

INS308

Zemin Mekaniği II

Zeminlerde Kayma Direnci Kavramı, Yenilme Teorileri

Prof. 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:	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.

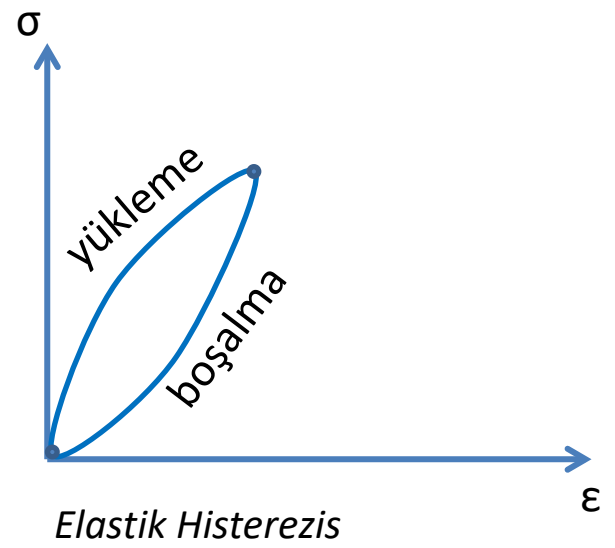
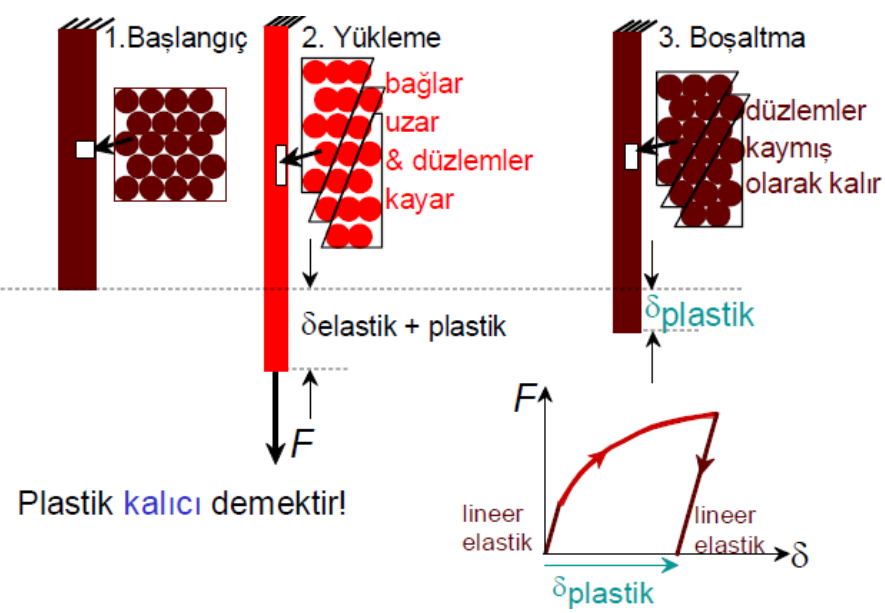
GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ

Hatırlayalım.

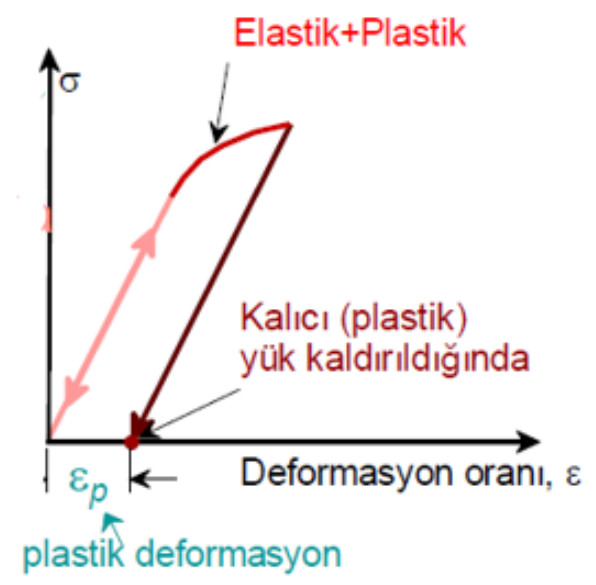
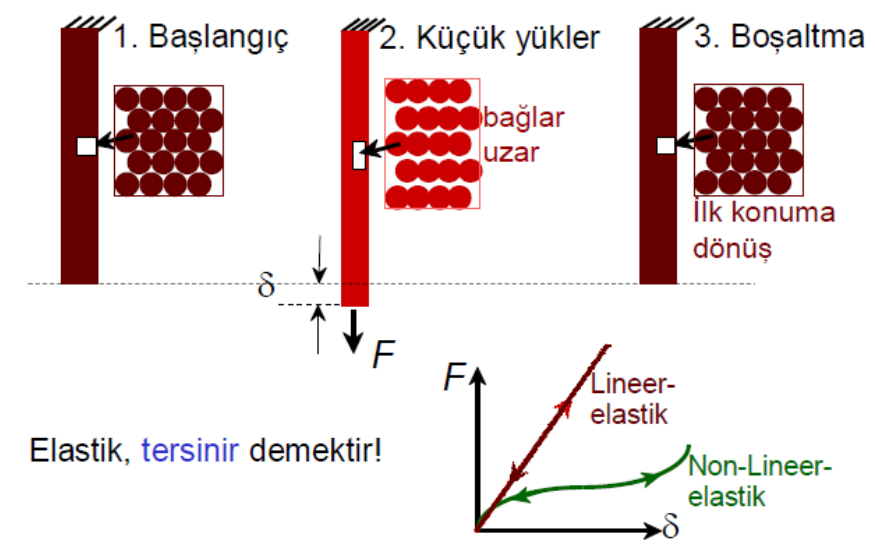
- ❑ Kesit düzlemine dik etkiyen kuvvetin oluşturduğu gerilmeye **normal gerilme** (σ) denilmektedir.
- ❑ Kuvvet, dışa doğru etkirse oluşan gerilme **çekme gerilmesi** içe doğru etkirse meydana gelen gerilme ise **basınç gerilmesi** olarak tarihlenmektedir.
- ❑ Yüzeye etkiyen kuvvet dik değil de paralel etkirse meydana gelen gerilme **kayma gerilmesi** (τ) olarak adlandırılır.
- ❑ Bir etki sonucunda cismin hacminde meydana gelen değişiklikler, birim şekil değişimi (ϵ) ve/veya açı (γ) değişimi şeklinde oluşmaktadır.
- ❑ Elastik ve Plastik özellik dış etkinin büyüklüğüne de bağlıdır. Aynı cisim, **elastik davranışı daha küçük gerilmelerde**, **plastik davranışı ise gerilmenin daha büyük değerlerinde gösterebilmektedir**.
- ❑ Cimin her yerinde malzeme özellikleri aynı ise homojenlikten bahsedilir. Ayrıca cimin bir noktasında her doğrultuda malzeme özellikleri aynı kalıyorsa o cisme izotrop, yönler göre farklılık sunuyorsa anizotrop cisim denir. Şekil değiştirme özelliğine bağlı olarak farklı malzeme davranışları vardır. **Tam elastik cisimde şekil değiştirme yük kalkınca sıfırlanır**. Yük kaldırılınca şekil değiştirmeler geri dönüyor ancak yüklemede ve boşalmada eğrisel bir yol oluşuyorsa histerezis olayı meydana gelmiştir.

GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ

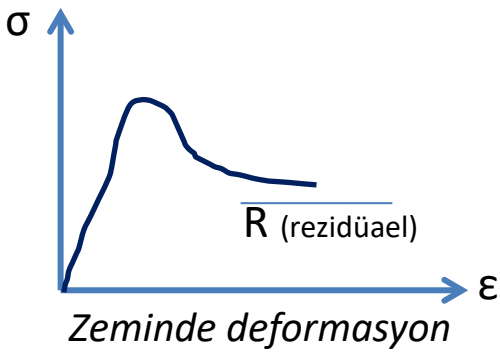
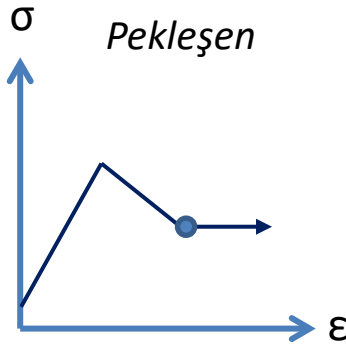
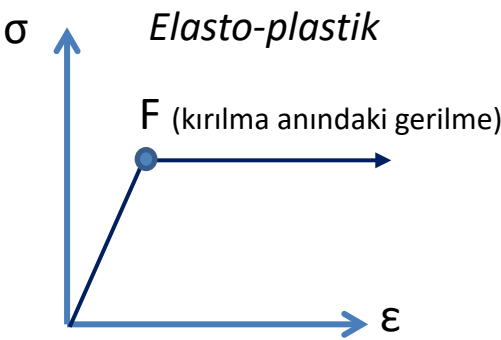
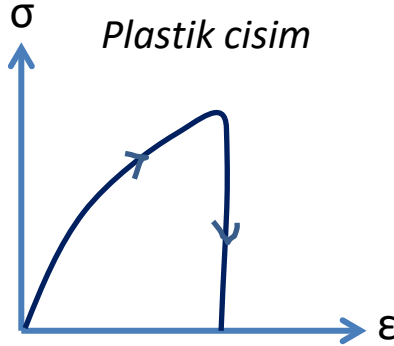
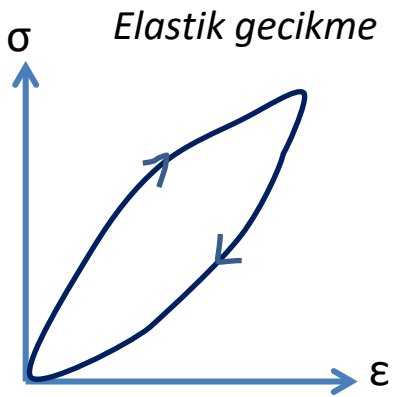
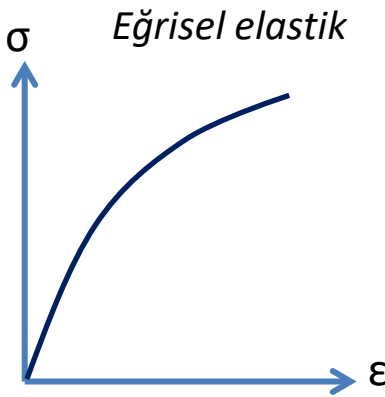
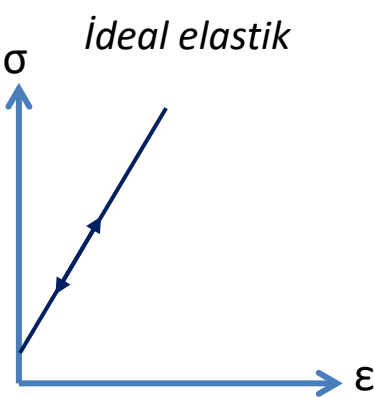
Plastik deformasyon



Elastik deformasyon



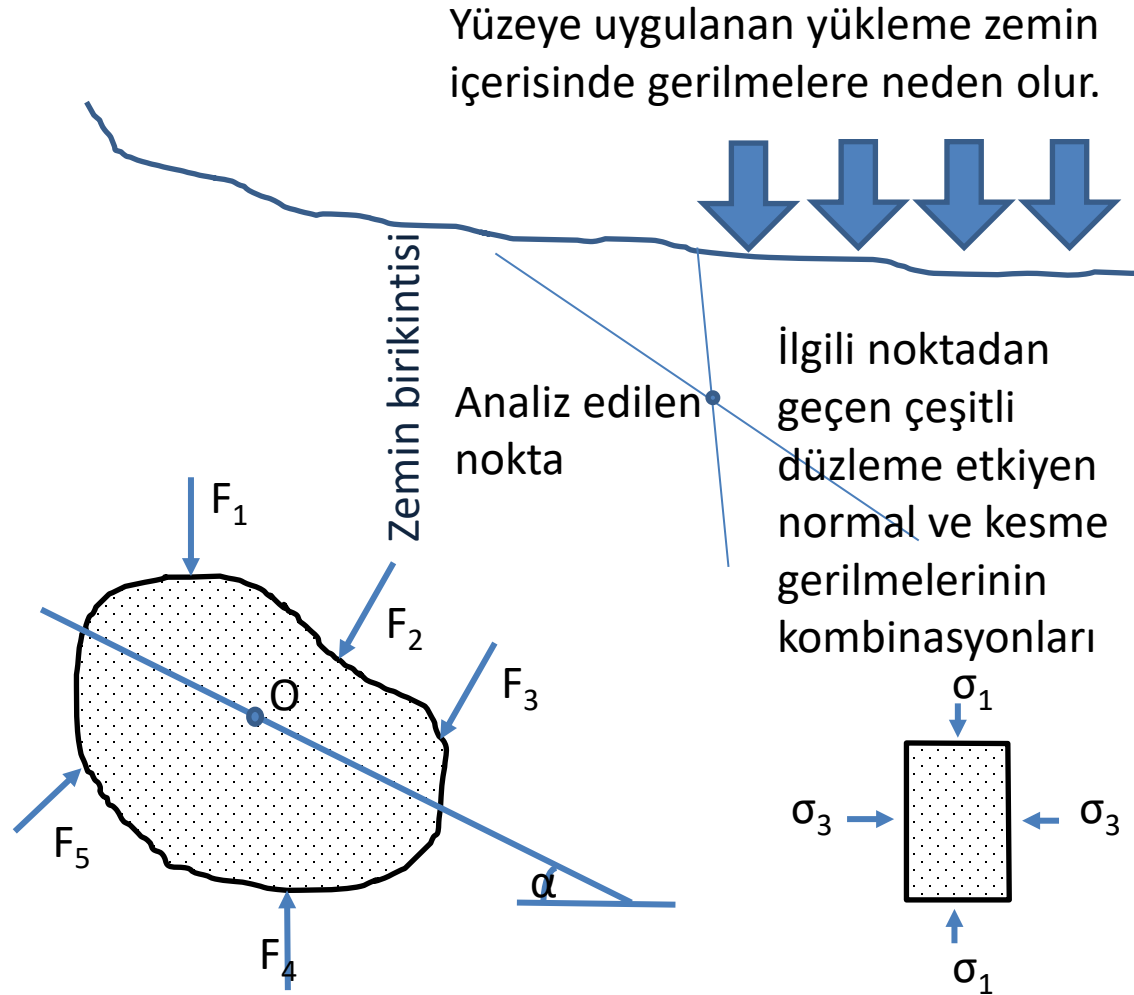
GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ



ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

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

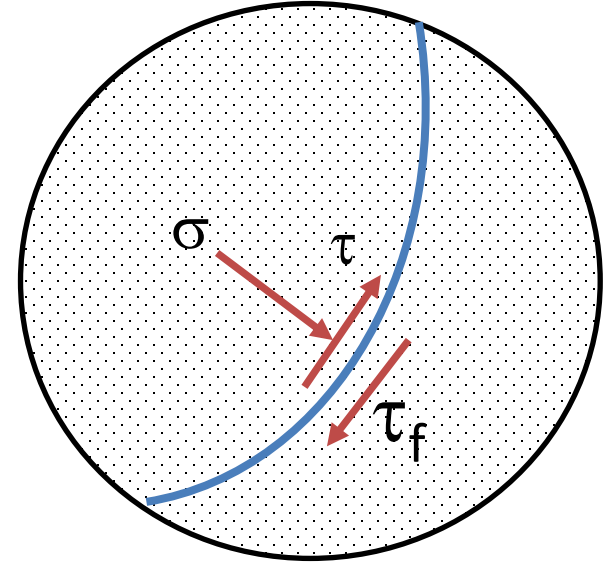
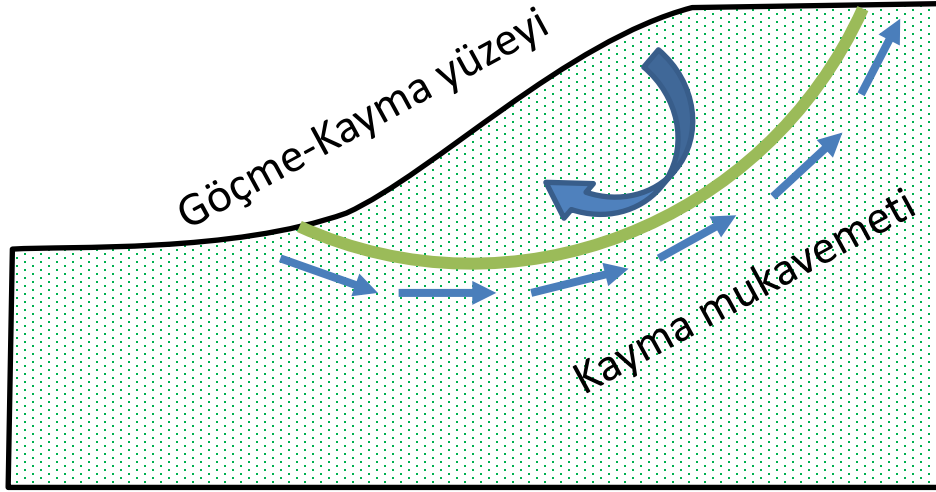
Şekilde $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ kuvvetleri etkisi altında kalmış zemin kütlesi gösterilmiştir. O noktasında sonsuz sayıda düzlem geçebilir. Genel olarak bu düzlemlerin her biri üzerinde normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri mevcuttur. **Ancak kayma gerilmelerin sıfır olduğu sadece normal gerilmelerin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



ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

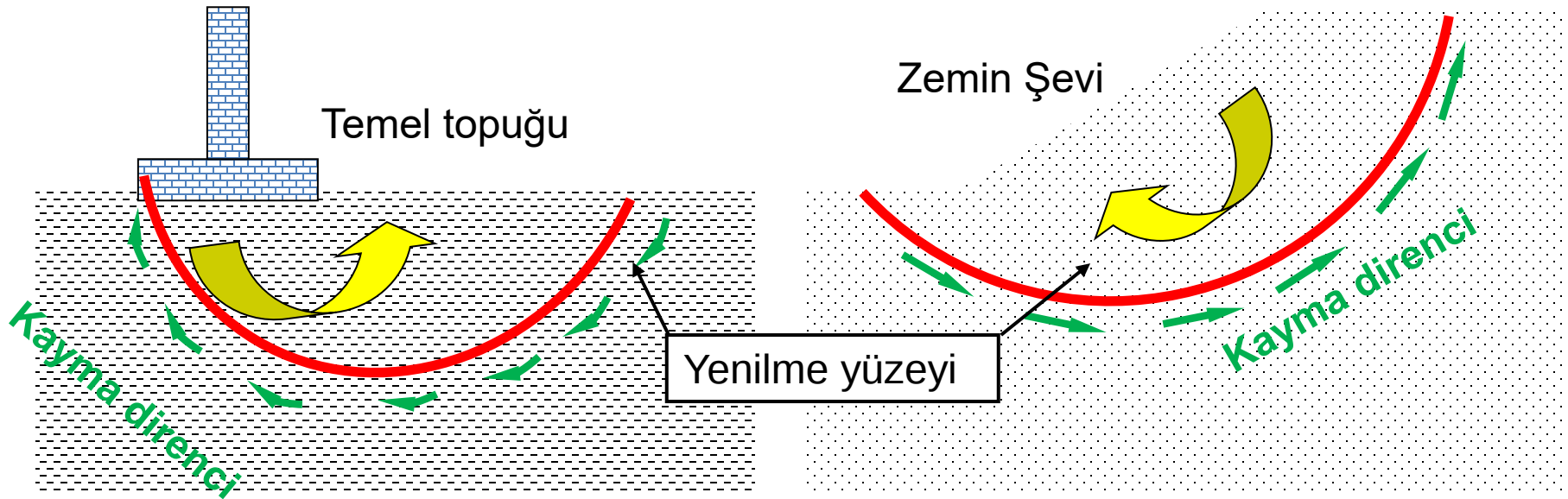
Zeminle ilgili çeşitli problemlerin çözümünde zemin kayma direnci ile ilgili bilgilere gereksinim duyulur. Zemin ortamı yüklendiği zaman zemin kitlesinde gerilmeler oluşur. Zeminlerde göçme meydana gelmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması gerekir. Genel olarak göçme, 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.

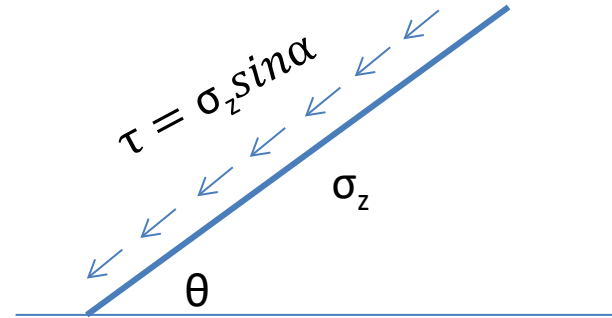
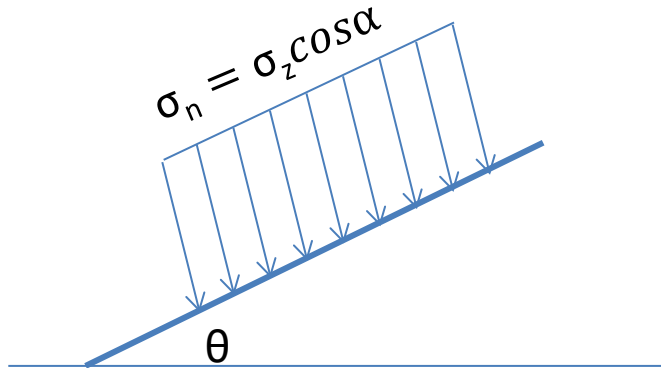
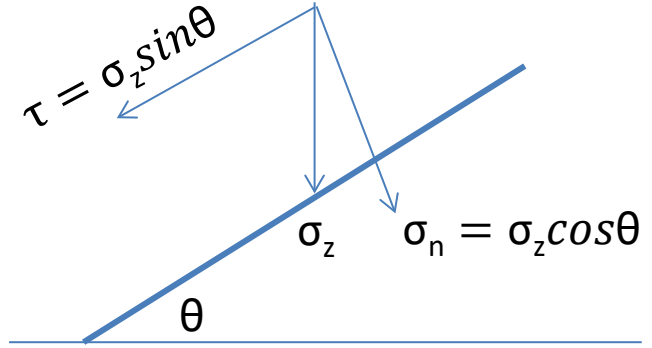
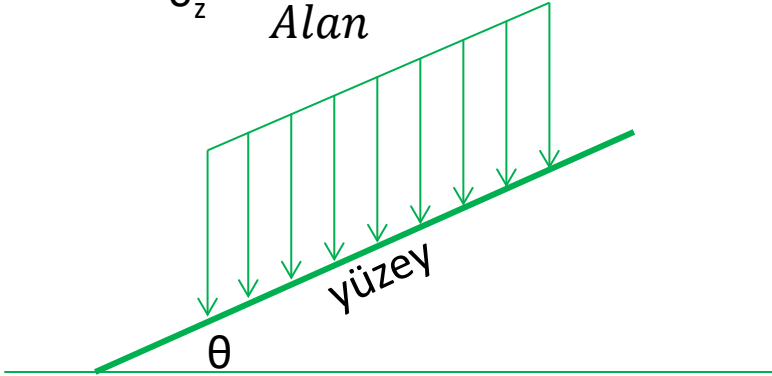
1. Tanelerin oluşturduğu yapının kesme deformasyonuna karşı gösterdiği direnç
2. Tanelerin (kum, çakıl) temas noktaları veya temas alanlarında oluşan sürtünme kuvvetleri
3. Zemin taneleri (kil) arasındaki çekme veya yapışma (kohezyon) kuvvetleri

ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

Yatayda θ açısı yapan bir düzlem üzerinde etkiyen kuvvetlerin bileşkesini bu düzleme dik (normal) ve paralel (kayma) iki bileşene ayırabiliriz.

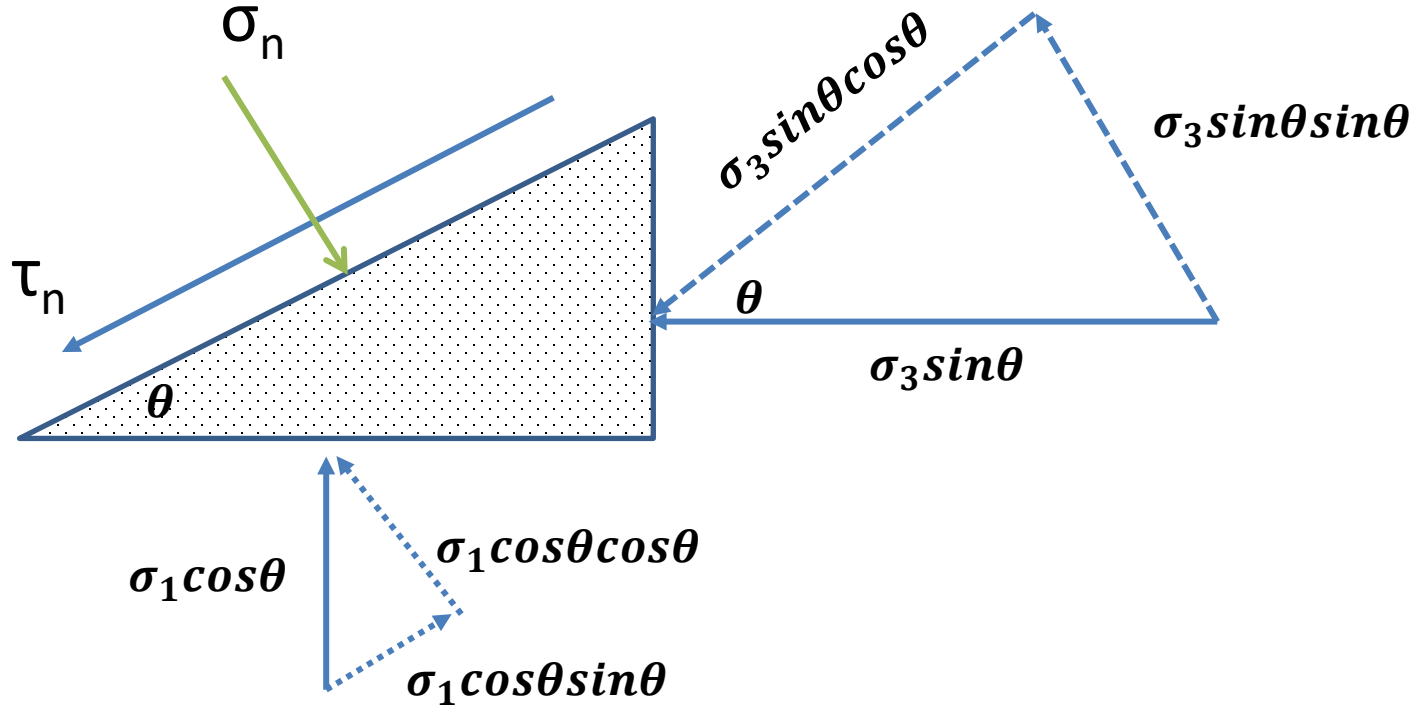
Eğer AC uzunluğu birim uzunluk olarak kabul edilir ise düzlem üzerindeki normal ve kayma gerilmelerine ayrılmış hali şekildeki gibi olur.

$$\sigma_z = \frac{W}{\text{Alan}}$$



ZEMİN KÜTLELERİNDE BİRLEŞİK GERİLMELER

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



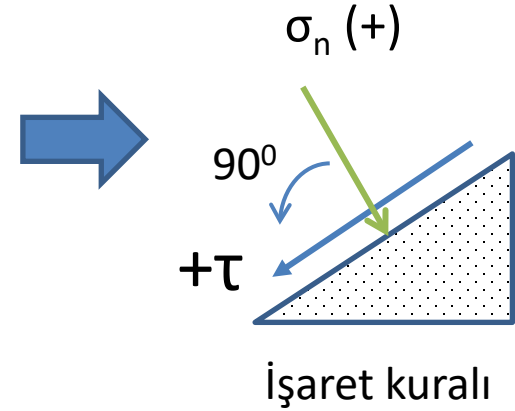
$$\sigma_n = \sigma_1 \cos \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

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

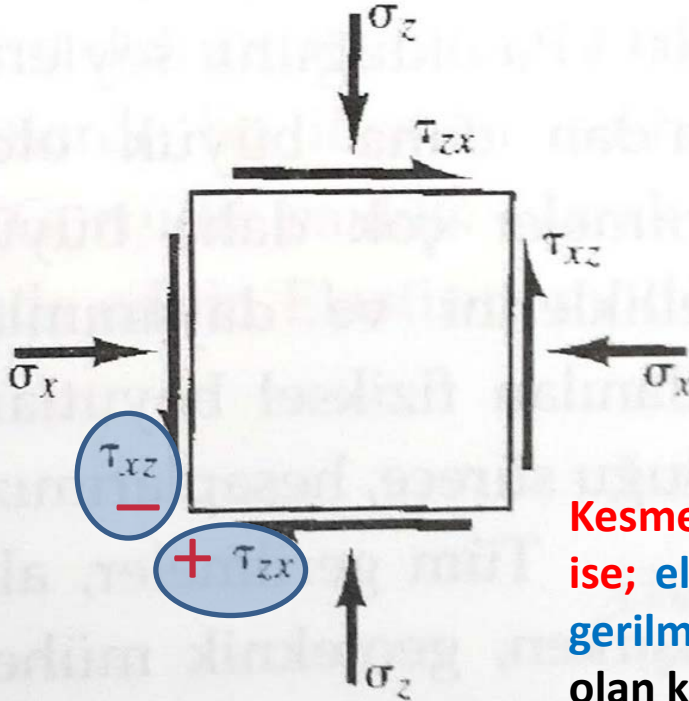
BİR DÜZLEMDE GERİLME; Analitik Gelişme

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)



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

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

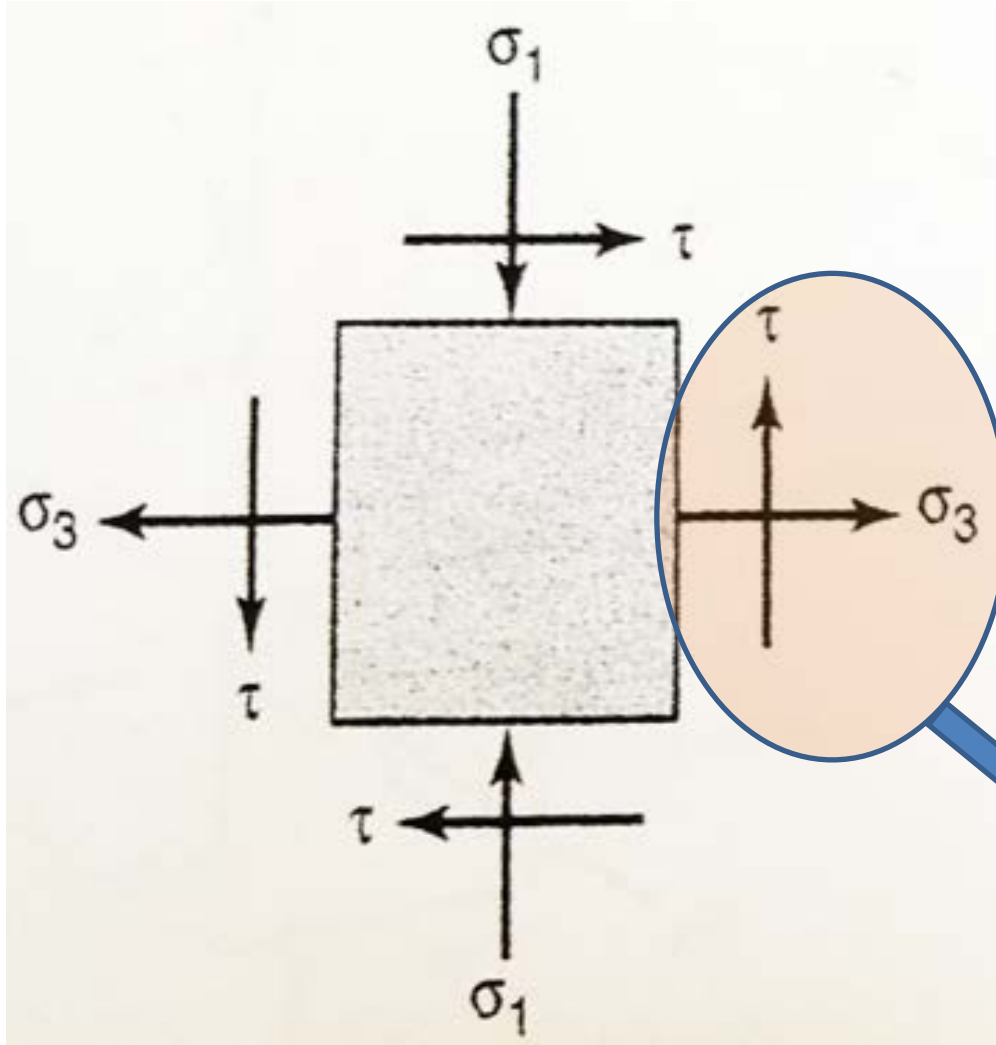
$$\tau_{xy} = -\tau_{xy}$$

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 DÜZLEMDE 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



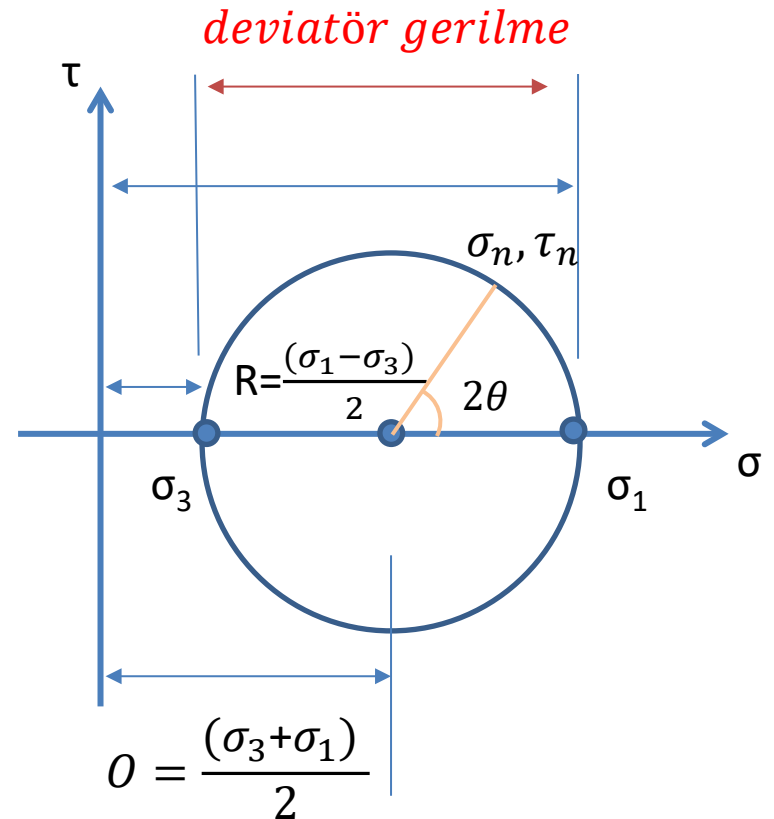
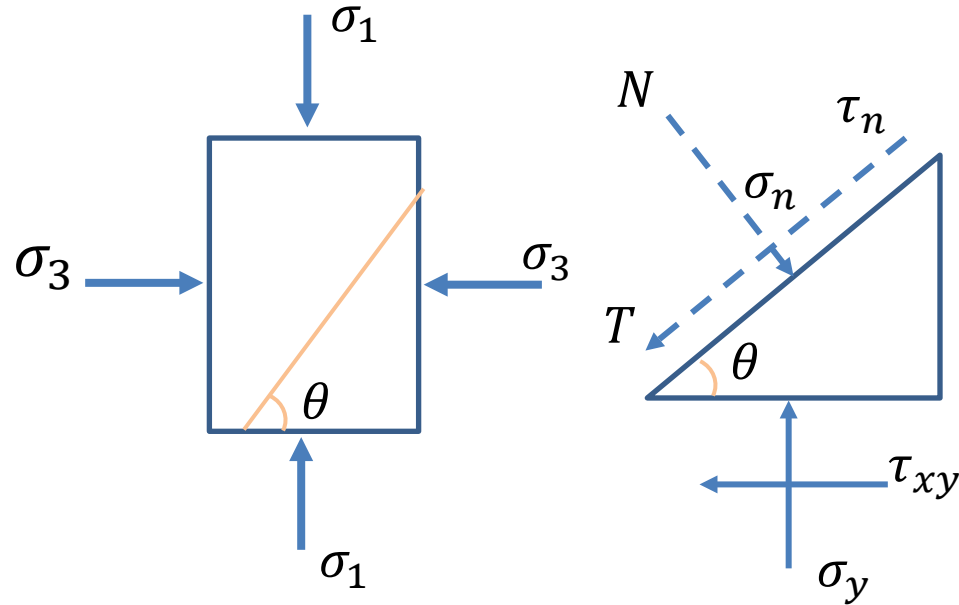
Klasik mukavemet; düşey düzlem normal doğrultudan saat ibrelerinin ters yönünde okun ucunun yukarıda olması ile belirlenir.

Düşey düzlemde gösterilen gerilmeler
- normal gerilme
- kesme gerilmesi

BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesi Prensipleri

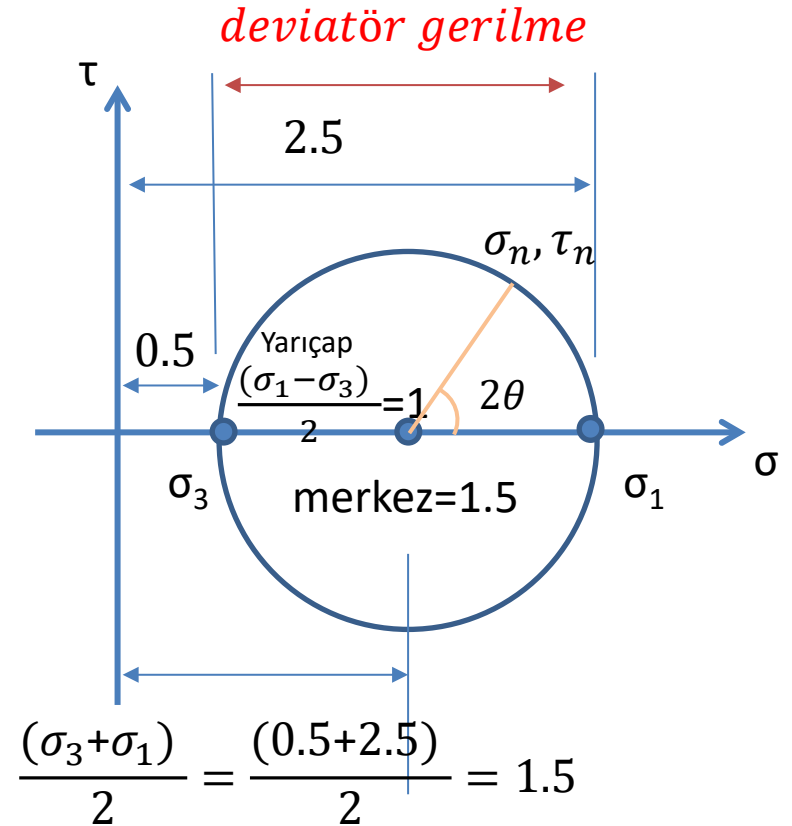
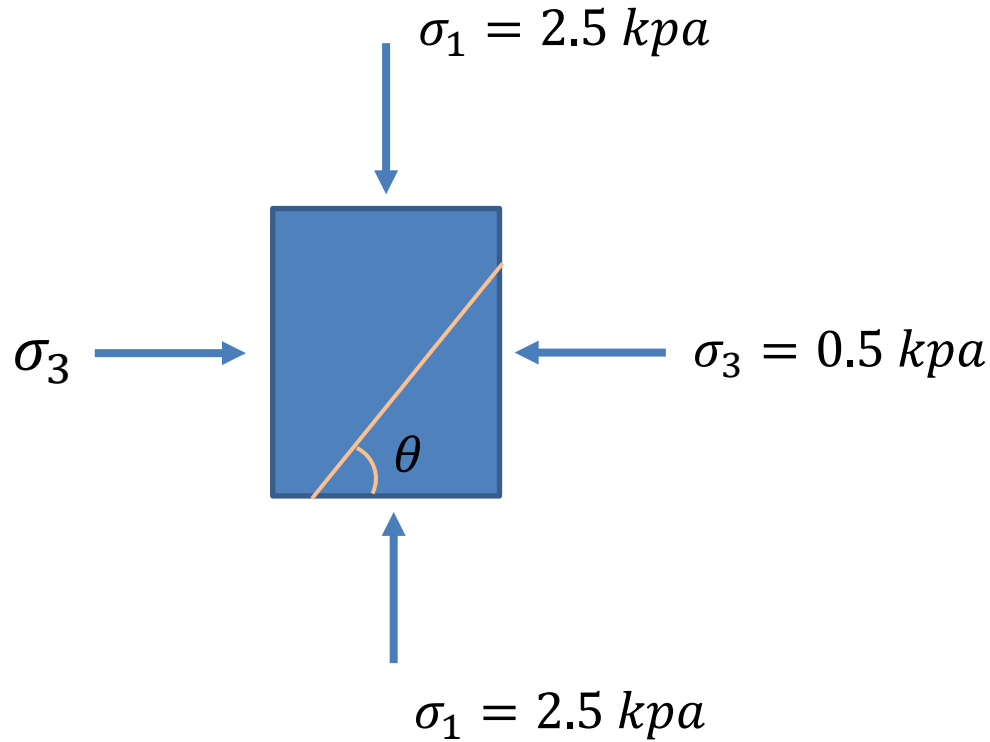
Zemin mekaniğinde pek çok problem iki boyutta incelenir. Bir düzlemdeki gerilme durumu analitik ve grafik (Mohr Dairesi) yöntemler analiz edilebilmektedir. **Mohr dairesi yönteminde yükleme durumunda bir düzlemdeki gerilmeler bilinirken başka bir düzlemdeki gerilmeler hesaplanabilir.** Mohr dairesi yönteminin önemli ve yararlı özelliği de **kutup noktasının** (düzlemlerin başlangıç noktası) belirlenebilmesidir.

Aşağıdaki elemana etki eden gerilme durumu için Mohr Dairesini çizelim.



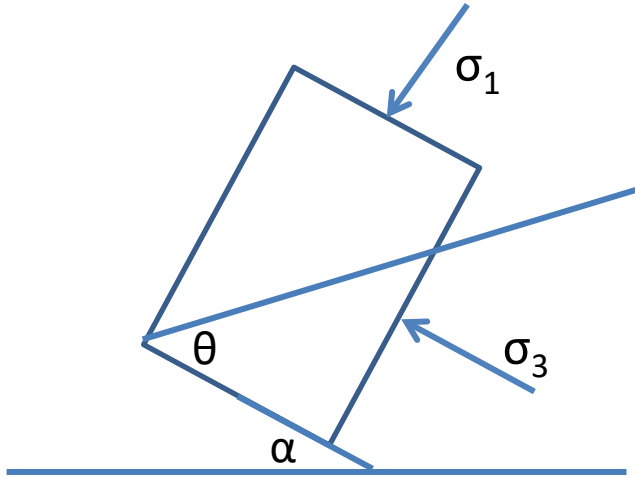
BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesi Prensipleri

Aşağıdaki elemana etki eden gerime durumu için Mohr Dairesini çizelim.

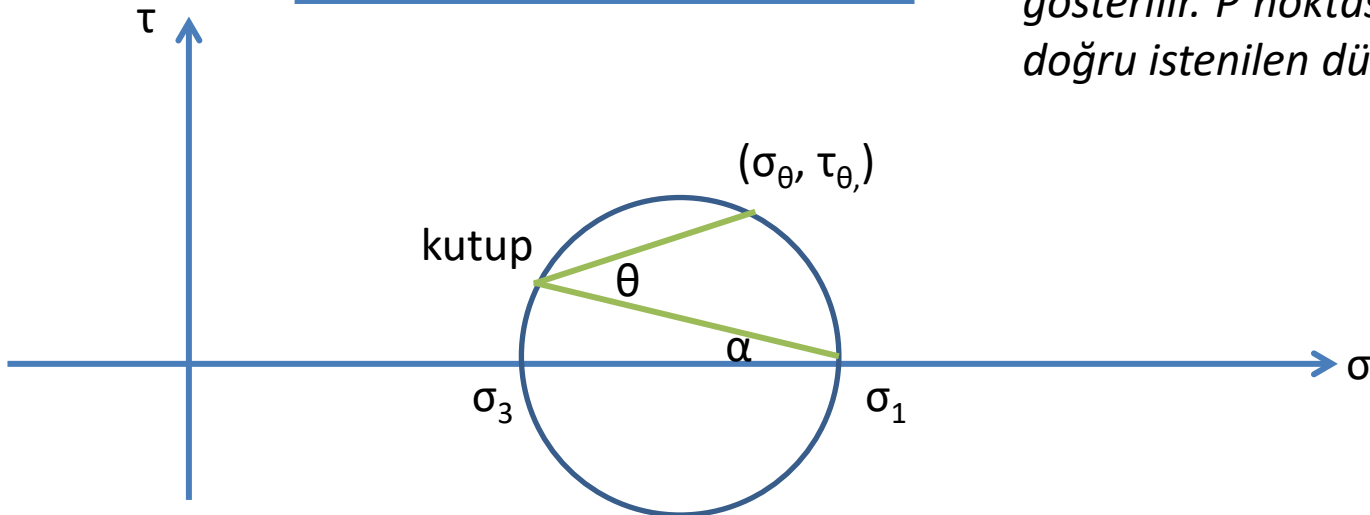


BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesi Prensibi

Asal gerilme düzlemleri yatay ve düşey düzlemlerden farklı düzlemler olabilir. Bu durumda mohr dairesi çizildikten sonra 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.**

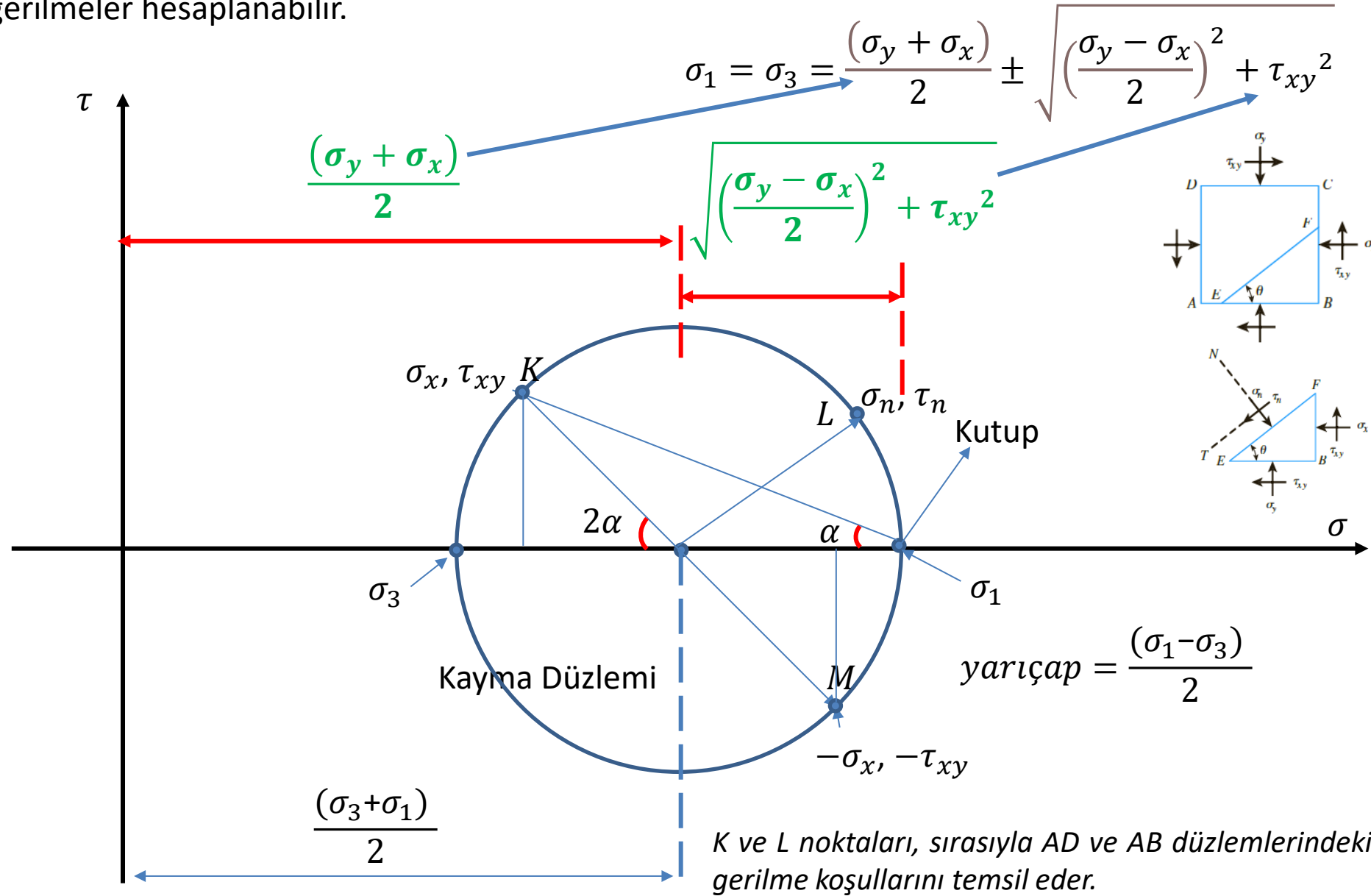


Kutup noktası; ortamdaki bir noktadaki tüm düzlemlerin mohr dairesi üzerinde geçtiği noktadır. Analizi yapılan düzlemin eğimi θ Mohr dairesinde 2θ olarak gösterilir. P noktasında θ eğiminde çizilecek doğru istenilen düzlemdeki gerilmeleri verir



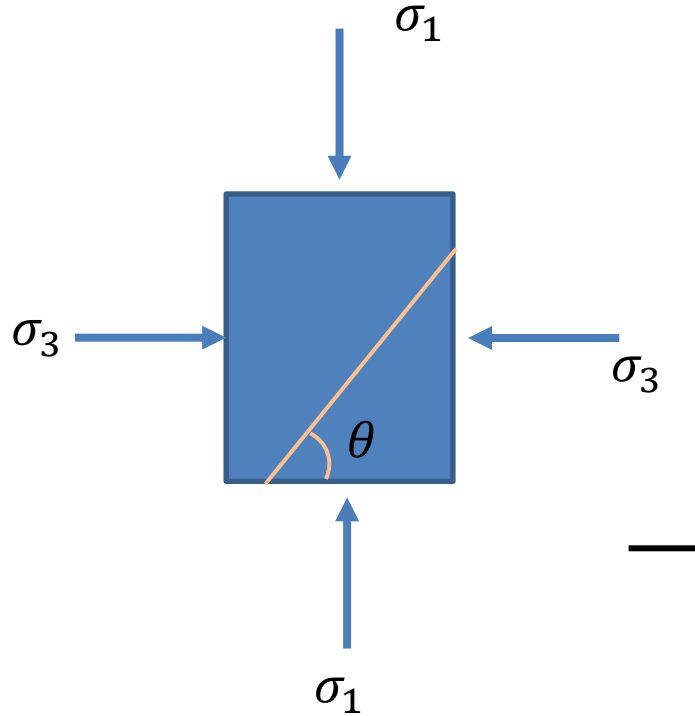
BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesinin Prensibi

Mohr dairesi ile yükleme durumunda bir düzlemdeki gerilmeler bilinirken başka bir düzlemdeki gerilmeler hesaplanabilir.



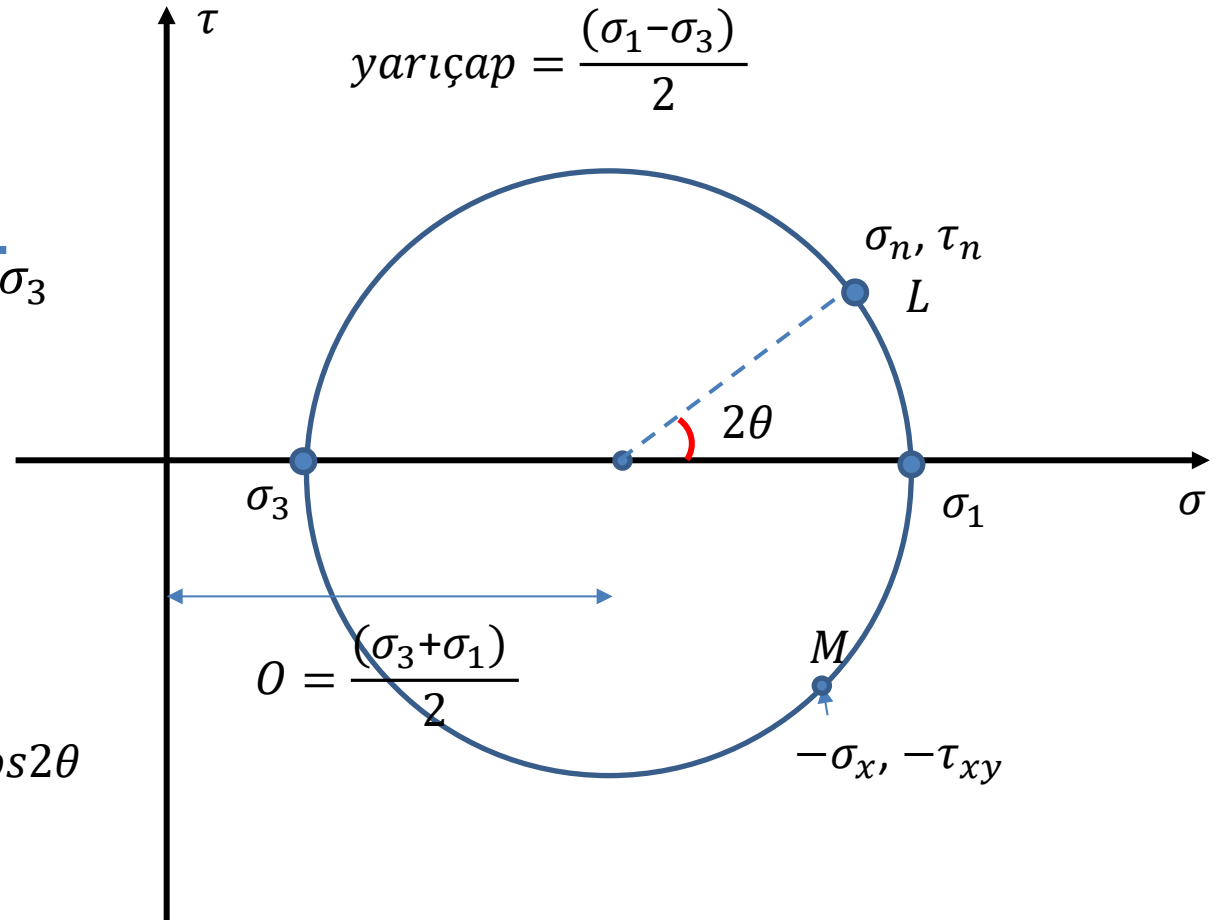
BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesi Prensibi

Mohr dairesi ile yükleme durumunda bir düzlemdeki gerilmeler bilinirken başka bir düzlemdeki gerilmeler hesaplanabilir.



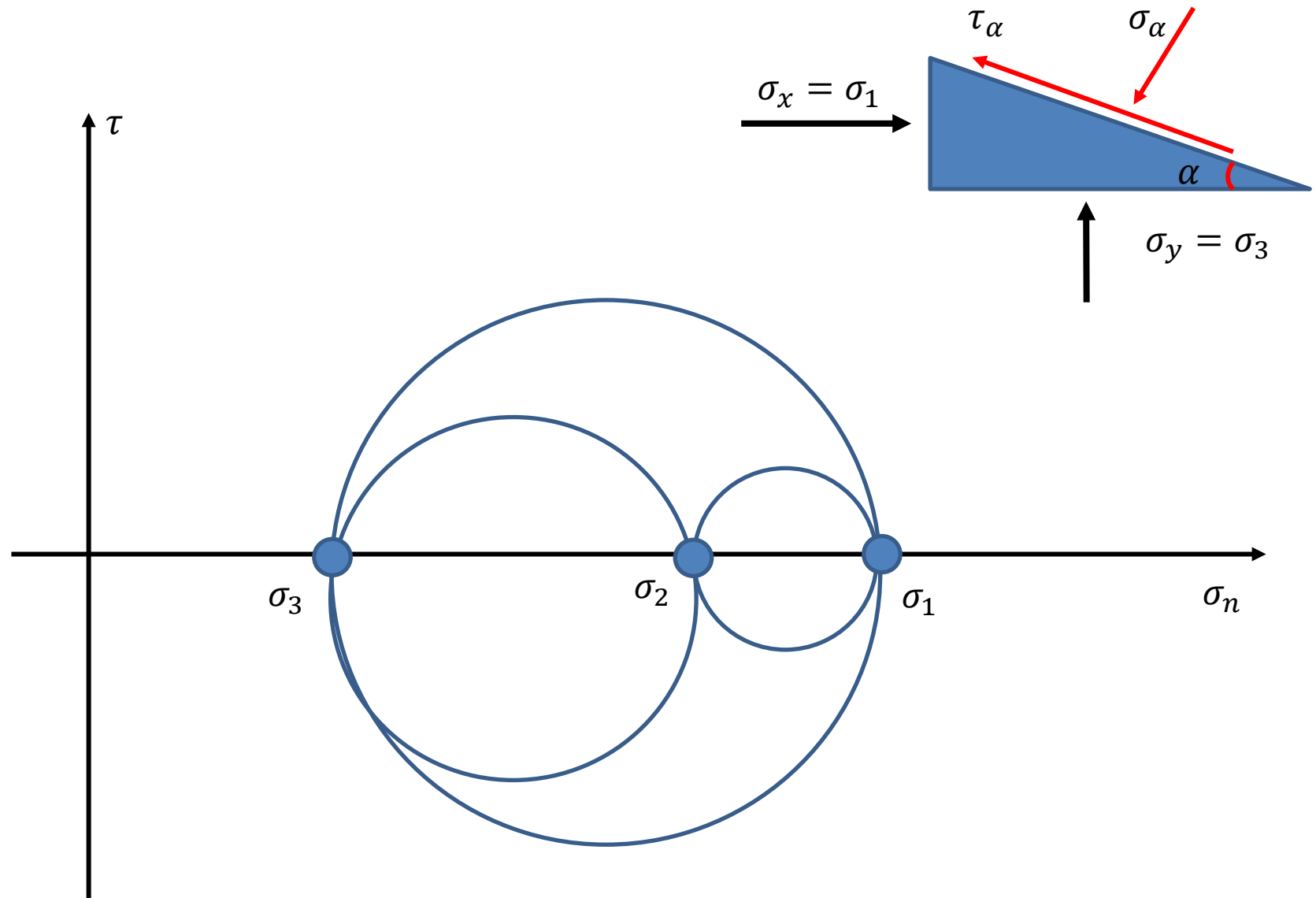
$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos 2\theta$$

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



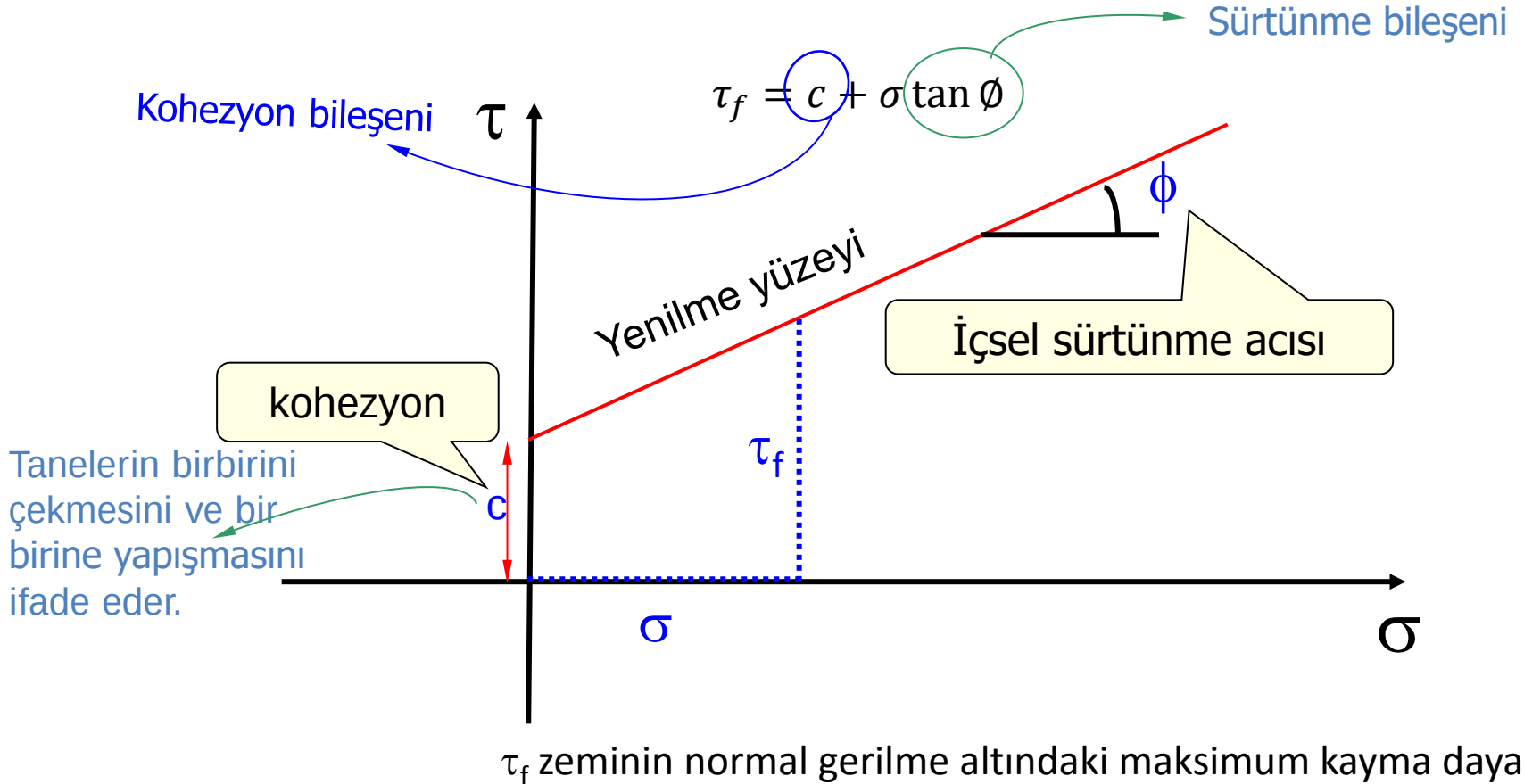
BİR DÜZLEMDE GERİLME; Mohr Dairesi Prensipli

Ortanca asal gerilme



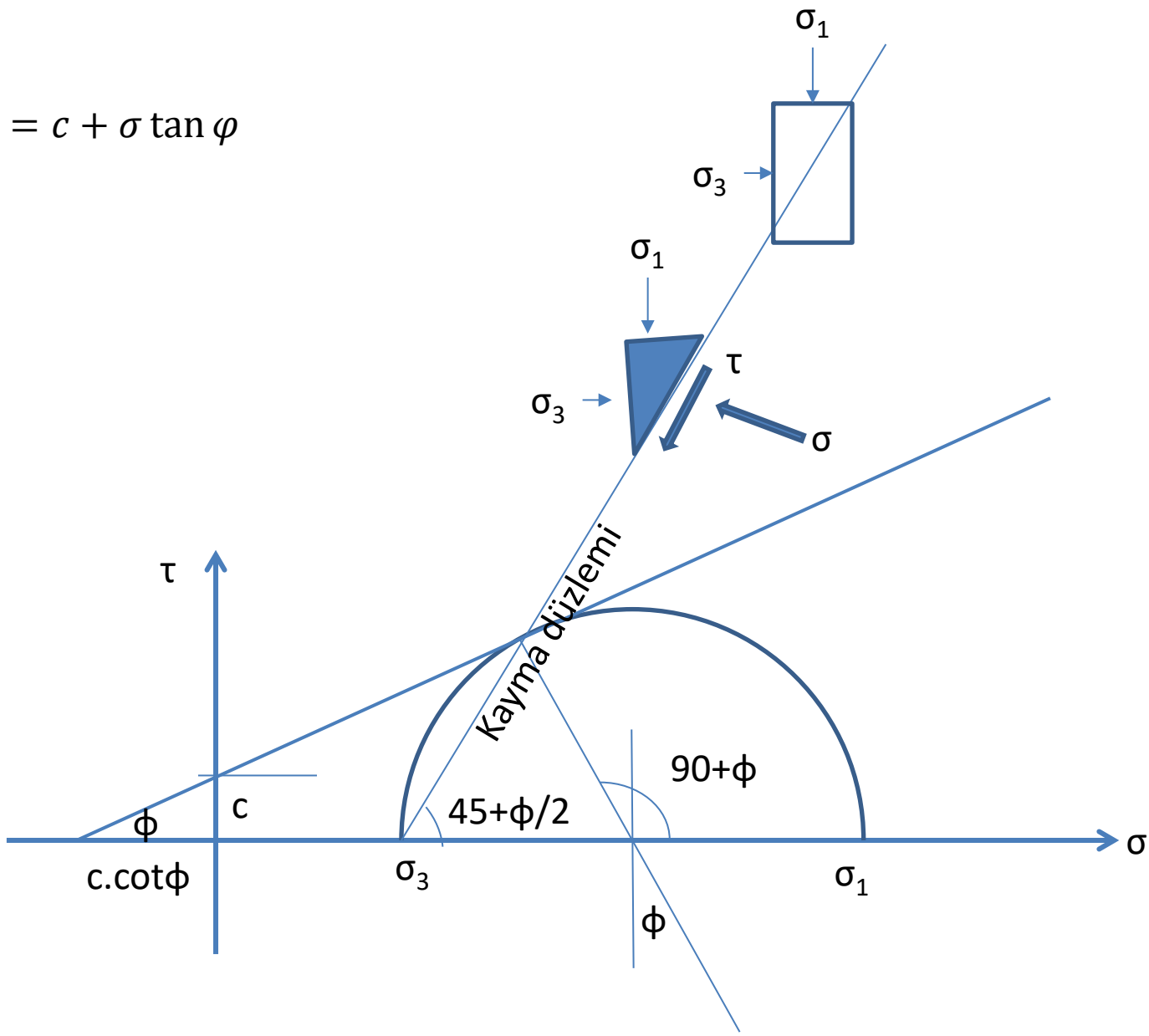
MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Mohr-Coulomb yenilme kriterine göre malzemenin göçmesi için, normal gerilmenin bir fonksiyonu olan kayma gerilmesinin artarak kırılma düzlemindeki kayma gerilmesine eşit olması gerekmektedir. Göçme zarfı olarak nitelendirilen bu eğrinin altında kalan gerilmeler için göçme ortaya çıkmazken, eğer gerilmeler bu eğriye ulaşmışsa göçme meydana gelmektedir. Göçme zarfı bir eğri şeklinde oluşmasına rağmen pratikte bu genellikle bir doğru olarak kabul edilmektedir.



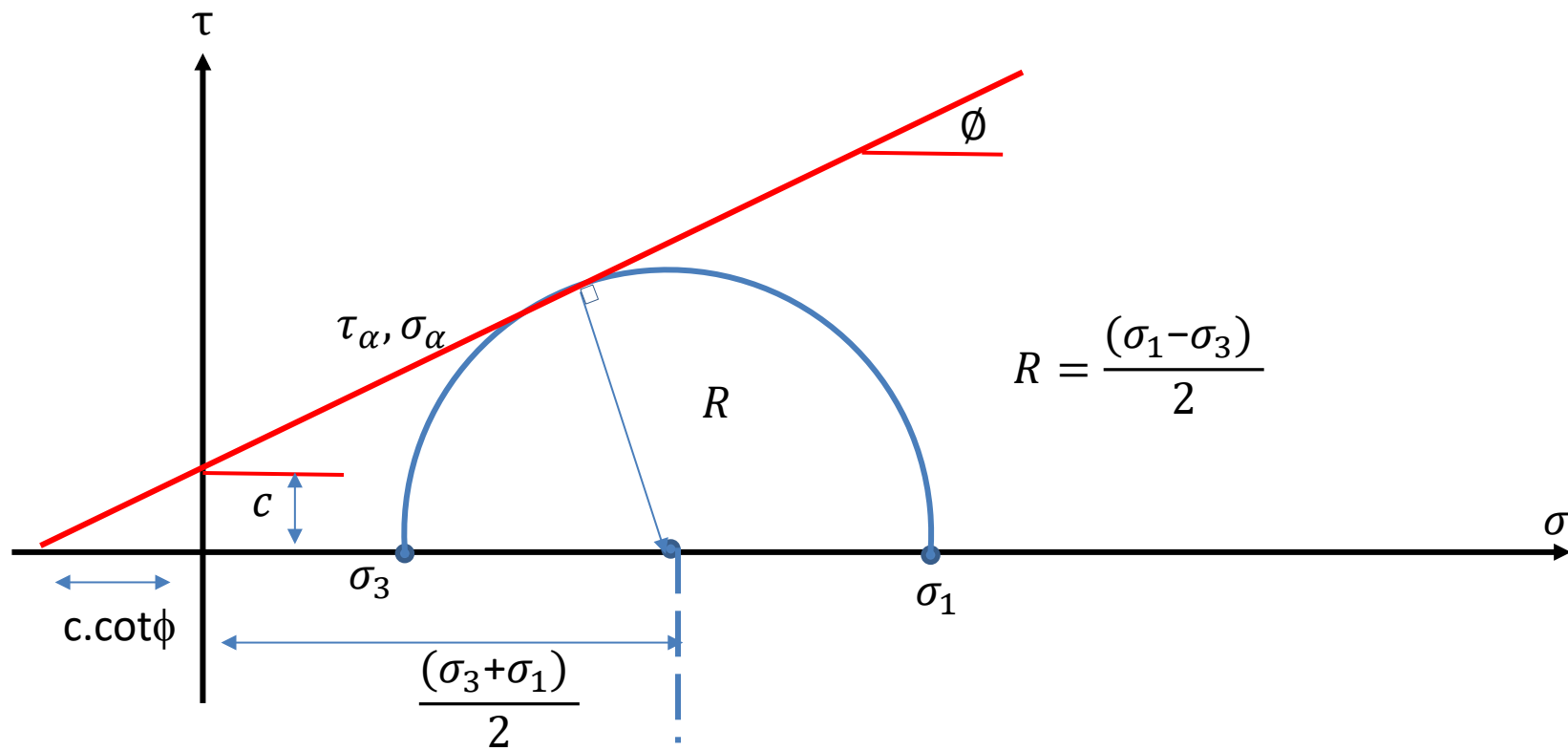
MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

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



MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Mohr-Coulomb hipotezi, asal gerilmeler cinsinden de ifade edilebilmektedir. Göçmeye yol açan asal gerilme değerleri ile zeminin kayma mukavemeti parametreleri arasındaki ilişkiyi trigonometrik bağıntılar şeklinde ifade etmek mümkün olmaktadır.



$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

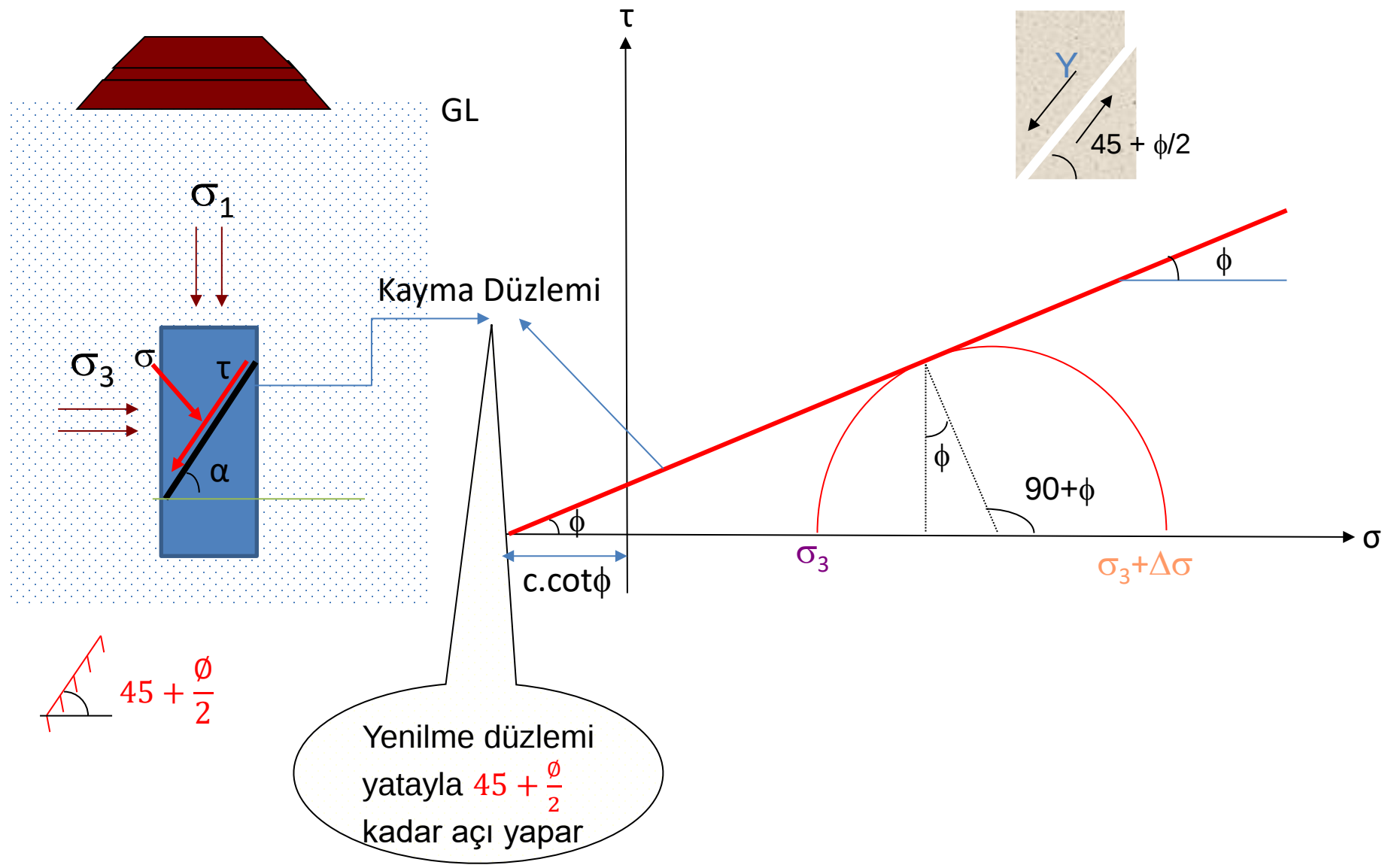
$$\sigma_{3f} = \sigma_{1f} \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

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

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

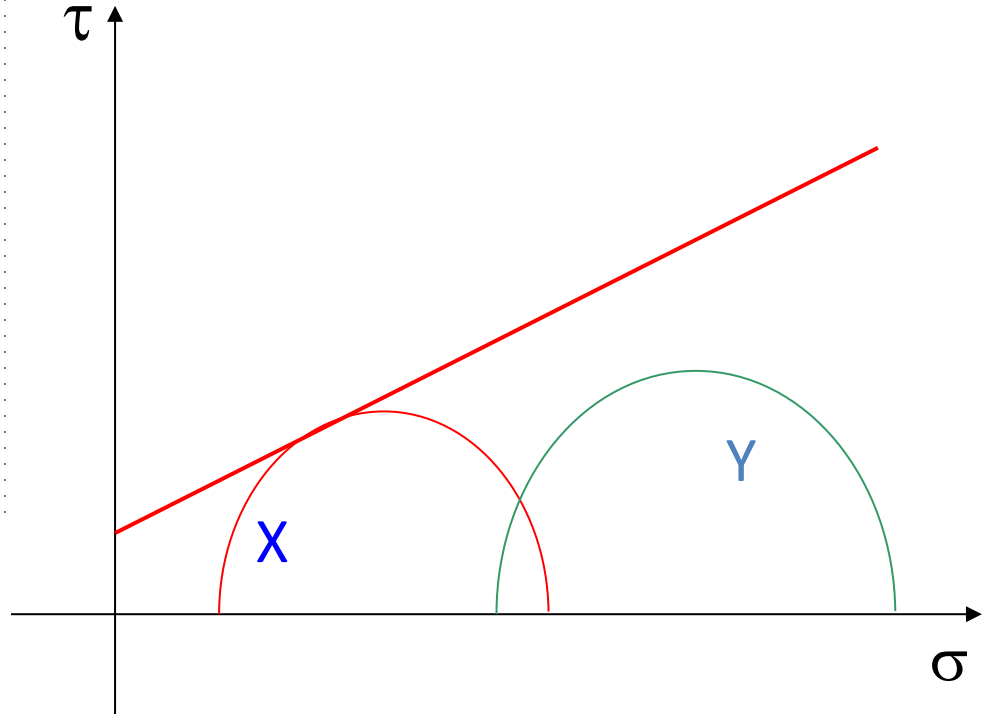
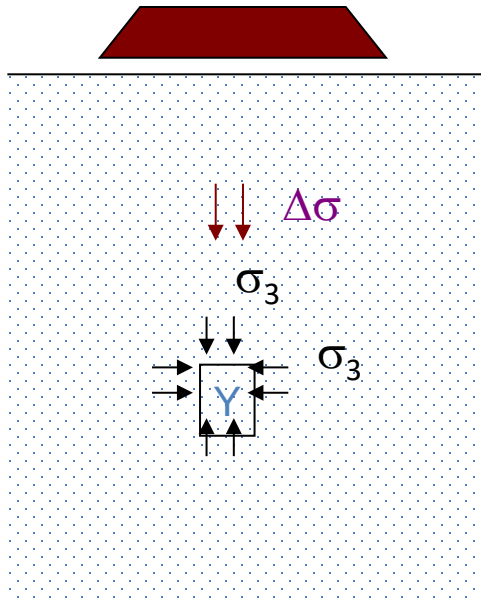
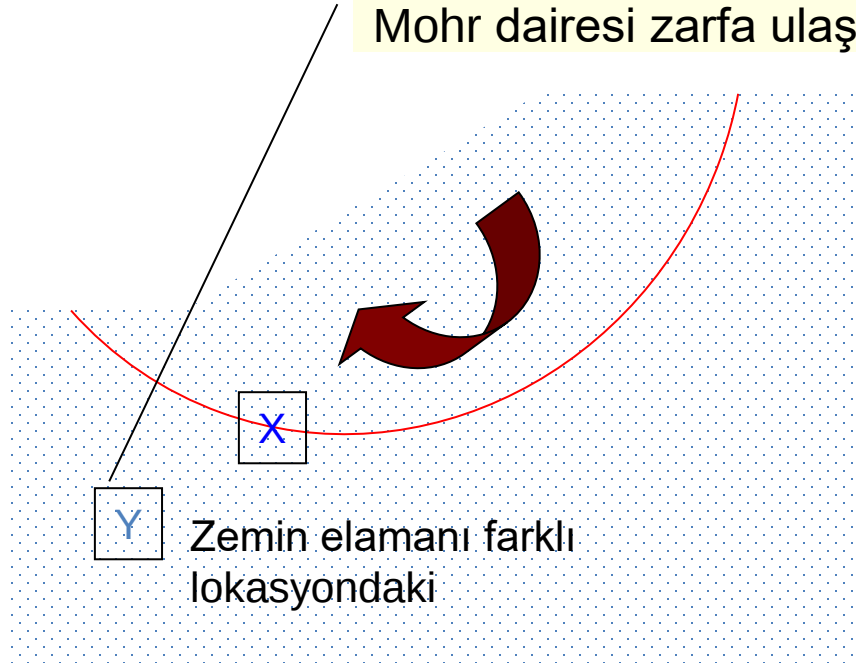
MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Kayama düzleminin asal düzlemle yaptığı açı



MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Mohr dairesi zarfa ulaşmaz ise zemin bileşeni yenilmez

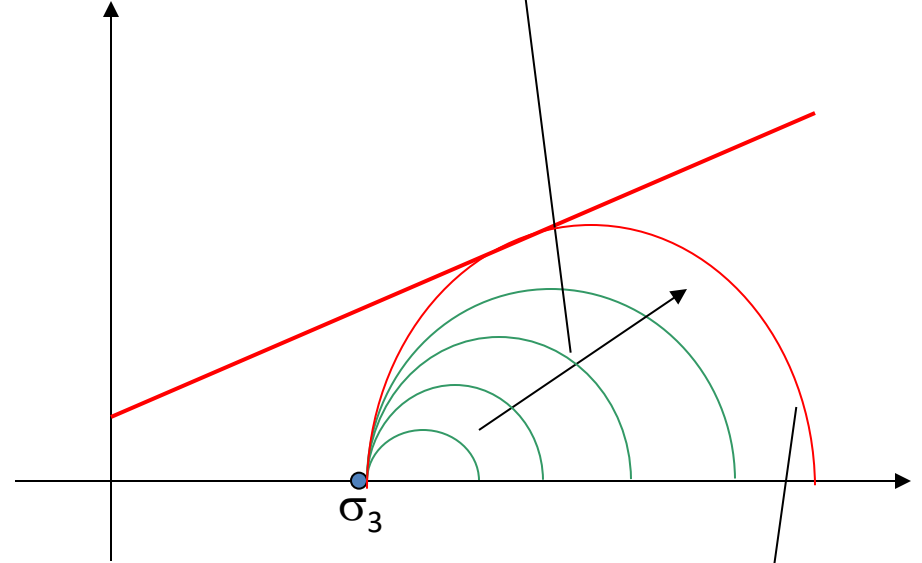
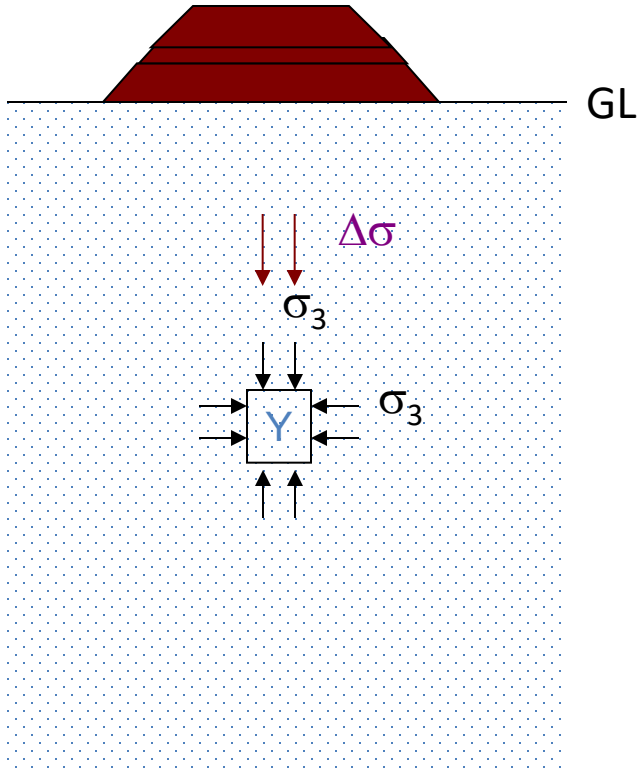


X ~ yenilme

Y ~ sağlam

MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Yüklemeye arttırıldığında Mohr dairesi büyür...



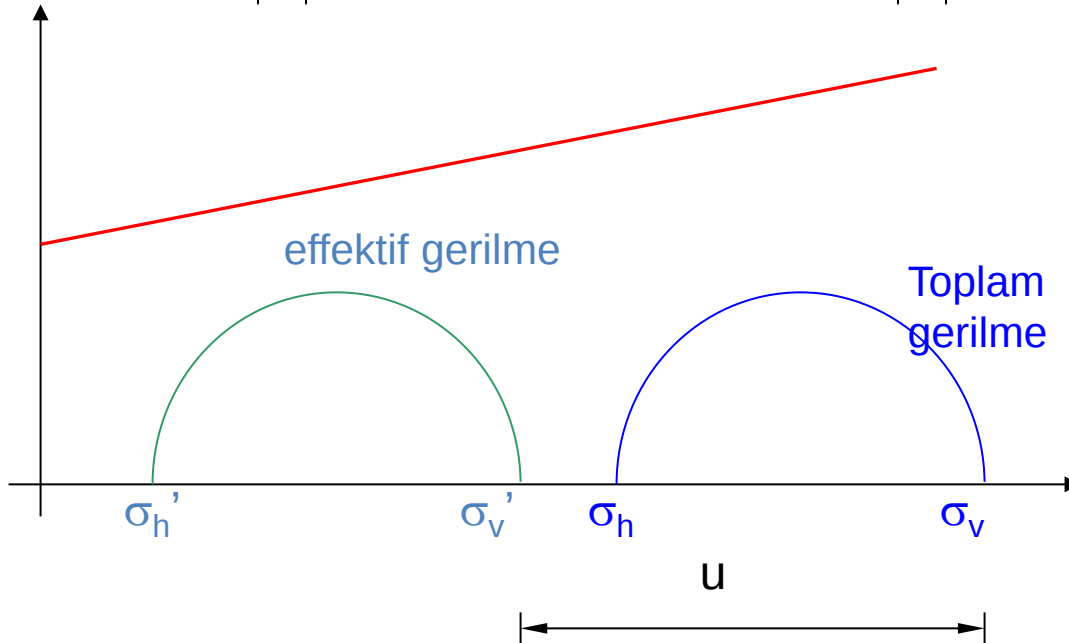
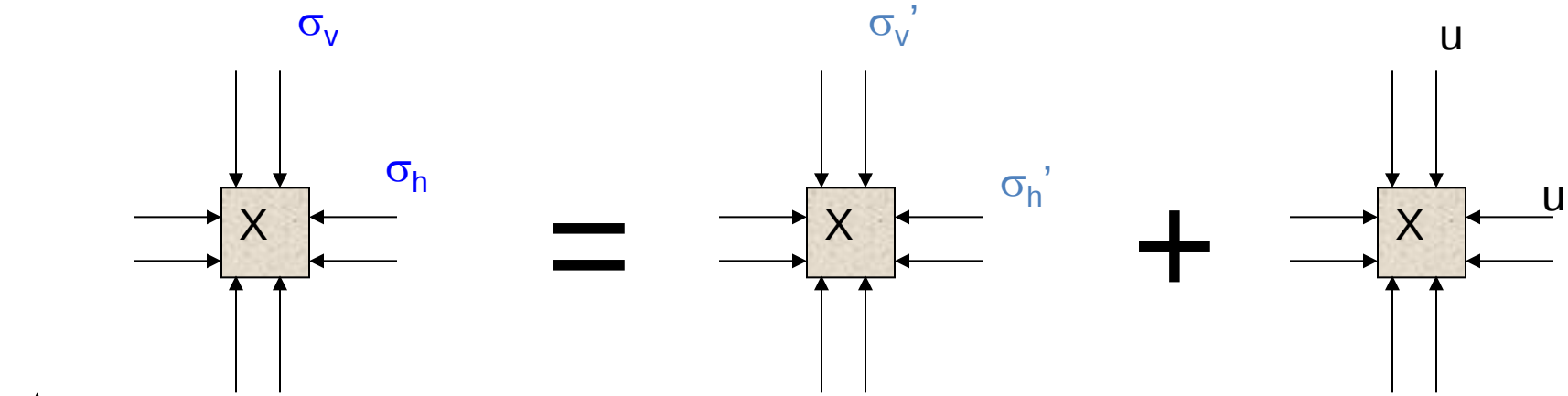
..ve sonrasında Mohr dairesi zarfa ulaştığında yenilme gerçekleşir.

MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

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

Mohr dairesindeki σ ve σ'

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



Normal yüklenmiş killerde efektif gerilmelere göre değerlendirme yapılması durumunda

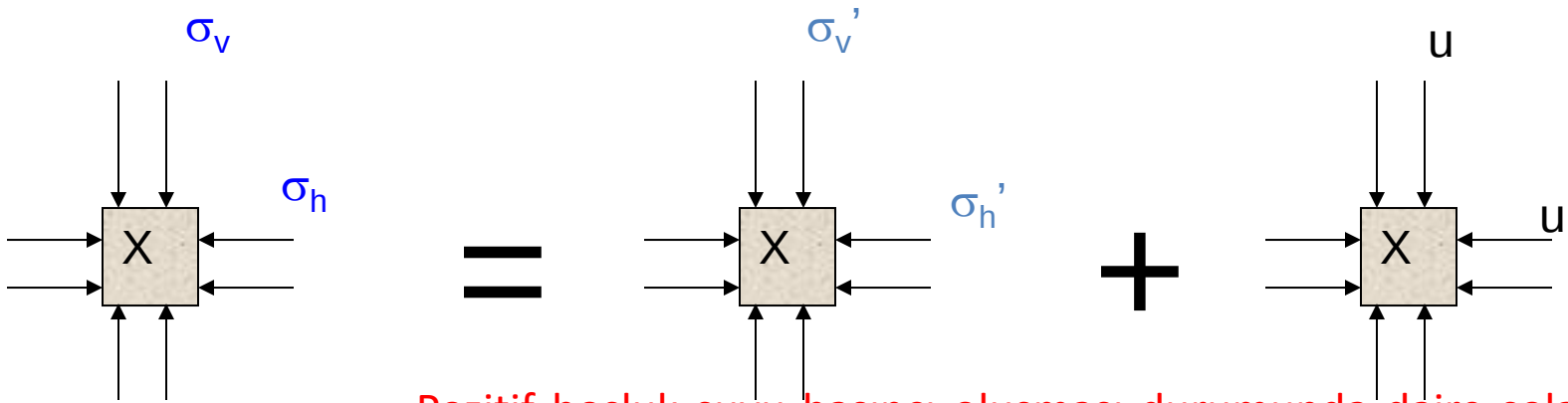
$$c' = c_{cu} = c_d = 0$$

Aşırı konsolida killerde;

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

MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Mohr dairesindeki σ ve σ'



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



MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

Sürtünme Kavramı

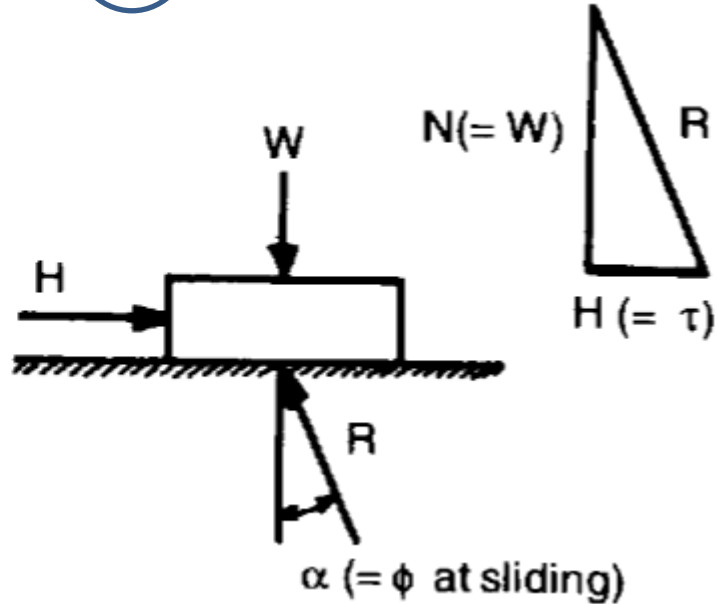
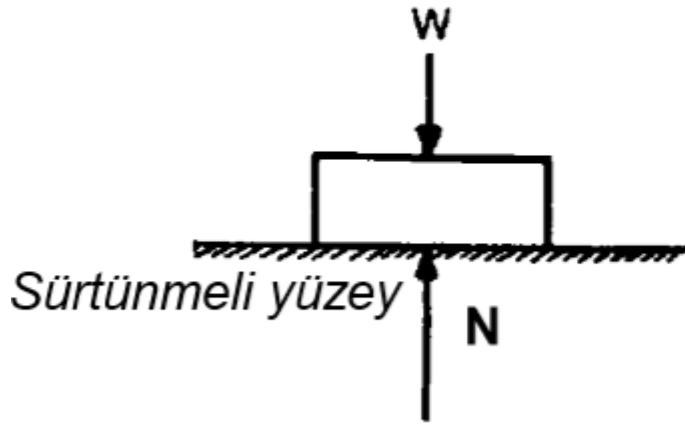
Kaymaya karşı koyan kuvvet düşey kuvvet ile sürtünme katsayısının çarpımına eşittir. *Yüzeyler arasındaki pürüzlülük arttıkça sürtünme direnci artacaktır.

*Cismin ağırlığı arttıkça sürtünme direnci artacaktır.

Zeminlerin göçmesinde, kayma direncinin aşılması genelde daha etkindir. Kayma direnci sürtünme ve kohezyon parametrelerinden oluşur.

Sürtünme Katsayısı

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



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

MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

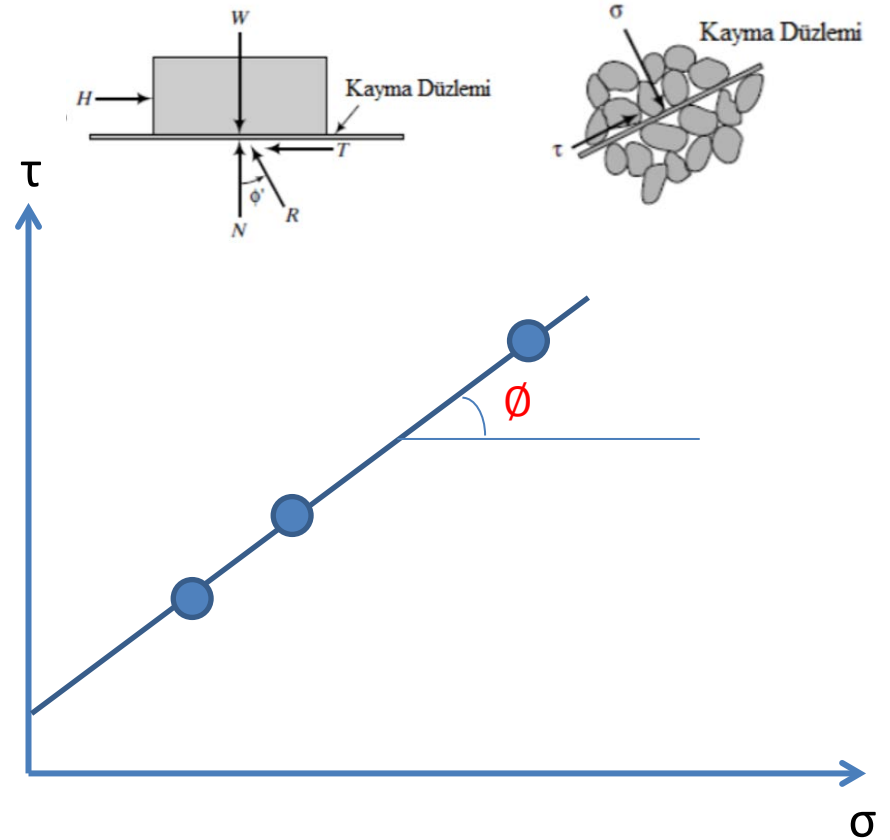
Sürtünme Kavramı

İtilen blok üzerinde klasik sürtünme olayını açıklamak daha kolaydır. Zeminin heterojen yapısı nedeniyle zemin taneleri arasında gerçekleşecek sürtünme olayını açıklamak ise daha karmaşıktır. Çünkü zemin blok gibi düzgün bir sürtünme yüzeyine sahip değildir. Dolayısıyla sürtünme olayı taneler arasında gerçekleşmektedir.

Geoteknik Mühendisliği bu olayı açıklamak için zemin yapısını göz önünde bulundurarak sürtünme katsayısı yerine **İçsel sürtünme açısı** kavramını geliştirmiştir. Bunun içinde aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

Taneli zeminler içsel sürtünme açısına göre yığın oluştururlar ve bu açı içsel sürtünme açına eşittir.

$$\phi = \tan^{-1} \mu \leftrightarrow \mu = \tan \phi$$



MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

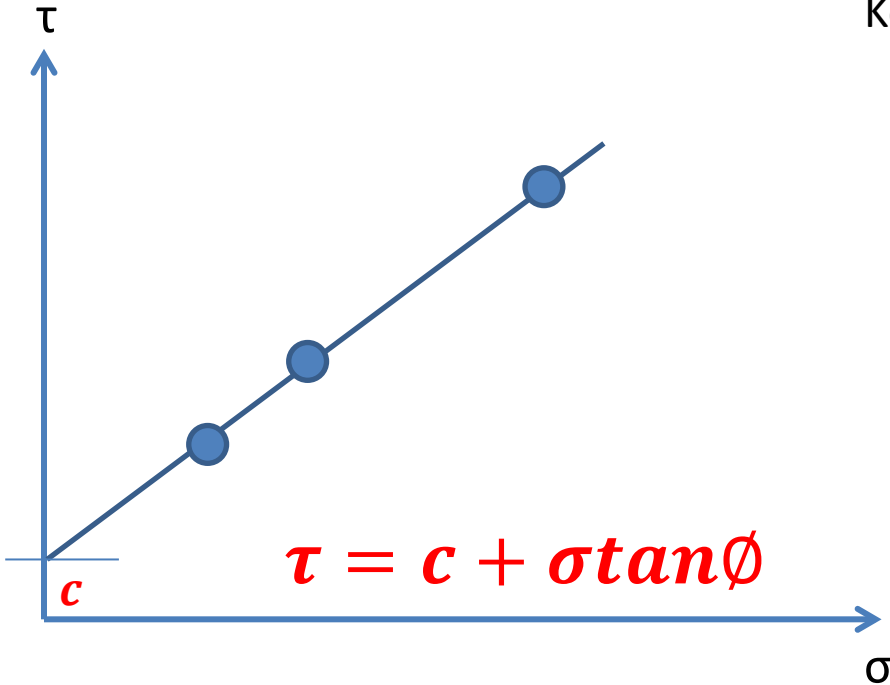
Kohezyon Kavramı

Zemin mekaniği açısından kohezyon (c), sistemde normal gerilme olmasa dahi zeminin kesme etkisine direnci olarak tanımlanmaktadır.

Hatırlatma!

Adezyon; farklı cisimler oluşan bağ

Kohezyon; aynı moleküller arasında oluşan bağ



Zeminlerde adezyon ve kohezyon kavramlarını aynı ortamlarda meydana geldiği için ayrı düşünmek oldukça zordur.

Zemin tanelerine yapışan su adezyon nedeniyle yapışmakta ve taneleri bir arada tutmaya yardımcı olmakta ancak zemin taneleri ise başta çimentolama olmak üzere elektriksel çekim etkileri, negatif boşluksuyu basınçları, tane kenetlenmesi gibi etkilerle bir arada olmalarını kuvvetlendirmektedir.

Lastik ayakkabıyla çamurda yürümeye çalışınca çamur, lastik ayakkabıya adezyon nedeniyle yapışacak ve diğer etkilerle topaklaşacak ve ayakkabı altında birikinti oluşturacaktır.

MOHR-COULOMB GÖÇME KRİTERİ

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.

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 sürtünmeli malzeme	Tabakalı halde bulunan veya aşırı konsolide zeminler
Mohr-Coulomb (1911)	Kayma düzleminde sürtünmeden, maksimum efektif gerilmeden ileri gelen kayma	Rijit ve sürtünmeli malzeme	Drenajlı koşullarıda 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, sürtünmeli 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)	$\sigma_1 = \sigma_t(\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0)$ $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_6(\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0)$

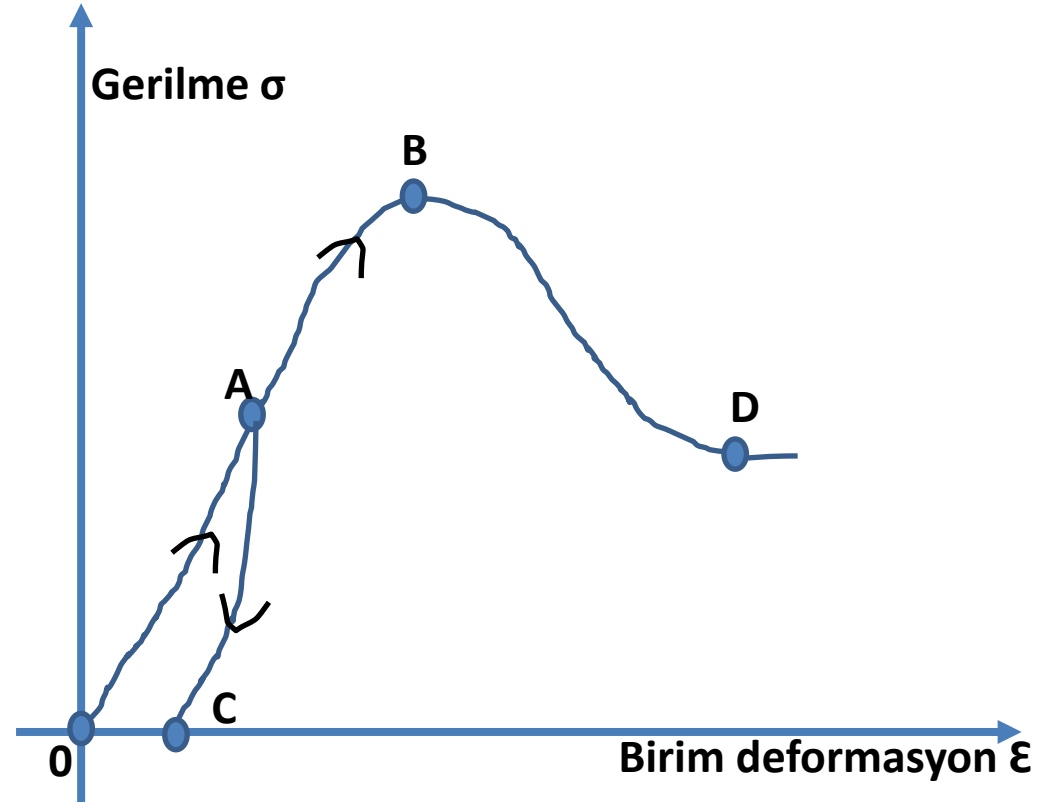
σ_t = Malzemenin çekme dayanımı
k= denklem değişmezi

ZEMİNLERİN GERİLME – 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 nedenledir 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.**

Zeminlerde gerilme deformasyon ilişkisi hiçbir zaman lineer ve elastik değildir. Zemin a noktasına kadar yüklenir (OA), daha sonra yük geri alınırsa (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.



ZEMİNLERİN GERİLME – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

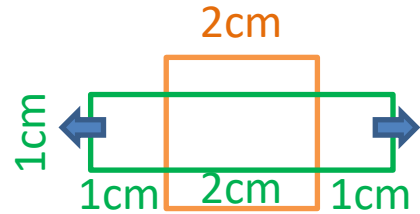
Poisson oranı

Poisson oranı yükleme doğrultusuna dik (enine) şekil değiştirmenin yükleme doğrultusundaki (boyuna) şekil değiştirmeye oranı olarak tanımlanır. Elastik malzemelerin kuvvet altında uğrayacağı deformasyonlar hakkında bilgi veren önemli bir sabittir. Zeminlerde malzemenin suya doygunluğunu hakkında bilgi verebilir. Poisson sabiti 0,5 e yakın malzemelerin suya doygunluğu yüksektir ve sıkıştırılabilirliği yok denecek kadar azdır. Sıvıların poisson oranı sıkışamaz malzeme olduğu için teorik olarak tam olarak 0,5'tir.

Poisson oranı 0,5 olan bir malzeme için sıkıştırılamaz ve bu nedenle de bu kuvvet altında hacim değişikliğine uğramazlar denilebilir. Hiçbir katı malzemenin poisson oranı 0,5 olamaz. 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 GERİLME – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Poisson oranı

Zemin Cinsi	E(kPa)	ν
Yumuşak killler	1400-4200	0.35-0.45
Orta katı killler	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 GERİLME – 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

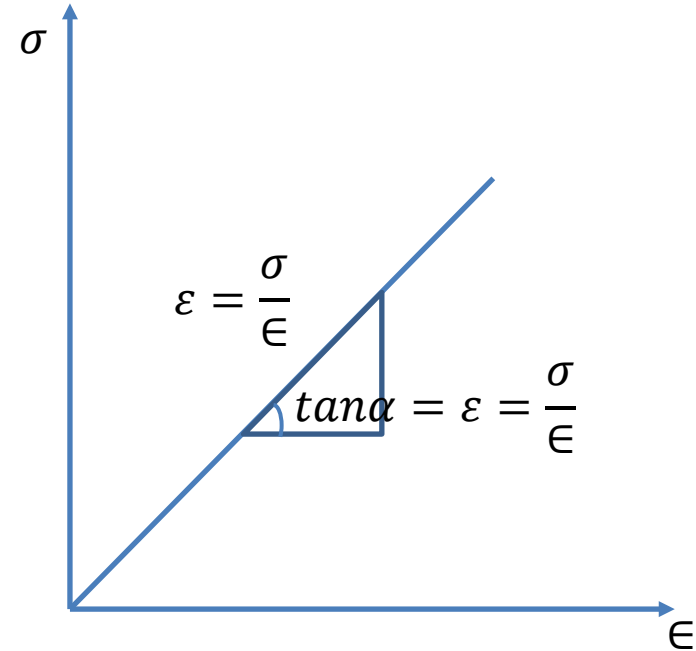
ZEMİNLERİN GERİLME – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Elastisite Modülü

İdeal elastik malzemenin gerilme-şekil değiştirme diyagramının eğimi elastisite modülü (Young Modülü) ile tanımlanmaktadır.

Doğal etkenlerle oluşan, taşınma ve birikme gibi olaylar sonucu meydana gelen zeminler, genellikle heterojen ve anizotrop bir yapı göstermektedirler. Ancak kimi kabuller ve 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.

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 GERİLME – DEFORMASYON İLİŞKİSİ

Elastisite Modülü

Kaya	Yer	ρ yoğunluk (g/cm³)	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
Çakıtaşı	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
Kuvarsit	Minnesota	2,75	84,8	629,0	23,4
Kuvarsit	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

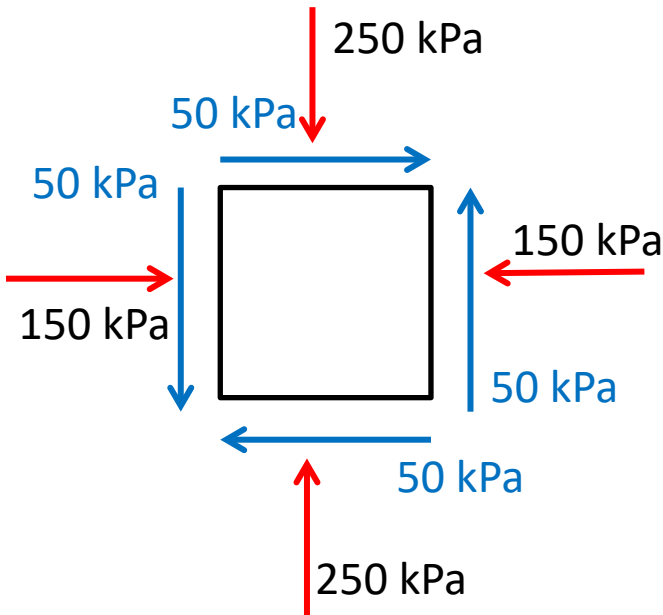
$$1000 \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ MPa}$$

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

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.

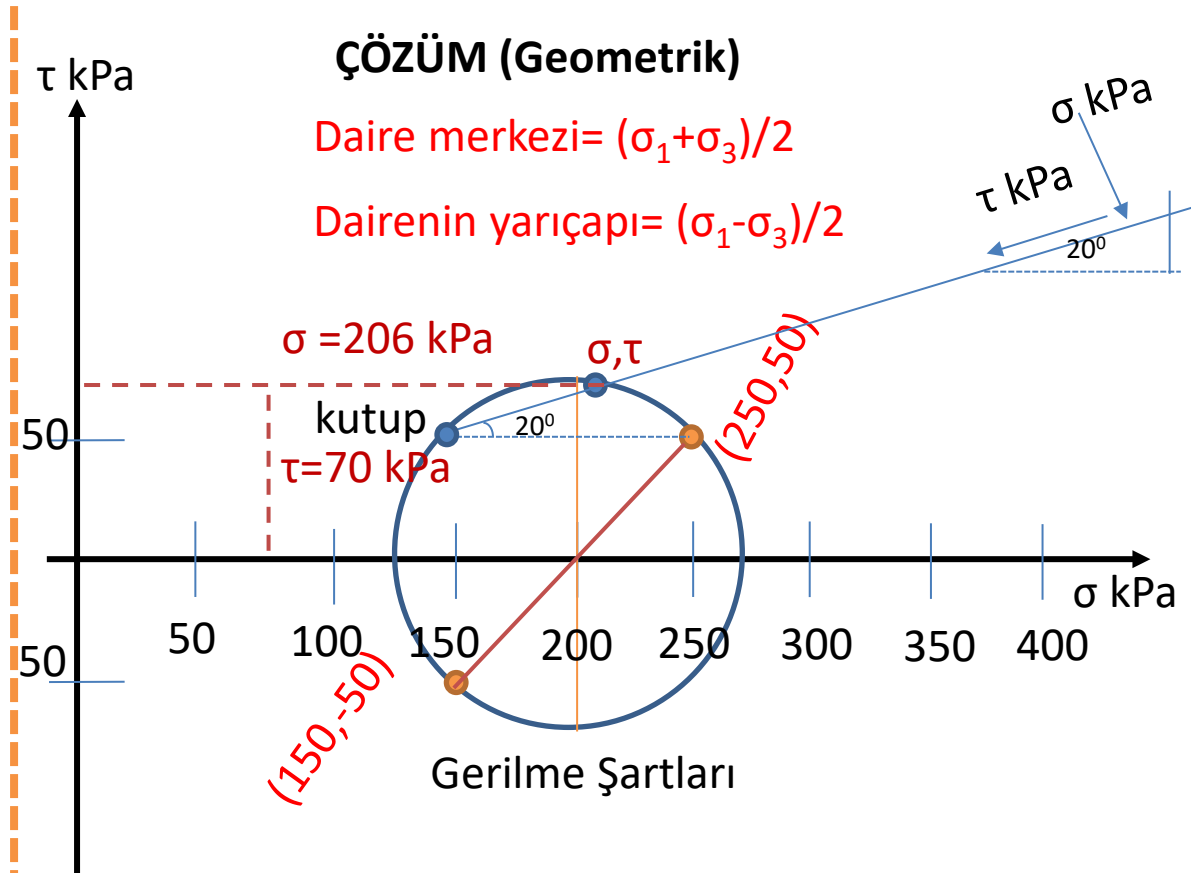
SORU



ÇÖZÜM (Geometrik)

Daire merkezi= $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$

Dairenin yarıçapı= $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$



Analitik

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

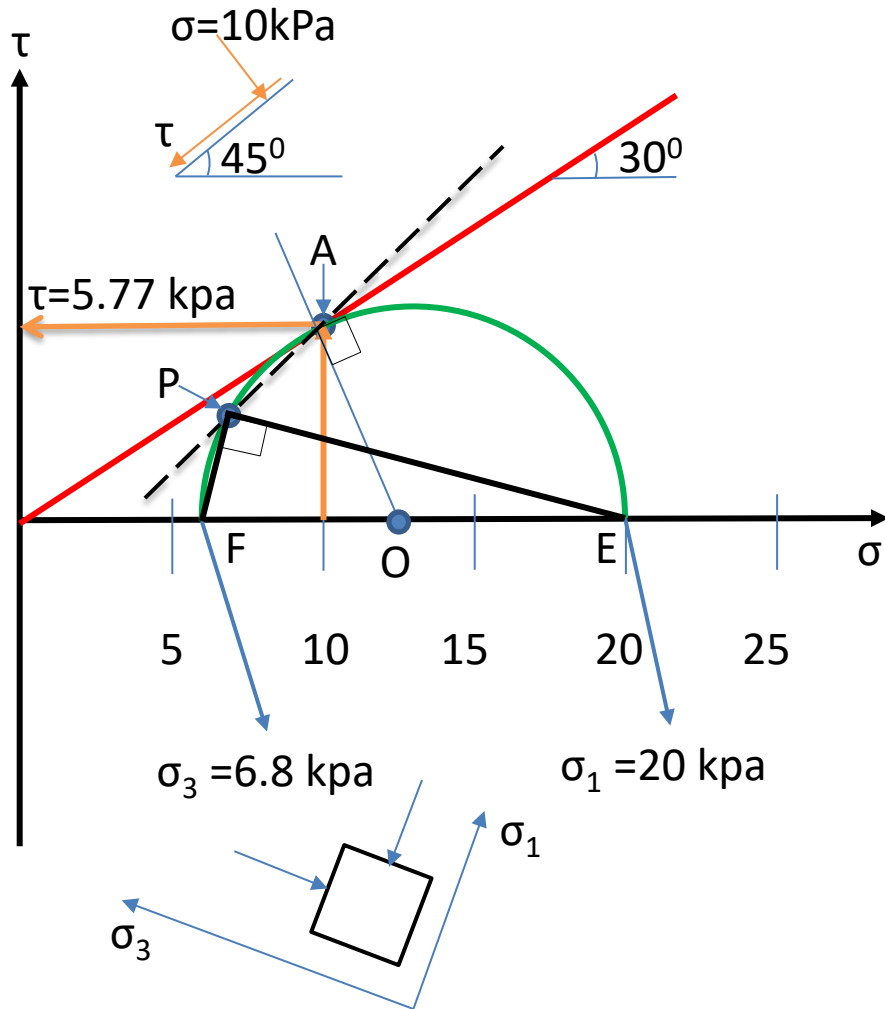
$$\tau_n = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \ggggg \frac{250 - 150}{2} \sin 40 - (-50) \cos 40$$

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

- Yenilmedeki kayma gerilmesini
- Zemin elemanındaki asal gerilmelerin büyüklüğünü ve yönünü bulunuz.

ÇÖZÜM

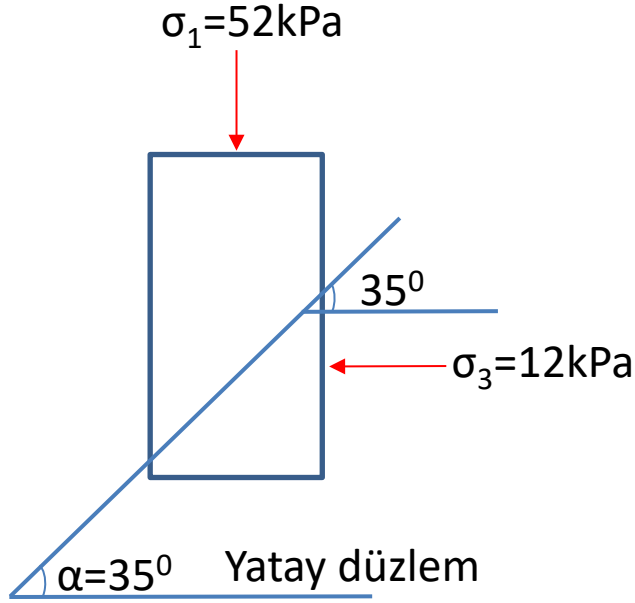


- X ekseninde $\sigma=10$ kpa'dan yenilme zarfını kesene kadar bir çizgi çizilerek A noktası bulunur. **Elde edilen noktadan $\tau=5.77$ kpa bulunur.** Aynı sonuç yenilme zarfı denkleminde de elde edilir.
- Mohr dairesi yenilme zarfına teyet olacaktır. Teyet noktası A olacaktır. Bu noktadan yenilme zarfına 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.**
- 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 ve PF çizilir.

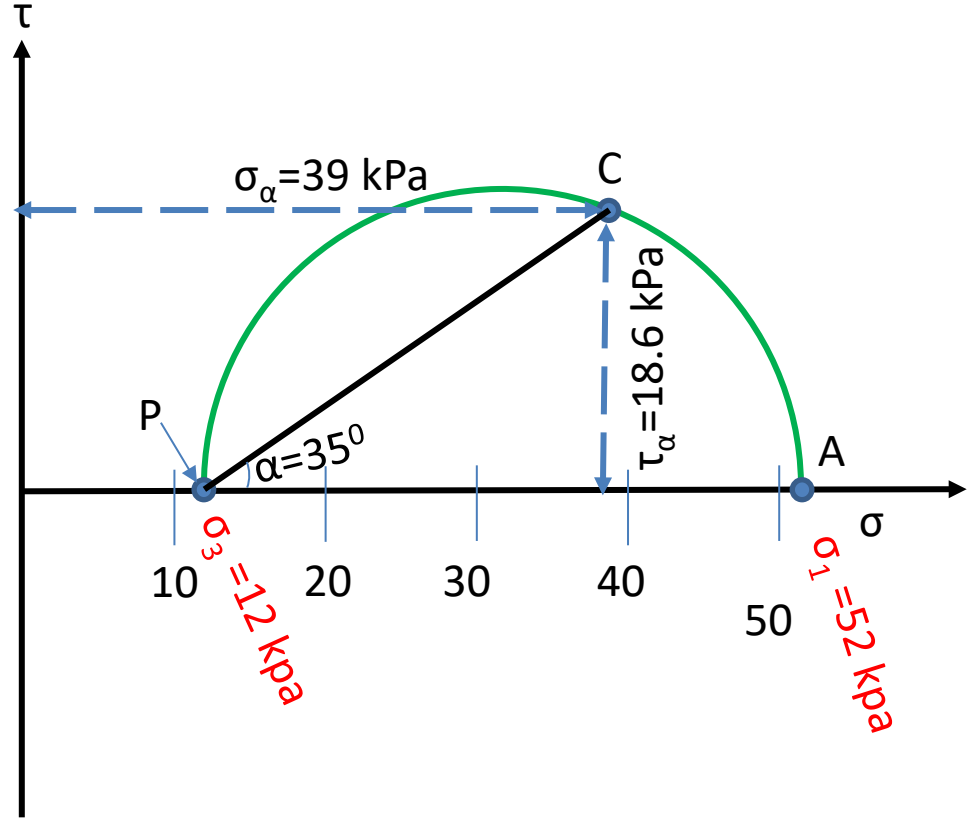
ÖRNEKLER

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

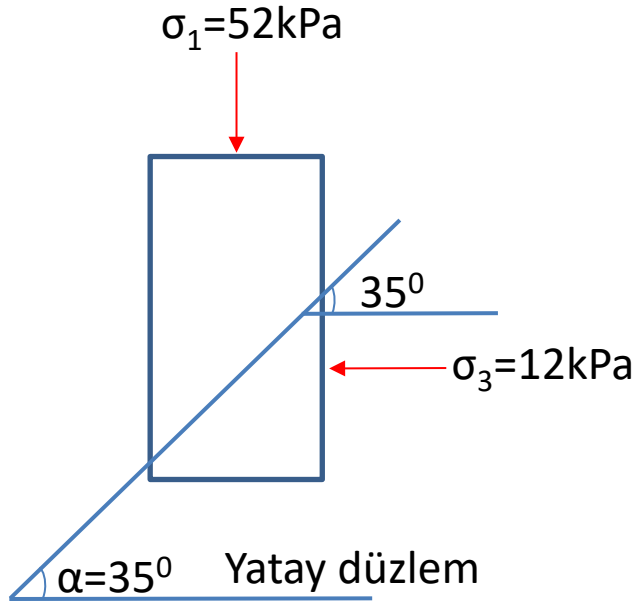


1. Ölçekli olarak Mohr dairesi çizilmeli; (Daire merkezi= $(\sigma_1 + \sigma_2)/2 = 32\text{kPa}$; Dairenin yarıçapı= $(\sigma_1 - \sigma_2)/2 = 20\text{kPa}$
2. σ_1 'in etkidiği yatay düzlemden yola çıkarak kutup noktası (P) bulunur. Kutup noktasından $\alpha=35^\circ$ eğimli doğru çizilerek aranılan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



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

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

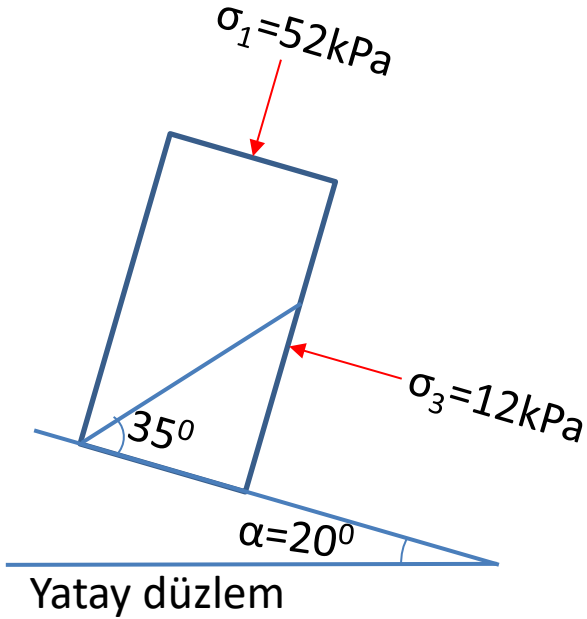
$$\sigma_\alpha = \frac{52 + 12}{2} + \frac{52 - 12}{2} \cos 2(35) = 38.840 \text{ kPa}$$

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

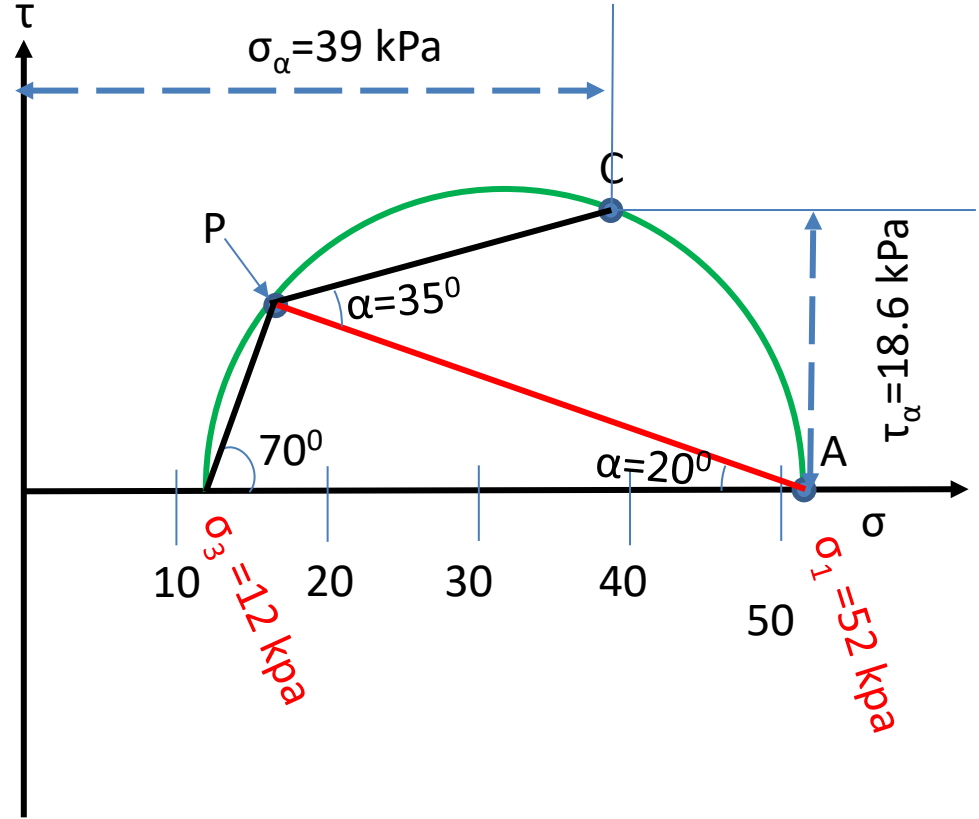
ÖRNEKLER

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.