



INM 308

Zemin Mekaniği

Zeminlerde Kayma Direnci Kavramı, Yenilme Teorileri

Doç.Dr. İnan KESKİN

inaneskin@karabuk.edu.tr, inaneskin@gmail.com

www.inaneskin.com

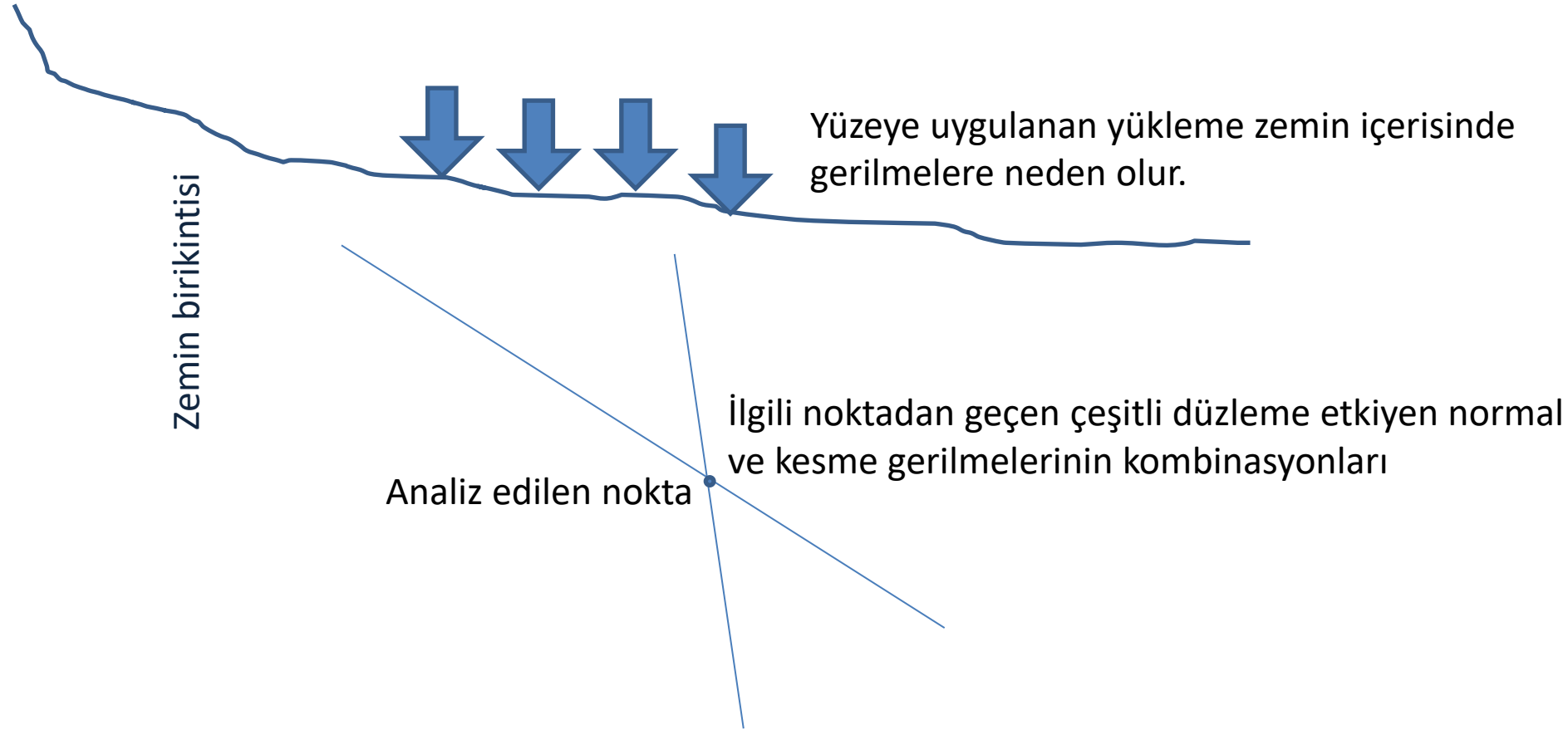
ZEMİN MEKANİĞİ

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:	Genel Zemin Mekanik Problem Çözümleri
Hafta 15:	Final Sınavı

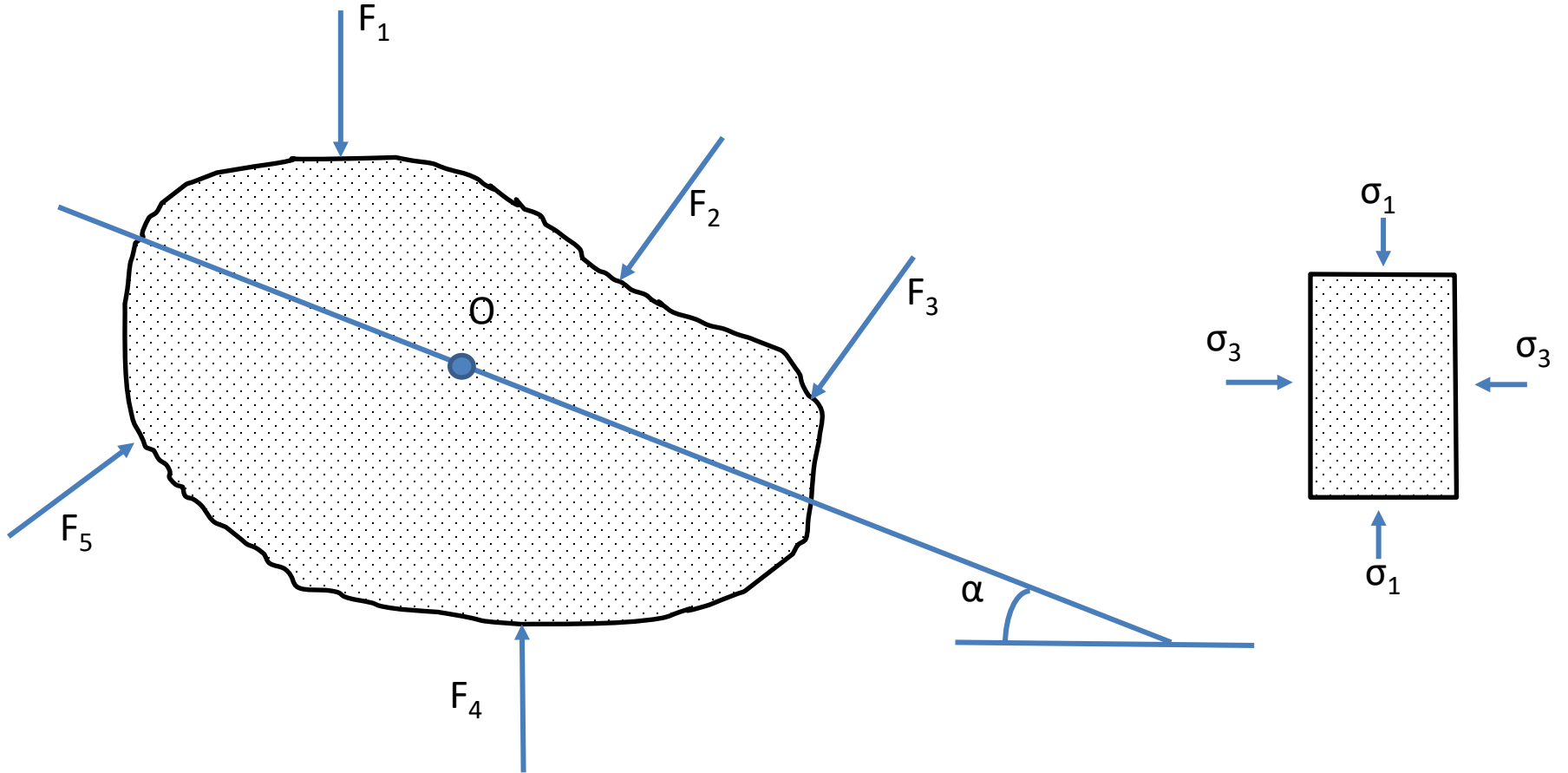
ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

Bir cisim veya kütle bir dış yüklemeye maruz kaldığında bu cisim veya kütlenin içinde farklı noktalarda çeşitli normal veya kesme iç gerilmeleri oluşur. Bir gerilme analizi yapılırken bir noktadaki gerilmeleri analiz etmek için mekanik mühendislik metotlarının kullanılması gerekir. Bu analizlerle ilgili noktadan geçen her düzleme etkiyen gerilmeler belirlenebilir.



ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

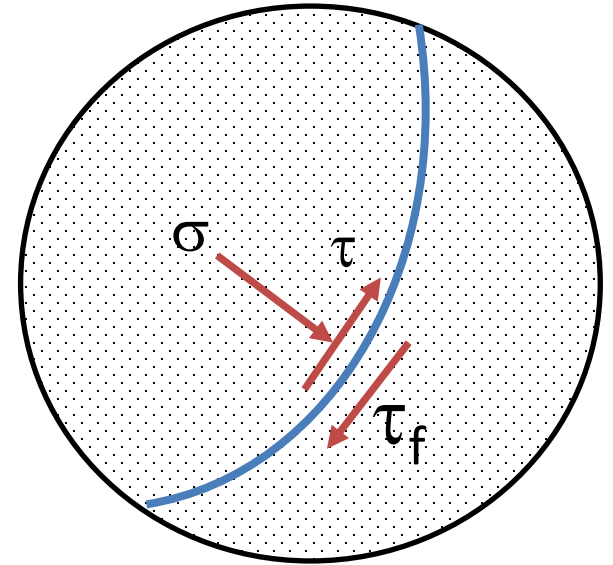
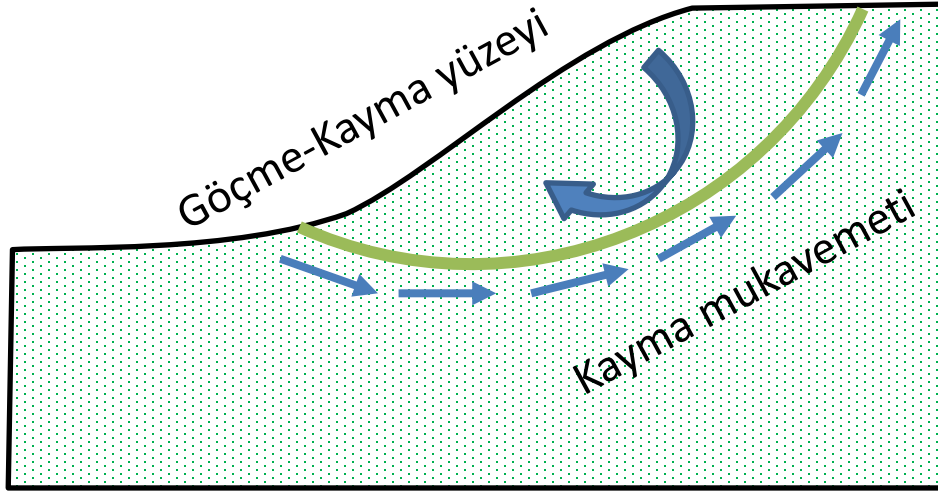
Şekilde $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ kuvvetleri etkisi altında kalmış zemin kütlesi gösterilmiştir. O noktasında sonsuz sayıda düzlem geçebilir. Genel olarak bu düzlemlerin her biri üzerinde normal gerilmeler kayma gerilmeleri mevcut olacaktır. **Ancak kayma gerilmelerin sıfır olduğu sadece normal gerilmelerin etkidiği gerilmeler asal gerilme olarak tariflenmektedir.** Asal gerilmeleri şiddetlerine göre en büyük asal gerilme (σ_1), ortanca asal gerilme (σ_2) ve en küçük asal gerilme (σ_3) olarak bilinmektedir.



ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

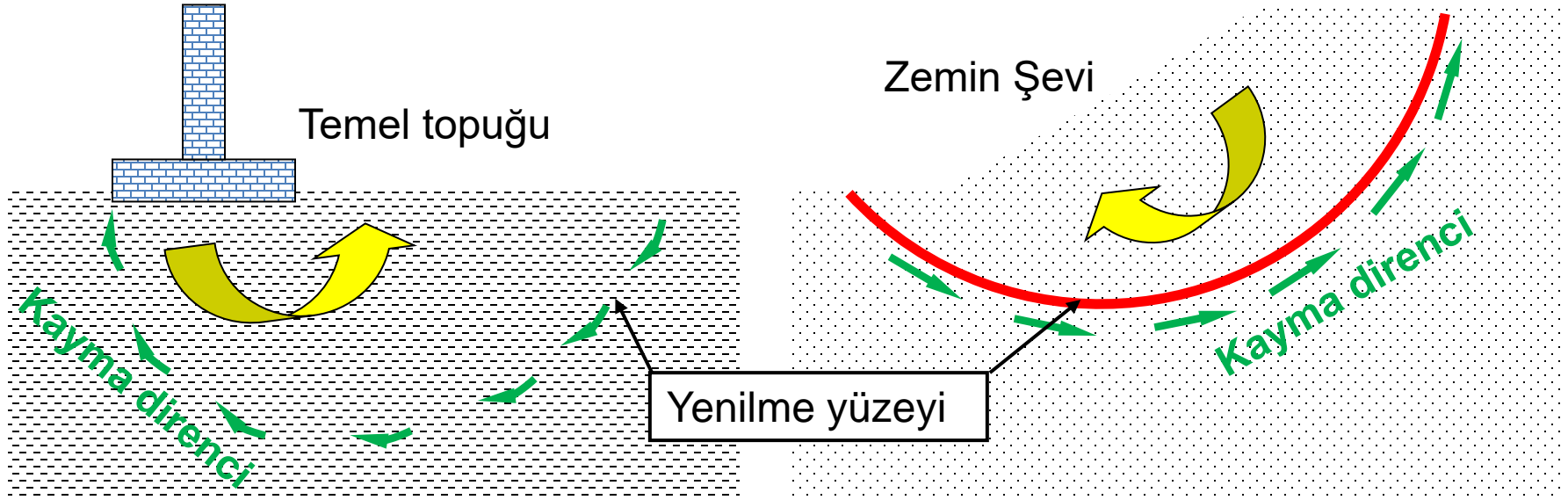
Zeminle ilgili çeşitli problemlerin çözümünde zemin kayma direnci ile ilgili bilgilere gereksinim duyulur. Zemin ortamı yüklendiği zaman zemin kitlesinde gerilmeler oluşur. Zeminlerde göçme meydana gelmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması gerekir. Genel olarak göçme, belli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Zeminin kayma direnci-mukavemeti, göçme oluşmadan karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile göçme düzlemi boyunca kaymaya karşı gösterilen dirençtir.



Göçme-Kayma yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri (τ) Göçme anında kayma mukavemeti değerine τ_f ulaşır.

BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme



Yenilme anında yenilme yüzeyi boyunca meydana gelen kayma gerilmesi kayma dayanımına ulaşır.

Genel olarak bir zeminin kayma direnci aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır.

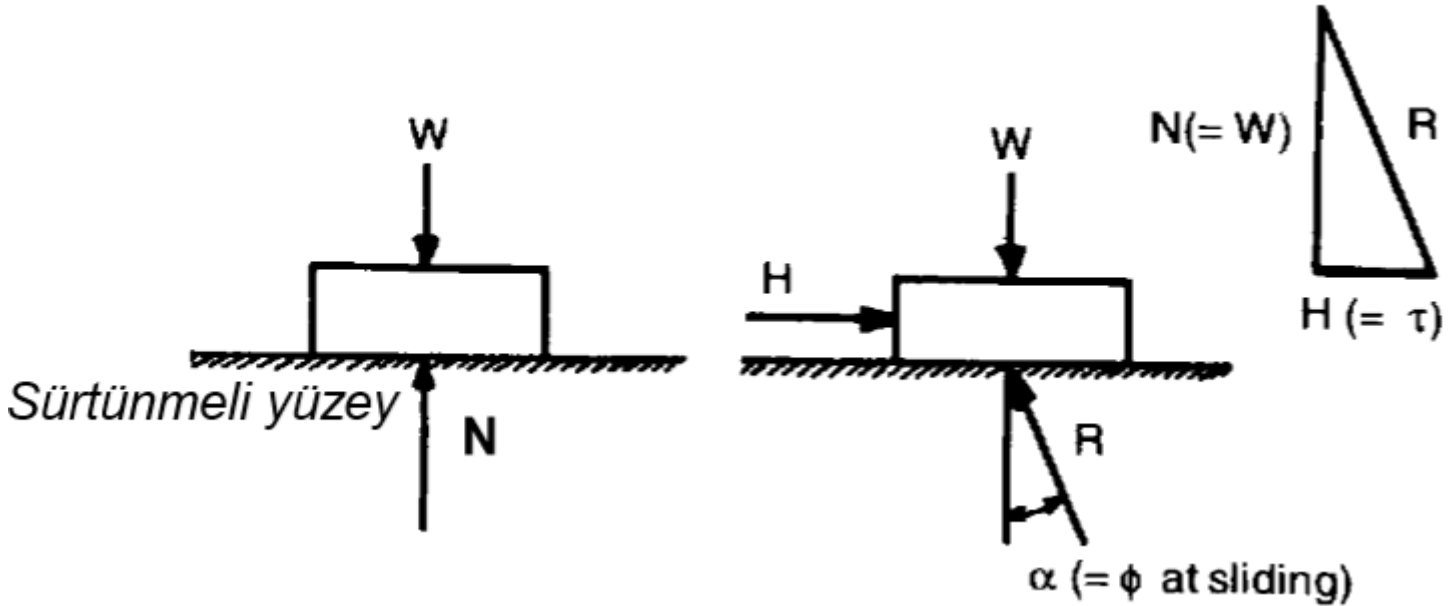
1. Tanelerin oluşturduğu yapının kesme deformasyonuna karşı gösterdiği direnç
2. Tanelerin (kum, çakıl) temas noktaları veya temas alanlarında oluşan sürtünme kuvvetleri
3. Zemin taneleri (kil) arasındaki çekme veya yapışma (kohezyon) kuvvetleri

BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme

Sürtünme Kavramı

Yüzeyler arasındaki pürüzlülük arttıkça sürtünme direnci artacaktır.

Cismin ağırlığı arttıkça sürtünme direnci artacaktır.



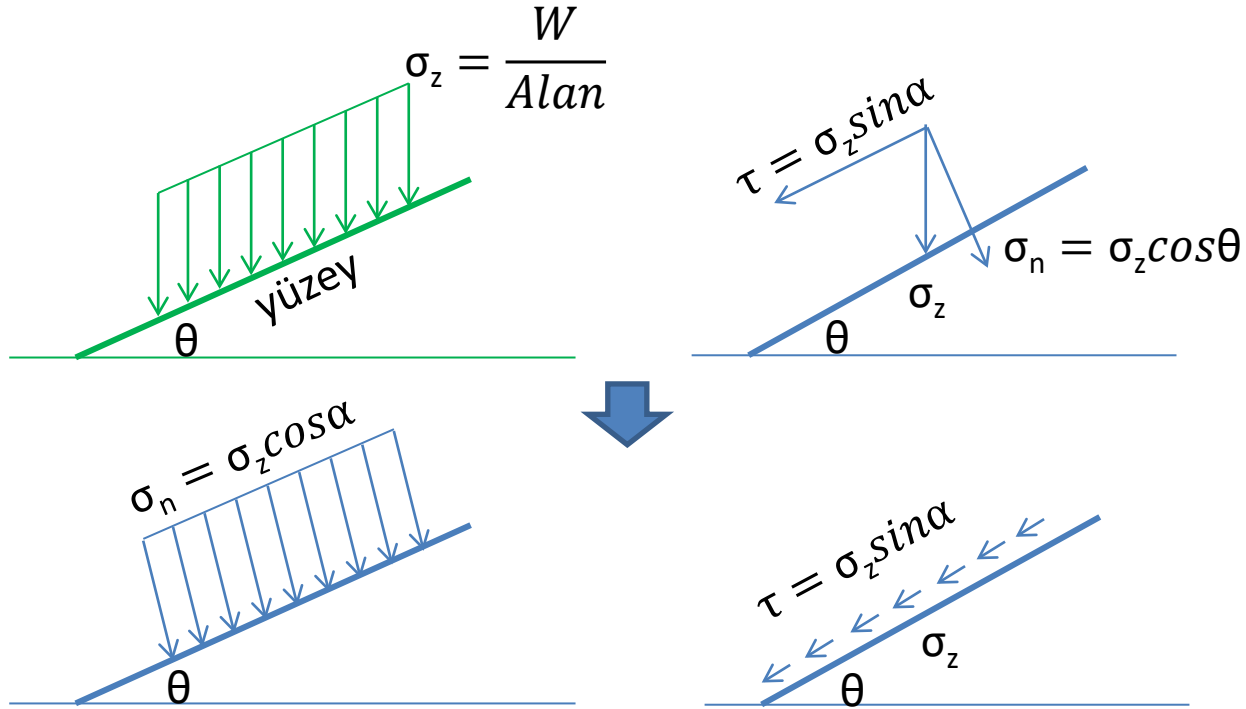
Cismin harekete başladığı anda $\alpha = \phi$ olacaktır

Sürtünme Katsayısı

$$F = \mu \cdot N = \tan \phi \times N$$

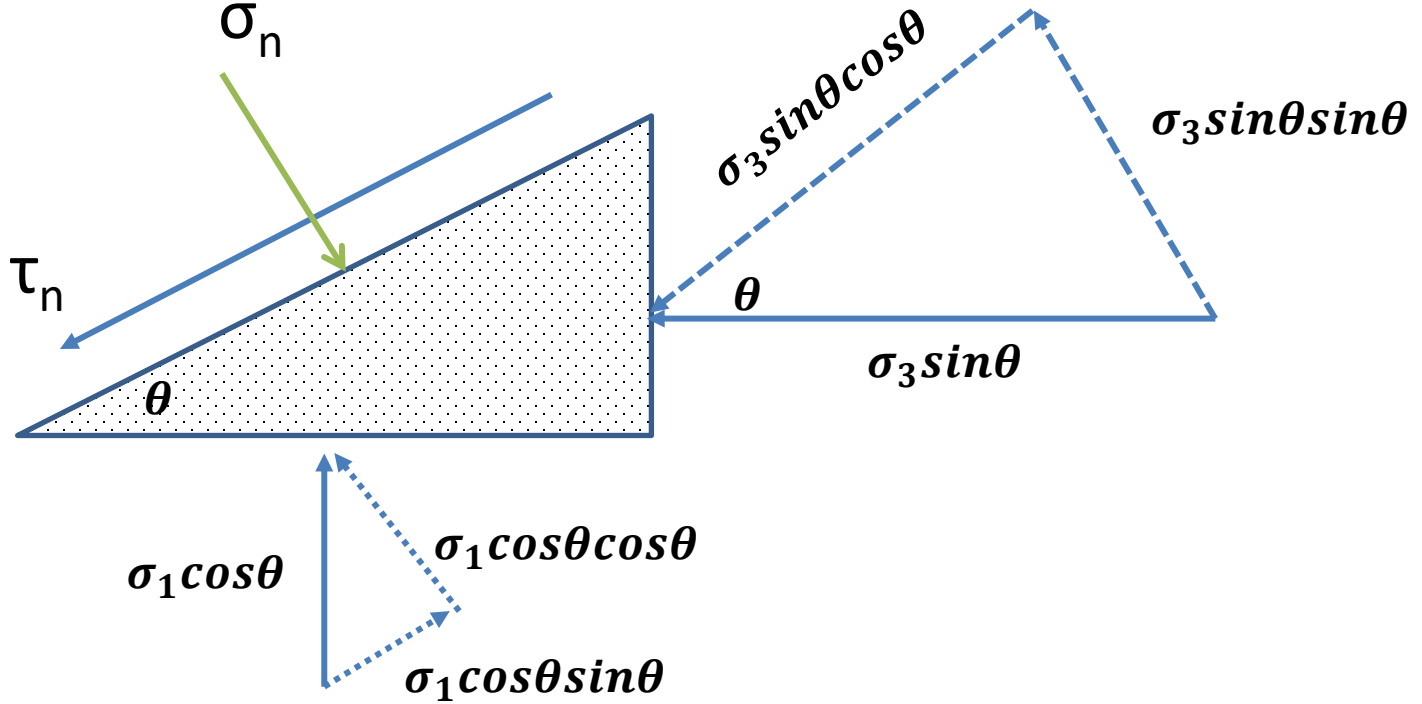
BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme

Yatayda θ açısı yapan bir düzlem üzerinde etkiyen kuvvetlerin bileşkesini bu düzleme dik (normal) ve paralel (kayma) iki bileşene ayırabiliriz. Eğer AC uzunluğu birim uzunluk olarak kabul edilir ise düzlem üzerindeki normal ve kayma gerilmelerine ayrılmış hali şeklindeki gibi olur.



BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme

σ_n ve τ_n 'i σ_1 ve σ_3 'i cinsinden belirlemek için, yatay ve dikey gerilmelere etki eden kuvvetler kesim düzlemine paralel ve dik bileşenlere ayrılır.



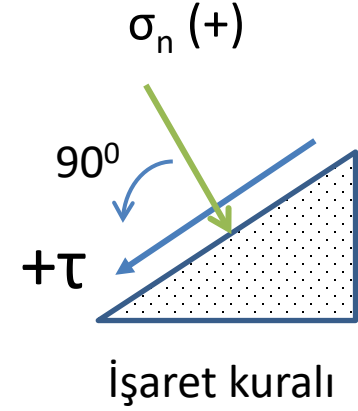
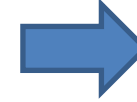
$$\sigma_n = \sigma_1 \cos \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau_n = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \sin 2\theta$$

BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme

Jeo-Geoteknik Mühendisliğinde kullanılan kuvvetlerin büyük bir kısmı basınç olduğu için **basınç kuvvetleri ve gerilmeleri pozitif gösterilmektedir**. Zemin çekme gerilmesi taşıyamaz kopar. Başka bir ifade ile zeminde – işaretli normal gerilme olmaz.

Bir kesitin dış normali (n) saatin tersi yönünde 90° döndürüldüğünde kayma gerilmeleri için + olan yön, diğer yön ise – olan yön olarak düşünülür.



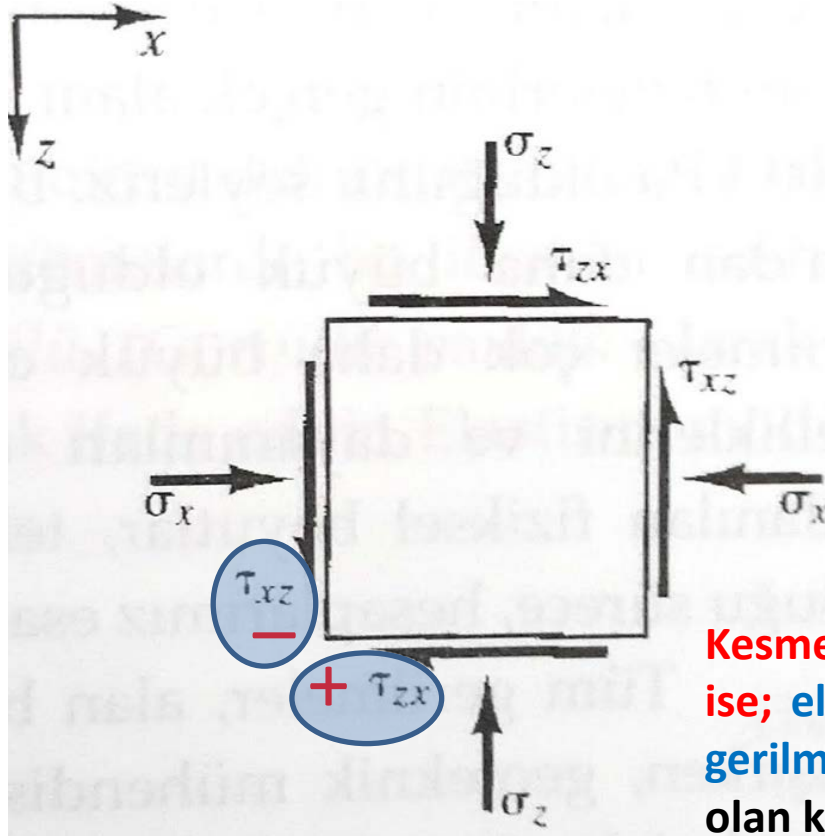
τ_{xz} = x düzleminde z yönünde (x eksenine dik etkiyen)

$$\tau_{xz} = -\tau_{xz}$$

$$\tau_{yz} = -\tau_{yz}$$

$$\tau_{xy} = -\tau_{xy}$$

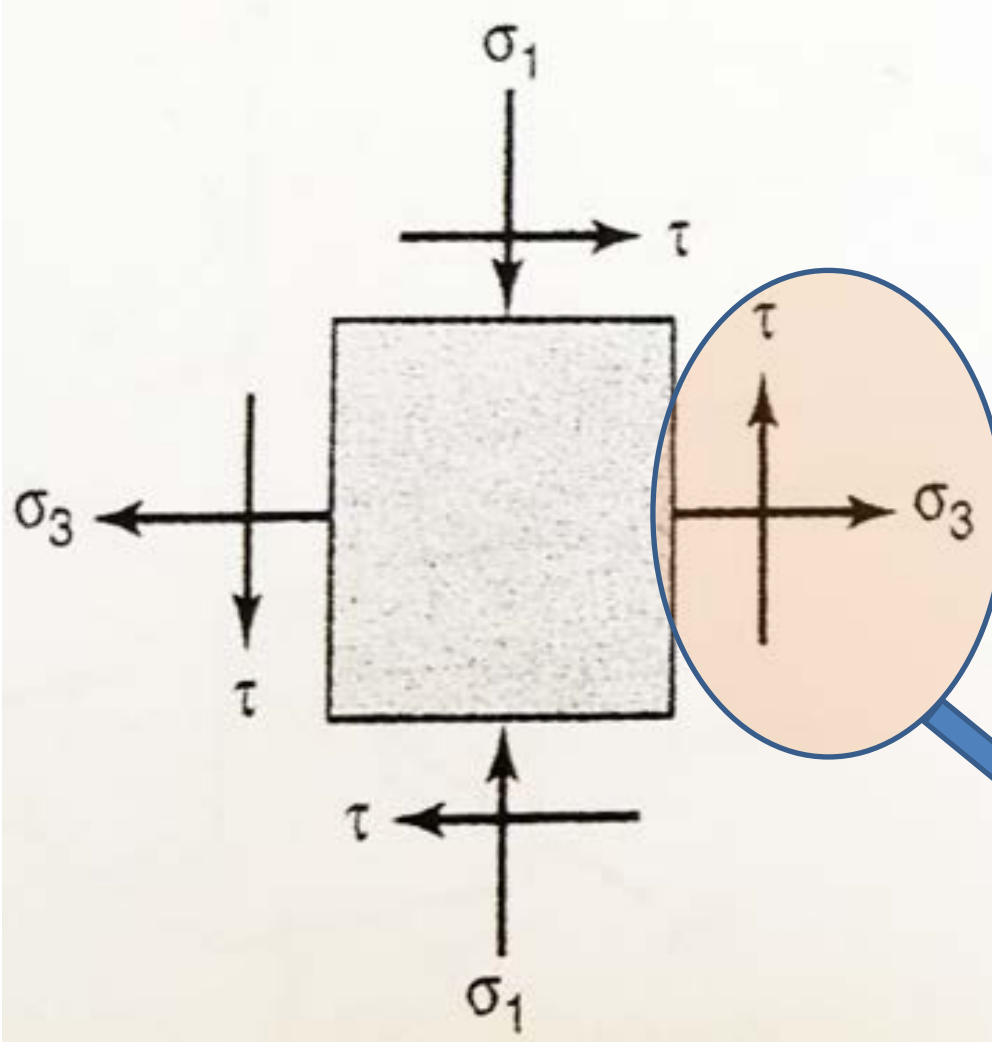
statik denge durumu



Kesme gerilmelerine uygun işaret vermenin bir diğer kuralı ise; elemanın saat yönünde dönmesine neden olan kesme gerilmelerini pozitif, saatin tersi yönde dönmesine neden olan kesme gerilmelerini negatif almaktır.

BİR NOKTADA GERİLME; Analitik Gelişme

!!!!!!!Zemin problemleri için, sıkıştırma gerilmeleri pozitif, saat yönünde çift oluşturan kesme gerilmeleri pozitif!!!!!!! **BU DURUM MEKANİKTE KULLANILAN YÖN KAVRAMININ TAM TERSİDİR.**



Yatay düzlemde gösterilen gerilmeler
+ normal gerilme
+ kesme gerilmesi



Klasik mukavemet; düşey düzlem normal doğrultudan saat ibrelerinin ters yönünde okun ucunun yukarıda olması ile belirlenir.

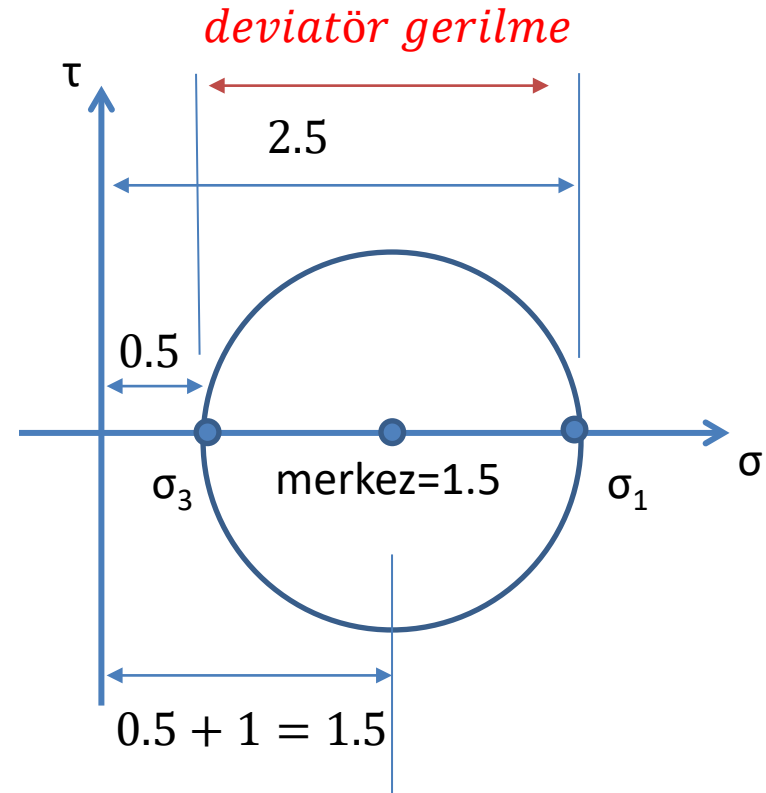
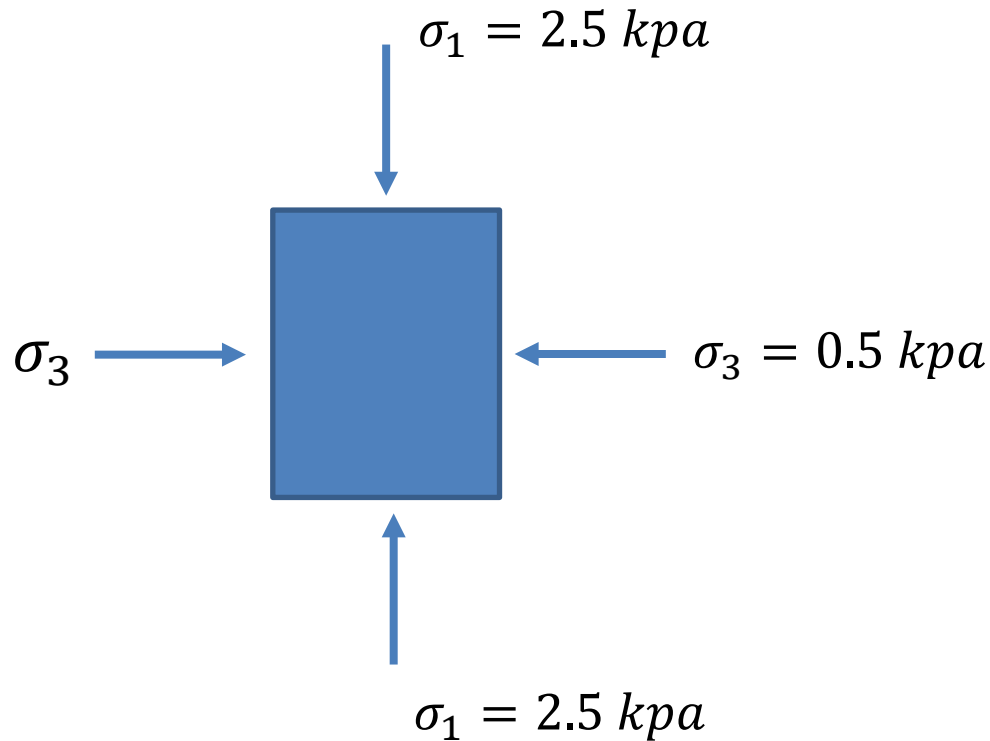
Düşey düzlemde gösterilen gerilmeler
- normal gerilme
- kesme gerilmesi

BİR NOKTADA GERİLME; Mohr Dairesi

Gerilme analizi en kolay şekilde Mohr gerilme dairesiyle yapılır. Mohr gerilme dairesinin önemli ve yararlı özelliklerinden birisi de kutup noktasının (düzlemlerin başlangıç noktası) belirlenebilmesidir.

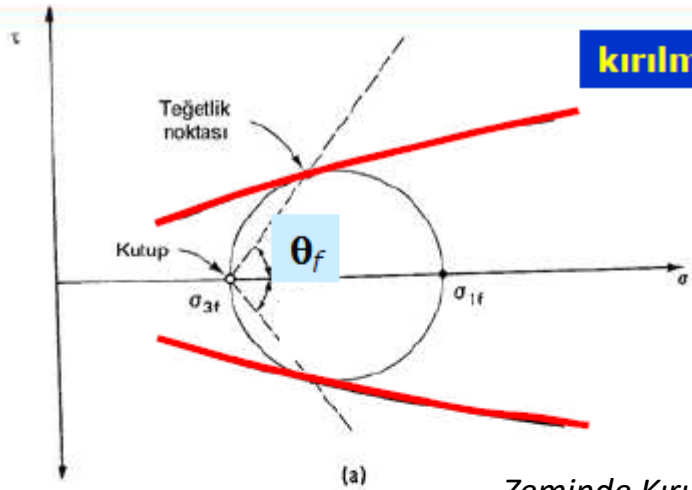
Mohr dairesini çizmek için iki gerilme noktasının bilinmesi yeterlidir.

Aşağıdaki elemana etki eden gerilme durumu için Mohr Dairesini çizelim

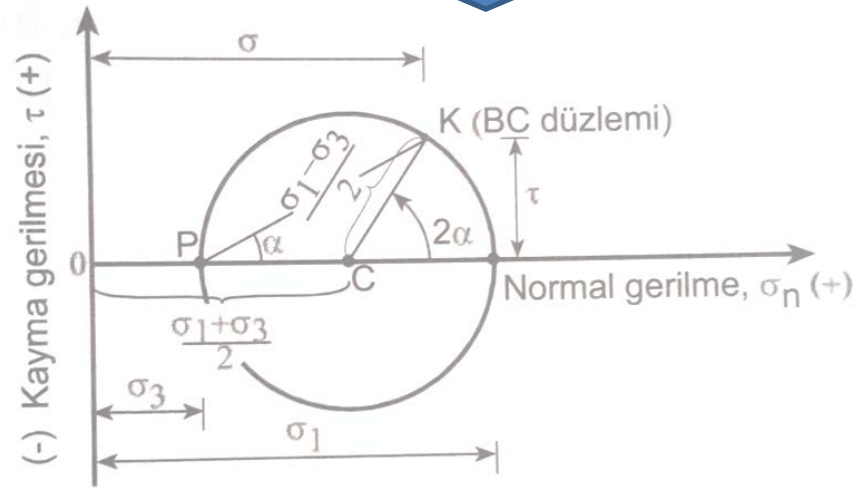
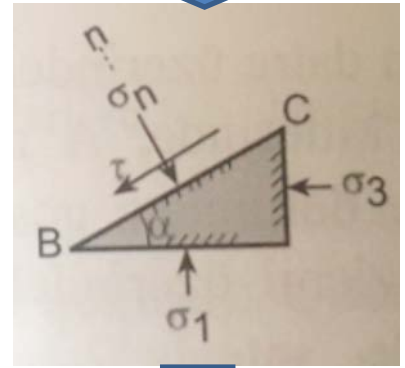
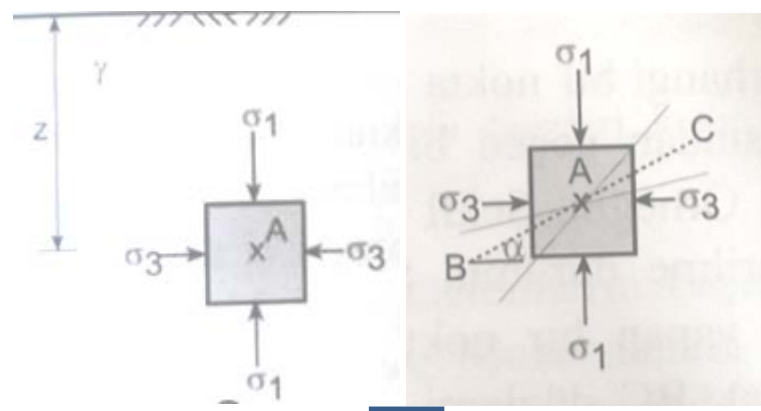
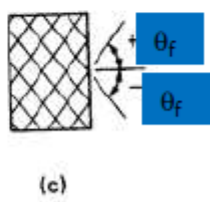
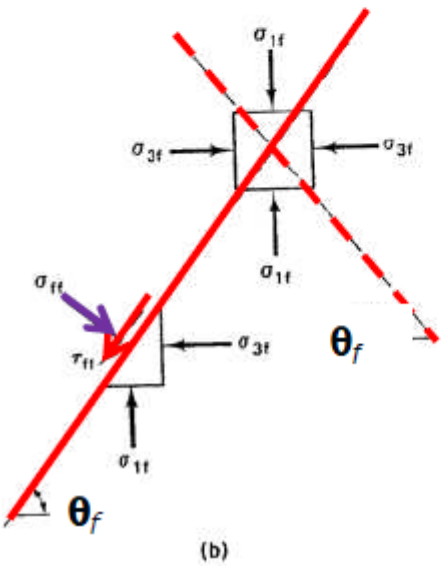


BİR NOKTADA GERİLME; Mohr Dairesi

kırılma zarfı

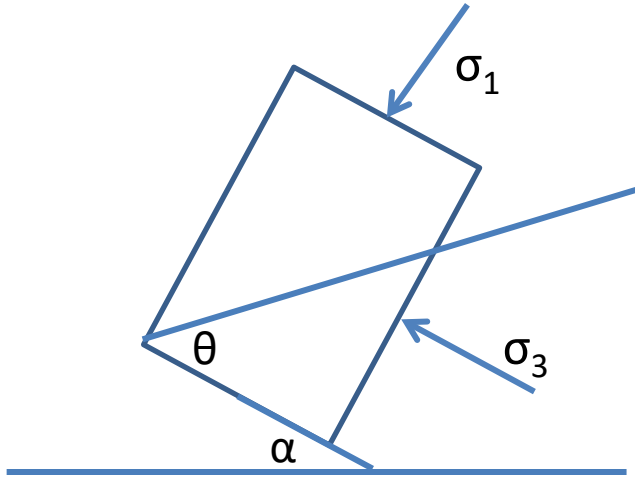


Zeminde Kırılma Düzlemleri
 (a) Kırılma Düzleminin Konumu
 (b) Kayma Düzlemleri
 (c) Eslenik Kırılma Düzlemleri

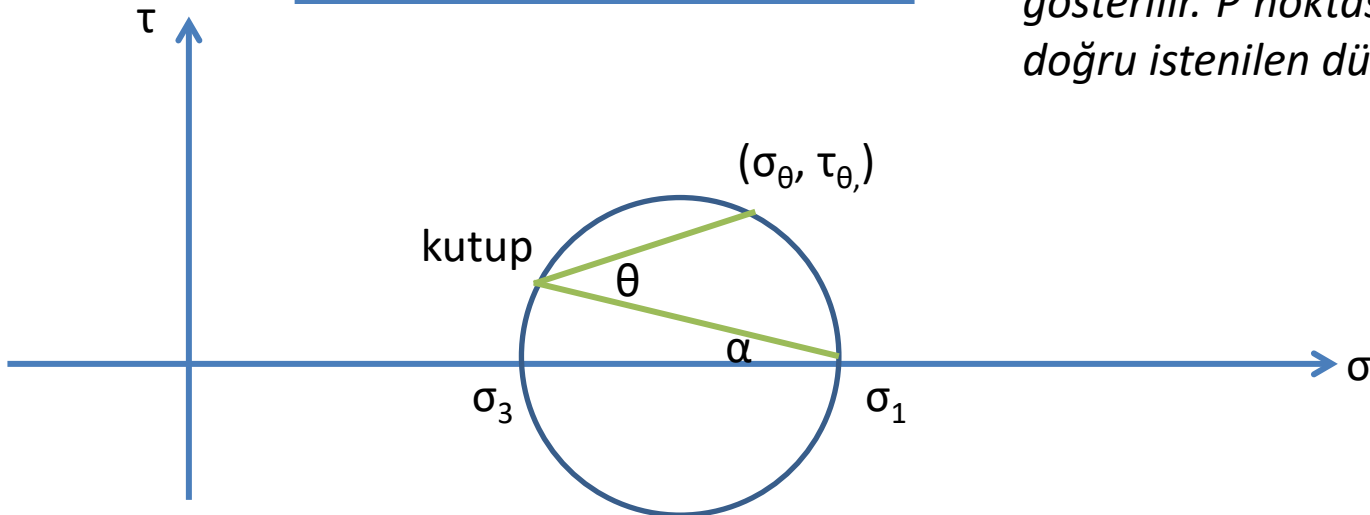


BİR NOKTADA GERİLME; Mohr Dairesi

Asal gerilme düzlemleri yatay ve düşey düzlemlerden farklı düzlemler olabilir. Bu durumda mohr dairesi çizildikten sonra önce bu daire üzerinde kutup noktasının (düzlemlerin orjini) bulunması gerekir. **En büyük gerilme (σ_1) noktasından bu asal gerilme düzlemine paralel (etkidiği düzleme paralel) bir doğru çizilirse, bu doğrunun Mohr dairesini kestiği nokta kutup noktasını verir.**

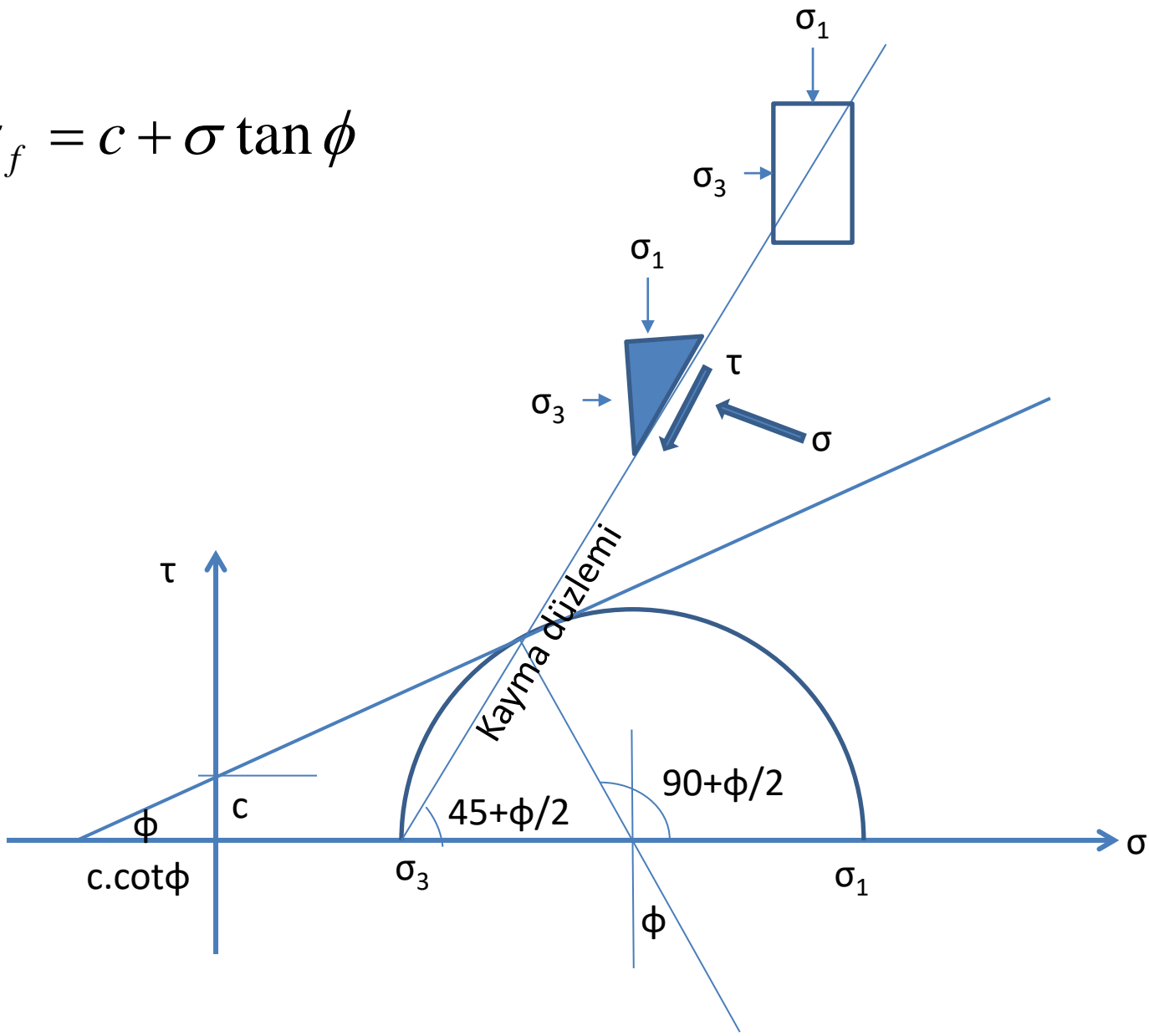


Kutup noktası; ortamdaki bir noktadaki tüm düzlemlerin mohr dairesi üzerinde geçtiği noktadır. Analizi yapılan düzlemin eğimi θ Mohr dairesinde 2θ olarak gösterilir. P noktasında θ eğiminde çizilecek doğru istenilen düzlemdeki gerilmeleri verir



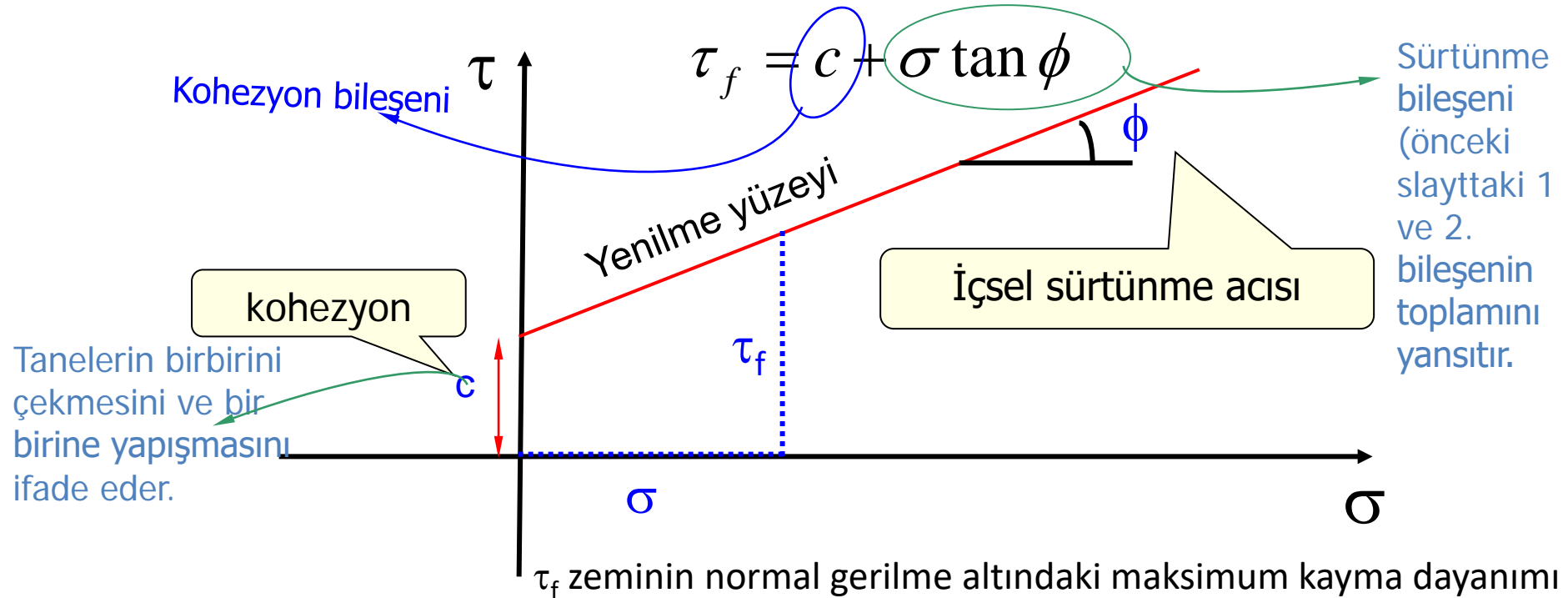
BİR NOKTADA GERİLME; Mohr Dairesi

$$s = \tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

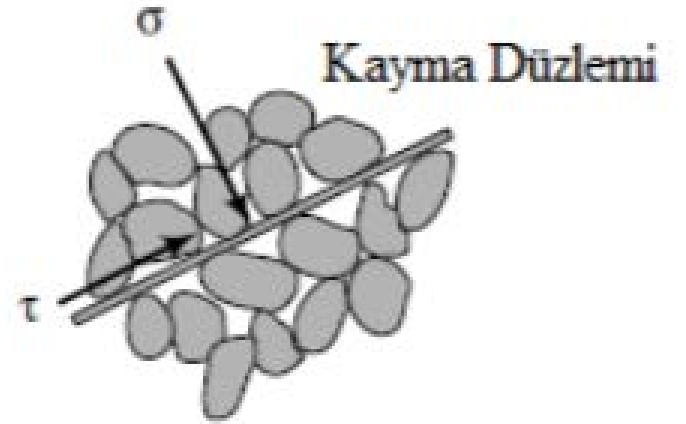
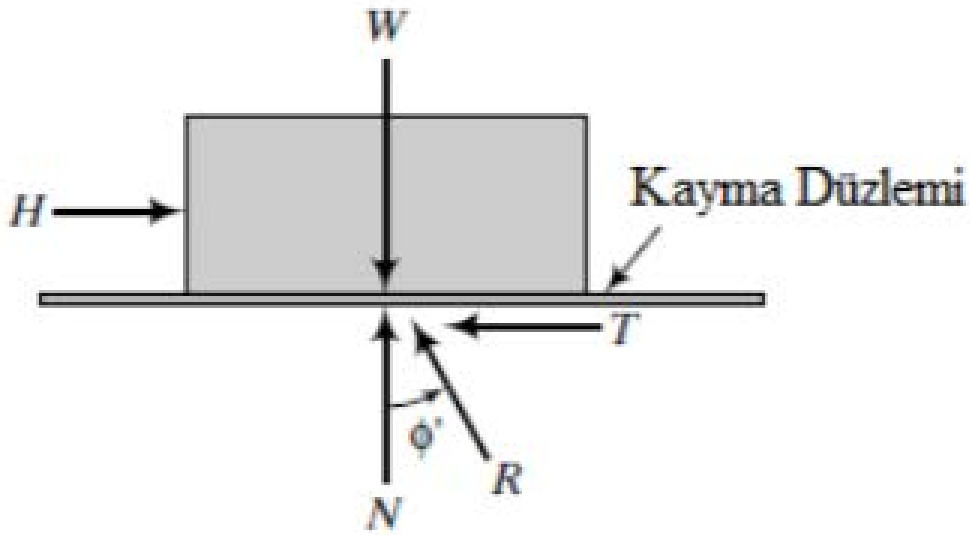


MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

Zeminler için göçmeye yol açan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini gözönüne alan birçok hipotez geliştirilmiştir. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılanı **Mohr-Coulomb göçme hipotezidir**. Buna göre göçmeye yol açan normal ve kayma mukavemetinin sınır değerleri bir eğri ile gösterilmektedir. Bu grafikte normal gerilmeler yatay eksende, kayma gerilmeleri dikey eksende gösterilmektedir. **Göçme zarfı olarak nitelendirilen bu eğrinin altında kalan gerilmeler için göçme ortaya çıkmazken, eğer gerilmeler bu eğriye ulaşmışsa göçme meydana gelmektedir.** Zeminde bu eğrinin üzerinde bir gerilme hali oluşamayacağı açıktır. Göçme zarfı bir eğri şeklinde oluşmasına rağmen pratikte bu genellikle bir doğru olarak kabul edilmektedir.



MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ



Coulomb sürtünme teorisi mekanizması (Das, 2010)

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

c ve ϕ makaslama dayanımının bir ölçüsüdür.

Yüksek değerleri yüksek makaslama dayanımı demektir.

Drenajsız deneylerde (UU); $\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u$

Konsolidasyonlu – drenajsız deneylerde (CU); $\tau_f = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$

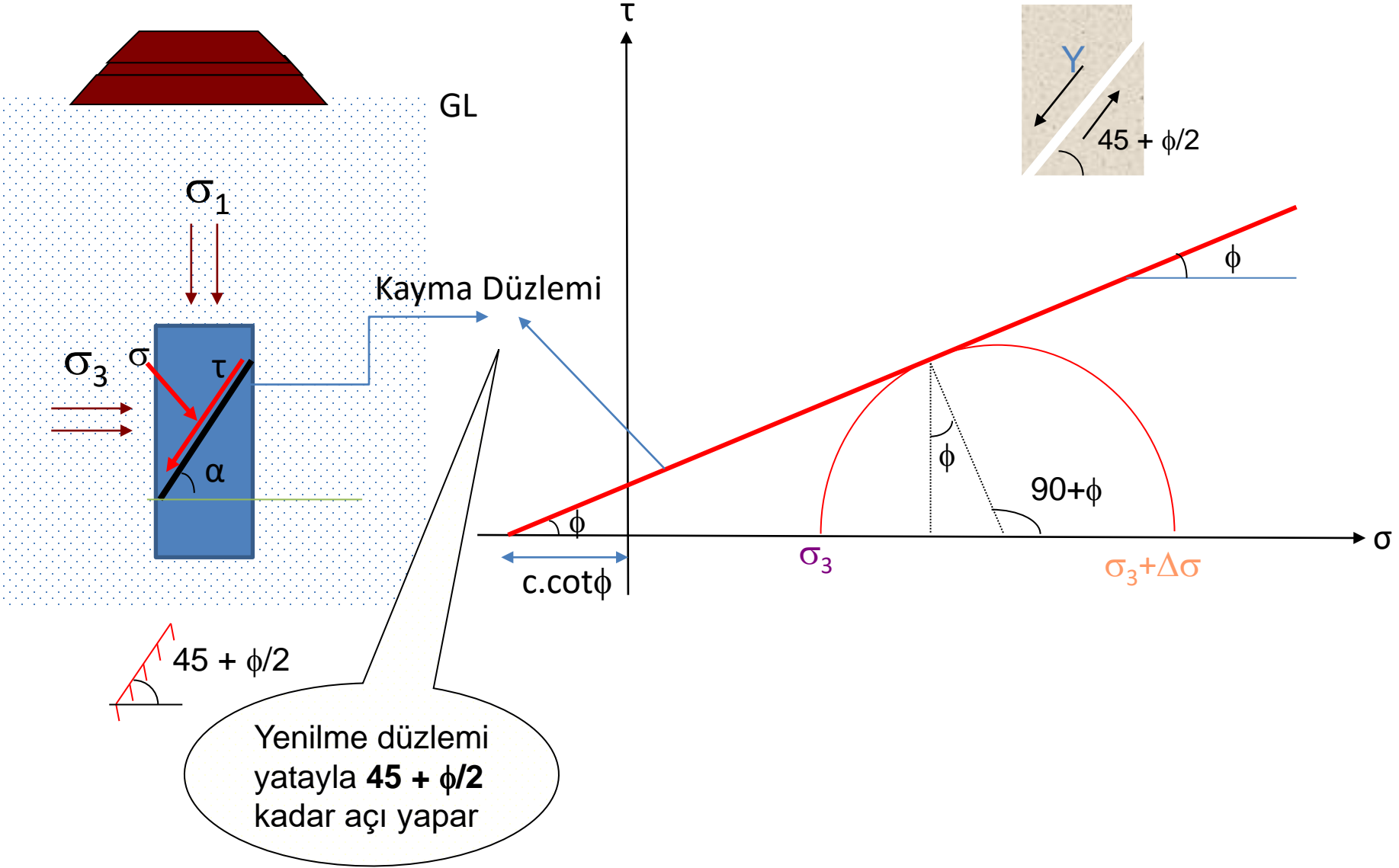
Drenajlı deneylerde (CD); $\tau_f = c_d + \sigma \tan \phi_d$

Denklem efektif gerilmelere göre yazıldığında; $\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$

Not: Yükleme hızı drenaj hızına göre **yavaş** uygulanıyorsa **drenajlı durum**, aksi durumda ise drenajsız durum söz konusudur.

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

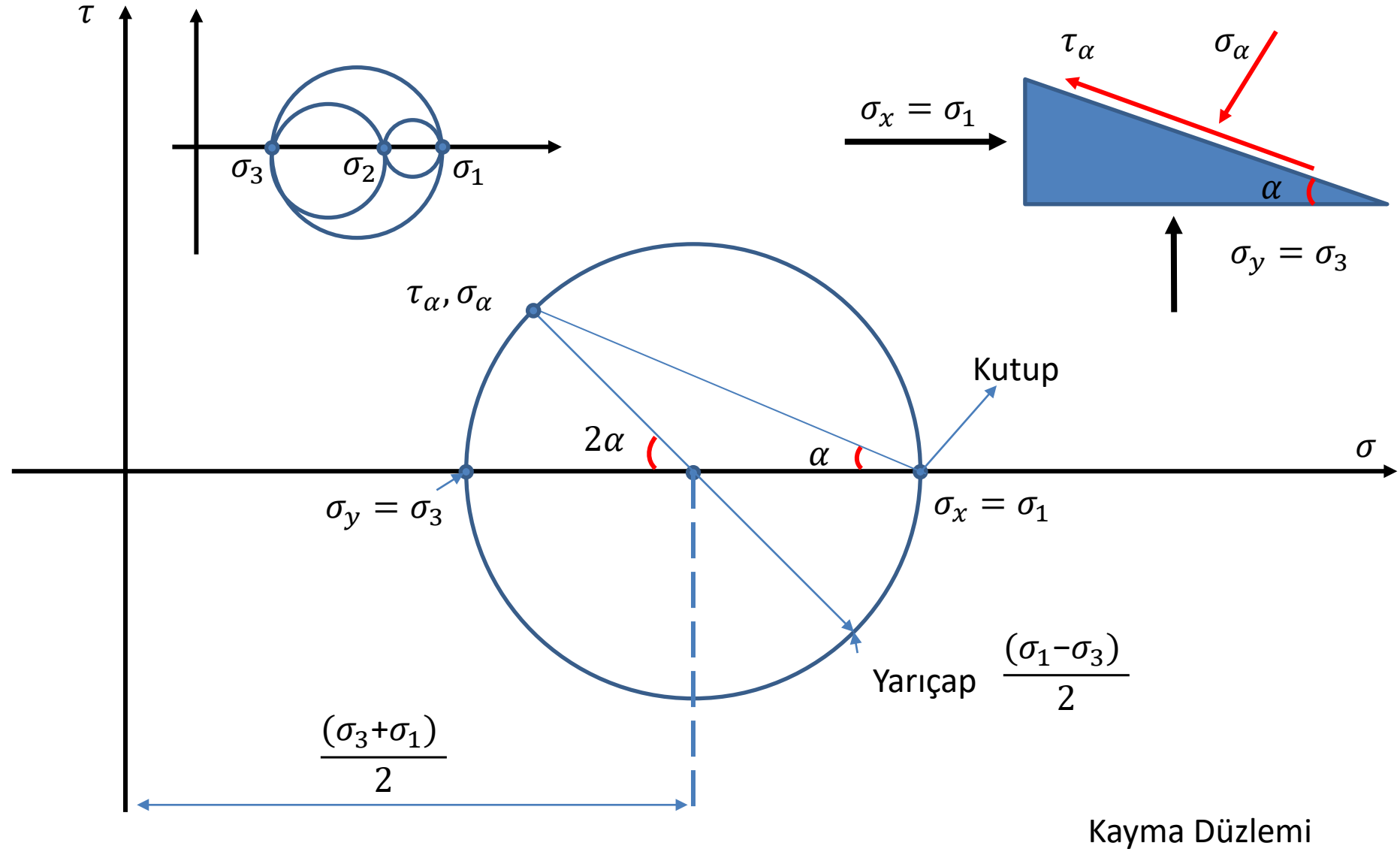
Kayama düzleminin asal düzlemle yaptığı açı



MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

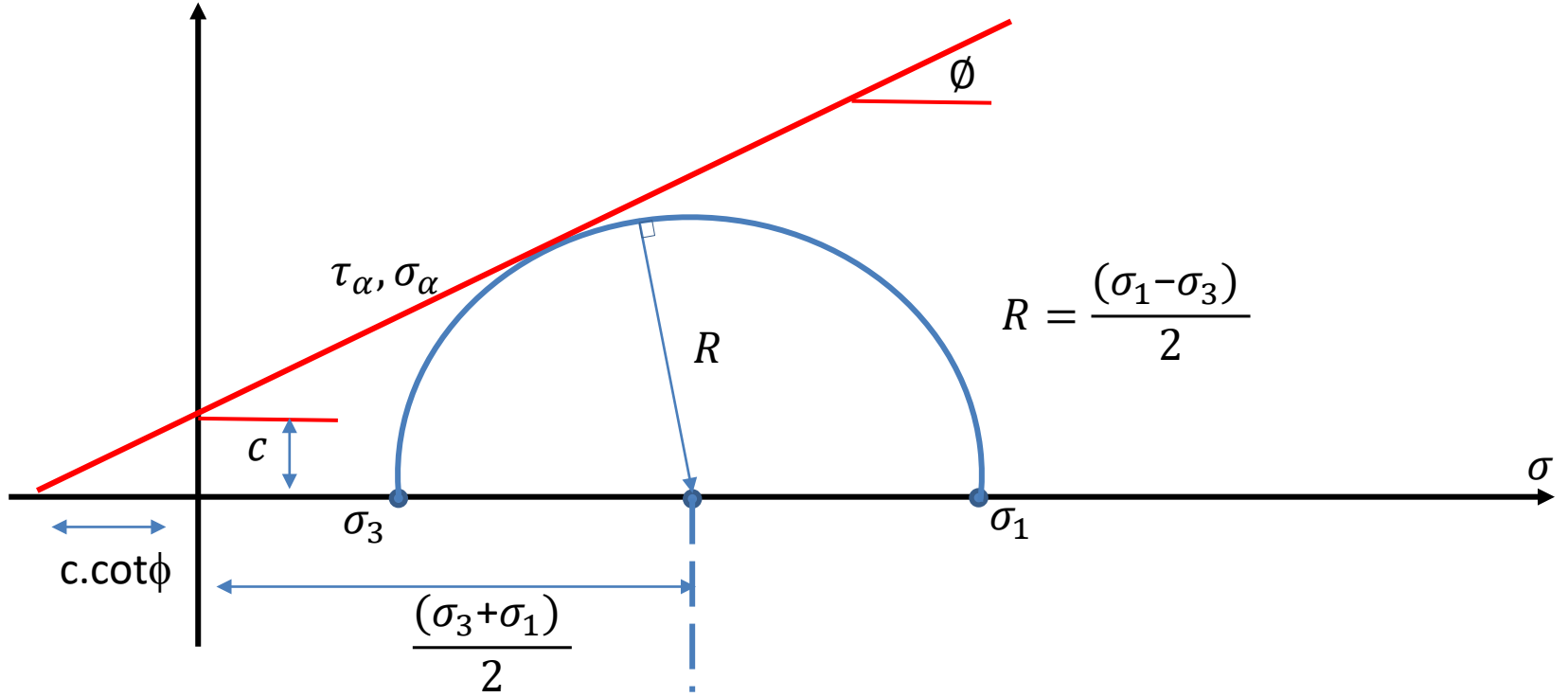
Kayama düzleminin asal düzlemle yaptığı açı

Mohr dairesi, bir yükleme durumunda bir düzlemdeki gerilmeler bilinirken başka bir düzlemdeki gerilmeleri hesaplamaya yarar.



Kayma Düzlemi

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ



Göçmeye yol açan asal gerilme değerleri ile zeminin kayma mukavemeti parametreleri arasındaki ilişkiyi trigonometrik bağıntılar şeklinde ifade etmek mümkün olmaktadır.

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

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

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}}$$

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Akma Sayısı}$$

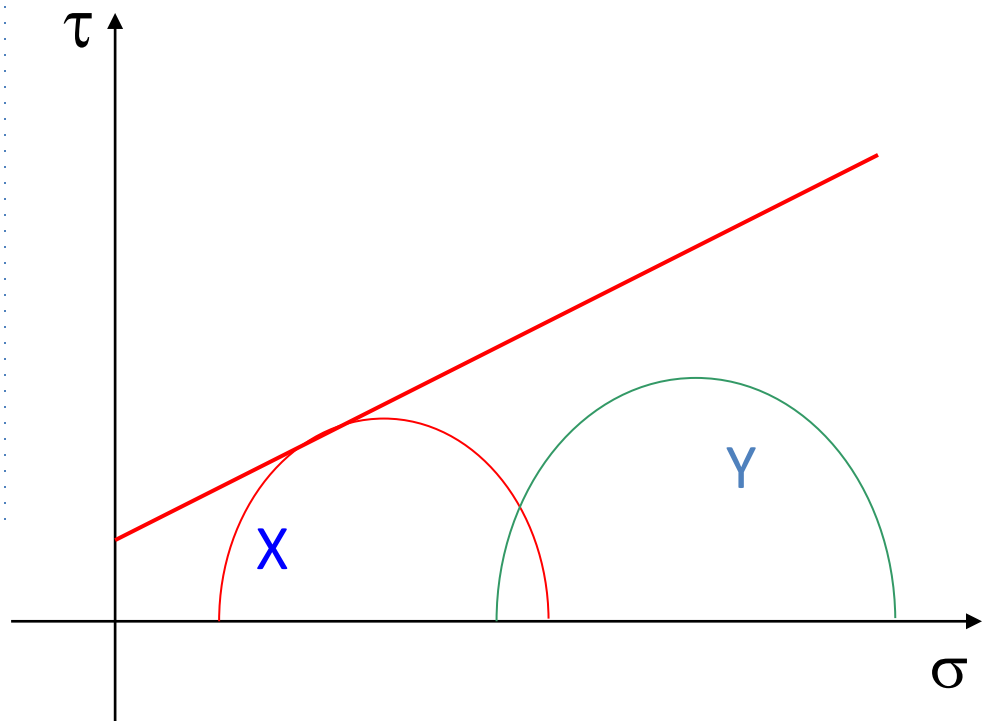
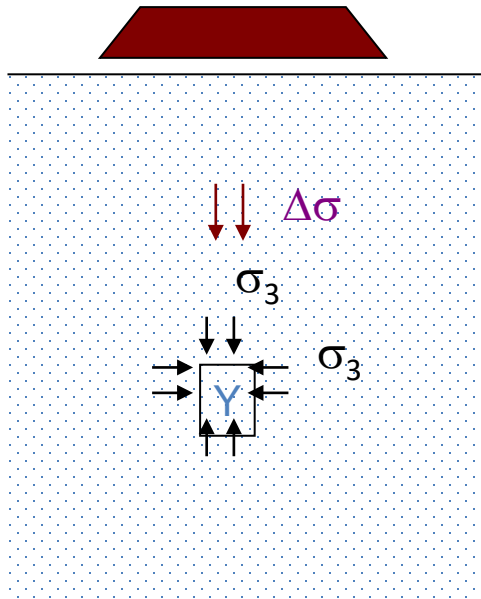
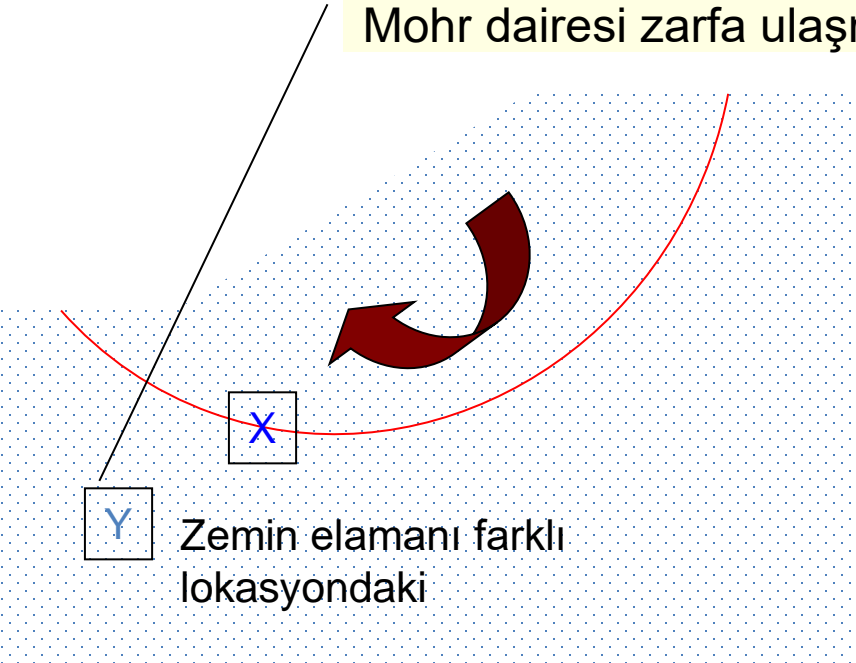
$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot N_\phi + 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\phi}$$

Plastik Denge Denklemi

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad \text{Kırılma Düzlemi}$$

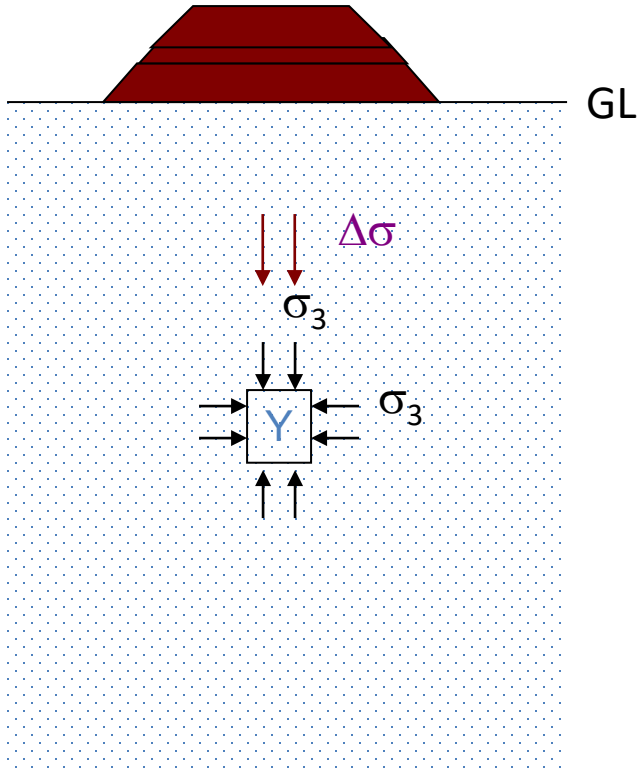
MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

Mohr dairesi zarfa ulaşmaz ise zemin bileşeni yenilmez

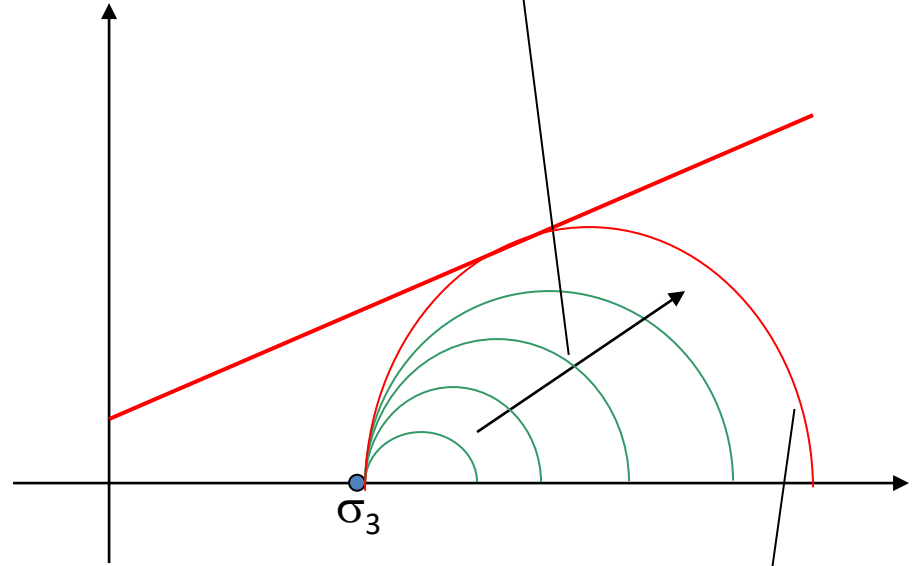


X ~ yenilme
Y ~ sağlam

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ



Yüklemeye arttırıldığında Mohr dairesi büyür...



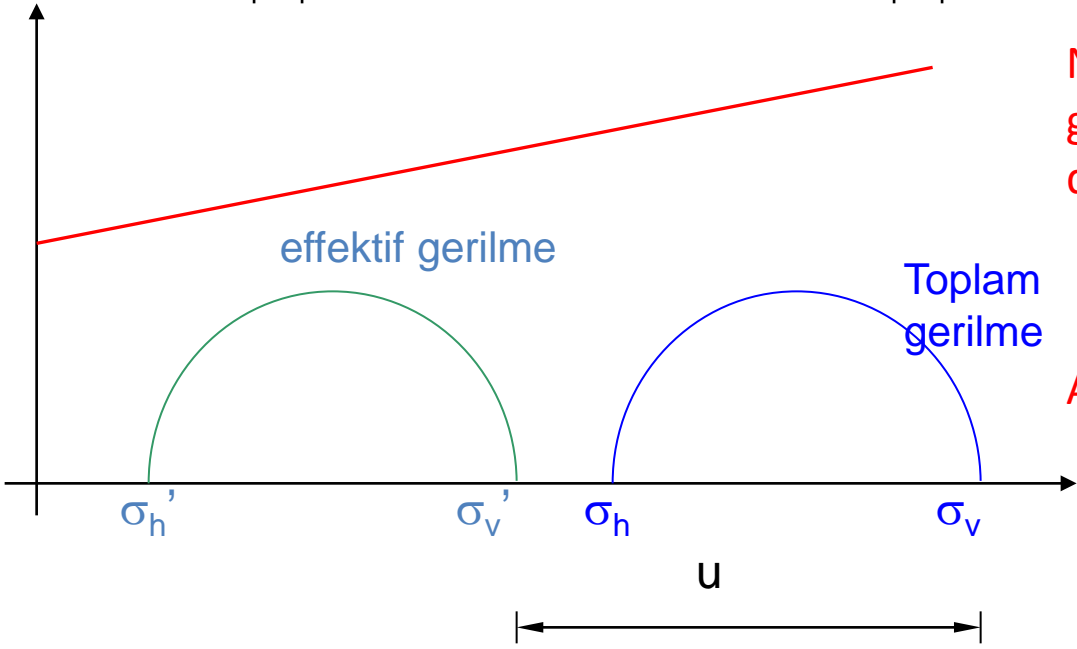
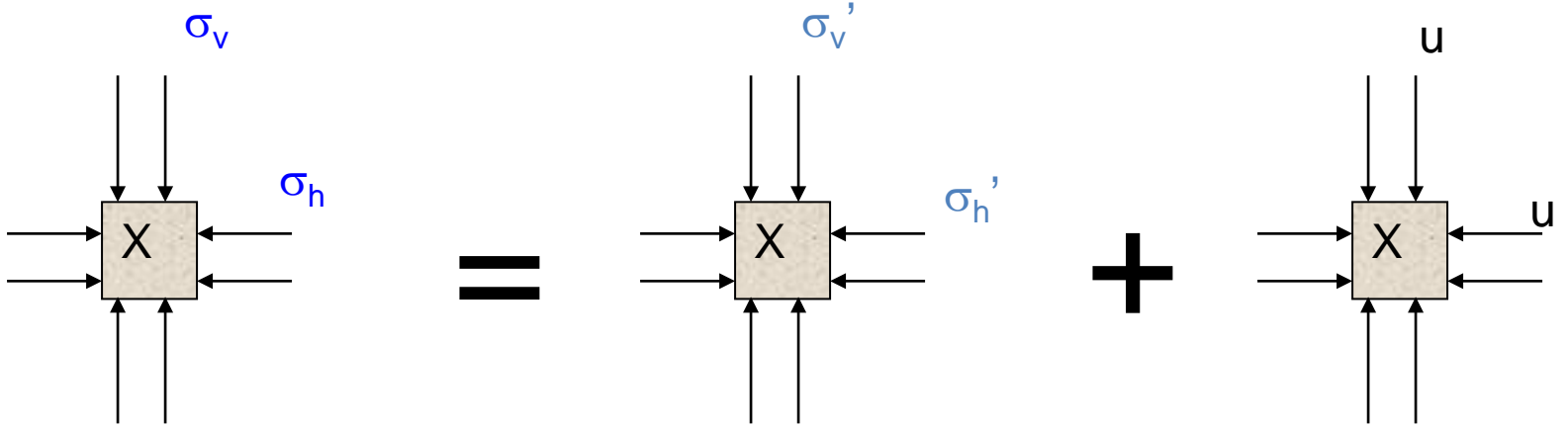
..ve sonrasında Mohr dairesi zarfa ulaştığında yenilme gerçekleşir.

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

Mohr dairesindeki σ ve σ'

$$\tau_f = c' + (\sigma - u)\tan\phi'$$

Boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Zemin kayma mukavemetini efektif gerilmeler cinsinden ifade etmek daha gerçekçi olmaktadır.



Normal yüklenmiş kilerde efektif gerilmelere göre değerlendirme yapılması durumunda

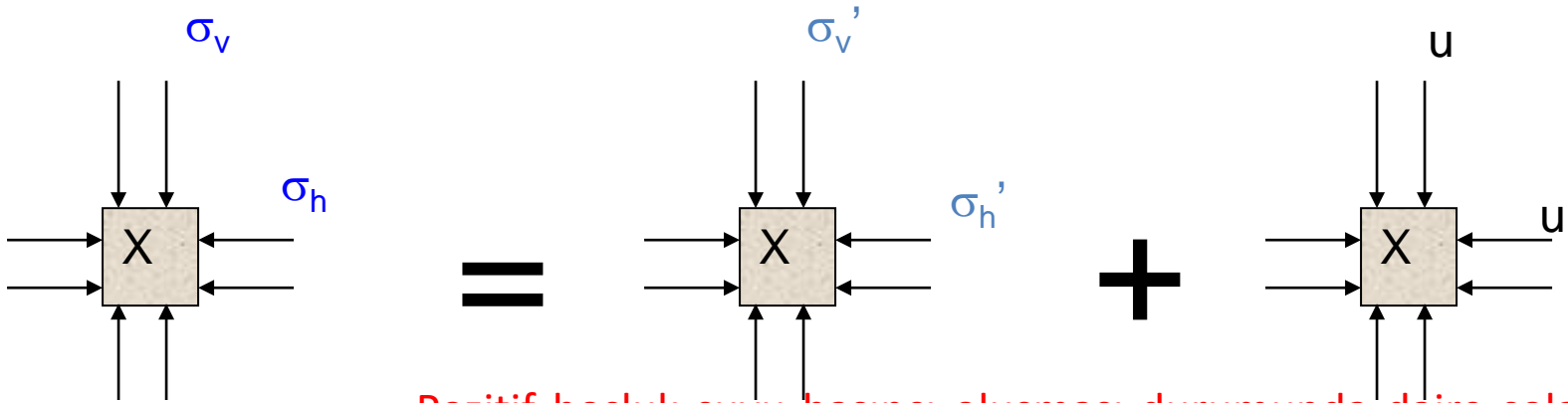
$$c' = c_{cu} = c_d = 0$$

Aşırı konsolida kilerde;

$$c' > 0, c_{cu} > 0, c_d > 0$$

MOHR-COULOMB GÖÇME HİPOTEZİ

Mohr dairesindeki σ ve σ'



Pozitif boşluk suyu basıncı oluşması durumunda daire sola negatif boşluk suyu basıncı oluşması durumunda ise daire sağ tarafa kayar.



DİĞER YENİLME KRİTERLERİ

Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan mohr hipotezini yıllar içerisinde başka teorilerde izlemiştir. Zeminin gevrek olmadığı kabulü ile bu teorilerden bazıları tablodaki gibidir.

Ad	Kırılma Kriteri	Malzeme Tanımı	En Uygun Kullanım
Coulomb (1776)	Kayma düzleminde sürtünmeden ileri gelen kayma	Rijit ve sürtümlü malzeme	Tabakalı halde bulunan veya aşırı konsolide zeminler
Mohr-Coulomb (1911)	Kayma düzleminde sürtünmeden, maksimum efektif gerilmeden ileri gelen kayma	Rijit ve sürtümlü malzeme	Drenajlı koşullarda aşırı konsolide ince daneli zeminler veya sıkı kaba daneli zeminler
Tresca (1869)	Maksimum gerilmenin yarısında oluşan kayma	Homojen-katı malzeme	Drenajsız koşullarda ince daneli zeminlerde
Taylor (1948)	Danelerin kenetlenmesinden dolayı oluşan sürtünme etkisinde meydana gelen kayma	Şekil değiştirebilir, sürtümlü katı	Drenajlı veya drenajsız koşullarda homojen özellik gösteren zeminler

Kırılma kriterleri arasındaki farklar (Budhu, 2011).

DİĞER YENİLME KRİTERLERİ

Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan mohr hipotezini yıllar içerisinde başka teorilerde izlemiştir. Zeminin gevrek olmadığı kabulü ile bu teorilerden bazıları tablodaki gibidir.

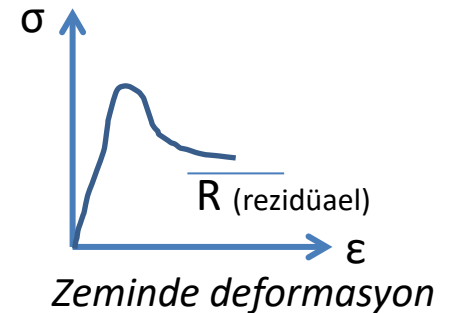
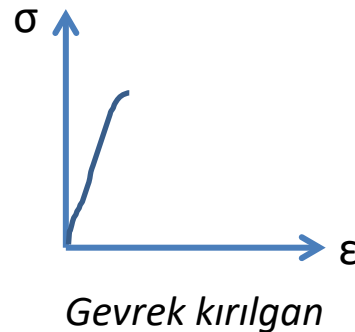
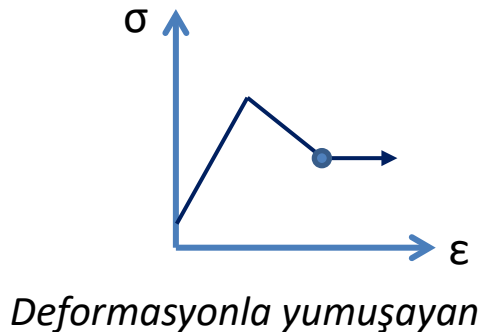
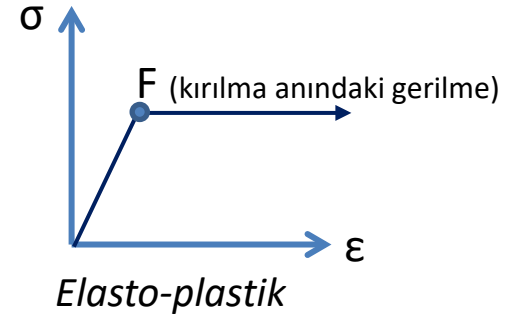
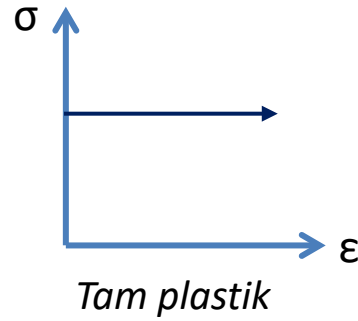
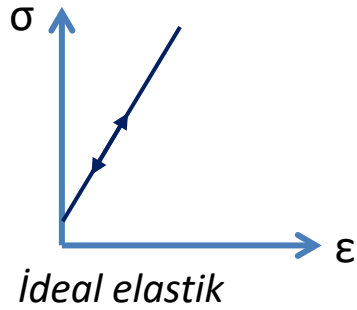
TEORİ	MATEMATİK İFADESİ
Tresca-Coulomb	$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k_1$
Geliştirilmiş Tresca	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_3^2$
Geliştirilmiş Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_4^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
Mohr Coulomb	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_5^2(\sigma_1 + \sigma_3)$
Girffit (GEVREK)	$\sigma_1 = \sigma_t(\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0)$ $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_6(\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0)$

σ_t = Malzemenin çekme dayanımı

k = denklem değişmezi

ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Zeminler elastik olmamalarına rağmen çok düşük gerilme altında yalancı elastik davranış gösterebilirler ve gerilme deformasyon ilişkisinin başlangıcı doğrusal kabul edilir. Gerçekte hem zeminler hem de kayalar elastik olmayan malzemeler olup bu nedenle de gerilme deformasyon ilişkisi ender olarak doğrusaldır. O nedenle ki zeminler için Young modülü ve poisson oranı değişmez değerler olmayıp belli bir gerilme altında malzeme davranışını yansıtan parametrelerdir. Sonuç olarak zeminler Elasto-plastik malzeme olarak kabul edilmektedir.

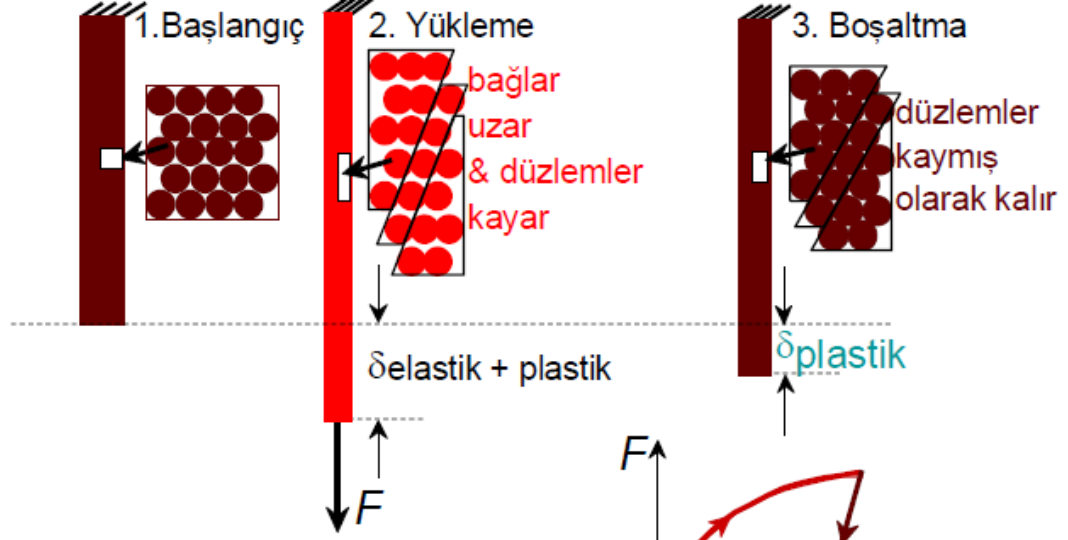
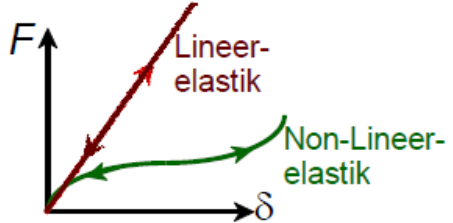


ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ



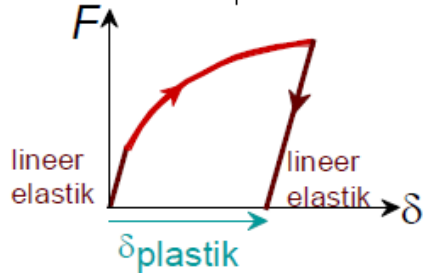
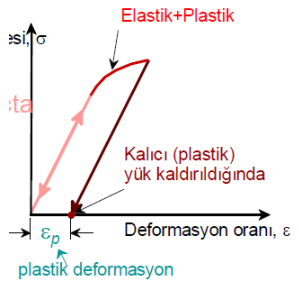
Elastik deformasyon

Elastik, tersinir demektir!



Plastik deformasyon

Plastik kalıcı demektir!



ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

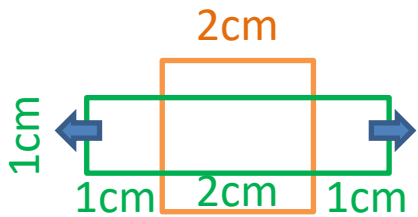
Poisson oranı

Poisson oranı elastik malzemelerin kuvvet altında uğrayacağı deformasyonlar hakkında bilgi veren önemli bir sabittir. **Zeminlerde malzemenin suya doygunluğunu anlatan bir sabittir. Poisson sabiti 0,5 e yakın malzemelerin suya doygunluğu yüksektir ve sıkıştırılabilirliği yok denecek kadar azdır.** Sıvıların poisson oranı teorik olarak tam olarak 0,5'tir. Çünkü sıvılar sıkıştırılamazlar. **Bu nedenle hiçbir katı malzemenin poisson oranı 0,5 olamaz.**

Poisson oranı 0,5 olan bir malzeme için sıkıştırılamaz ve bu nedenle de bu kuvvet altında hacim değişikliğine uğramazlar denilebilir. Örneğin; lastik, kauçuk gibi bazı malzemelerin poisson oranları 0,5 değerine yakındır.

Kuvvetin uygulandığı yönde uzama miktarı 2 cm

Kuvvetin uygulandığı yöne dik yöndeki daralma 1 cm



$$\nu = - \frac{\text{enine deformasyon}}{\text{boyuna deformasyon}} = - \frac{-1 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 0.5$$

Diğer bir ifade ile Poisson oranı; Yanal eksenlerde oluşan birim şekil değiştirmenin, kuvvet ekseninde oluşan birim şekil değiştirmeye oranının “-“(eksi) ile çarpımıdır.

$$(\nu = - \epsilon_y / \epsilon_x)$$

$$\text{Poisson Oranı } (\nu) = \frac{\text{Yanal Gerinme } (\epsilon_y)}{\text{Eksenel Gerinme } (\epsilon_x)}$$

ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Poisson oranı

Zemin Cinsi	E(kPa)	ν
Yumuşak killer	1400-4200	0.35-0.45
Orta katı killer	4200-8400	0.30-0.35
Katı killer	8400-20000	0.2-0.35
Gevşek Kum	7000-20000	
Orta sıkı kum	20000-40000	0.30-0.35
Sıkı kum	40000-84000	

Zemin Cinsi	Poisson Oranı (μ)
Doygun kil	0.4 - 0.5
Doygun olmayan kil veya kumlu kil	0.2 - 0.4
Kum, ($\Phi = 40^\circ$)	0.3 - 0.4
Kum, ($\Phi = 20^\circ$)	0.1 - 0.2
Silt	0.3 - 0.4
Kaya	0.1 - 0.4

Tablo: Zemin cinsine göre poisson oranı (μ) değişimi (Özüdoğru, 1986)

ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ - DEFORMASYON İLİSKİSİ

Poisson oranı

Metal Alloy	Modulus of Elasticity		Shear Modulus		Poisson's Ratio
	GPa	10 ⁶ psi	GPa	10 ⁶ psi	
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.29
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28

Material	Poisson's Ratio - μ -	Material	Poisson's Ratio - μ -
Upper limit	0.5	Magnesium	0.35
Aluminum	0.334	Magnesium Alloy	0.281
Aluminum, 6061-T6	0.35	Marble	0.2 - 0.3
Aluminum, 2024-T4	0.32	Molybdenum	0.307
Beryllium Copper	0.285	Monel metal	0.315
Brass, 70-30	0.331	Nickel Silver	0.322
Brass, cast	0.357	Nickel Steel	0.291
Bronze	0.34	Polystyrene	0.34
Clay	0.41	Phosphor Bronze	0.359
Concrete	0.1 - 0.2	Rubber	0.48 - ~0.5
Copper	0.355	Sand	0.29
Cork	0	Sandy loam	0.31
Glass, Soda	0.22	Sandy clay	0.37
Glass, Float	0.2 - 0.27	Stainless Steel 18-8	0.305
Granite	0.2 - 0.3	Steel, cast	0.265
Ice	0.33	Steel, Cold-rolled	0.287
Inconel	0.27 - 0.38	Steel, high carbon	0.295
Iron, Cast - gray	0.211	Steel, mild	0.303
Iron, Cast	0.22 - 0.30	Titanium (99.0 Ti)	0.32
Iron, Ductile	0.26 - 0.31	Wrought iron	0.278
Iron, Malleable	0.271	Z-nickel	0.36
Lead	0.431	Zinc	0.331
		Limestone	0.2 - 0.3

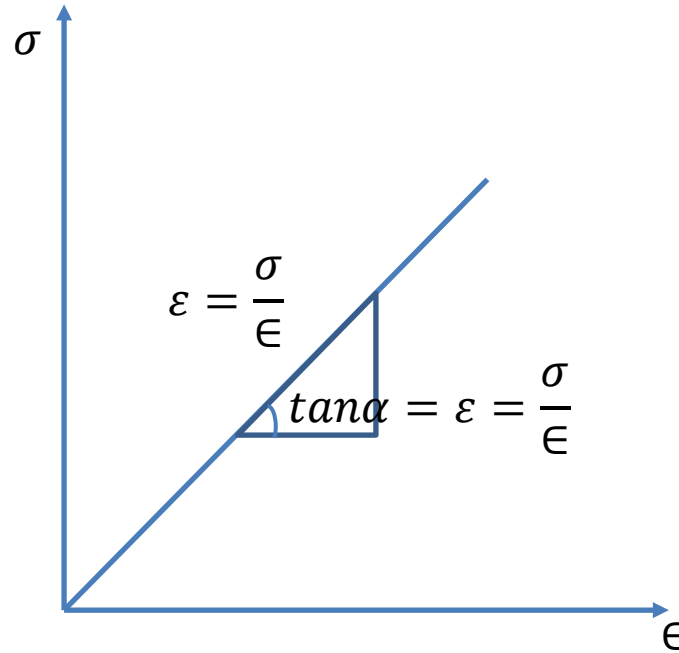
ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Elastisite Modülü

Doğal etkenlerle oluşan, taşınma ve birikme gibi olaylar sonucu meydana gelen zeminler, genellikle heterojen ve anizotrop bir yapı göstermektedirler. Yapılan deneyler, zeminlerin de, yaklaşık olarak, elastik bir cisimmiş gibi düşünülmesine ve değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu nedenle, elastik malzemelerin gerilmeler altındaki davranışını incelemek için geliştirilen Hooke kanunu elastik zeminler için de geçerli kabul edilmektedir.

İdeal elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramının eğimi, elastisite modülünü verir

Zemin Cinsi	E_u (MN/m ²)
Yumuşak kil	2 - 5
Katı kil	3 - 5
Sert kil	7 - 20
Kumlu kil	30 - 40
Siltli kil	7 - 20
Gevşek kum	10 - 25
Sıkı kum	50 - 90
Sıkı çakıl/kum	100 - 200



Tablo: Zeminlerde drenajsız elastisite modülü (E_u) değerleri (Özüdoğru, 1986)

ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Kaya	Yer	ρ yoğunluk (g/cm ³)	E Elastisite modülü (GPa)	Nihai dayanım	
				σ_c Basınç dayanımı (MPa)	σ_t Çekme dayanımı (MPa)
Amfibolit	California	2,94	92,4	278,0	22,8
Andezit	Nevada	2,37	37,0	103,0	7,2
Bazalt	Michigan	2,70	41,0	120,0	14,6
Bazalt	Colorado	2,62	32,4	58,0	3,2
Bazalt	Nevada	2,83	33,9	148,0	18,1
Beton	-	2,7-3,2	2,1-1,0	0,41-0,21	0,04-0,02
Çakıltaşı	Utah	2,54	14,1	88,0	3,0
Diyabaz	New York	2,94	95,8	321,0	55,1
Diyorit	Arizona	2,71	46,9	119,0	8,2
Dolomit	Illinois	2,58	51,0	90,0	3,0
Gabro	New York	3,03	55,3	186,0	13,8
Gnays	Idaho	2,79	53,6	162,0	6,9
Gnays	New Jersey	2,71	55,16	223,0	15,5
Granit	Georgia	2,64	39,0	193,0	2,8
Granit	Maryland	2,65	25,4	251,0	20,7
Granit	Colorado	2,64	70,6	226,0	11,9
Grovak	Alaska	2,77	68,4	221,0	5,5
Jips	Kanada	2,32	-	22,0	2,4
Kireçtaşı	Almanya	2,2	63,8	63,8	4,0
Kireçtaşı	Indiana	2,30	26,96	53,1	4,07
Mermer	New York	2,72	54,0	126,9	11,7
Mermer	Tennessee	2,70	48,3	106,0	6,5
Fillit	Michigan	3,24	76,5	126,0	22,8
Kuarsit	Mirnesota	2,75	84,8	629,0	23,4
Kuarsit	Utah	2,55	22,06	148,0	3,5
Tuz	Kanada	2,20	4,64	35,5	2,5
Kumtaşı	Ohio	2,17	10,52	38,9	5,17
Kumtaşı	Utah	2,20	21,37	107,0	11,0
Şist	Colorado	2,47	8,96	15,0	-
Şist	Alaska	2,89	39,3	129,6	5,5
Şeyl	Utah	2,81	58,19	215,8	17,2
Şeyl	Pennsylvania	2,72	31,2	101,4	1,38
Silttaşı	Pennsylvania	2,76	30,6	113,0	2,76
Sleyt	Michigan	2,93	75,85	180,0	25,5
Çelik	-	7,85	200,00	365,0	365,0
Tüf	Nevada	2,39	3,65	11,3	1,17
Tüf	Japonya	1,91	76,0	36,0	4,31

Elastisite Modülü – E- kg/cm ²	DAYANIM
<1000	Çok zayıf
1000–5000	Zayıf
5000–10000	Orta
10000–30000	Sağlam
>30000	Çok Sağlam

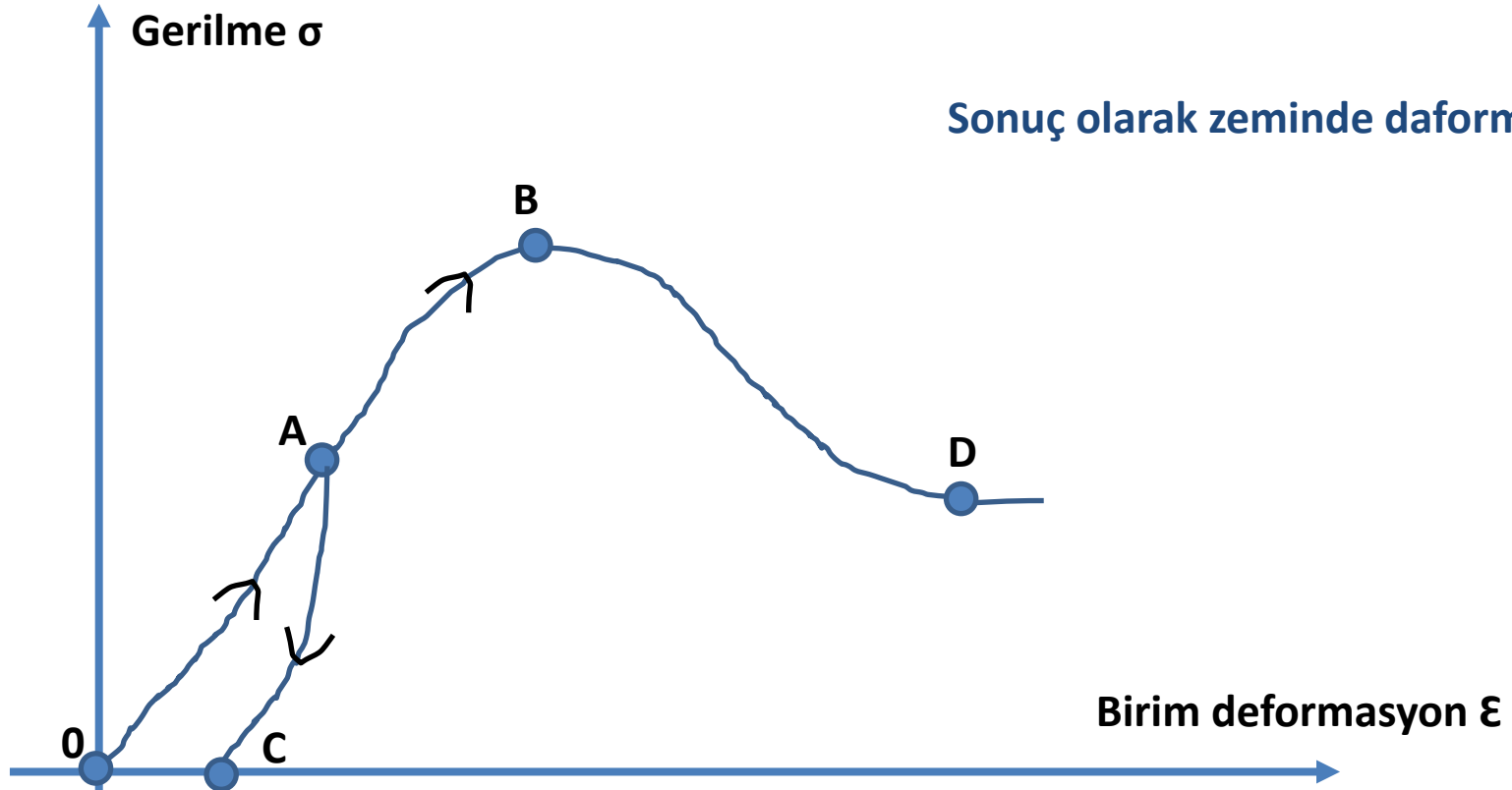
$$1000 \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ MPa}$$

Sıra No	Zemin türü	Sembol	Sıklık	Birim Hacim Ağırlık			Kayma Direnci ϕ Derece
				Tabii γ_s kN/m ³	Doygun γ_d t/m ³ (kN/m ³)	Batık γ t/m ³ (kN/m ³)	
1	iyi derecelenmiş kum, az siltli kum, kum-çakıl	Cu ≤ 6 olan SW, SM	Gevşek Orta Sıktı Sıktı	17,0 18,0 19,0	19,0 20,0 21,0	9,0 10,0 11,0	30 32,5 35
4	iyi derecelenmiş az kumlu çakıl, yassı çakıl ve taş	GW	Gevşek Orta Sıktı Sıktı	17,0 18,0 19,0	19,0 20,0 21,0	9,0 10,0 11,0	32,5 35 37,5
7	Kötü derecelenmiş kum, kum-çakıl ve çakıl	6 < Cu ≤ 15 olan SP, SM, GP	Gevşek Orta Sıktı Sıktı	18,0 19,0 20,0	20,0 21,0 22,0	10,0 11,0 12,0	30 32,5 35
10	Kötü derecelenmiş kum, kum-çakıl, az siltli çakıl	Cu ≥ 15 olan SP, SM, GP veya GM	Gevşek Orta Sıktı Sıktı	18,0 20,0 22,0	20,0 22,0 24,0	10,0 12,0 14,0	30 32,5 35

ZEMİNLERİN KAYMA GERİLMESİ – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Zeminlerde gerilme deformasyon ilişkisi hiçbir zaman lineer ve elastik değildir. Zemin a noktasına kadar yüklenir (OA), daha sonra yük geri alınır (OC) zemin orijinal haline dönmez. OC kadar kalıcı deformasyon olur histeri etkisi denir (OA ile OC eğrisinin farklı olması).

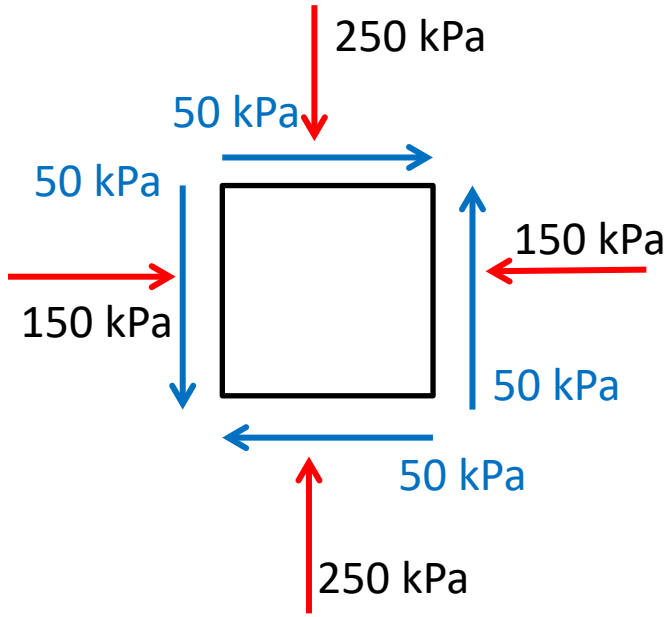
B noktasından sonra yüklemeye devam edildiğinde zemin yük almamakta ve deformasyon yük azaldığı halde artmaktadır. B noktasından sonra zemin yenilmektedir. D noktasından sonra ise zemin sabit yük altında sürekli deforme olmaktadır.



ÖRNEKLER

Bir zemin ortamındaki **yatay düzleme** etki eden düşey gerilme ve kayma gerilmesi ile **düşey düzleme** etki eden yatay gerilme ve kesme gerilmesi şekilde ifade edildiği gibidir. Buna göre düzlemlere etki eden gerilme değerleri dikkate alınarak 20° lik düzlemde oluşacak gerilme değerlerini analitik ve grafik yöntemlerine göre bulunuz.

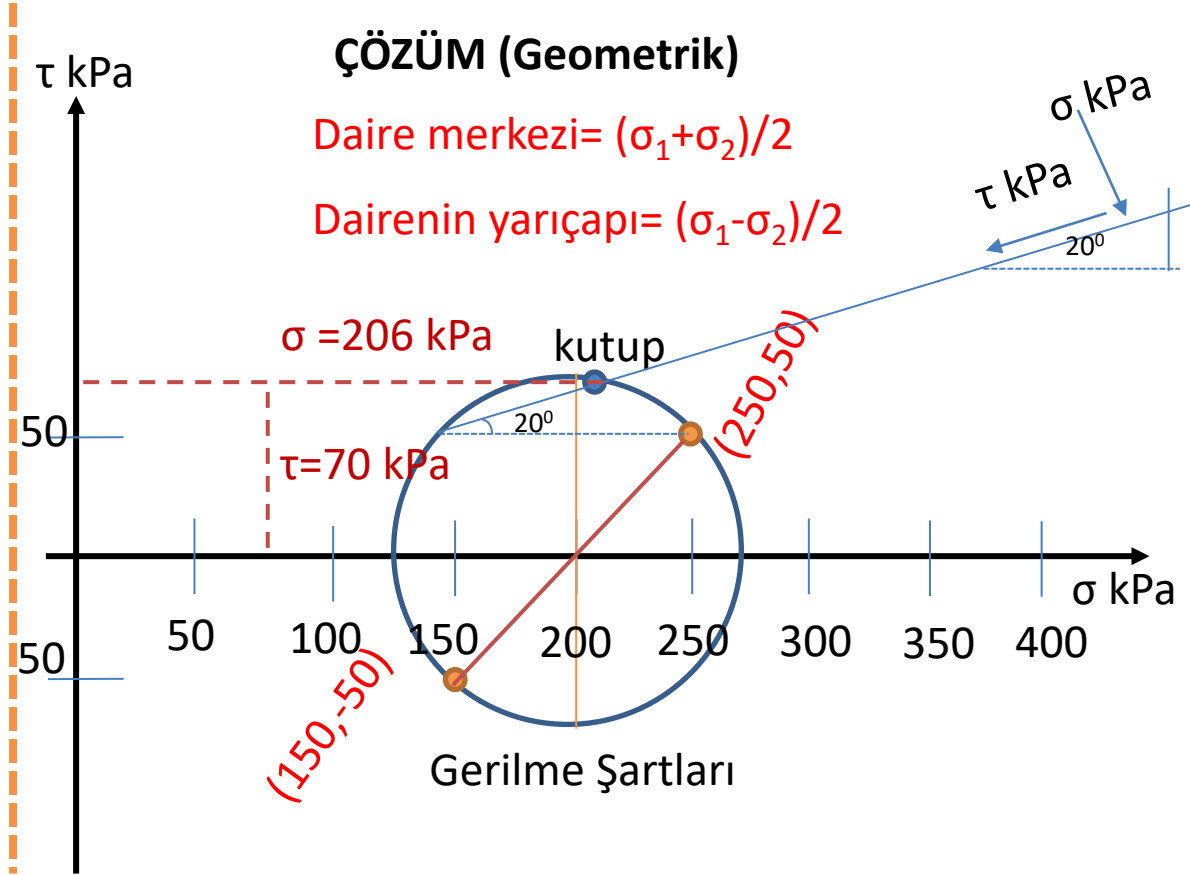
SORU



ÇÖZÜM (Geometrik)

$$\text{Daire merkezi} = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$$

$$\text{Dairenin yarıçapı} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2$$



Analitik

$$\sigma_n = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \gggggg \frac{250 + 150}{2} + \frac{250 - 150}{2} \cos 40 + (-50) \sin 40$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \gggggg \frac{250 - 150}{2} \sin 40 - (-50) \cos 40$$

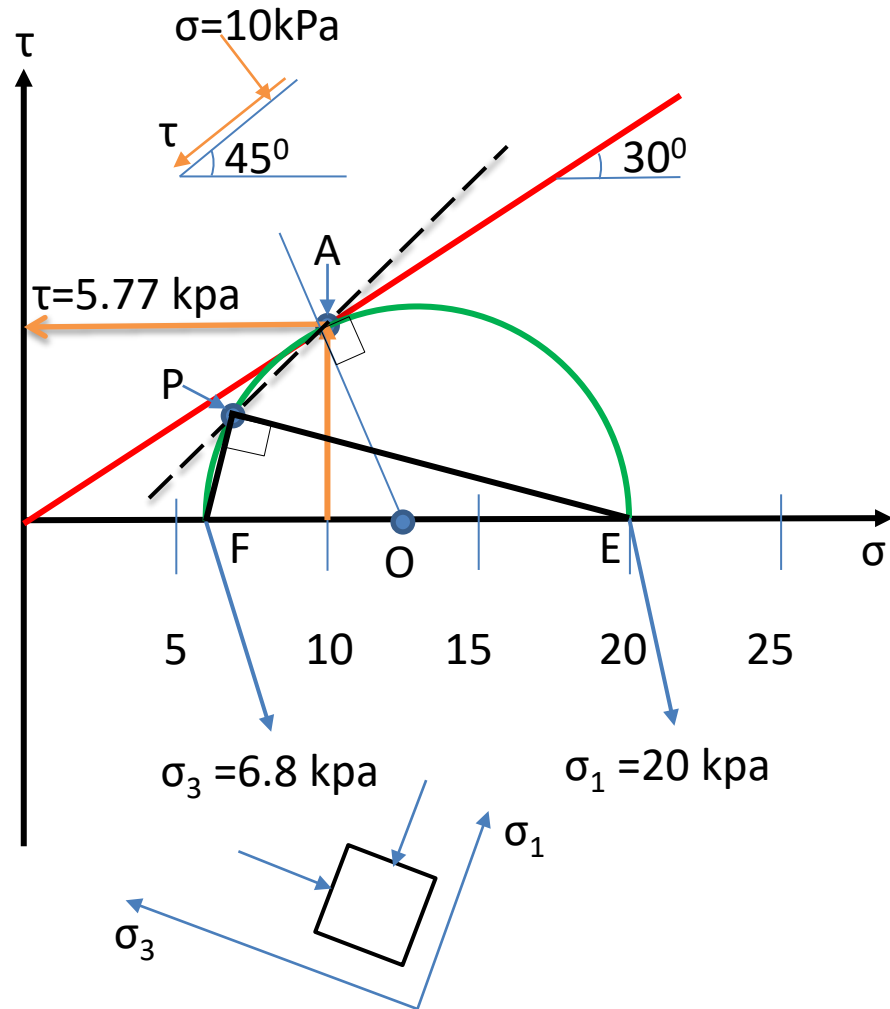
ÖRNEKLER

Bir zeminin dayanım parametreleri $c'=0$ ve $\phi'=30^\circ$ 'dir. Bu zemindeki bir elemanda yenilmenin 45° yapan bir düzlem üzerinde ve $\sigma_f = 10$ kpa ile gerçekleştiğini varsayarak

a. Yenilmedeki kayma gerilmesini

b. Zemin elemanındaki asal gerilmelerin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

ÇÖZÜM



1. X ekseninde $\sigma=10$ kpa'dan yenilme zarfını kesene kadar bir çizgi çizilerek A noktası bulunur. **Elde edilen noktadan $\tau=5.77$ kpa bulunur.** Aynı sonuç yenilme zarfı denkleminde de elde edilir.

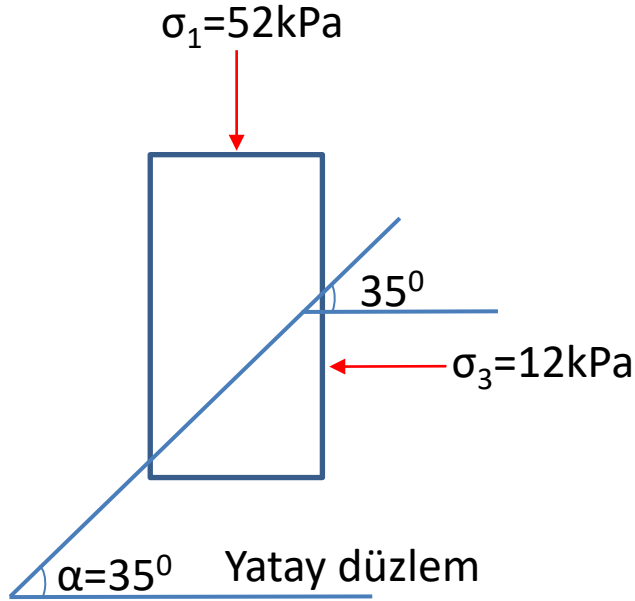
2. Mohr dairesi yenilme zarfına teyet olacaktır. Teyet noktası A olacaktır. Bu noktadan yenilme zarfına bir dik çıkarak X eksenine uzatarak aranan dairenin merkezi O bulunur. Merkezden OA yarı çaplı bir yay çizilir. **Dairenin X eksenini kestiği yerler asal gerilmeleri ifade eder.**

3. A noktası zemin elemanında 45° yapan düzlem üzerindeki gerilmeyi temsil ettiğinden A noktasından yatayla 45° açı yapan bir çizgi çekilir bunun mohr dairesini kestiği yer kutuptur (P). Majör ve Minör asal gerilmelerin yönelimlerini elde etmek için PE vePF çizilir.

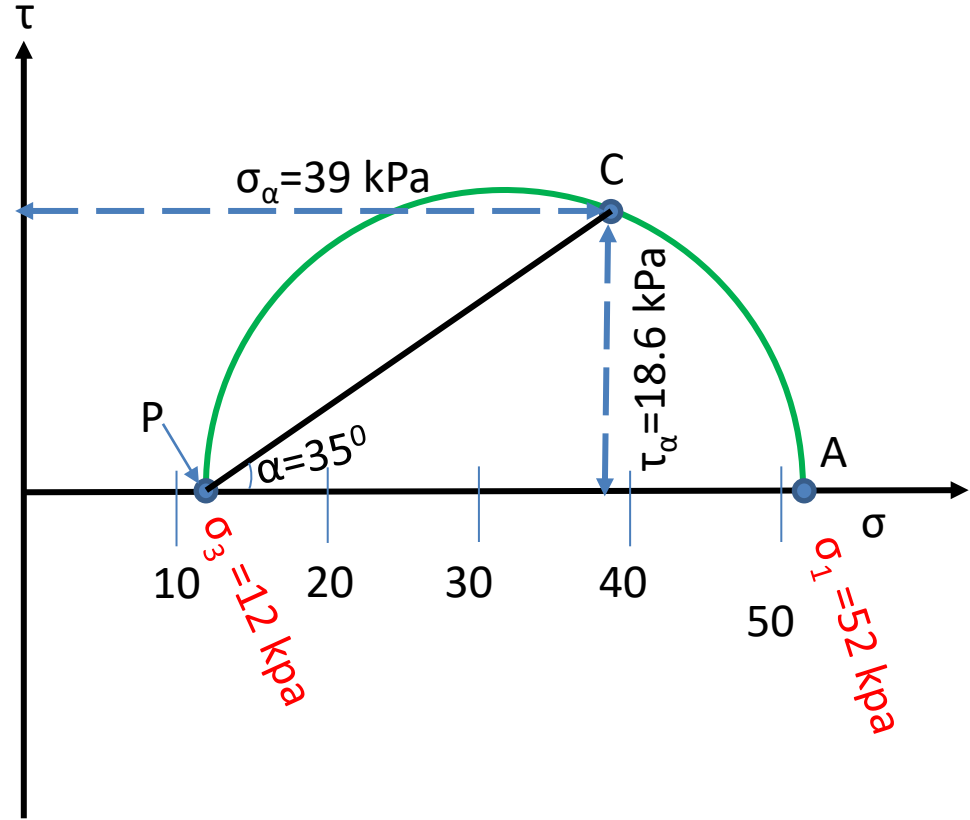
ÖRNEKLER

Şekilde verilen eleman üzerine etkiyen kuvvetler $\sigma_1=52\text{kPa}$ $\sigma_3=12\text{kPa}$ olduğuna göre yatayla 35° olan düzleme etkiyen gerilmeleri bulunuz.

ŞEKİL



ÇÖZÜM 1

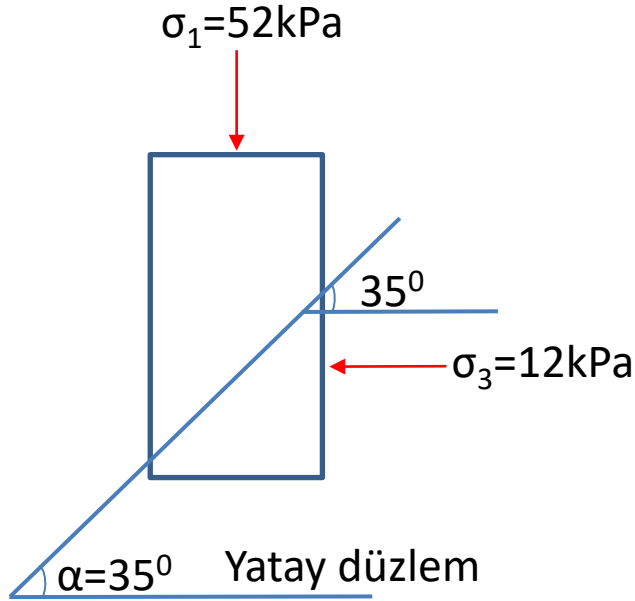


1. Ölçekli olarak Mohr dairesi çizilmeli; (Daire merkezi = $(\sigma_1 + \sigma_2)/2 = 32\text{kPa}$; Dairenin yarıçapı = $(\sigma_1 - \sigma_2)/2 = 20\text{kPa}$)
2. σ_1 'in etkidiği yatay düzlemden yola çıkarak kutup noktası (P) bulunur. Kutup noktasından $\alpha = 35^\circ$ eğimli doğru çizilerek aranılan gerilme değerleri (C) bulunur.

ÖRNEKLER

Şekilde verilen eleman üzerine etkiyen kuvvetler $\sigma_1=52\text{kPa}$ $\sigma_3=12\text{kPa}$ olduğuna göre yatayla 35° olan düzleme etkiyen gerilmeleri bulunuz.

ÇÖZÜM 2



$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

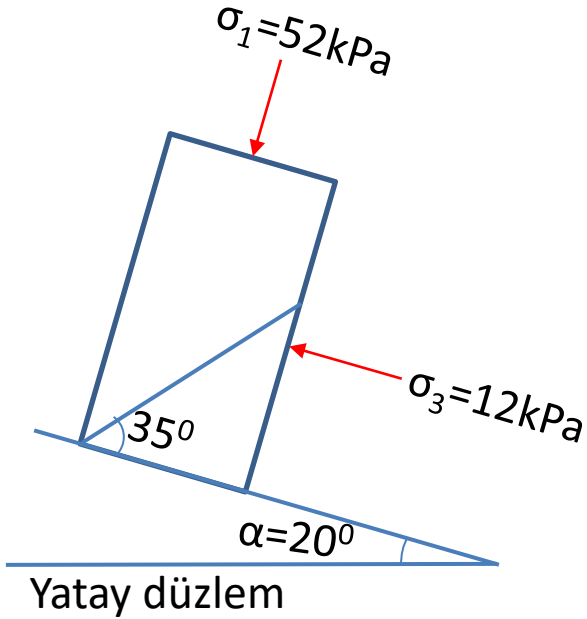
$$\sigma_\alpha = \frac{52 + 12}{2} + \frac{52 - 12}{2} \cos 2(35) = 38.840 \text{ kPa}$$

$$\tau_\alpha = \frac{52 - 12}{2} \sin 2(35) = 18.79 \text{ kPa}$$

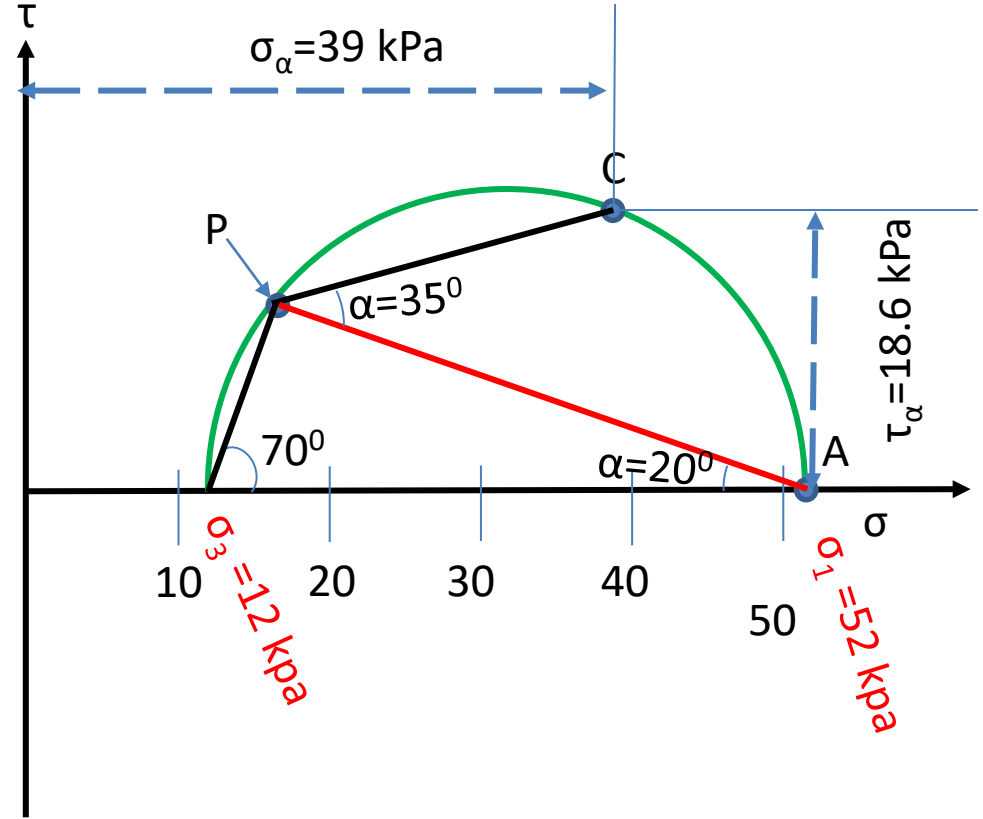
ÖRNEKLER

Bir önceki soruda verilen elemanın yataydan 20° döndürülmesi durumunda düzleme etkiyen gerilmeleri bulunuz.

ŞEKİL



ÇÖZÜM



1. Bir önceki gibi mohr dairesi çiziniz.
2. σ_1 'in etkidiği yatay düzlemden yola çıkarak kutup noktasını (P) bulunuz. Büyük asal gerilme yatayla 20° açı yapmaktadır. AP doğrusundan 35° dönün C noktasını bulun. Aranılan gerilme değerleri C noktasının koordinatlarından bulunur. Değer uzayda yer değiştirme olmadığından bir önceki örnekle aynıdır.