 2c \tan(45 + \phi / 2) + \sigma_3 \tan^2(45 + \phi / 2)$$

$$\sigma_1 = 2 \times 40 \times \tan(45 + 27/2) + 230 \times \tan^2(45 + 27/2) = 743.1 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{P_{\max}}{A_f}, \quad 743.1 = 230 + \frac{P_{\max}}{11.74 \times 10^{-4}}, \quad P_{\max} = 0.60238 \text{ kN}$$

**Problem 8.7)** Bir kesme kutusu (60 mmx60 mm) deneyinde, zemin örneği üzerinde 540 N luk yük varken, örneğin kesilmesi sırasında 317.3 N luk bir kesme kuvveti uygulandığı ölçülmüştür. Zeminin kohezyonu 15 kN/m<sup>2</sup> olduğuna göre, bu zeminin içsel sürtünme açısı ne kadar olabilir?

### Cözüm



Şekil 8.52 Problem 8.7.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi, \quad \sigma_n = \frac{N}{A} = \frac{0.540}{60 \times 60 \times 10^{-6}} = 150 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau_{\max} = \tau_f = \frac{T_{\max}}{A} = \frac{0.3173}{3600 \times 10^{-6}} = 88 \text{ kN/m}^2$$

$88 = 15 + 150 \times \tan \phi$ ,  $\phi \approx 26^\circ$  bulunur.

Veya, Şekil 8.52'den grafik olarak,  $\phi \approx 26^\circ$  olarak ölçülür.

**Problem 8.8)** Bir genel zeminde ( $c \neq 0$ ,  $\phi \neq 0$ ) yapılan bir kesme kutusu deneyinde (60 mm x60 mm), 180 N luk sabit düşey yük altında kesme anındaki kesme kuvveti 231.8 N dur. Aynı zemin üzerinde yapılan bir başka kesme kutusu deneyinde düşey yük 360 N iken, karşılaşılabilecek en büyük kesme kuvveti ne kadar olabilir? Bu zeminin içsel sürtünme açısı  $26$  derecedir.

### Cözüm

Genel bir zemin için Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi,

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$$

$$\frac{0.2318}{60 \times 60 \times 10^{-6}} = c + \frac{0.18}{60 \times 60 \times 10^{-6}} \times \tan 26 \rightarrow c = 40 \text{ kN/m}^2$$

$$\tau = 40 + \frac{0.36}{3600 \times 10^{-6}} \times \tan 26 \rightarrow \tau \approx 89 \text{ kN/m}^2$$

$$T_{\max} \approx 89 \times 60 \times 60 \times 10^{-6} = 0.3204 \text{ kN}$$

**Problem 8.9)** Diğer bilgilerin Şekil 8.53'de verildiği durumda A noktasındaki bir asal elamanda yatay basınç  $30 \text{ kN/m}^2$  ise, bu elamanda kırılma meydana geldiğine göre, bu zeminin içsel sürtünme açısı kaç derecedir? Not: Bu elamanda kırılma anında büyük asal gerilme düşey yöndedir

### Cözüm

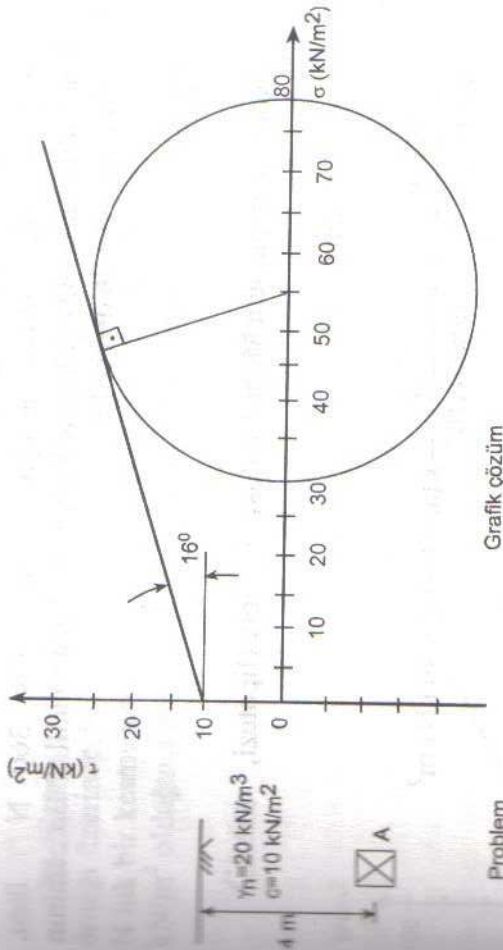
$$\sigma_1 = \sigma_3 = 4 \times 20 = 80 \text{ kN/m}^2, \quad \sigma_1 = \sigma_3 = 30 \text{ kN/m}^2, \quad c = 10 \text{ kN/m}^2$$



$$\sigma_1 = 2c \tan \phi + \sigma_3 \tan^2 (45 + \phi/2)$$

$$80 = 2 \times 10 \times \tan(45 + \phi/2) + 30 \times \tan^2(45 + \phi/2)$$

$$45 + \phi/2 = 53^\circ \rightarrow \phi = 16^\circ \text{ bulunur.}$$



Problem

Şekil 8.53 Problem 8.9

Veya çizimle, ölçülerek  $\phi \approx 16^\circ$  bulunur.

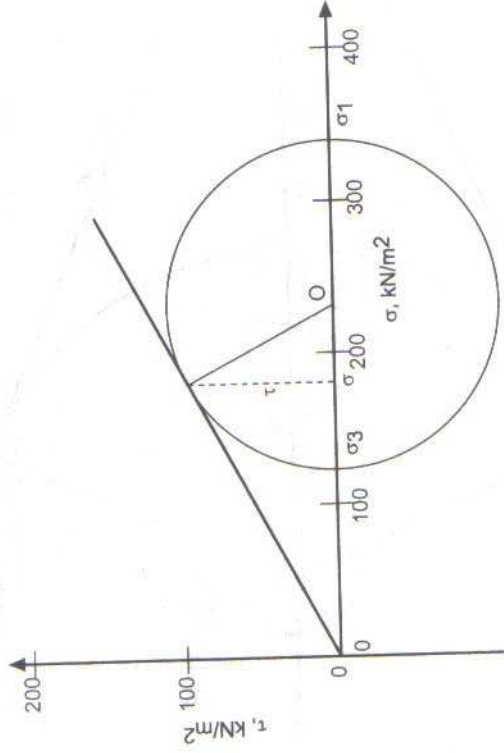
**Problem 8.10)** Bir kesme kutusu deneyinde (60 mmx60 mm) kum zeminin ( $c=0$ ) örneğinin kesilmesi sırasında örneğe uygulanan düşey yük 648 N, kesme kuvveti 345.6 N dur. Zemin örneğine etkiyen asal gerilmeleri bulunuz.

### Cözüm

Probleme ilgili şekil, Şekil 8.54'de görülmüyor. Kırılma sırasında örneğe etkiyen normal ve kesme gerilmeleri,

$$\sigma_n = \frac{0.648}{0.06 \times 0.06} = 180 \text{ kN/m}^2 \quad \text{ve} \quad \tau = \frac{0.3456}{0.06 \times 0.06} = 96 \text{ kN/m}^2$$

olarak bulunur. Mohr eksenleri ölçekli çizilip,  $\sigma_n$  ve  $\tau$  işaretlenir, kırılma doğrusu ( $\tau = \sigma_n \tan \phi$ ) ve Mor dairesi çizilirse, asal gerilmeler  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$ , sırayla 340 ve 122.5 kN/m<sup>2</sup> olarak bulunur (Şekil 8.54). Grafik çözüm nedeniyle bu değerler yaklaşıktır. Bu değerler analitik yolla tam hesaplanabilir.



Şekil 8.54 Problem 8.10

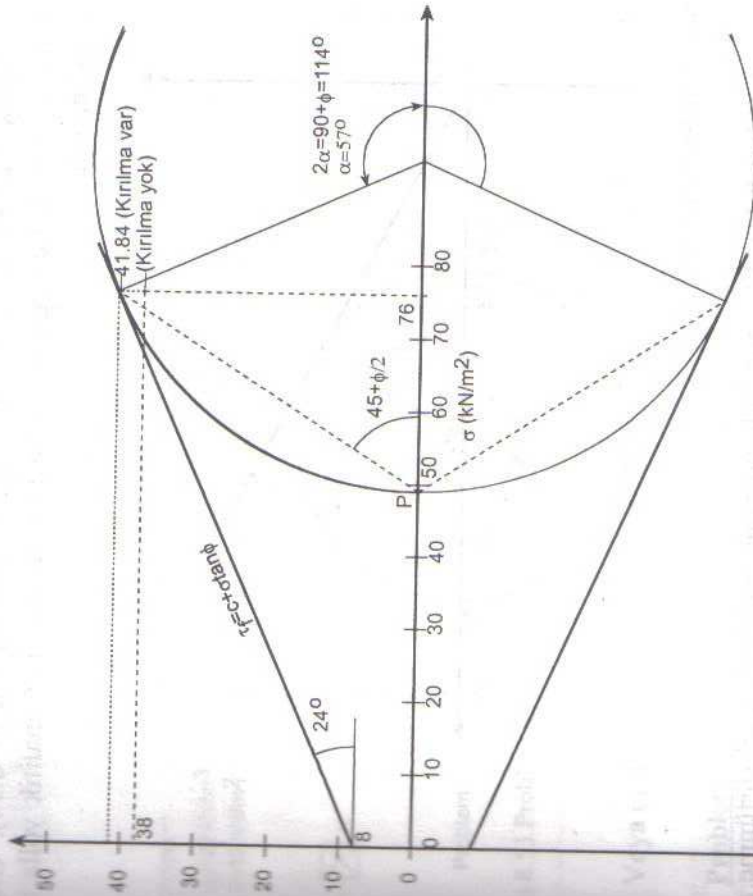
**Problem 8.11)** Bir zeminin kohezyonu 8 kN/m<sup>2</sup>, içsel sürtünme açısı 24 derecedir. Yatay yüzü bu zemin ortamında belirli bir noktadaki bir düzlemdeki gerilmeler  $\sigma = 76$  kN/m<sup>2</sup>,  $\tau = 38$  kN/m<sup>2</sup> dir. Bu düzlemde kırılma olur mu? Bu noktada kırılma durumu için hangi koşul sağlanmalıdır? Bu noktada kırılma durumunda (Zemin ortamında büyük asal gerilme düşey yöndedir.), kırılma düzleminin yatayla yaptığı açı kaç derece olur?

**Cözüm**

Bu noktadaki düzlemde zeminin kayma direnci (dayanımı),

$$\tau_r = c + \sigma \tan \phi = 8 + 76 \times \tan 24 = 41.84 \text{ kN/m}^2 > 38$$

$\tau < \tau_r \rightarrow$  Kırılma olmaz (Şekil 8.55). Kırılma olması için  $\tau = 41.84 \text{ kN/m}^2$  olmalıdır (Şekil 8.55). Kırılma açıları  $\alpha = \pm(45^\circ + \phi/2 = 57^\circ)$  olur.



Şekil 8.55 Problem 8.11

**Problem 8.12)** Bir genel zemin örneği ( $c=42 \text{ kN/m}^2$ ,  $\phi=27^\circ$ ) ile yapılan bir kesme kutusu deneyinde (60 mmx60 mm), kesme sırasında ölçülen kesme kuvveti 335.56 N dur. Düşey yükü bulunuz.

**Cözüm**

$$\frac{335.56 \times 10^{-3}}{60 \times 60 \times 10^{-6}} = 42 + \sigma_n \tan 27 \rightarrow \sigma_n = 100.51 \text{ kN/m}^2$$

$$N = 100.51 \times 60 \times 60 \times 10^{-6} = 0.362 \text{ kN}$$