JEO 357
Kayaç Mekaniği
Ders Notları

Doç. Dr. Ergün TUNCAY
Hacettepe Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

2012

İÇERİK

1. GİRİŞ
2. GERİLME – BİRİM DEFORMASYON
    - 2.1. Gerilme
    - 2.2. Birim Deformasyon
    - 2.3. Gerilme - Birim Deformasyon Davranışları
    - 2.4. Gerilme – Birim Deformasyon İlişkileri
3. KAYA MALZEMESİNİN FİZİKSEL ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ
    - 3.1. Fiziksel Özellikler
    - 3.2. Dayanım Özellikleri
    - 3.3. Deformasyon Özellikleri
    - 3.4. Kaya Malzemesi Sınıflamaları
    - 3.5. Kaya malzemesinin davranışı ve özelliklerini etkileyen faktörler
4. YENİLME KRİTERLERİ
5. KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ
    - 5.1. Süreksizlik türleri
    - 5.2. Süreksizlik özellikleri
    - 5.3. Süreksizliklerin Dayanım Davranışı
    - 5.4. Sondaj Loglarından Belirlenen Karot Parametreleri
    - 5.5. Başlıca Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri
    - 5.6. Kaya Kütlesi Dayanım ve Deformasyon Özellikleri
6. ARAZİ GERİLMELERİ
7. KAYA MEKANİĞİ DENEYLERİ
8. KAYA MEKANİĞİNİN BAZI UYGULAMA ALANLARI
    - 8.1. Şev Duraylılığı
    - 8.2. Yeraltı açıklıkları
    - 8.3. Taşıma Gücü

ÖĞRENCİYE ÖNERİLEN BAZI YARDIMCI KAYNAKLAR

- Amedei, B. and Stefanson, O., 1997. Rock Stress and Its Measurement. Chapman & Hall, London, 490p.
- Bell, F.G., 1983, Engineering Propeties of Soils and Rocks. Butterworth & Co., Second Edition, Kent, England, 149p.
- Goodman, R.E. 1989. Introduction to Rock Mechanics. Wiley, 2nd ed., New York, 562p.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981. Rock Slope Stability. IMM, London, 402p.
- Hoek, E. and Brown, E.T. Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.
- Hoek, E., Rock Engineering Course Notes. http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner
- Hudson, J.A. and Harrison, J.P. 1997. Engineering Rock Mechanics. Elsevier Science Ltd., Oxford, 444p.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Eds: Ulusay and Hudson. Ankara, Turkey.
- Jumikis, A.R., 1983. Rock Mechanics. Trans Tech Pub., 2nd ed., Texas, 613p.
- Karpuz, C ve Hindistan, M.A. 2008. Kaya Mekaniği İlkeleri, uygulamaları. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Yayın No: 116, Ümit Ofset, 2. Baskı, Ankara, 346s.
- Ulusay, R. 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 5. Baskı, Ankara, 458s.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2007. Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2. Baskı, Ankara, 292s.
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Binal, A., 2011. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 3. Baskı, Ankara, 167s.
- Wyllie, D.C., 1992. Foundations on Rock. Chapman & Hall, London, 490p.

ÖDEV VE SINAV PROGRAMI

3 ÖDEV ➡ (%10)

1. Arasınav ➡ (%20): ._____.

2. Arasınav ➡ (%20): ._____.

FİNAL sınavı ➡ (%50)

Bölüm 1

Giriş

Kaya: Tortul, magmatik ya da metamorfik kökenden gelen kristalli veya taneli sert ortamlara KAYA denir.

Mekanik: Bir cismin hareketini ve dengesini inceleyen bilim dalına MEKANİK denir. Bir malzemenin uygulanan bir kuvvet karşısında verdiği tepki bu malzemenin mekanik davranışını ifade eder.

Kaya Mekaniği: Kaya ve kaya kütlelerinin mekanik davranışını inceleyen kuramsal ve uygulamalı bilim dalıdır. Mekaniğin bu dalı kaya ve kaya kütlelerinin bulundukları fiziksel ortamlarda, etkisi altında kaldıkları kuvvet alanlarına karşı tepkisini kapsar. Kaya mekaniğinin uygulaması KAYA MÜHENDİSLİĞİ olarak adlandırılır.

Her kaya mühendisliği projesi birbirinden farklıdır. Ancak, projeyi oluşturan tüm tasarımlar ve yapım faaliyetleri kaya mekaniği prensipleri ile ilişkilidir.

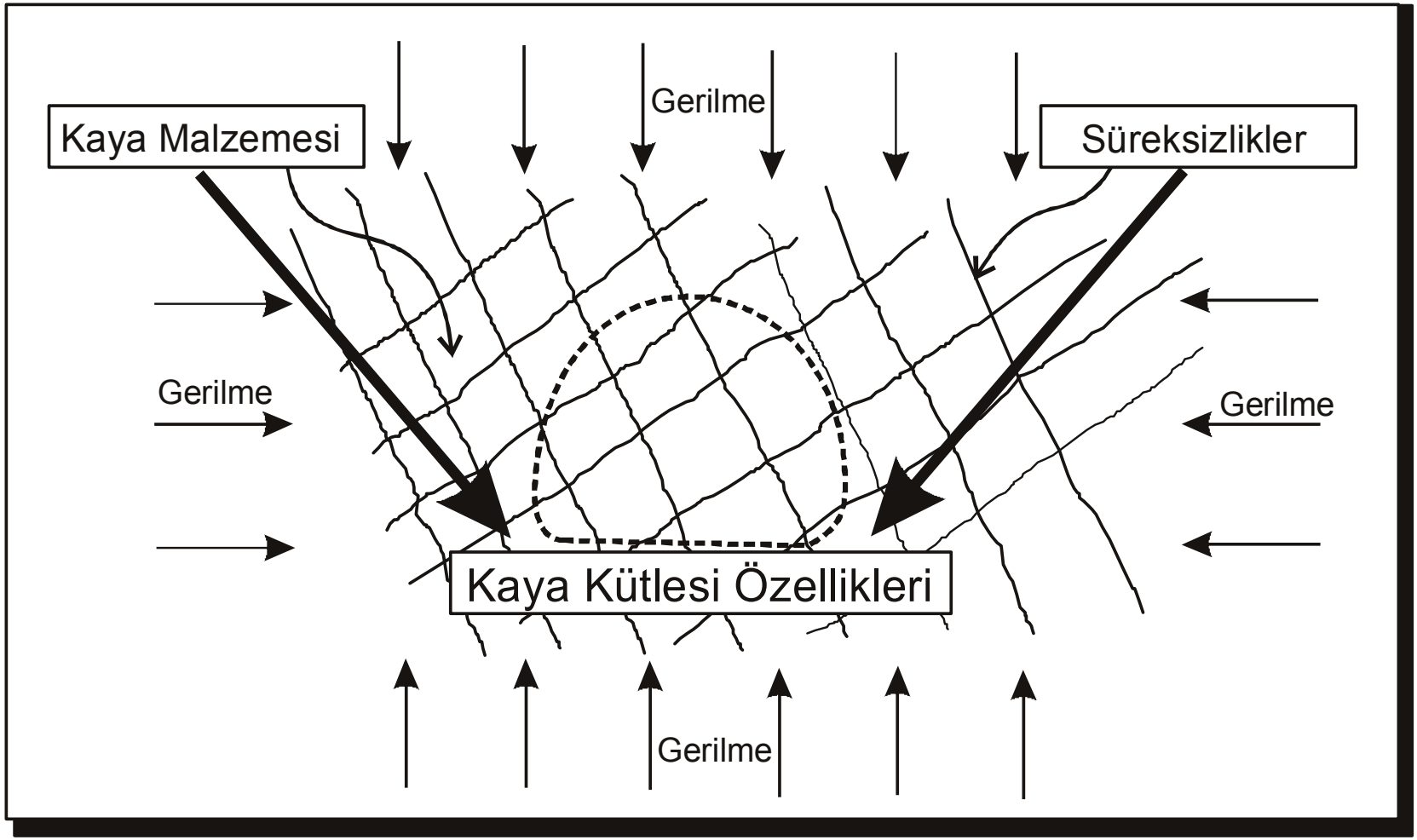
KAYA MALZEMESİ – KAYA KÜTLESİ

Kaya malzemesi (intact rock material), sağlam kaya malzemesi, herhangi bir kırık içermeyen en küçük kaya elemanıdır. Kaya malzemesinde bazen mikro kırıklar bulunmakla birlikte, bunlar süreksizlik veya kırık olarak dikkate alınmazlar. Bu kaya parçaları, birkaç milimetreden metrelerce uzunluğa kadar olabilirler. Diğer bir ifadeyle, kaya kütlesinde eklem, tabakalanma, şistozite fay vb. gibi doğal süreksizliklerin arasında kalan ve malzemenin çekilme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık veya zayıflık düzlemi içermeyen değişik boyutlardaki kaya parçalarıdır.

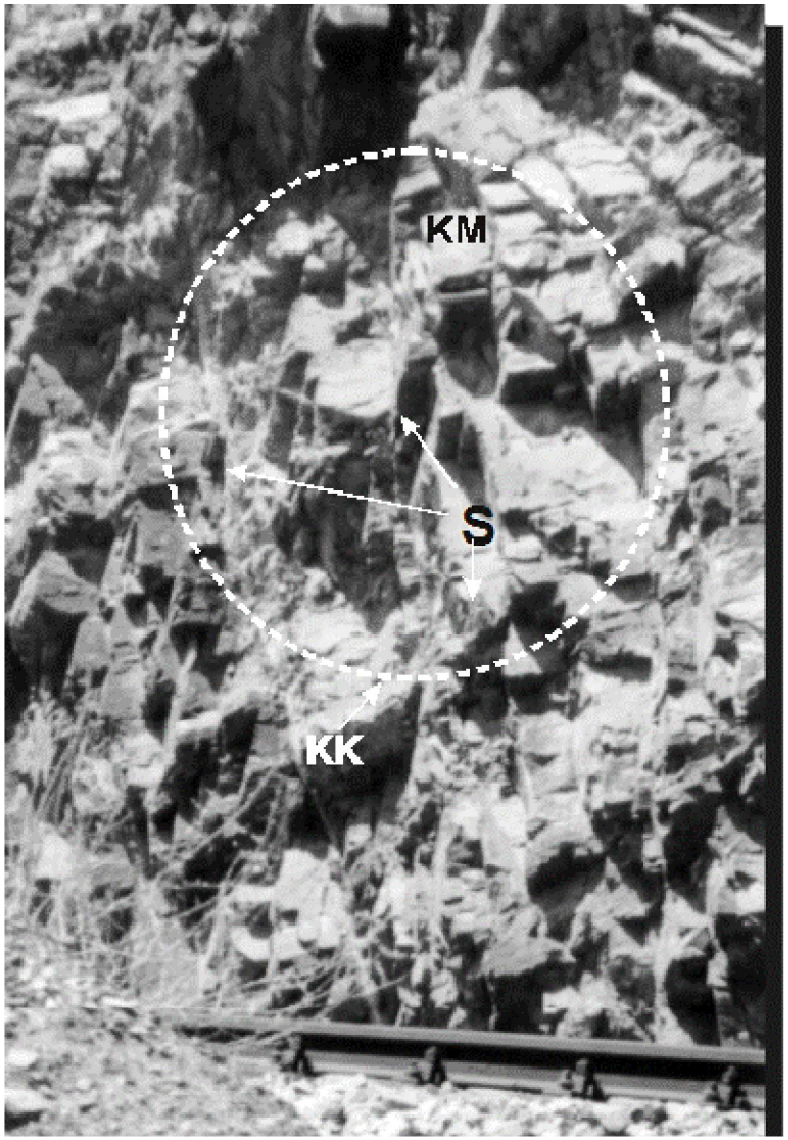
Süreksizlik (discontinuity), kaya kütlelerinde çekilme dayanımına sahip olmayan veya çok düşük çekilme dayanımına sahip tabakalanma düzlemi, eklem, fay, makaslama zonu, dilinim, şistozite vb. gibi jeolojik anlamda zayıflık düzlemlerinin tümünü içeren genel bir kavramdır. Bu kavram; süreksizliğin yaşı, geometrisi ve kökeni gibi hususları içermez. Bununla birlikte, bazı durumlarda jeolojik kökenli *doğal süreksizlikler* ile sondaj, patlatma ve kazı gibi işlemler sırasında oluşturulan *yapay süreksizliklerin* ayırdedilmesi önem taşır. Süreksizliklerin özellikleri, konumları ve yönelimleri kaya kütlelerinin deformasyon, dayanım, geçirgenlik vb. gibi özelliklerini, dolayısıyla kaya mühendisliği uygulamalarını önemli derecede etkiler. Süreksizliklerin üç boyutlu karmaşık yapısı, *süreksizlik ağı* veya *kaya yapısı* olarak adlandırılır.

Kaya kütlesi (rock mass) veya yerinde kaya (in-situ rock), süreksizlik ağı ile kaya malzemesinin birlikte oluşturdukları kütle veya sistemdir. Kaya kütlelerinde süreksizliklerle sınırlanan kaya malzemesi blokları, taze kaya malzemesinden bozunmuş (ayrışmış) kayaya kadar değişik özellikler sergileyebilir. Kaya kütlelerinin belirli bir gerilme altındaki davranışı, genellikle kaya malzemesine ait bloklar ile süreksizlikler arasındaki etkileşim tarafından denetlenir. Dolayısıyla kaya malzemesi, kendisiyle birlikte süreksizlikleri ve bozunma profilini de içine alan kaya kütlesi kavramından farklı olup, bu kavramla karıştırılmamalıdır.

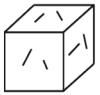
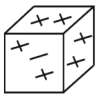
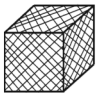
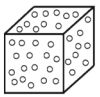
(Ulusay, ve Sönmez, 2007'den)


Kaya Malzemesi
Gerilme
Süreksizlikler
Gerilme
Gerilme
Kaya Kütlesi Özellikleri
Gerilme

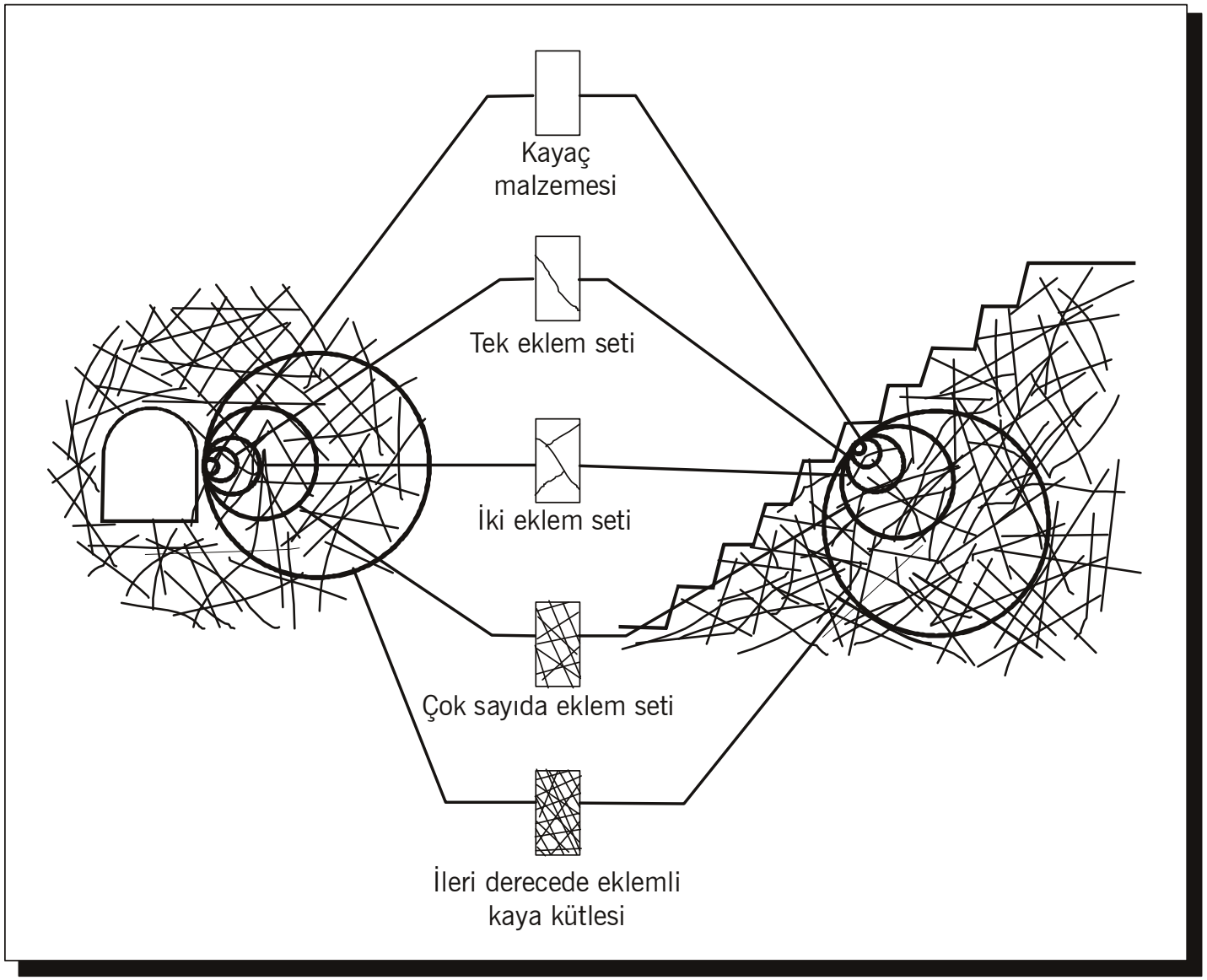
(Hudson, 1989)



Bir demiryolu şevini oluşturan kaya kütlesinden görünüm, *Kırıkkale civarı* (Ulusay ve Sönmez, 2007)

DOKUSU-NİTELİKLERİ		ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞLARI	
		DEFORMASYON	DEFORMASYON MEKANİZMASI
TEK CİSİM ORTAMI	 Çatlaksız-Masif Tek parça Yapı ve oluşumdan kaynaklanan ilksel anizotropi	Elastik, plastik, vizkoz	Kırılma, akma
KIRIKLI TEK CİSİM ORTAMI	 Çatlaklanmış, ancak parçalanmamış, çatlaklar arasında malzeme köprüleri, çok cisim ortamına geçiş İlksel anizotropi, tektonizma, kazı ve patlatma sonucu oluşan anizotropi	Elastik Psödoelastik	Kırılma, kırılma akması, basamaklı kırılma
SÜREKSİZ PARÇALANMIŞ ORTAM	 İri parçalı ve tam kırıklı sistem. Çatlak cisimlerinin oluşturduğu tuğla yapısı. Gerçek süreksiz ortam. İstatistiksel anlamda sürekli ortam Tektonik kökenli anizotropi	Makaslama sürtünmesi, yapışma sürtünmesi, psödoplastik kenetlenme	Kırılma akması, doku deformasyonu
TANELİ AYRIK ORTAM	 Ezilmiş, kırılmış, yontulmuş yığma malzeme. Ayrık kütle, sürekli ortam Anizotropi mümkün, ancak araştırılmamış.	Elastik, plastik	Tanelerin ötelenmesi, dönmesi ve deformasyonu

Müler (1963; Yüzer ve Vardar, 1986'dan)


Kayaç
malzemesi
Tek eklem seti
İki eklem seti
Çok sayıda eklem seti
İleri derecede eklemli
kaya kütlesi

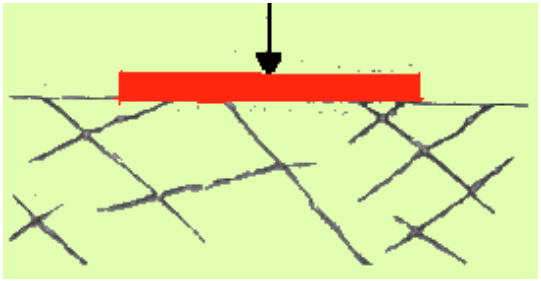
(Hoek, 1995)

BAŞLICA KAYA MÜHENDİSLİĞİ PROJELERİ

(Ulusay ve Sönmez, 2007'den düzenlenmiştir)

TEMELLER:

Kayalar (kaya kütleleri) genellikle yapılar için en uygun temel zeminleridir. Ancak, yüzeye yakın yerlerde süreksizlikler nedeniyle, kayaların izin verilebilir deformasyon veya oturma sınırları içinde üzerine uygulanan gerilmeleri taşıyabilecek özellikte olmaları gerekir.

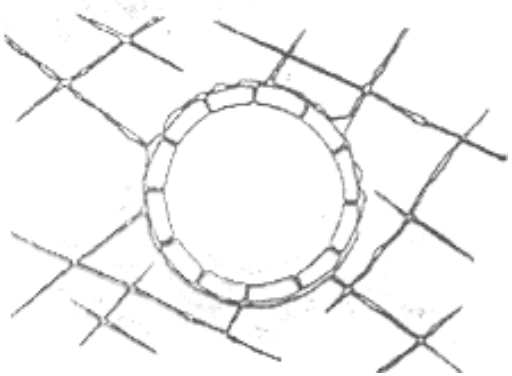


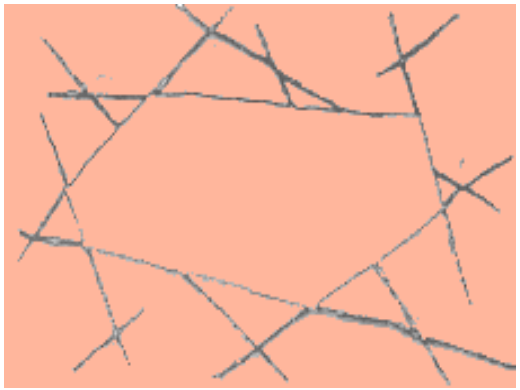
KAYA ŞEVLERİ:

Kaya şevlerinde; düzlemsel, kama, devrilme ve dairesel olmak üzere dört temel duraysızlık mekanizması vardır. Bu duraysızlıklardan herhangi birinin gelişmesi halinde kaya mekaniği metodları kullanılarak yenilme mekanizması tanımlanabilir ve duraylılık analizleri yapılabilir.

TÜNELLER VE ŞAFTLAR:

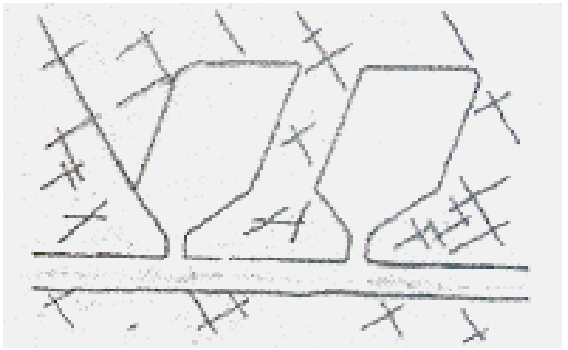
Tünellerin ve şaftların duraylılığı, kayanın yapısına, kaya kütlesine etkiyen gerilmelere, yeraltı suyu akışına, süreksizliklere ve kazı tekniğine bağlıdır. Bu yapıların duraylılığının değerlendirilmesinde kaya mekaniğinin temel ilkeleri önemli bir kılavuzdur.





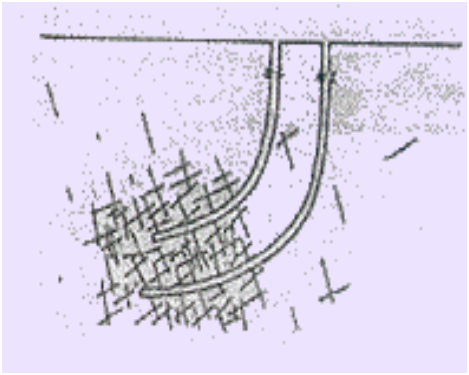
GENİŞ YERALTI AÇIKLIKLARI:

Süreksizlikler geniş yer altı boşluklarının tasarımı ve inşasında önemli bir rol oynamaktadır.Kayayı güçlendirme ve desteklemek için seçilecek yöntemler, kazı sonucu meydana gelen yüzey hareketinin esaslarına dayanır.



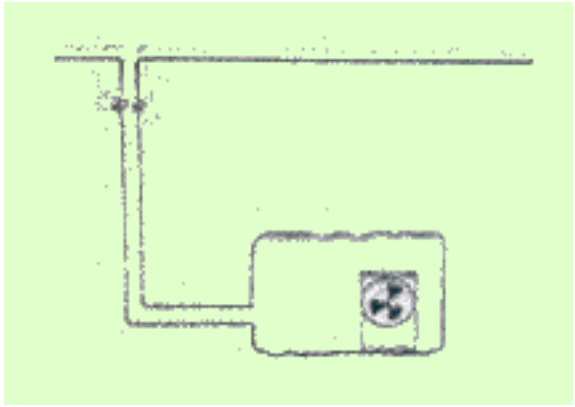
YERALTI MADENCİLİĞİ:

Madencilik amaçlı açılan galerilerin geometrileri karmaşık ve oldukça değişkendir. Kaya kütlelerinin içerdikleri süreksizliklerin önemi büyüktür. Ancak tüm madencilik tasarımlarının hedefi en ekonomik yöntemle çevheri/minerali çıkarmaktır.



JEOTERMAL ENERJİ ÜRETİMİ:

Jeotermal enerjinin üretilmesi sondaj kuyusundan gönderilen soğuk suyun kaya rezervuardaki süreksizliklerden geçerek ikinci bir kuyuya geçmesiyle gerçekleştirilir. Üretim sisteminin optimum düzeyde olması kaya kütlesindeki süreksizliklerin birbirleriyle bağlantılı olmasına, arazi gerilmelerine, su akışına, sıcaklığa ve zamana bağlıdır.



RADYOAKTİF ATIKLARIN DEPOLANMASI:

Amaç; radyoaktif maddelerin biyosfere geri dönmemesi için atığı izole etmektir. Radyoaktif maddenin sızması için bir geçiş yolu sağlayan kaya içindeki süreksizliklerin anlaşılması kadar jeotermal enerji için yukarıda sıralanan faktörlerin bilinmesi depolamanın güvenliği açısından önem taşır.

JEOLOJİ MÜHENDİSİ, KAYA MEKANİĞİ KAPSAMINDA;

- Gerilme –birim deformasyon kavramları ve dönüşüm ilişkileri
- Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri
- Gerilme etkisinde kaya malzemesi davranışı
- Yenilme kriterleri
- Kaya kütlesi özellikleri
- Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemler ➔ laboratuvar ve arazi deneyleri ile görgül yaklaşımlar
- Kaya şev duraylılığı, kaya ortamlarda sığ temellerin taşıma gücü, yeraltı açıklıklarının duraylılığı, vb.

hakkında temel düzeyde bilgi donanımına sahip olmalıdır.

Bu ders kapsamında; kaya mekaniği prensipleri ve bunların kaya mühendisliğiyle ilişkisine temel düzeyde giriş yapılacaktır.

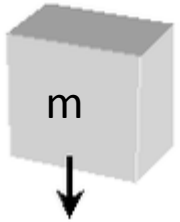
Bölüm 2

Gerilme – Birim Deformasyon

2.1. GERİLME

Kuvvet (F), bir kütleye (gr, kg, ton, vs.) sahip cismin şeklini ve/veya hareketini değiştiren etkidir. Kuvvetin, büyüklüğü doğrultusu ve yönü vardır. Birimi, kilogram kuvvet (kgf), Newton (N) vb dir. Yönü, doğrultusu ve büyüklüğü mevcut ➔ Vektörel Nicelik.

Cisim kuvveti, cisim boyunca etki eder ve başka bir cisimle teması olmaksızın üretilir (yerçekimsel, manyetik, eylemsizlik kuvveti gibi).



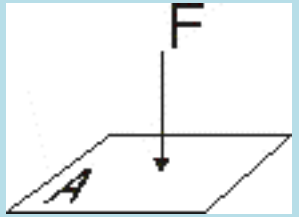
F = m.g

Yüzey kuvveti, bir cismin dış yüzeyi boyunca etki eder ve başka bir cisimle teması sonucu oluşur.

Gerilme (σ)

Gerilme, en basit şekilde; birim alana etkiyen kuvvet olarak tanımlanır. Bu alan, bir yapının sınırlarını oluşturan dış yüzey, fay eklem gibi süreksizlik yüzeyleri, ya da farazi bir içsel yüzey olabilir. Gerilmenin birimi: Kilogram kuvvet / metre² veya Newton / metre² (N/m²), vb.

Yönü, doğrultusu, büyüklüğü (değeri) ve etkidiği bir düzlem söz konusudur ➔ Tansörel nicelik



$$\sigma = F / A$$

Kuvvet ve Gerilme Birimleri – Metrik Sisteme Göre

F (kuvvet) = m (kütle) x g (ivme) → Kuvvet birimi: kgf (kilogram kuvvet) gibi

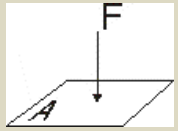
Kilogram kuvvet, kütlesi 1 kg olan bir cismin standart bir çekim altında (örneğin: yerçekimi) uyguladığı kuvvetttir.

σ (Gerilme) = F (kuvvet) / A (Alan) → Gerilme birimi: kgf / m² gibi

Kuvvet birimleri: kgf (kilogram kuvvet), gf (gram kuvvet), tonf (ton kuvvet)
Gerilme birimleri: kgf/m² , kgf/cm² , gf/cm² , tonf/m² gibi.

SORU: Bir düzlem (alan) üzerindeki bir kütlenin yaratmış olduğu metrik sisteme uygun gerilme değeri 100kgf/m² dir. Aşağıdaki birim dönüşümlerini yapınız.

100 kgf/cm² = ... gf/m² = ... tonf/m² = ...gf/cm²



Gerilme birimi olarak metrik sistem tercih edilmesine rağmen, kuvvet (f) takısının kullanılmaması dünyada yaygın bir kullanım şeklidir. Örneğin; gerilme birimi için, kgf/cm² yerine kg/cm² şeklinde kullanımı gibi.

Kuvvet ve Gerilme Birimleri - SI (Standart International) Birimler Sistemine Göre

F (kuvvet) = m (kütle) x g (ivme) → Kuvvet birimi = kg x m/s² = N (Newton)

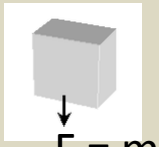
Kütle birimi : kilogram(kg)
İvme birimi : metre / saniye² (m/s²)

σ (Gerilme) = F (kuvvet) / A (Alan) → Gerilme birimi = N / m² = Pa (Pascal)

Kuvvet birimleri: N (Newton), kN (Kilo Newton), MN (Mega Newton)
Gerilme birimleri: Pascal (Pa=N/m²) , Kilopascal (kPa=kN/m²) , Megapascal (MPa=MN/m²)

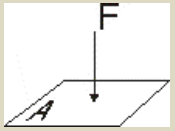
SORU: Dünyada bir kütleye yerçekimi ivmesinin (9.81m/s²)kazandırmış olduğu kuvvet değerini SI birimleri cinsinden belirleyiniz?

100 kg = ...N = ...kN = ...MN



SORU: Dünyada bir düzlem (alan) üzerindeki bir kütlenin yaratmış olduğu gerilme değerini SI sistemine uygun şekilde çeviriniz?

100 kgf/cm² = ... Pa = ... kPa = ...MPa



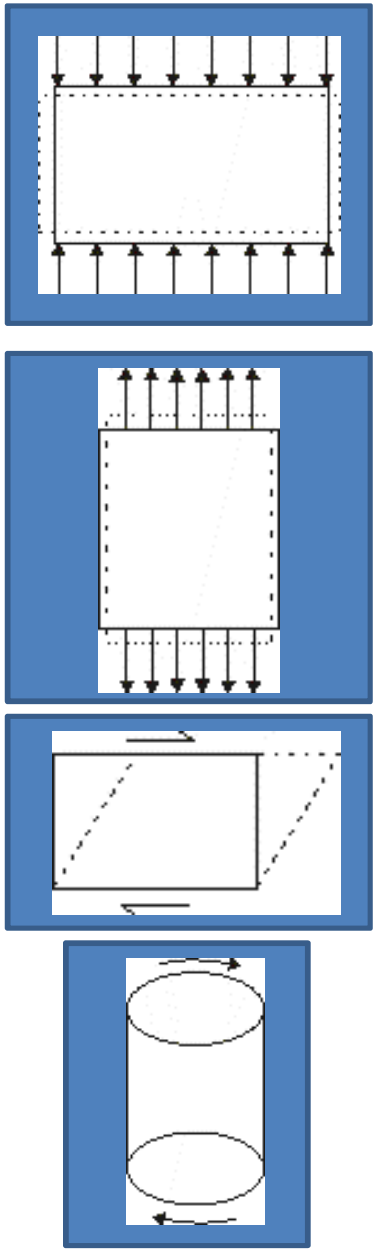
Gerilme Türleri:

- Şıkıştırma/Basma Gerilmesi (Compressive stress): Aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerine doğru kuvvetlerin oluşturduğu ve bir cisme sıkıştırıcı yönde etki eden gerilmelerdir. Bu gerilmeler, kaya mekaniğinde pozitif (+) olarak alınır. Kayada etkidiği doğrultuda boy kısalmasına neden olur.

- Çekme Gerilmesi (Tensile stress): Aynı doğrultuda, zıt yönlü ve birbirlerinden uzaklaşan kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerdir. Bu gerilmeler kaya mekaniğinde negatif (-) olarak alınır. Etkidiği doğrultuda boy uzamasına neden olur.

- Makaslama Gerilmesi (Shear stress): Cismin yüzeyine paralel yönde etkiyen, doğrultuları aynı yönleri zıt kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerdir. Kayada şekil değişikliğine neden olurlar.

- Burulma Gerilmesi (Torsional stress): Bir cisme farklı iki noktasından cisim içerisinde dönme oluşturacak şekilde etki eden teğetsel gerilmelerdir.



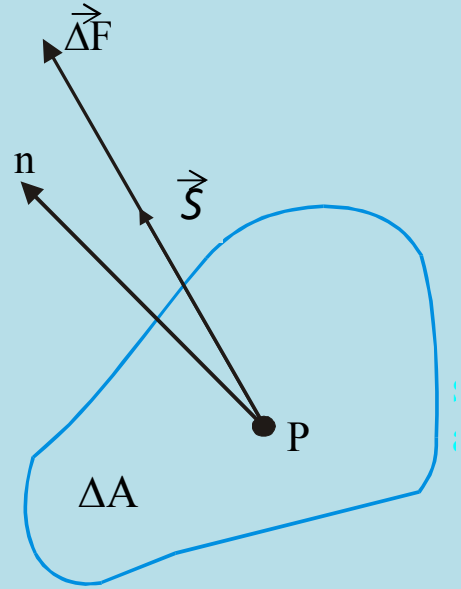
Gerilme vektörü (Stress vector / Traction vector):

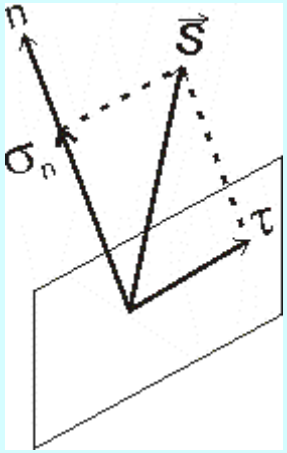
Bir alana etkiyen bileşke kuvvetin, alanın sıfıra gittiği andaki limit değeri.

$$\vec{S} = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A}$$

ΔF: P noktasını çevreleyen ΔA alanına etkiyen bileşke kuvvet

n : Düzleme dik yöndeki eksen (düzlem normali)





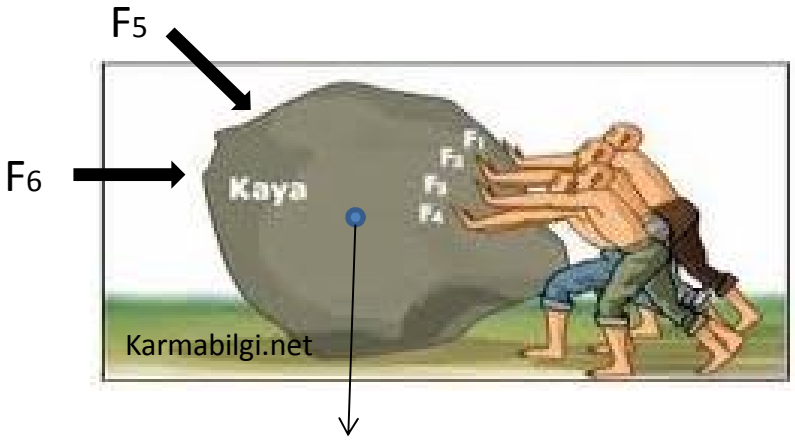
Bir düzleme dik ve paralel yönde etkiyen gerilmeler:

σ_n : Yüzeye (düzleme) dik yönde etkiyen gerilme ➔ NORMAL GERİLME (NORMAL STRESS)

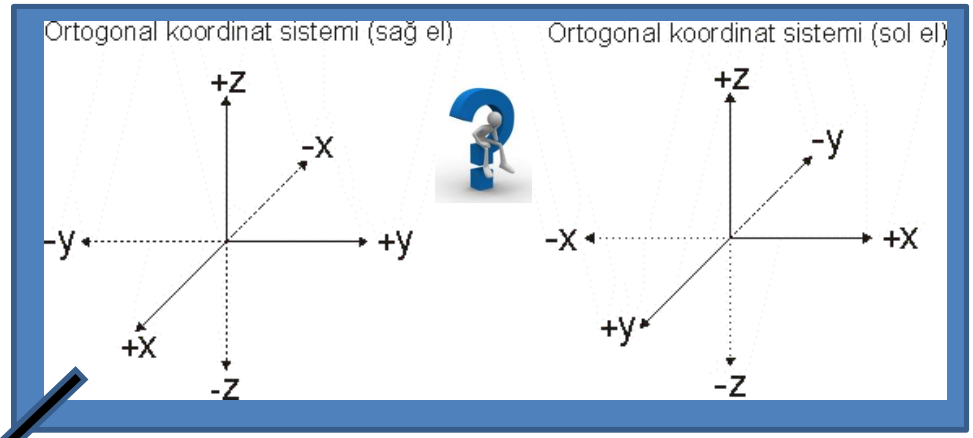
τ : Yüzeye teğetsel (paralel) yönde etkiyen gerilme ➔ MAKASLAMA GERİLMESİ (SHEAR STRESS)

(Farklı disiplinlerde kayma ya da kesme gerilmesi olarak da adlandırılmaktadır)

2.1.1. Bir Noktadaki Üç Boyutlu Gerilme Bileşenleri

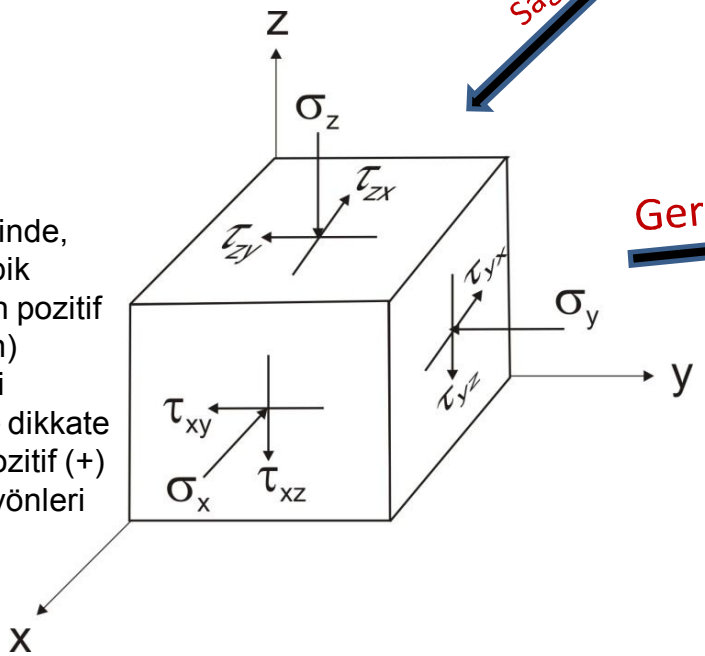


Bloğun içerisinde bir noktadaki gerilme durumu?



Sağ el

Kaya mekaniğinde, birim kübik elemanın pozitif (görünen) yüzeyleri üzerinde dikkate alınan pozitif (+) gerilme yönleri



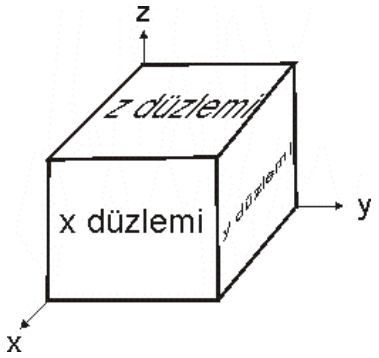
Gerilme tansörü

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Herhangi bir noktadaki (kübik birim eleman üzerinde) gerilme durumu 9 bileşenden meydana gelir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

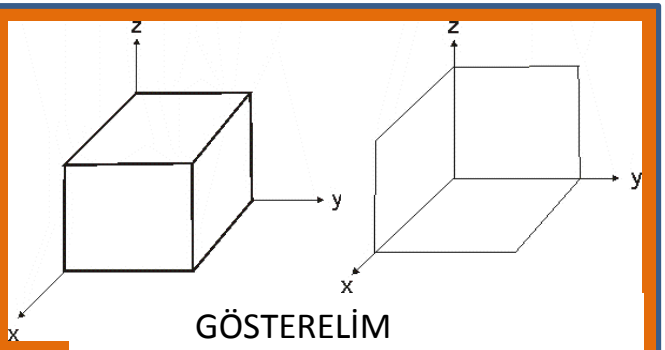
Gerilme bileşenlerinin sembol gösteriminde, ilk alt indis gerilmenin etkidiği düzlemi, ikinci alt indis ise gerilmenin yönünü gösterir.



$$[\sigma] = \begin{bmatrix} 8 & -1 & 3 \\ -1 & -5 & 2 \\ 3 & 2 & -3 \end{bmatrix}$$

Yanda matris formunda verilen gerilme tansöründeki gerilme bileşenlerinin yönlerini kübik eleman üzerinde gösteriniz?

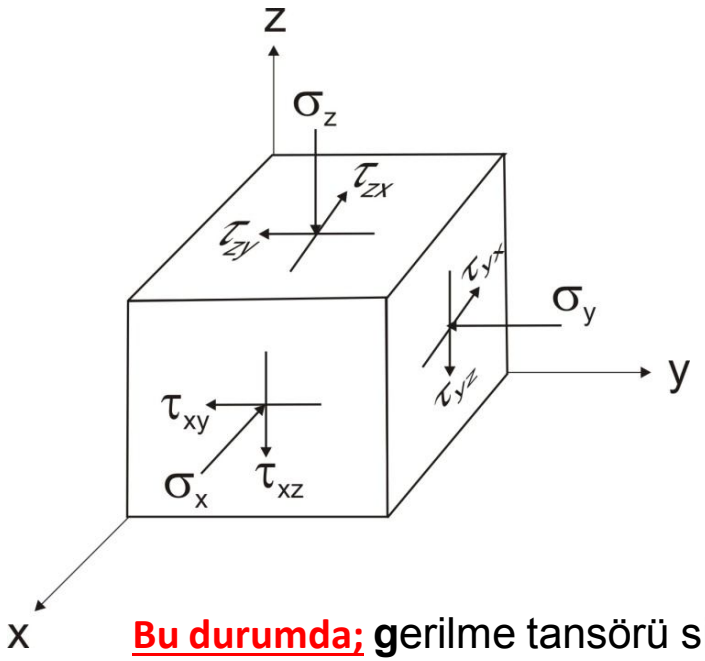
?



GÖSTERELİM

Gerilme bileşenleri literatürde sadece σ simgesiyle, ya da ortogonal eksenlere verilen adlara bağlı olarak farklı alt indislerle gösterilebilmektedir.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$ GİBİ

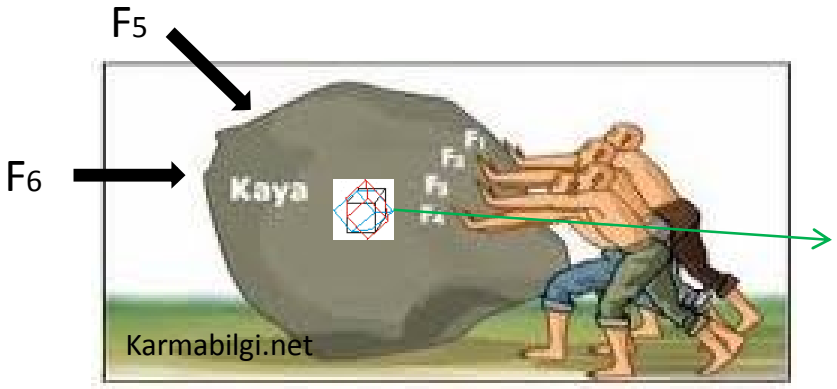


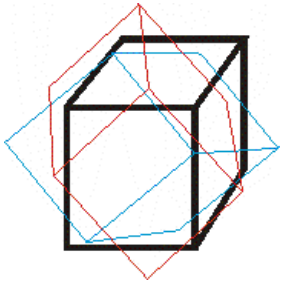
Birim kübik eleman üzerine etkiyen makaslama gerilmesi bileşenlerinin, küpün dönme dengesini koruyabilmesi için, ikişer ikişer birbirine eşit olması gerekir.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \qquad \tau_{yz} = \tau_{zy} \qquad \tau_{xz} = \tau_{zx}$$

Bu durumda; **g**erilme tansörü simetrik bir matris formundadır ve 6 bileşeninin bilinmesi yeterlidir.

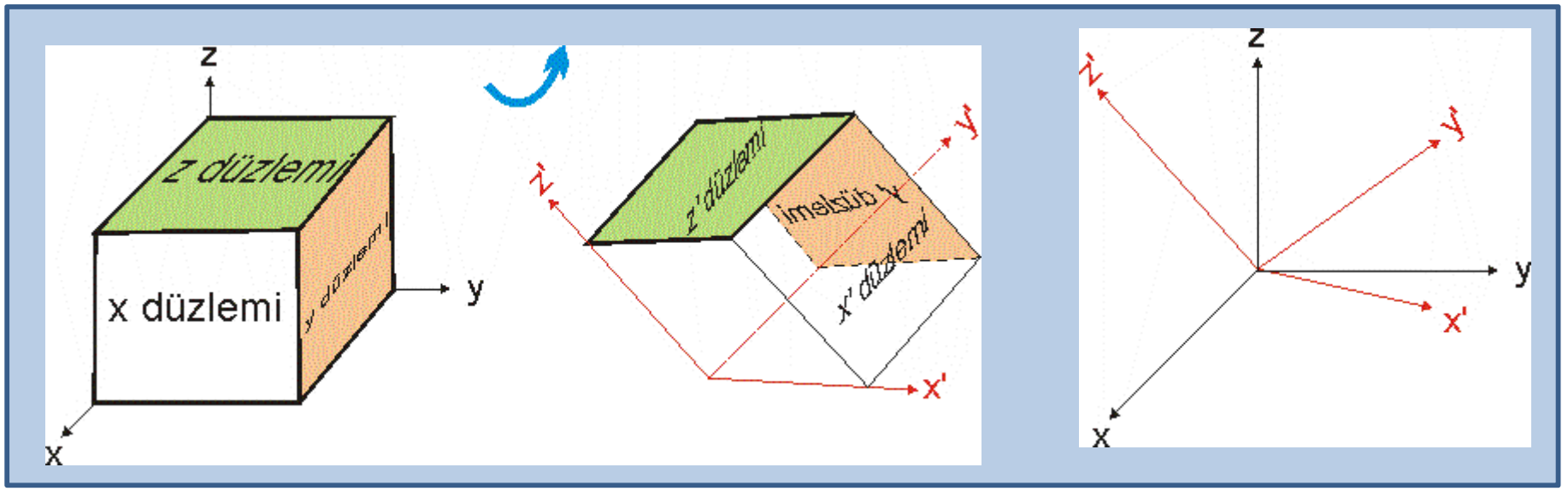
$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

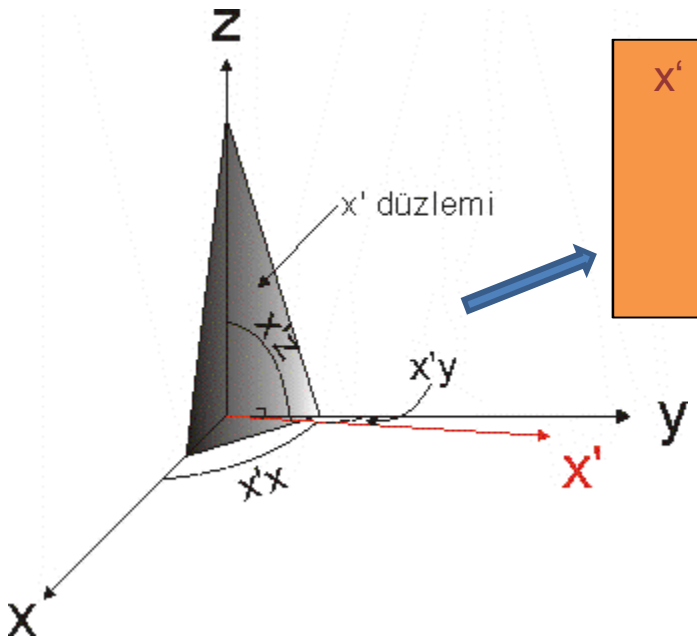




Farklı konumlardaki birim kübik elemanlar üzerindeki gerilme bileşenleri ??

Üç Boyutlu Gerilme Dönüşüm/Çevirim (Transformasyon) İlişkileri





x‘ için doğrultu kosinüsler (direction cosines)

$l_{x'} = \cos(x' x)$

$m_{x'} = \cos(x' y)$

$n_{x'} = \cos(x' z)$

x‘ düzlemine x,y ve z eksenlerine paralel yönde etkiyen kuvvetler (P kuvvetleri)

$$(P_{x'x}\ P_{x'y}\ P_{x'z}) = (l_{x'}\ m_{x'}\ n_{x'})\ (\sigma)_{xyz}$$

Gerilme tansörü

x' düzlemine dik yönde etkiyen kuvvet

$$S_{x'} = P_{x'x}\, l_{x'} + P_{x'y}\, m_{x'} + P_{x'z} n_{x'}$$

Aynı şekilde diğer düzlemler için Doğrultu kosinüsler belirlenirse;

y' için doğrultu kosinüsler	z' için doğrultu kosinüsler
$l_{y'} = \cos(y'\,x)$	$l_{z'} = \cos(z'\,x)$
$m_{y'} = \cos(y'\,y)$	$m_{z'} = \cos(z'\,y)$
$n_{y'} = \cos(y'\,z)$	$n_{z'} = \cos(z'\,z)$

Doğrultu kosinüsler matrisi

$$[L] = \begin{bmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & m_{z'} & n_{z'} \end{bmatrix}$$

Yeni koordinatlarda (x',y',z') gerilme tansörü

$$[\sigma'] = [L] \bullet [\sigma] \bullet [L]^T$$

T: Terzyüz (transpose)

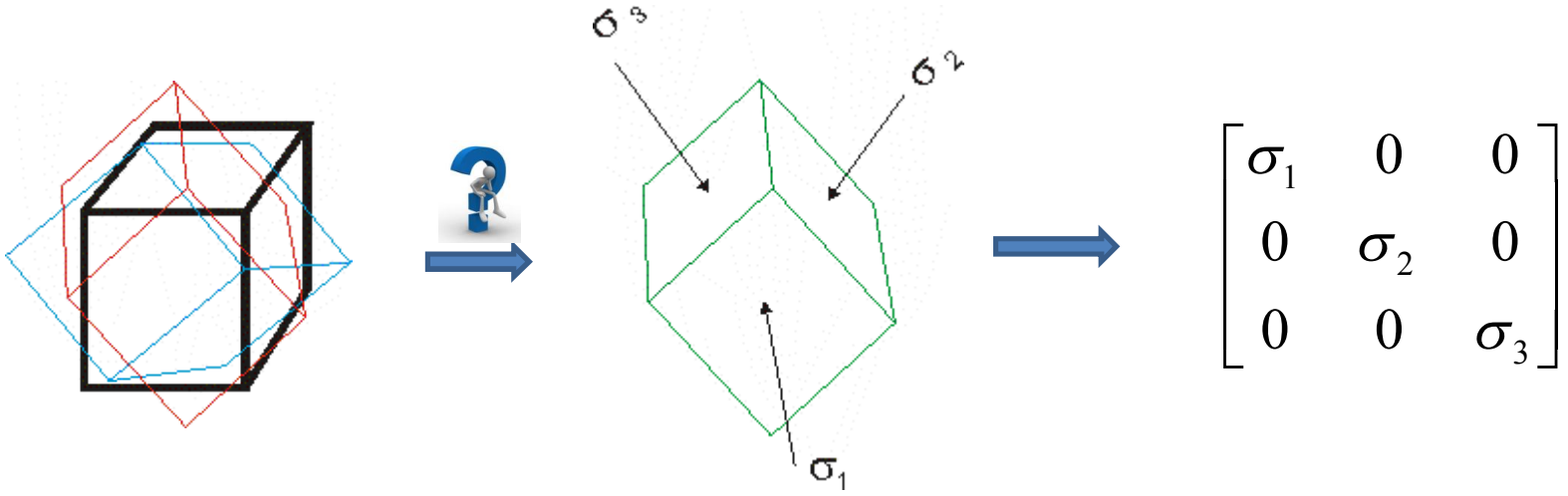
Açık haliyle;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} & \tau_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & m_{z'} & n_{z'} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} l_{x'} & l_{y'} & l_{z'} \\ m_{x'} & m_{y'} & m_{z'} \\ n_{x'} & n_{y'} & n_{z'} \end{bmatrix}$$

Bir eksen takımındaki kübik elemana etkiyen gerilme bileşenleri, ilk aşamada eksenlere paralel yönde etkiyen kuvvetlere dönüştürülür. Sonraki aşamada da yeni eksen takımındaki elemana etkiyen gerilmeler bulunmuş olur.

Asal Gerilmeler (Principle Stresses)

Makaslama gerilmelerinin olmadığı (sıfır olduğu) birim kübik elemanın düzlemlerine ASAL DÜZLEMLER, bu düzlemlere etkiyen normal gerilmelere de ASAL GERİLMELER (σ_1, σ_2, σ_3) adı verilir.



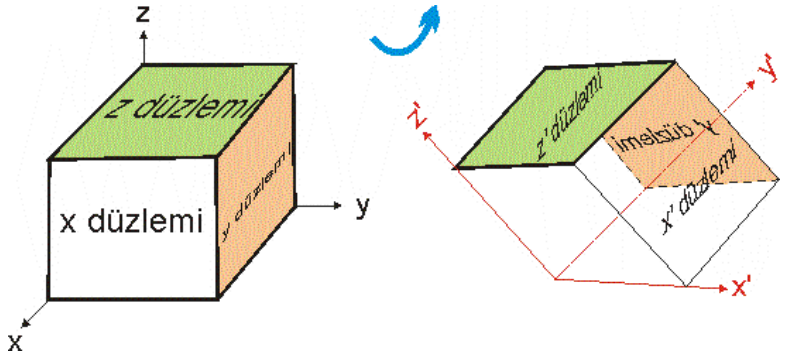
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Aynı gerilme ortamında (aynı noktada) üç boyutlu konumu farklı olan tüm birim kübik elemanların yüzeylerine etkiyen normal gerilmelerin toplamları eşittir.

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_{x'} + \sigma_{y'} + \sigma_{z'}$$

Üç boyutlu olarak asal gerilmelerin ve etkidiği düzlemlerin belirlenmesi vb. konularda ayrıntılı bilgi, ders kapsamında yararlanılması önerilen kaynaklarda mevcuttur.

SORU: Bir eksen takımındaki (x,y,z) gerilme tansörü bilinmektedir. Söz konusu eksenlerin farklı bir eksen takımıyla (x',y',z') olan açıları belirlenmiş ve bu açılar aracılığıyla doğrultu kosinüsleri hesaplanmıştır. Yeni eksen yönlerine uygun birim kübik elemana etkiyen gerilme tansörünü bulunuz.

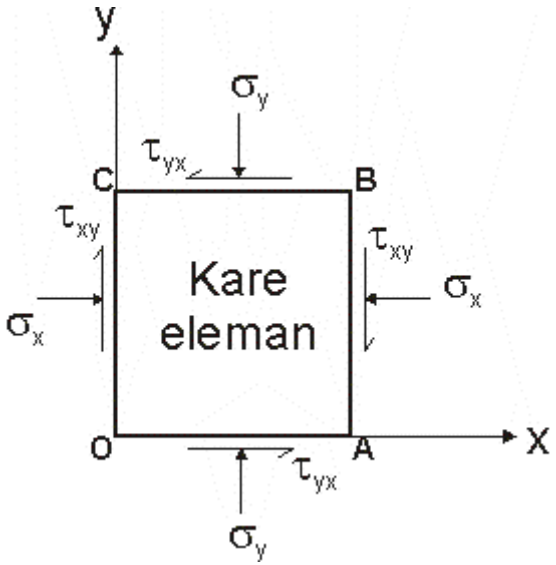


$$[\sigma]=\begin{bmatrix}5 & -1 & 1\\ -1 & 3 & 2\\ 1 & 2 & -1\end{bmatrix} \qquad [L]=\begin{bmatrix}0.244 & -0.244 & 0.939\\ -0.664 & 0.664 & 0.341\\ -0.707 & -0.707 & 0\end{bmatrix} \qquad [\sigma']=?$$

HATIRLAYALIM

-Kuvvet ve gerilme birimleri ve dönüşümleri?
-Gerilme türleri?
-Normal gerilme?
-Makaslama gerilmesi?
-Asal gerilme?
-Asal düzlem?

2.1.2. İki Eksenli (İki Boyutlu) Gerilme Durumu ve Gerilme Dönüşümü (Stress Transformation) İlişkileri

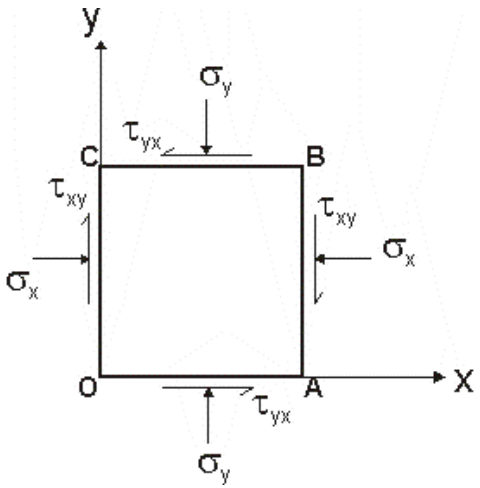


İki boyutlu gerilme durumunda;

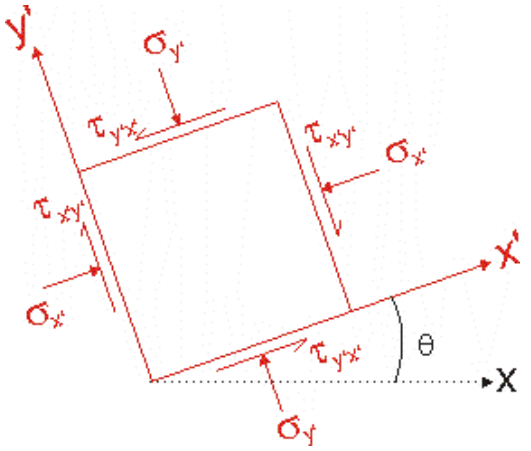
* Birim kare elamanın kenarları, üçüncü boyutta (sayfaya dik yönde) kalınlığı bir birim kabul edilen düzlemleri ifade eder (σ_x 'in etkidiği düzleme x düzlemi, σ_y'nin etkidiği düzleme y düzlemi denir).
* Sıkıştırıcı yönde etki eden normal gerilmeler pozitif (+), çekme gerilmeleri ise negatif(-)'tir.
* Makaslama gerilmesi, kare elemanın pozitif yüzeylerinde (AB ve BC düzlemlerinde), + eksene zıt yönde etkiyorsa pozitif (+), tersi yönünde ise negatif (-)'tir. Kare elemanın diğer yüzeylerinde (OA ve OC düzlemleri) tam tersidir. Üç boyutlu kübik elemandaki gibi.

* $\tau_{xy} = \tau_{yx}$

2.1.2.1. Gerilme Çevirimi - Analitik Yöntem

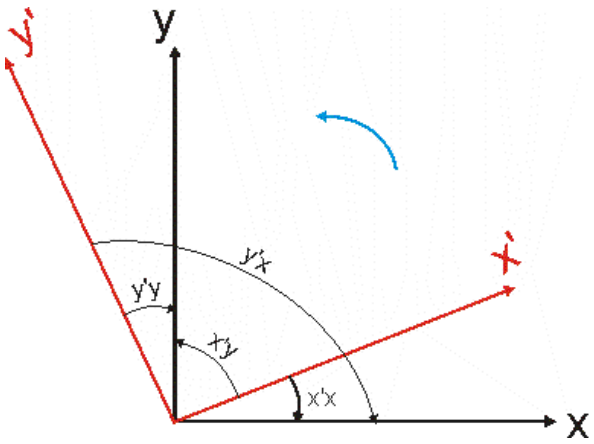


Bir gerilme ortamında xy eksen takımına uygun birim kare elemana etkiyen gerilmeler soldaki gibi ise, aynı gerilme ortamında θ açısı kadar çevirilmiş birim kare elamana etkiyen gerilmeleri bulunuz.



Birim kare, dolayısıyla eksenler, saat yönünün tersi yönde çevrildiğinde
Doğrultu kosinüsler matrisi

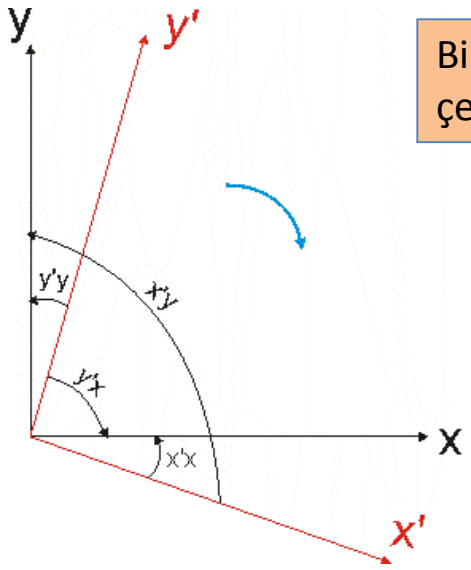
$$[L]=\begin{bmatrix} l_{x'} & m_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos(x'x) & \cos(x'y) \\ \cos(y'x) & \cos(y'y) \end{bmatrix}$$



x'x = θ ise

$$[L]=\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(90-\theta) \\ \cos(90+\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[L]=\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$



Birim kare, dolayısıyla eksenler, saat yönünde çevrildiğinde, Doğrultu kosinüsler matrisi

x'x = θ ise

$$[L]=\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Yeni koordinatlarda (x'y') gerilme tansörü

$$[\sigma'] = [L] \bullet [\sigma] \bullet [L]^T$$

YAPILAN İŞLEMİN FİZİKSEL ANLAMI:
Önce x' ve y' düzlemlerinde x ve y eksenlerine paralel yönde etkiyen kuvvetlerin (P kuvvetleri) bulunması, bu kuvvetlerden yararlanarak x'y' düzlemlerine etkiyen bileşke kuvvetlerin (dik ve paralel yöndeki) ve gerilmelerin hesaplanması.

Eksenler saatin tersi yönünde çevrilmişse

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \sigma_x\cos\theta + \tau_{xy}\sin\theta & \sigma_x(-\sin\theta) + \tau_{xy}\cos\theta \\ \tau_{yx}\cos\theta + \sigma_y\sin\theta & \tau_{yx}(-\sin\theta + \sigma_y\cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{x'} = \cos\theta \cdot (\sigma_x \cos\theta + \tau_{xy} \sin\theta) + \sin\theta (\tau_{yx} \cos\theta + \sigma_y \sin\theta)$$

$$\tau_{x'y'} = \cos\theta \cdot (-\sin\theta \cdot \sigma_x + \cos\theta \cdot \tau_{xy}) + \sin\theta \cdot (-\sin\theta \cdot \tau_{yx} + \sigma_y \cos\theta)$$

$$\sigma_{y'} = -\sin\theta \cdot (-\sin\theta \cdot \sigma_x + \tau_{xy} \cos\theta) + \cos\theta (-\sin\theta \cdot \tau_{yx} + \sigma_y \cos\theta)$$

Sadeleştirme yapıldığında:

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta$$

$$\tau_{xy'} = \tau_{xy} \left(\cos^2\theta - \sin^2\theta\right) + \left(\sigma_y - \sigma_x\right) \sin\theta \cos\theta$$

Trigonometrik ilişkiler kullanılarak yeniden düzenlendiğinde:

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

Eksenler saat yönünde çevrilmişse

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \sigma_x\cos\theta + \tau_{xy}(-\sin\theta) & \sigma_x\sin\theta + \tau_{xy}\cos\theta \\ \tau_{yx}\cos\theta + \sigma_y(-\sin\theta) & \tau_{yx}\sin\theta + \sigma_y\cos\theta \end{bmatrix}$$

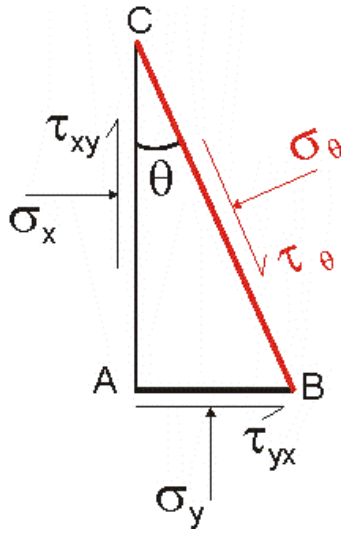
Yukarıda yapılan tüm işlemler burada da tekrarlandığında:

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta$$

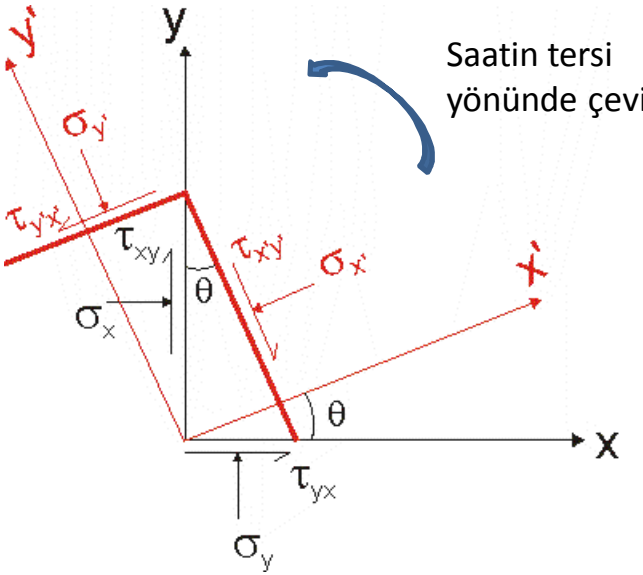
$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta$$

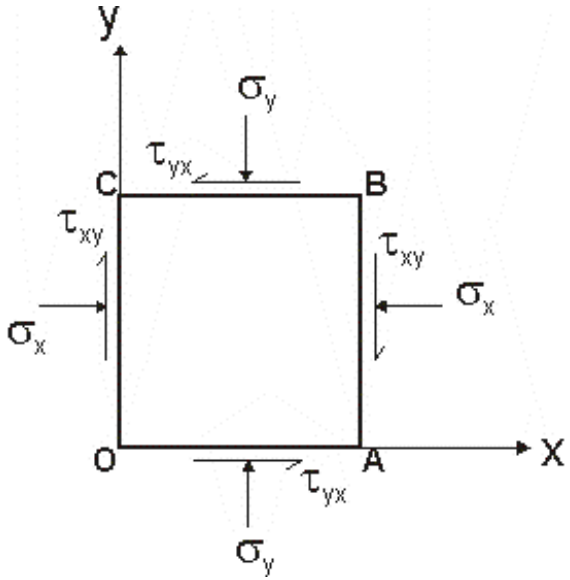
İki boyutlu gerilme ortamında bir düzleme etkiyen gerilmeler



σθ ve τθ ?

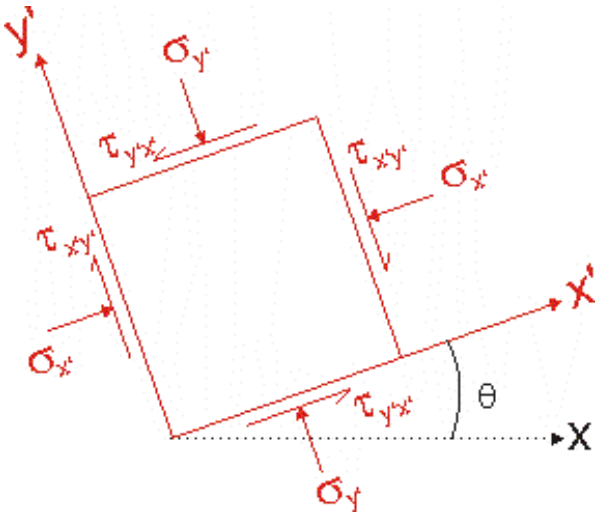


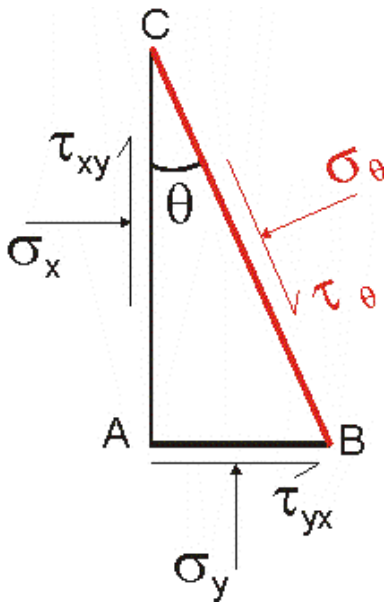
Saatin tersi yönünde çevirim



Gerilme çevirimi?

σθ = σx' τθ = τx'y'





Denge gereği,
kuvvetlerin herhangi bir yöndeki toplamı sıfıra (0) eşit olmalıdır. σ_θ ve τ_θ yönünde denge durumu;

$$\sum F_{\sigma_\theta} = \sigma_\theta \cdot BC - \sigma_x . AC \cdot \cos\theta - \sigma_y \cdot AB \cdot \sin\theta - \tau_{xy} \cdot AC \cdot \sin\theta - \tau_{yx} \cdot AB \cdot \cos\theta = 0$$

$$\sum F_{\tau_\theta} = \tau_\theta \cdot BC - \tau_{xy} \cdot AC \cdot \cos\theta + \tau_{yx} \cdot AB \cdot \sin\theta + \sigma_x \cdot AC \cdot \sin\theta - \sigma_y \cdot AB \cdot \cos\theta = 0$$

BC = 1 birim ise, AC = cos θ , AB = sin θ

Bu durumda

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + 2\tau_{xy} \sin\theta\cos\theta$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy}\left(\cos^2\theta - \sin^2\theta\right) + \left(\sigma_y - \sigma_x\right)\sin\theta\cos\theta$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \qquad = \sigma_{x'}$$

$$\tau_\theta = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \qquad = \tau_{x'y'}$$

Trigonometrik ilişkilerden yararlanılarak σ_θ aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\left(\sigma_x + \sigma_y\right) + \frac{1}{2}\left(\sigma_x - \sigma_y\right)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta$$

Asal Gerilmeler

Herhangi bir eksen takımında düzlemlere etkiyen gerilmeler biliniyorsa, asal gerilmeler (en küçük ve en büyük normal gerilmeler) ve etkidiği yönler, dolayısıyla düzlemler (asal düzlemler) de analitik yöntemle bulunabilir. (Hatırlatma: Makaslama gerilmelerinin sıfır olduğu düzlemlere asal düzlemler, bu düzlemlere etkiyen normal gerilmelere ise asal gerilmeler denir.)

Düzleme etkiyen normal gerilme (σ_θ) eşitliğinin türevi alınırsa:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = -2\sin 2\theta \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} + 2\tau_{xy}\cos 2\theta = 0$$

$$\Rightarrow \quad \sin 2\theta \cdot (\sigma_x - \sigma_y) = 2\tau_{xy}\cos 2\theta \quad \Rightarrow \quad \tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

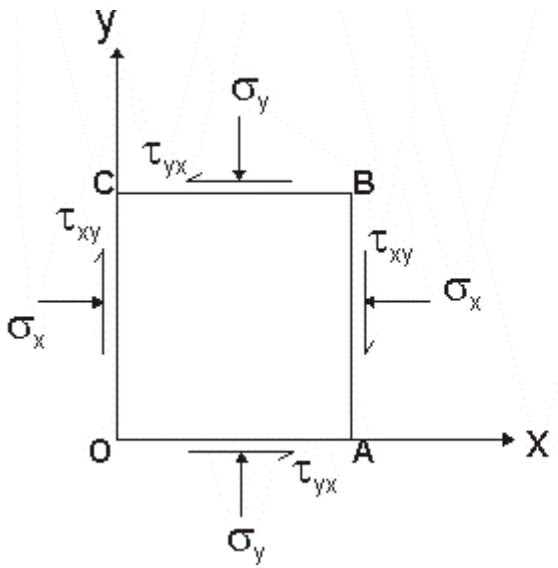
Asal gerilme düzlemlerinin x veya y düzlemlerinden olan dönme açısı:

$$\Rightarrow \quad \theta_1 = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right)$$

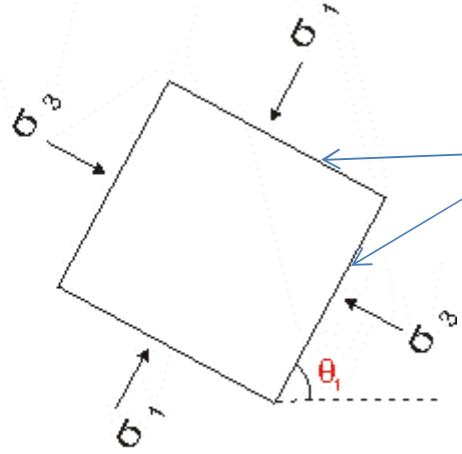
En büyük ve en küçük asal gerilmeler:

$$\Rightarrow \quad \sigma_{\max/\min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \mp \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

σ_1 σ_3



Asal gerilmeler: σ_1 , σ_3



Asal düzlemler

Düzleme etkiyen makaslama gerilmesi (τ_θ) eşitliğinin türevi alınırsa:

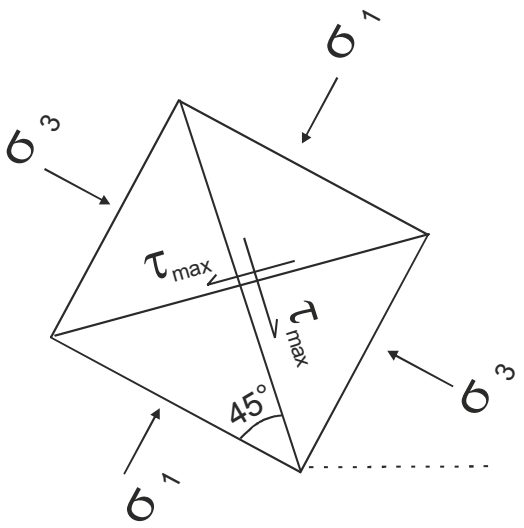
$$\frac{d\tau_\theta}{d\theta} = 2\cos 2\theta \frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2} - 2\tau_{xy}\sin 2\theta = 0$$

En büyük makaslama gerilmelerinin etkidiği düzlemlerin, x veya y düzlemlerinden olan dönme açısı (θ_2):

$$\Rightarrow \quad 2\cos 2\theta \frac{(\sigma_y - \sigma_x)}{2} = 2\tau_{xy}\sin 2\theta \quad \Rightarrow \quad \theta_2 = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2\tau_{xy}}\right)$$

En büyük makaslama gerilmeleri:

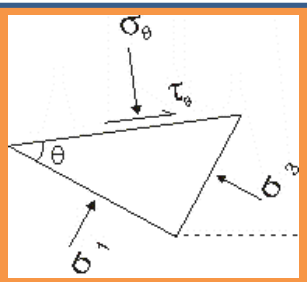
$$\Rightarrow \quad \tau_{max} = \pm\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$



Asal gerilmelerin etkidiği düzlem ile en büyük makaslama gerilmelerinin etkidiği düzlemler arasında 45°'lik bir açı vardır.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \rightarrow \sigma_{\tau_{max}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

Asal gerilmeler ve yönleri biliniyorsa, asal düzlemlere θ açısı kadar bir eğimi olan (birim eleman saat yönünün tersine dönüyor) düzlemde gerilmeler nedir?

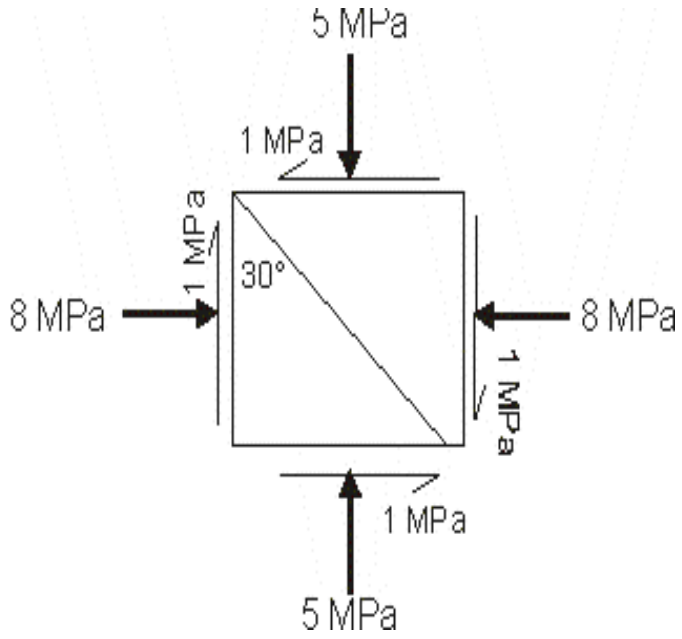


$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\theta \qquad \tau_\theta = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2\theta$$

SORU: Bir noktaya (birim kare elemana) etkiyen gerilmeler aşağıdaki şekilde verilmiştir.

(a) Kare elemanın şekilde görülen düzlemiyle 30° açı yapan düzleme etkiyen gerilmeleri bulunuz.

(b) Bu gerilme ortamındaki asal gerilmeleri ve yönlerini bulunuz. Asal gerilmelerin etkidiği birim kare elemanın, aşağıdaki kare elemana göre konumunu çiziniz.



ÇÖZÜM:

a)

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$
$$= 8.\cos^2 30 + 5.\sin^2 30 + 1.\sin 2\theta$$
$$= 8.116 MPa$$

$$\tau_\theta = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta$$
$$= \left(\frac{5-8}{2}\right)\sin(60) + 1.\cos(60)$$
$$= -0.799 MPa$$

b)

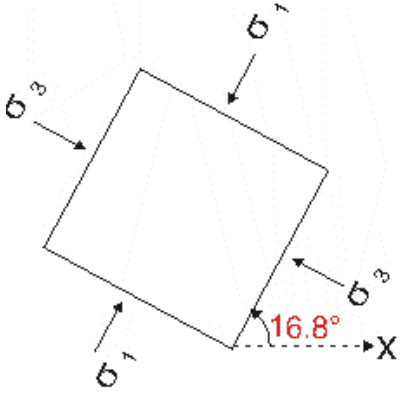
$$\sigma_{max} / \sigma_{min} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \mp \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right)$$

$\sigma_1 = 8.3 MPa$

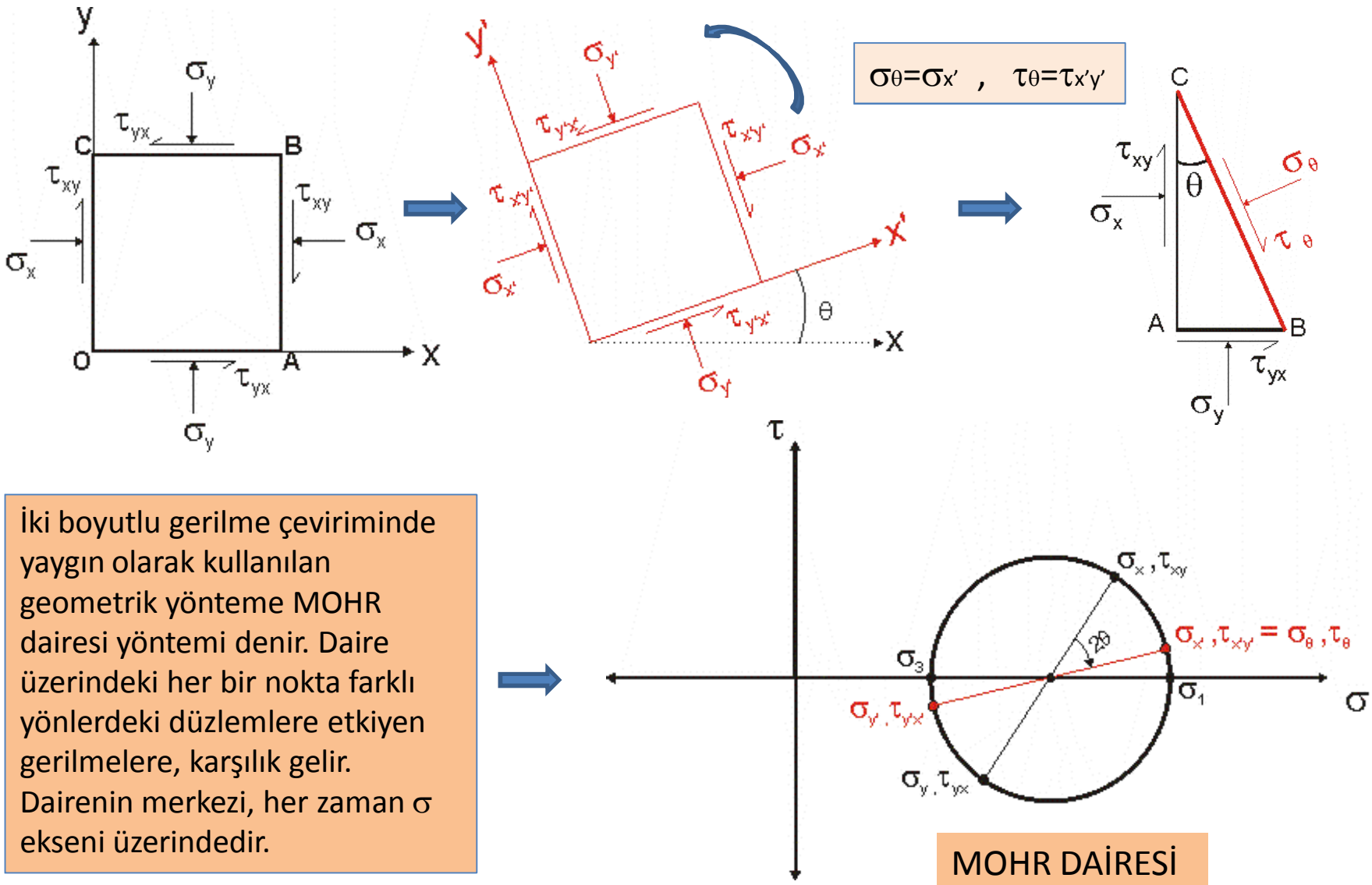
$\sigma_3 = 4.7 MPa$

$\theta_1 = 16.8°$



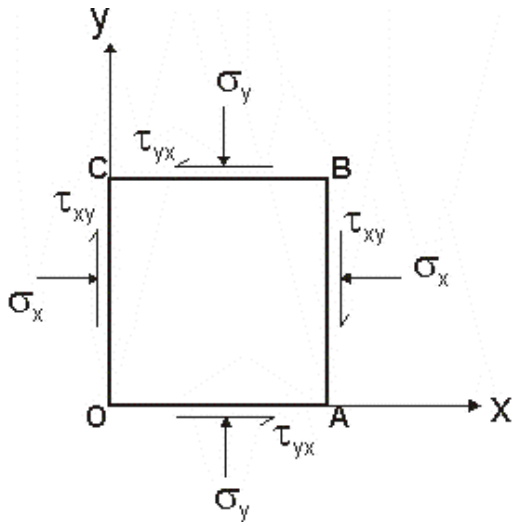
θ_1 pozitif olduğu için kare eleman saat yönünün tersi yönde çeviriliyor.

2.1.2.2. Gerilme Çevirimi - Geometrik Yöntem (MOHR DAİRESİ)



İki boyutlu gerilme çeviriminde yaygın olarak kullanılan geometrik yönteme MOHR dairesi yöntemi denir. Daire üzerindeki her bir nokta farklı yönlerdeki düzlemlere etkiyen gerilmelere, karşılık gelir. Dairenin merkezi, her zaman σ ekseni üzerindedir.

MOHR DAİRESİ



MOHR dairesi çizilirken yapılan KABULLER:

Sıkıştırıcı/basma türündeki normal gerilme pozitif (+), çekme türündeki gerilme negatif (-)'tir. Makaslama gerilmeleri için ise, saat yönünde olanı pozitif(+), saatin tersi yönde olanı negatif (-) olarak kabul edelim.

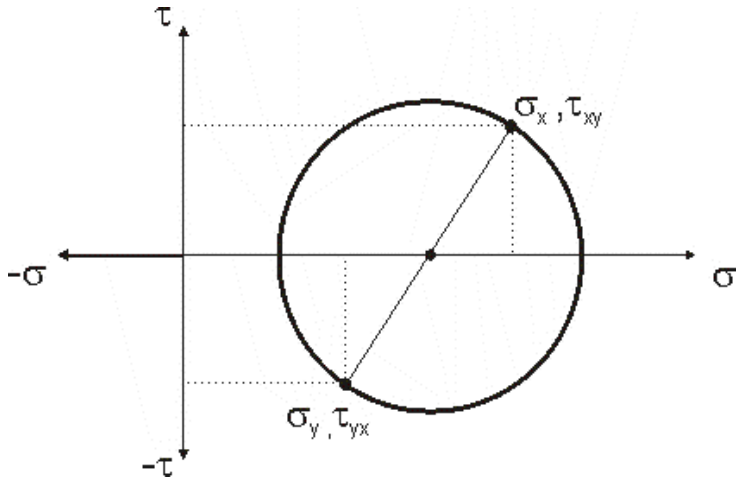
****Önemli:** Literatürde, gerilmelerin türünün ve yönlerinin işaretine ilişkin kabuller farklılık göstermektedir. Kabullere bağlı olarak da Mohr dairesindeki çözümlemeler farklı olacaktır.** Aşağıda verilen adımlar yukarıda yapılan kabuller için geçerlidir.

Mohr dairesi aracılığıyla gerilme çeviriminde izlenecek adımlar:

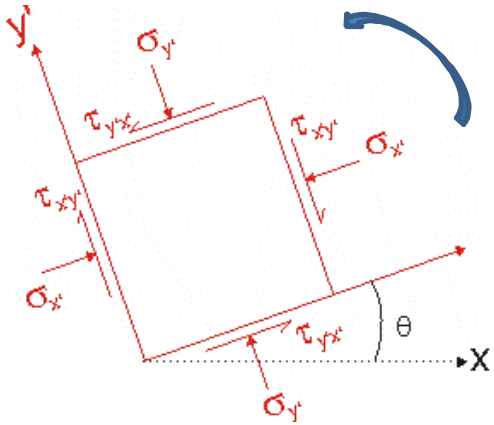
1) Ortogonal eksenler çizilerek dikey eksen τ (makaslama gerilmesi) ve yatay eksen de σ (normal gerilme) olarak isimlendirilir. ***Bu iki eksenin eşit şekilde ölçeklendirilmesi önemlidir.*** σ_x τ_{xy} ve σ_y τ_{yx} çiftlerine karşılık gelen noktalar (x düzlemi ve y düzlemi) belirlenir. Her iki noktadan geçen ve merkezi $(\sigma_x+\sigma_y)/2$ olan daire (Mohr dairesi) çizilir.

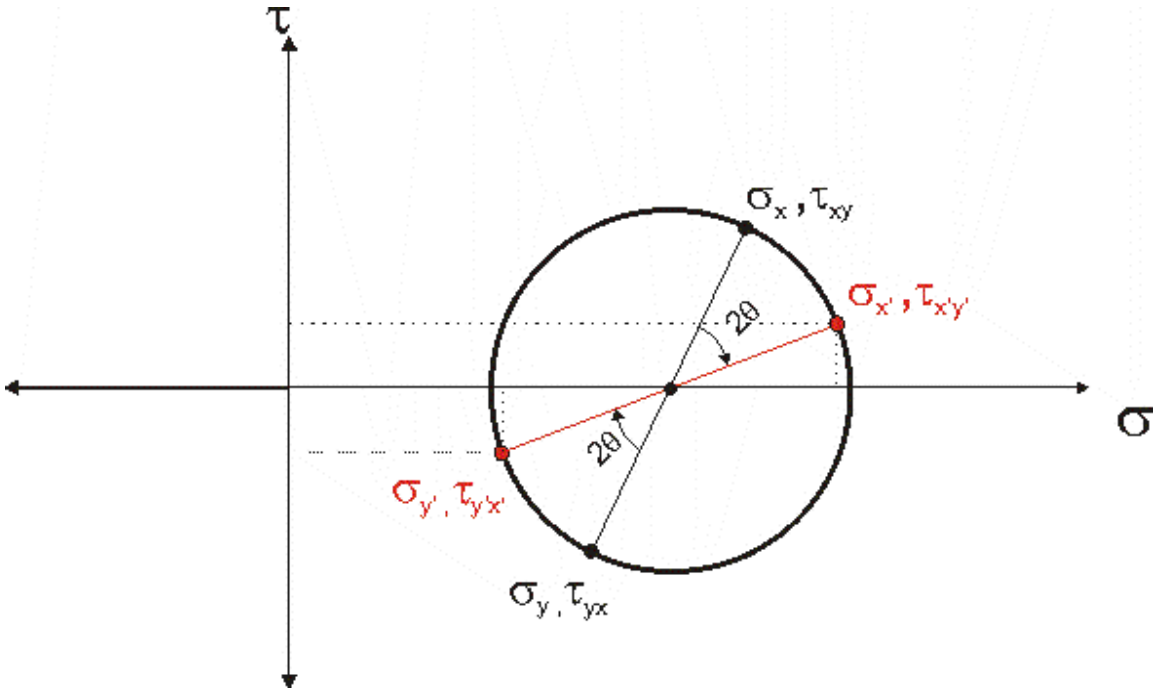
Üstteki birim kare elemana etkiyen gerilmelerin yönleri dikkate alındığında:

σ_x :pozitif τ_{xy} :pozitif
σ_y :pozitif τ_{yx} :negatif

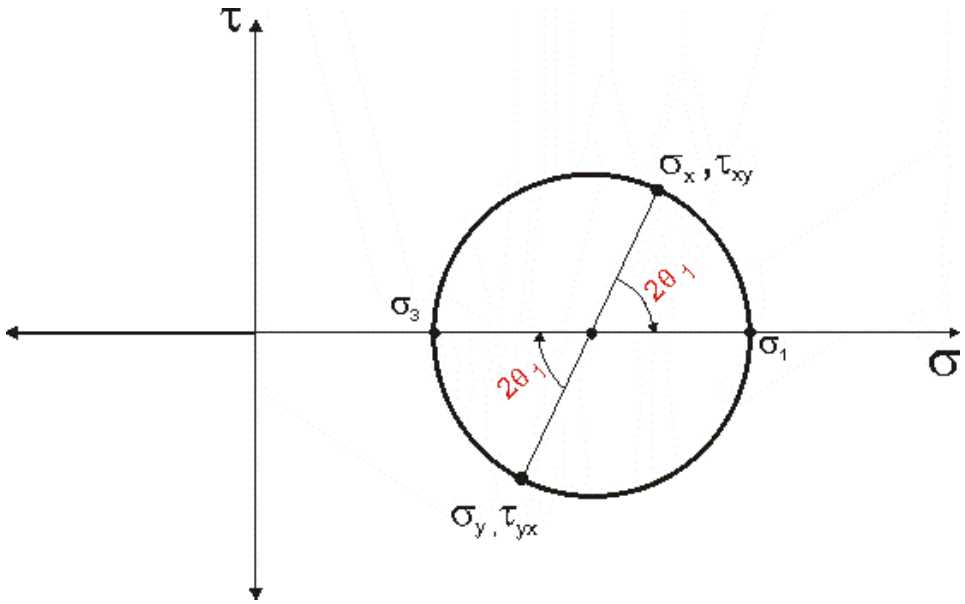


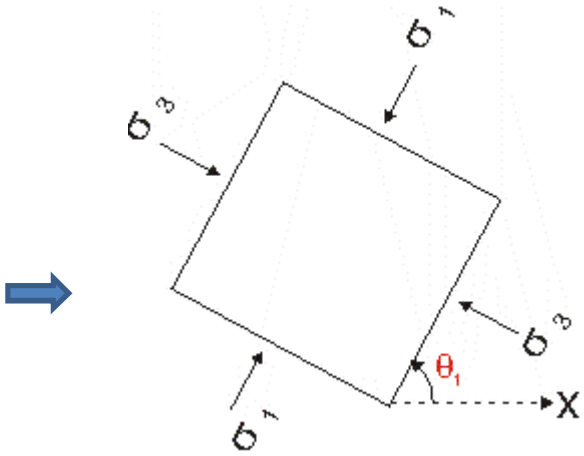
2) xy eksen takımındaki birim kare elamanın saatin tersi yönünde θ açısı kadar döndürülmesi durumunda yeni koordinat sistemindeki (x'y') elemana etkiyen gerilmeleri bulmak için; Mohr dairesi üzerindeki σ_x τ_{xy} noktasından (x düzlemi) saat yönünde 2θ kadar açı ölçülür ve daire üzerindeki yeni nokta (x' düzlemi) işaretlenir. Aynı işlem y düzlemi için de yapılır. Bu noktalar, sırasıyla x' ve y' düzlemlerine etkiyen gerilmelere karşılık gelir. (Eğer birim kare elaman saat yönünde çevrilmiş olsaydı, mohr dairesinde saatin tersi yönünde işlem yapılacaktı.)



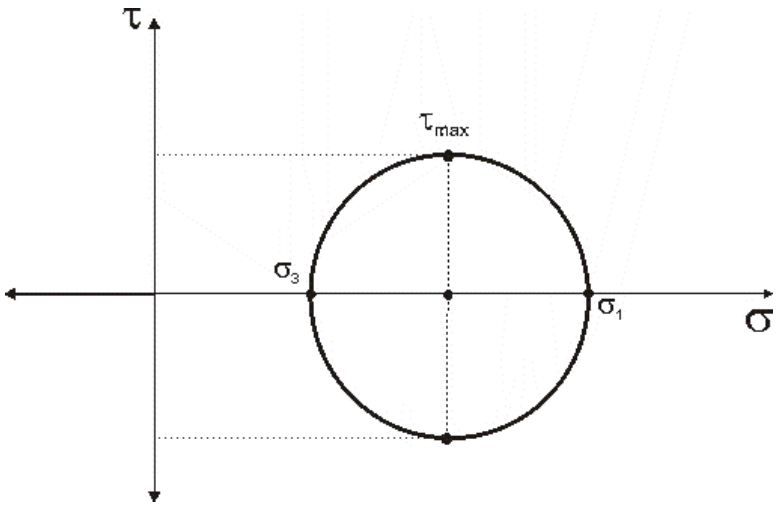


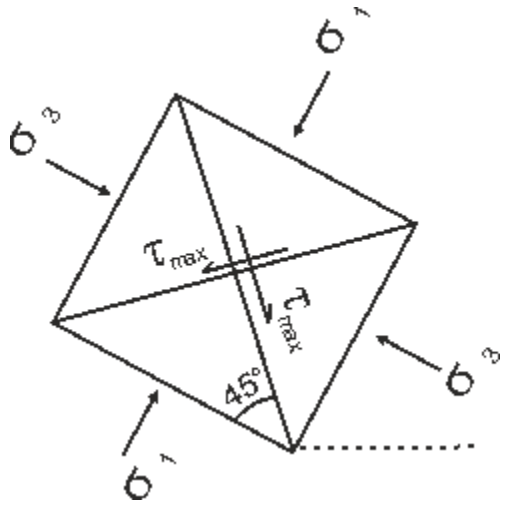
3) Mohr dairesinin yatay ekseni (σ eksenini) kestiği iki nokta asal düzlemlere, bu düzlemelere etkiyen gerilmeler de en büyük ve en küçük asal gerilmelere (σ_1 ve σ_3) karşılık gelir. Mohr dairesi aracılığıyla asal düzlemlerin x ve y ya da x' ve y' düzlemleriyle yaptığı açıyı bulmak mümkündür.



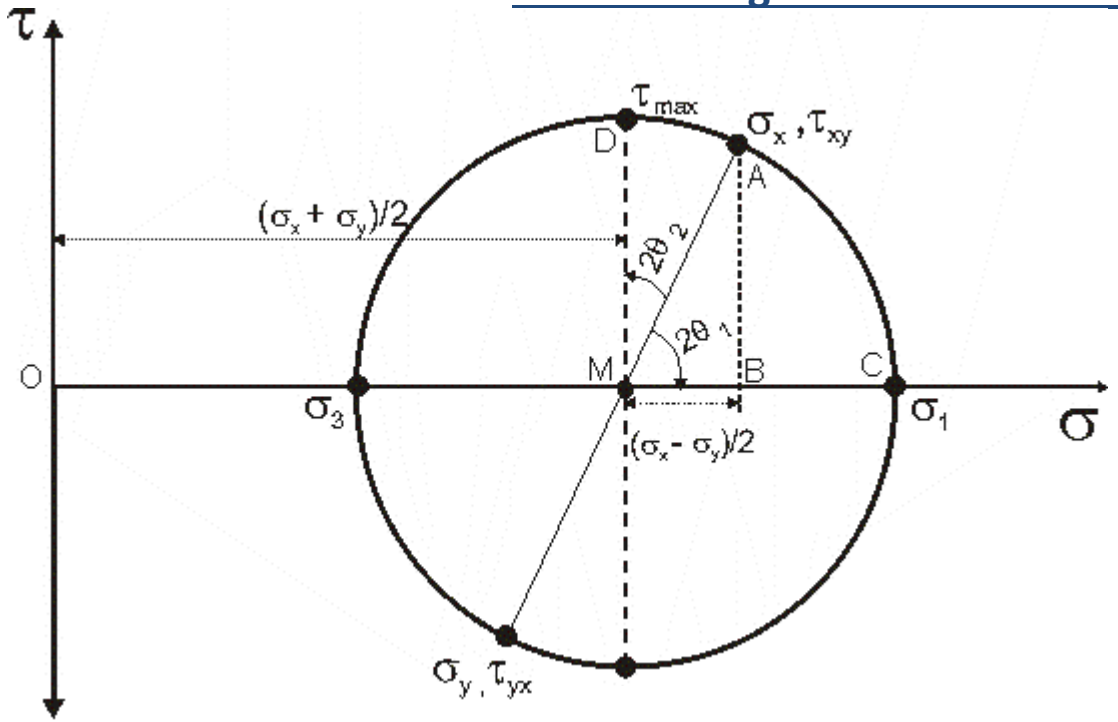


4) Mohr dairesi üzerinde dairenin merkezine karşılık gelen makaslama gerilmeleri, en büyük makaslama gerilmeleridir. Asal düzlemlerle aralarında kare elemanda (gerçekte) 45°, Mohr dairesinde ise bu açının iki katı olan 90° açı vardır.





Mohr dairesinden yararlanılarak asal gerilmeler ile en büyük ve en küçük makaslama gerilmelerinin bulunması:



$$|AB| = \tau_{xy}$$
$$|OM| = (\sigma_x + \sigma_y)/2$$
$$|MB| = (\sigma_x - \sigma_y)/2$$

Mohr dairesinin yarıçapı ⇒ $r = |MD| = |MA| = |MC|$

$$\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^{\ 2} = r^2 \Rightarrow r = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^{\ 2}}$$

$$r = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\cos 2\theta_1$$

Pisagor bağıntısı

Açılar ⇓

$$\tan 2\theta_1 = \frac{\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)/2}$$

$$\tan 2\theta_2 = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)/2}{\tau_{xy}}$$

En büyük ve en küçük makaslama gerilmeleri:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\min} = -\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

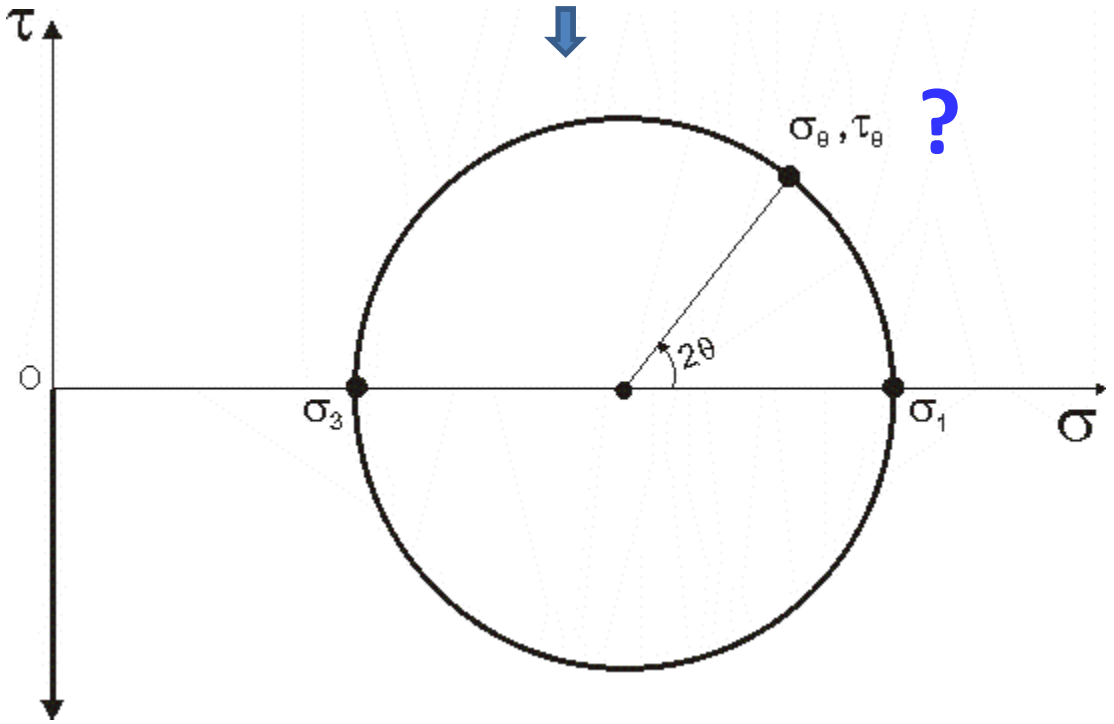
$$\theta_2 = \frac{1}{2}\arctan\left[\frac{-(\sigma_x - \sigma_y)}{2\tau_{xy}}\right]$$

En büyük ve en küçük asal gerilmeler:

$$\sigma_1 / \sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \mp \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\arctan\left[\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right]$$

Asal gerilmelerin bilinmesi durumunda; aşağıda verilen Mohr dairesinde görüldüğü gibi, asal gerilme düzlemleri ile θ kadar bir açısı olan düzlemdeki σ_θ ve τ_θ gerilme eşitliklerinin belirlenmesi? (Mohr dairesi ve trigonometrik ilişkilerden yararlanılarak)



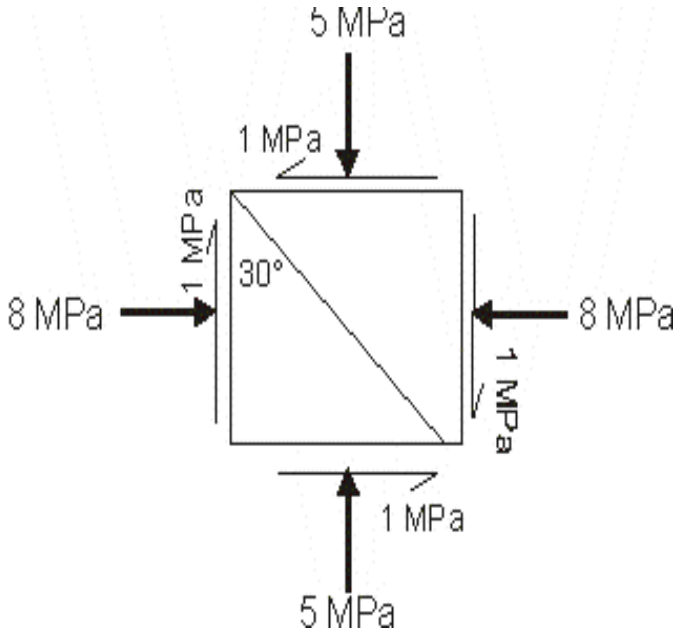
$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta$$

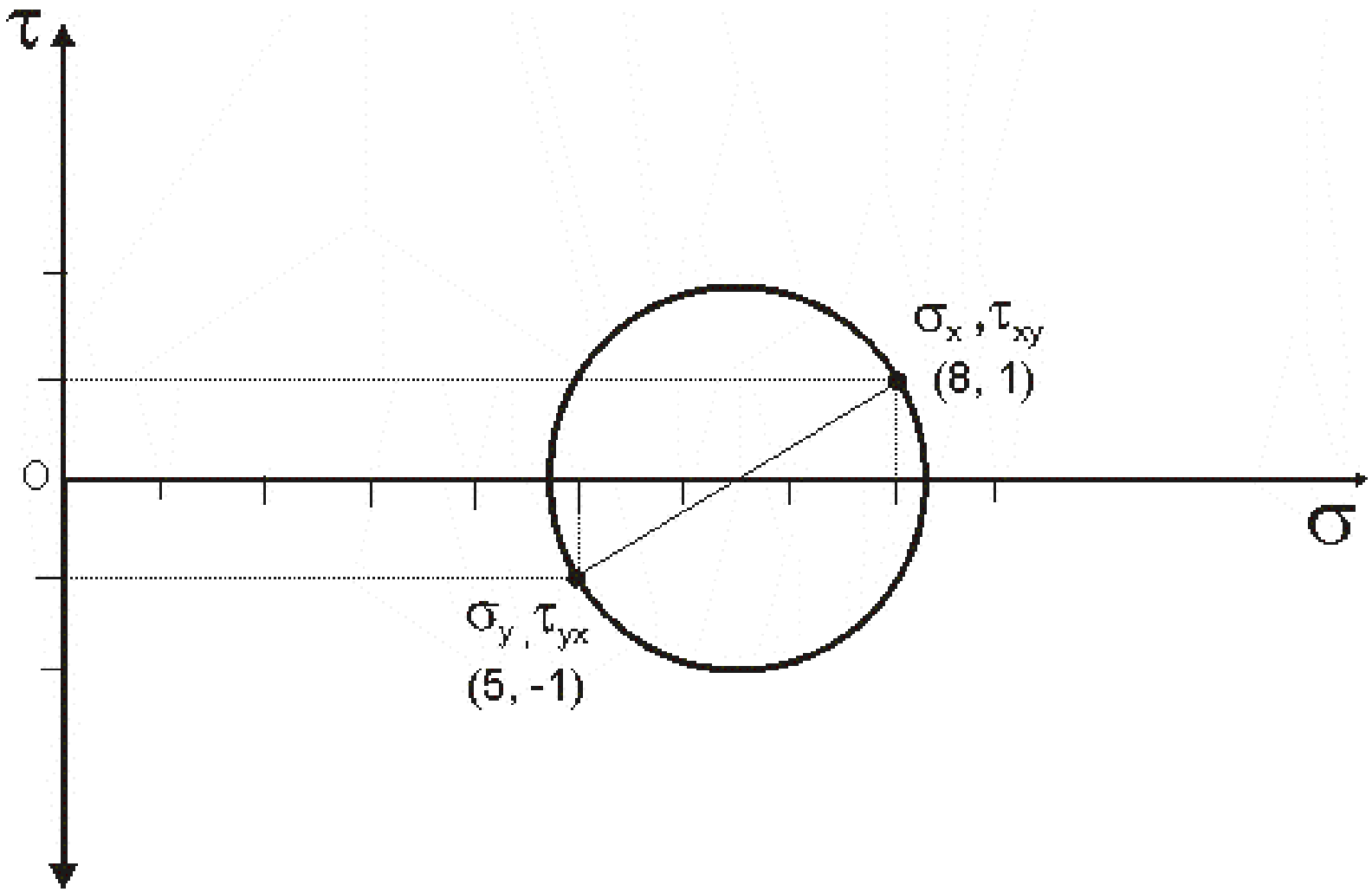
$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta$$

SORU: Bir noktaya (birim kare elemana) etkiyen gerilmeler aşağıdaki şekilde verilmiştir.

(a) Kare elemanın şekilde görülen düzlemiyle 30° açı yapan düzleme etkiyen gerilmeleri, Mohr dairesi yöntemini kullanarak belirleyiniz.

(b) Bu gerilme ortamındaki asal gerilmeleri ve yönlerini Mohr dairesi yöntemiyle bulunuz. Asal gerilmelerin etkidiği birim kare elemanın, aşağıdaki kare elemana göre konumunu çiziniz.





Geriye kalan adımları tamamlayarak çözelim

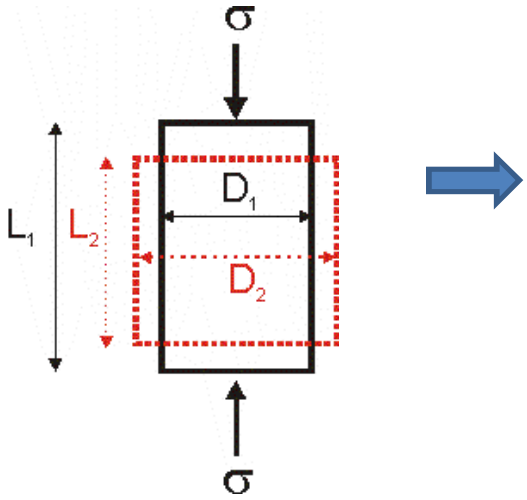
2.2. BİRİM DEFORMASYON (STRAIN)

Deformasyon (deformation), kuvvet etkisi altındaki bir cismin içindeki noktaların göreceli ve/veya mutlak yer değiştirmeleri sonucu cismin şekil ve boyutlarındaki değişimdir.

Cisimlerin deformasyonu, hesaplamalarda kolaylık olması amacıyla birim deformasyon cinsinden ifade edilir.

Birim Deformasyon (ε), gerilme etkisi altındaki bir cismin birim boyut ya da birim şeklindeki değişim. İki çeşit birim deformasyon vardır: *Normal birim deformasyon (boyut değişimine bağlı) ve Makaslama birim deformasyonu (Şekil değişimi - açısal deformasyona bağlı).*

Birim (normal) deformasyon, bir yöndeki uzama veya kısalmanın cismin o yöndeki orijinal boyutuna oranıdır.

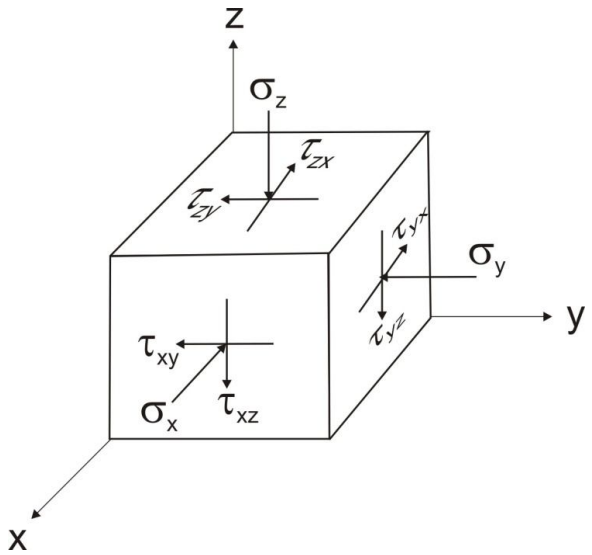


$$\varepsilon_b = \lim_{\Delta L \to 0} \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \frac{\Delta L}{L_1} = \frac{L_1 - L_2}{L_1}$$

$$\varepsilon_e = \lim_{\Delta D \to 0} \frac{\Delta D}{D_1} \rightarrow \frac{\Delta D}{D_1} = \frac{D_2 - D_1}{D_1}$$

1: İlk boyut
2: Deformasyon sonrası boyut

Üç boyutlu birim deformasyonların matematiksel tanımı:



Herhangi bir yönelimdeki koordinatlara uygun üç boyutlu gerilme ortamında, gerilmelerin neden olduğu birim deformasyonlar :

Normal birim deformasyonlar:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \qquad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

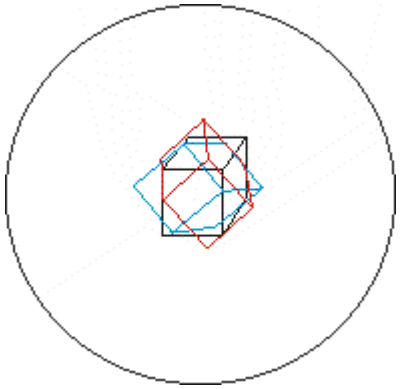
Makaslama birim deformasyonları (Açısal birim deformasyonlar):

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \qquad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \qquad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

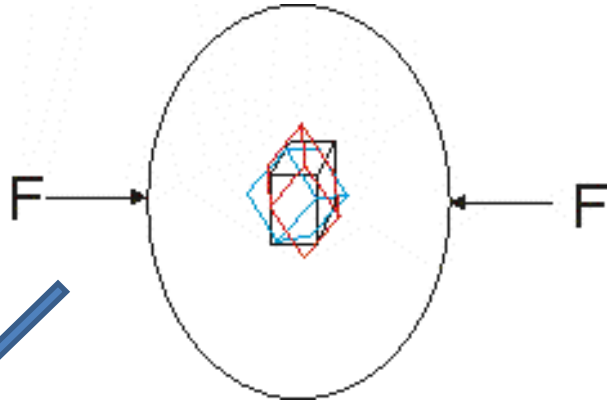
$\varepsilon_{xy} = \gamma_{xy}/2$ $\varepsilon_{yz} = \gamma_{yz}/2$ $\varepsilon_{zx} = \gamma_{zx}/2$

Üç boyutlu gerilme ortamının ifade edildiği gibi, birim deformasyonlar da ifade edilebilir.

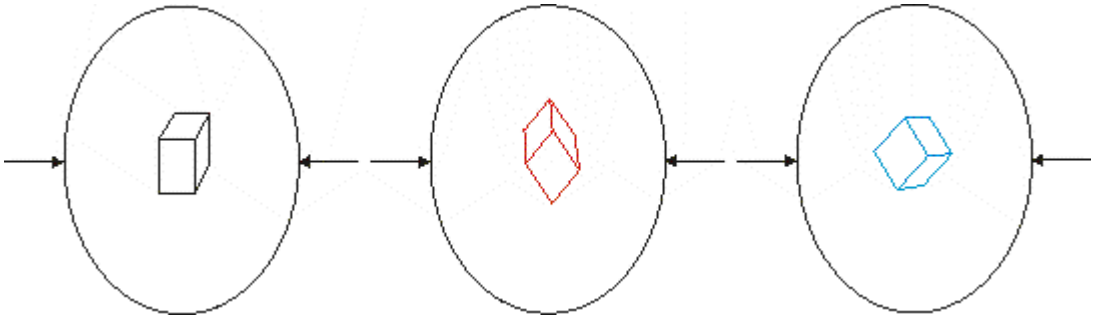
Bir kütle içinde farklı konumlardaki birim kübik elemanlar



Kütle herhangi bir yönde kuvvet etkisine maruz kaldığında



Farklı konumlardaki birim kübik elemanlardaki boyut ve şekil değişimi farklılığı



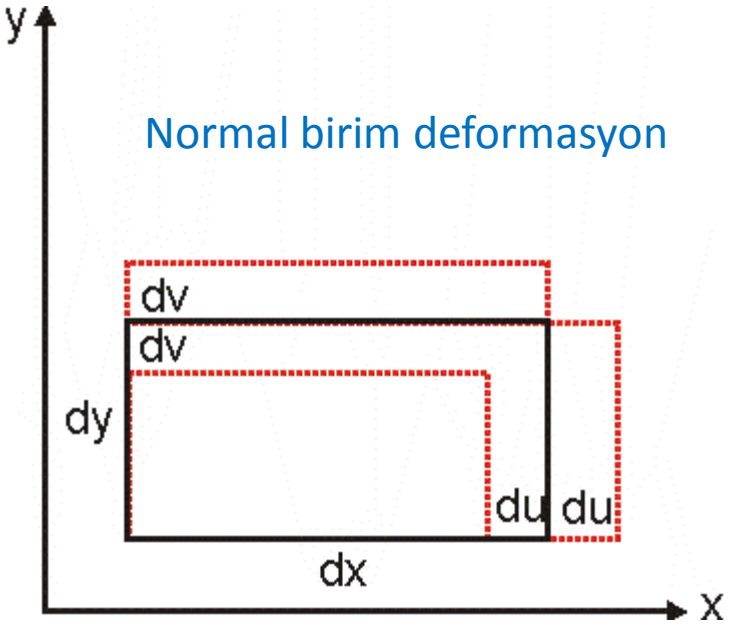
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

Birim deformasyon matrisi

Üç boyutlu birim deformasyon çevirim ilkeleri, üç boyutlu gerilme çevirim ilkelerine benzer şekilde yapılır.

İki boyutta birim deformasyonlar

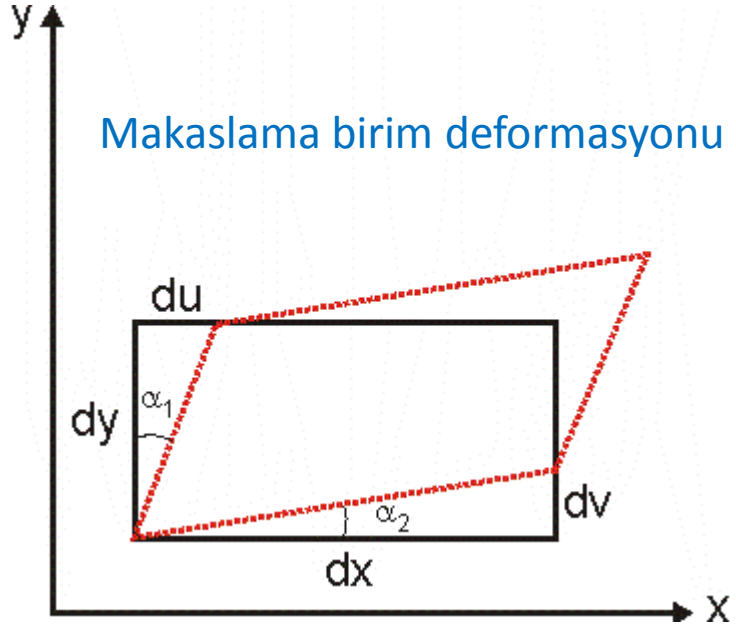
Normal birim deformasyon



x ve y yönlerindeki normal birim deformasyonlar

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \qquad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy}$$

Makaslama birim deformasyonu



Makaslama birim deformasyonu (γ_{xy}), her iki düzlemdeki açısal değişimin toplamıdır.

$$\tan\alpha_1 = \frac{du}{dy}$$

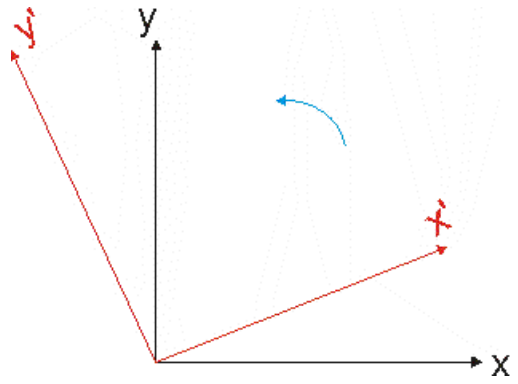
$$\tan\alpha_2 = \frac{dv}{dy}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy}$$

İki boyutta gerilmelere karşılık gelen birim deformasyon bileşenleri ➔ ε_x, ε_y, ε_{xy}

$\varepsilon_{xy} = \gamma_{xy}/2$

Birim deformasyon çevirim ilkeleri, gerilmelerde olduğu gibidir: İki boyutta x-y ekseni boyunca gelişen birim deformasyonlar, x ekseni ile saat yönüne ters yönde θ kadar bir açısı olan x' yönündeki birim deformasyonlara aşağıdaki eşitliklerle çevirilir.



$$\varepsilon_{x'} = \varepsilon_x \cos^2\theta + \varepsilon_y \sin^2\theta + 2\varepsilon_{xy} \sin 2\theta$$

$$\varepsilon_{x'y'} = -\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)\sin 2\theta + \varepsilon_{xy} \cos 2\theta$$

Asal eksenlerdeki en büyük ve en küçük birim deformasyonlar ile asal eksenlerin x-y koordinatları ile olan açısı:

$$\varepsilon_1 = (1/2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{\varepsilon_{xy}{}^2 (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2}$$

$$\varepsilon_3 = (1/2)(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - \sqrt{\varepsilon_{xy}{}^2 (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2}$$

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}\right)$$

Gerilmelerde de olduğu gibi:

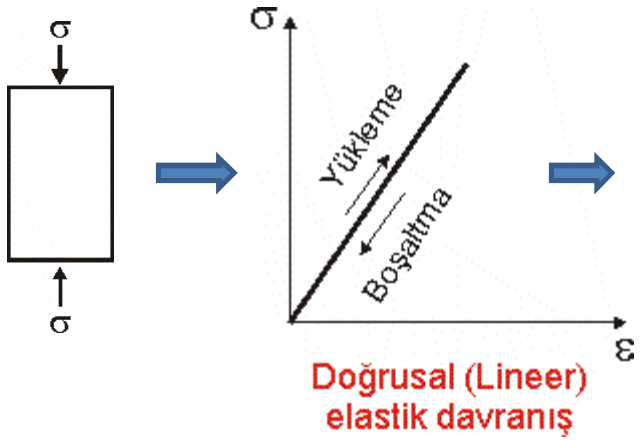
$$(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = (\varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'}) = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

Mohr dairesi birim deformasyon çevirimleri için de kullanılabilir.

2.3. GERİLME - BİRİM DEFORMASYON DAVRANIŞLARI

Önceki alt bölümlerde; gerek gerilme, gerekse birim deformasyon kavramları irdelendi ve denge gereği her birinin kendi içindeki çevirim ilişkilerine değinildi. Bu alt bölümde ise, bir malzemenin gerilmeye maruz kalması durumunda ne tür deformasyon (dolayısıyla birim deformasyon) davranışları sergileyebileceği, temel düzeyde irdelenecektir.

- Elastik (Elastic) davranış: Gerilme etkisiyle şekil değişikliğine uğrayan, etki kalktıktan sonra tekrar orijinal şekline dönen cisme elastik cisim, bu cismin davranış şekline ise elastik (birim) deformasyon denir.

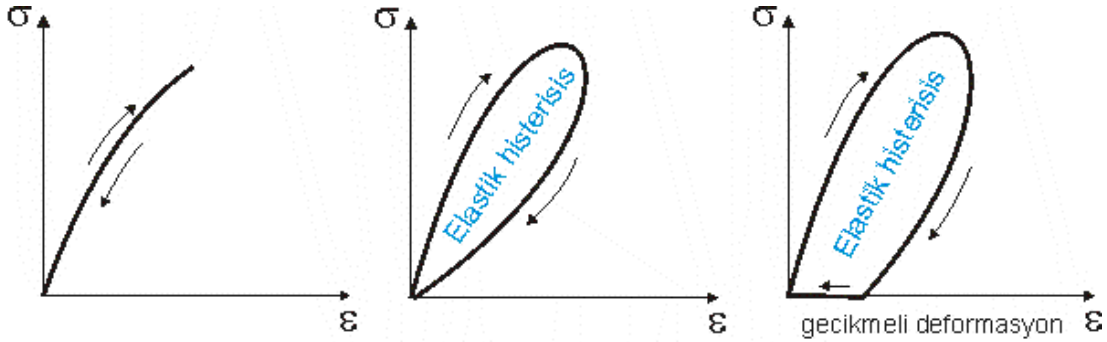


Bu tür davranış gösteren malzeme Hooke katısı olarak bilinir

$\sigma = E.\varepsilon$

E: Elastik modül

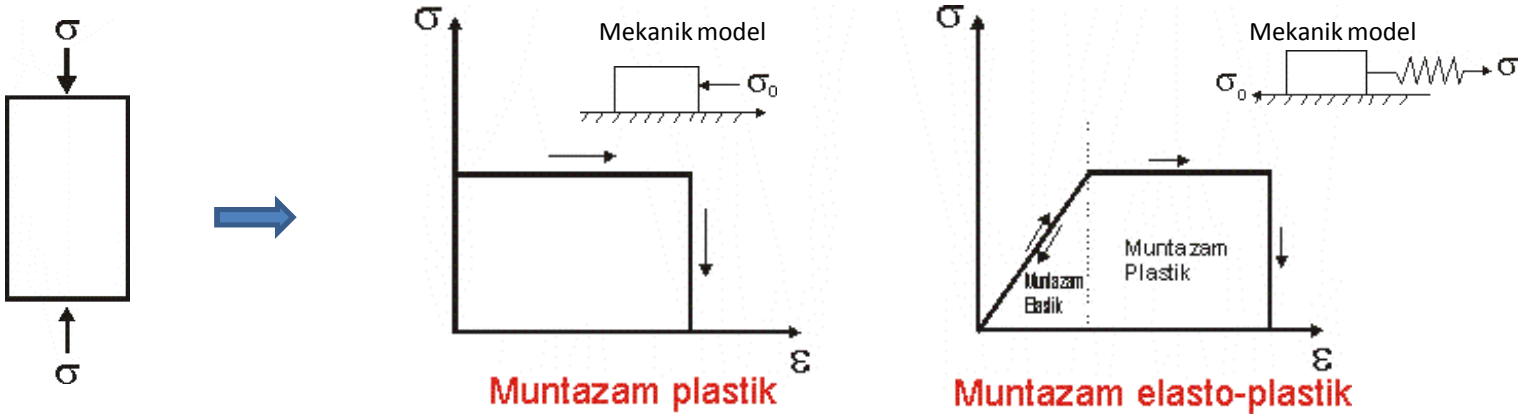
Mekanik model:

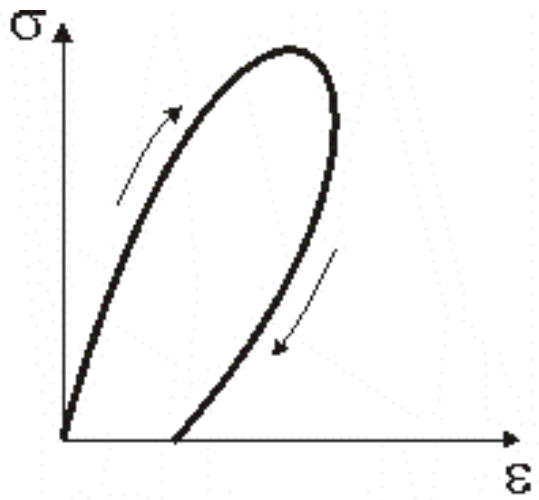


Doğrusal olmayan elastik davranış

Elastik histerisis: Gerilme enerjisi ile bu gerilmedeki *elastik* enerji arasındaki fark.

- Plastik ve elasto-plastik davranış: Yükleme sırasında oluşan birim deformasyon, boşaltma sırasında hiç kazanılamıyorsa muntazam plastik davranış söz konusudur. Malzeme belirli bir gerilmeye kadar muntazam elastik, sonrasında muntazam plastik davranış gösteriyorsa, muntazam elasto-plastik davranış söz konusudur.





Kaya malzemesinin davranışı, gerilme artışına bağlı olarak farklılık gösterir. Gerilmenin belirli bir değerine kadar elastik, sonrasında elasto-plastik ve plastik davranışlar sergiler. Bu konu 3. Bölüm'de daha ayrıntılı irdelenecektir.

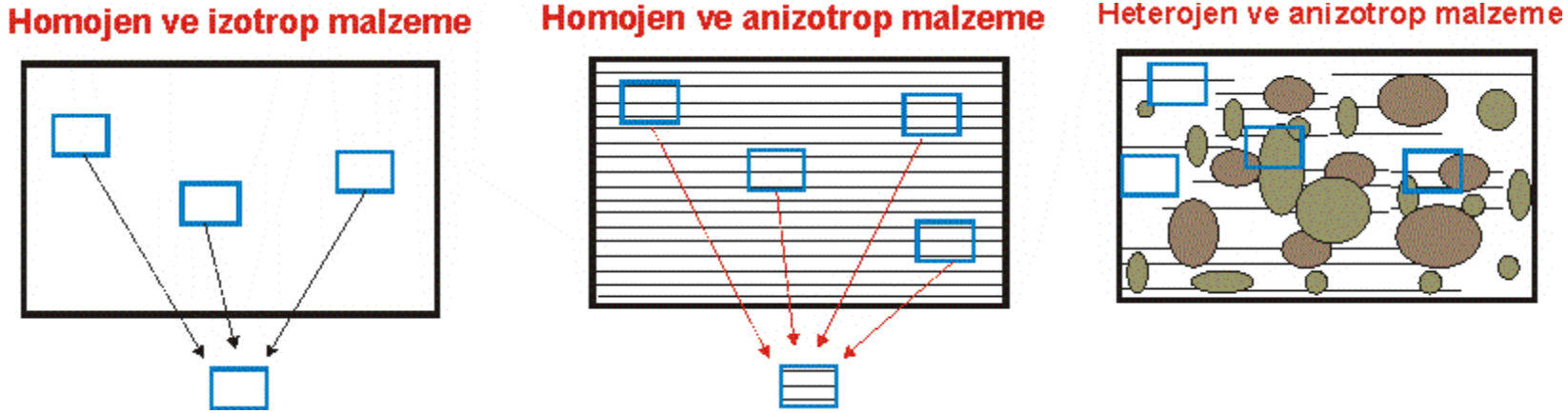
NOT:

Elastik ve plastik davranışların yanı sıra, viskoz davranış modeli de söz konusudur. Ayrıca, bu temel üç davranış modelinden daha fazla birleşik ideal modeller de türetilebilmektedir. Ancak, bu konulara bu ders kapsamında girilmeyecektir.

2.4. GERİLME - BİRİM DEFORMASYON İLİŞKİLERİ

Bu bölümde, elastisite teorisi dikkate alınarak, gerilme birim deformasyon ilişkilerine değinilecektir. Temel Elastisite teorisinde katı maddelerin, doğrusal elastik (Hooke yasasına uygun), homojen ve izotrop olduğu varsayılır. Homojen, doğrusal elastik ancak izotrop olmayan malzemeler için de uygulanabilir.

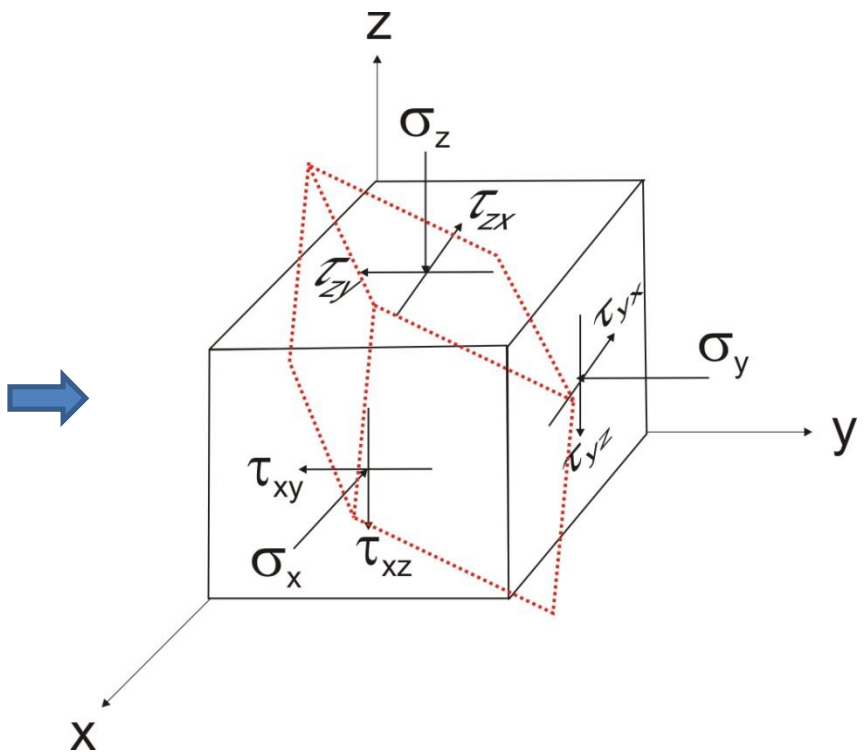
Homojen malzeme: Bir malzemenin özelliklerinin her noktasında aynı olması.
Homojen olmayan (heterojen) malzeme : Bir malzemenin özelliklerinin farklı noktalarında farklılık göstermesi.
İzotrop malzeme: Bir malzemenin özelliklerinin her yönde aynı olmasına izotropi, bu özelliğe sahip cisme de izotrop cisim (malzeme) denir.
Anizotrop malzeme: Bir malzemenin özelliklerinin yönlere bağlı olarak farklılık göstermesine anizotropi, bu özellikteki bir cisme de anizotrop cisim (malzeme) denir.



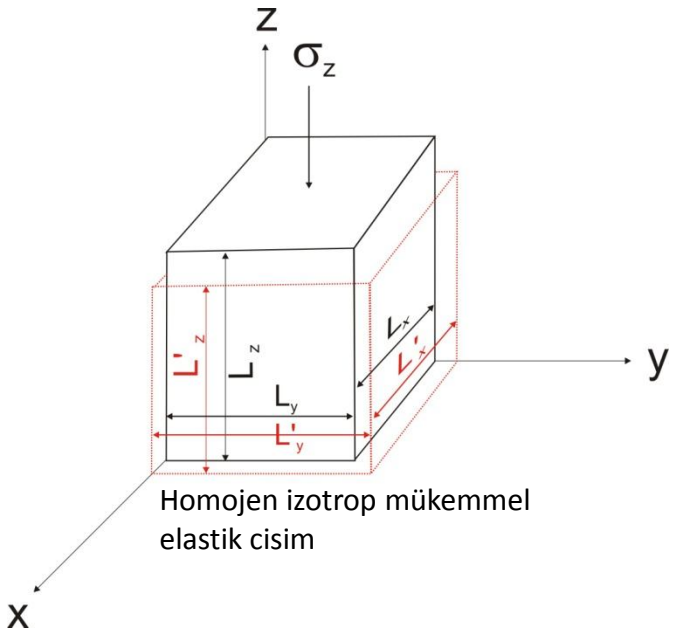
Hiç bir doğal ya da yapay malzeme elastisite teorisindeki varsayımları tam anlamıyla sağlamaz. Ancak, belirli düzeydeki hata payları gözardı edilerek, mekanikte elastisite teorisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu derste; malzemenin homojen, izotrop ve Hooke yasasına uygun davrandığı düşünülerek gerilme – birim deformasyon ilişkileri anlatılmıştır. İzotrop olmayan ortamlar için de elastik çözümlemeler mevcut olup ders kapsamında önerilen kaynaklardan yararlanılabilir.

Üç boyutlu Gerilme - birim deformasyon durumu

Üç boyutlu gerilme etkisindeki bir elemanda boyut ve şekil değişikliğinin temsili gösterimi



Gerilme - birim deformasyon eşitlikleri



Homojen izotrop mükemmel elastik cisim

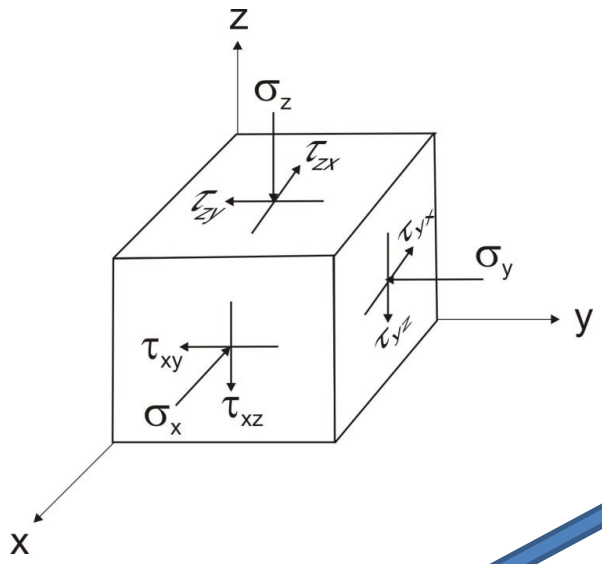
Rijit olmayan, homojen ve izotrop bir cisim yandaki şekilde görüldüğü gibi z yönünde normal gerilmeye maruz kaldığında, her yönde deformasyona, dolayısıyla birim deformasyona uğrar. Hooke yasasının geçerli olduğu varsayıldığında, uygulanan gerilme yönündeki birim deform $\varepsilon_z=\sigma_z/E$

x ve y yönündeki birim deformasyonlar ise:

$\varepsilon_x=-\nu(\sigma_z/E)$ $\varepsilon_y=-\nu(\sigma_z/E)$ eşitlikleriyle belirlenir.

Kısalmayı pozitif (+), uzamayı ise negatif (-) alıyoruz.

Bu eşitliklerdeki E ve ν, sırasıyla ELASTİK MODÜL ve POİSSON ORANI değerleridir. Bu parametrelere elastik teoride malzemenin (cisim) iki temel elastik sabiti denir. Elastik modül, kayanın sertliğinin bir ifadesidir. Kaya ne kadar sert ise, değeri o kadar büyüktür. Dolayısıyla, sert kayalar gerilmeye maruz kaldıklarında daha az birim deformasyon gözlenirken, yumuşak kayalarda birim deformasyon daha fazla olacaktır. Poisson oranı ise, gerilmeye dik yöndeki birim deformasyonun gerilme yönündeki birim deformasyona oranıdır. Değeri yüksek olan kayalarda yanal yöndeki birim deformasyon daha fazla gözlenir. Sert kayalarda değeri düşük, yumuşak kayalarda daha yüksektir. Kayalar için Poisson oranı genel olarak 0.18 -0.35 arasındadır.



Diğer iki yöndeki normal gerilmelerin (σ_x ve σ_y) neden olduğu normal birim deformasyonlar:

σ_x gerilmesinden kaynaklanan birim deformasyonlar:

$\varepsilon_x=\sigma_x/E$ $\quad \varepsilon_y=-\nu(\sigma_x/E)$ $\quad \varepsilon_z=-\nu(\sigma_x/E)$

σ_y gerilmesinden kaynaklanan birim deformasyonlar:

$\varepsilon_y=\sigma_y/E$ $\quad \varepsilon_x=-\nu(\sigma_y/E)$ $\quad \varepsilon_z=-\nu(\sigma_y/E)$

x, y ve z yönlerindeki normal birim deformasyonların toplamı:

$$\Sigma\,\varepsilon_x = -\nu(\sigma_z/E) + \sigma_x/E - \nu(\sigma_y/E)$$

$$\Sigma\,\varepsilon_y = -\nu(\sigma_z/E) + \sigma_y/E - \nu(\sigma_x/E)$$

$$\Sigma\,\varepsilon_z = \sigma_z/E - \nu(\sigma_x/E) - \nu(\sigma_y/E)$$

Üç boyutta normal gerilmelerin neden olduğu normal birim deformasyonlar:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu\left(\sigma_y + \sigma_z\right)\right]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu\left(\sigma_x + \sigma_z\right)\right]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu\left(\sigma_x + \sigma_y\right)\right]$$

Makaslama birim deformasyonları:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} \Big/ \left[\frac{E}{2(1+\nu)}\right] = \tau_{xy} / G$$

$$\gamma_{yz} = \tau_{yz} \Big/ \left[\frac{E}{2(1+\nu)}\right] = \tau_{yz} / G$$

$$\gamma_{zx} = \tau_{zx} \Big/ \left[\frac{E}{2(1+\nu)}\right] = \tau_{zx} / G$$

Rijidite ya da Makaslama Modülü (Rigidity/Shear Modulus):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Hatırlatma:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy} \quad \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$$

$$\varepsilon_{xy} = \gamma_{yx}/2 \quad \varepsilon_{yz} = \gamma_{zy}/2 \quad \varepsilon_{yz} = \gamma_{zy}/2$$

Dilatasyon (hacimsel birim deformasyon) (e)
(Normal birim deformasyonların toplamı)

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$e = \frac{(1-2\nu)}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

Bulk ya da Hacimsel Esneme Modülü (Bulk Modulus):

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$e = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3K$$

Özel durum için: Hidrostatik gerilme ortamı $(\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z)$

$$e = \sigma / K$$

Gerilmelerin birim deformasyon cinsinden eşitlikleri ise:

$$\sigma_x = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1+\nu}\cdot\varepsilon_x$$

$$\sigma_y = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1+\nu}\cdot\varepsilon_y$$

$$\sigma_z = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{E}{1+\nu}\cdot\varepsilon_z$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy} \qquad \tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{yz} \qquad \tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\mu)}\gamma_{zx}$$

Lame sabiti (λ)

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)\cdot(1-2\nu)}$$

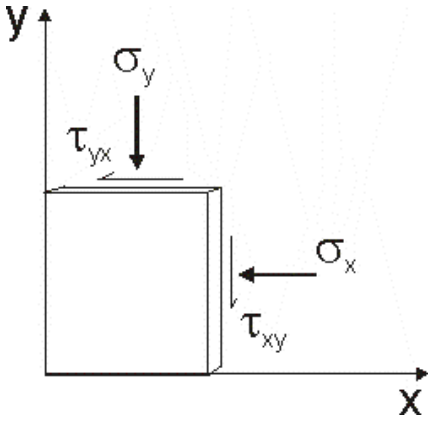
$$\sigma_x = \lambda \cdot e + 2G \cdot \varepsilon_x \qquad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}$$

$$\sigma_y = \lambda \cdot e + 2G \cdot \varepsilon_y \qquad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}$$

$$\sigma_z = \lambda \cdot e + 2G \cdot \varepsilon_z \qquad \tau_{zx} = G\gamma_{zx}$$

İki boyutlu Gerilme Durumları için Özel Gerilme – Birim Deformasyon İlişkileri:

Düzlemsel gerilme (PLANE STRESS) durumu: İki yönde gerilmenin etkidiği, üçüncü yönde (düzleme dik yönde) gerilmenin etkimediği (sıfır olduğu) durum. Mühendislik uygulamalarında bu duruma benzer problemlerle karşılaşılır. Bütün gerilme bileşenleri düzlemine paralel etkiyen ince bir plaka, bu duruma tipik bir örnektir. $\sigma_z=0\ \tau_{xz}=0\ \tau_{yz}=0$



$$\varepsilon_x=\frac{1}{E}\left(\sigma_x-\nu\cdot\sigma_y\right)\quad \varepsilon_y=\frac{1}{E}\left(\sigma_y-\nu\cdot\sigma_x\right)\quad \varepsilon_z=-\frac{\nu}{E}\left(\sigma_x+\sigma_y\right)\quad \gamma_{xy}=\tau_{xy}/G$$

Düzlemsel birim deformasyon (PLANE STRAIN) durumu:
Bir düzleme dik yöndeki birim deformasyonlar sıfır alınırsa, düzlemsel birim deformasyon hali oluşur. Bu duruma, uzun yatay tüneller tipik bir örnektir. $\gamma_{xz}=\gamma_{yz}=0$ & $\varepsilon_z=0$

$$\varepsilon_x=\frac{1}{E}\left[\left(1-\nu^2\right)\cdot\sigma_x-\nu\left(1+\nu\right)\cdot\sigma_y\right]$$

$$\varepsilon_y=\frac{1}{E}\left[\left(1-\nu^2\right)\cdot\sigma_y-\nu\left(1+\nu\right)\cdot\sigma_x\right]$$

$$\gamma_{xy}=\tau_{xy}/G$$

$$\sigma_z=\nu(\sigma_x+\sigma_y)$$

Bölüm 3

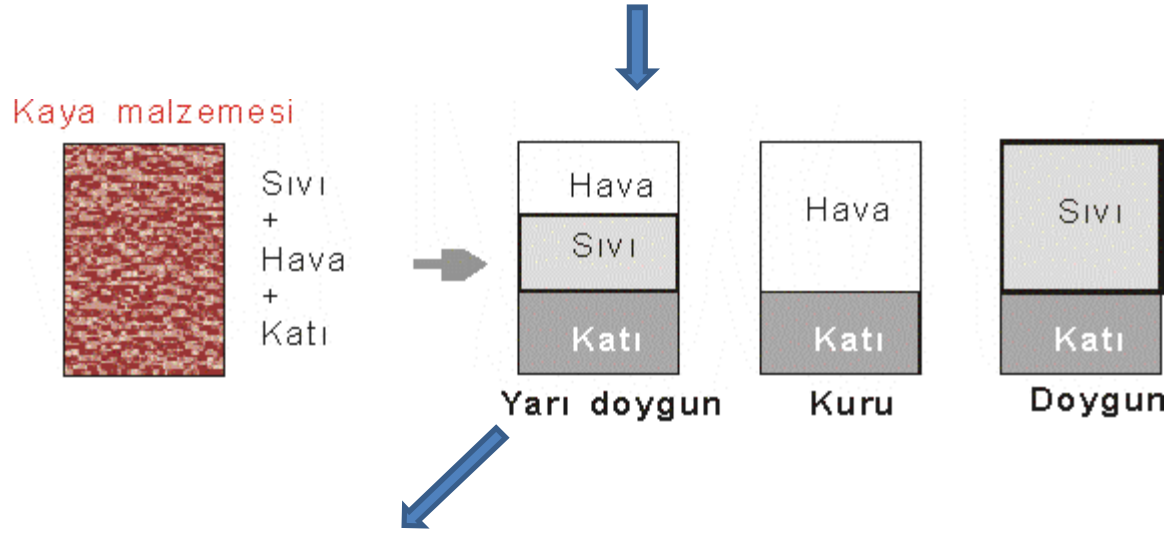
Kaya Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Kaya malzemesinin tanımlanması amacıyla, jeoloji mühendisliğinin farklı alt disiplinlerinde farklı özellikleri dikkate alınabilmektedir. Örneğin; kayanın türü, rengi, dokusu ve yapısı, sertliği, tane veya mineral boyutu, minerallerinin kristal yapısı ve bozunma durumu, vb. özellikler dikkate alınmaktadır. Kaya mekaniğinde kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri kapsamında ise; daha çok kayanın gerilme etkisi altında mekanik davranışında rol oynayan başlıca fiziksel ve mekanik özellikler dikkate alınacaktır.

3.1. KAYA MALZEMESİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Kaya mekaniğinde kaya malzemesinin fiziksel özellikleri (parametreler) denilince, özgül ağırlığı, yoğunluğu, birim hacim ağırlığı, gözenekliliği, geçirgenliği gibi özellikler ve içerdiği su içeriğine bağlı olarak bu özelliklerden bazılarındaki değişimler akla gelmektedir.

Kaya malzemesi, kaya taneleri ve/veya mineraller ile boşluklardan oluşmakta olup, boşluklarında sıvı ve/veya hava bulunmaktadır.



Hacim – Kütle/Ağırlık Diyagramı

	Hacim			Ana ögeler	Kütle		Ağırlık	
Boşluk	V_T	V_v	V_a	Hava	0	M_T	0	W_T
			V_w	Sıvı	M_w		W_w	
Katı		V_s	V_s	Katı	M_s		W_s	

Yandaki diyagramda kayanın yarı doygun, kuru ve doygun olması durumları ile çeşitli kısımlarının hacim ve ağırlık cinsinden simgesel olarak gösterilişi verilmiştir. Burada kullanılan indisler birçok yayında da kullanılmasına rağmen bazılarında farklılık göstermektedir. Bu nedenle; bu durumun gözönünde bulundurulması ve ilerleyen kısımlarda verilen ilişkilerin temel felsefesi öğrenilerek literatüre yabancılık çekilmemesi önerilir.

Yoğunluk (Density) (ρ): Birim hacimdeki kütle (g/cm³, kg/cm³, ton/m³, vs.)

$$\rho = \frac{M_T}{V_T}$$

Suyun yoğunluğu: 1 g/cm³

Birim Hacim Ağırlık (Unit weight) (γ): Birim hacimdeki ağırlık (N/m³, kN/m³, vs.)

$$\gamma = \frac{W_T}{V_T}$$

Suyun birim hacim ağırlığı: 9.81 kN/m³

Islak birim hacim ağırlık (γ_{wet}): Boşluklarının bir kısmı su ile dolu olan (yarı doygun) kaya örneğinin ağırlığının hacmine oranı.

Doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat}): Doygun haldeki kaya örneğinin ağırlığının hacmine oranı.

Kuru birim hacim ağırlık (γ_{dry}): Kuru kaya örneğinin ağırlığının hacmine oranı.

Özgül Ağırlık (Specific gravity) (G_s): Katı kısmın ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranıdır. Diğer bir ifade ile, maddenin/materyalin ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığının kaç katı olduğunun bir ölçüsüdür. (Birimsiz)

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w}$$

Porozite/Gözeneklilik (Porosity) (n): Boşluk hacminin toplam hacme oranıdır. (%)

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

Boşluk Oranı (Void ratio) (e): Boşluk hacminin katı kısmın hacmine oranıdır. (%)

$$e = \frac{V_v}{V_k}$$

Nem/Su İçeriği (Water content) (w): Kaya örneğinin içerdiği suyun ağırlığının katı kısmın ağırlığına oranıdır. (%)

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

Doygunluk derecesi (Degree of saturation) (S_r):
Su hacminin boşluk hacmine oranı. (%)

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

Kayaların fiziksel özelliklerinin tanımları ve formülasyonları yukarıda verilmiş olmakla birlikte pratikte bazı hacimlerin (boşluk hacmi gibi) dolayısıyla bazı fiziksel özelliklerin belirlenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle, fiziksel özellikler arasında bazı ilişkiler kurularak az sayıda özellik bilindiği taktirde diğer fiziksel özellikler de belirlenebilmektedir. Bunun için iki farklı yaklaşım bulunmaktadır.

Fiziksel Özellikler Arasındaki İlişkiler

1. YAKLAŞIM: ***V_s=1*** *birim alınırsa aşağıdaki ilişkiler kurulabilir.*

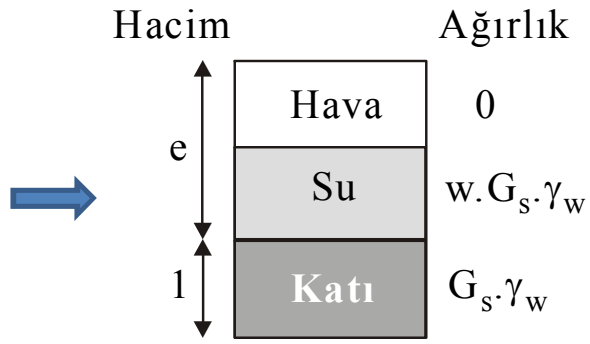
$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{1} \Rightarrow \mathbf{V_v = e}$$

$$G_s = \frac{W_s}{V_s.\gamma_w} = \frac{W_s}{1.\gamma_w} \Rightarrow \mathbf{W_s = G_s.\gamma_w}$$

Suyun Birim hacim ağırlığı (γ_w): 9.81 kN/m³

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_w}{G_s.\gamma_w} \Rightarrow \mathbf{W_w = w.G_s.\gamma_w}$$

Bu durumda kaya malzemesini oluşturan ögelerin hacim ve ağırlıklarını aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür.



Buradan, fiziksel özelliklerin tanımları dikkate alınarak eşitlikleri yeniden düzenlenirse,

Islak Birim Hacim Ağırlık
(Kaya malzemesi yarı doygun halde)

$$\gamma_{wet} = \frac{\text{Toplam Ağğırlık}\,(w.G_s.\gamma_w + G_s.\gamma_w)}{\textit{Toplam Hacim}\,(1+e)}$$

$$\gamma_{wet} = \frac{G_s(1+w)}{1+e}\gamma_w$$

Doygun Birim Hacim Ağırlık (γ_{sat}): ⇒ $$\gamma_{sat} = \frac{G_s(1+w_{sat})}{1+e}\gamma_w$$

Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{dry}): ⇒ $$\gamma_{dry} = \frac{G_s}{1+e}\gamma_w$$

Porozite/Gözeneklilik (n): ⇒ $$n = \frac{e}{1+e}$$

Doygunluk Derecesi (S_r): ⇒ $$S_r = \frac{G_s.w}{e}$$

eşitlikleri elde edilir.

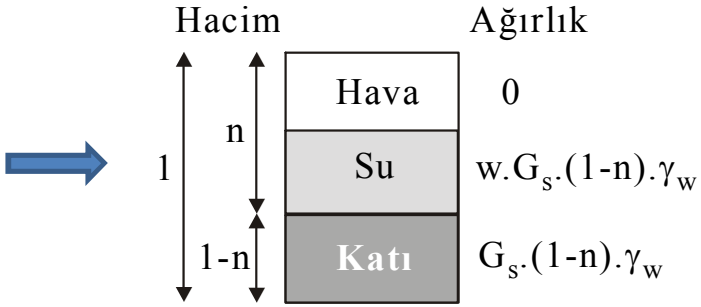
2. YAKLAŞIM: ***V_T=1*** *birim alınırsa aşağıdaki ilişkiler kurulabilir.*

$$n = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_v}{1} \Rightarrow \mathbf{V_v = n} \Rightarrow \mathbf{V_s = 1 - n}$$

$$G_s = \frac{W_s}{V_s.\gamma_w} = \frac{W_s}{(1-n).\gamma_w} \Rightarrow \mathbf{W_s = G_s.(1-n).\gamma_w}$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_w}{G_s.\gamma_w} \Rightarrow \mathbf{W_w = w.G_s.(1-n).\gamma_w}$$

Bu durumda kaya malzemesi örneğini oluşturan kısımların hacim ve ağırlıklarını yandaki şekilde ifade etmek mümkündür.



Buradan, fiziksel özelliklerin tanımları dikkate alınarak eşitlikler yeniden düzenlenirse,

$$\gamma_{wet} = G_s(1-n).(1+w).\gamma_w$$

$$\gamma_{dry} = G_s(1-n).\gamma_w$$

$$\gamma_{sat} = G_s(1-n).(1+w_{sat}).\gamma_w$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$S_r = G_s.(1-n).w$$

elde edilir.

NOT 1:

Suyun birim hacim ağırlığı (γ_w) 9.81 kN/m^3, 9810 N/m^3 vb. dir. Yukarıdaki eşitliklerde birim hacim ağırlık yerine yoğunluklar ve buna bağlı olarak fiziksel özellikler arasındaki ilişkiler belirlenecekse suyun yoğunluğu birim hacimdeki kütle cinsinden ifade edilmelidir. Bu durumda (ρ_w: 1 g/cm^3, 0.001 kg/cm^3, vs. değerleri kullanılmalıdır.)

NOT 2:

Topraklarda doğal nem içeriği, dolayısıyla, doğal birim hacim ağırlık belirlenebilmesine rağmen, rutin kaya mühendisliği projelerinde yeraltından örselenmemiş kaya örneği alımında sondaj tekniğinden yararlanılması, dolayısıyla karot alınırken sondaj suyunun kullanımı ya da yüzeyden kaya bloğu alınması gibi nedenlerden dolayı kaya malzemesinin doğal nem içeriği laboratuvarda belirlenemez. Bu yüzden, genellikle kuru yoğunluk veya kuru birim hacim ağırlık değerleriyle ifade edilirler. Bunun yerine, kaya örneği belirli doygunluk dereceleri için suya doyurularak, bu doygunluktaki yoğunluk ya da birim hacim ağırlıkları belirlenebilir. Doğada, sağlam kayadaki boşlukların yanı sıra, genelde kırık ve çatlaklar da bulunduğundan kaya kütlesinin içerdiği boşluklar daha fazladır. Bu nedenle laboratuvarda belirlenen fiziksel özellikler sağlam kayaya ait olup, kaya kütlesini temsil etmez.

Örnek problem: *Araziden elde edilen ve kırık çatlak içermeyen homojen bir kaya bloğundan, laboratuvarda düzgün şekilli örnekler hazırlanarak 105° C'de kurutulmuş ve kuru kütlesi 558.9 gram, hacmi ise 235.9 cm³ olarak belirlenmiştir. Kaya malzemesinin özgül ağırlığı G_s=2.65 olarak belirlendiğine göre, kayanın aşağıdaki fiziksel özelliklerini bulunuz.*

-Kuru haldekiYoğunluk?
-Kuru birim hacim ağırlık?
-Doygun birim hacim ağırlık?
-Boşluk oranı?
-Porozite?
-% 70 doygunluk derecesindeki nem içeriği ve birim hacim ağırlığı?

3.2. KAYA MALZEMESİNİN DAYANIM ÖZELLİKLERİ

Dayanım (Strength):

Bir kaya malzemesinin dayanımı, maruz kaldığı gerilmeye karşı göstermiş olduğu dirençtir. Maruz kaldığı gerilme, kayanın dayanımını aştığında kayada yenilme meydana gelecektir. Kayaların temel dayanım özellikleri:

- ✓ Sıkışma Dayanımı
- ✓ Çekilme Dayanımı
- ✓ Makaslama Dayanımı
- ✓ Burulma Dayanımı
- ✓ Bükülme (Eğilme) Dayanımı

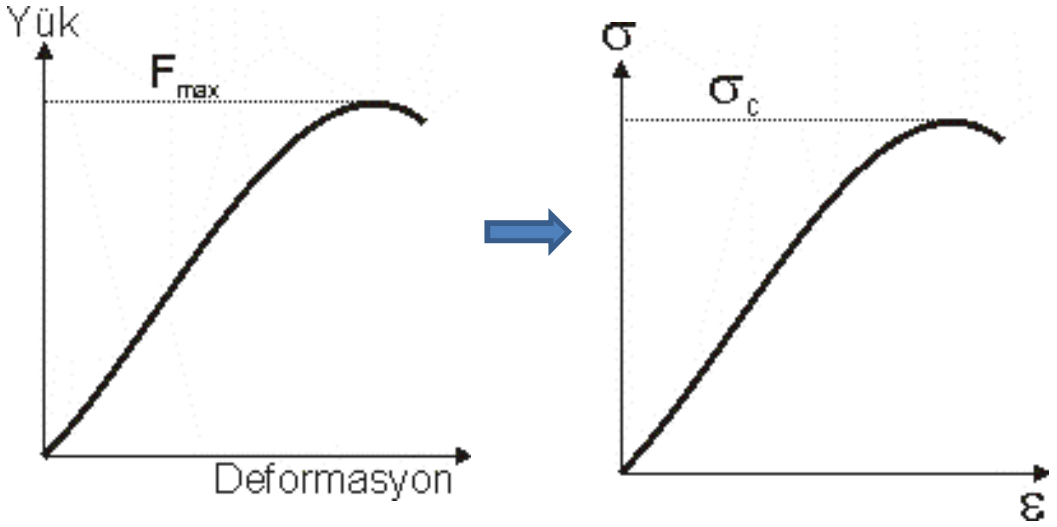
Ders kapsamında, sıkışma, çekilme ve makaslama dayanımı özelliklerine değinilecektir.

3.2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength):

Tek eksenli sıkışma gerilmesi etkisinde olan bir malzemenin (kayanın) yenildiği andaki gerilme değerine Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (σ_c ya da UCS) denir. Gerek sağlam kaya malzemesinin temel bir mekanik özelliği, gerekse kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde temel bir girdi parametresi olarak kullanılır. Sağlam kaya malzemesinden alınan karot örneğinin (silindirik örnek) laboratuvarda tek eksenli yükleme koşulunda kırılmasıyla belirlenir. Uygulamada, küp örneklerin kullamı da söz konusudur, ancak en yaygın olanı silindirik örnek kullanımıdır.

Tek eksenli yükleme

Yenilme



Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı:

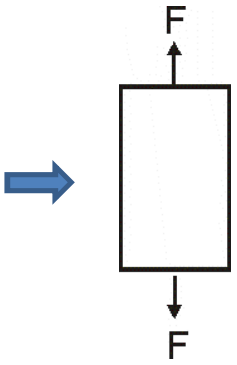
$$\sigma_c = UCS = \frac{F_{max}}{A}$$

F_{max}: Yenilme anındaki yük (kuvvet)
A: Yükün uygulandığı alan (silindirik örneğin taban alanı)

3.2.2. Çekilme Dayanımı (Tensile Strength):

Tek eksenli çekme gerilmesi etkisinde olan bir malzemenin (kayanın) yenildiği andaki gerilme değerine Çekme/Çekilme Dayanımı (σ_t) denir. Laboratuvarda doğrudan ya da dolaylı deneyler aracılığıyla belirlenebilir.

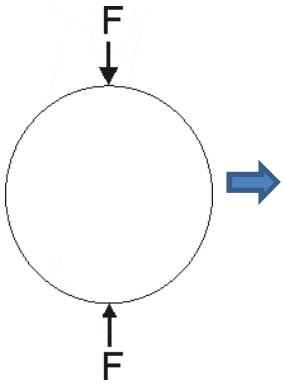
Doğrudan çekme



$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

F_{max}: Yenilme anındaki yük
A: Yüklemenin yapıldığı alan (silindirik örneğin taban alanı

Dolaylı yöntem (Brazilian Çekilme Deneyi):

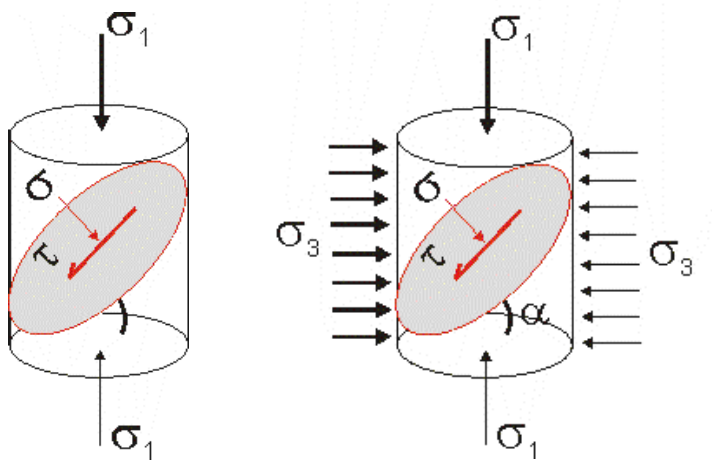


$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi \cdot t \cdot D}$$

F: Yenilme anındaki yük
D: Çap
t: Kalınlık

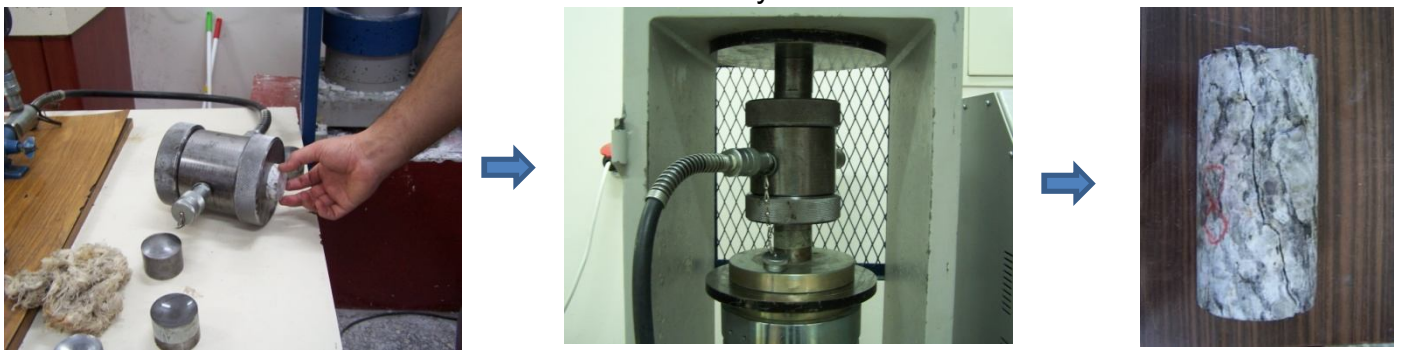
3.2.3. Makaslama Dayanımı (Shear Strength):

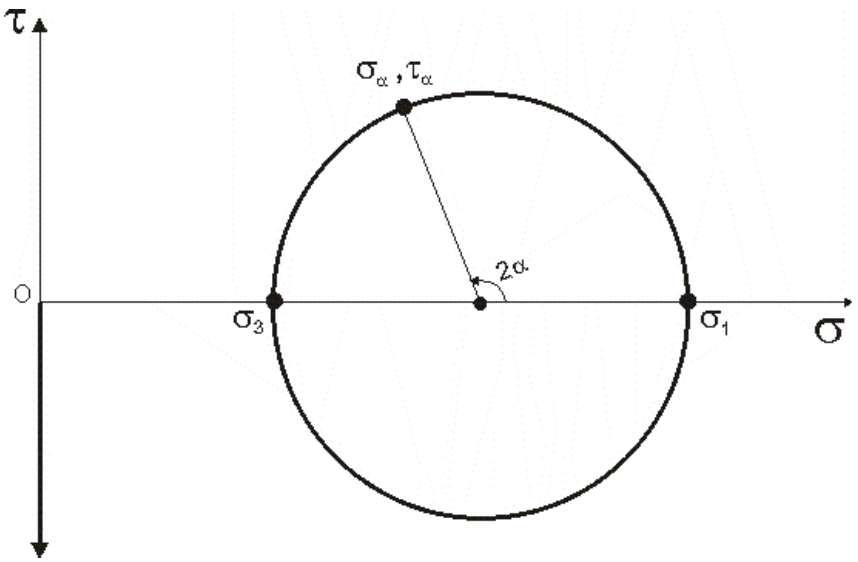
Gerilme etkisindeki kaya malzemesinde yenilme anında yenilme düzlemine etkiyen makaslama gerilmesi (τ), bu kaya malzemesinin makaslama dayanımına karşılık gelir.

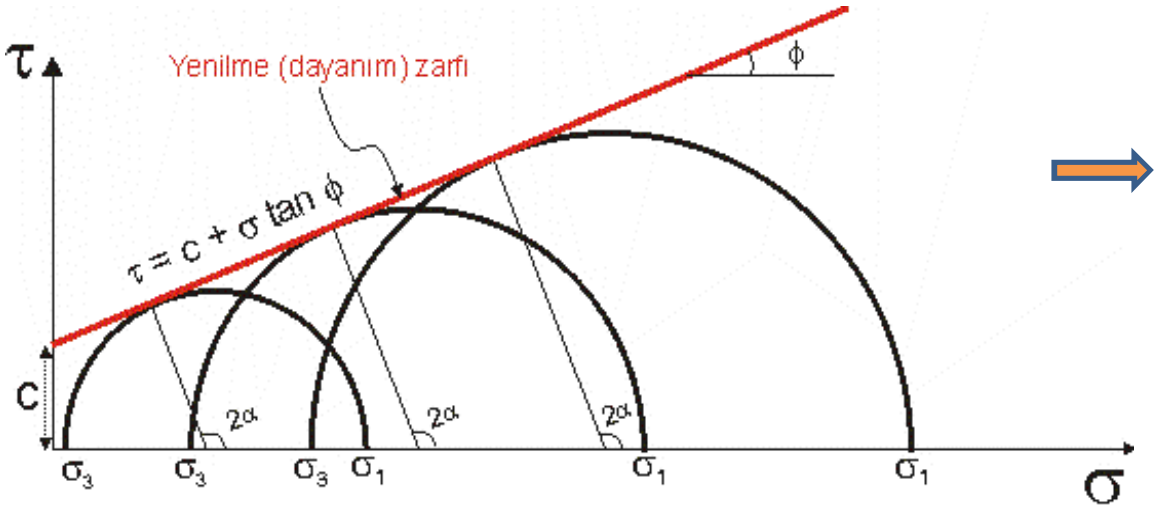


Bir kaya malzemesinin makaslama dayanımını belirlemek amacıyla, laboratuvarda üç eksenli sıkışma deneyleri yapılır ve Mohr dairelerinden yararlanılabilir ve makaslama dayanımı zarfı (yenilme zarfı) belirlenebilir.

Sabit yanal gerilme (hücre/çevre basıncı) altında eksenel yükleme





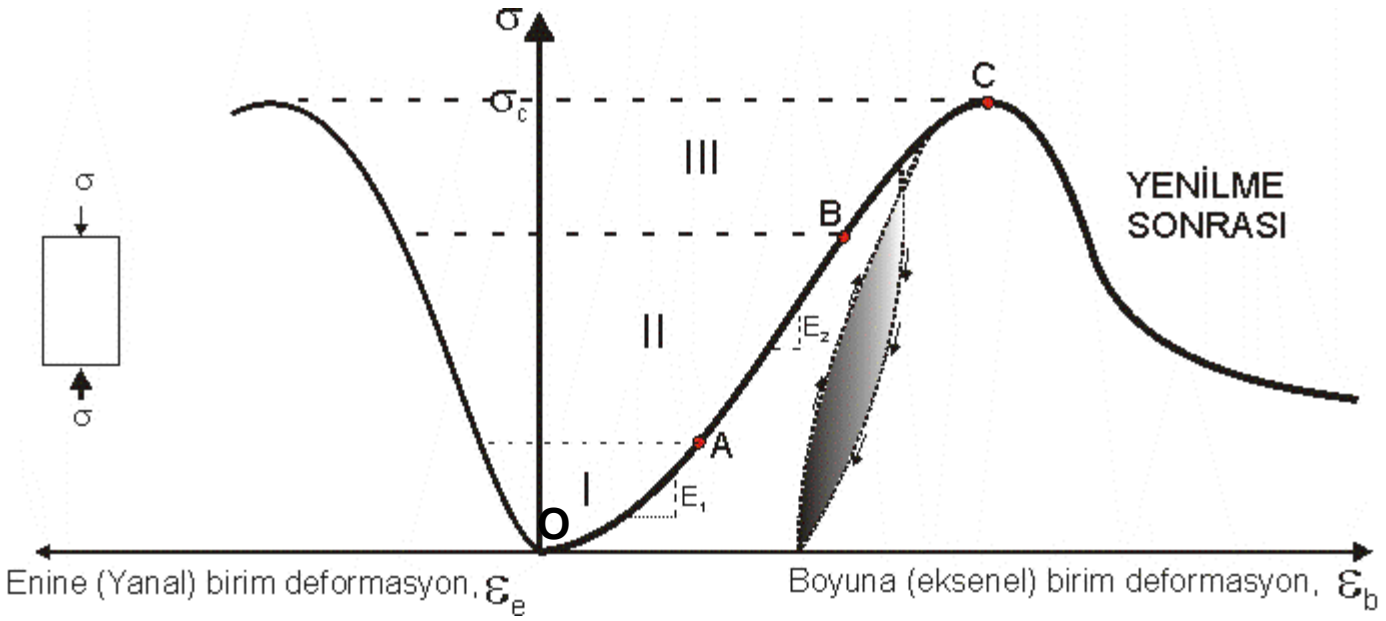


c: Kohezyon
ϕ: İçsel sürtünme açısı

Normal gerilme etkisi olmaksızın kaya malzemesinin göstermiş olduğu dayanıma **KOHEZYON (c)**, malzemenin yerdeğiştirmeye karşı gösterdiği sürtünme direncine ise **İÇSEL SÜRTÜNME AÇISI (ϕ)** denir. Bu iki parametre kayanın **makaslama dayanımı parametreleri** olarak bilinir.

3.3. KAYA MALZEMESİNİN DEFORMASYON ÖZELLİKLERİ

2. Bölüm'de gerilme – birim deformasyon ilişkileri irdelenirken malzemenin, elastik, elasto-plastik, plastik ve viskoz olmak üzere başlıca ideal davranış modellerine değinilmişti. Ancak kaya malzemesinin gerilme altındaki davranışı, bu modellere tam olarak uymaz. Gerilme artışına bağlı olarak kayanın deformasyon davranışında da farklılıklar oluşur. Bir kaya malzemesinin gerilme birim deformasyon ilişkisi en basit şekliyle aşağıdaki gibidir.



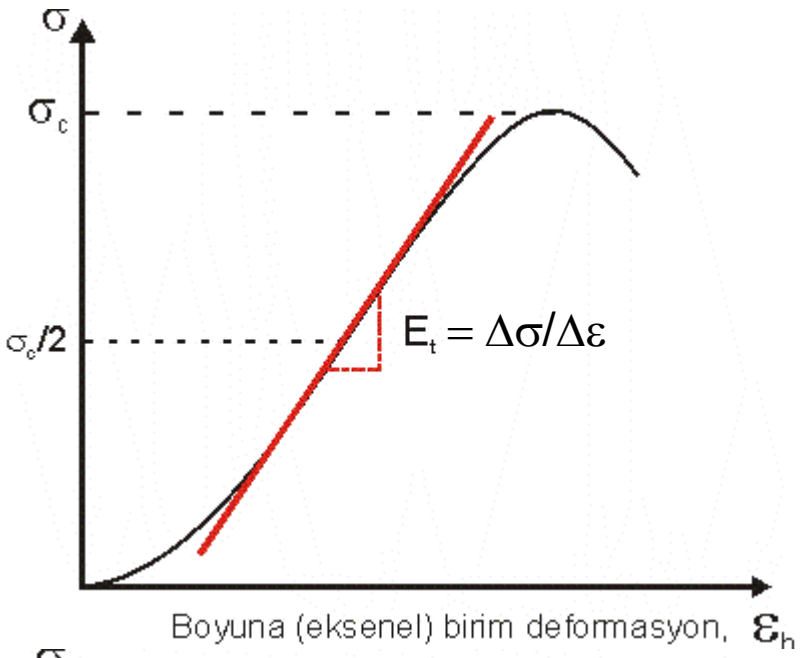
Temel düzeyde; gerilmeye bağlı olarak kaya malzemesinin davranışını, I., II., III. ve Yenilme sonrası olmak üzere dört bölgeye ayırmak mümkündür.

I. BÖLGE: Kaya malzemesi içindeki boşluk, çatlak gibi kısımların yükleme etkisiyle kapandığı bölgedir (OA arası). Deformasyon fazladır ve bu nedenle düşük Elastik Modül değeri (E_1) belirlenir. Boşaltma işleminde az miktarda histerik özellik gösterir.
II. BÖLGE: Gerilme – eksenel birim deformasyon eğrisinin doğrusal elastik davranış gösterdiği bölgedir (AB arası), örnekteki boy kısalması yanal uzamadan fazladır. Bu bölgeden belirlenen Elastik Modül (Young modülü) değerinin ($E_2=\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$) genel olarak kayayı temsil ettiği düşünülür ve *Ortalama Modül* olarak da isimlendirilir. Söz konusu bölgedeki yanal birim deformasyon dikkate alınarak kaya malzemesini temsil eden Poisson oranı ($\nu=\Delta\varepsilon_e/\Delta\varepsilon_b$) da belirlenebilir.
III. BÖLGE: B noktasında kaya elastik davranıştan plastik davranış göstermeye başlar (eğilme noktası (yield point)). Boşaltma yapıldığı taktirde kalıcı deformasyon ve histerik davranış gözlenir. Kayanın içindeki mevcut çatlaklarda ilerleme ya da yeni çatlakların gelişmesi söz konusudur. Kaya malzemesi örneğinde hacim artışı gözlenir. Bu bölgedeki davranış, kayanın yenilmesi (C noktası) ile sonlanır. B noktasından sonraki (IV. Bölge dahil) kayanın gerilme etkisindeki davranışı SÜNÜMLÜ davranış olarak adlandırılır.
IV. BÖLGE: Gerilme kontrollü yükleme yapıldığı taktirde, örnek kırılarak yenilir ve bu bölgenin davranışı belirlenemez. Birim deformasyon kontrollü deney aleti kullanıldığı taktirde, yenilme sonrası davranışı belirlemek mümkündür. Bu bölgede, kayanın dayanımı hızla düşmesine rağmen, hala bir miktar dayanıma sahiptir.

Temel elastik sabitler (Young Modülü ve Poisson oranı), laboratuvarda kaya örnekleri üzerindeki statik ve dinamik deneylerle belirlenebilmektedir. Ayrıca, ortalama elastik modül haricinde teğet elastik modül, kiriş (sekant) elastik modül değerleri de belirlenebilir.

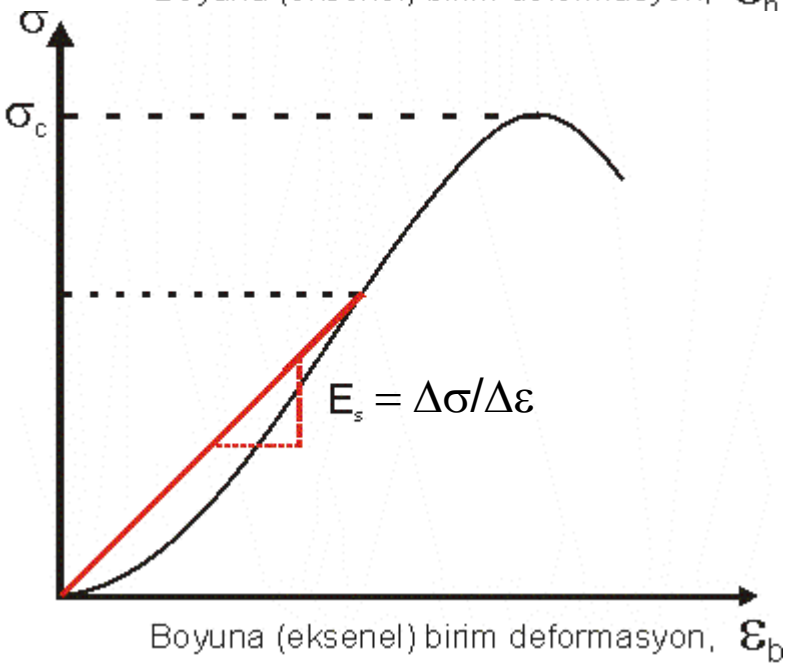
Teğet modülü

Tek eksenli sıkışma dayanımının %50'si kadar sabit bir gerilme değeri için gerilme-birim deformasyon eğrisine teğet olan doğrunun eğimi dikkate alınarak belirlenir. Bununla birlikte, farklı gerilme değerleri için farklı teğet modüllerin bulunabileceği bilinmelidir.



Kiriş (sekant) modülü

Gerilme-birim deformasyon eğrisinin 0 noktasından ek eksenli sıkışma dayanımının %50'si kadar sabit bir gerilme değeri arasındaki doğrunun eğimi dikkate alınarak belirlenir. Bununla birlikte, farklı gerilme değerleri için farklı kiriş modüllerin bulunabileceği bilinmelidir.



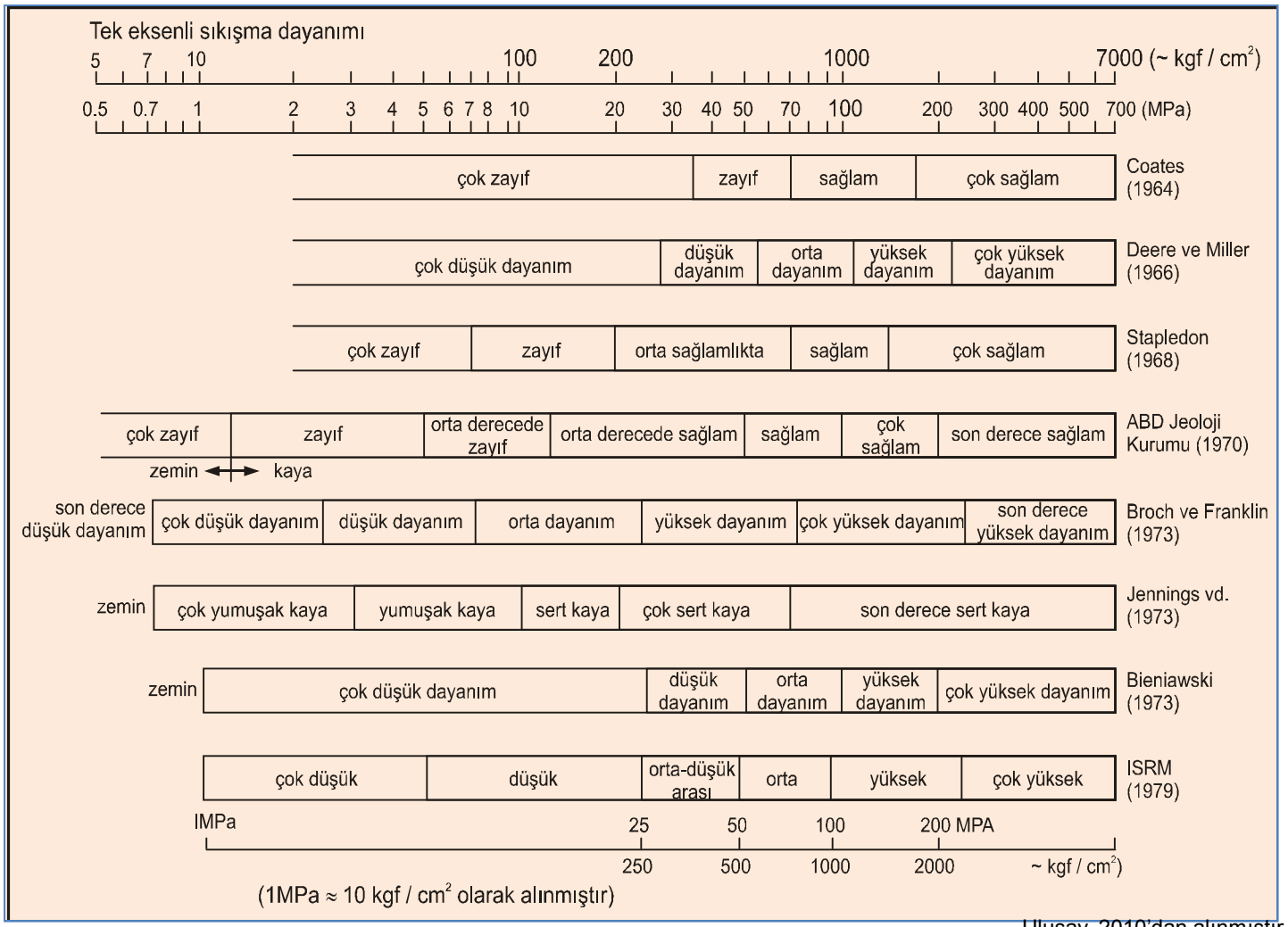
Kaya türüne bağlı olarak kaya malzemesinin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin yaklaşık olarak değişim aralıkları (Jumikis, 1983'den düzenlenmiştir.)

Sağlam Kaya	Laboratuvar						Doğal (yerinde)
	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı, σ_c (MPa)	Çekilme Dayanımı, σ_t (MPa)	Elastik Modül, E (GPa)	Poisson Oranı, ν	Kuru yoğunluk, ρ (g/cm^3)	Porozite, n %	Permeabilite katsayısı, k (cm/s)
VOLKANİK							
Bazalt	78-412	5.9-29.4	19.6-111.5	0.14-0.25	2.21-2.77	0.22-22.06	10^{-4}-10^{-5}
Diyabaz	118-245	5.9-12.7	22.0-107.5	0.125-0.33	2.82-2.95	0.17-1.00	10^{-5}-10^{-7}
Gabro	147-196	4.9-29.4	58.4-107.8	0.125-0.25	2.72-3.00	0.00-3.57	10^{-5}-10^{-7}
Granit	118-275	3.9-24.5	21.3-70.5	0.125-0.34	2.53-2.62	1.02-2.87	10^{-3}-10^{-5}
SEDİMANTER							
Dolomit	14.7-245	2.5-24.5	19.6-93.0	0.08-0.32	2.67-2.72	0.27-4.10	4.6×10^{-9}-1.2×10^{-8}
Kireçtaşı	29.4-245	1.0-24.5	8.0-78.5	0.10-0.33	2.67-2.72	0.27-4.10	10^{-2}-10^{-4}
Kumtaşı	19.6-167	19.6	4.9-84.3	0.07-0.30	1.91-2.58	1.62-26.40	10^{-2}-10^{-4}
Şeyl	21.6-160	2.0-9.8	7.8-44.0	0.10-0.50	2.00-2.40	20.00-50.00	10^{-3}-10^{-4}
METAMORFİK							
Gnays	78-245	3.9-19.6	14.2-58.8	0.09-0.25	2.61-3.12	0.32-1.16	10^{-3}-10^{-4}
Mermer	49-196	4.9-19.6	28-100	0.11-0.38	2.51-2.86	0.65-0.81	10^{-4}-10^{-5}
Kuvarsit	85-353	2.9-19.6	25.5-97.5	0.11-0.23	2.61-2.67	0.40-0.65	10^{-5}-10^{-7}
Şist			40.70.5	0.08-0.20	2.60-2.85	10.00-30.00	10^{-4}-3×10^{-4}
Sleyt	24.5-196	6.9-19.6		0.06-0.44	2.71-2.78	1.84-3.61	10^{-4}-10^{-7}

*Bu aralıklar, kayaların özelliklerinin yaklaşık değerleri hakkında fikir edinilmesi amacıyla verilmiştir. Aynı petrografik isme sahip olmasına rağmen, bu aralıkların dışında değerlere sahip kayalar mevcuttur.

3.4. BAZI KAYA MALZEMESİ SINIFLAMALARI

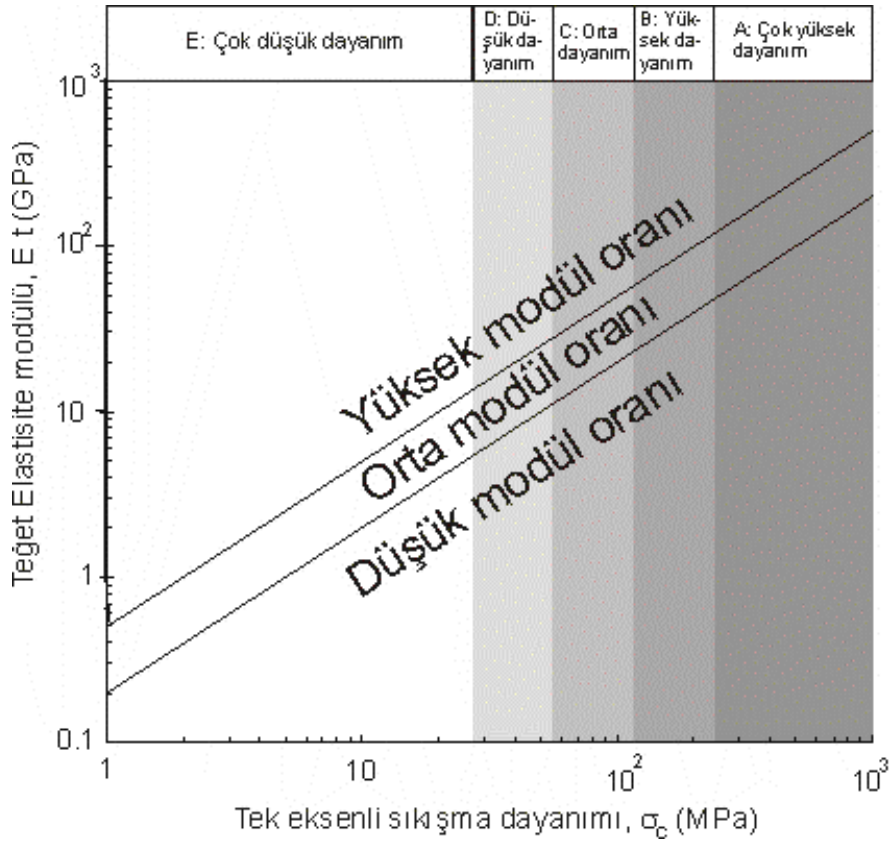
İstisnaları olmakla birlikte kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı genel olarak 1 MPa'ın üzerindedir. Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını dikkate alarak yapılmış sınıflamalar:



Ulusay, 2010'dan alınmıştır.

Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve teğet elastik modülü dikkate alınarak Deere ve Miller (1966) tarafından önerilmiş sınıflama: Birleştirilmiş Mühendislik Sınıflaması

UCS			Modül Oranı (E/UCS)		
Sınıf	Dayanım	σ_c (MPa)	Sınıf	Modül Oranı	Değer
A	Çok yüksek	> 220	H	Yüksek	> 500
B	Yüksek	110-220	M	Orta	200-500
C	Orta	55-110	L	Düşük	< 200
D	Düşük	27.5-55			
E	Çok düşük	< 27.5			

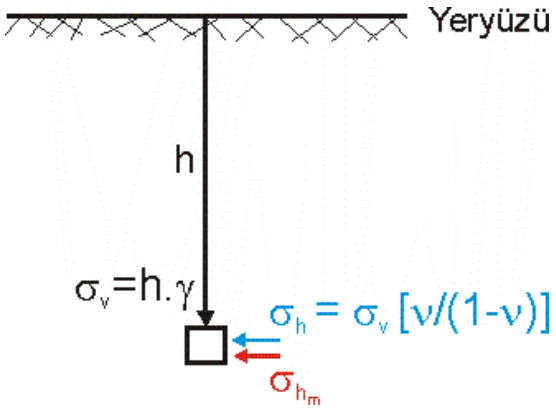


3.5. KAYA MALZEMESİNİN DAVRANIŞINI VE ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kaya mühendisliği projelerinde, yeraltı ve yerüstü kaya yapıları genellikle kaya malzemesinden çok kaya kütlesi içinde tasarlanmaktadır. Bununla birlikte, kaya kütlesinin bir elemanı olan kaya malzemesinin davranışı önemlidir. Kaya malzemesinin davranışı ve jeomekanik özellikleri; kayanın tane ya da kristallerinin büyüklüğü, şekli, dizilişi, kristallenme, çimentolanma, kenetlenme, gözeneklilik ve su emme durumu, heterojen olması, anizotropi gibi kendi özelliklerinden kaynaklanan faktörlerin yanı sıra, çevresel faktörlerden de etkilenmektedir. Jeomekanik özellikler, genellikle Statik (kısa süreli) laboratuvar deneyleriyle belirlenir. Laboratuvar ortamında zamana bağlı deneyler (örneğin akma (creep) deneyi) ile uzun süreli duraylılığa ilişkin yaklaşımlar yapılmakla birlikte, kayaların çok daha uzun süre sabit gerilme, sıcaklık vb. ortamlarda kalması nedeniyle doğadaki durum birebir yansıtılamamaktadır. Bu nedenle, belirlenen davranış ve jeomekanik özellikler çoğunlukla laboratuvar deney şartlarına uygun bir ortamdaki kayanın davranışına bağlı özelliklerdir. Ancak, doğada kaya yapısının bulunduğu ortama bağlı olarak farklılıklar söz konusu olabilmektedir. Kayanın davranışını ve jeomekanik özelliklerini etkileyen çevresel faktörler:

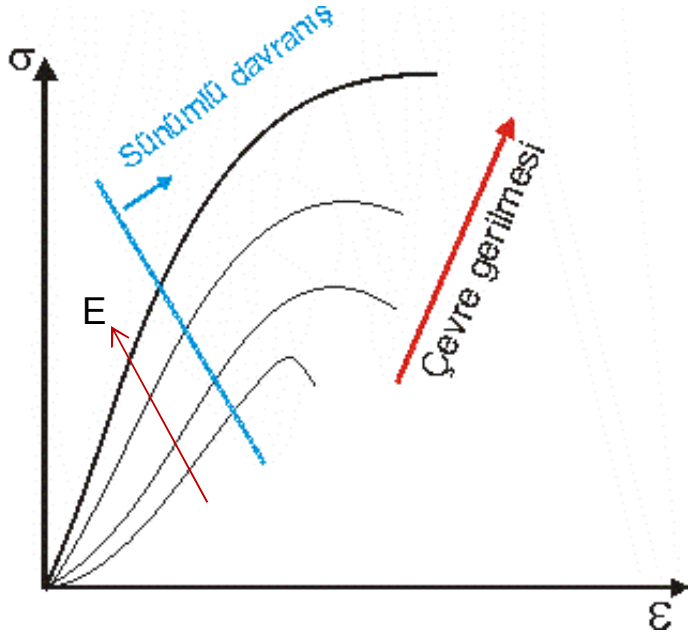
1) Çevre (confining) basıncı/gerilmesi: Yerkabuğunda belirli bir derinlikte bir noktada (birim eleman), yerçekimi etkisi nedeniyle düşey yönde bir gerilme (örtü gerilmesi) söz konusudur. Bu düşey yöndeki gerilme etkisiyle, kayada düşey (young modülüne bağlı olarak) ve yatay (Poisson oranına bağlı olarak) yönde deformasyon gelişimi olmalıdır. Yanyana iki birim elemanda yanal birim deformasyonlar aynı büyüklükte ama zıt yönlerdedir. Etkiler birbirini dengelediğinden, her iki

elemanda da yanal yönde bir hareket olmayacaktır. Bu durum nedeniyle, örtü gerilmesinden kaynaklanan bir yanal gerilme/basınç söz konusu olacaktır. Bunun yanı sıra, kıtaların hareketi, jeolojik yapı vb. unsurlardan kaynaklanan bir gerilme birikimi söz konusudur. Yatay yöndeki bu gerilmeler çevre gerilmesi/basıncı olarak düşünülürse;

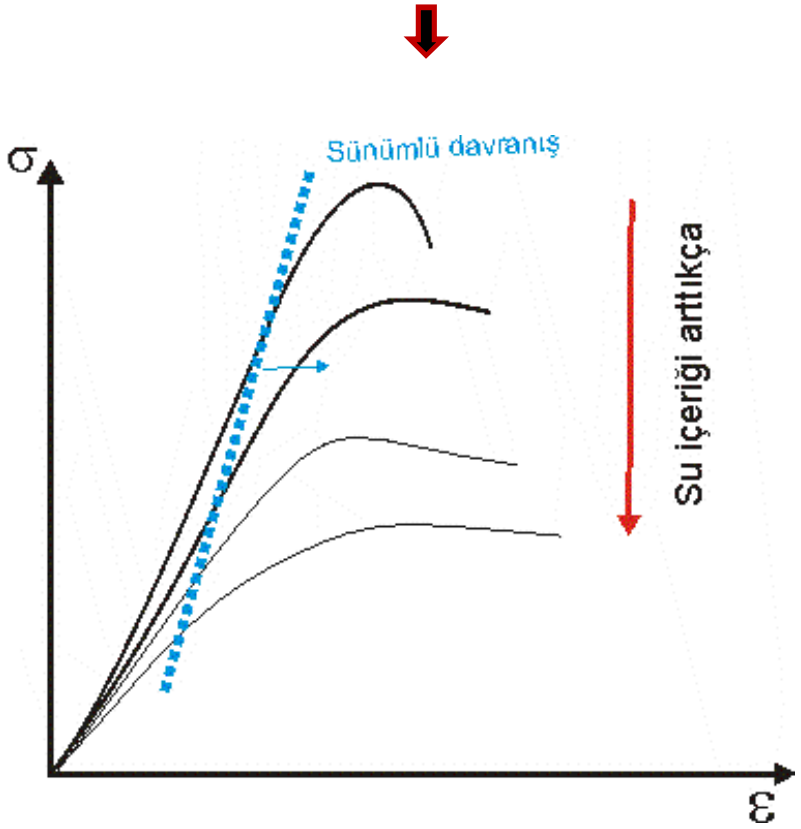


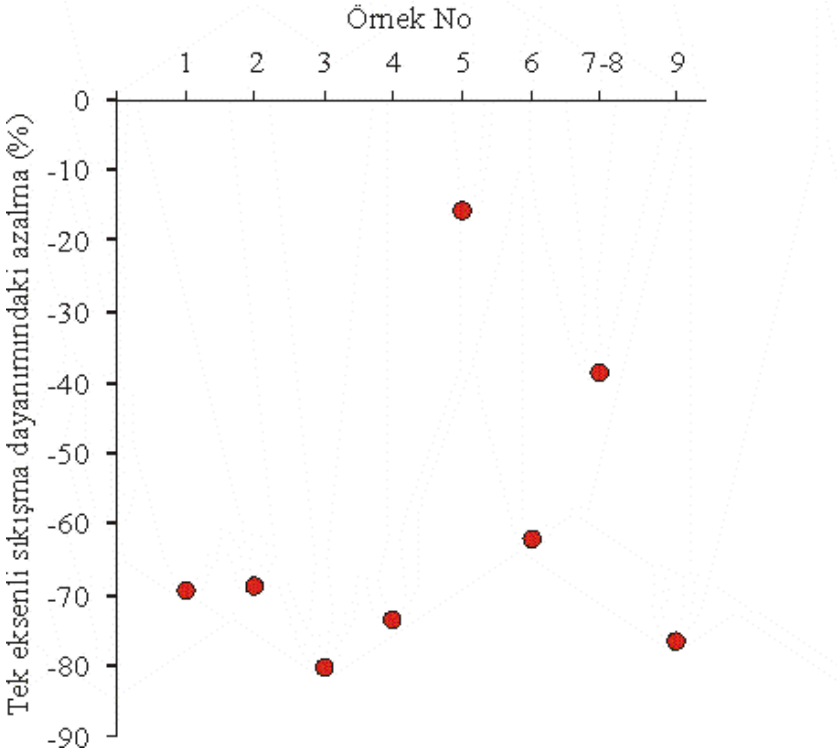
σ_v: Örtü gerilmesi (Düşey yöndeki kütleye yerçekimi kuvvetinin kazandırmış olduğu ağırlıktan kaynaklanan gerilme)
σ_h: Örtü gerilmesinden kaynaklanan yatay yöndeki gerilme
σ_{h_m}: Kıtaların hareketi vb. nedenlerden kaynaklanan yatay gerilme
h: Örtü malzemesinin yüksekliği
γ: Örtü malzemesinin birim hacim ağırlığı

Çevre gerilmesi arttıkça, kaya malzemesinin gerilme-birim deformasyon davranışı da farklılık gösterir. Mekanik anlamda; çevre gerilmesi arttıkça, malzemenin gerilmeye karşı gösterdiği dayanım artar, deformasyon azalır (Elastik modül artar), sünümlülük artar .



2) Su (Nem) içeriği: Nem içeriğinin kaya malzemesinin fiziksel özelliklerindeki etkisine Bölüm 3.1'de değinmiştik. Doğal ortamda kaya malzemesinin su içeriği, mekanik özelliklerini de etkiler. Su, kaya türlerine bağlı olarak farklı ölçülerde kayada yumuşamaya, mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olur, genel olarak kaya malzemesinin su içeriği arttıkça, dayanım ve elastik modül azalırken sünümlü davranış artar. Özellikle kil içeren kaya malzemesi suya doygun hale geldiğinde hacim artışı, su içermediği (kuru) zamanlarda ise hacim azalması olur. Bu ıslanma-kuruma döngüsü nedeniyle özellikle bu tür kayalarda kabarmalar, çatlaklar oluşur.





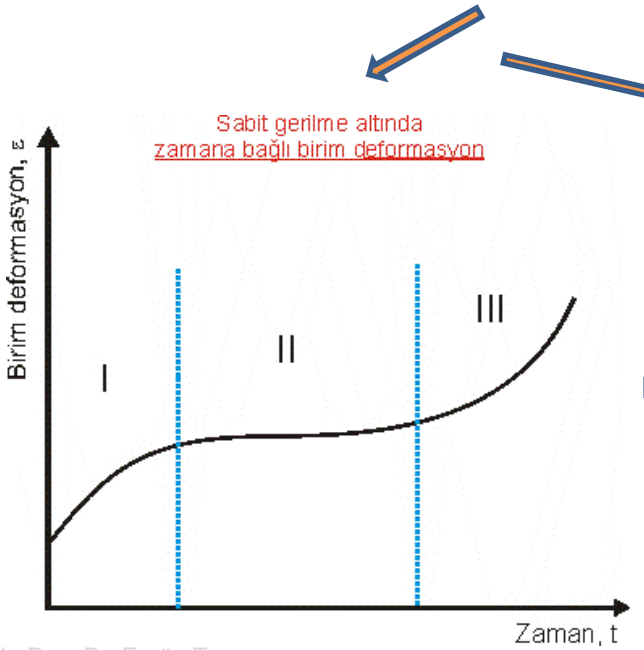
Kapadokya'da farklı mineralojik bileşime sahip tüflerin (1-9) kuru dayanımlarına göre suya doygun dayanımlarındaki azalma oranı (Tuncay, 2009'dan)

3) Sıcaklık: Yerkabuğunda derinlere inildikçe sıcaklık artar. Bunun yanı sıra, aktif volkanik bölgelerde, aktif fayların bulunduğu yerlerdeki jeotermal alanlarda vb., sıcaklık değerleri farklılık gösterir. Dolayısıyla, yüzeyde kaya malzemesinin davranışı ile bu alanlardaki davranışı ve mekanik özellikleri de farklılık gösterir. Genel olarak, kayanın dayanımı ve elastik modülü azalırken sünümlülük artar (Gerilme - birim deformasyon davranışı, su içeriğinin etkisinde olduğu gibidir). Ayrıca, yaz kış ısı farklılığı, kayaların yüzey ve yüzeye yakın kesimlerinde suyun da varlığıyla donma-çözünme etkisi, dolayısıyla hacim değişikliği nedeniyle parçalanmalara neden olur.

4) Zaman: Kaya mühendisliği yapılarında iki tür yenilme söz konusudur:

i) Kayanın kısa süreli dayanımı (statik koşuldaki dayanım), ortamda kendisine etkiyen gerilmeden küçükse, yapı hemen yenilir.

ii) Kaya malzemesi, maruz kaldığı sabit bir gerilmeye karşı başlangıçta duraylı iken, zamanla dayanım azalması nedeniyle yenilir (Zaman etkisi).



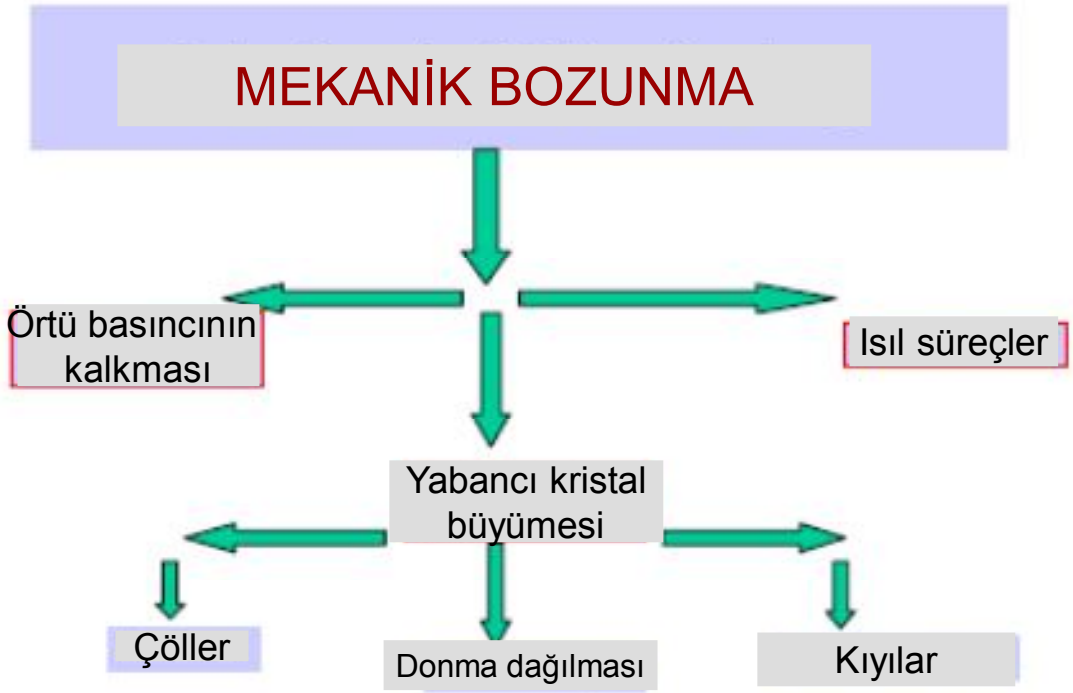
Zamanla dayanım azalması: Çevresel etkiler nedeniyle kaya malzemesinin dayanımındaki azalma

OB : Zamandan bağımsız birim deformasyon (ani birim deformasyon)
I: Birim deformasyonun oransal olarak doğrusal artışı
II: Birim deformasyon artışının oransal olarak sabit olduğu kısım
III: Deformasyonun daha hızlı arttığı kısım ve yenilme

Kaya malzemesinde BOZUNMA

Bozunma, kaya malzemesinin fiziksel özellikleri ve mekanik davranışlarına etki eden faktörlerin neden olduğu bir durumdur. Yani; nem içeriği, sıcaklık, zaman vb. faktörler, kayaların fiziksel ya da kimyasal bozunmasına neden olurlar.

1) Fiziksel (Mekanik) Bozunma: Kayanın mekanik anlamda dağılması. Basınç ve sıcaklık değişimi gibi süreçler egemendir; kaya parçalanır, ancak bileşimi değişmez.



(www.coursehero.com/file/3890064/weathering/)

1) Kimyasal Bozunma: Kayanın bileşiminde değişiklik söz konusudur. Kayayı oluşturan minerallerin içsel yapılarında değişime neden olan süreçleri içerir.

Mekanik (fiziksel) ve kimyasal bozunma genellikle birlikte meydana gelirler ve etkileri iç içe olabilir.

Alterasyon: Hidrotermal sıvıların etkisiyle meydana gelen ve kayaçların kimyasal ya da mineralojik bileşiminde değişime neden olan süreç.

Tipik alterasyon türleri: KAOLİNLEŞME VE KLORİTLEŞME

Bazı kayalarda kimyasal bozunma ve alterasyonun etkilerinin ayırt edilmesi oldukça güçtür.

Bununla birlikte;
Bozunmanın etkisi derinlikle sönümlenir. Alterasyon ise, hemen hemen değişik derinliklerde gözlenebilir.

Kaya malzemesi BOZUNMA SINIFLAMASI

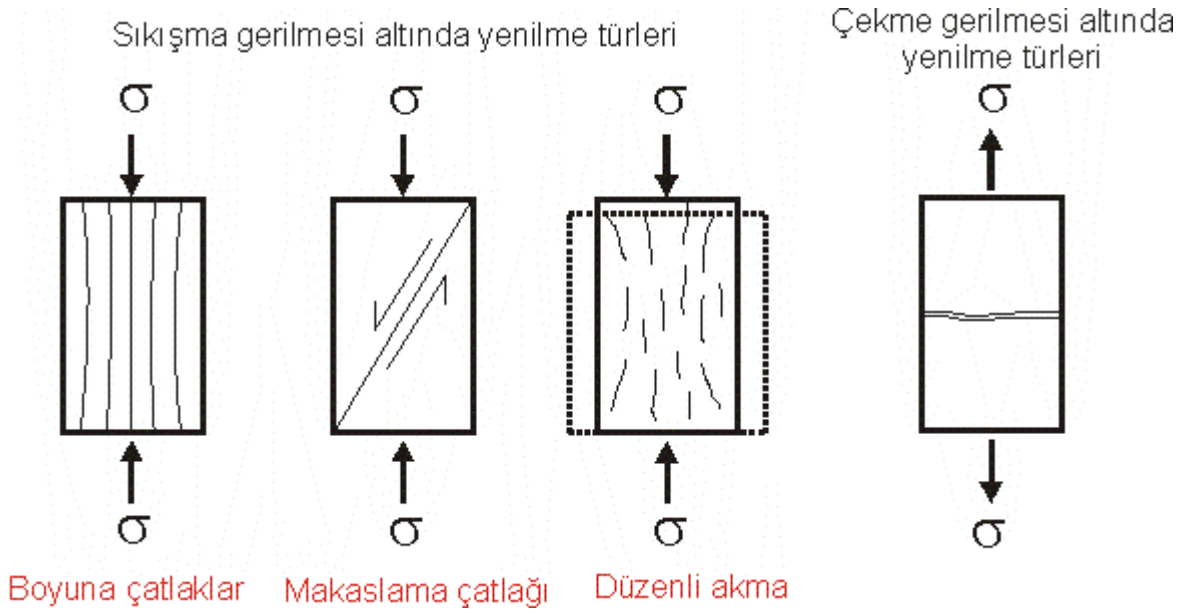
Tanım	Açıklama	Sınıf
Taze	Kaya malzemesinin bozunduğuna dair görünür bir işaret yok	IA
Hafif Bozunmuş	Ana süreksizlik yüzeyinde renk değişimi	IB
Az Bozunmuş	Kaya malzemesi ve süreksizlik yüzeyinde renk değişimi.Kaya malzemesinde bozunma nedeniyle renk değişimi olabilir ve ilk durumuna göre kısmen daha zayıf olabilir	II
Orta-Derece Bozunmuş	Kaya malzemesinin yarısından azında ayrışma ve/veya parçalanma. Taze veya solmuş kaya ya sürekli bir yapı veya çekirdek taşı olarak bulunmakta.	III
Yüksek-Derece Bozunmuş	Kaya malzemesinin yarıdan fazlası ayrışmış ve/veya parçalanmış. Taze veya solmuş kaya ya süreksiz bir yapı veya çekirdek taşı olarak bulunmakta.	IV
Tamamen Bozunmuş	Tüm kaya malzemesi ayrışmış ve/veya parçalanmış. Orijinal kütle yapısı hala çoğunlukla sağlam.	V
Rezidüel(Artık) Toprak	Tüm kaya malzemesi toprağa dönüşmüş. Kütle yapısı ve malzeme dokusu tahrip olmuş. Hacimde büyük bir değişiklik var ama toprağın önemli bir kısmı taşınmamış (yerinde).	VI

(Dearman, 1980; Erguvanlı, 1995'ten)

Bölüm 4

Yenilme Kriterleri

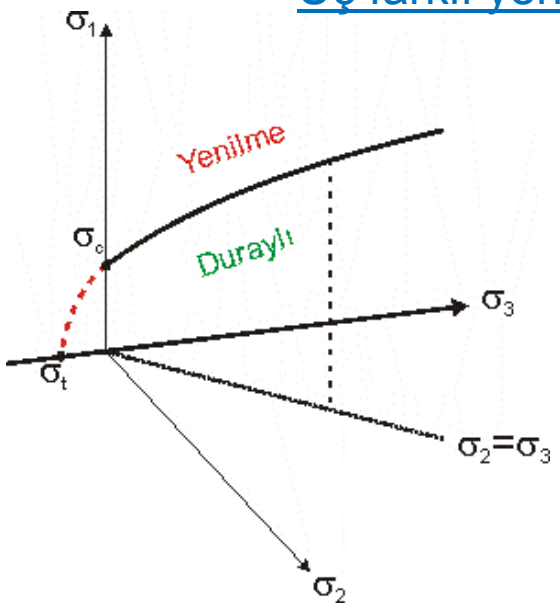
Yenilmenin (kırılmanın) gerçekleşmesi için, etkisinde kaldığı gerilmenin kayanın dayanımını aşması gerekir. Kaya malzemesinde gözlenen tipik yenilme türleri:



Limit denge durumu; kaya malzemesinin dayanımının, maruz kaldığı gerilmeye eşit olduğu durumdur. Tüm yenilme kriterleri (ölçütleri), bu denge durumu göz önünde bulundurularak türetilmiştir.

Limit denge = Dayanım / Gerilme = 1

Üç farklı yenilme şartı düşünülürse:



(Karpuz ve Hindistan, 2006'dan)

Tek eksenli sıkışma dayanımı durumu:
$\sigma_1 = \sigma_c$ ve $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

Çekilme dayanımı durumu:
$\sigma_3 = \sigma_t$ ve $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$

Laboratuvarda silindirik kaya örneğinde
üç eksenli sıkışma dayanımı durumu:
$\sigma_3 = \sigma_2$ arttıkça σ_1 artar

$\sigma_3 \neq \sigma_2$ ise ?? ⟹ Eğri değil, geometrik bir yüzey

Kayaların heterojen özellik gösterebilmesi, davranışının gevrekten sünümlüye kadar değişebilmesi, farklı araştırmacılar tarafından farklı yenilme kritirlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Yenilme kriterleri, TEORİK ve GÖRGÜL (AMPİRİK) olmak üzere iki grup altında toplanabilir.

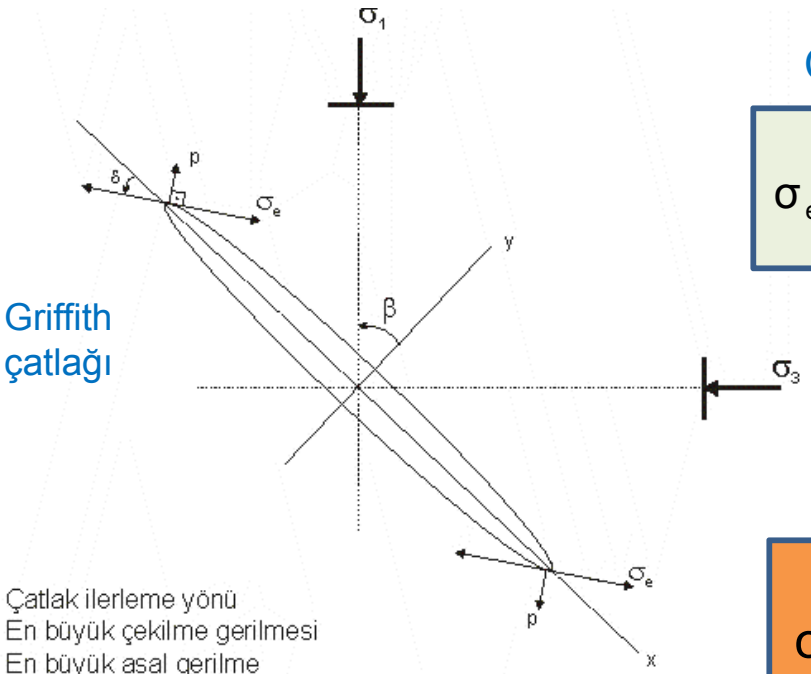
⇓

Teorik kriterler: Griffith kriteri, Mohr Coulomb Kriteri, Tresca kriteri, Von Mises kriteri, vb.
Görgül kriterler: Franklin kriteri, Bieniawski kriteri, Hoek ve Brown Kriteri, Kim-Lade kriteri, vb.

NOT: Bu ders kapsamında; Griffith ve Mohr Coulom teorik yenilme kriterleri ile Hoek-Brown Görgül yenilme kriterlerine giriş niteliğinde değinilecektir. Gerek bu kriterlerin gerekse diğer kriterlerin ayrıntısı, önerilen kaynaklarda bulunabilir.

Griffith Yenilme Kriteri:

Yenilme kriterlerinin en eskisidir. Bir malzemenin gerilmeye maruz kalması durumunda, içinde varolan eliptik şekilli mikrokırıkların uçlarında gelişen çekme gerilmeleri malzemenin çekme dayanımına (σ_t) ulaştığı anda çatlakların ilerlemesi esasına dayanır.



Griffith çatlağı

p : Çatlak ilerleme yönü
σ_e: En büyük çekilme gerilmesi
σ_1: En büyük asal gerilme
σ_3: En küçük asal gerilme
β : Çatlak uzun ekseni normali ile en büyük asal gerilme arasındaki açı
δ : Çatlak uzun ekseni ile en büyük çekilme gerilmesi yönü arasındaki açı ($\delta=2\beta-\pi/2$)

Çatlak ucunda gelişen en büyük çekilme gerilmesi:

$$\sigma_e = \frac{(\sigma_1 \cos^2\beta + \sigma_3 \sin^2\beta) - (\sigma_1^2 \cos^2\beta + \sigma_3^2 \sin^2\beta)^{1/2}}{\xi_0}$$

GRIFFITH YENİLME KRİTERİ:

Koşul:	Asal gerilmeler cinsinden:
$\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$	$\Rightarrow \quad (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3)$
$\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$	$\Rightarrow \quad \sigma_3 = -\sigma_t$

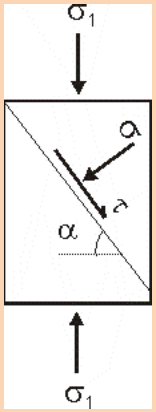
σ_1 ve σ_3:Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler

Not: Literatürde Griffith kriterinin modifikasyonları mevcuttur (örneğin, McClintock ve Walsh (1962) tarafından ya da Murrel (1963) tarafından yapılan modifikasyonları.)

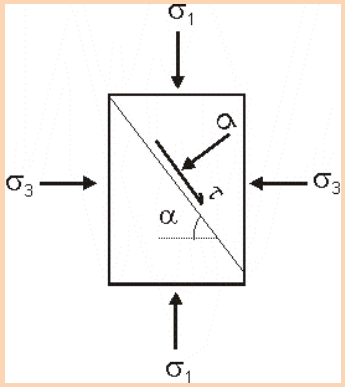
Mohr-Coulomb Yenilme Kriteri:

Mohr ve Coulomb kriterleri iki ayrı kriter olmakla birlikte, birbirlerine benzerliği nedeniyle Mohr-Coulomb kriteri olarak anılır. Yenilme, makaslama gerilmesinin makaslama dayanımını aştığı anda gerçekleşir.

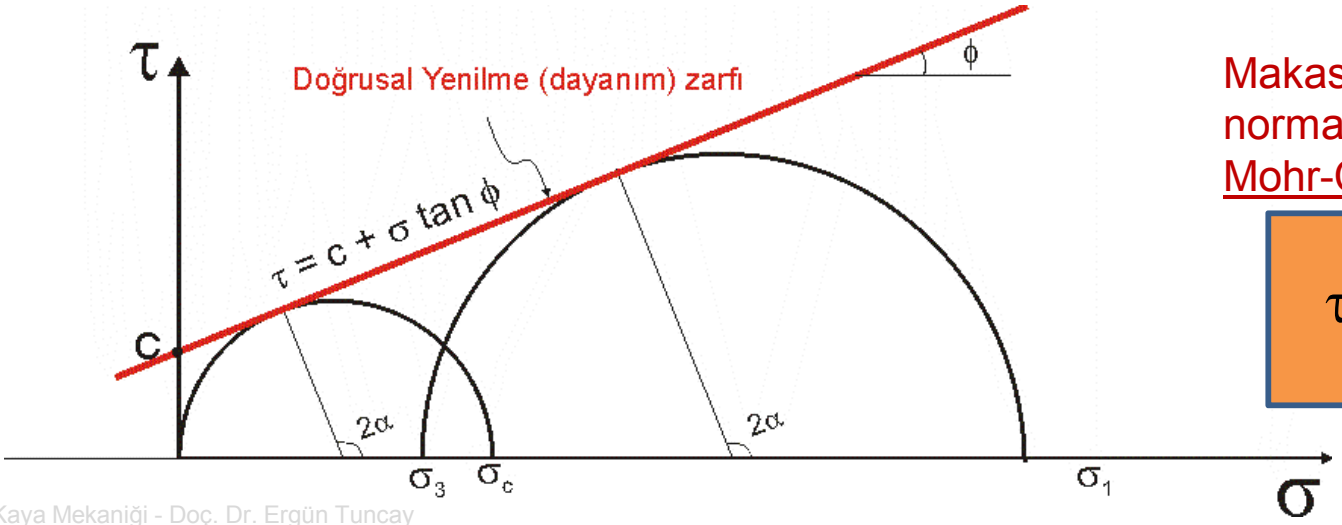
Tek eksenli sıkışmada yenilme



Üç eksenli sıkışmada yenilme

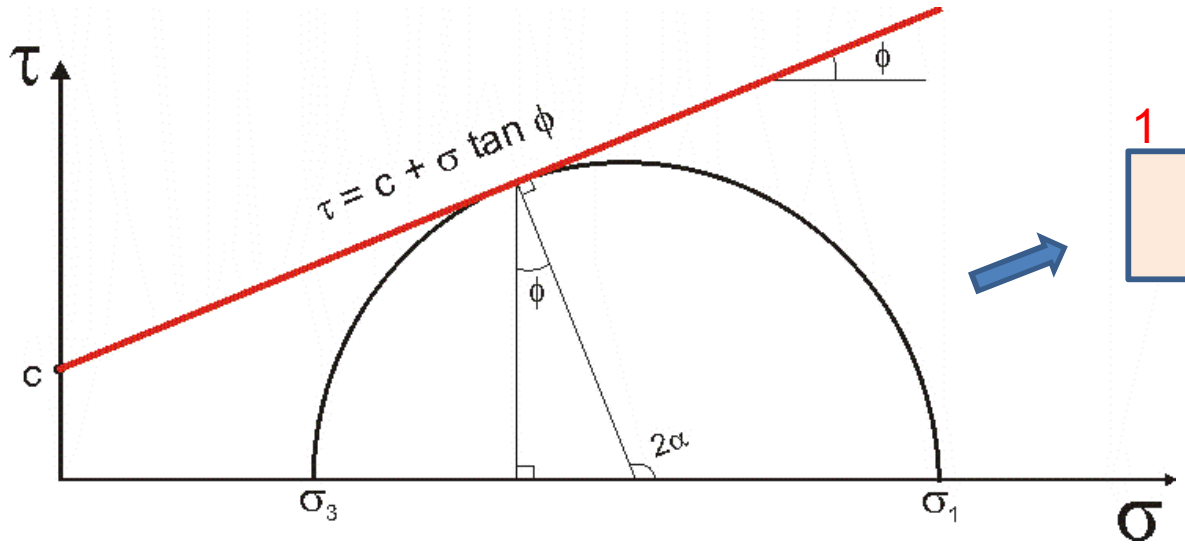


σ_1 ve σ_3:
Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler



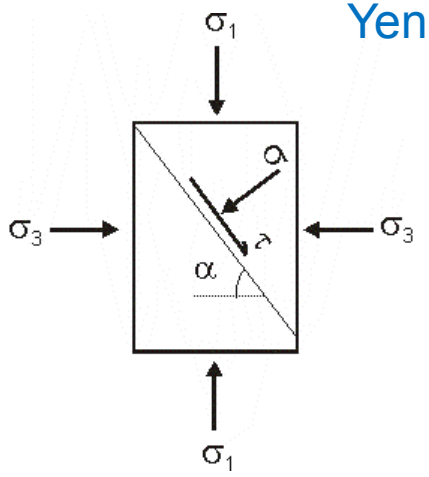
Makaslama dayanımı ve normal gerilme cinsinden Mohr-Coulomb Yenilme Kriteri:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\phi$$



1

$$\alpha = (45 + \phi/2)$$



Yenilme anındaki gerilmeler:

2

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

3

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

1, 2 ve 3 no'lu eşitlikler yenilme kriteri eşitliğinde kullanılırsa

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin 2(45 + \phi/2) = c + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2(45 + \phi/2)\right)\tan\phi$$

$$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\sin(90+\phi)=c+\left[\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}+\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\cos(90+\phi)\right]\tan\phi$$

$\cos\phi$ $\qquad$ $-\sin\phi$

Sadeleştirmeler yapıldığında

$$(\sigma_1-\sigma_3)\cos^2\phi=2c\cdot\cos\phi+(\sigma_1+\sigma_3)\sin\phi-(\sigma_1-\sigma_3)\sin^2\phi$$

σ_1 çekilip yeniden düzenlenirse

Asal gerilmeler cinsinden Mohr Coulomb Yenilme Kriteri Eşitlikleri:

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

Ya da

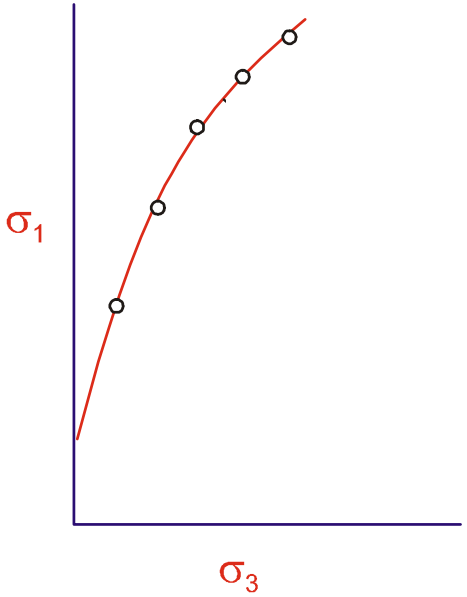
$$\sigma_1=2c\cdot\sqrt{\tan^2(45+\phi/2)}+\sigma_3\tan^2(45+\phi/2)$$

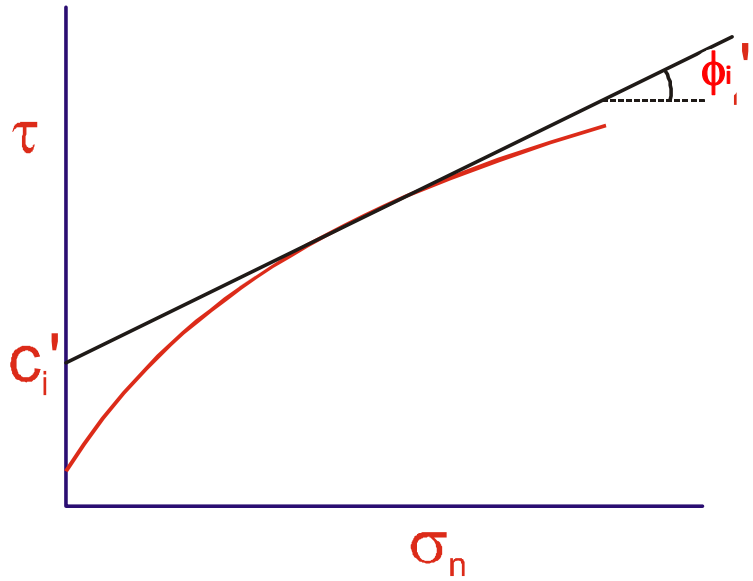
Hoek-Brown Yenilme Kriteri:

Ölçüt, Griffith (1921 ve 1924)'in önerdiği ve McClintock ve Walsh (1962) tarafından modifiye edilen kuramın üzerine kurulmuştur. Kaya malzemesi için de kullanılabilmekle birlikte günümüzde kaya kütlelerinin dayanım ve yenilme durumlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_{ci} + s\sigma_{ci}^2}$$

σ_1 ve σ_3:Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler
σ_{ci}: Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
m ve s: Boyutsuz malzeme sabitleridir (Kaya malzemesi için s=1 dir, m parametresi ise kaya türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir, üç eksenli sıkışma deneylerinden yararlanılarak belirlenebilir.)

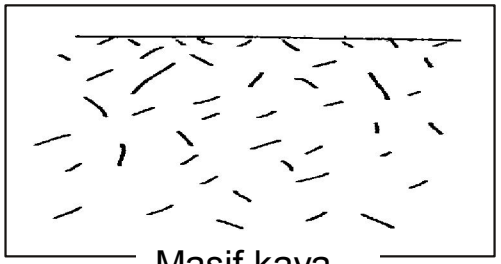




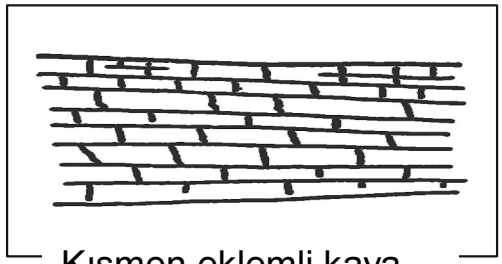
Bölüm 5

Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri

Başlıca Kaya Kütleleri

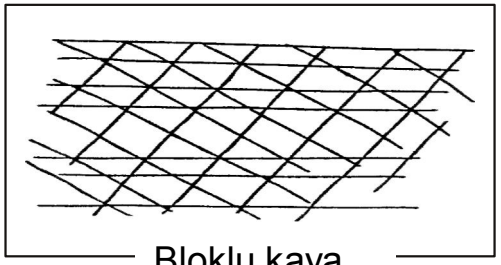


Masif kaya



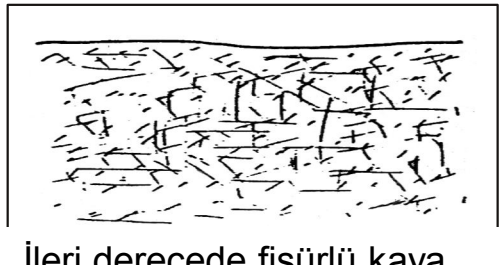
Kısmen eklemli kaya

Kısmen bloklu kaya



Bloklu kaya

Çok gözenekli kaya

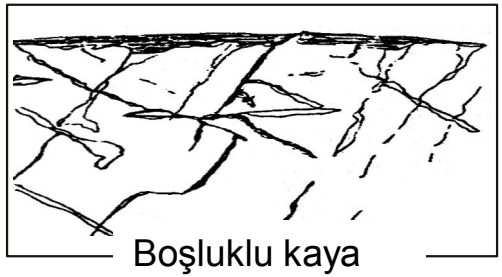


İleri derecede fisürlü kaya

Sıkışan ve şişen kaya

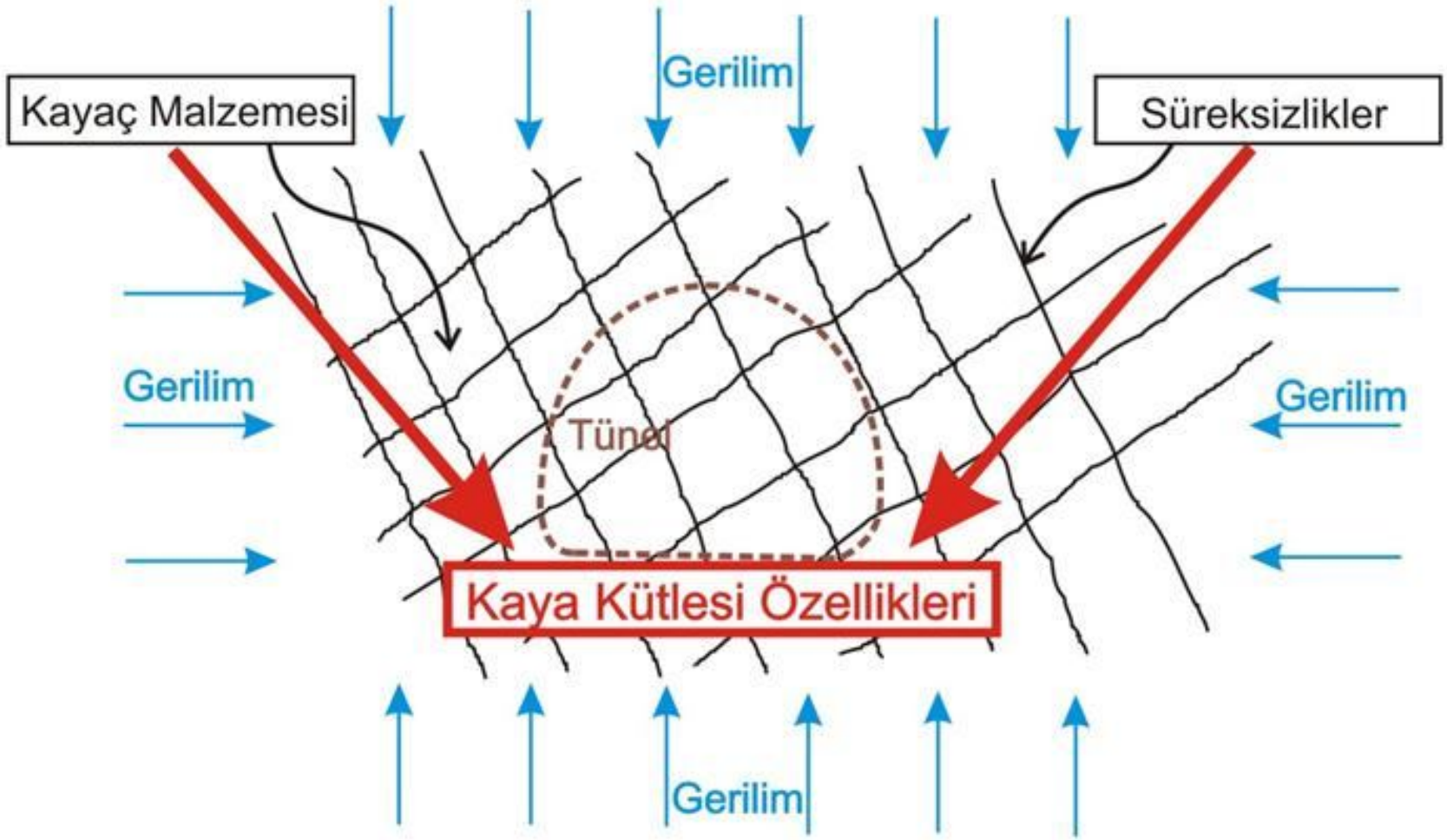
Düzenli karışımlar

Düzensiz karışımlar

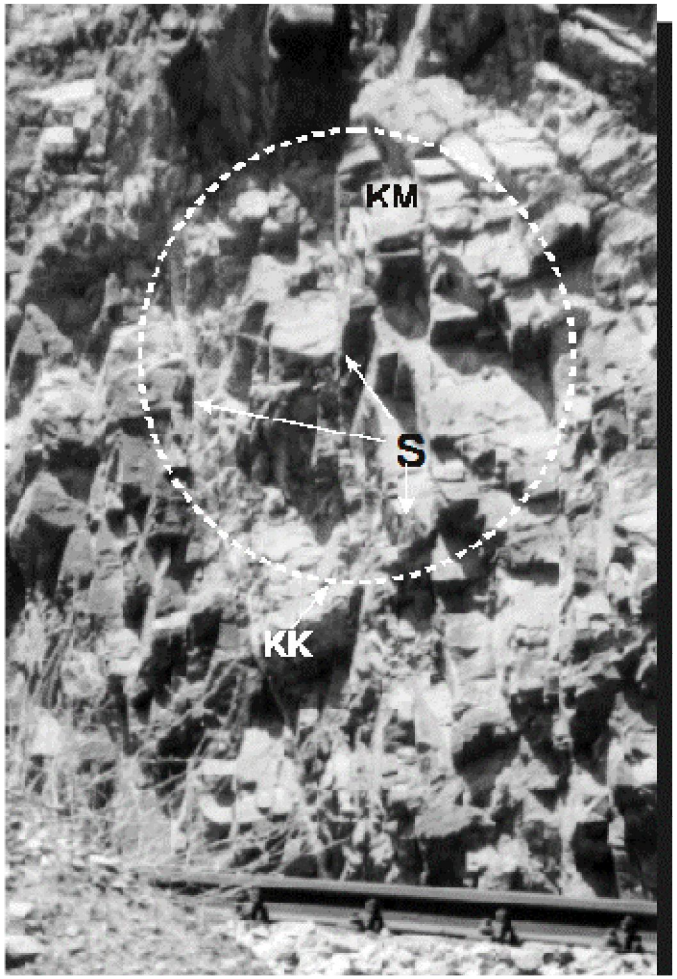


Boşluklu kaya

Goodman, 1995 (Ulusay ve Sönmez, 2007'den)


Kayaç Malzemesi
Gerilim
Süreksizlikler
Gerilim
Tünel
Gerilim
Kaya Kütlesi Özellikleri
Gerilim

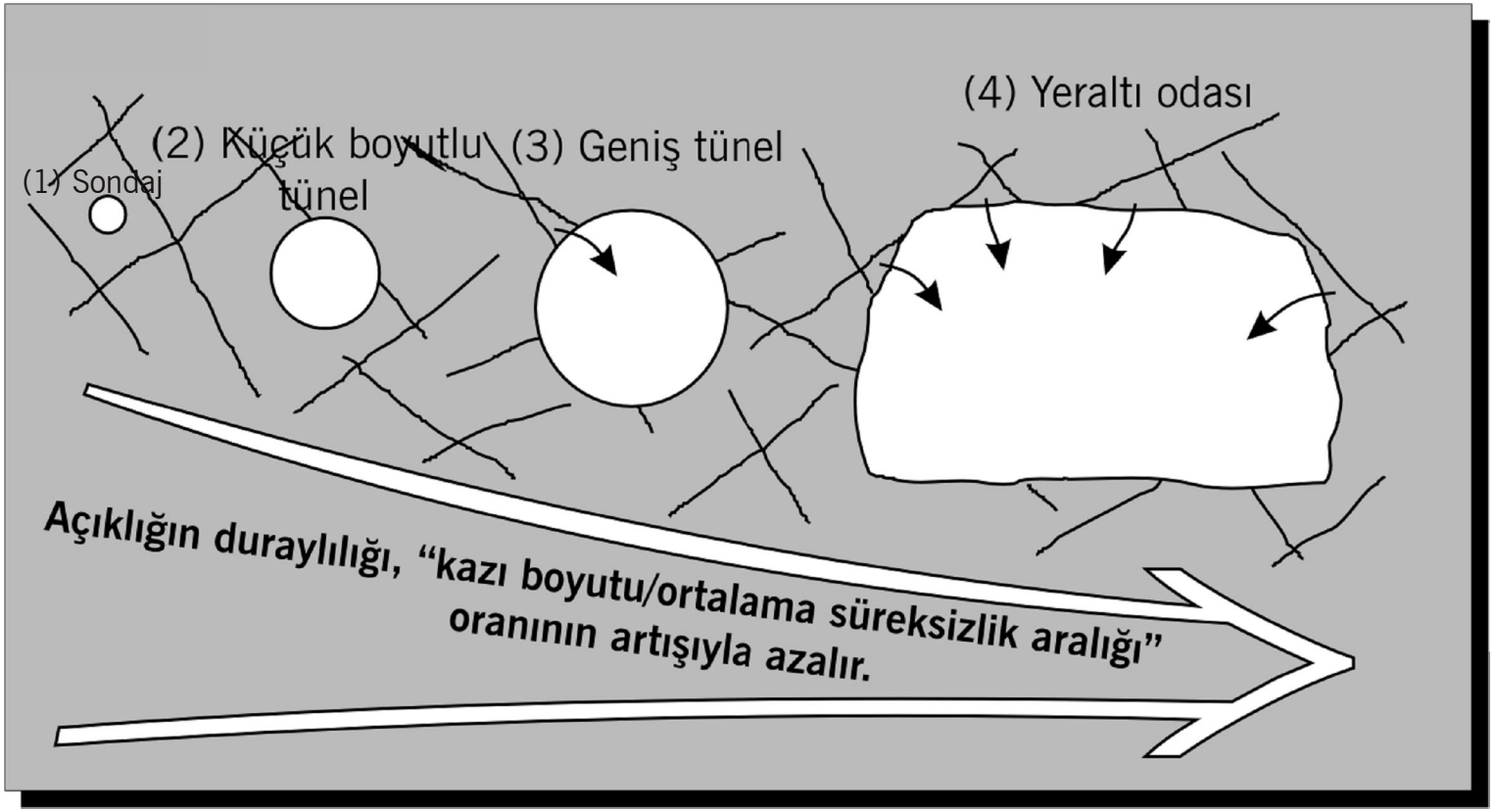
(Hudson, 1989)



(Ulusay ve Sönmez, 2007)

TKİ-Milas Işıkdere Sahası Açık Ocak Kömür İşletmesindeki kaya kütlesinden bir görünüm Foto: 2010

Ölçek etkisi



Kazı boyutlarının artışıyla kaya kütlesi kavramının önem kazanmasını gösteren şematik kesit (Hudson, 1989'dan düzenlenmiştir). (Ulusay ve Sönmez, 2007)

5.1. SÜREKSİZLİK TÜRLERİ

Kaya kütlesini eksiksiz şekilde tanımlayabilmek için, içerdiği süreksizliklerin de ayırtlanarak, özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

Süreksizlik: Kaya kütlesi içinde çekilme dayanımı düşük veya sıfır olan zayıflık düzlemi.

Süreksizlik Türleri:

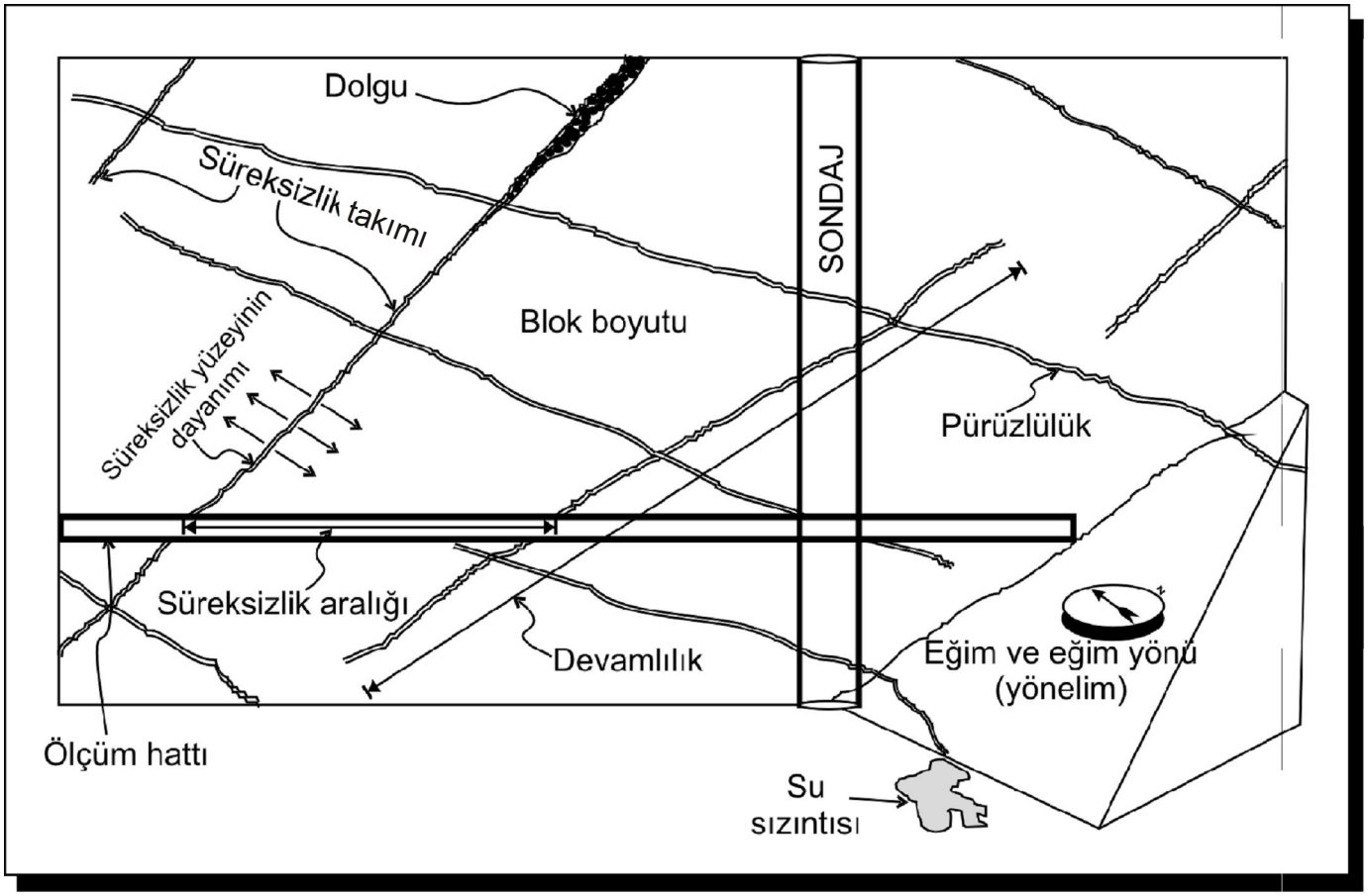
1. Grup: Takım veya sistemler halinde görülen, istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulabilen ve yüzeyleri boyunca herhangi bir yerdeğiştirmenin meydana gelmediği TABAKA, EKLEM, DİLİNİM (KLİVAJ), ŞİSTOZİTE, FOLİASYON, LAMİNASYON gibi süreksizliklerdir.

2. Grup: Tek başına bulunan, istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulmayan ve yüzeyleri boyunca bir yer değiştirmenin gözlendiği FAY ve MAKASLAMA ZONU gibi süreksizliklerdir.

Süreksizlik türlerinin tanımları:

- ***Dokanak;*** iki farklı litolojik birim arasındaki sınır.
- ***Tabaka düzlemi;*** sedimanter kayaların oluşumu sırasında tane boyu ve yönelimi, mineralojik bileşim, renk ve sertlik gibi faktörlerdeki değişime bağlı olarak gelişen bir yüzeydir.
- ***Fay ve makaslama zonu;*** yüzeyi boyunca birkaç santimetreden kilometrelerce uzunluğa kadar göreceli bir yerdeğiştirmenin meydana geldiği makaslama yenilmesine maruz kalmış yüzeylerdir.
- ***Eklem;*** yüzeyi boyunca herhangi bir yerdeğiştirmenin meydana gelmediği doğal kırıktır.
- ***Dilinim (Klivaj);*** ince taneli kayalarda, sıkıştırıcı kuvvete dik yönde oluşmuş, sık aralıklı ve birbirine paralel yönde gelişmiş zayıflık düzlemleridir.
- ***Fisür;*** Fookes ve Denness (1969) tarafından "sürekli bir malzemeyi ufak birimlere ayırmadan bölen süreksizlik“
- ***Foliasyon (Yapraklanma);*** yüksek basınç ve/veya yüksek sıcaklık altında farklılaşma veya minerallerin tercihli yönelimi nedeniyle ortaya çıkan metamorfik kökenli zayıflık yüzeyleridir.
- ***Damar;*** çevre kayasından farklı özellikteki bir malzeme tarafından doldurulmuş kırıktır.

5.2. SÜREKSİZLİK ÖZELLİKLERİ



- Süreksizlik takımı (seti) sayısı ve ortalama yönelimleri
- Süreksizlik aralığı
- Süreksizlik devamlılığı
- Süreksizliklerin pürüzlülüğü, dalgalılığı ve Pürüzlülük-dayanım ilişkisi
- Süreksizlikerin açıklığı ve dolgu durumu
- Süreksizlik yüzeyinde bozunma

Kaya kütlelerinin tanımlanmasında süreksizliklerin esas alınan başlıca özellikleri (Hudson, 1989'dan yararlanılmıştır). (Ulusay ve Sönmez, 2007'den)

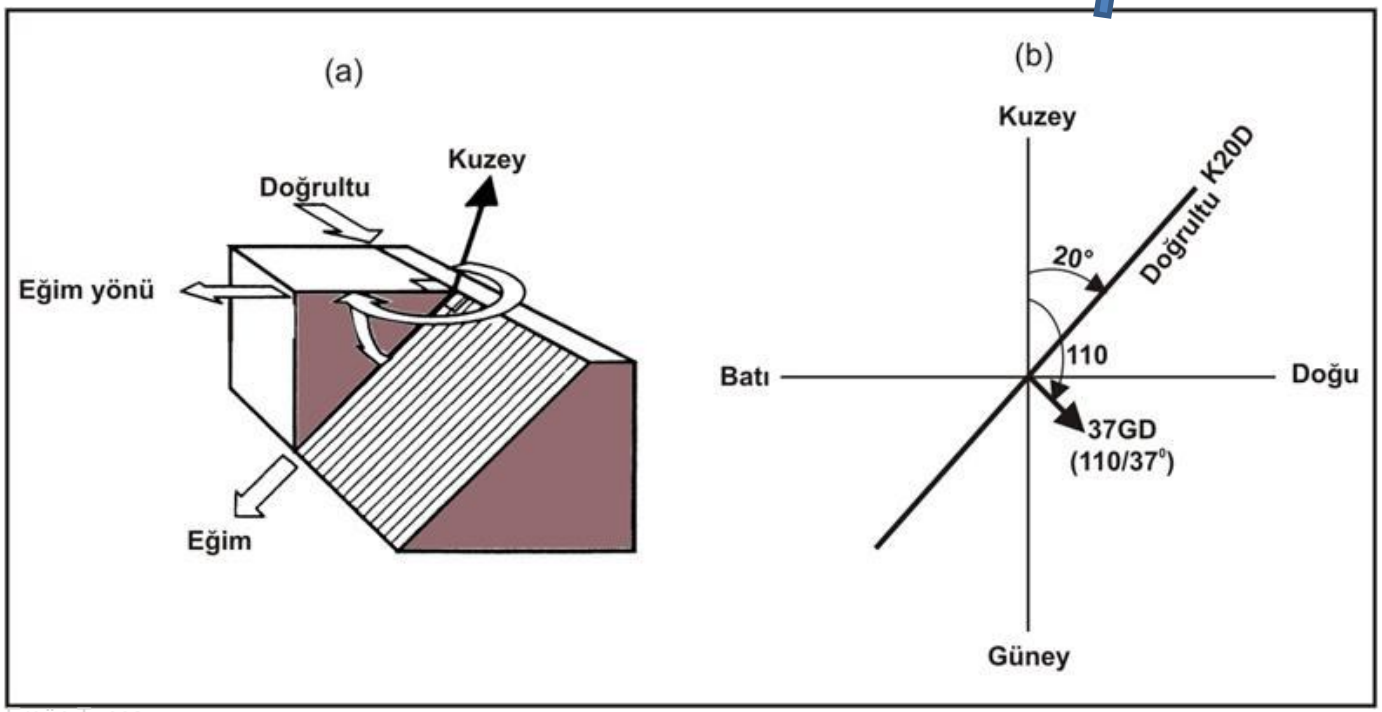
Süreksizliklerin yönelimi:

Süreksizlik yönelimlerinin ifade edilmesi:

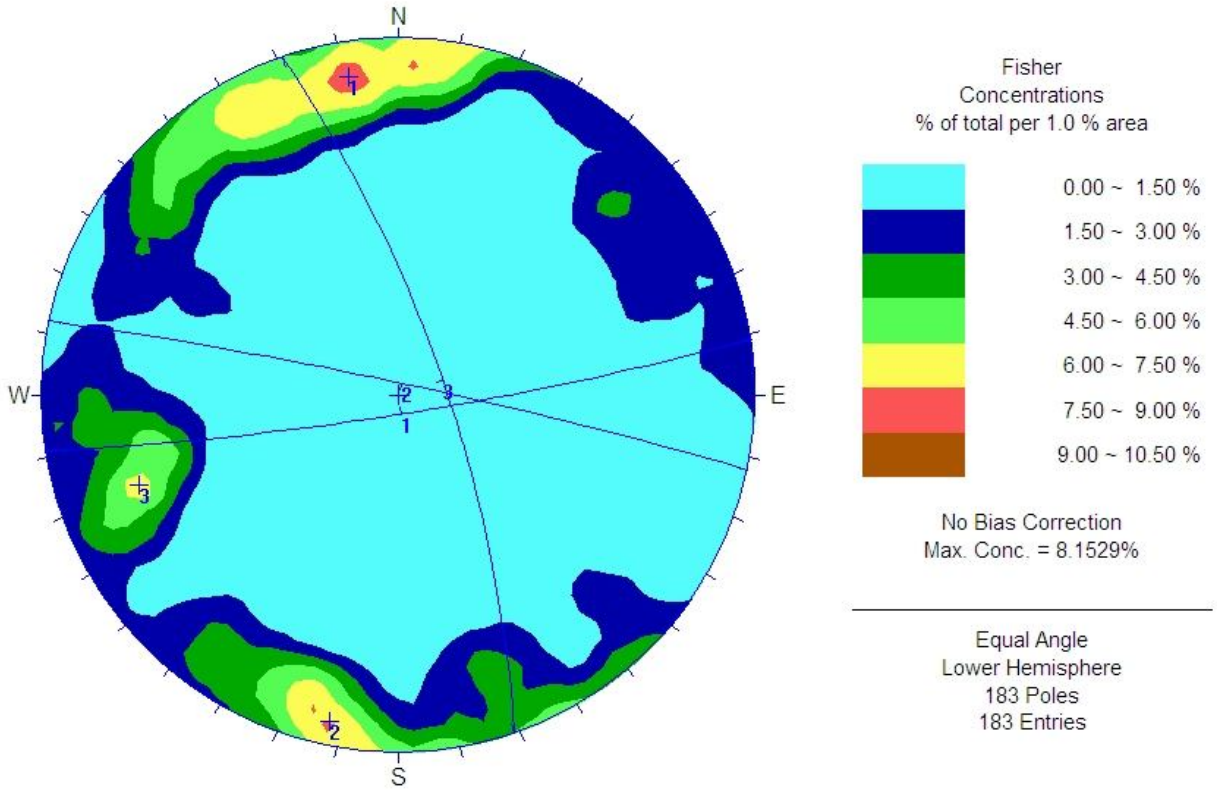
Eğim / Doğrultu ➔ (37 GD / K20D)

veya

Eğim / Eğim yönü ➔ (37 / 110)

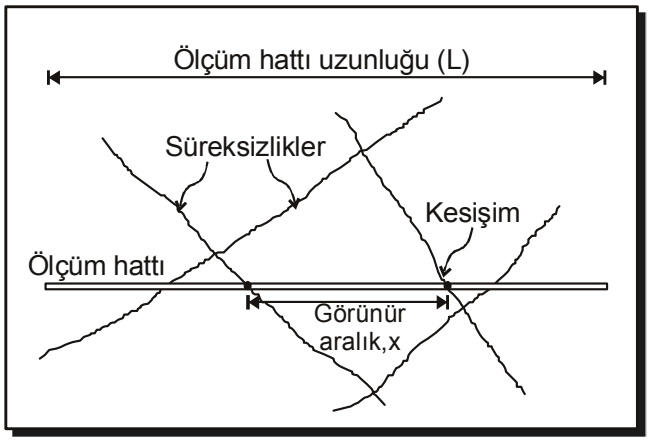


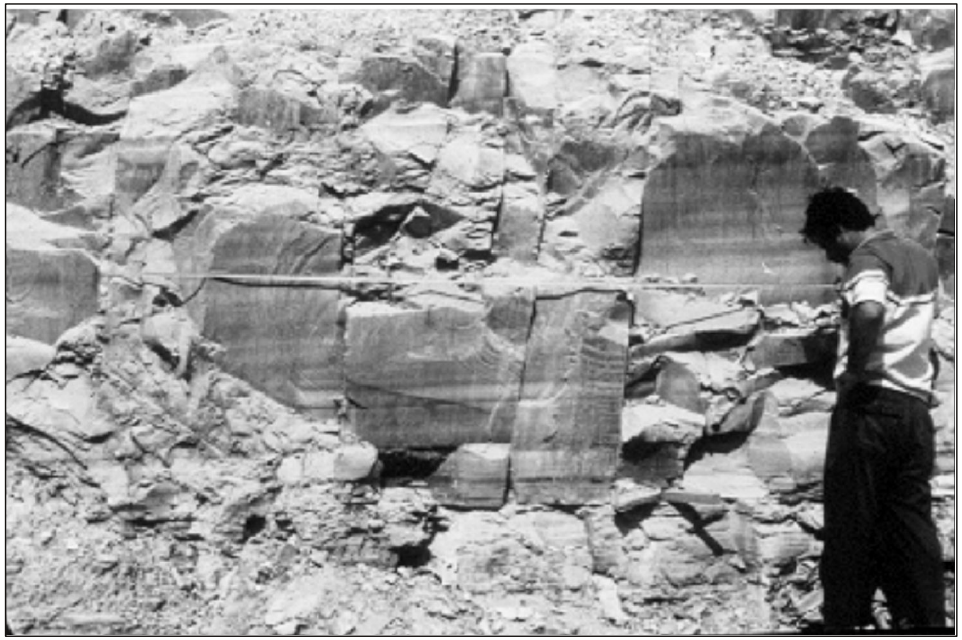
En az 150 civarında süreksizlik yönelim ölçüsü alınarak stereonette değerlendirme yapılır ve ana eklem takımlarının sayısı ve herbir eklem takımının ortalama yönelimi belirlenir.



3 Ana Eklem takımı mevcut. Ortalama Yönelimleri: 1. Set: 82/175
2. Set: 85/015
3. Set: 78/072

Süreksizlik aralığı ve sıklığı:





. Ölçüm hattı boyunca süreksizlik aralığının tayini ve bir hat ölçümünden görünüm
(Ulusay ve Sönmez, 2007'den)

Süreksizlik aralığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981)

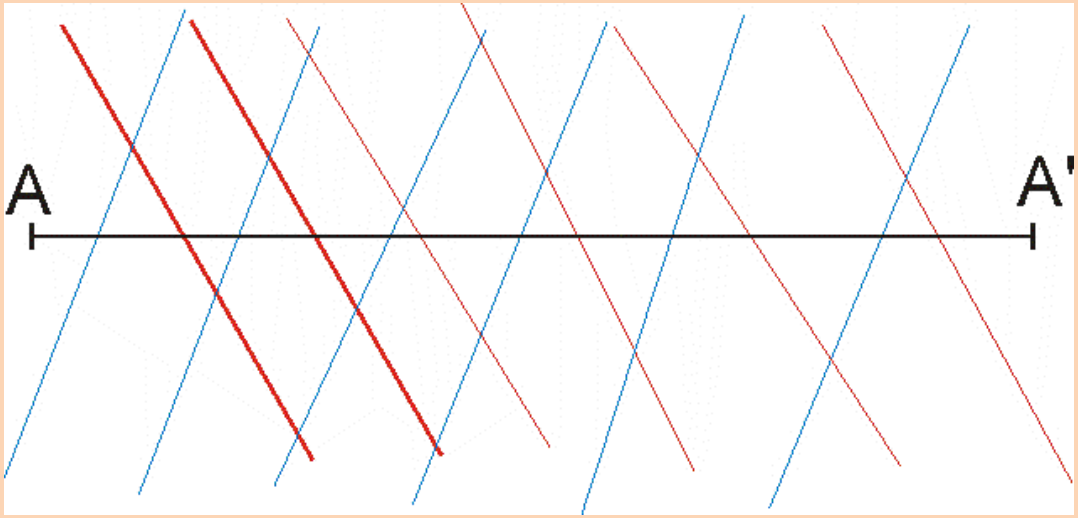
Aralık (mm)	Tanımlama
< 20	Çok dar aralıklı
20-60	Dar aralıklı
60-200	Yakın aralıklı
200-600	Orta derecede aralıklı
600-2000	Geniş aralıklı
2000-6000	Çok geniş aralıklı
>6000	İleri derecede geniş aralıklı

❖ Aralık ölçümü için en ideal koşul süreksizliklerin etüt hattına dik olmasıdır, ancak doğada bu şekilde bir ölçüm alınabilecek yüzlekleri bulmak çoğu zaman mümkün değildir.

❖ Görünür aralık daha kolay ölçülebilen bir parametre olup, süreksizlik yoğunluğunun tanımlanmasında esas alınır.

❖ Patlatma kırıkları ölçüme katılmaz.

ÖRNEK: İki adet süreksizlik takımının bulunduğu bir şev aynasında süreksizlik aralığı ölçümü



Ortalama süreksizlik aralığı ➔ $X = L/N$ (m)

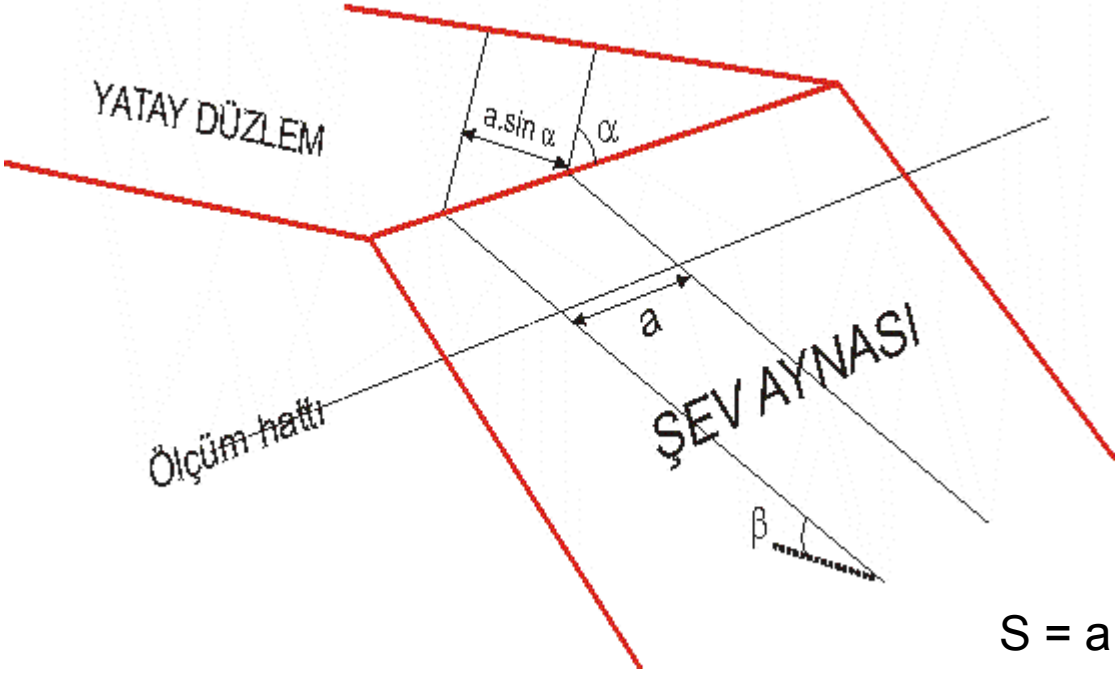
Süreksizlik sıklığı ➔ $\lambda = N/L$ (m^{-1})

L: Ölçüm hattı uzunluğu (A-A')
N: Ölçüm hattını kesen tüm süreksizliklerin sayısı

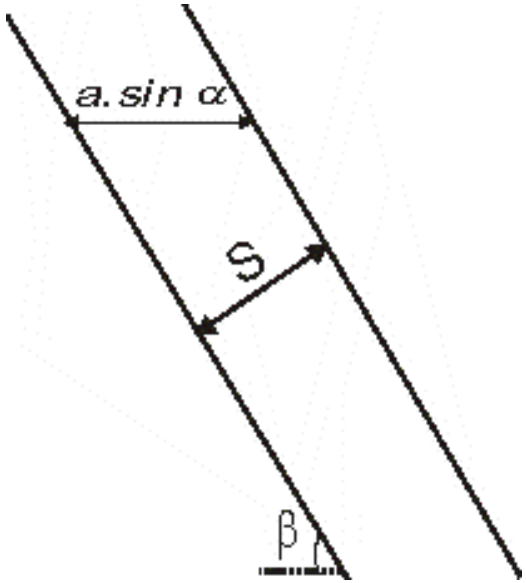
Bu tür ölçüm hatlarından (hat etüdü) yararlanılarak her bir süreksizlik takımı için ayrı ayrı olmak üzere gerçek süreksizlik aralıkları belirlenebilir.

Gerçek süreksizlik aralığı:

Aynı eklem takımına ait iki süreksizlik



Süreksizlik doğrultusuna dik kesit

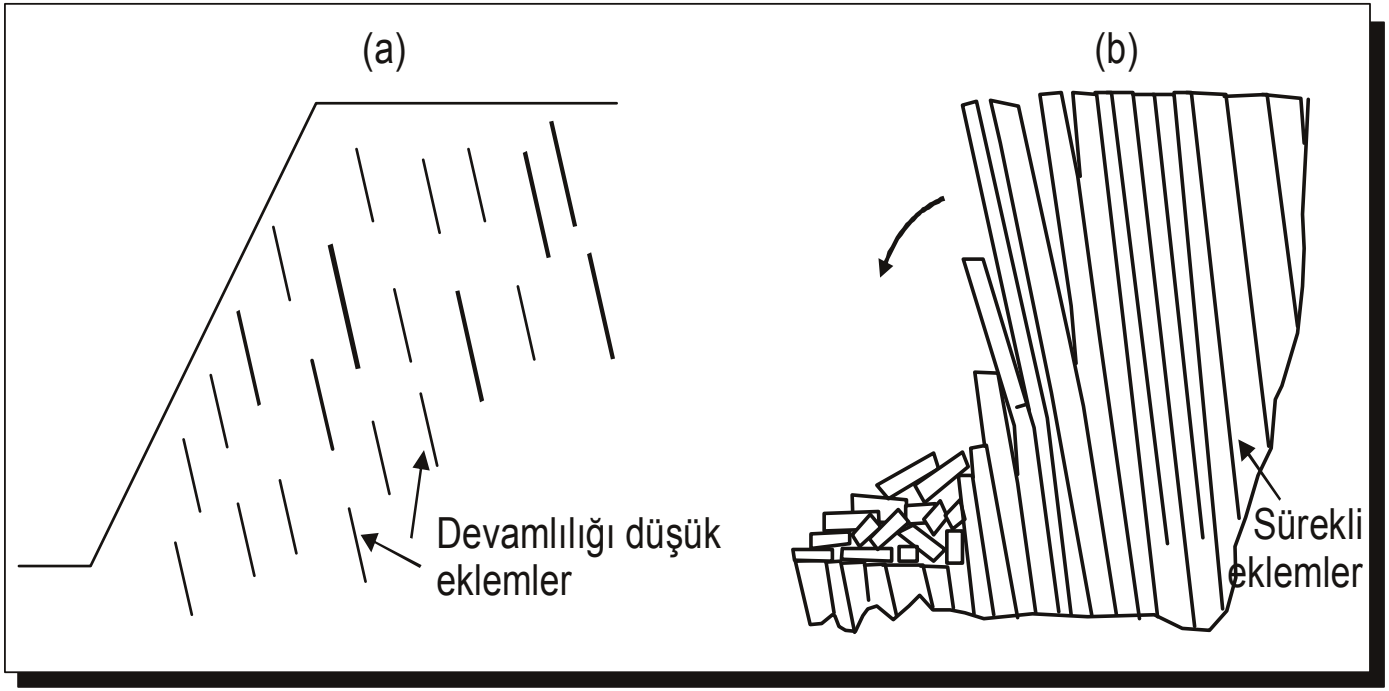


$$S = a \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta$$

S: Gerçek süreksizlik aralığı
a: Görünür süreksizlik aralığı
α: Ölçüm hattı ile süreksizlik doğrultusu arasındaki açı
β: Süreksizliklerin gerçek eğim açısı

Bu durumda; herhangi bir süreksizlik takımına ait gerçek süreksizlik aralığını bulmak için, önce ölçüm hattı boyunca söz konusu takıma ait süreksizliklerin ortalama aralığı bulunur (örneğin, birinci takım için ➔ $x_1=L/N$), sonra $\mathbf{S_1 = x_1.\sin\alpha.\sin\beta}$ işlemi yapılır.

Süreksizliklerin devamlılığı:

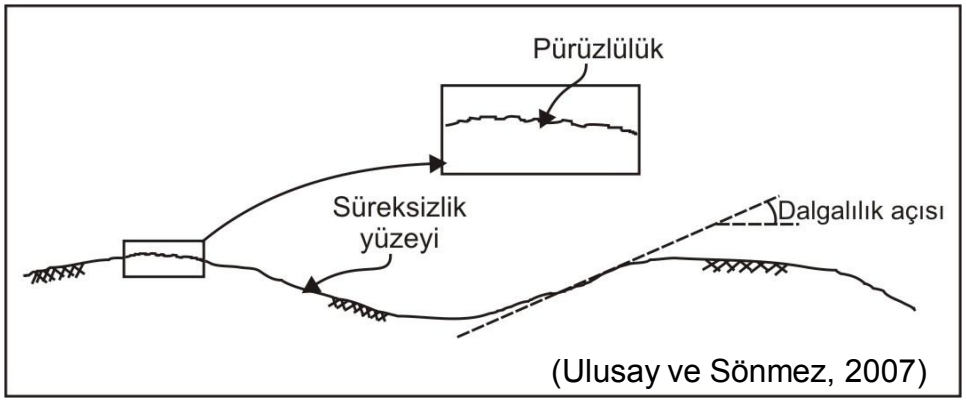


(Ulusay ve Sönmez, 2007)

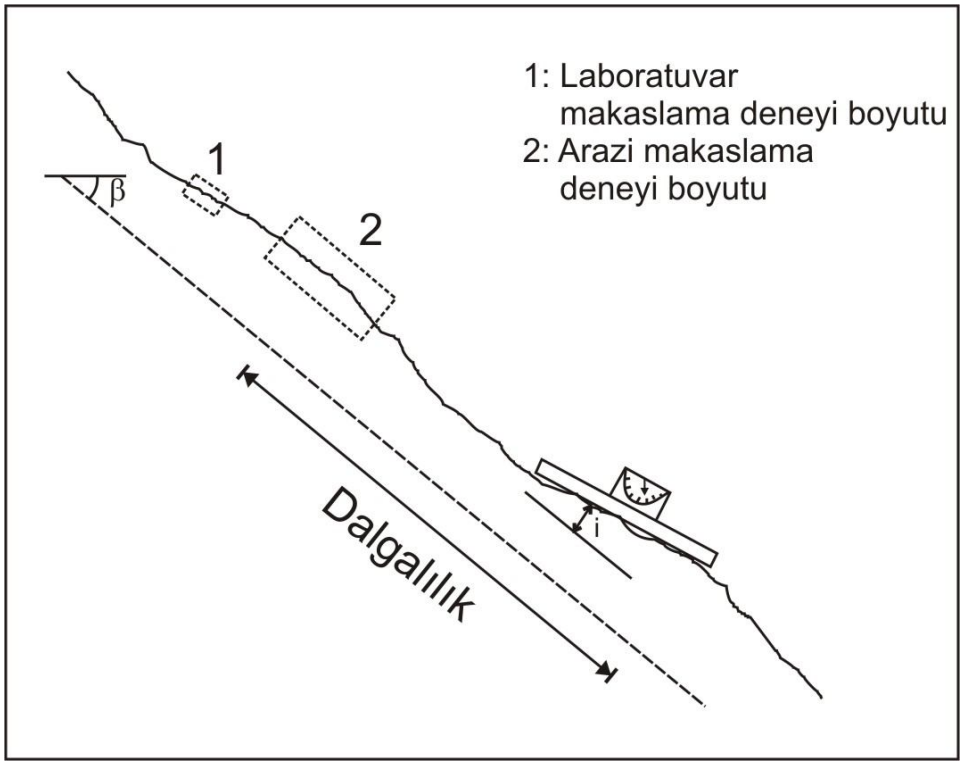
Süreksizliklerin devamlılığını tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

Tanımlama	Süreksizlik izinin uzunluğu
Çok düşük devamlılık	< 1 m
Düşük derecede devamlılık	1-3 m
Orta derecede devamlılık	3-10 m
Yüksek devamlılık	10-20 m
Çok yüksek devamlılık	>20 m

Pürüzlülük ve Dalgalılık:



(Ulusay ve Sönmez, 2007)

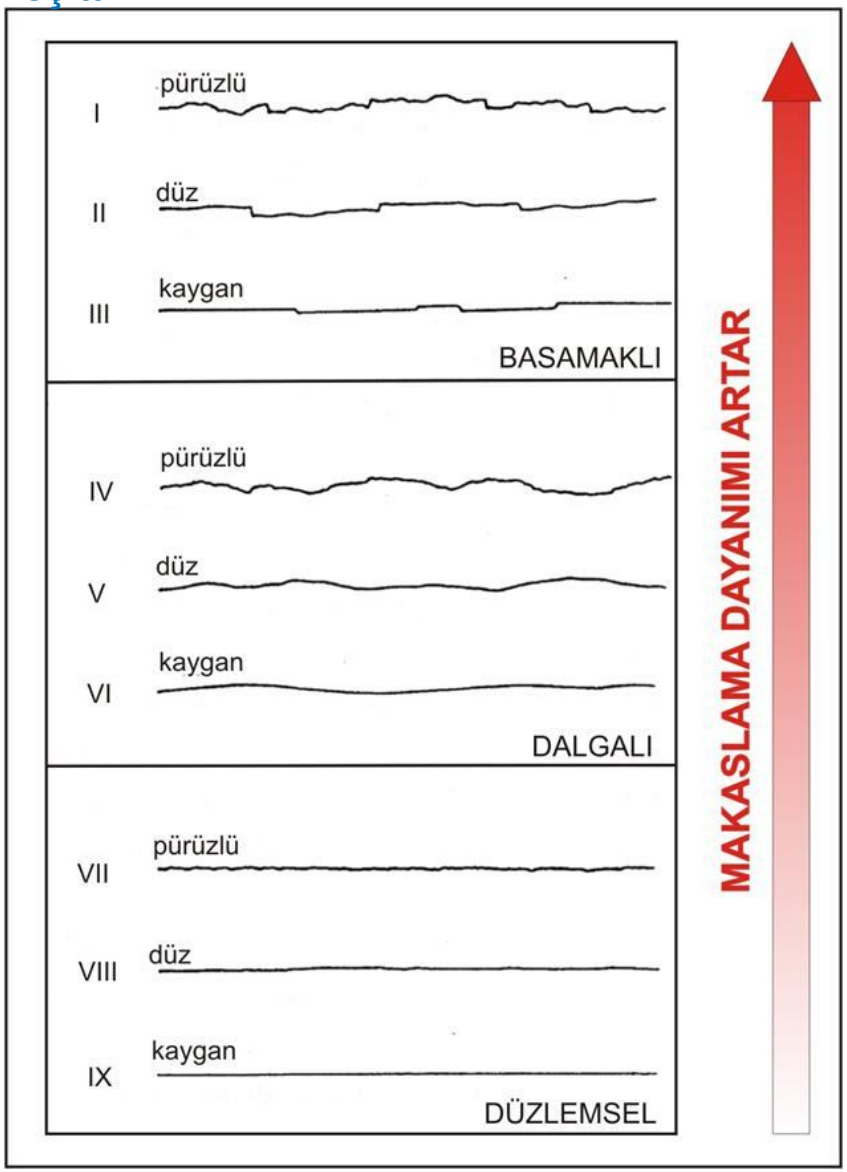


(ISRM, 1981)

❖ Pürüzlülük: Bir süreksizlik yüzeyinin düzlemsellikten küçük ölçekli sapmaları. Laboratuvar boyutundaki örneklerin makaslama dayanımını etkiler.

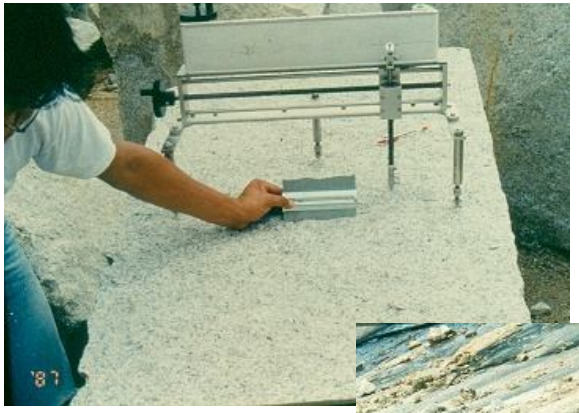
❖ Dalgalılık: Bir süreksizlik yüzeyinin düzlemsellikten büyük ölçekli sapmaları. Büyük ölçekte süreksizliklerin makaslama dayanımını etkiler.

Her profilin uzunluğu 1 ile 10 m arasında değişir. Düşey ve yatay ölçekler birbirine eşittir.

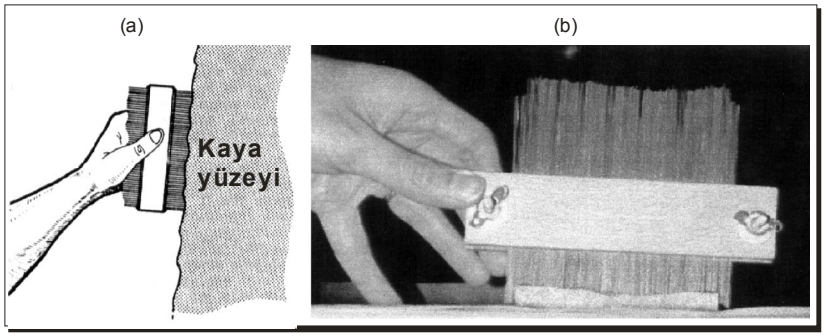


ISRM (1981)

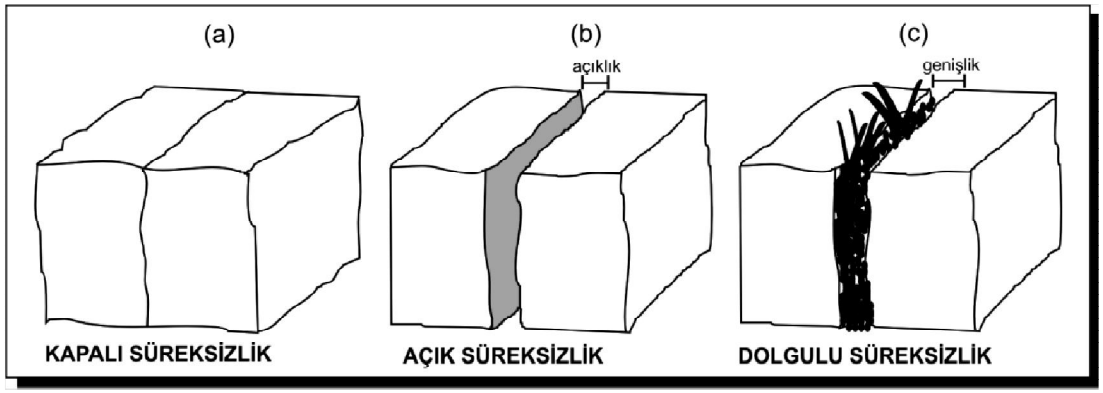
Profilometre ile pürüzlülük ölçümü



Fotoğraflar: Ömer Aydan



Süreksizliklerin açıklığı ve dolgu:

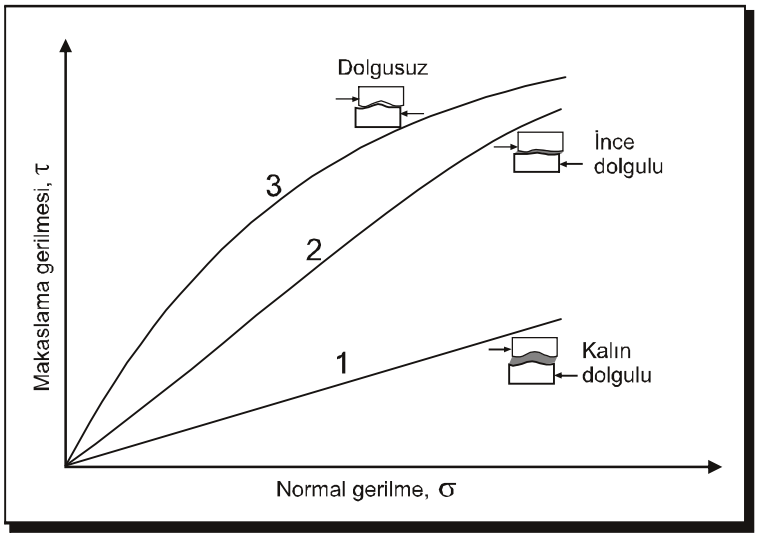


Kapalı, açık ve dolgulu süreksizlikler (ISRM, 1981'den).

Pürüzlülüğün yanı sıra, dolgunun olup olmaması, kalınlığı ve sert ya da yumuşak özellikte olması süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımını etkileyen hususlardır.

Süreksizliklerin açıklığı tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

Açıklık	Tanımlama	
<. 0.1 mm	Çok sıkı	
0.1-0.25 mm	Sıkı	KAPALI yapılar
0.25-0.5 mm	Kısmen açık	
0.5-2.5 mm	Açık	
2.5-10 mm	Orta derecede geniş	BOŞLUKLU yapılar
> 10 mm	Geniş	
10-100 mm	Çok geniş	
100-1000 mm	Aşırı geniş	AÇIK yapılar
>1000 mm	Boşluklu	



Dolgu malzemesinin kalınlığının süreksizliğin makaslama dayanımına etkisi (Hoek ve Bray, 1981'den düzenlenmiştir).
(Ulusay ve Sönmez, 2007)

Süreksizlik yüzeylerinde bozunma:

Süreksizlik yüzeylerindeki bozunma durumu, süreksizliklerin dayanımını etkileyen faktörlerden biridir ve gerek kaya malzemesi gerekse kaya kütlesi için önerilen bozunma sınıflamaları dikkate alınarak tanımlanmalıdır. ISRM (1981) tarafından önerilen bozunma sınıflamaları ve tanımlama ölçütleri aşağıdaki gibidir.

Kaya malzemesinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama (ISRM, 1981).

Tanım	Tanımlama ölçütü
Taze (bozunmamış)	Kaya malzemesinin bozunduğuna ilişkin belirgin bir gösterge yoktur.
Rengi değişmiş	Orijinal kaya malzemesinin rengi değişmiş olup, renkteki değişimin derecesi belirgindir. Renk değişimi sadece bazı mineral taneleriyle sınırlı ise, bu durum kayıtlarda belirtilmelidir.
Bozunmuş	Kaya malzemesi orijinal dokusunu korumakla birlikte, toprak zemine dönüşmüştür. Ancak minerallerin bir kısmı veya tamamı bozunmuştur.
Bozunmuş-dağılmış	Kayanın orijinal dokusu korunmakla birlikte, kaya malzemesi tamamen bozunarak toprak zemine dönüşmüş olup, kırılgandır.

Kaya kütlelerinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama (ISRM, 1981).

Tanım	Tanımlama ölçütü	Bozunmanın derecesi
Bozunmamış (Taze)	Kayanın bozunduğuna ilişkin gözle ayırdedilebilir bir belirti olmamakla birlikte, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözlenebilir.	W 1
Az bozunmuş	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir.	W 2
Orta derecede bozunmuş	Kayanın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Kaya; taze, ya da renk değişimine uğramış olup, sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W 3
Tamamen bozunmuş	Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlesinin yapısı halen korunmaktadır.	W 4
Artık zemin	Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlesinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmakla birlikte, zemin taşınmamıştır.	W 5

Süreksizlik özellikleri HAT ETÜTLERİ aracılığıyla belirlenebilir. Ölçüm hattını kesen her bir süreksizliğe ilişkin özellikler, istatistiksel değerlendirmelerde kullanılmak üzere formlara kaydedilir.

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı

SÜREKSİZLİK ÖLÇÜMÜ VERİ FORMU

Genel Bilgiler:

Sıra No: Lokasyon: Tarih: Hat No: Hat Doğrultusu: Sayfa No:

SÜREKSİZLİKLERİN ÖZELLİKLERİ VE YÖNELİMİ

Metre	Tür	Eğim	Eğim Yönü Doğrultu	Devamlılık (m)	Açıklık (m)	Dolgunun Türü	Pürüzlülük	Dalgalılık Boyu (mm)	Dalgalılık Yüksekliği (mm)	Bozunma	Su Durumu	Su Akışı (lt/dk)	AÇIKLAMALAR

Tür:
1. Fay Zonu
2. Fay
3. Eklem
4. Klivaj
5. Şistozite
6. Makaslama
7. Çatlak
8. Tabaka

Dolgunun Türü:
1. Dolgusuz
2. Yüzey boyaması
3. Kohezyonsuz
4. Etken olmayan kil
5. Şişen kil veye kil matriks
6. Çimentolanmış (Kalsit,Kuvars vb.)
7. Klorit, Talk, Jips
8. Diğer (Tanımlayınız)

Prüzlülük:
A. Basamaklı
B. Dalgalı
C. Düz

1. Kaygan
2. Düz
3. Az pürüzlü
4. Pürüzlü
5. Çok pürüzlü

Bozunma:
1. Bozunmamış (taze)
2. Az bozunmuş
3. Orta derecede bozunmuş
4. İleri derecede bozunmuş
5. Tamamen bozunmuş
6. Artık zemin

Su Durumu:
1. Kuru
2. Nemli
3. Islak
4. Damlama (sızıntı)
5. Akış

Sondaj karotlarında süreksizliklerin karakterizasyonu

Sondajlardan elde edilen karotlardan, süreksizlik özellikleri hakkında yüzeydeki etütlerden elde edildiği kadar sağlıklı bilgi elde edilemez.

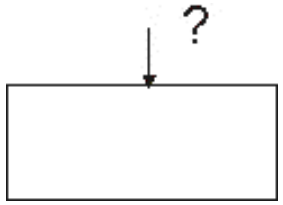
Karşılaştırma

Özellik	Ölçüm yöntemi	Karot	Yüzlek
Yönelim	Pusula-gonyometre	o	i
Ortalama aralık /sıklık	Şerit metre	i	i
Devamlılık	Şerit metre	k	i/o
Pürüzlülük	Referans yüzeyler	o	i
Yüzey dayanımı	Schmidt çekici	o	i
Açıklık	Kumpas veya cetvel	k	i
Dolgu	Gözlemsel	k	i
Sızıntı	Zamana bağlı gözlem	k	i
Set sayısı	Stereografik izdüşüm tekniği	o	i
Blok boyutu	3 boyutlu eklem sıklığı	k	i

İ: iyi, o: orta, k: kötü

5.3. SÜREKSİZLİK YÜZEYLERİNİN DAYANIMI

❖ Süreksizlik yüzeylerinin sıkışma dayanımının tahmin edilmesi için basit bazı arazi tanımlamaları ile yapılan sınıflandırmadan (ISRM, 1981) yararlanılmakla birlikte, uygulamada çoğunlukla Schmidt çekici deneyi ile dolaylı yoldan belirlenmektedir.

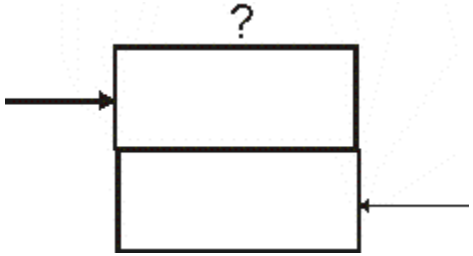


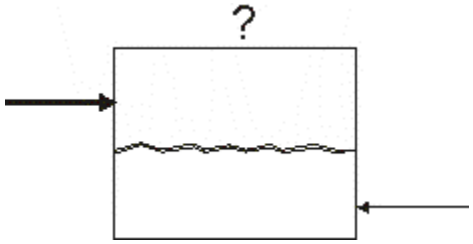
❖ Süreksizlik yüzeylerinin Makaslama dayanımının belirlenmesi için;

- Laboratuvarda doğrudan makaslama deneyinden,

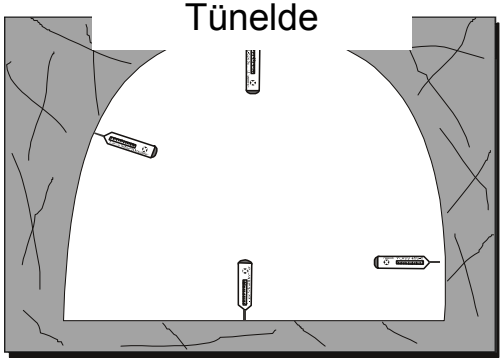
Ya da

- Barton (görgül) yenilme kriterinden yararlanılabilir (Uygulamada pürüzlü yüzeyler için tercih edilir)

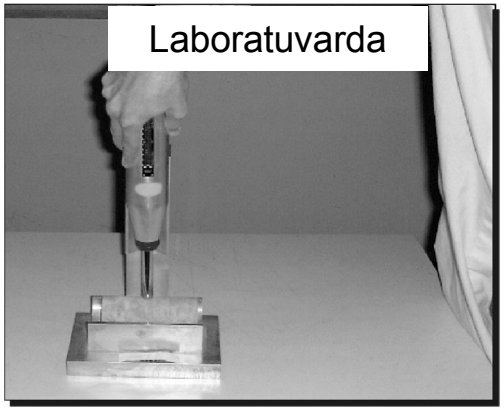




Süreksizlik yüzeylerinin sıkışma dayanımı:



(c)



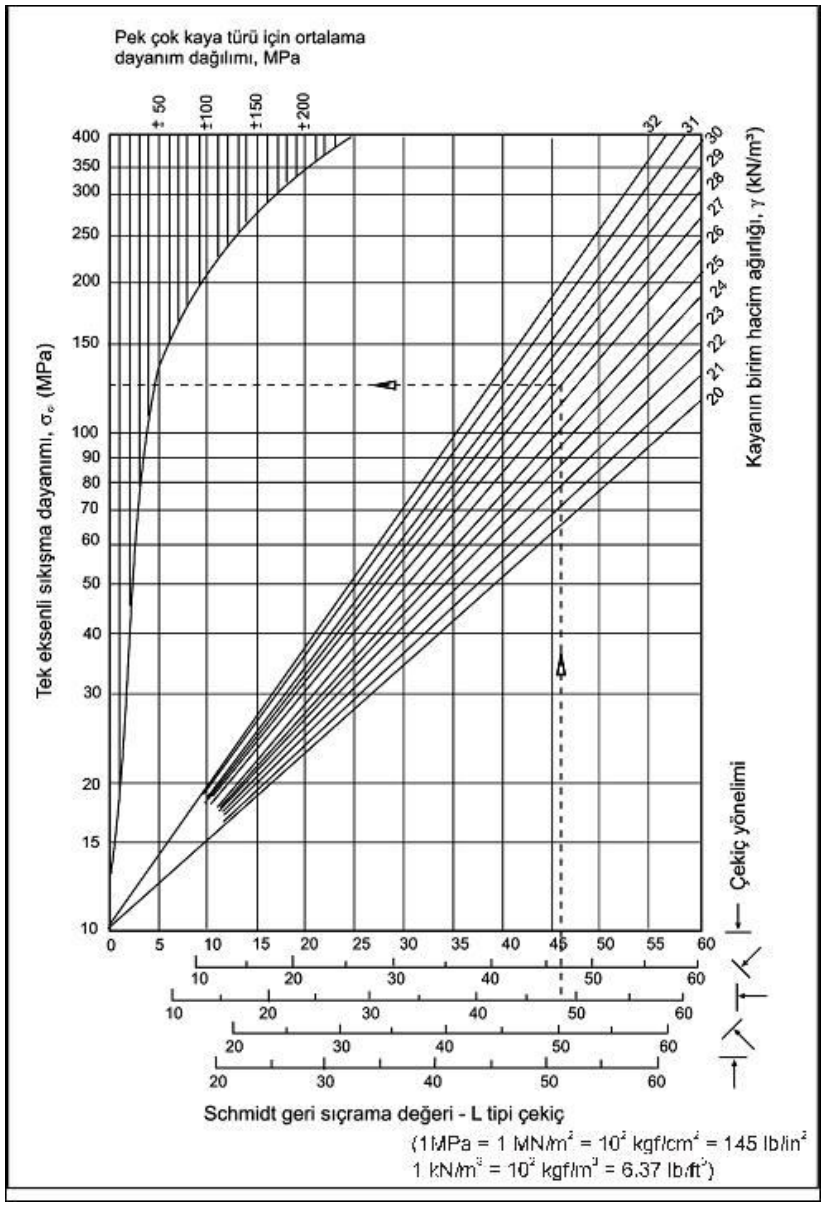
(Gökçeoğlu, 1997)

Schimidt çekici deneyinin süreksizlik yüzeylerinde ya da yapay yüzeylerde uygulanması

Süreksizlik ya da yapay yüzeyin sertliğine bağlı olarak Schimidt çekicinden okunan darbe (geri sıçrama) sayısı farklılık gösterir. Uygulanma yönüne de bağlı olarak, genel anlamda yumuşak yüzeylerde geri sıçrama sayısı az iken, sert yüzeylerde fazladır. Deneyin uygulanma şekli ve sayısı, ISRM önerilerinde (1981) belirtildiği gibi olmalıdır.

- **Süreksizlik yüzeyine dik yönde yapılır.**
- **Bir yüzeyde 20 (ISRM, 2007) deney yapılır, en küçük 10 veri atılır ve kalan 10 verinin ortalaması alınır.**

Schmidt çekici ile Dayanım belirleme abağı:



Örnek çözüm:

Düşey bir süreksizlik yüzeyine uygulanan Schmidt deneyinde belirlenen geri sıçrama sayısı 48 ve birim hacim ağırlık 27 kN/m³ ise, yüzeyin sıkışma dayanımı yaklaşık 120 MPa'dır.

SORU:

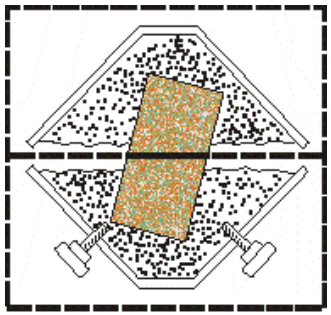
Bir tünelin tavanında düşey yönde uygulanan Schmidt çekici deneyinde aşağıdaki geri sıçrama sayıları elde edilmiştir. Bu ölçümleri ve kayanın birim hacim ağırlığının 22 kN/m³ olduğunu dikkate alarak, süreksizlik yüzeyinin sıkışma dayanımını belirleyiniz.

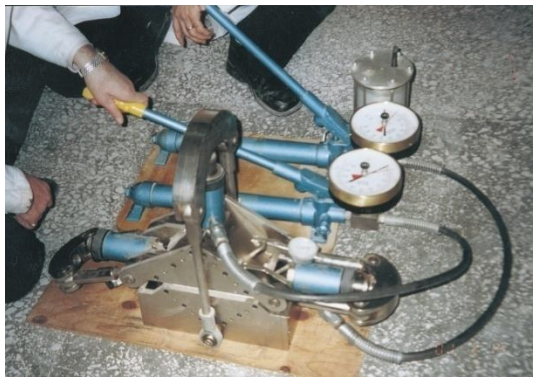
Ölçümler: 22, 23, 25, 20, 25, 24, 22, 21, 26, 24, 23, 23, 24, 23, 21, 20, 22, 23, 24, 22

Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı:

Laboratuvar deneyleri

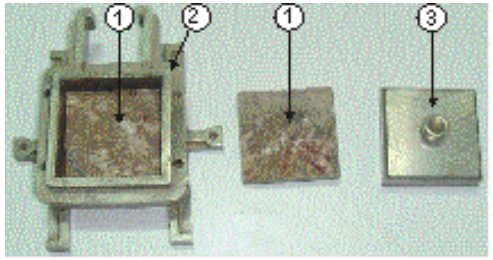
Portatif doğrudan makaslama deney düzeneği

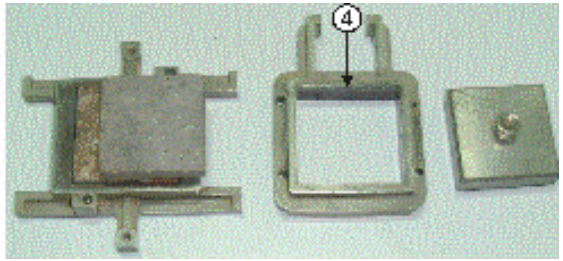




Uygulama zorluğu var!

Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deney düzeneği



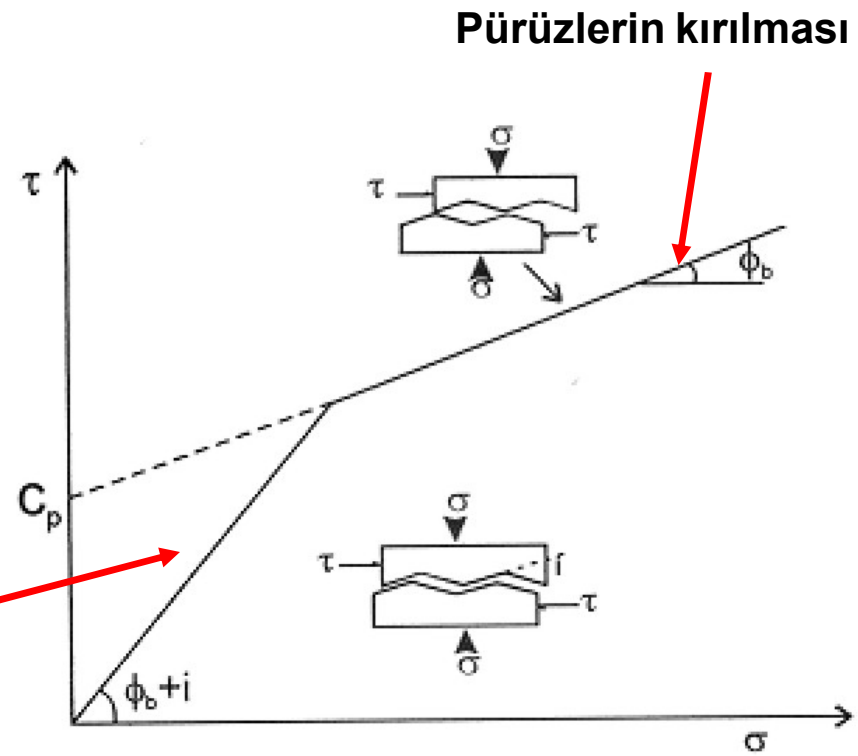


Genellikle çok az pürüzlü ya da pürüzsüz yüzeyler için tercih edilir ve doruk dayanımın yanı sıra artık (rezidüel) dayanım da belirlenebilir.

Barton Görgül Yenilme Ölçütü

- Pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımının tahmin edilmesine yönelik bir yaklaşım olan bu ölçüt, Barton (1974) tarafından geliştirilmiştir. Süreksizlik yüzeylerinin sadece doruk makaslama dayanımının tayininde kullanılır. *(Teorik olarak, pürüzsüz süreksizlik yüzeylerinin dayanımının belirlenmesinde de kullanılabilir, ancak bu tür süreksizlik yüzeyleri için çoğu mühendislik uygulamasında laboratuvar deneyi tercih edilir ve analizlerde Mohr-Coulomb yenilme kriterinden yararlanılır)*
- Ölçütün avantajı : Ölçüte ilişkin eşitlikteki parametreler göreceli olarak kolaylıkla tayin edilebilir.

Genel felsefesi



Pürüzlü Süreksizlik yüzeyinin Doruk Makaslama Dayanımı:

$$\tau = \sigma_n \tan\left(JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right)$$

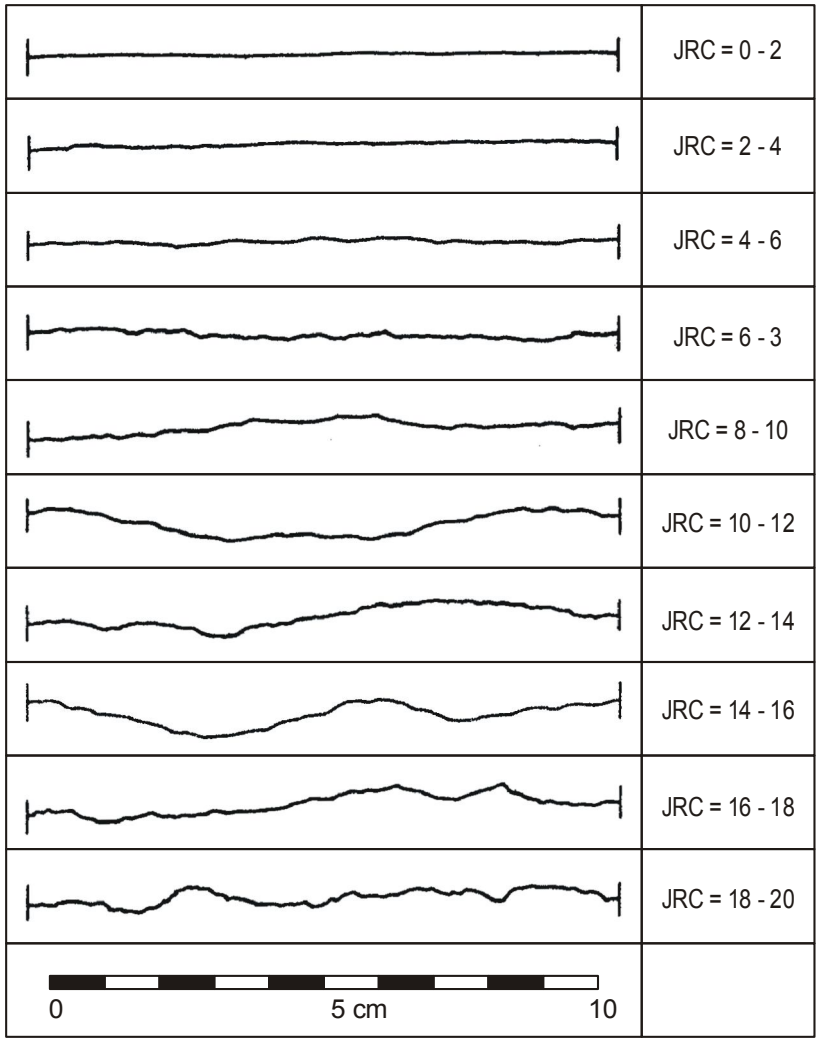
JRC : Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülük katsayısı (Arazide gözlenen süreksizlik profili ile yandaki standart profiller karşılaştırılarak değeri puanı belirlenir.)

JCS : Süreksizlik yüzeyinin dayanımı (Schmidt çekici deneyi ve ilgili dayanım belirleme abağı ile saptanır)

σ_n : Normal gerilme

ϕ_b : Temel sürtünme açısı (düz yüzeydeki makaslama deneyi ile belirlenir)

Eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) (Barton, 1974)

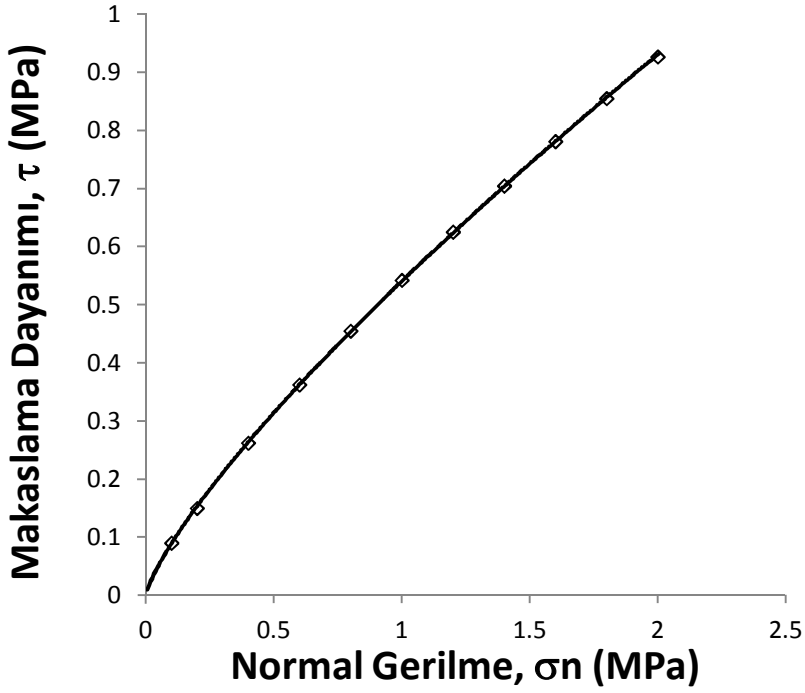


Barton ölçütü kullanılarak pürüzlü bir süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı zarfının çizilmesine ÖRNEK:

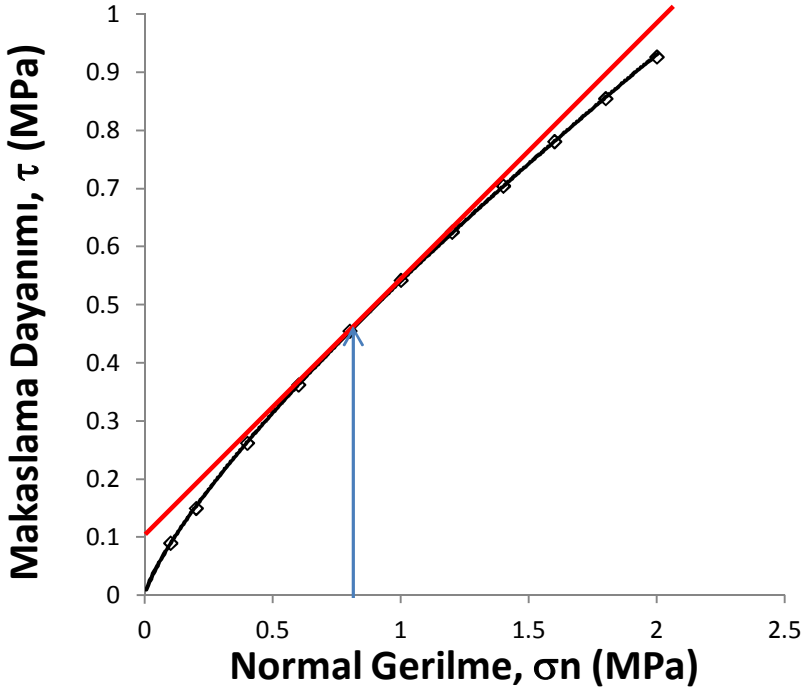
Şev duraylılığının araştırılması amacıyla, ortamdaki süreksizlik yüzeylerinde yapılan 20 adet Schmidt deneyinden belirlenen geri sıçrama sayılarından en düşük 10 ölçüm atılmış ve kalan 10 ölçümün ortalaması15 olarak belirlenmiştir. Şevi oluşturan kaya malzemesinin birim hacim ağırlığı 20 kN/m³, temel sürtünme açısı ise 12° olarak deneylerle belirlenmiştir. Süreksizlik profili Barton (1974) tarafından önerilen standart profillerle karşılaştırılmış ve 14 olarak tayin edilmiştir. Bu süreksizlik yüzeyine ait makaslama dayanımı grafiğini çiziniz.

ϕ_b=12° , JRC=14 , JCS (Schimidt çekici abağından) = 16.1 MPa

Ölçütün dayanım eşitliği kullanılarak, farklı normal gerilme düzeyleri için dayanım değerleri belirlenir ve EĞRİSEL YENİLME ZARFI çizilir.



Bir normal gerilme (σ_n) seviyesi için ϕ_i ve c_i'nin (anlık makaslama dayanımı parametrelerinin) hesaplanması:



Makaslama dayanımı eşitliğinin türevi:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan\left(JRC \cdot \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b \right) - \frac{\pi \cdot JRC}{180 \cdot \ln(10)} \left[\tan^2\left(JRC \cdot \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b \right) + 1 \right]$$

İstenen normal gerilme değeri için anlık makaslama dayanımı parametreleri

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}\right)$$

$$c_i = \tau - \sigma_n \tan \phi_i$$

5.4. SONDAJ LOGLARINDAN BELİRLENEN KAROT PARAMETRELERİ

Kaya kütlesinin kalitesi, sondajdan alınan karot verimini de etkilemektedir. Bol kırıklı çatlaklı, ya da bozunma derecesi yüksek kaya kütlelerinde elde edilen karot yüzdesi düşüktür. Bozunmanın olmadığı ya da az olduğu, süreksizlik sayısının düşük olduğu kaya kütlelerinde ise, karot yüzdesi artar.

Jeoteknik amaçlı sondajlarda derinliğe bağlı jeolojik birimin değişimi, kaya tanımlaması, yeraltı su seviyesi, yapılmışsa deney seviyeleri ve sonuçları, vs. bilgiler sondaj loglarına işlenir. Ayrıca, süreksizlik özelliklerine ilişkin belirlenebilen özellikler ile aşağıdaki 4 parametre de tespit edilerek sondaj loguna kaydedilir.

*** Toplam karot verimi (TKV) * Sağlam karot verimi (SKV)**
*** Kaya Kalite Göstergesi (RQD) * Eklem sıklığı (λ)**

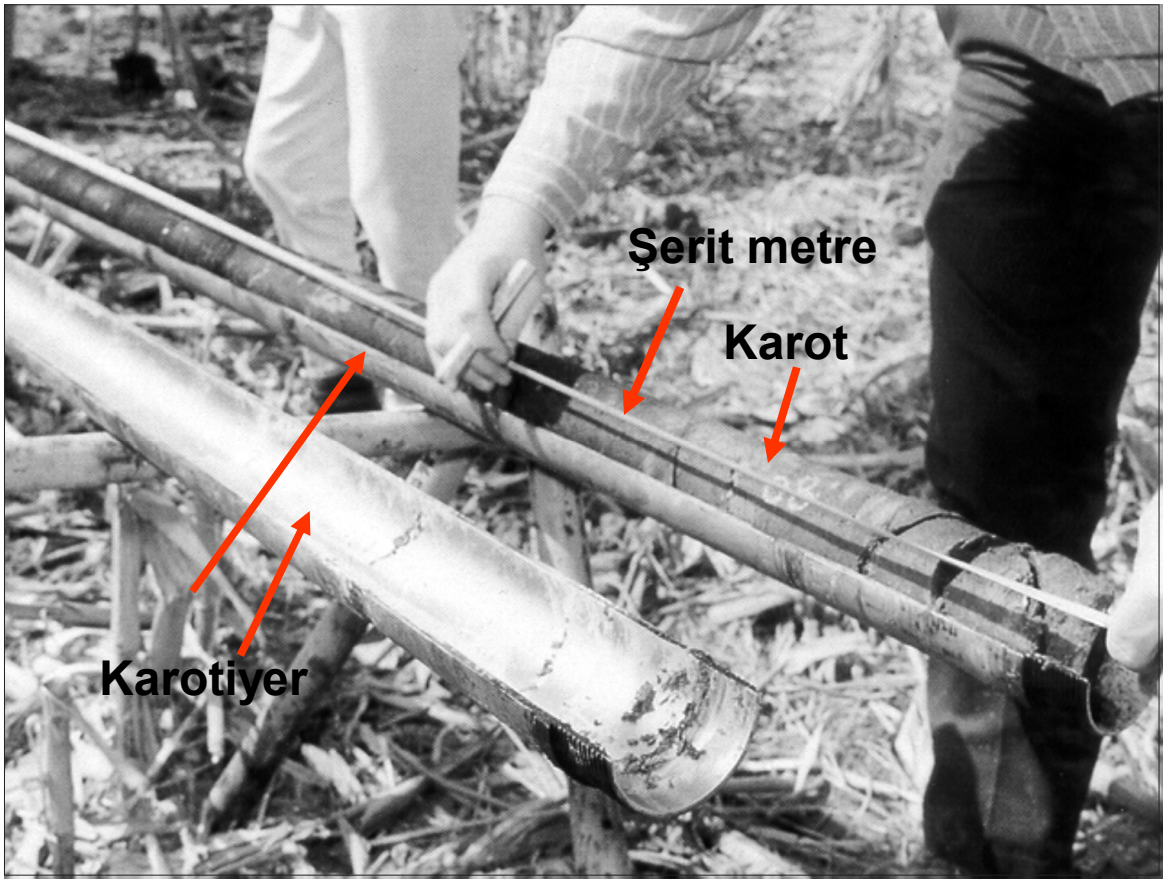
$$TKV = \frac{\Sigma \text{ İlerlemede alınmış tüm karot ve kırıntı parçalarının uzunluğu}}{\text{İlerleme aralığının uzunluğu}}$$

$$SKV = \frac{\Sigma \text{ İlerlemede silindirik şeklini koruyan karot parçalarının uzunluğu}}{\text{İlerleme aralığının uzunluğu}}$$

$$RQD = \frac{\Sigma \text{ İlerlemede uzunluğu en az 10cm olan silindirik karotların uzunluğu}}{\text{İlerleme aralığının uzunluğu}}$$

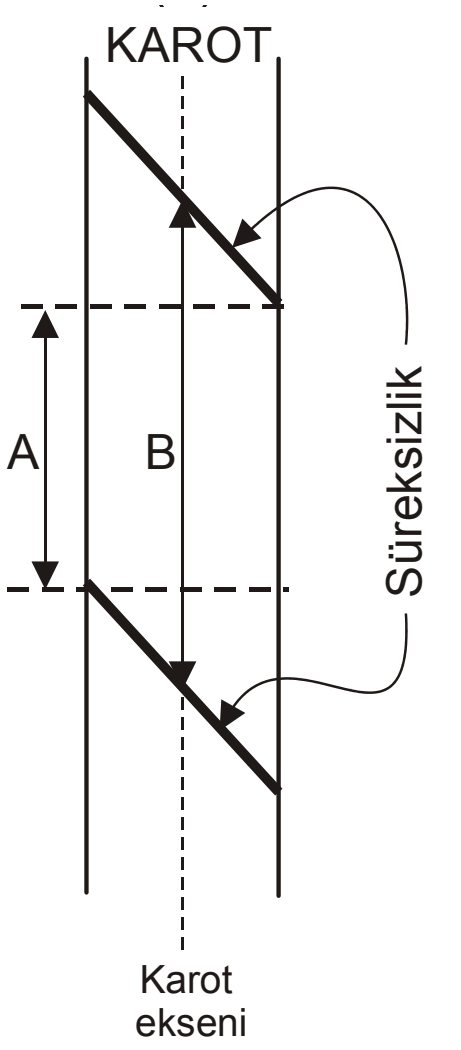
$$\lambda = \frac{\text{Bir ilerlemedeki doğal süreksizliklerin sayısı}}{\text{İlerleme uzunluğu (m)}} \quad (m^{-1})$$

Sondaj karotlarına ilişkin özelliklerin karotiyerde veya sandıkta ölçülmesi



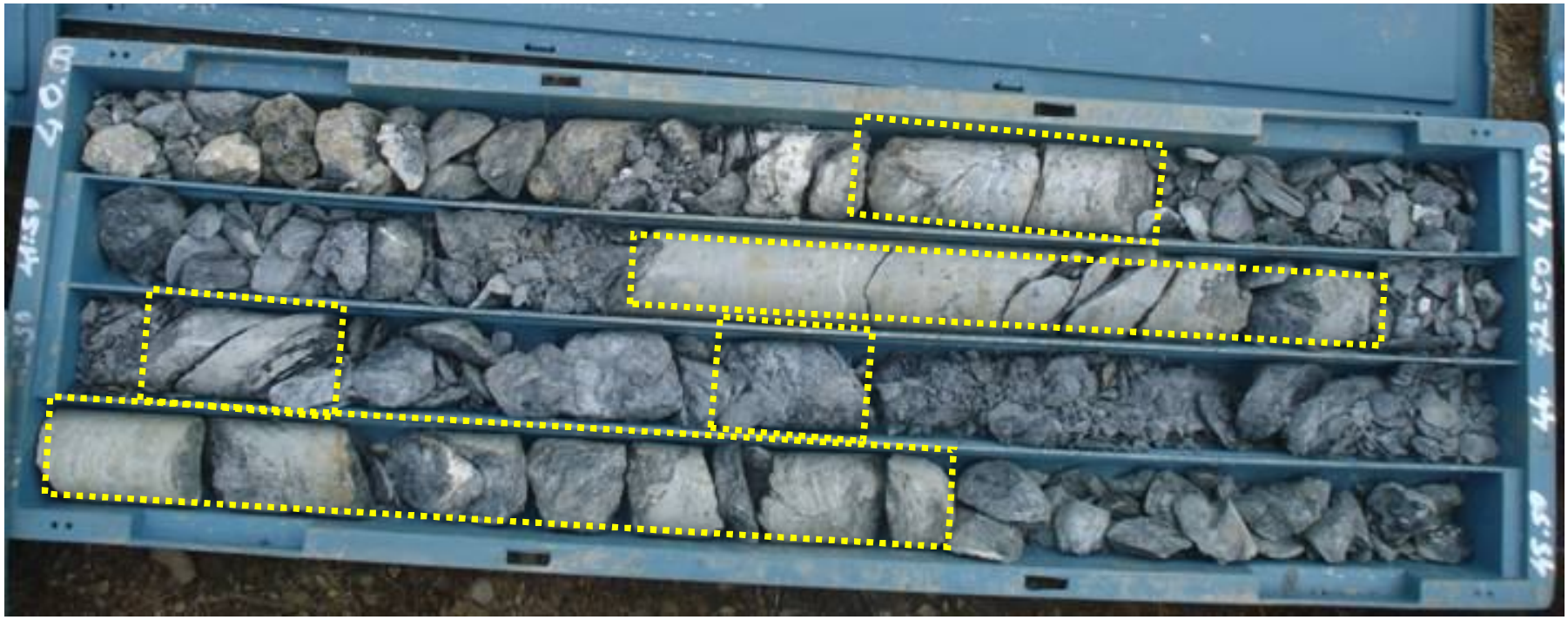
(Ulusay ve Sönmez, 2007)

Karotların eksenel uzunlukları belirlenir.



A: Sağlam kısmın uzunluğ
B: Eksenel uzunluk

Sonjdan alınan karotlar sandıklara (karot sandıkları) yerleştirilir ve çok parçalanmış karotlar (kırıntılı) bir araya getirilir.



Silindirik özelliğini koruyan karotlar ile parçalanmış karotların eksenel uzunlukları belirlenir

Karot parametreleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Her karot parçasının uzunluğu karotun orta noktasından ölçülmelidir.

- Eğer karotlar karotiyerde, karotiyerden çıkarılırken veya sandığa yerleştirilirken kırılmışlarsa (taze yüzeyler gösterir), bunlar doğal süreksizlik olarak dikkate alınmamalı ve bu karot parçaları birleştirilip tek parça kabul edilmelidir.

- Karot eksenine yaklaşık paralel ($85\text{-}90^0$) süreksizlikler içeren karotlar, boyları ≥10 cm olmak koşuluyla, RQD'ye dahil edilirler.

- RQD sadece kaya karotlarında uygulanır. Silindirik özelliğini korusa dahi, zemin (toprak) karotlar SKV'ye dahil edilir, ancak RQD'ye dahil edilmez.

- RQD değerine göre kaya kütlesinin kalitesi aşağıdaki çizelgeye göre sınıflandırılır.

RQD	Kaya Kalitesi
90-100	Çok iyi (mükemmel)
75-90	İyi
50-75	Orta
25-50	Zayıf
<25	Çok zayıf

5.5. BAŞLICA KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ

Kaya kütlesiyle ilgili sınırlı bilginin bulunduğu yeraltı açıklıklarının yapılabilirlik (fizibilite) ve tasarım aşamalarında, destek sistemleriyle ilgili ilk değerlendirmeler için KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ kullanılır. Bunun yanı sıra, kaya kütleleri için önerilen görgül yenilme kriterlerinde (Hoek Brown yenilme ölçütü gibi) bir girdi parametresi olarak kullanılabilirler.

⇓

KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ, TEK BAŞINA DAHA AYRINTILI VE KARMAŞIK TASARIM YÖNTEMLERİNİN YERİNE GEÇMEZ VE İLK TASARIM AMACIYLA KULLANILIR

⇓

RMR, Q, GSI gibi mühendislik uygulamalarında başvurulan ve kaya kütlesinin tanımlanmasına yönelik sınıflamalar mevcut olup, bu bölümde sadece RMR ve Q sistemi giriş niteliğinde tanıtılacaktır.

RMR KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMİ (Bieniawski, 1989)

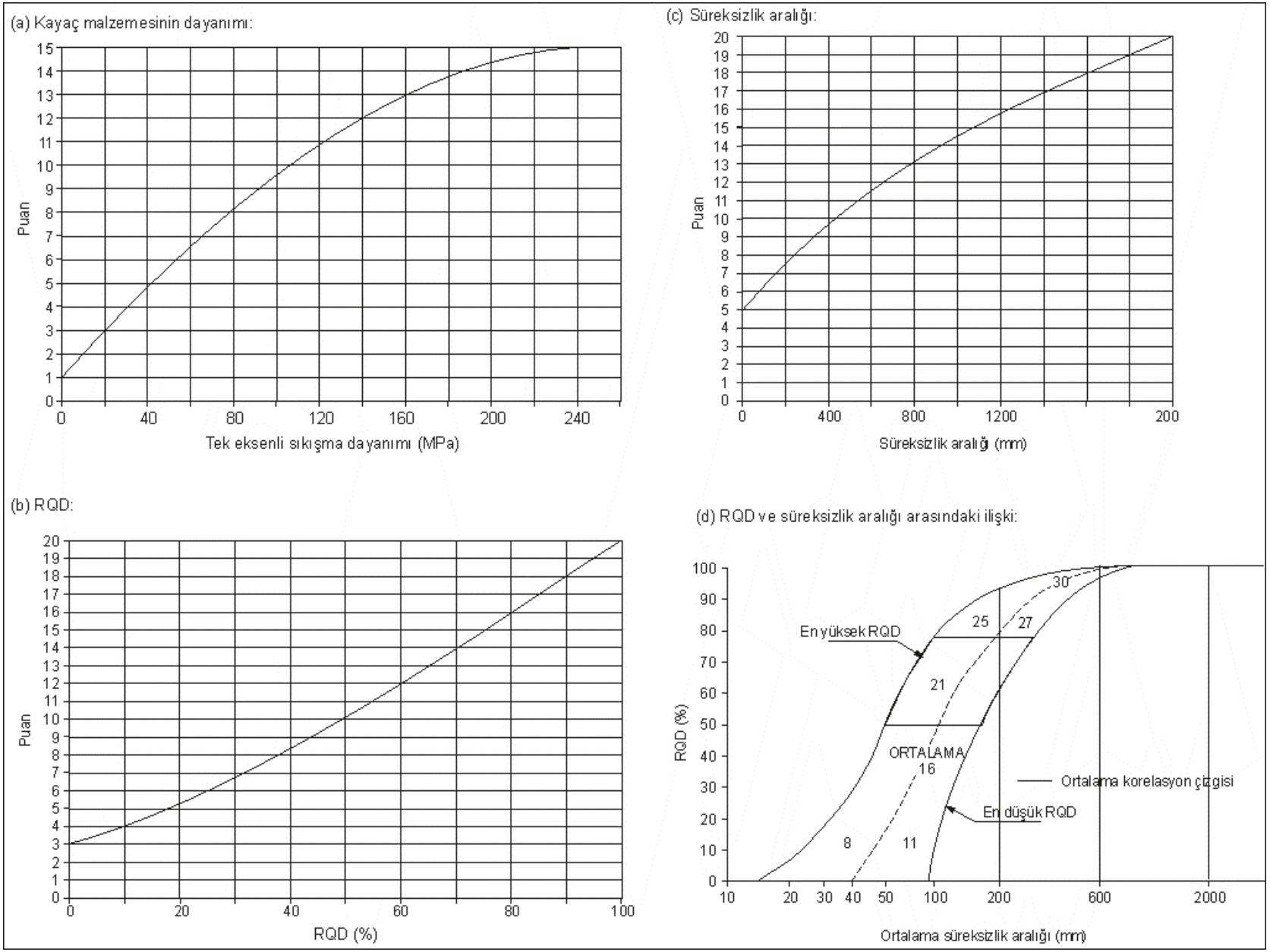
A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI

1*	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2*	Kaya kalite göstergesi, RQD		%90-%100	%75-%90	%50-%75	%25-%50	< %25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3*	Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4**	Süreksizliklerin durumu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu < 5 mm veya 1-5 mm açık eklemler, sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm kalınlıkta veya açık eklemler > 5 mm devamlı süreksizlikler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltısuyu koşulu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk		
		Oran: Eklemdeki su basıncı / Ana asal gerilme	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Puan		15	10	7	4	0		

*** Bir sonraki sayfada verilen grafiklerden belirlenmesi daha uygun.**

**** Ayrıntılı puanlama çizelgesinden belirlenmesi daha uygun.**

RQD ve süreksizlik dayanımı,RQD ve süreksizlik aralığı parametrelerine ait puanları tayin grafikleri



Süreksizlik koşulu için ayrıntılı puanlama çizelgesi

Parametre	**Puanlar**				
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılık)	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)
Süreksizlik açıklığı	Yok (6)	< 0.1 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	> 5 mm (0)
Pürüzlülük	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan (0)
Dolgu		Sert dolgu		Yumuşak dolgu	
	Yok (6)	< 5 mm (4)	> 5 mm (2)	< 5 mm (2)	> 5 mm (0)
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozumuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

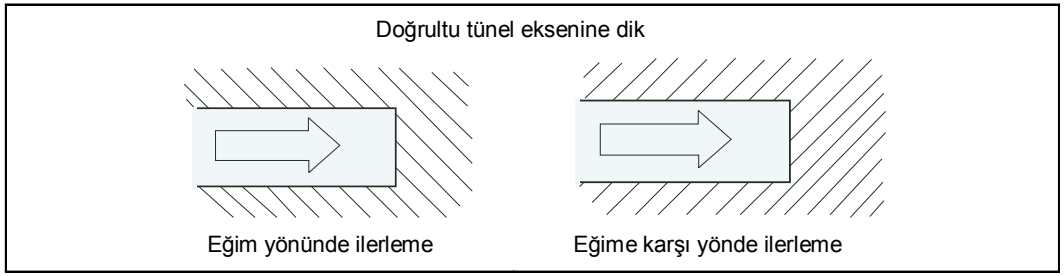
1. Kaya malzemesinin dayanımı
2. RQD
3. Süreksizlik aralığı
4. Süreksizliklerin durumu (Devamlılık, açıklık, pürüzlülük, dolgu, bozunma)
5. Yaraltısuyu durumu

\+ _____

Temel RMR Puanı

B. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM ve DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0^0-20^0 arasında
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı yönde ilerleme				
Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	Eğim 45^0-90^0	Eğim 20^0-45^0	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta



C. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME

Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

Temeller ve şevler için önerilen düzeltmeler kullanılmamaktadır.

D. KAYA SINIFLARI VE PUANLARI

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

E. KAYA SINIFLARININ BAZI ÖZELLİKLERİ

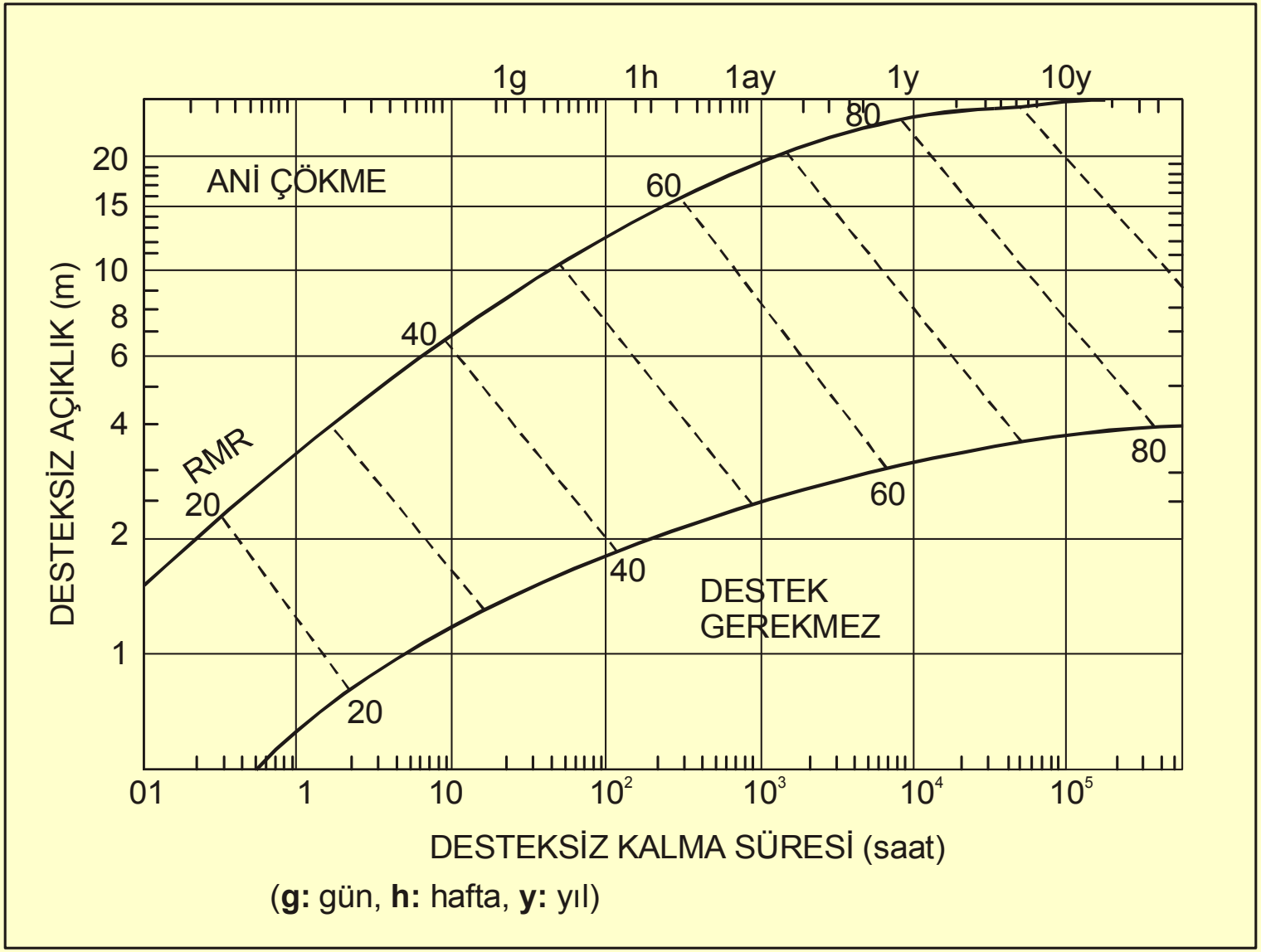
Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama desteksiz kalabilme süresi	15m açıklık için 20 yıl	10m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	2.5m açıklık için 10 saat	1m açıklık için 30 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı (derece)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15

Oldukça kaba bir yaklaşım

RMR sisteminden yararlanılarak, tüneller için destek sistemlerinin belirlenmesi

BİRİNCİL DESTEK (TAHKİMAT)				
KAYA KÜTLESİ SINIFI	**Kazı**	**Kaya sapmaları* (10 m genişlikteki tünel için uzunluk)**	**Püskürtme beton**	**Çelik Destek**
I	Tam kesit, 3 m ilerleme.	Bir miktar kaya saplaması haricinde genellikle destek gerektirmez.		
II	Tam kesit, 1.0-1.5 m ilerleme, tam kazı destek. Aynaya 20 m mesafede.	Kemerin her 2-3 m'sinde yer yer saplama, tel kafeslerle 2-2.5 m aralıklı.	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Gerekmez
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.5-3 m ilerleme. Tam kazı destek. Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli.	3-4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerde 1.5-2 m aralıklı.	Tavan kemerinde 50-100 mm ve yan duvarlarda 30 mm.	Gerekmez
IV	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.0-1.5 m ilerleme. Kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar, gerekli destek.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5 m aralıklı, 4-5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 100-150 mm ve yan duvarlarda 100 mm.	Gereken yerde 1.5 m aralıklı yer yer hafif traversler.
V	Tavan ve tabanda birlikte ilerleme. Tavandan 0.5-1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlamadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm.	Çelik iksalı, 0.75 m aralıklı orta-ağır traversler.

Desteksiz duraylı kalabilme süresi : Kazı sonrası bir yeraltı açıklığının desteksiz olarak duraylı kalabildiği süre.



RMR sistemi ayrıca,

- Destek yükünün tahmin edilmesinde,

- Kaya kütlesinin deformasyon modülünün (E_M) tahmininde,

-Kaya kütlelerinin dayanımlarının tahmini için kullanılan ampirik Hoek-Brown yenilme ölçütünde kaya malzemesi sabitlerinin belirlenmesinde

kullanılabilmektedir. Bu konulara Mühendislik Jeolojisi dersinde değinilecek olup, önerilen kaynaklardan da bilgi edinilebilir.

KAYA KÜTLESİ KALİTESİ SİSTEMİ (Q-Sistemi)

Bu sistem, Barton vd. (1974) tarafından çok sayıdaki yeraltı kazılarının duraylılığıyla ilgili vakalara ait veri esas alınarak geliştirilmiştir.

Q sisteminde kullanılan parametreler:

(a) RQD
(b) Eklem seti sayısı, J_n
(c) Eklem pürüzlülük sayısı, J_r
(d) Eklem alterasyon sayısı, J_a
(e) Eklem su azaltma faktörü, J_w
(f) Gerilim azaltma faktörü, SRF

Q değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$Q=(RQD/J_n)\ (J_r/J_a)\ (J_w/SRF)$$

blok boyutu — bloklar arası makaslama dayanımı — aktif gerilme

Q → 0.001 ve 1000 arasında değişir

Eğer RQD<10 (0 dahil) → Q eşitliğinde **RQD=10** alınır

Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Barton vd., 1974)

1. RQD	KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI
0-25	A. Çok zayıf
25-50	B. Zayıf
50-75	C. Orta
75-90	D. İyi
90-100	E. Çok iyi (mükemmel)

Not: (1) RQD < 10 (0 dahil) ise Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer kullanılır. RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.

2. EKLEM TAKIMI SAYISI	(J_n)
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1.0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişi güzel çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde	15
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20

Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için ($3.0 \times J_n$) kullanılır.
(3) Tünel girişleri için ($2.0 \times J_n$) kullanılır.

---

3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI **(J_r)**

(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı

A. Süreksiz eklemler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1.5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
F. Düz, düzlemsel	1.0
G. Kaygan, düzlemsel	0.5

Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.

(b) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok

H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1.0
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon	1.0

Not: (5) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyük ise, J_r'ye 1.0 eklenebilir .
(6) Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlenmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için J_r=0.5 alınabilir.

(7) J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau = \sigma_n \tan(J_r / J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.

4. EKLEM ALTERASYON SAYISI	J_a	ϕ(yaklaşık)
(a) Kaya-süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	0.75	_
B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-30º
C. Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	20-25º
D. Silti veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25º
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örneğin kaolinit veya mika). Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	8-16º
(b) 10 cm'lik makaslamadan önceki süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30º
G. Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	6	16-24º

H. Orta ve düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	8	12-16º
J. Şişen kil mineralleri –örneğin mont-morillenit (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm.) J_a'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12º
(c) Makaslanma durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)	6, 8 veya 8-12	6-24º
N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5.0	-
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımlanması için G, H, ve J'ye bakınız)	10,13 veya 13-20	6-24º

5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	**Yaklaşık su basıncı (kgf /cm²)**	**J_w**
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örneğin genel olarak <5 l/dk.)	1	1.0
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2.5	0.66

J_w:

Kaya Mekaniği - Doç. Dr. Ergün Tuncay

C. Dolgusuz eklemler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2.5-10	0.5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2.5-10	0.33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	10	0.2-0.05
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	>10	0.1-0.05

Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir.
Eğer drenaja yönelik önlemler alınırsa, J_w artar.
(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.

6. GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	**SRF**
(a) Tünel açılırken kaya kütlesinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar:	
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	10
B. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)	5
C. kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)	2.5

B.	Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)			5
C.	kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)			2.5
D.	Kil içermeyen dayanımlı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			7.5
E.	Kil içermeyen dayanımlı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤ 50 m)			5.0
F.	Kil içermeyen dayanımlı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)			2.5
G.	Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemli "küp şeker" görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5.0
(b)	**Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları:**	σ_c/σ_t	σ_t/σ_1	SRF
H.	Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	>200	<0.01	25
J.	Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0.01-0.3	1

K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L. Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0.5-0.65	5-50
M. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2	0.65-1	50-200
N. Masif kayada aşırı kaya patlatması ve ani dinamik deformasyon	<2	>1	200-400

Not: (10) Oldukça yönser (aniztrop) bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c 0.75σ_c'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise 0.5σ_c'ye düşürülür. Burada σ_c, tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_θ en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen).
(11) Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2.5'tan 5'e arttırılması önerilir (H maddesine bakınız)

(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma:

	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF
O. Az sıkıştıran kaya basıncı	1-5	5-10
P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	>5	10-20

Not: (12) Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütlesinin sıkışma dayanımı $q = 0.7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m³) (Singh, 1993)

(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği: SRF

R. Düşük şişme basıncı	5-10
S. Çok yüksek şişme basıncı	10-15

EK AÇIKLAMALAR:

Kaya kütle kalitesi Q'nun hesaplanmasında yukarıdaki çizelgedeki 1-9 numaralı notlara ek olarak, aşağıda verilen rehber niteliğindeki hususlara da dikkat edilmelidir.

1. Sondaj karotu olmadığı zamanlarda, RQD birim hacimdeki eklemlerin sayısından hesaplanabilir ve her bir eklem takımı için metredeki eklem sayısı ilave edilir. Kil içermeyen kaya kütleleri için bu sayıyı RQD'ye çevirmek amacıyla aşağıdaki basit ilişki kullanılabilir:

$$RQD = 115 - 3.3\, J_v \text{ (yaklaşık)} \qquad (8.5)$$

Burada,

J_v: Bir metreküpteki toplam eklem sayısı (RQD = J_v < 4.5 için)

2. Eklem takımlarının sayısını ifade eden J_n parametresi, genellikle çizgisellik (foliasyon), şistozite, dilinim veya tabakalanma vb.'den etkilenebilmektedir. Bu durumda, iyi bir gelişme göstermişlerse, bu paralel eklemler tam bir eklem takımı olarak sayılmalıdırlar. Bununla birlikte, sadece görünür birkaç eklem veya bu özellikleri nedeniyle karotta yer yer kırıklar mevcutsa, J_n'nin değerlendirilmesinde bunların "gelişigüzel eklemler" olarak sayılması daha uygundur.

3. Makaslama dayanımını temsil eden J_r ve J_a parametlereleri, belirli bir zondaki en zayıf önemli eklem takımıyla veya kil dolgulu süreksizlikle ilişkili olmalıdır. Bununla birlikte, en küçük (J_r/J_a) değerine sahip eklem takımının veya süreksizliğin duraylılığı için uygun bir konumda ise, daha az uygun konumdaki eklem takımı veya süreksizlik bazan daha az önem taşır ve bu durumda (J_r/J_a) değeri yüksek olan, Q'nun hesaplanmasında kullanılır. (J_r/J_a)'nın değeri gerçekte, yenilmenin başlamasına yol açan yüzeyle ilişkilidir.

4. Kaya kütlesi kil içeriyorsa, gevşeyen yükler için SRF faktörü değerlendirilmelidir. Bu tür durumlarda sağlam kayanın dayanımı çok az önem taşır. Bununla birlikte, eklemli olma özelliğinin en az olduğu ve kilin hiç bulunmadığı durumlarda, sağlam kayanın dayanımı en zayıf halkayı oluşturur ve duraylılık, kayanın "gerilme/dayanım" oranına bağlı olacaktır. Oldukça anizotrop bir gerilme alanı duraylılık için uygun olmayıp, 10 ve 11 numaralı notlarda kabaca hesaba katılır.

5. Sağlam kayacın σ_c ve σ_t ile ifade edilen tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımları, mevcut arazi koşullarına uygun ise, kayanın doygun haldeki durumuna göre değerlendirilir. Nemli veya doygun koşullar altındaki kayaların dayanımı için çok tutucu bir tahmin yapılır.

Yukarıda verilen ölçütlere göre tüm parametreler tayin edilir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak "Kaya Kütle Kalitesi, Q" hesaplanır.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \qquad (8.6)$$

Kaya Mekaniği - Doç. Dr. Ergün Tuncay

ESR bir tür güvenlik katsayısıdır ve yeraltı açıklığının türüne göre aşağıdaki çizelgeden belirlenir.

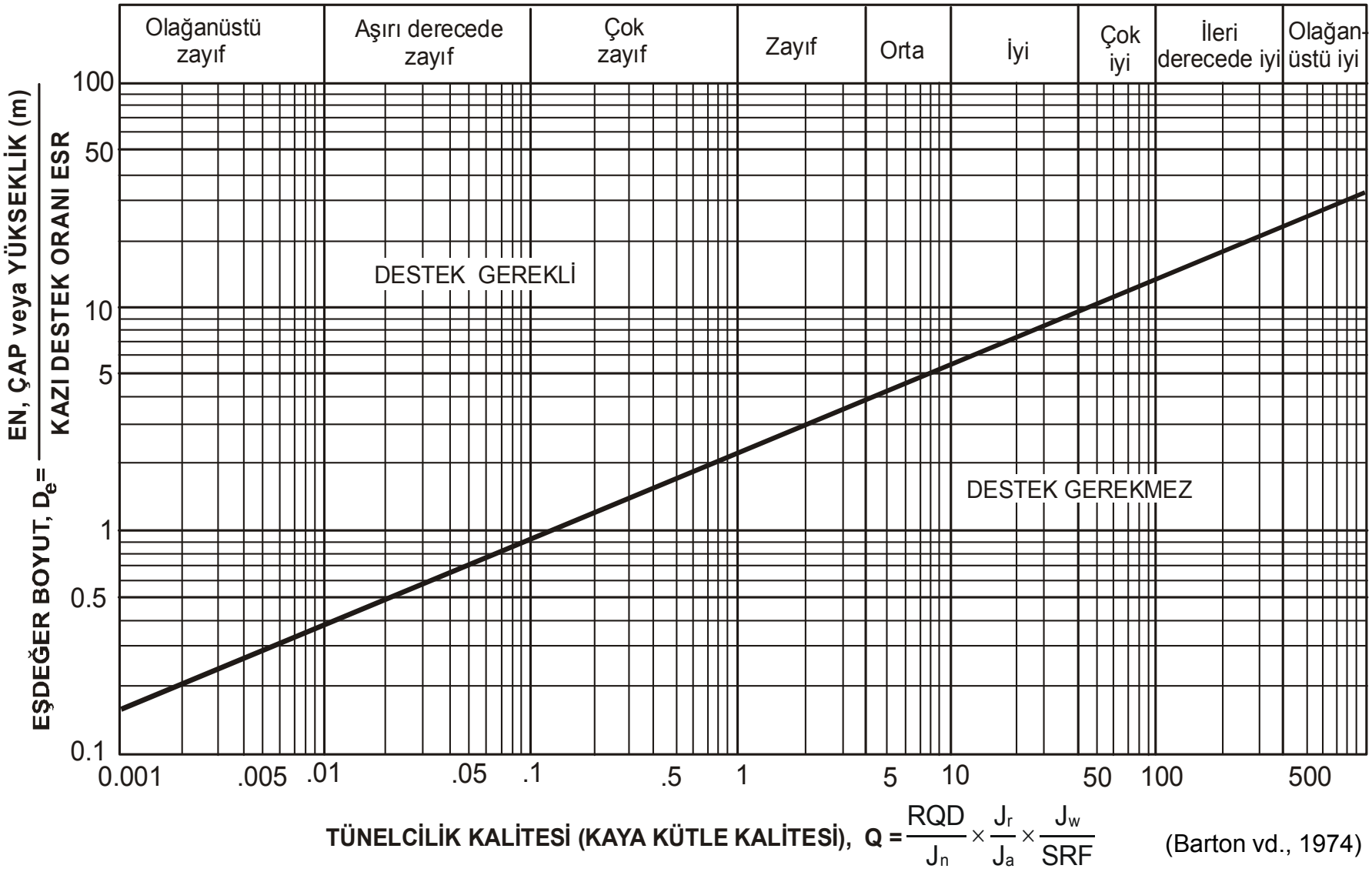
KAZI TİPİ	Orijinal ESR*	Güncelleştirilmiş ESR+
A. Kısa süreli (geçici) maden kazıları vd.	3-5	2-5
B. Uzun süreli (kalıcı) maden kazıları, su tünelleri, büyük kazılar için açılan pilot tüneller, geniş yeraltı kazıları	1.6	1.6-2.0
C. Geniş yer altı depolama odaları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, yaklaşım tünelleri	1.3	1.2-1.3
D. Enerji santralleri, büyük (ana) karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel girişleri, ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme bölgeleri	1.0	0.9-1.1
E. Yeraltı nükleer enerji santralleri, demiryolu istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar, gaz iletim tünelleri	0.8	0.5-0.8

* Barton vd. (1974)

\+ Grimstad ve Barton (1993)

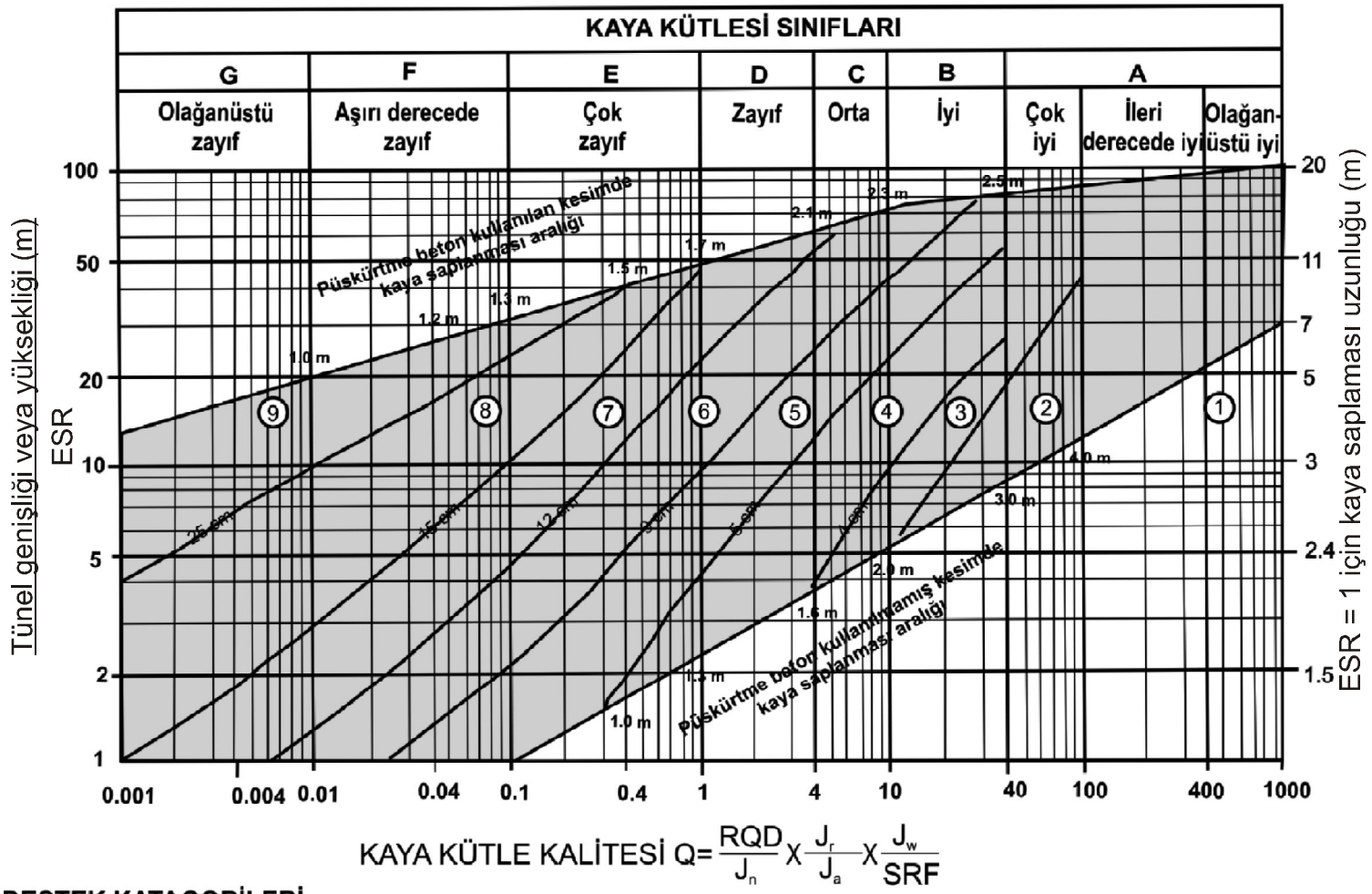
D_e = Açıklığın eni, çapı veya boyu/ Kazı destek Oranı (ESR)

D_e ve Q arasındaki ilişki



(Barton vd., 1974)

Tünel destek sisteminin belirlenmesi:



(Grimstad ve Barton, 1993)

DESTEK KATAGORİLERİ

1) Desteksiz
2) Yerel bulonlama
3) Sistematik bulonlama
4) Sistematik bulonlama (ve takviyeli, püskürtme beton 4-10 m)
5) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton 5-9 cm
6) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 9-12 cm
7) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 12-15 cm
8) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton >15 cm,güçlendirilmiş Çelik hasırlı püskürtme beton ve bulonlama
9) Beton kaplama

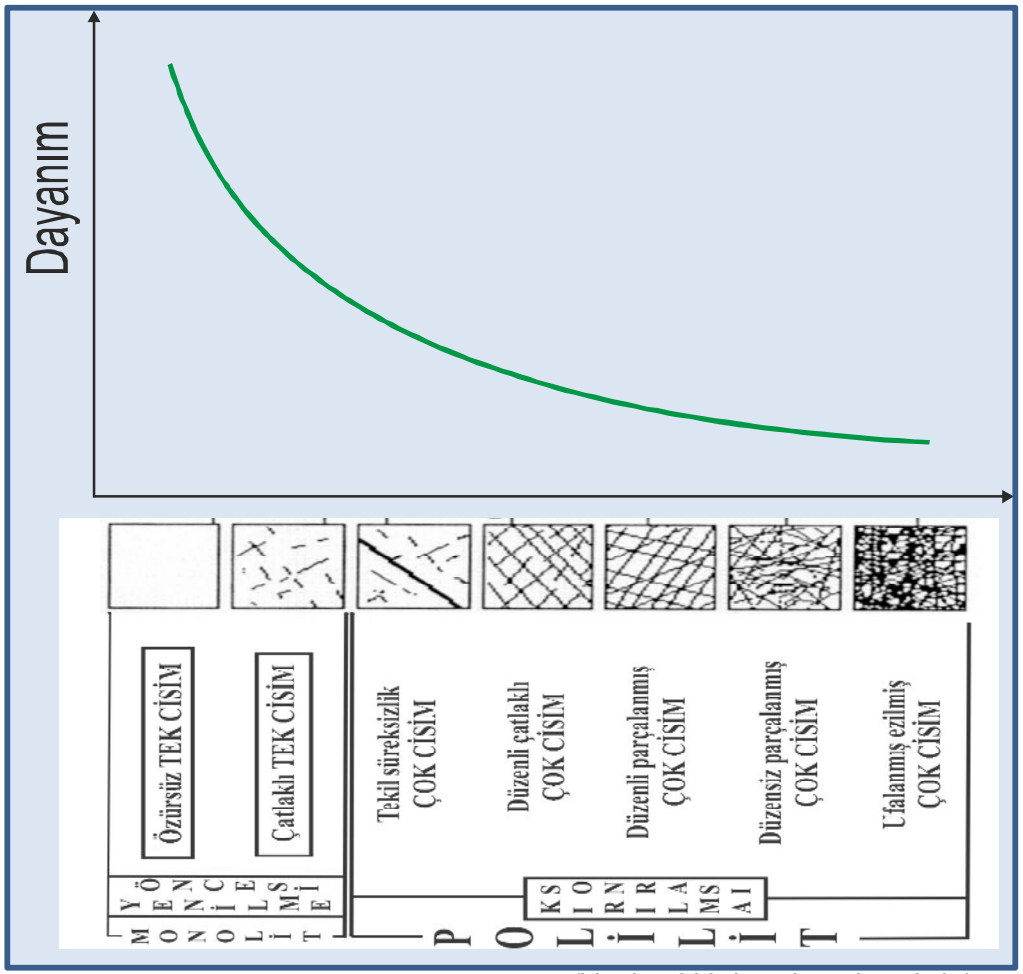
Q sistemi kullanılarak; tavan destek basıncı, kaya saplamaları ve ankrajlarının boyutlarının tayini, kaya kütlelerinin deformasyon modülünün (E_M) kestirimi amacıyla önerilmiş görgül eşitlikler mevcuttur.

Ayrıca, RMR ve Q sistemi arasındaki ilişkiyi veren eşitlikler de önerilmiştir.

Bu konulara bu ders kapsamında girilmeyecek olup, Mühendislik Jeolojisi dersinde değinileceği hatırlatılır. Ayrıca, önerilen kaynaklarda bu ayrıntılara ulaşılabilir.

5.6. KAYA KÜTLESİ DAYANIM VE DEFORMASYON ÖZELLİKLERİ

Kaya malzemesinden itibaren eklem yoğunluğuna bağlı olarak kaya kütlesindeki **dayanım** azalmasını aşağıdaki şekilde irdelemek mümkündür.



(Vardar, 2005'ten düzenlenmiştir.)

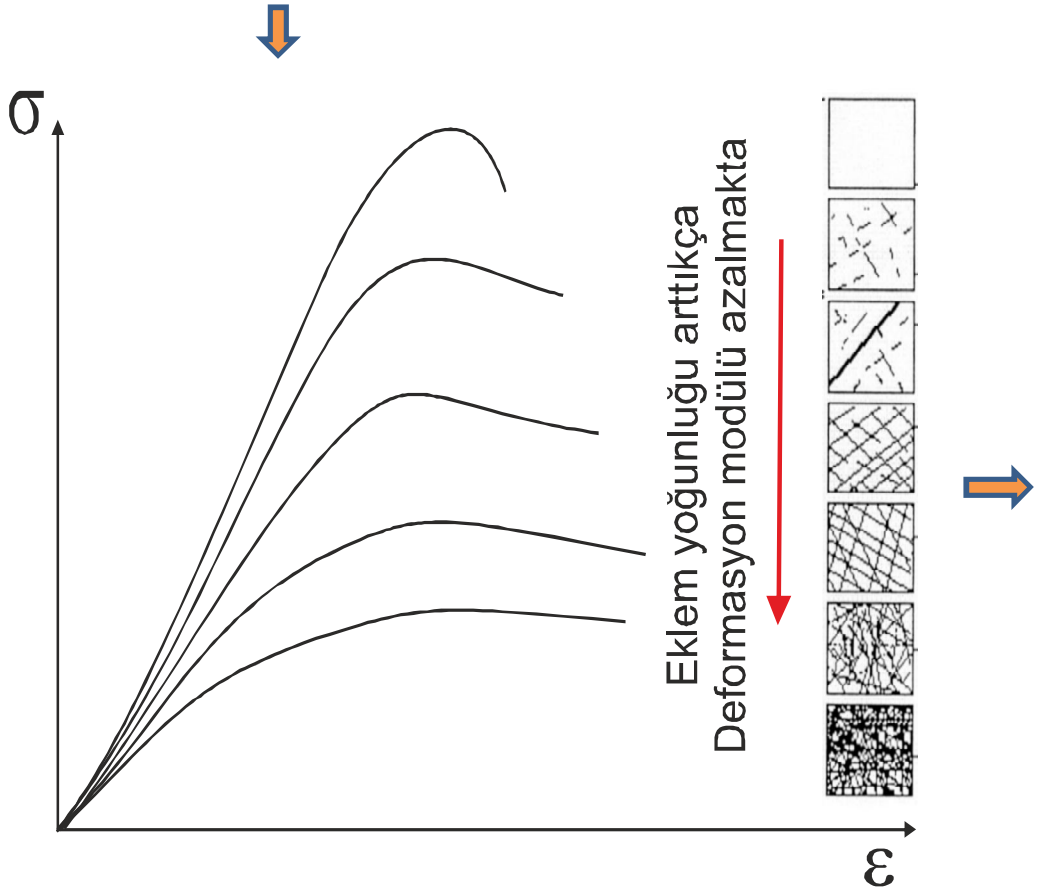
Bu durumda

Kaya kütlesinin Dayanımı nasıl belirlenebilir?

Kaya kütlesi puanlama sistemleri ve görgül yenilme ölçütlerinden yararlanılan yöntemler

Kaya kütlesinin **dayanımını** belirlemek amacıyla, günümüzdeki mühendislik uygulamalarında, GSI (Jeolojik dayanım indeksi)'ın girdi parametresi olarak kullanıldığı Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü tercih edilmektedir.

Kaya malzemesinden itibaren eklem yoğunluğuna bağlı olarak kaya kütlesindeki deformasyon modülü azalmasını ise aşağıdaki şekilde irdelemek mümkündür.

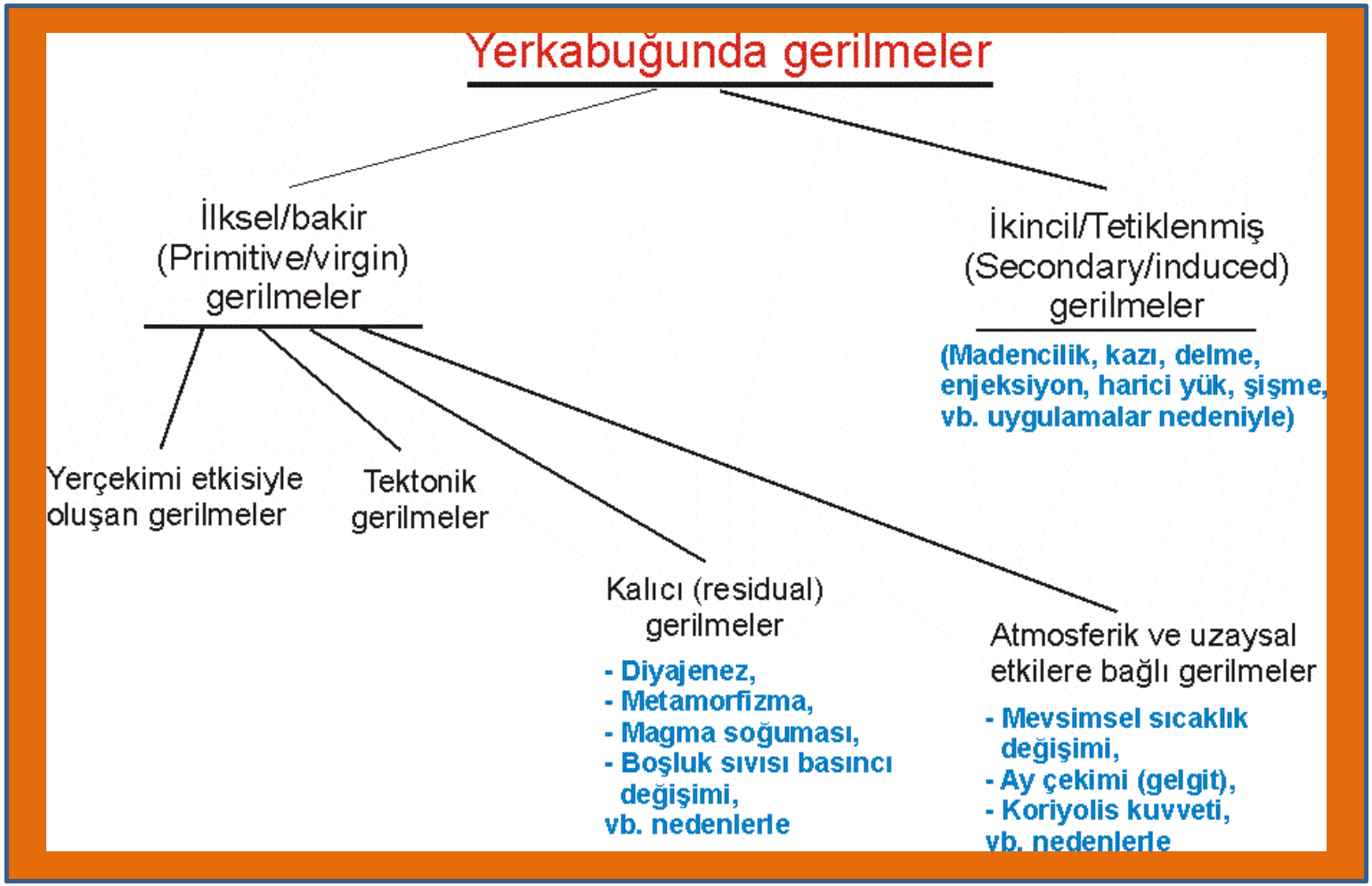


Kaya kütlesinin **deformasyon modülünün** belirlenmesi amacıyla, arazi deneylerinin yanı sıra, daha önce de değinildiği gibi, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden (RMR, Q sitemi, GSI, vb.) yararlanılarak önerilmiş eşitlikler bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar, ders kapsamında önerilen kaynaklarda mevcuttur.

Bölüm 6

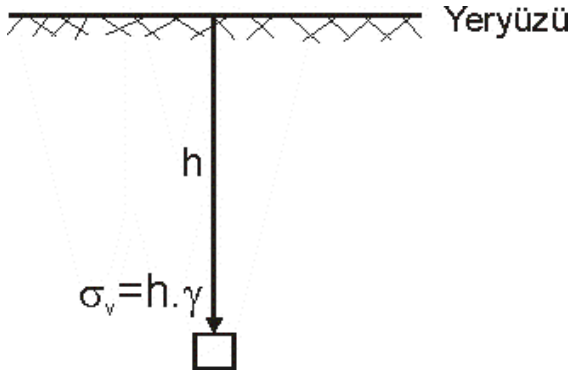
Arazi Gerilmeleri

Yerkabuğunun herhangi bir yerindeki kaya kütlesi gerilmelerin etkisindedir. Bakir (virgin) ya da İLKSEL olarak tanımlanan bu gerilmelere arazi gerilmeleri ya da yerinde (in-situ) gerilmeler adı verilmektedir. Kaya mühendisliği yapılarının (örneğin; farklı amaçlarla oluşturulan yeraltı açıklıkları, derin açık işletmelerdeki nihai şevler, vb.) inşası planlanan yerdeki ilksel gerilme durumu, yapının tasarımında önemli bir faktördür. Gerilmeler, özellikle yeraltı açıklıklarının yenilmelerindeki en önemli etkenlerden biridir.



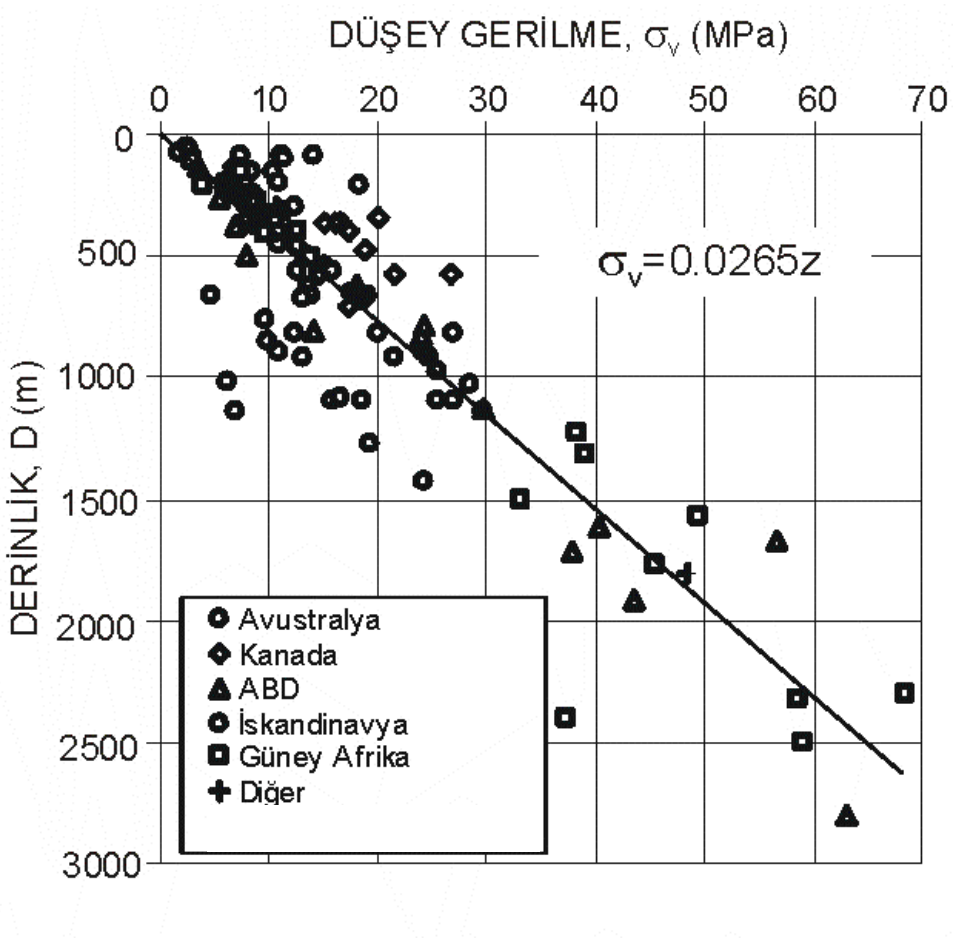
Amadei ve Stephansson, 2007'den düzenlenmiştir.

Yeraltında bir noktada sadece yerçekimi etkisiyle oluşan teorik (kuramsal) düşey gerilme (σ_v):



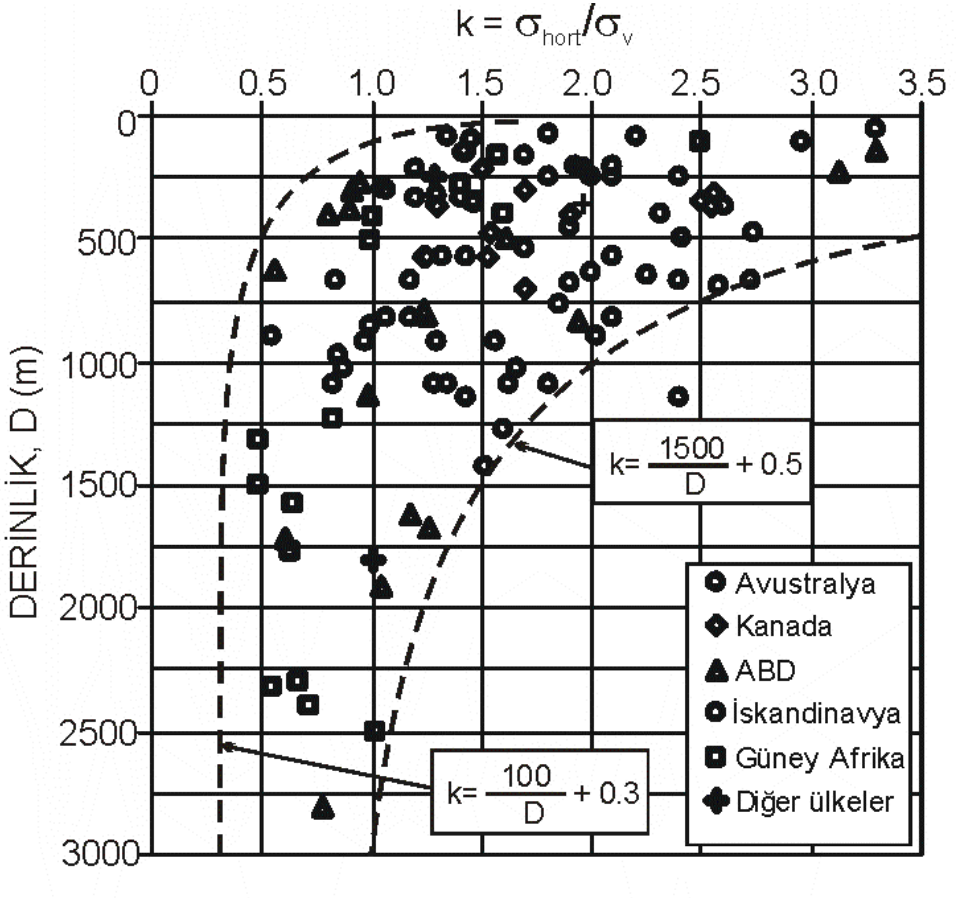
γ: Örtü malzemesinin (kaya kütlesinin) birim hacim ağırlığı
h: Örtü malzemesi kalınlığı

Dünyanın çeşitli yerlerinde ölçülmüş düşey gerilmelerin derinlikle değişimi (Hoek ve Brown, 1980'den) :

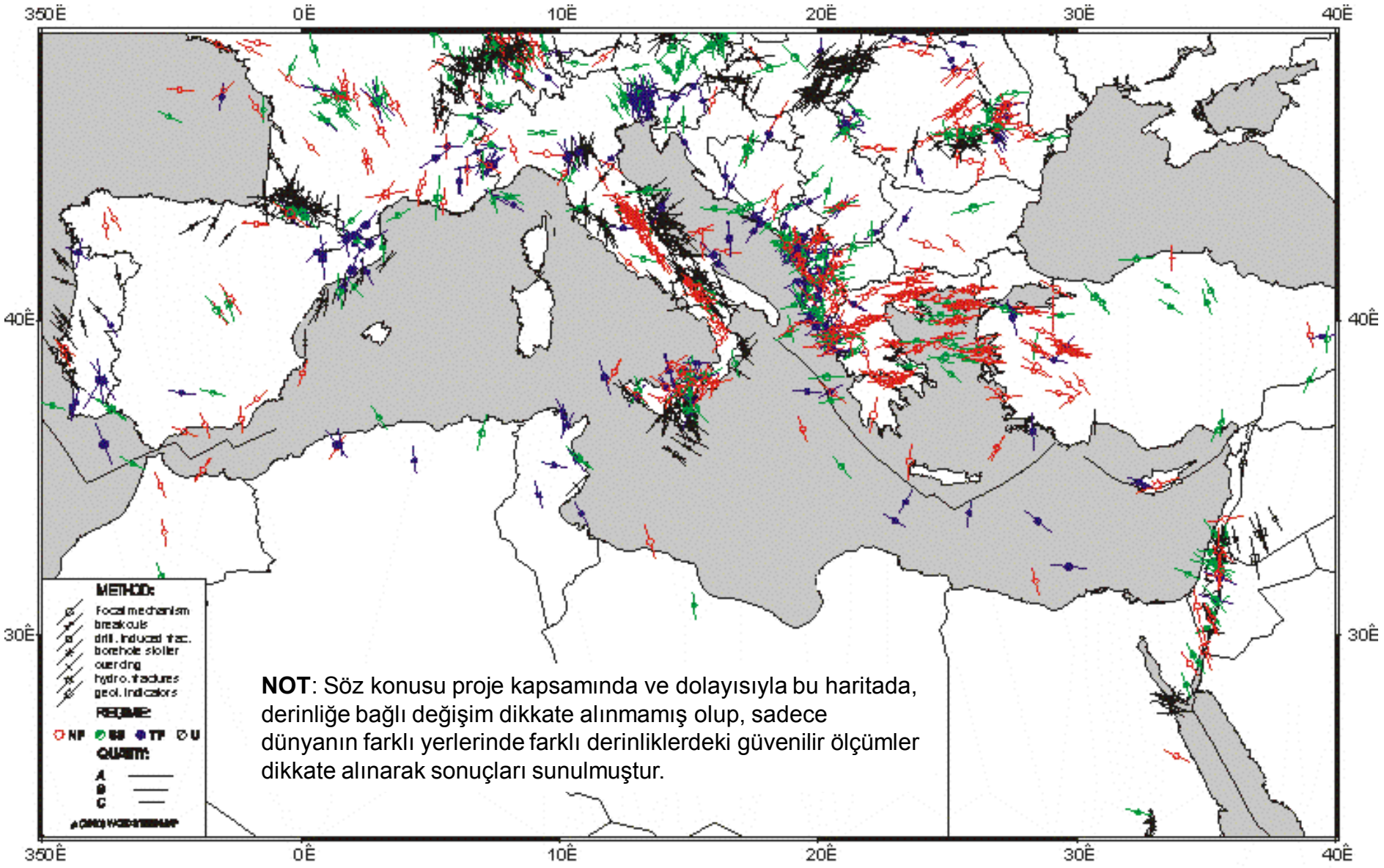


Yeraltında herhangi bir noktadaki gerilmelerin büyüklüklerini ve yönlerini belirlemenin en uygun yolu, kabul görmüş yerinde (arazide) gerilme ölçümü yöntemlerinden ya da araziden alınmış örnekler üzerinde laboratuvar ortamında birim deformasyon ölçümüne dayanan tekniklerden (Anelastic strain recovery, gibi) yararlanılmasıdır. Arazide gerilme ölçüm yöntemleri maliyetli ve zaman alıcı olmaları nedeniyle, halen basit gerilme ölçümü yöntemlerine ilişkin araştırmalar devam etmektedir. Gerilme ölçüm yöntemlerinin herbirinin uygulama sınırlaması bulunmakta, bu nedenle kullanılan ölçüm yönteminin sınırlamaları çok iyi bilinmelidir.

Dünyanın çeşitli yerlerinde ölçülmüş ortalama yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının (k) derinlikle değişimi (Hoek ve Brown, 1980'den)



“Dünya gerilme haritası” projesi kapsamında hazırlanmış Akdenize komşu kıtalarda en büyük yatay gerilme yönleri



NOT: Söz konusu proje kapsamında ve dolayısıyla bu haritada, derinliğe bağlı değişim dikkate alınmamış olup, sadece dünyanın farklı yerlerinde farklı derinliklerdeki güvenilir ölçümler dikkate alınarak sonuçları sunulmuştur.

Mueller, B., Reinecker, J., Heidbach, O. and Fuchs, K. (2000): The 2000 release of the World Stress Map (www.world-stress-map.org)

YERİNDE GERİLMELERİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Arazi gerilmelerini etkileyen bazı faktörlere aşağıda değinilmiştir.

1. Topoğrafya etkisi

Düz topoğrafyanın olduğu yerlerde (örneğin Kanada ve Avustralya gibi ülkelerin büyük bölümünde) jeolojik yapının etkisi düşünülmediğinde her derinlikteki her noktada, (büyüklükleri değişmekle birlikte) ilksel asal gerilmelerin düşey ve yatay yönde etkidiği düşünülmektedir. Ancak, engebeli topoğrafyaya sahip yerlerde özellikle yüzeye yakın kesimlerde farklı yönlerde etki ederler. Vadi yamaçlarında vadiye paralel yönde iken, derinlere gidildikçe asal gerilmelerin yönleri yatay ve düşeye yaklaşır ve belirli bir derinlikten itibaren tekrar yatay ve düşey yönde etkirler.

Düz topoğrafya

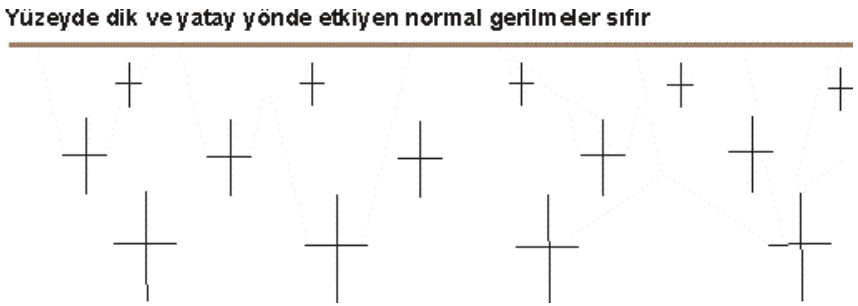
Sadece yerçekimi etkisi gözönünde bulundurulursa:

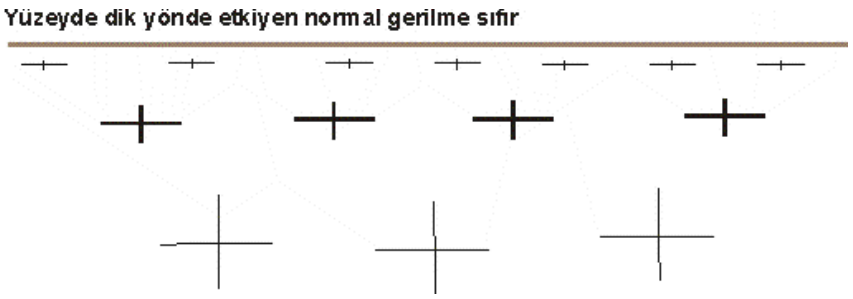
$\sigma_z = \gamma.h$ $\sigma_h = k.\sigma_z$

Hoek yasası dikkate alınırsa ➔ $k=\nu/(1-\nu)$

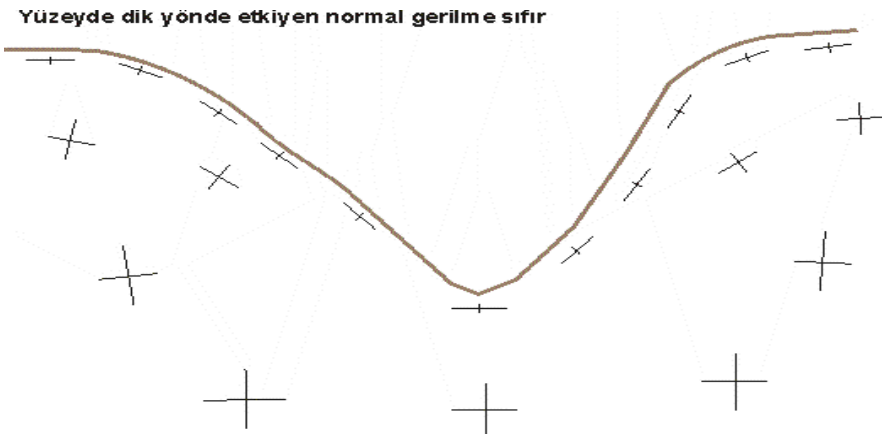
Yerçekimine ek olarak güncel tektonik etki vb. de gözönünde bulundurulursa:

$\sigma_z = \gamma.h$ $\Sigma\sigma_h$ ➔ $k.\sigma_z$ ve $\sigma_{h\text{ -tek}}$





Vadi ve yamaçlarda



2. Erozyon etkisi

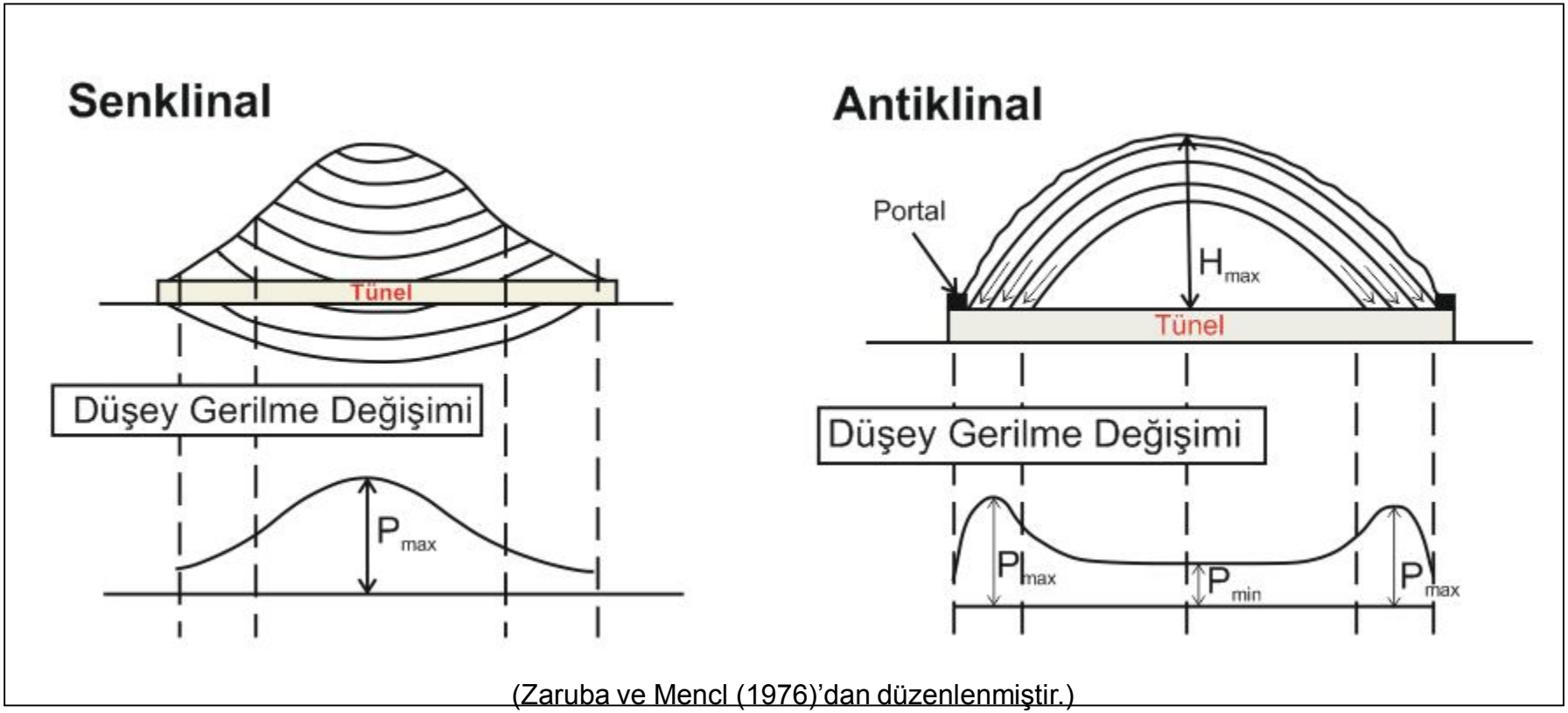
Jeolojik geçmişinde dengede olan arazi gerilmeleri, erozyonun etkisiyle düşey gerilmenin yatay gerilmeye oranla daha çok azalması sonucu, bu tür yerlerde daha büyük “k” değeri beklenir.

$$k = k_o \left[(k_o - \nu / (1-\nu)\right] . \left[\Delta z / (z_o - \Delta z)\right]$$

k : Güncel yatay/düşey gerilme oranı
k_o: Jeolojik geçmişte yatay/düşey gerilme oranı
ν: Poisson oranı
Δz: Erozyon kalınlığı
z_o: Gerilme hesaplanan noktadaki eski örtü kalınlığı

2. Yapısal özelliklerin etkisi

Tabakalanma düzlemi, zayıflık düzlemi gibi yapısal unsurlar gerilmeleri etkilemektedir. Örneğin; antiklinal ve senklinal yapılarının bulunduğu yerlerde düşey gerilmeler teorik olarak hesaplanan düşey gerilmelerden ($\sigma_z = \gamma.h$) farklılık gösterir. Antiklinalin merkezinde daha küçük değerlerde iken, kanatlarda daha yüksek düşey gerilmeler söz konusudur. Senklinal yapılarında bu durum tam tersidir.



(Zaruba ve Mencl (1976)'dan düzenlenmiştir.)

Bölüm 7

Kaya Mekaniği Deneyleri

Kaya malzemesi ve kaya kütlesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayini, arazide kaya kütlesine etkiyen gerilmelerin belirlenmesi, kaya ve kaya kütlesinin deformasyon özellikleri vb. amaçlarla arazide ve/veya laboratuvarda deneyler yapılmaktadır. Ders kapsamında; bazı temel deneylere değinilecek olup, bu deneylerin ayrıntısına girilmeden kısaca yapılışları, amaçları ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesine ilişkin bilgiler verilecektir. Deneylere örnek hazırlama ve deney sırasında uyulması gereken standart ya da öneriler, Ulusay vd. (2011) (laboratuvar deneyleri) ve ISRM (2007)'da bulunabilir.

Ders kapsamında aşağıda verilen parametrelerin belirlenmesine yönelik yapılan başlıca deneylere değinilecektir.

LABORATUVAR DENEYLERİ

Kaya malzemesinin;

- Fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler
- Dayanım ve deformasyon özelliklerini belirlenmeye yönelik deneyler
- Sonik hız deneyi
- Suda dağılmaya karşı duraylılık, Islanma kuruma ve Donma-çözünme deneyleri

ARAZİ DENEYLERİ

- Dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneyler
- Arazi gerilmelerinin belirlenmesine yönelik deneyler

7.1. LABORATUVAR DENEYLERİ

7.1.1. Fiziksel Özellikleri Belirlemeye Yönelik Deneyler

3. Bölüm'de değinilen kaya malzemesinin fiziksel özelliklerine ilişkin yapılan tanımları hatırlayınız.

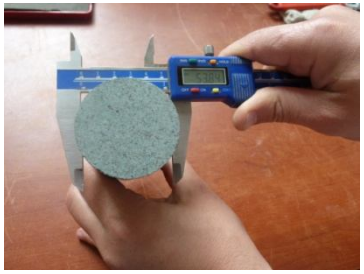
7.1.1.1. Yoğunluk - Birim Hacim Ağırlık Tayini

Kaya malzemesinin bu özellikleri, hem düzgün geometrik şekilli (çoğunlukla silindirik) hem de düzgün şekle sahip olmayan kaya malzemesi örneklerinde belirlenebilir.

⇩

Düzgün geometrik şekilli örneklerde (Kompas yöntemiyle)

Deneye hazırlanan prizmatik ya da silindirik şekilli örneğin boyutları belirlenerek örneğin hacmi (V) cm^3 ve m^3 cinsinden hesaplanır. Örneğin kuru yoğunluk (ρ) ya da birim hacim ağırlığı (γ) belirlenecekse, örnek 105°C'de en az 24 saat fırında kurutulur ve kütlesi (m_{kuru}) hassas terazide gram (g) cinsinden belirlenir. Yerçekimi ivmesi ($9.81 m/s^2$) dikkate alınarak örneğin ağırlığı (W_{kuru}) kilonewton (kN) cinsinden hesaplanır. Yandaki formüller kullanılarak kuru yoğunluk ve birim hacim ağırlık bulunur.



⇨

Kuru Yoğunluk (ρ) = m_{kuru} / V (g/cm³)

Kuru Birim hacim ağırlık (γ) = W_{kuru} / V (kN/m³)

Düzensiz geometriye sahip örneklerde – Civa taşırma yöntemiyle

Düzensiz geometriye sahip kaya malzemesi (el örneği) tamamen civa ile dolu bir kababatırılır ve taşan civanın kütlesi hassas terazide belirlenir. Civanın yoğunluğundan (13.6 g/cm³) yararlanılarak taşan civanın hacmi cm³ ve m³ cinsinden belirlenir. Bu hacim, düzensiz örneğin hacmine eşittir. Örneğin kuru yoğunluğu ya da birim hacim ağırlığı belirlenecekse, örnek 105°C'de en az 24 saat fırında kurutulur ve kütlesi gram cinsinden hassas terazide belirlenir. Yerçekimi ivmesi dikkate alınarak (9.81) örneğin ağırlığı (W_{kuru}) kilonewton (kN) cinsinden hesaplanır. Bir önceki sayfada verilen eşitliklerle kaya malzemesinin kuru yoğunluğu ve kuru birim hacim ağırlığı belirlenir.

Gerek düzenli gerekse düzensiz şekilli kaya malzemesi örneğinin farklı nem içeriklerinde ya da doygun haldeyken kütlesi ve ağırlığı belirlenerek nemli ve doygun yoğunlukları ve birim hacim ağırlıkları da belirlenebilir.

7.1.1.2. Özgül Ağırlık (Gs) Tayini

Özgül ağırlığın deneyle belirlenebilmesi için kaya malzemesinin katı kısmının (tanelerin) hacminin belirlenebilmesi gerekir. Boyle yasası dikkate alınarak, basınç - hacim ilişkisi sadece gaz ve kaya örneği+gaz ile doldurulmuş kap için ayrı ayrı belirlenebilir. Bu işlem için, tek ya da çift hücreli porozimetreler kullanılabilir. Bu deneyde sıkışabilirlikteki fark, sıkışmayan tanelerden (kayayı oluşturan katı kısım) kaynaklanır ve elde edilen sonuçlardan katı kısmın hacmi hesaplanabilir. **Ancak,** bu yöntem kaya örneğinin içindeki boşlukların tamamının birbiriyle bağlantılı olması durumunda gerçek özgül ağırlık değerinin bulunmasını sağlar. Özellikle gaz boşlukları içeren kayalarda (örneğin bazalt) birbirleriyle bağlantısız olan boşluklar nispeten fazladır. Bu tür kayalarda, ezme / toz haline getirme (pulverization) işlemi ve daha çok zeminlerde (toprak) kullanılan piknometre deneyi ile özgül ağırlığın belirlenmesi daha uygundur.

Porozimetre (Gözenek ölçer)

Piknometre deneyi

$$P_1.V_1 = P_2.V_2$$

7.1.1.3. Görünür Gözeneklilik

Hem düzgün geometrik şekilli (çoğunlukla silindirik) hem de düzgün şekle sahip olmayan kaya malzemesi örneklerinde SUYA DOYURMA YÖNTEMİYLE belirlenebilir. Düzgün şekilli örneğin hacmi kompas yöntemiyle, düzgün şekilli olmayan örneğin hacmi (V) ise bir önceki alt bölümde değinildiği gibi civa taşırma yöntemiyle belirlenir.

Örnek 105°C'de en az 24 saat fırında kurutulur ve kütlesi (m_{kuru}) gram cinsinden hassas terazide belirlenir. Daha sonra, 48 saat su dolu bir kapta bekletilerek terazide doygun kütlesi (m_{doy}) ölçülür. Aşağıdaki formül kullanılarak görünür gözeneklilik (n) belirlenir.

Görünür gözeneklilik (n) = $(m_{doy}-m_{kuru})\rho_w / V$ (Birimsiz ya da %)

Gerçek gözeneklilik, piknometre deneyinden belirlenen özgül ağırlık (Gs) ve deneyle belirlenen kuru birim hacim ağırlık (γ_{kuru}) değerleri ile 3. Bölüm'de değinilen fiziksel özellikler arasındaki ilişkiler kullanılarak belirlenebilir.

7.1.2. Dayanım Özelliklerini Belirlemeye Yönelik Deneyler

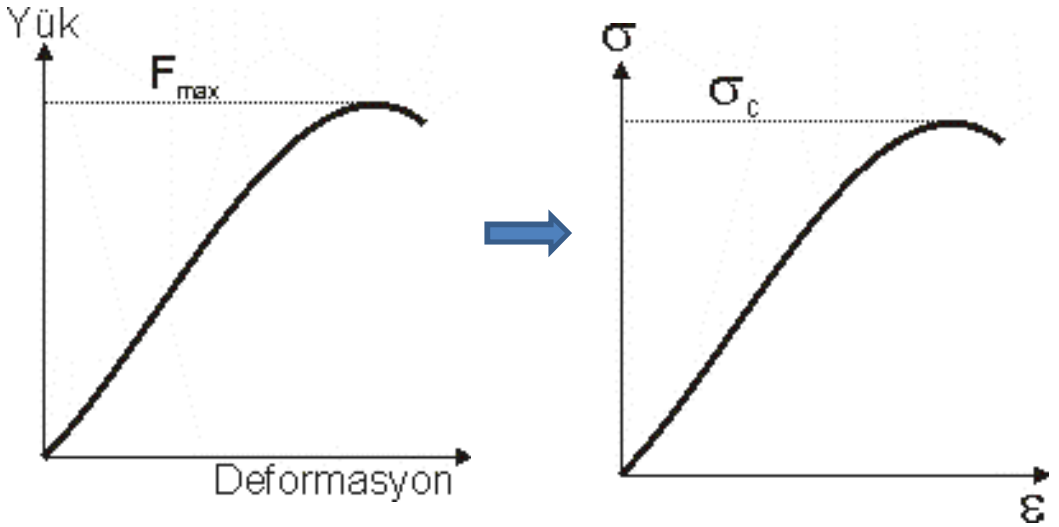
3. Bölüm'de değinilen kaya malzemesinin dayanım özelliklerine ilişkin yapılan tanımları hatırlayınız.

7.1.2.1. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyi

Deneyin amacı, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını (UCS ya da σ_c) belirlemektir. Bu amaçla, kaya örneklerinden silindirik şekilli deney örnekleri (karot) hazırlanır ve örneğin boyu ve çapı ölçülür (ISRM önerilerine göre deney örneğinin boy/çap oranı 2.5 ile 3 arasında olmalı).

Deney örneğinin laboratuvarda hazırlanışı

tek eksenli yükleme koşulunda, sabit gerilme ya da deformasyon hızında örnek kırılasıya kadar yükleme yapılır. Örneğin kırıldığı andaki gerilme değeri kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımına karşılık



Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı:

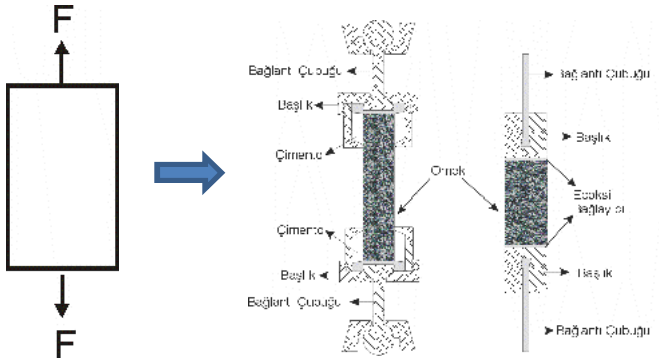
$$\sigma_c = UCS = \frac{F_{max}}{A}$$

F_{max}: Yenilme anındaki yük (kuvvet)
A: Yükün uygulandığı alan (silindirik örneğin taban alanı)

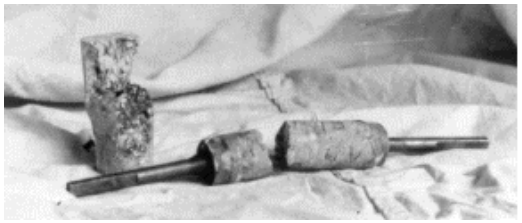
7.1.2.2. Çekilme Dayanımını Belirlemeye Yönelik Deneyler

Deneyin amacı, kaya malzemesinin çekime dayanımını (σ_t) belirlemektir. Doğrudan çekilme deneyiyle ya da dolaylı bir deney olan Brazilian deneyiyle belirlenebilir.

Doğrudan çekme deneyi:



Obert ve Duval (1967)

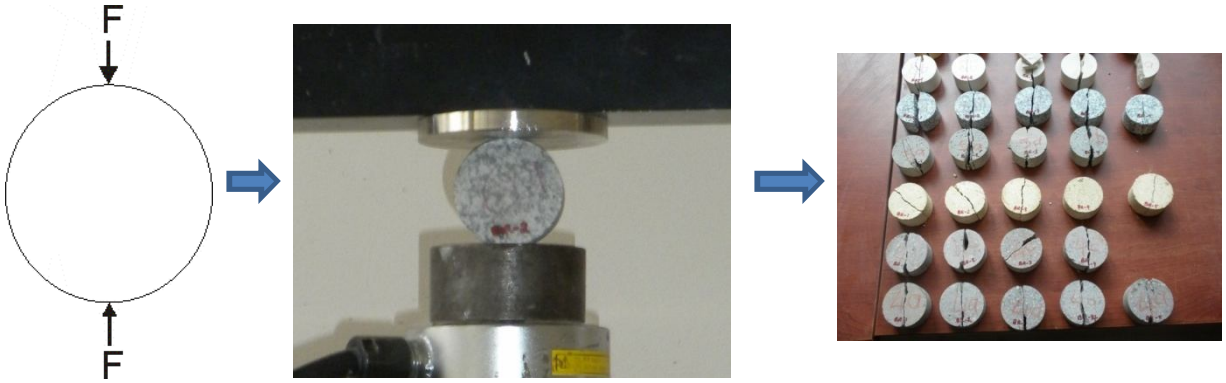


Ulusay vd.(2011)

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

F_{max}: Yenilme anındaki yük
A: Yüklemenin yapıldığı alan (silindirik örneğin taban alanı

Dolaylı yöntem (Brazilian Çek(il)me Deneyi):



$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi \cdot t \cdot D}$$

F: Yenilme anındaki yük
D: Çap
t: Kalınlık

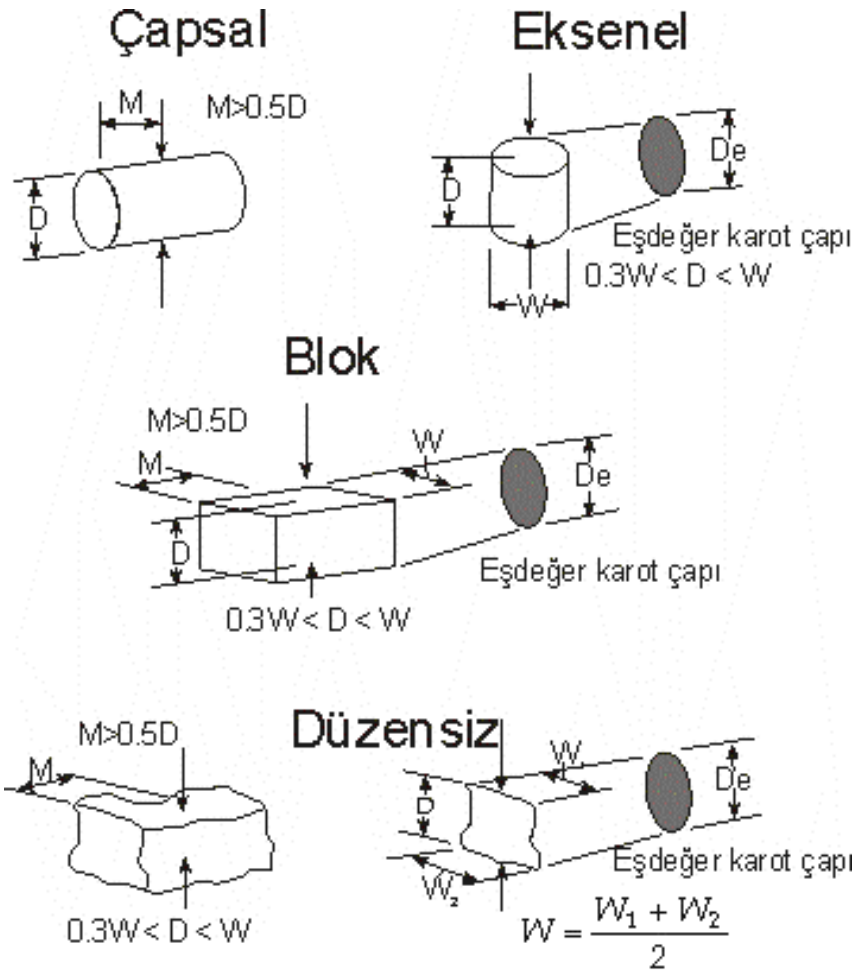
7.1.2.3. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımını Dolaylı Yoldan Belirlemeye Yönelik İndeks Deneyler

Zayıf ve sık aralıklı eklem içeren kayalarda bazen standartlara uygun karot örneği hazırlamak güçtür. Bu tür malzemelerin UCS değerini dolaylı yoldan belirlemek için bazı indeks deneylerden yararlanılmıştır. İndeks deneyler ve kullanımındaki avantaj ve dezavantajlar herbiri için aşağıda anlatılmıştır.

Nokta Yükü Dayanım İndeksi Deneyi:

Bu deneyden elde edilen nokta yükü dayanım indeksi, **kaya malzemesinin** UCS ve çekilme dayanımını (σ_t) dolaylı yoldan belirlemek amacının yanı sıra, kaya malzemelerinin dayanımlarına göre sınıflandırmalarında, kaya kütlesi sistemlerinde bir girdi parametresi olarak da kullanılmaktadır. Deney aleti portatif olması nedeniyle arazide de kullanılabilmektedir. **Ancak, günümüzde UCS ve σ_t'nin belirlenmesinde dolaylı yoldan kullanılmaması yönünde bir eğilim de vardır.**

Deneyde kullanılabilen örnekler



(ISRM, 1985).

Düzeltilmemiş
Nokta yükü dayanım indeksi:

$$I_s = P / De^2 \quad (MPa)$$

P: Yenilme yükü (kN)
De: Eşdeğer çap
(Çapsal deneyde, $De^2 = D^2$
Eksenel, blok ve düzensiz örneklerde $De^2 = 4A/p$
A=W.D)

Boyut düzeltme faktörü:

$$F = (De / 50)^{0.45}$$

(mm)

Düzeltilmiş
Nokta yükü dayanım indeksi:

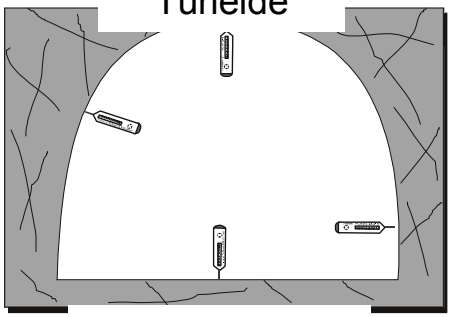
$$\mathbf{I_{s(50)} = F.\ I_s \quad (MPa)}$$

Schmidt Çekici Deneyi:

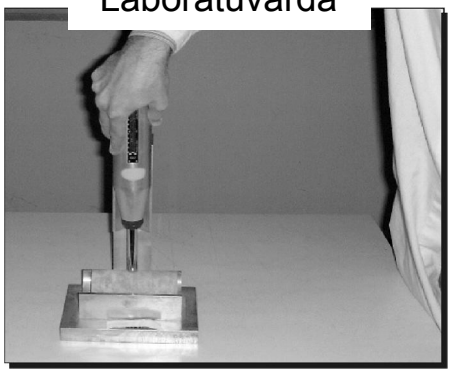
Kaya malzemelerinde ve süreksizlik yüzeylerinde, Schmidt çekici kullanılarak, Schmidt geri sıçrama değerinin tayini ve dolaylı yoldan UCS'nin belirlenmesi amacıyla yapılır. Deneyin çok zayıf ve çok sert kaya malzemelerinde sağlıklı sonuçlar vermediği belirtilmektedir (Xu vd., 1990)

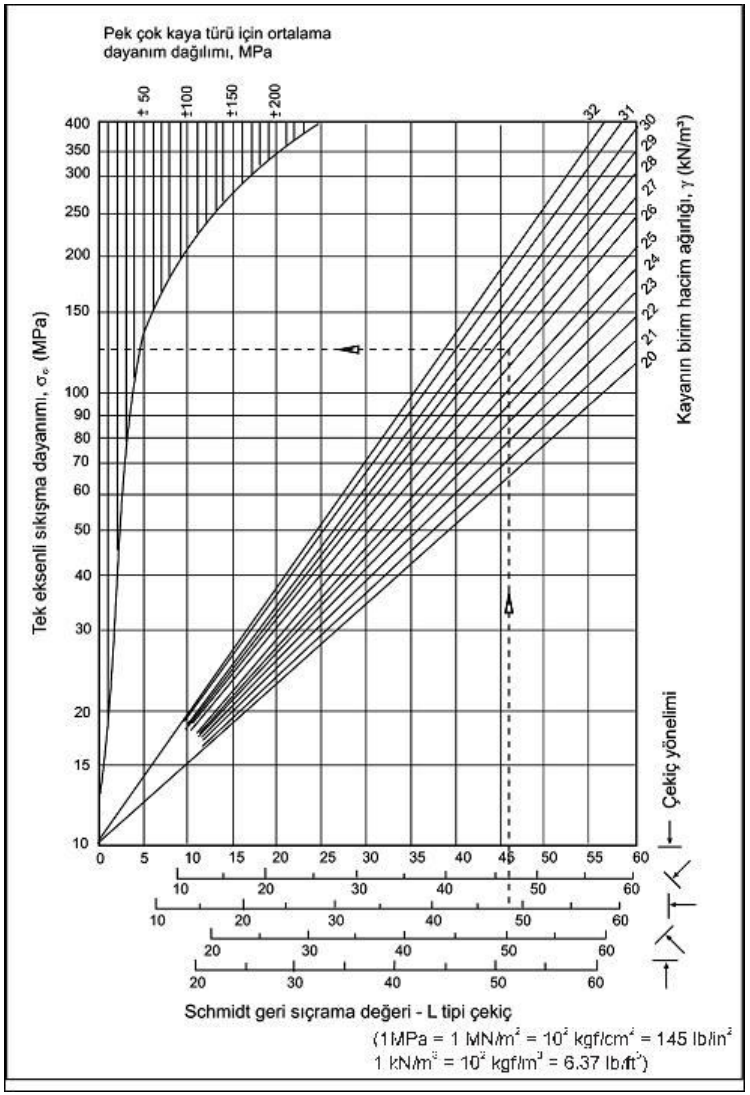
Süreksizlik yüzeyinde

Tünelde



Laboratuvarda

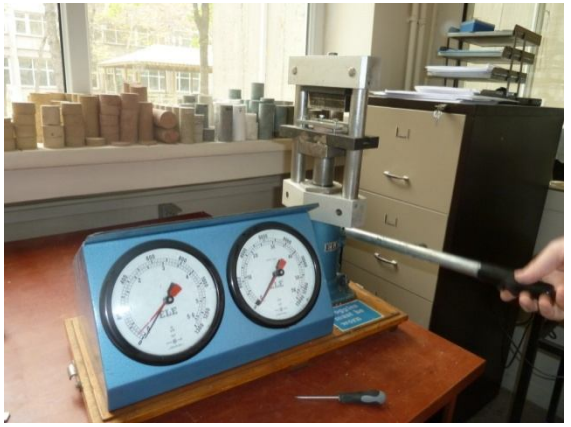




Disk Makaslama İndeksi Deneyi:

Disk makaslama indeksi (BPI) Özellikle zayıf, kırıklı ve dilimler halinde ayrılabilen kayalarda, kaya malzemesinin UCS değerini dolaylı olarak belirlemek amacıyla önerilmiştir (Schirer, 1988; Ulusay, vd. 2001).

Örnek kalınlığı: 5-15mm
Çapı : 42 mm'den az olmamalı



50 mm çap ve 10 mm kalınlık için

DÜZELTİLMİŞ BPI_c

$$BPI_c = 3499 \cdot D^{-1.3926} \cdot t^{-1.1265} \cdot F$$

Tek eksenli sıkışma dayanımı

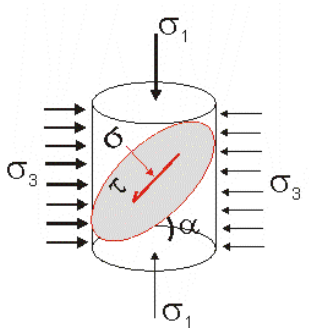
$UCS = 5.1\ BPI_c$

D: Deneyde kullanılan örneğin çapı
t: Deneyde kullanılan örneğin kalınlığı
F: Örneğin yenildiği anda uygulanan yük

7.1.3. Makaslama Dayanımını Belirlemeye Yönelik Deneyler:

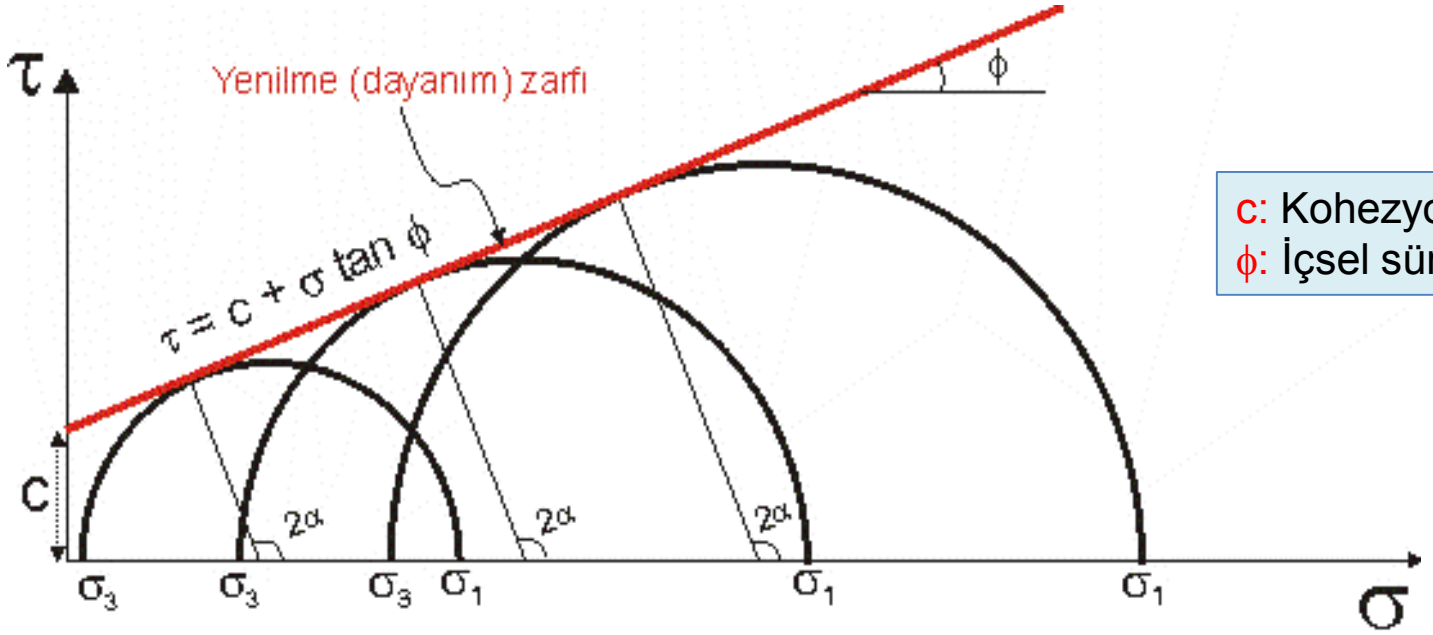
7.1.3.1. Üç eksenli sıkışma deneyi:

Deneyin amacı, **kaya malzemesinin** makaslama dayanımını belirlemektir. Aynı kaya türünden alınan en az üç karot örnek üzerinde deney yapılırak makaslama dayanımı parametreleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) belirlenir.



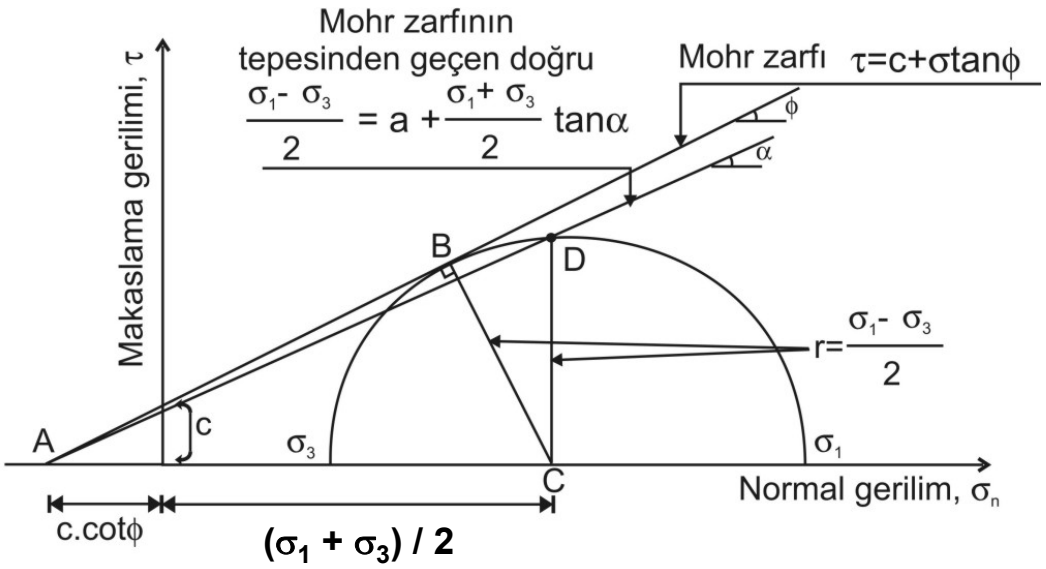
Sabit yanal gerilme (hücre/çevre basıncı) altında eksenel yükleme

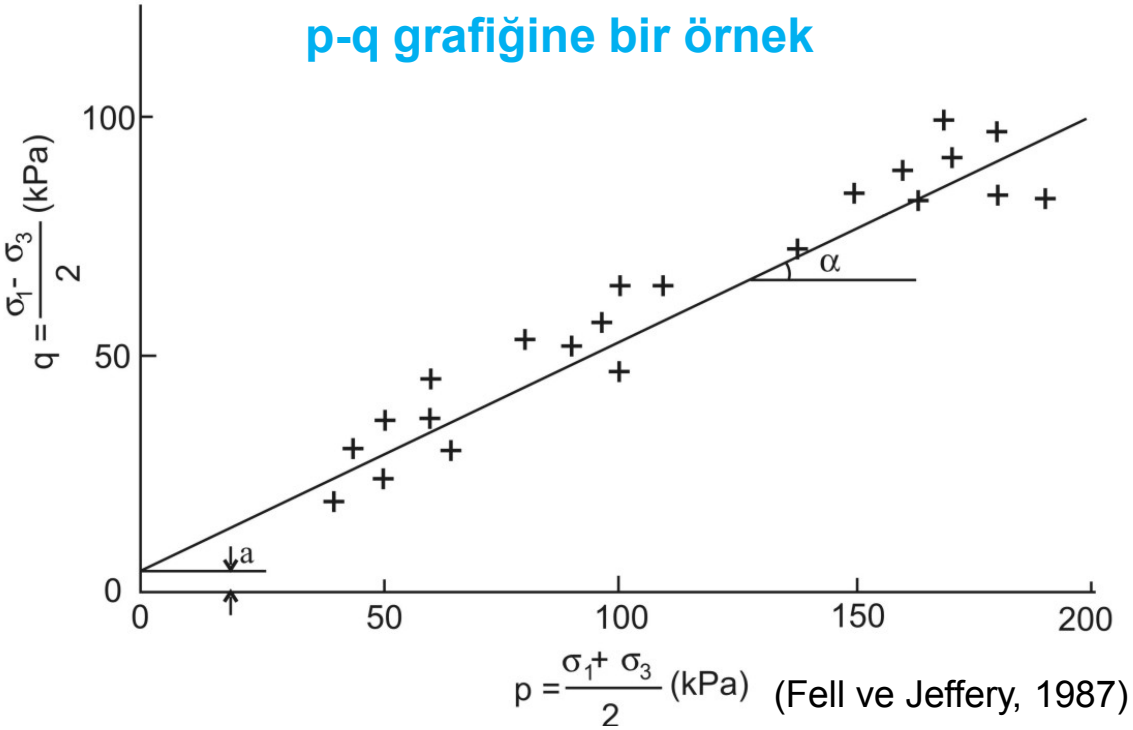
Her bir deney sonucu için Mohr daireleri çizilir, bu dairelere ortak teğet çizilerek makaslama dayanımı zarfı (yenilme zarfı) belirlenir.



c: Kohezyon
ϕ: İçsel sürtünme açısı

Ancak, deney sonuçlarına göre çizilen Mohr daireleri her zaman üstteki gibi ideal sonuçlar vermez. Bu durumlarda,istatistiksel bir değerlendirme ile dayanım zarfının çizilmesi daha uygun olur.





(Fell ve Jeffery, 1987)

p-q grafiğinin mantığı

p - q grafiğinden yararlanarak

Makaslama dayanımı parametreleri:

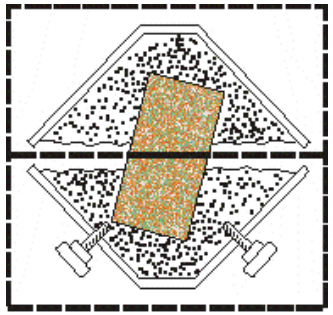
$$\phi = \sin^{-1}(\tan\alpha)$$

$$c = \frac{a}{\cos\phi}$$

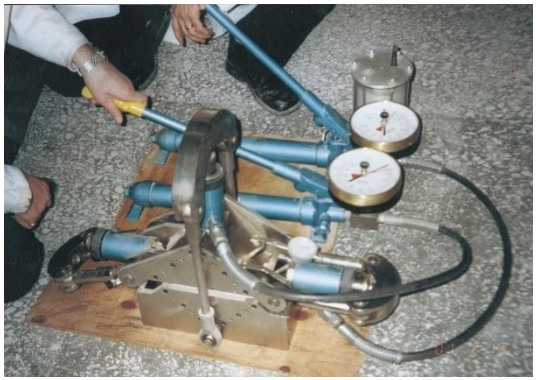
7.1.3.2. Doğrudan makaslama deneyi

Deneyin amacı, **düz ve pürüzsüz ya da çok az pürüzlü süreksizlik yüzeylerinin** makaslama dayanımı parametrelerini (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) belirlemektir. Bu deneyde, doruk ve artık makaslama dayanımı parametreleri belirlenebilir.

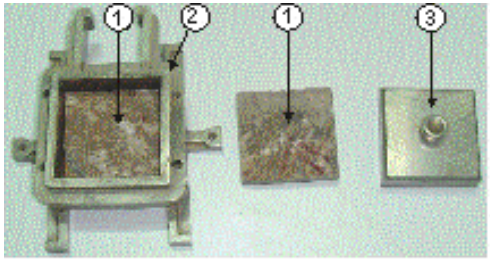
Portatif doğrudan makaslama deney düzeneği

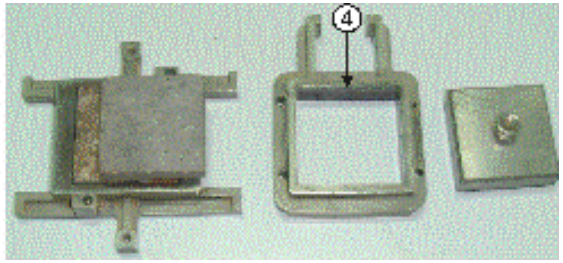


Ulusay vd. (2011)



Deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deney düzeneği

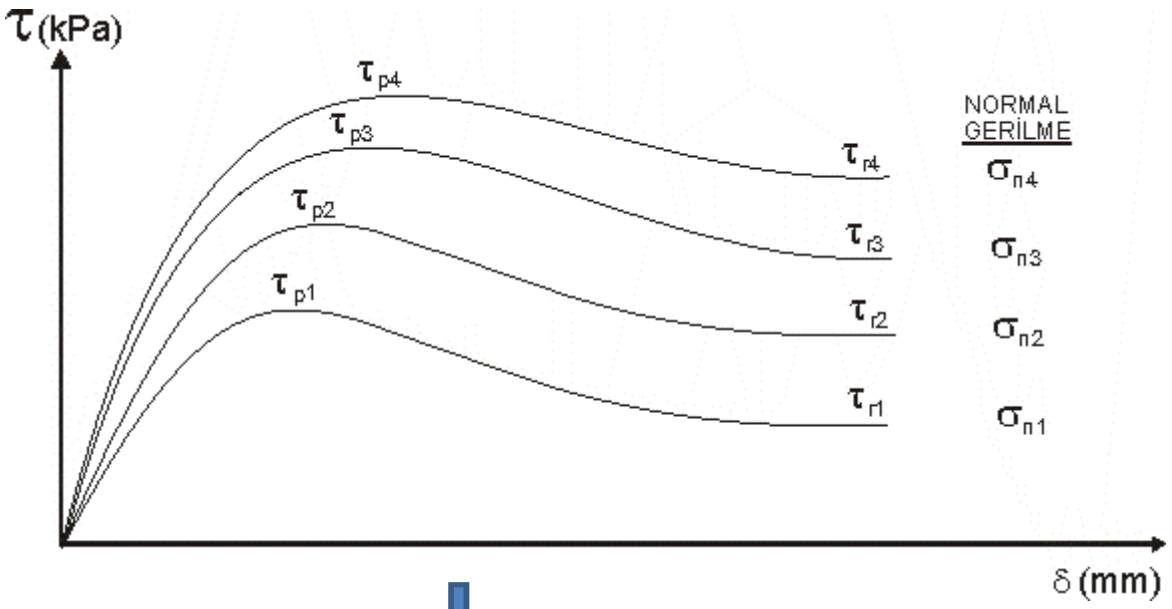




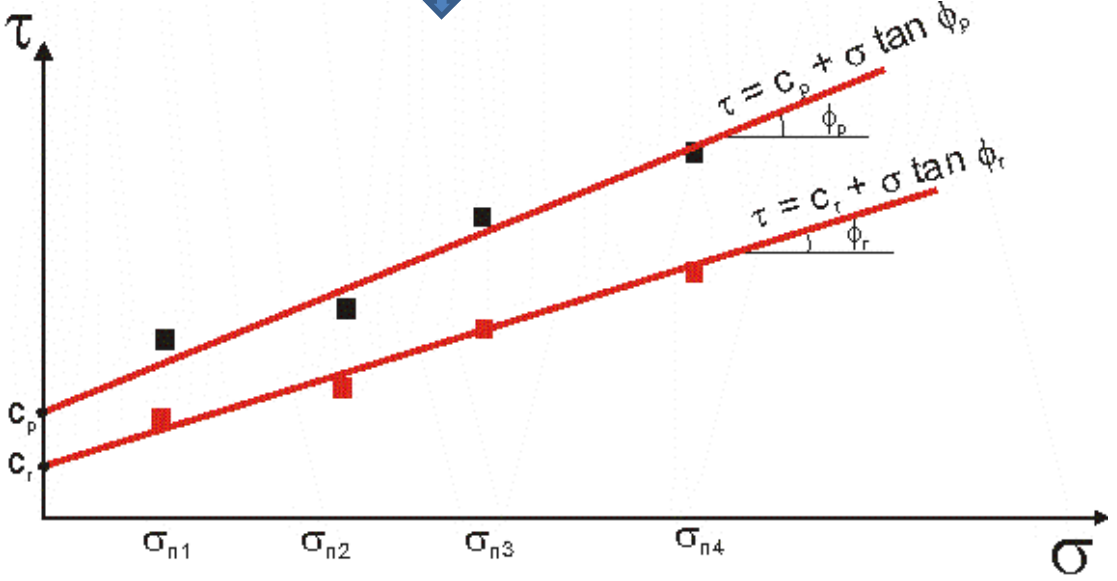
Ulusay vd. (2011)

DENEY VERİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı normal gerilmeler altında doğrudan makaslama deneyleri yapılır ve her bir normal gerilme için doruk (peak) ve artık (residual) makaslama dayanımları belirlenir.



Normal gerilmelere karşılık belirlenen artık ve artık makaslama dayanımları σ-τ grafiğine işlenerek doruk ve artık yenilme zarfları çizilir. Her bir yenilme zarfı için doruk ve artık makaslama dayanımı parametreleri bulunur.



7.1.4. Deformasyon Deneyleri:

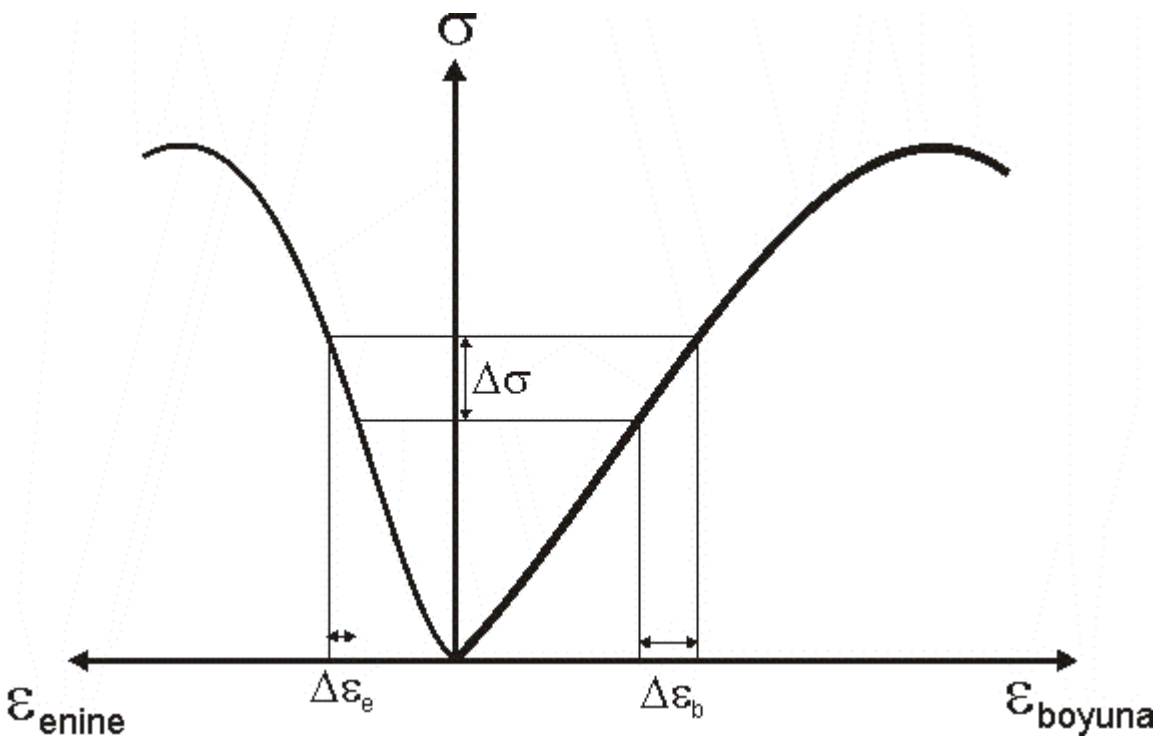
3. Bölüm'de değinilen kaya malzemesinin deformasyon özelliklerine ilişkin yapılan tanımları hatırlayınız.

Kaya malzemesinin temel elastik sabitlerinin (Elastik modül ve Poisson oranı) belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçla, tek eksenli yükleme koşulunda Gerilme – Birim deformasyon eğrileri çizilerek ilgili parametreler belirlenir.

Kaya örneğinin orta noktasına düşey ve yatay yönde birim deforamasyon ölçerler (strain gauge) yapıştırılır.

Yükleme sırasında yük artışına bağlı olarak doğrudan birim deformasyon değişimi veri transfer üniteleri aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılır.

Deneyden elde edilen Yük-birimdeformasyon verisi, deneye tabi tutulan karot örneğinin alanı dikkate alınarak "gerilme – birim deformasyon verisine dönüştürülür ve grafiği çizilir.



Lineer elastik modül:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_b}$$

Poisson oranı:

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_e}{\Delta\varepsilon_b}$$

Teğet elastik modül ve kiriş modülü 3. Bölüm'de bahsedildiği gibi belirlenebilir.

7.1.5. Sonik hız deneyi:

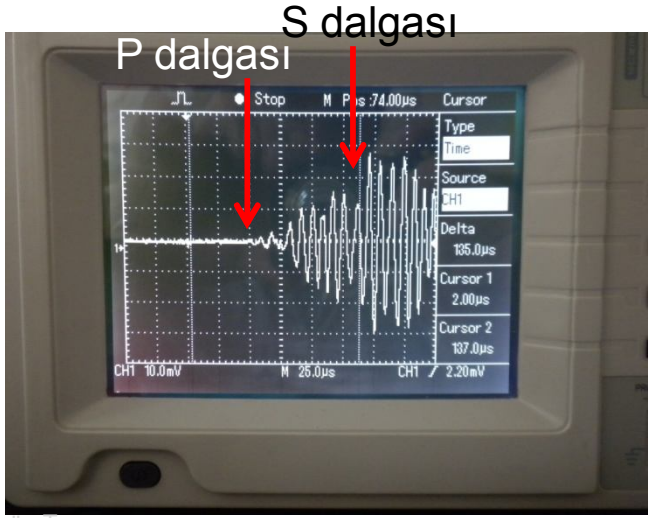
Bu deney, kaya örnekleri içinde sıkışma (P) ve makaslama (S) dalgalarının yayılma hızını belirlemek amacıyla yapılır.Bu amaçla deneyde P ve S dalgalarının deney örneğini geçme süreleri (ilerleme süreleri) belirlenir. Belirlenen P ve S dalga hızlarından (Vp ve Vs) yararlanarak, kaya malzemesinin **dinamik Elastik modülü (E_d)** ve **dinamik Poisson oranı (ν_d)** ve **dinamik Rijidite modülü (G_d)** belirlenebilir.

$$V_p = L / T_p$$

$$V_s = L / T_s$$

Birimi: m/s

L: Örneğin uzunluğu (mm)
T_p: P dalgasının ilerleme süresi
T_s: S dalgasının ilerleme süresi



$$E_d = \rho \cdot V_S^2 \cdot \frac{\left(3V_p^2 - 4V_p^2\right)}{\left(V_p^2 - V_s^2\right)}$$

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - V_s^2}{2\left(V_p^2 - V_s^2\right)}$$

$$G_d = \rho \cdot V_s^2$$

7.1.6. Donma-Çözülme, Suda Dağılmaya Karşı Duraylık ve Islanma-Kuruma Deneyleri

Bu deneyler kaya malzemesinin farklı çevresel etkilere maruz kalması durumunda aşınmaya karşı durayılılıklarının, fiziksel özelliklerinin ve dayanımlarının değişimi hakkında fikir edinmek amacıyla yapılan indeks deneylerdir.

Donma-Çözülme Deneyi

En az %50 oranında suya doygun olan düzgün şekilli örnekler torbalara konularak yanda görülen ve içinde CaCl2 + 6H2O bulunan donma- çözülme aletinin haznesine yerleştirilir. -18°C'de donmaya bırakılır. Daha sonra ısı +32°C'ye getirilerek örnekler bu koşulda çözülmeye bırakılır. Genel olarak, örneğin bulunduğu yerdeki iklim koşulları dikkate alınarak bu çevrimin sayısı belirlenir. Deney sonunda örnek fırında kurutularak ağırlık kaybı belirlenir. Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim de incelenebilir. Deneyin ayrıntısı için ilgili kaynaklara bakınız.

Islanma-Kuruma Deneyi

Örnekler suya dolu bir kap içinde bekletilerek suya doyurulur. Daha sonra fırında kurutulur. Bu çevrim çok sayıda yapılarak, kaya malzemesinin ıslanma ve kuruma sonrası ağırlık kaybı (aşınması sonucu) ile fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenebilir. Deneyin ayrıntısı için ilgili kaynaklara bakınız.

Suda Dağılmaya Karşı Duraylık Deneyi

Deneyin amacı, kaya örneklerinin iki çevrim olarak ıslanma kurumaya maruz bırakılması durumunda parçalanma ve zayıflamaya karşı gösterdiği direnç hakkında fikir edinmektir. Her biri yaklaşık 40-50g ağırlığında mümkün olduğunca küresele yakın yaklaşık 10 adet kaya parçası tamburlara yerleştirilir ve tamburlar su içeren haznelerin içinde 20 deviri 10 dakikada yapacak şekilde döndürülür. Örnekler fırında kurutulur. Aynı şekilde ikinci çevrim de yapılarak, ağırlık kaybı (Suda dağılmaya karşılık duraylık indeksi - I_{d2}) hesaplanır. Deneyin ayrıntısı için ilgili kaynaklara bakınız.

7.2. ARAZİ DENEYLERİ

Kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerini belirlemeye yönelik farklı deney yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan bir kaçı örnek olarak aşağıda sunulmuştur.

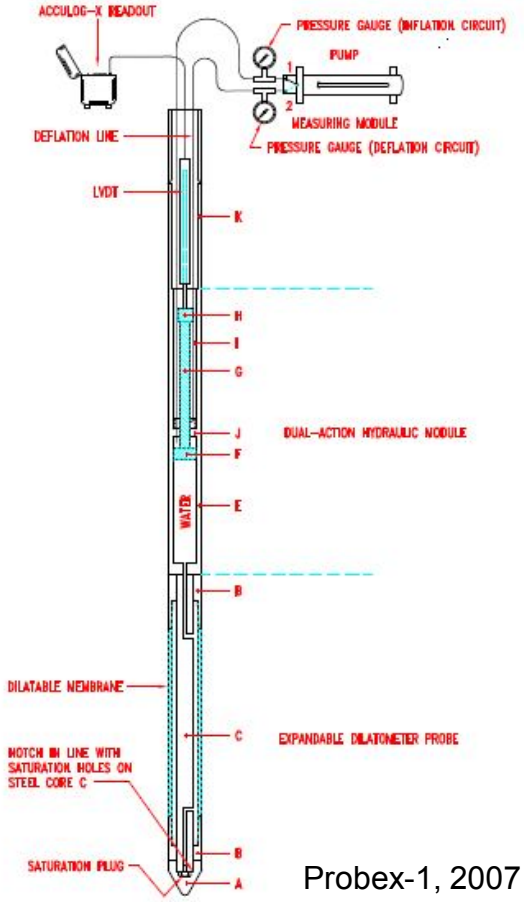
7.2.1. Kayaların deformabilite özelliklerinin tayin edilmesi

- **Dilatometre Deneyi**

(Probex-1, 2007)

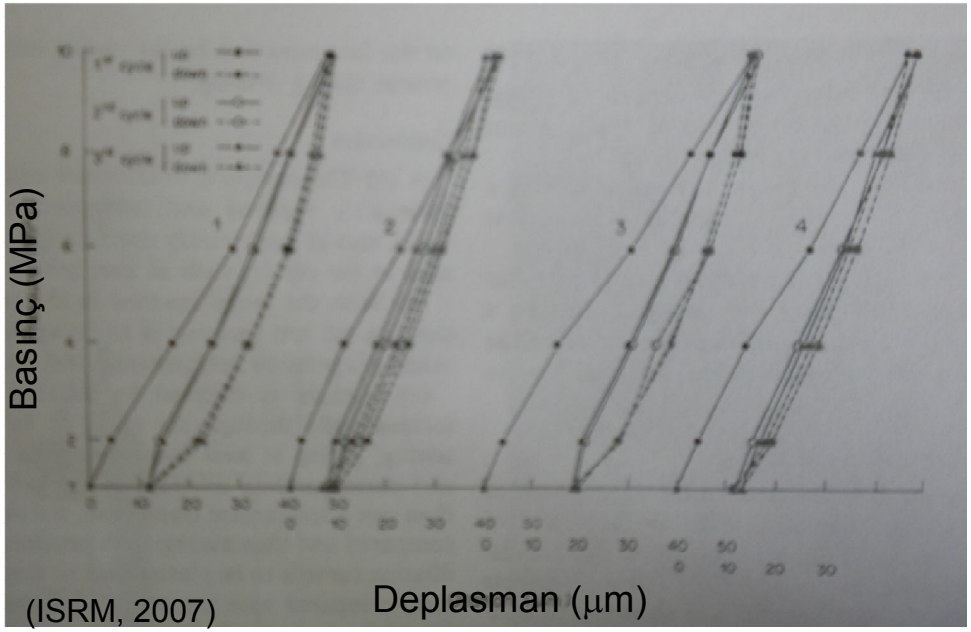
Sert ve orta sertlikteki kayaçlarda açılan sondaj kuyularının cidarlarına sonda yardımı ile radyal üniform basınç verip bu basınç altında dört çap doğrultusundaki deformasyonu elektronik cihazlarla ölçmekten ibarettir (Şekercioğlu, 1993).

Interfels, 2007



Probex-1, 2007

Basınç deformasyon grafikleri deformasyon modülü hesaplama eşitlikleri



Deney, geniş aralıklı çatlak içeren kayada yapılmışsa, Sekant dilatometrik deformasyon modülü (Ed)

$$E_d = (1+\nu_R) D \frac{\Delta p_i}{\Delta D} .....(MPa)$$

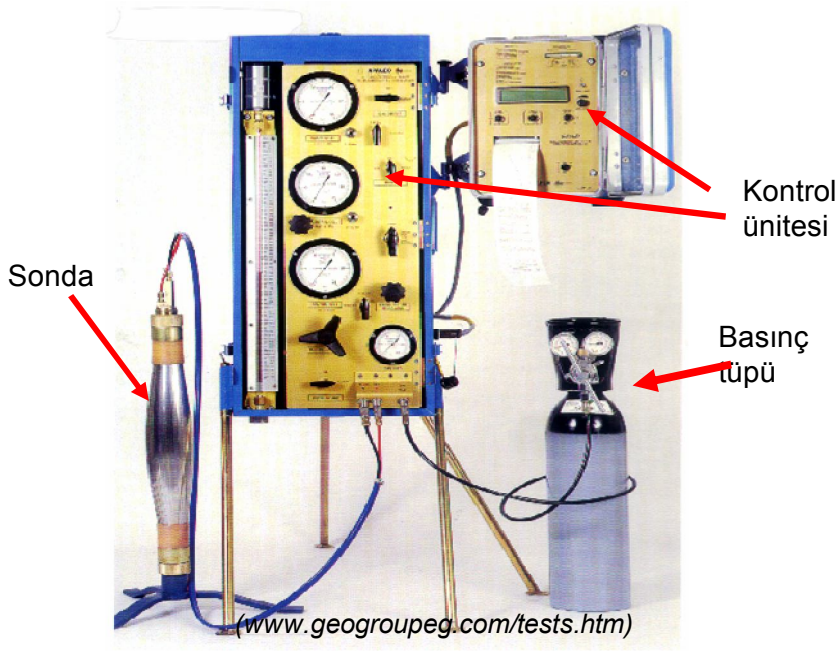
Burada;
D: Kuyu çapı (m)
Δpi :hesaplanan bölgedeki basınç artışı (MPa),
ΔD : basınca karşı gelen delik çap değişimi (m),
ν_R : kaya kütlesinin poisson oranıdır.

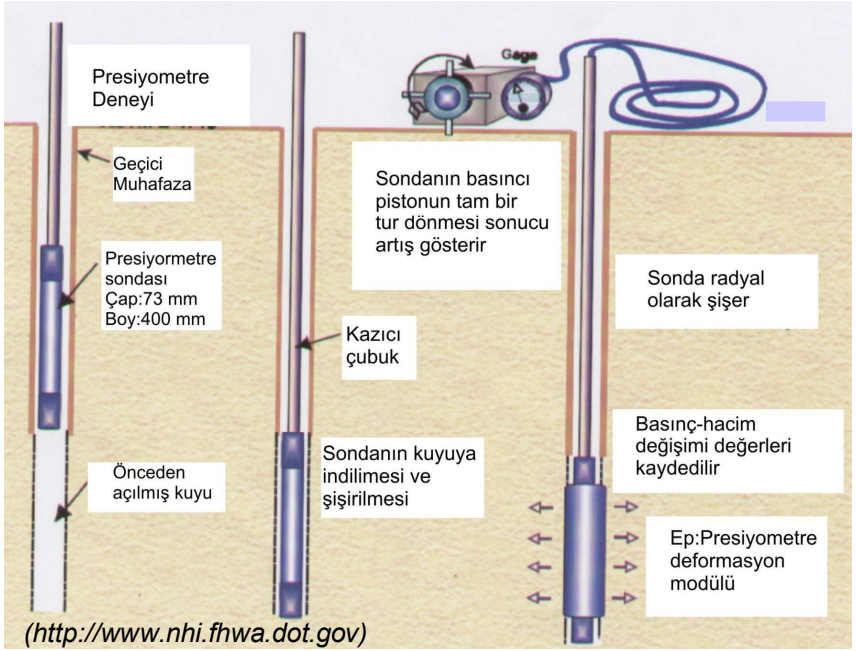
Deneyin çatlaklı kayada yapılması durumunda ve uygulanan basınç (p_i), arazi basıncının (p_0) iki katını geçmesi halinde çatlaklar açılır ve aşağıdaki eşitlik kullanılır.

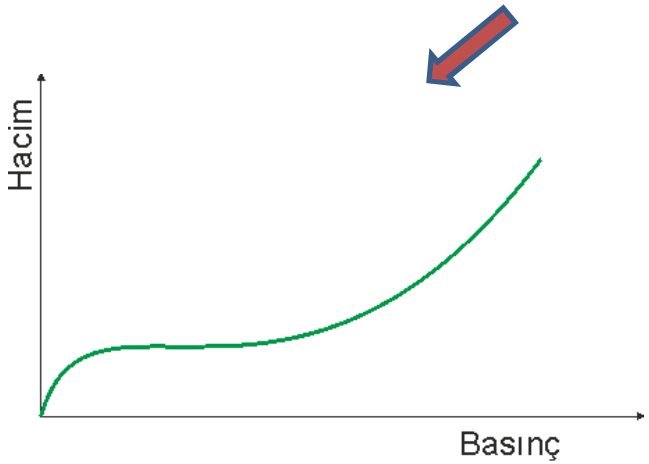
$$E_d = D \frac{p_i}{\Delta D} (1+\nu_R) \left[(1-\nu_R) \ln\left(\frac{p_i}{2p_o}\right) + 1 \right] .....(MPa)$$

• Presiyometre Deneyi

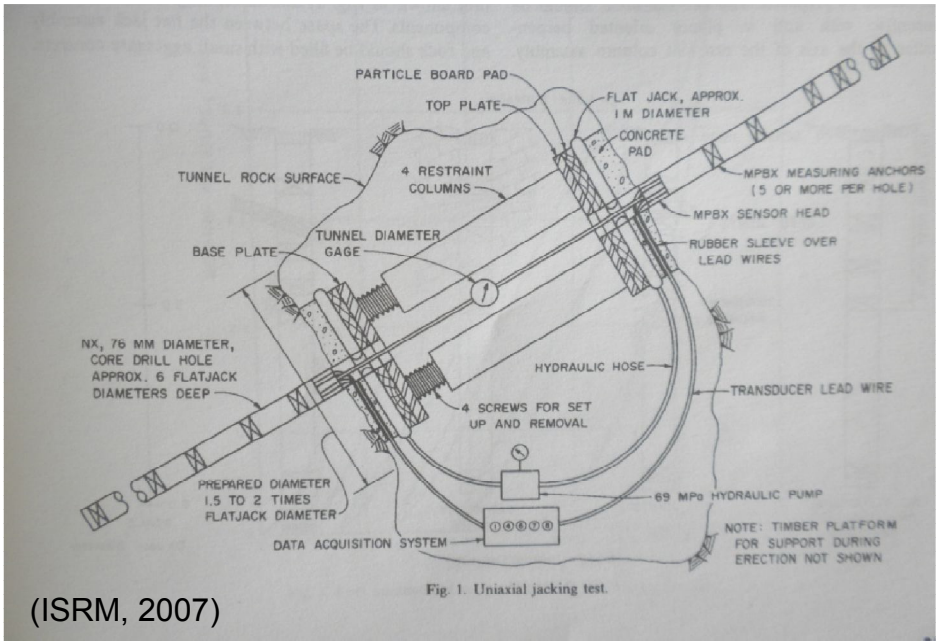
Zayıf kayalarda uygulanabilen bir deney yöntemidir. Tipik bir presiyometre deneyinde ölçüm hücresine uygulanan basınç seviyesi 10 veya daha fazla sayıda ve eşit miktarda arttırılarak bunlara karşılık gelen hacim değişiklikleri belirlenir.





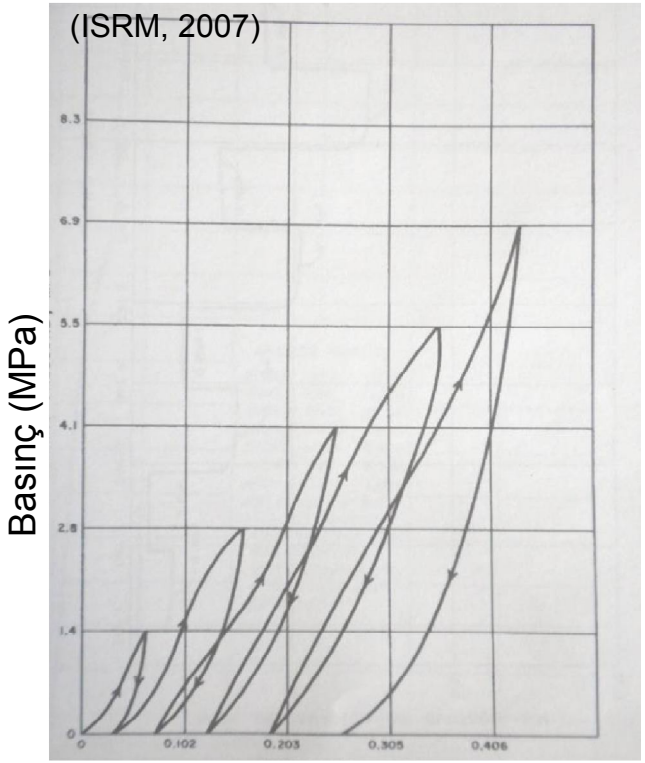


• Plaka Yükleme Deneyi



(ISRM, 2007)

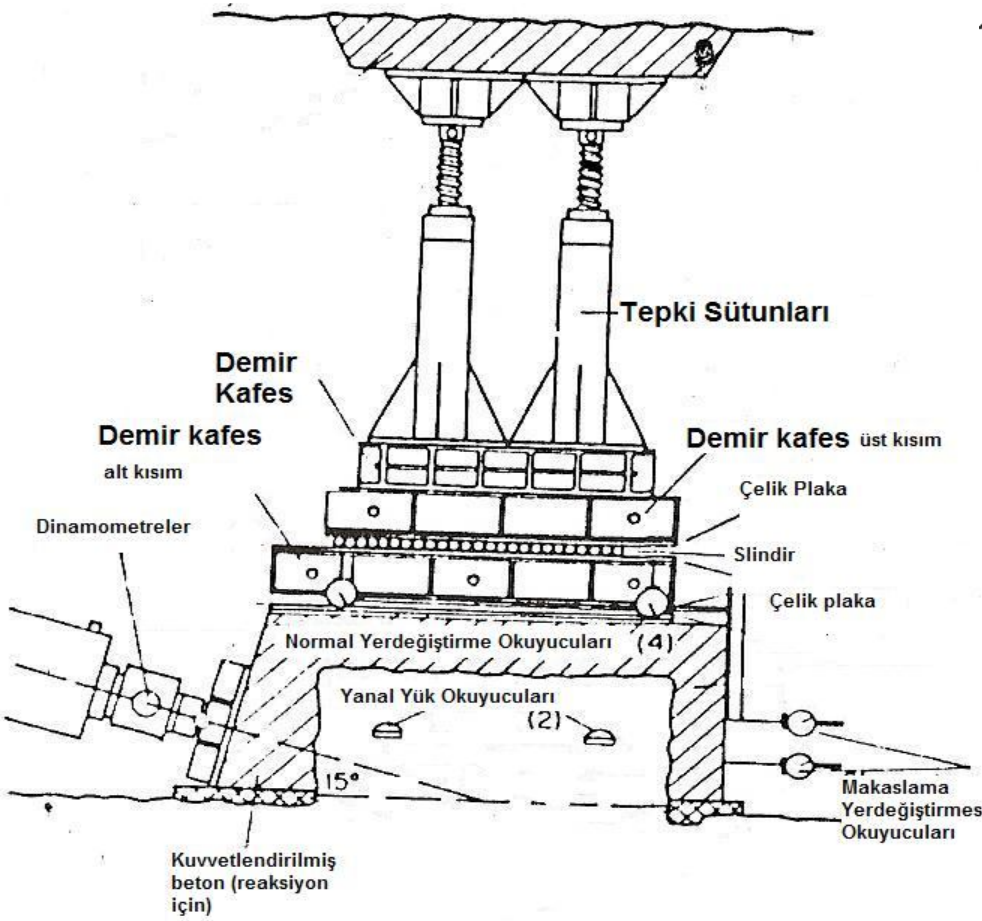
Küçük yeraltı açıklıklarında kaya kütlesinin yüklenmesi sonucu oluşan deformasyonların belirlenmesi işlemidir.

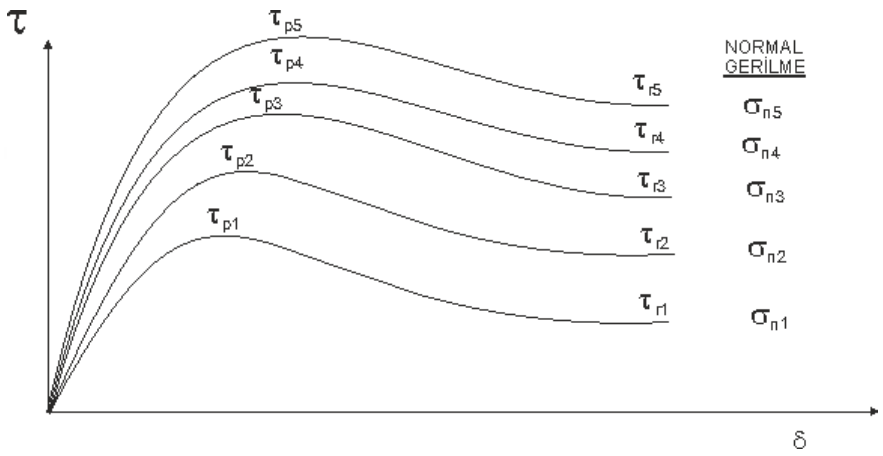


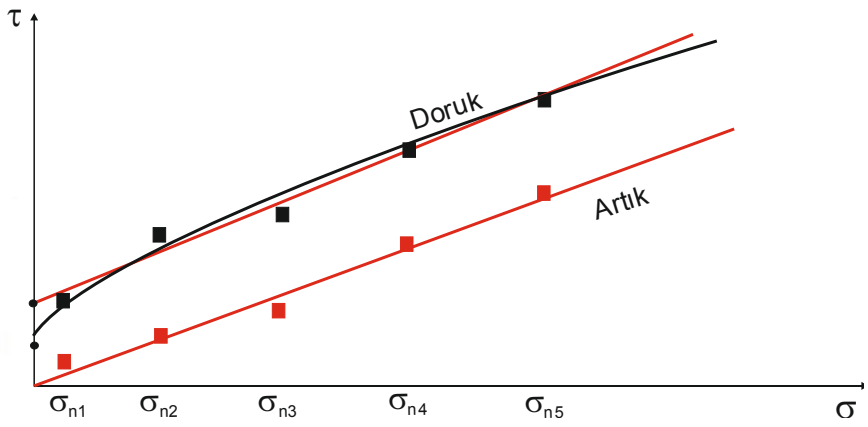
7.2.1. Makaslama dayanımı parametrelerinin tayin edilmesi

• Yerinde Doğrudan Makaslama Deneyi

Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılır.

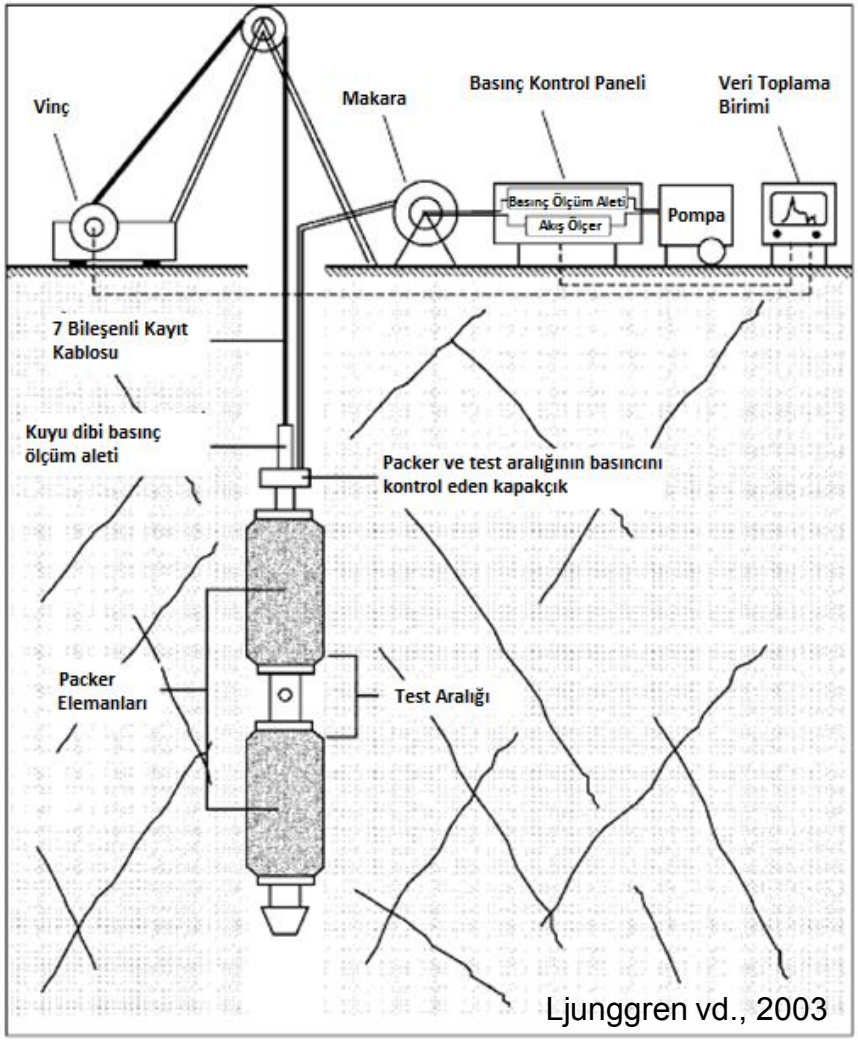




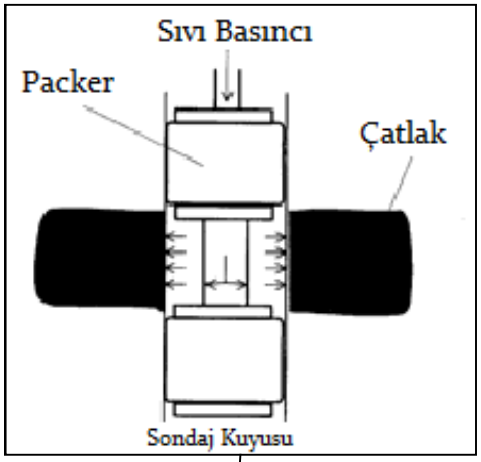


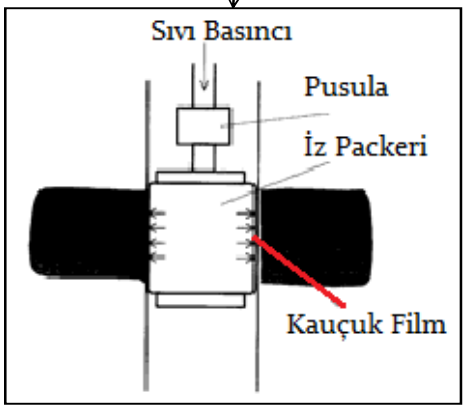
7.2.1. Arazi Gerilmelerinin (In-situ Stress) Tayin Edilmesi

- **Hidrolik Çatlatma (Hydraulic fracturing) Deneyi**

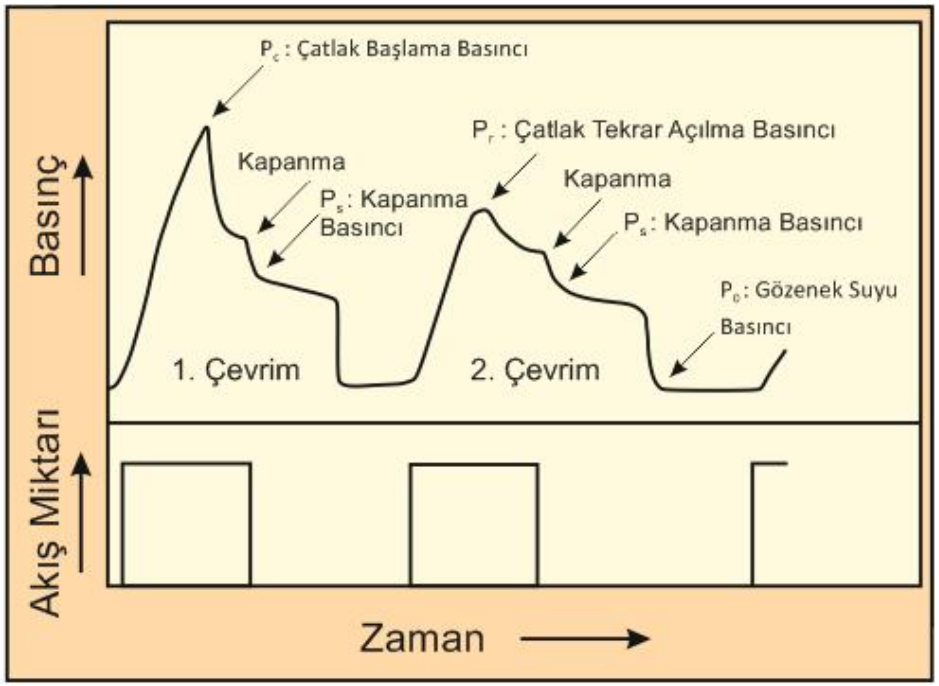


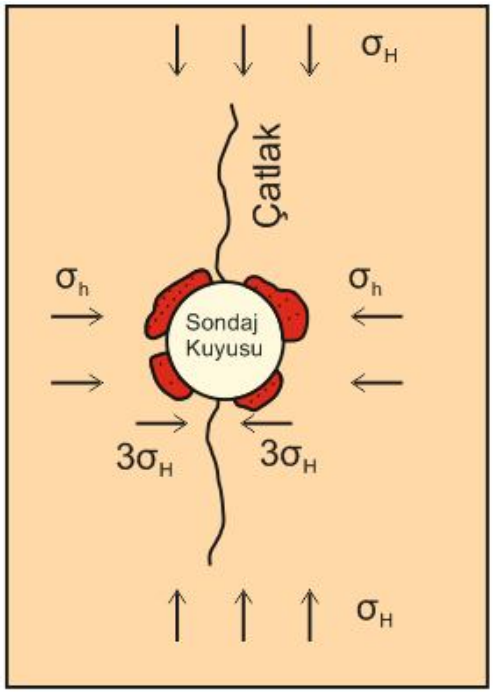
Ljunggren vd., 2003





Amadei & Stephansson (1997)





Enever, Cornet ve Roegiers, 1992'den düzenlenmiştir.

Bu yöntemle gerilme tensörüne ait iki asal gerilme hesaplanırken, üçüncü asal gerilme yapılan varsayım (düşey gerilmenin örtü yüküne eşit olduğu varsayımı) sonucu belirlenir.

$$\sigma_h = P_s$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_c' - P_0 + \sigma_t$$

$$\sigma_t = P_c' - P_r$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_r - P_0$$

$$\sigma_{1,2,3} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

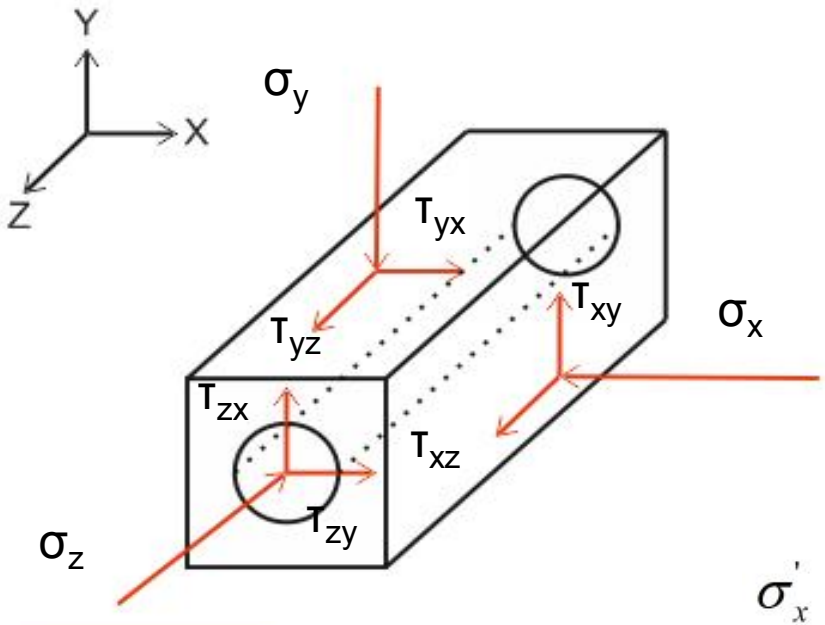
• Gerilim Boşaltma Yöntemleri (Stress Relief Methods)

Kaya örneğinin, kendisini çevreleyen kaya kütlesinden ve dolayısıyla gerilme alanından izole edilmesi amaçlanır. Bu işlem sonucunda sergilediği deformasyon davranışı incelenir.

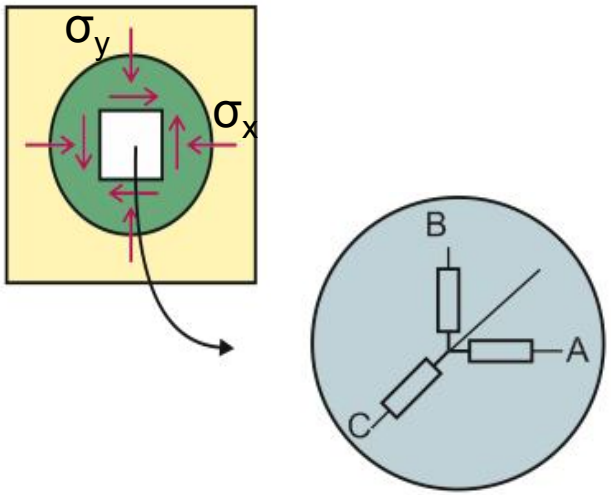
http://mmsstress.com.au

http://www.bgr.bund.de

CSIR Doorstopper



Kuyu tabanına yapıştırılan doorstopper ile iki boyutta gerilme ölçümü yapılır.
Alet yerleştirildiğinde ve mevcut deliğin delme işlemi bittiğinde ölçümler yapılır.



$$\sigma'_x = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B}{1-\nu} + \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{1+\nu}\right]$$

$$\sigma'_y = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B}{1-\nu} - \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{1+\nu}\right]$$

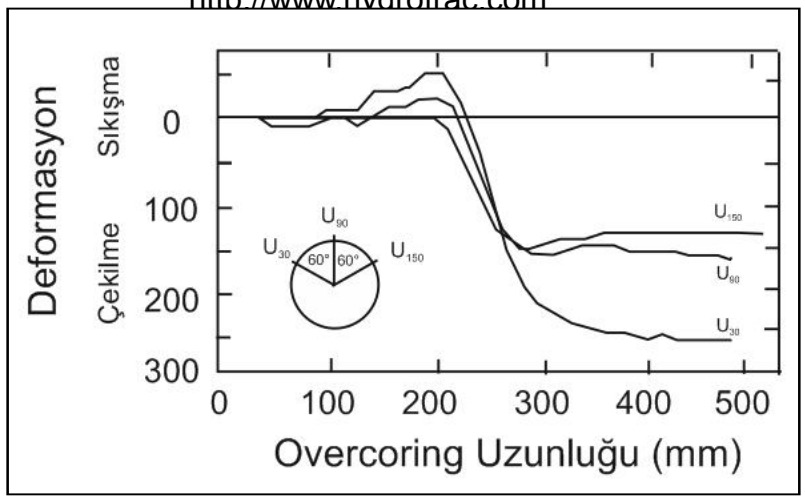
$$\tau'_{xy} = \frac{E}{2}\left[\frac{\varepsilon_C - (\varepsilon_A + \varepsilon_B)}{1+\nu}\right]$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

USBM Ölçüm Aleti

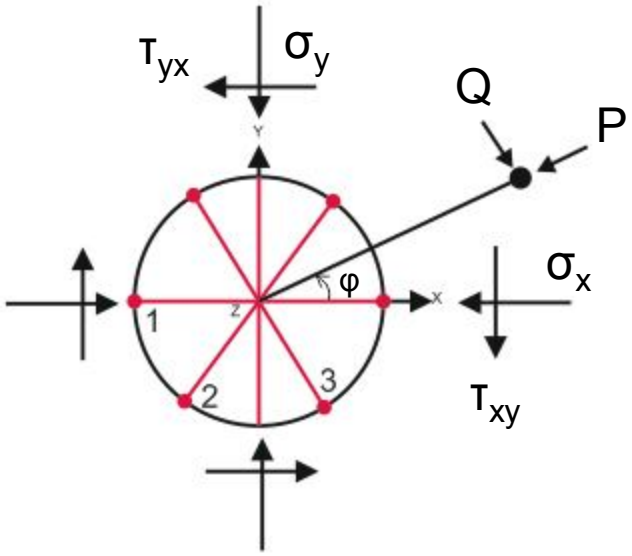
http://www.hydrofrac.com

Karşılıklı olarak dizilmiş 6 adet ölçüm noktası kullanılarak kuyu çapında meydana gelen değişimler ölçülür.
Tekrar kullanılabilmesi en büyük avantajıdır.



Walton ve Worotnicki, 1978

www.measurementagapito.com



$$P = \frac{\left(\sigma_{xo} + \sigma_{yo}\right)}{2} + \left(\frac{\left(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}\right)^2}{4} + \tau_{xyo}^{\ 2} \right)^{1/2}$$

$$Q = \frac{\left(\sigma_{xo} + \sigma_{yo}\right)}{2} - \left(\frac{\left(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}\right)^2}{4} + \tau_{xyo}^{\ 2} \right)^{1/2}$$

$$\cos 2\varphi = \frac{0.5\left(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}\right)}{\left(\frac{\left(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}\right)^2}{4} + \tau_{xyo}^{\ 2} \right)^{1/2}}$$

$$\sin 2\varphi = \frac{\tau_{xyo}}{\left(\frac{\left(\sigma_{xo} - \sigma_{yo}\right)^2}{4} + \tau_{xyo}^{\ 2} \right)^{1/2}}$$

$$\sigma_{xo} = \frac{E}{6(v^2 - 1)}\left[U_1 + U_2 + U_3 + 0.5\left(2U_1 - U_2 - U_3\right)\right]$$

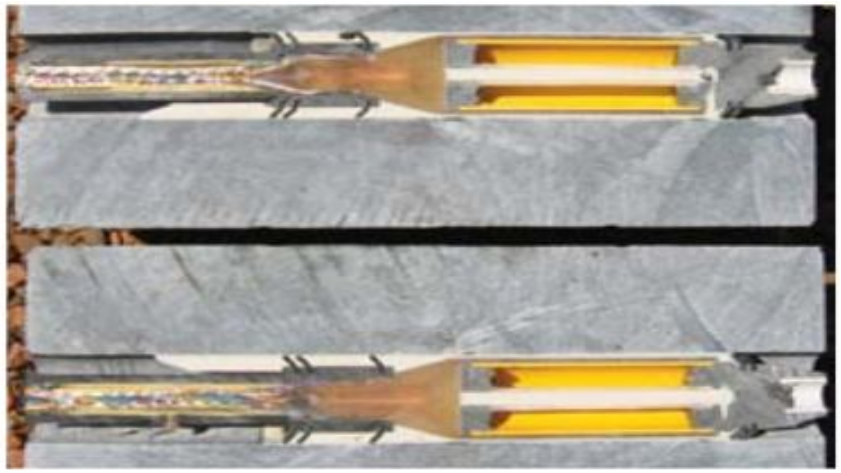
$$\sigma_{yo} = \frac{E}{6(v^2 - 1)}\left[U_1 + U_2 + U_3 - 0.5\left(2U_1 - U_2 - U_3\right)\right]$$

$$\tau_{xyo} = \frac{E}{4(3)^{1/2}(v^2 - 1)}\left[U_2 - U_3\right]$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

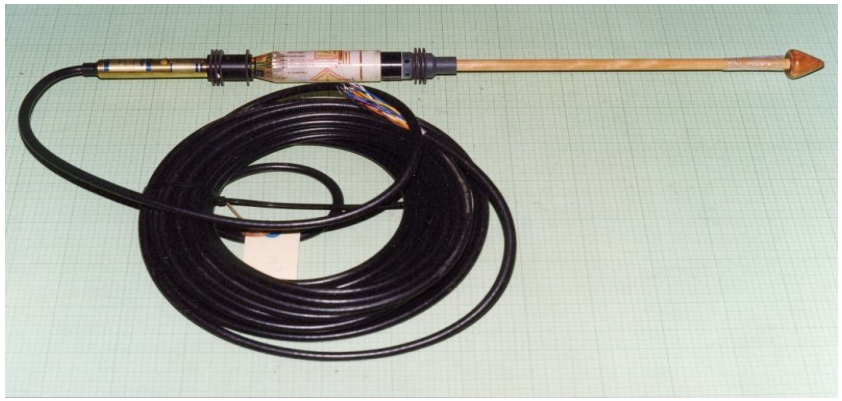
CSIRO HI (Hollow Inclusion) Hücresi

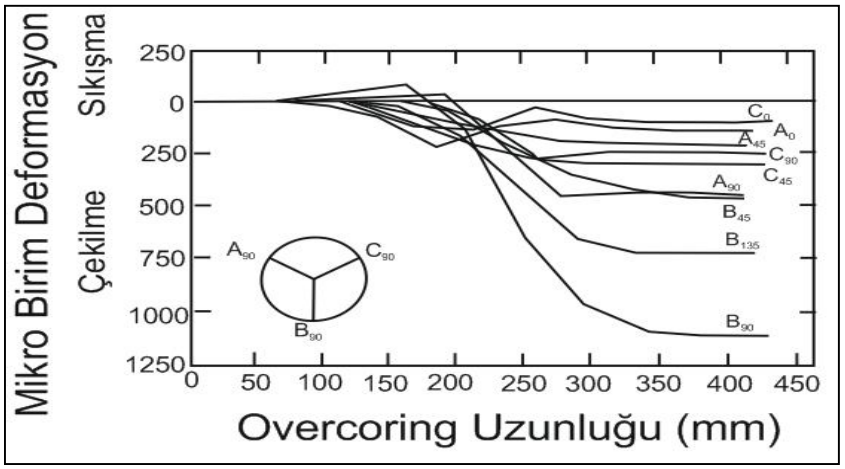
measurement.coffey.com



Özel bir yapışkan ile pilot kuyu içerisine yapıştırılan ölçüm aleti yardımıyla üç boyutta birim deformasyon ölçümleri yapılır.

minewiki.org



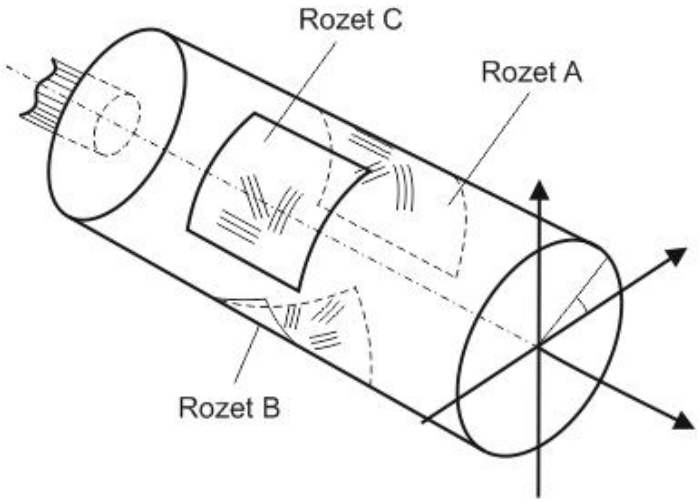


Walton ve Worotnicki, 1978

$$\varepsilon_\theta = \frac{\left\{\left(\sigma_{xo}+\sigma_{yo}\right)K_1(\rho) - \nu\sigma_{zo}K_4(\rho) - 2\left(1-\nu^2\right)x\left[\left(\sigma_{xo}-\sigma_{yo}\right)\cos 2\theta + 2\tau_{xyo}\sin 2\theta\right]K_2(\rho)\right\}}{E}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\left\{\sigma_{zo} - \nu\left(\sigma_{xo}+\sigma_{yo}\right)\right\}}{E}$$

$$\gamma_{\theta z} = \frac{\left\{4\left(1+\nu\right)\left[\tau_{yzo}\cos\theta - \tau_{xzo}\sin\theta\right]K_3(\rho)\right\}}{E}$$

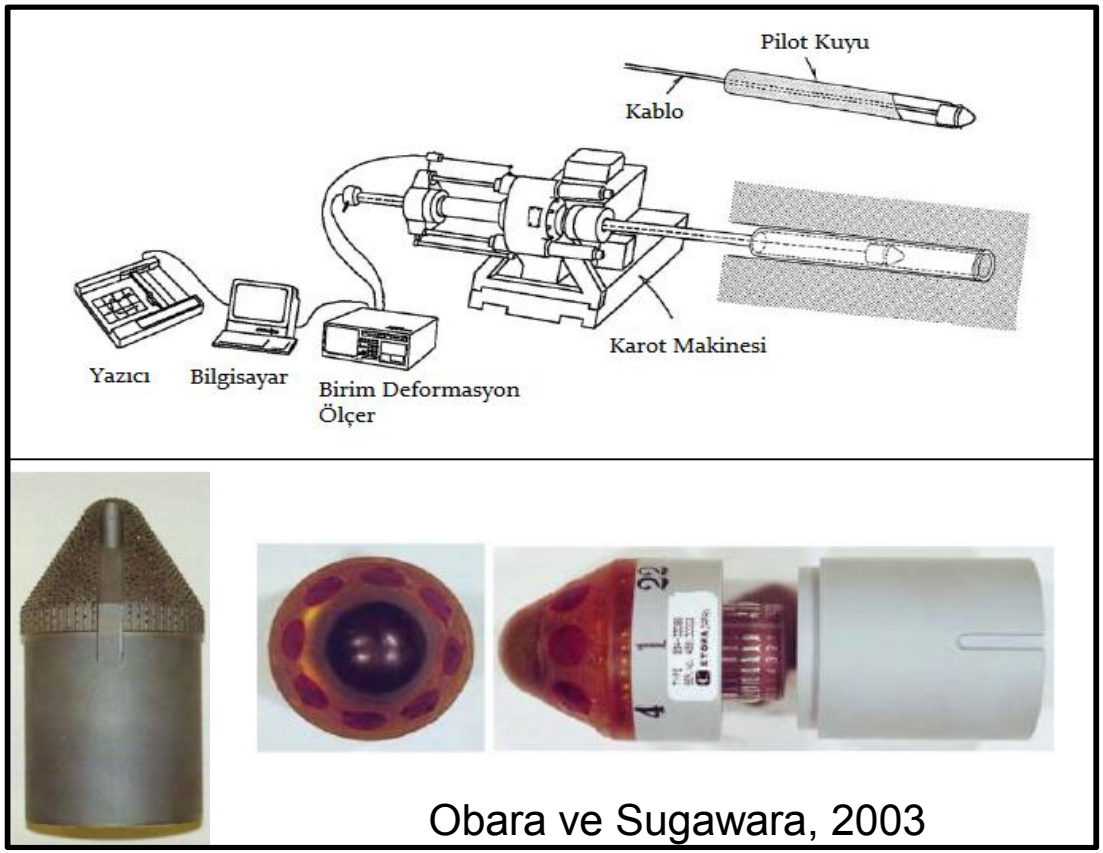


$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

www.measurementagapito.com

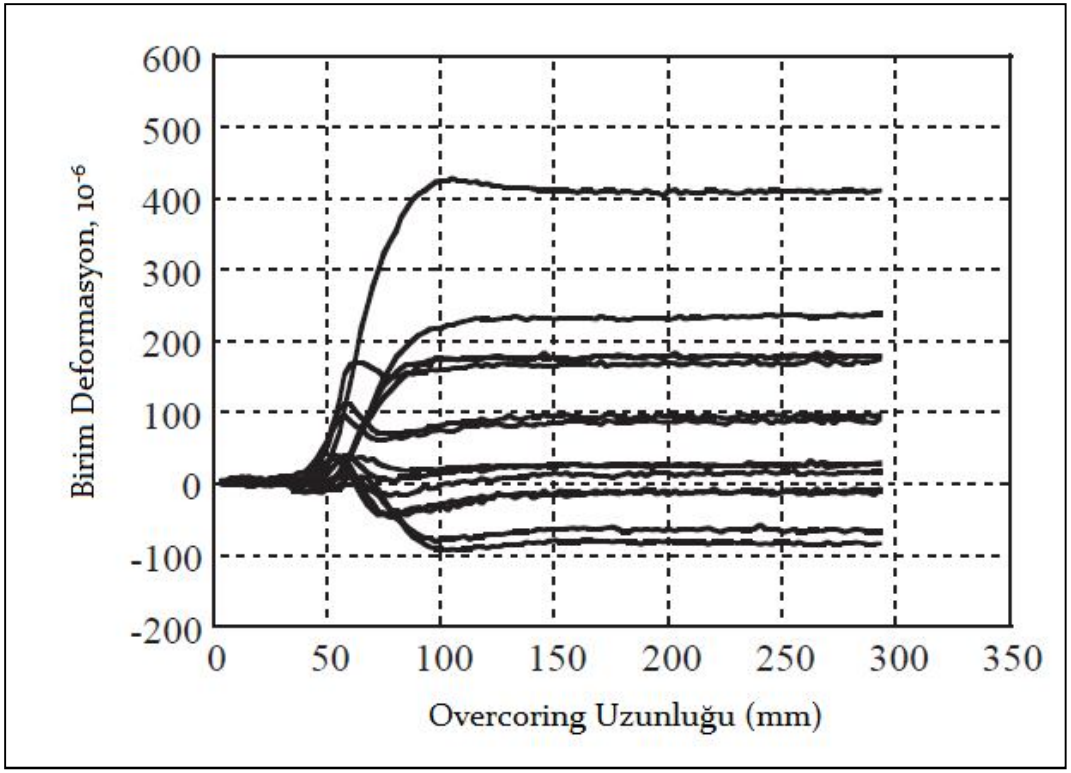
Konik Uçlu Hücre (CCBO)

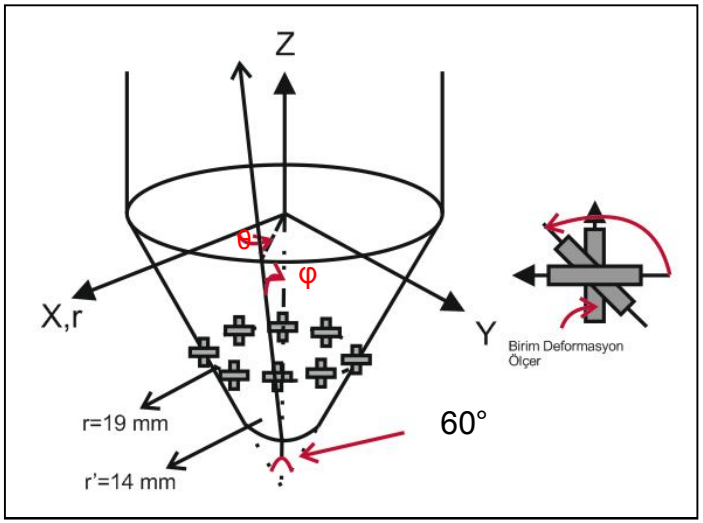
Kuyunun dibi konik uca göre şekillendirilir. Japonya'da yaygın olarak kullanılan bu teknik yardımıyla üç boyutlu gerilme ölçümü yapılabilmektedir.



Obara ve Sugawara, 2003

Ogasawara vd., 2012





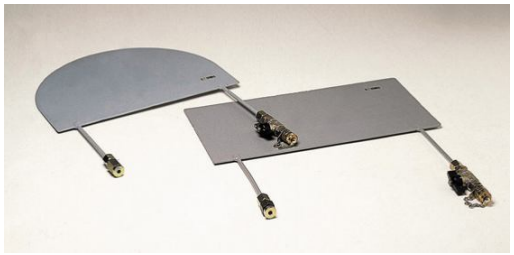
Obara ve Sugawara, 2003

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_\theta\\ \varepsilon_\rho\\ \varepsilon_\phi\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{11}+A_{12}\cos 2\theta, & A_{11}-A_{12}\cos 2\theta, & C_{11}, & D_{11}\sin\theta, & D_{11}\cos\theta, & 2A_{12}\sin 2\theta\\ A_{21}+A_{22}\cos 2\theta, & A_{21}-A_{22}\cos 2\theta, & C_{21}, & D_{21}\sin\theta, & D_{21}\cos\theta, & 2A_{22}\sin 2\theta\\ A_{31}+A_{32}\cos 2\theta, & A_{31}-A_{32}\cos 2\theta, & C_{31}, & D_{31}\sin\theta-D_{32}\cos\theta, & D_{31}\cos\theta+D_{32}\sin\theta & 2A_{32}\sin 2\theta-2A_{33}\cos 2\theta \end{bmatrix}\frac{\{\sigma\}}{E}$$

$$\{\sigma\}=\{\sigma_x,\sigma_y,\sigma_z,\tau_{yz},\tau_{zx},\tau_{xy}\}^T$$

• Yassı Veren (Flatjack) Deneyi

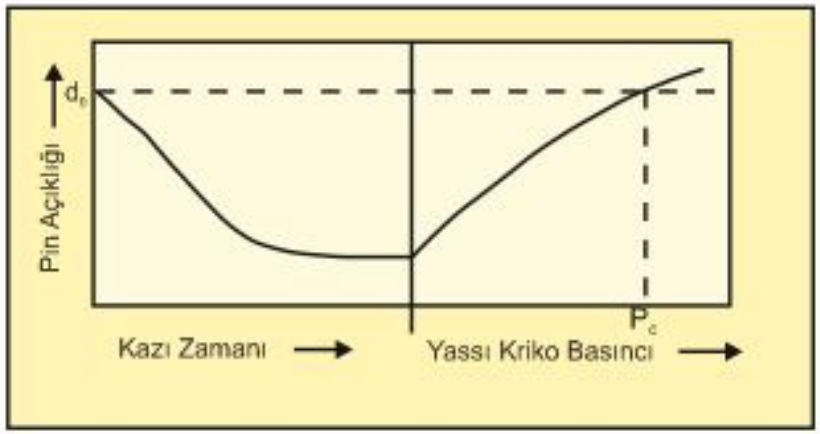
İki referans noktası arasında meydana gelen yer değiştirmenin ilk haline dönüştürülmesi için gerekli olan gerilme bulunması amaçlanır. Yüzeye dik olarak oluşturulan yarık içerisine yassı veren'ler yerleştirilir.

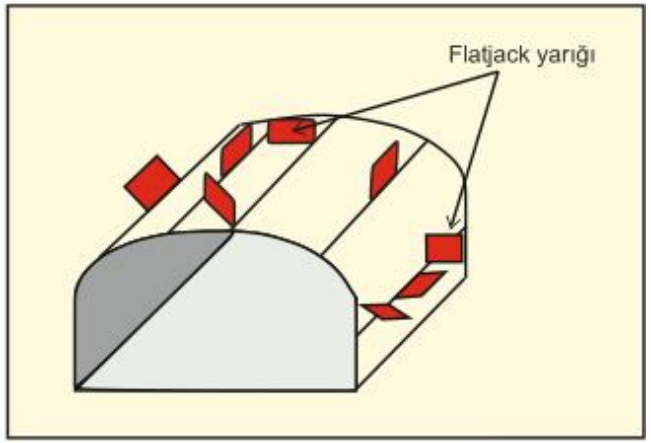


http://www.controls-group.com/eng/concrete-testing-equipment/flat-jacks.php

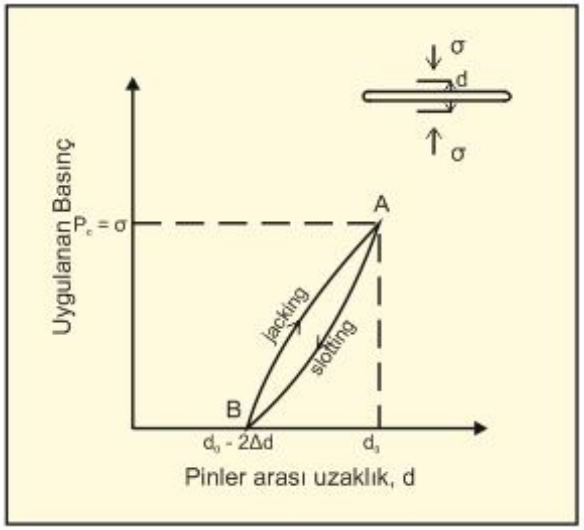
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{\theta 1} \\ \sigma_{\theta 2} \\ \sigma_{\theta 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\cos 2\theta_1, & 1+\cos 2\theta_1, & -4\sin 2\theta_1 \\ 1-\cos 2\theta_2, & 1+\cos 2\theta_2, & -4\sin 2\theta_2 \\ 1-\cos 2\theta_3, & 1+\cos 2\theta_3, & -4\sin 2\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xo} \\ \sigma_{yo} \\ \tau_{xyo} \end{bmatrix}$$

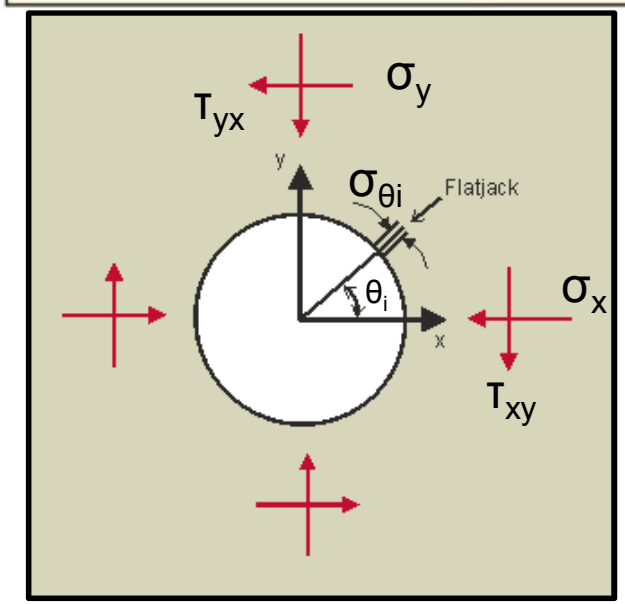
Amadei & Stephansson (1997)





Hudson & Harrison, 1997





Bölüm 8

Kaya Mekaniğinin Bazı Uygulama Alanları

Her kaya mühendisliği projesi birbirinden farklıdır. Ancak, projeyi oluşturan tüm tasarımlar ve yapım faaliyetleri kaya mekaniği prensipleri ile ilişkilidir.

Bu bölümde, doğal ve yapay kaya şevlerinde olası duraysızlık modelleri ve bunların analiz edilmesi için yararlanılan yöntemler ile tünel uygulamalarında ikincil/tetiklenmiş gerilmelerin analizi hakkında ve taşıma gücü hesabı ile ilgili temel düzeyde bilgiler verilecektir. Daha ayrıntılı bilgi, ders kapsamında önerilen kaynaklarda bulunabilir.

8.1. KAYA ŞEV DURAYLILIĞI

TEMEL TANIMLAR:

Şev: Düzenli ya da düzensiz bir geometriye sahip olan dik ya da eğimli yüzey

Duraylılık (Stabilite): Herhangi bir cismin yerini ve konumunu koruyabilmesi koşulu

Yenilme: Duraysızlık durumu

Kaya Şev Duraysızlığı: Şevi (yamacı) oluşturan kaya malzemesi ya da kütlesinin, mevcut süreksizlik düzlemleri boyunca ya da dayanımın en düşük olduğu bir yüzey boyunca, yenilme gerçekleşmesi sonucu, eğim aşağı doğru hareket etmesi.

Doğal yamaçlar
(Düzensiz geometri)

Mühendislik Şevleri (Düzenli geometri)

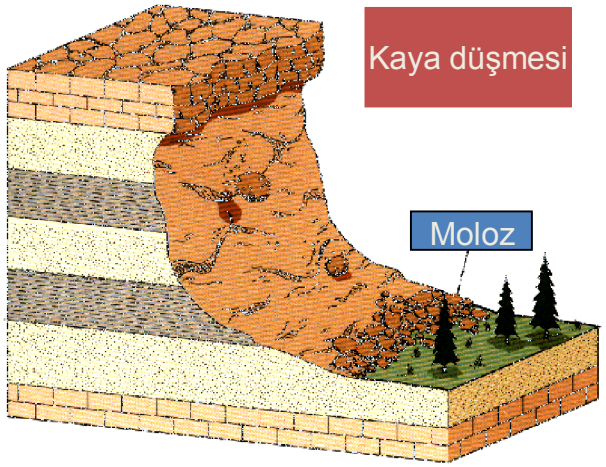
Açık İşletme Şevi

8.1.1. ŞEV DURAYSIZLIĞI TÜRLERİ

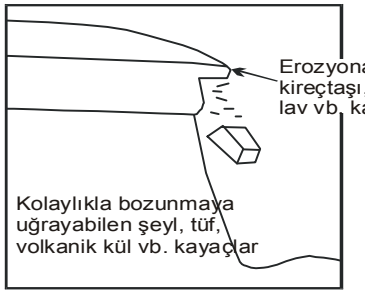
Zemin (toprak) ve Kaya Şev Duraysızlıklarının (Heyelanların) Sınıflandırılması (Varnes, 1978)

HAREKET TÜRÜ		MALZEME TÜRÜ		
		KAYA	ZEMİN	
			İri taneli	*İnce taneli*
Düşme		Kaya düşmesi	Moloz düşmesi	Toprak düşmesi
Devrilme		Kaya devrilmesi	Moloz devrilmesi	Toprak devrilmesi
Kayma	Dönel	Kaya kayması	Moloz kayması	Toprak kayması
	Ötelenmeli	Kaya kayması	Moloz kayması	Toprak kayması
Yanal Yayılma		Kaya yayılması	Moloz yayılması	Toprak yayılması
Akma		Kaya akması	Moloz akması	Toprak akması
Karmaşık kayma		İki veya üç duraysızlık türünün birbirini izlemesi		

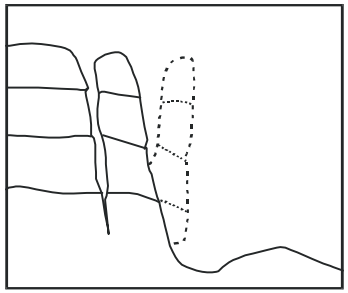
1. KAYA DÜŞMESİ: Dik bir şevden ayrılan herhangi bir boyuttaki kütlenin çok düşük makaslama yerdeğiştirmesiyle, ya da herhangi bir makaslama yerdeğiştirmesi olmaksızın yerçekimi etkisiyle hareket etmesi.

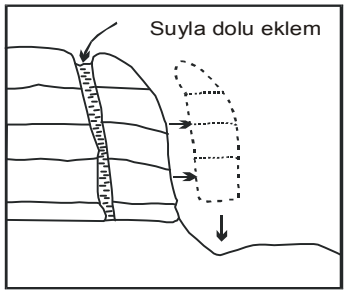


Olası kaya düşmesi mekanizmaları



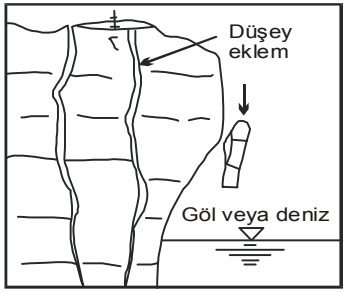
(a) Farklı bozunma


(b) Eklemli homojen kayada eklemler arasında suyun donması

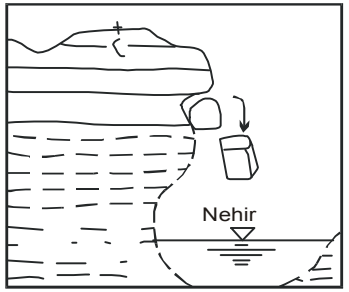


(c) Eklemli homojen kayaç. Gevşemiş blok üzerinde hidrostatik basınç etkisi

(d) Homojen eklemli kayaç. Aşırı sökülme veya patlatmaya bağlı kırıklar tarafından gevşetilmiş veya desteksiz kalmış bloklar



(e) Kolaylıkla aşınabilen bir kayacın üzerinde yer alan homojen eklemli kayaç veya dirençli kayaç (dalga etkisi altındaki kayalık)



(f) Kolaylıkla aşınabilen bir kayacın üzerinde yer alan homojen eklemli

aşındırma etkisi altındaki kayalık)

Broms (1975)'ten

2. DEVRİLME: Bir nokta etrafında dönerek hareket etme

✓ Devrilmeler oldukça dik eğime ve yüksek devamlılığa sahip süreksizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinde meydana gelir.

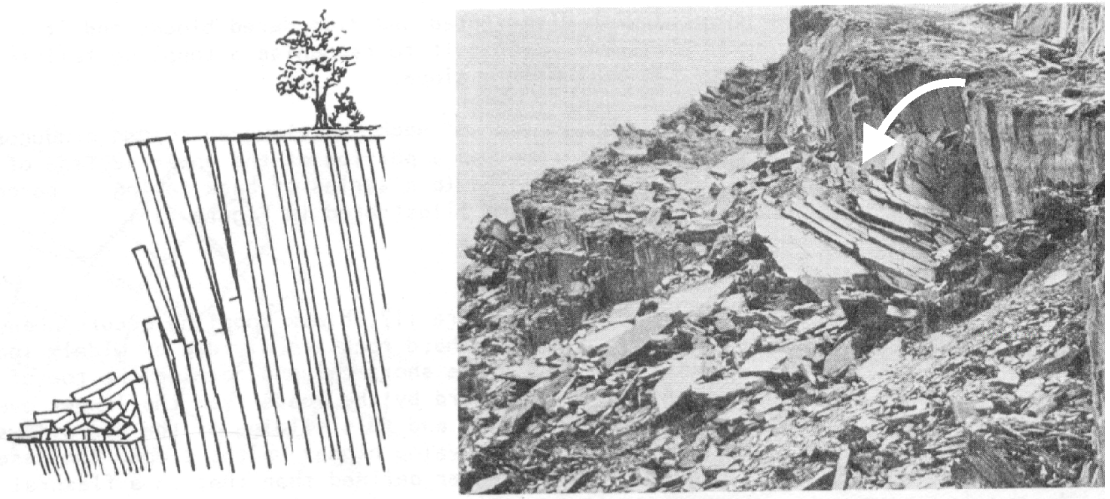
✓Bu duraysızlık herhangi bir çökme meydana gelmeden gerçekleş**ir.**

Devrilme Türleri

(a) Bükülme devrilmesi: Yarı sürekli kaya kolonları üst taraflarından bir yüklemeye/itkiye maruz kaldıklarında veya bu ağırlık kolonun tabanı dışına düştüğünde, bloğun öne doğru bükülmesine ve kırılmasına yol açar.

Mekanizma: Topuk aşınması, kayma, alttan oyulma

Her kolonun dışa doğru hareketi, şevin üst kesiminin orijinal konumunu değiştirir.

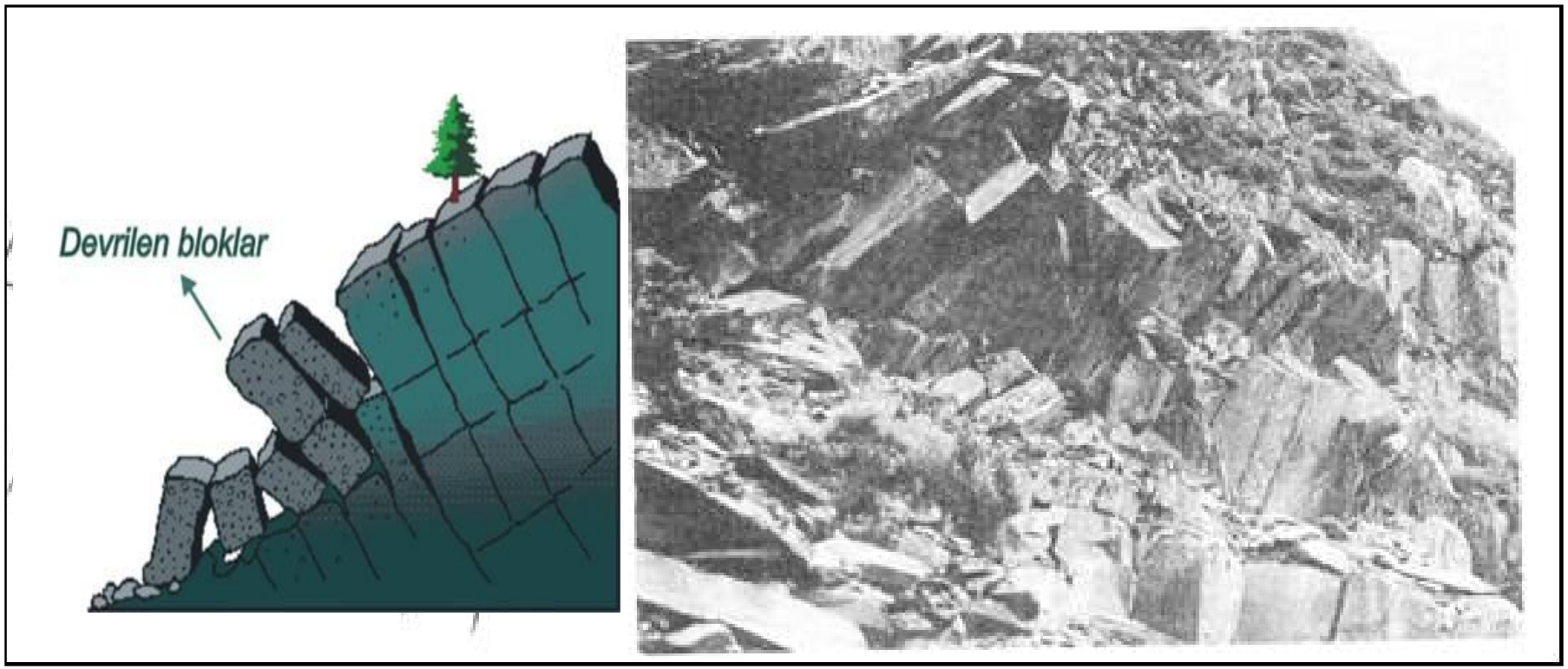


Hoek ve Bray (1977)

(b) Blok Tipi Devrilme:

Bu tür devrilme münferit kaya kolonlarının ikincil eklemler tarafından bölünmesiyle meydana gelir.

Topuk bölgesindeki kısa kolonlar daha uzun kolonlardan aktarılan itki etkisine maruz kalırlar ve kayma hareketi şevin topuğunda gelişir. Daha sonra topuğun gerisindeki kolonlar devrilmeye maruz kalırlar.



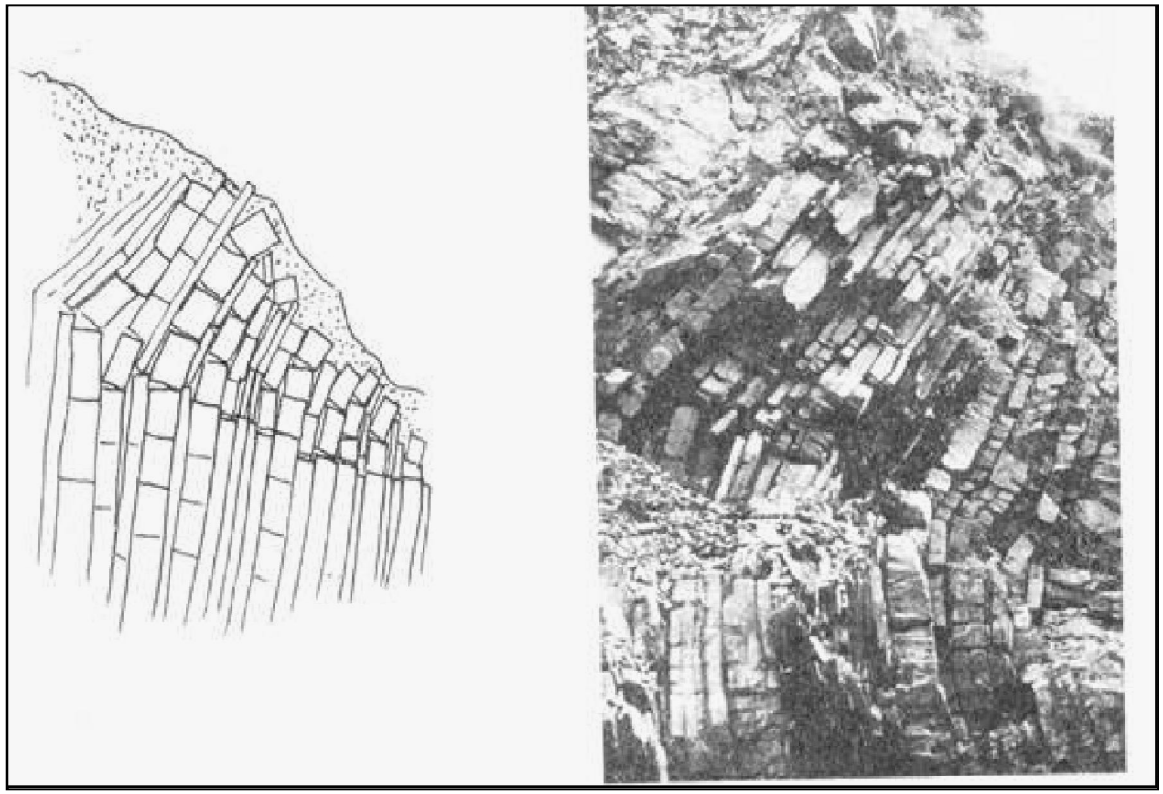
Hoek ve Bray (1977)

(c) Blok-Bükülme Devrilmesi:

Bu tür devrilme, çok sayıda çapraz eklemle bölünmüş yarı-sürekli uzun kolonlar boyunca meydana gelen bükülme devrilmesidir.

Kolonların devrilmesi, çapraz eklemlerde biriken yerdeğiştirmenin bir sonucudur. Çok sayıda küçük hareketler.

.



Hoek ve Bray (1977)

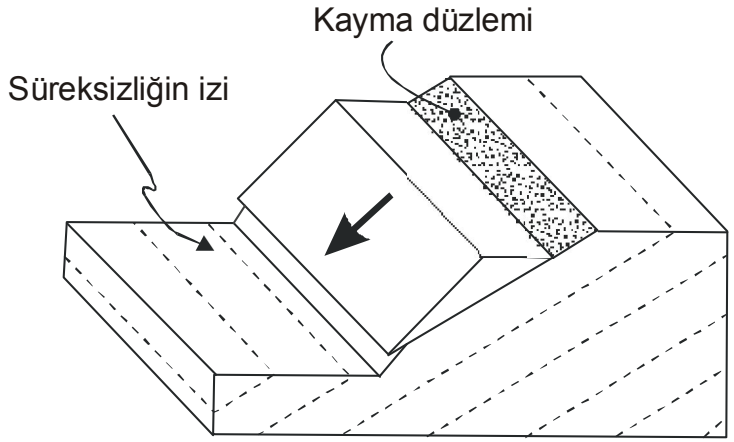
3. KAYMA

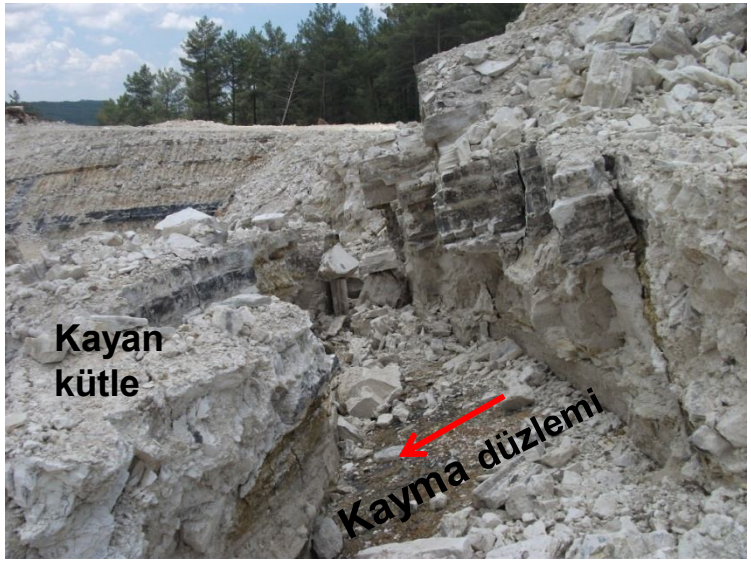
Belirgin bir yüzey veya yüzeyler boyunca makaslama birim deformasyonu ve yerdeğiştirme nedeniyle gelişen duraysızlık türü. Yerdeğiştiren kütle orijinal yeryüzünün altında bir ayrılma yüzeyi oluşturacak şekilde kayar.

a) Ötelenmeli Kaymalar

Bu tür kaymalar, düzlemsel veya çok az ondülasyonlu yüzeyler üzerinde gerçekleşen makaslama yenilmeleri sonucu meydana gelirler.

Düzlemsel kayma

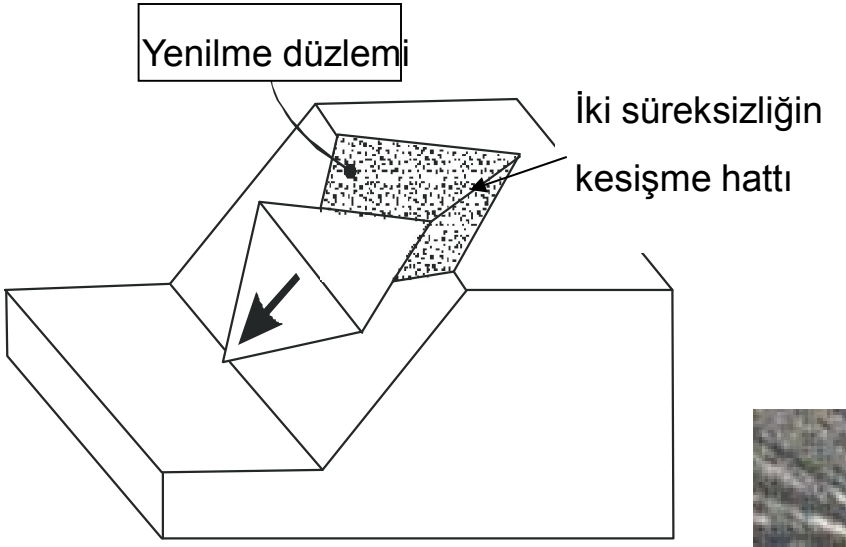


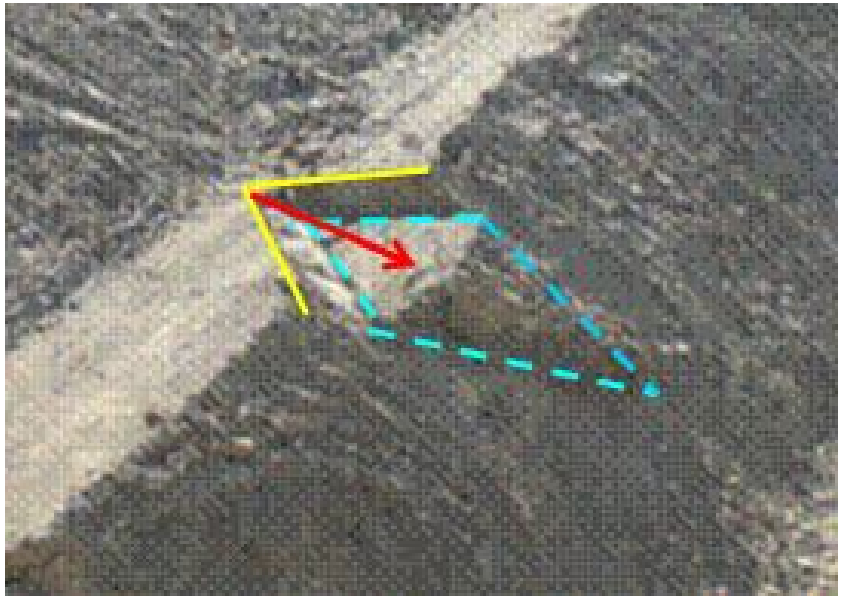


- Kayan kütle çok aşırı derecede deforme olmaz.
- Yapısal denetimli duraysızlık: Tabakalanma, eklem, fay, makaslama düzlemi, dokanak vb. boyunca gelişebilir.

Kama tipi kayma

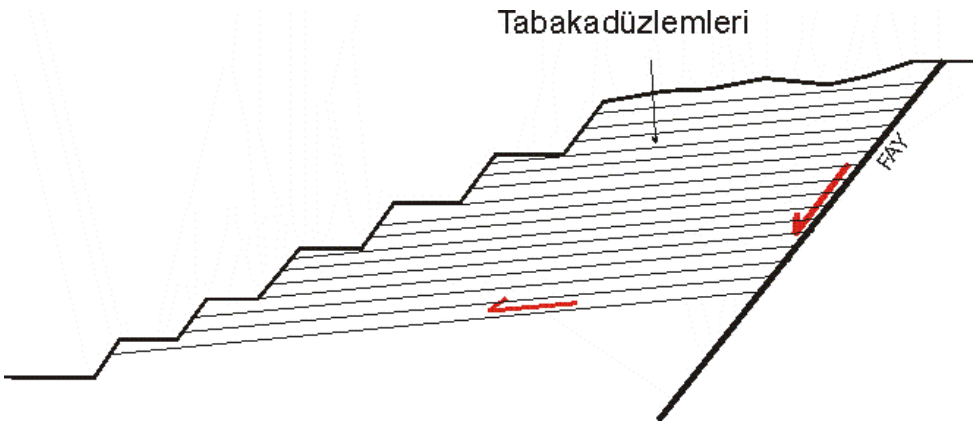
Birbirini kesen iki süreksizliğin oluşturduğu tetrahedral kamanın kesişme hattı boyunca hareket etmesi. Kesişme hattının şev aynasını kesmesi gerekir.





(userweb.port.ac.uk/~gilesd/images/A55/P1010069.JPG)

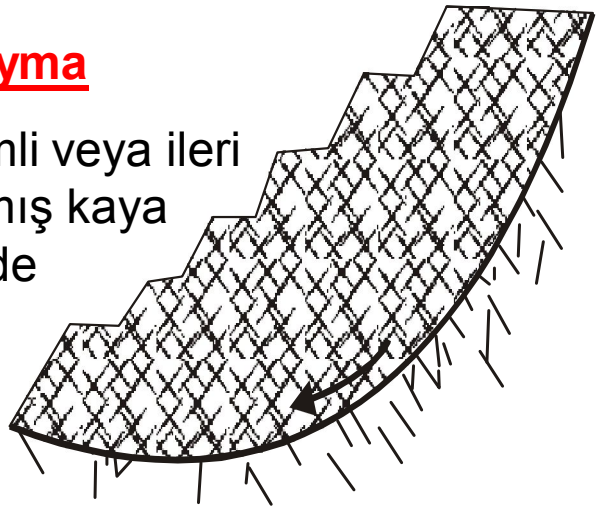
İki ya da çok yüzeyli kayma

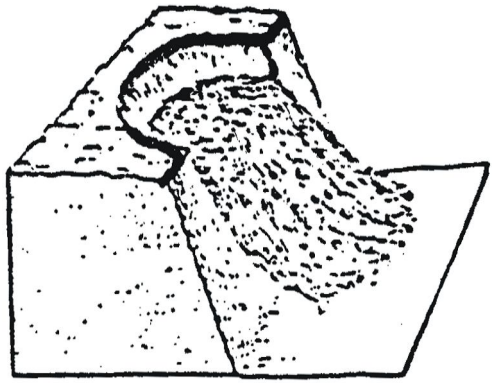


b) Dönel Kaymalar

Dairesel kayma

İleri derecede eklemli veya ileri derecede ayrışmış kaya kütlelerinde





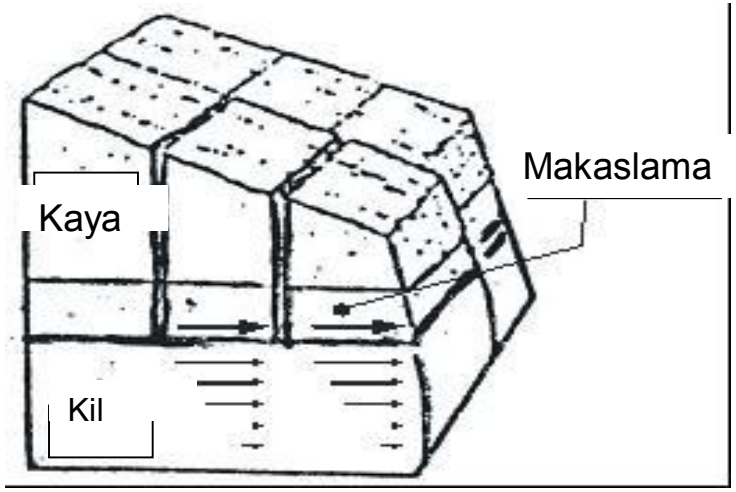
4. YANAL YAYILMA

Bu duraysızlık türünde, makaslama ve çekme çatlaklarının eşliğinde gelişen kütlenin yanal yöndeki hareketi başlıca duraysızlık mekanizmasını oluşturur.

Yanal kaya yayılması

- Şev, yumuşak bir malzemenin üzerinde yer alan sıkı bir malzemeden oluşur.

- Bu tür yayılma, örneğin kil gibi plastik özellikteki bir zemin üzerindeki bloklu kaya kütlesinin dokanak yüzeyi boyunca gelişen makaslama yenilmesi sonucu yavaş bir hızla kazı boşluğuna doğru hareketi sonucu gelişir.



5. AKMA

Kaya akması

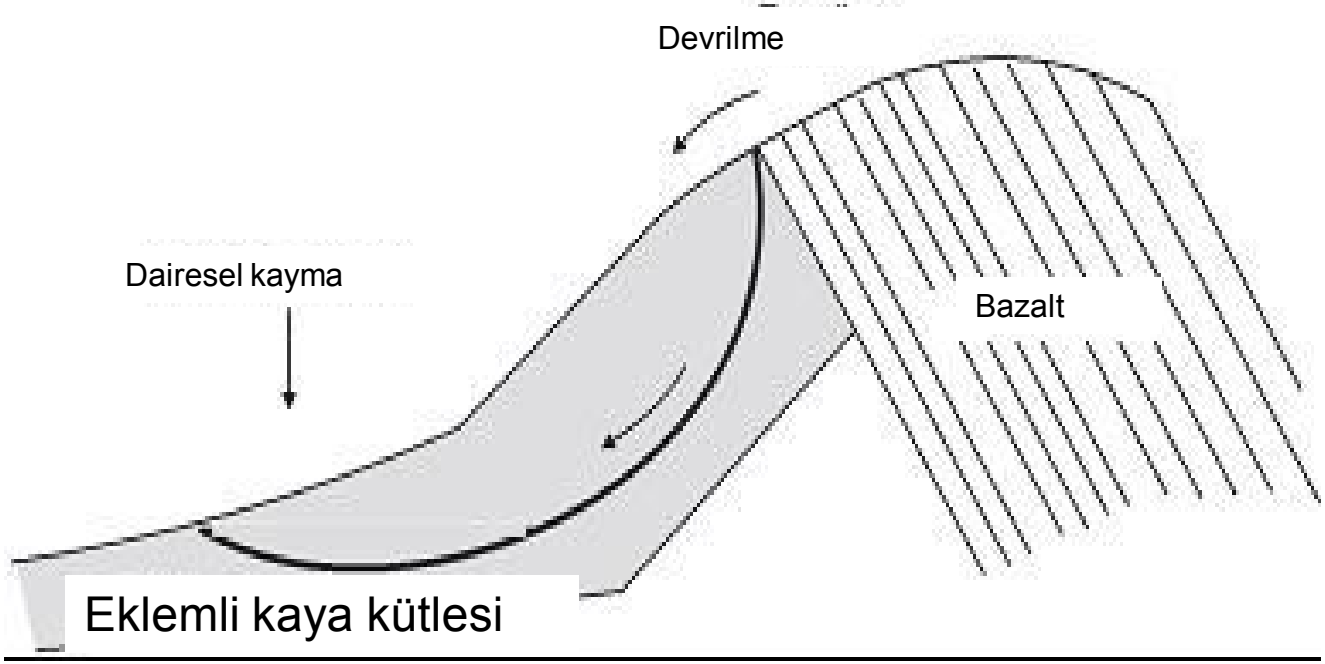
- Bu hareket, geniş veya küçük kırıklar ve hatta mikro kırıklar arasında gelişen deformasyonlarla oluşur.
- Hareket genellikle yavaştır, bazen çok yavaş olup gravite hareketi adını alır.
- Akma sonrası kıvrımlanma, bükülme ve kabarma gibi yüzey şekilleri oluşur.

6. KARMAŞIK DURAYSIZLIKLAR

Birden fazla sayıda ve değişik türde şev duraysızlıklarının birbirlerini izleyerek meydana gelmeleri.

Bazı örnekler:

- Dairesel kayma ve devrilme
- Kayma ve kaya düşmesi
- Kayma ve devrilme, vb.



8.1.2. ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİ

Kaya şev yapılarının (Yol yarması, açık ocak işletme şevleri, vb.) güvenilir ve en ekonomik biçimde tasarımlanması için şev duraylılığı analizlerinden yararlanılması gerekmektedir.

Başlıca şev duraylılığı analiz yöntemleri:

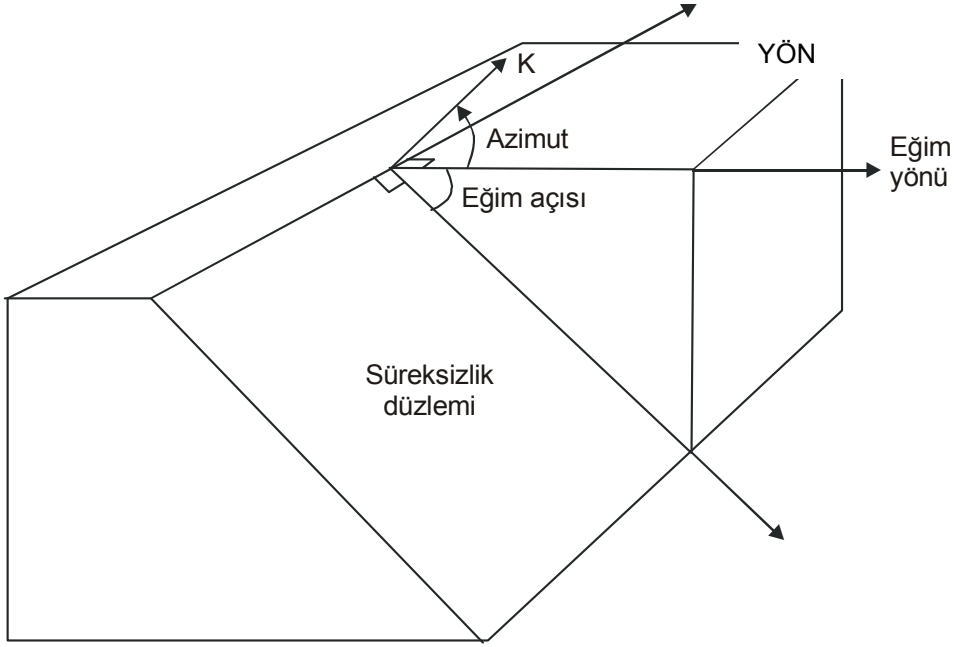
- Kinematik analiz yöntemi
- Limit denge yöntemleri
- Sayısal çözümleme yöntemleri

Ders kapsamında kinematik analiz yöntemine değinilecek olup, limit denge yöntemi ile ilgili de giriş niteliğinde bilgi verilecektir.

8.1.2.1. KİNEMATİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Doğal yaz da kazı sonrası oluşturulan bir şevde süreksizlik denetimli şev duraysızlıklarının beklenip beklenmeyeceğini ayırt etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, ön değerlendirme amaçlıdır. Düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme türü duraysızlıkların analizi için yararlanılır. Analiz yöntemine geçmeden kullanılan terminoloji ve stereonetler hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

Süreksizlik ve çizgiselliklerin yönelimlerinde kullanılan terminoloji:

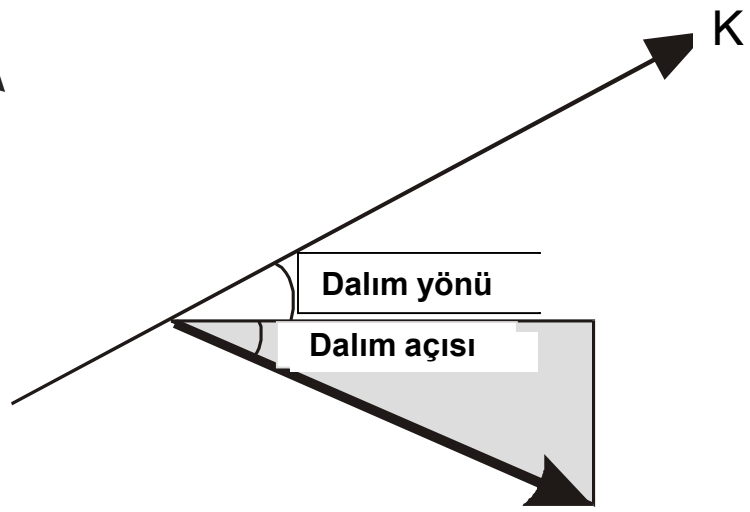


Düzlemsel elemanlar için:

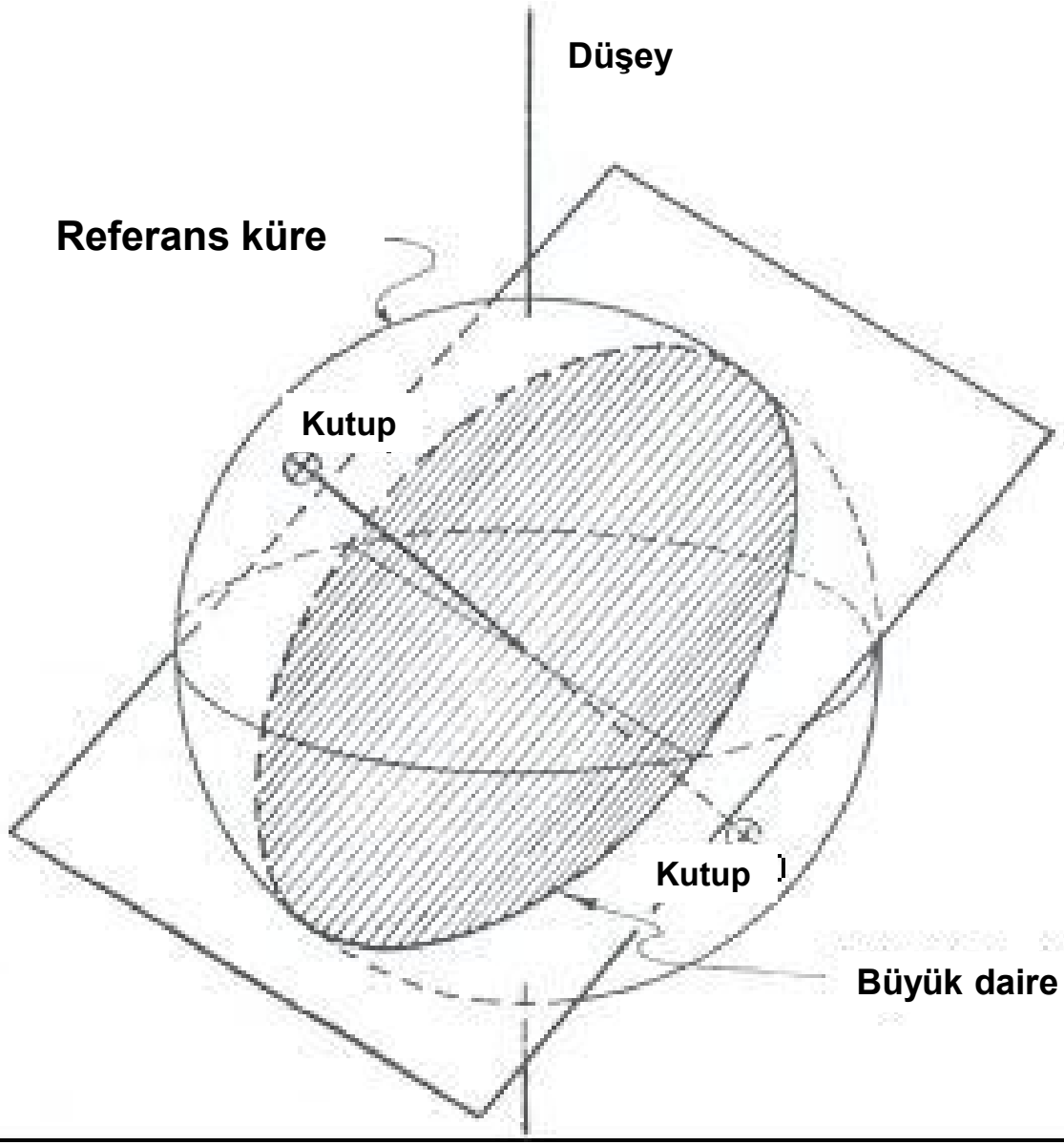
1. **Eğim**
2. **Doğrultu VEYA Eğim Yönü**

Çizgisel elamanlar için:

1. **Dalım açısı**
2. **Dalım yönü**

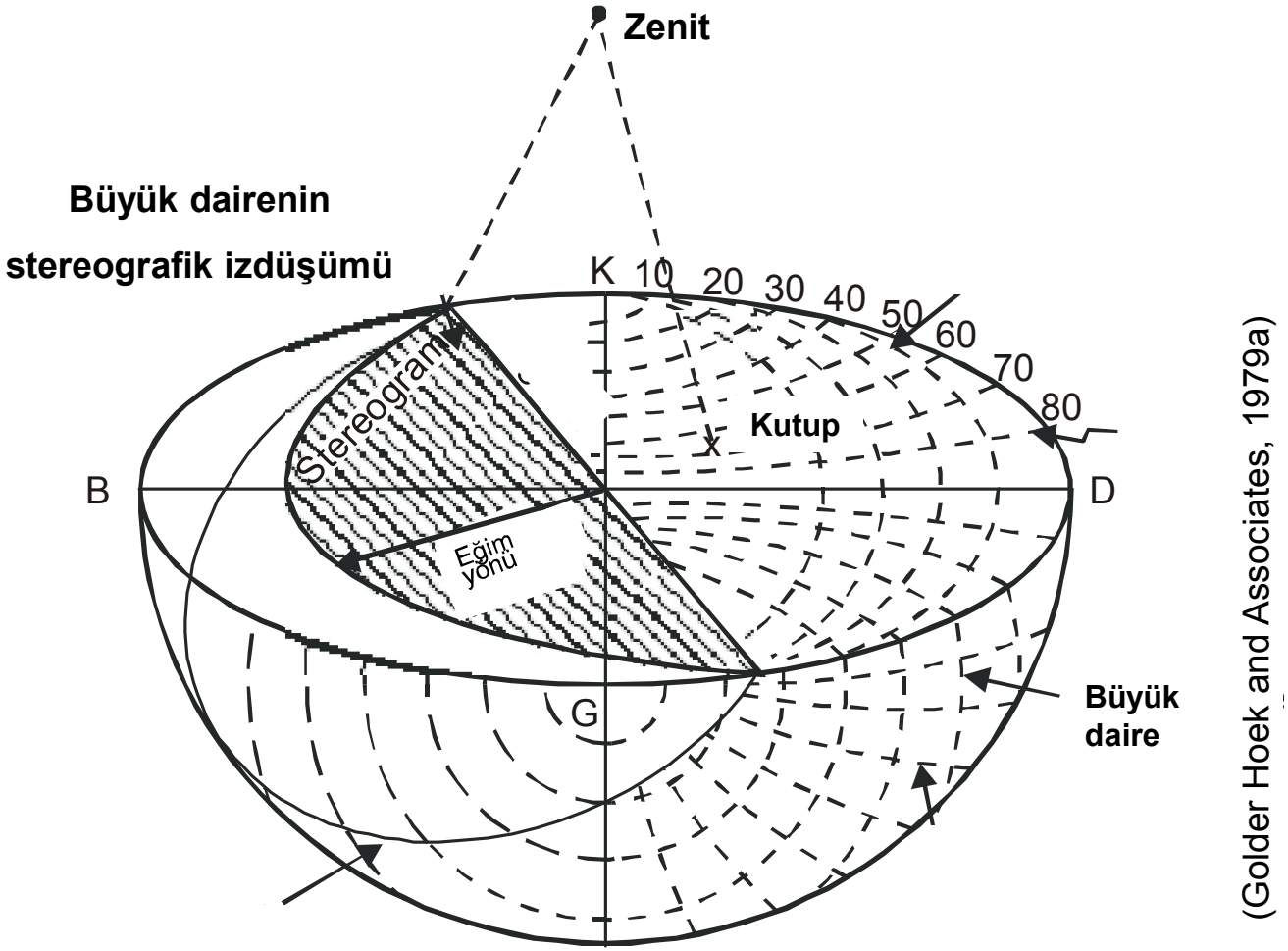


Bir düzlemi tanımlayan büyük daire ve kutup noktası



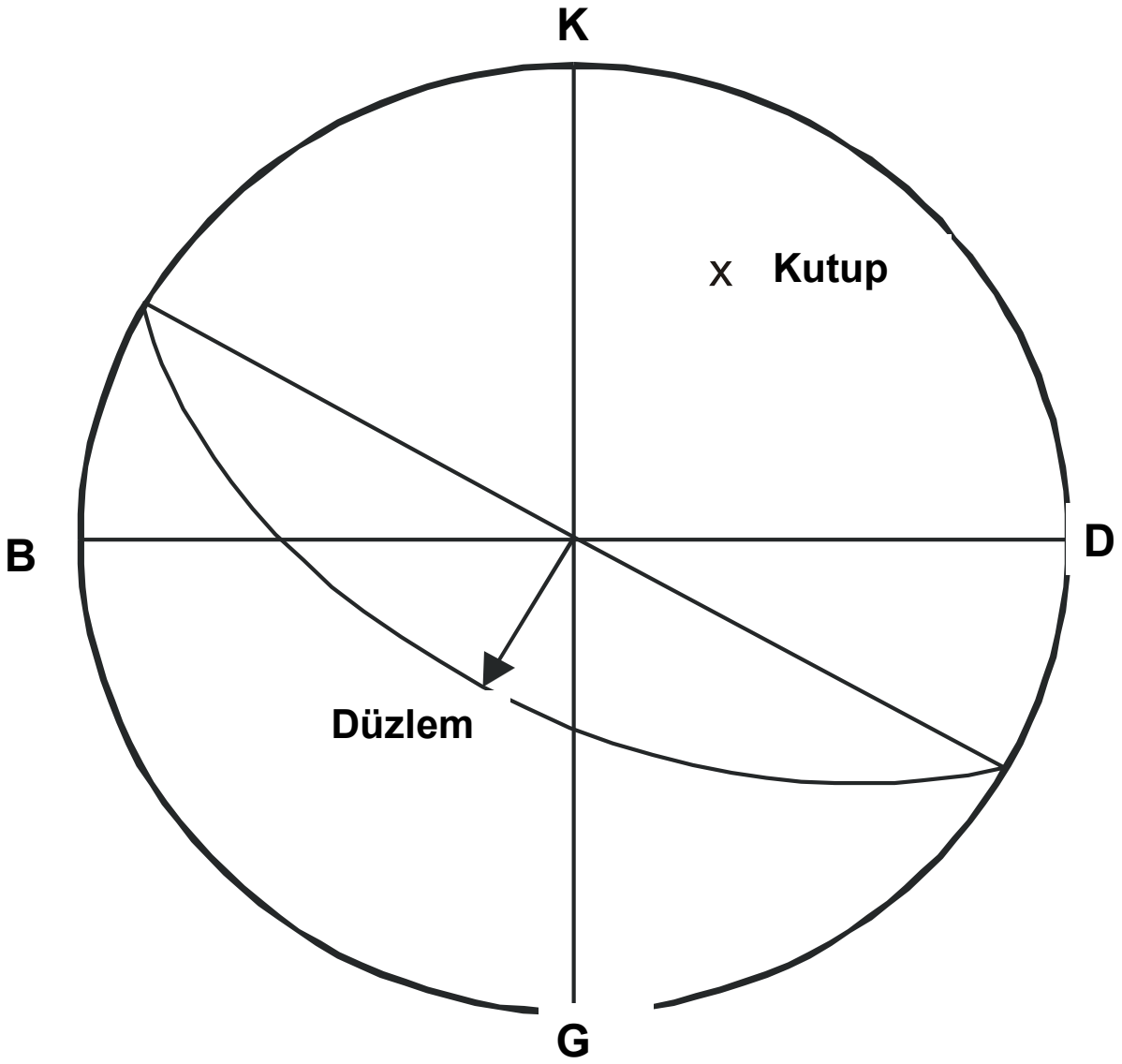
(Ulusay, 2010)

Büyük daire ve kutup noktasının alt yarı kürede yatay düzlem üzerine izdüşümü

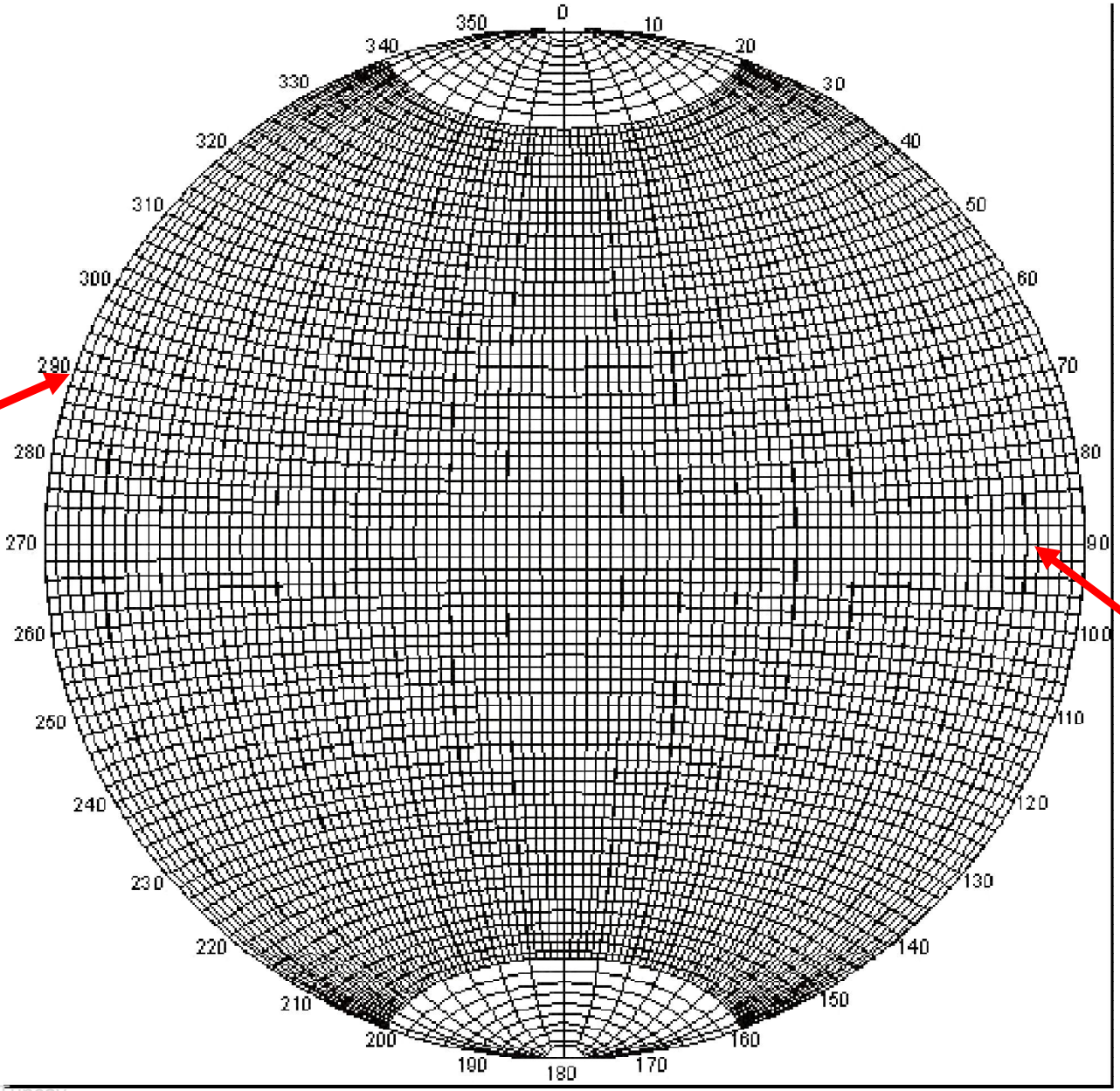


(Golder Hoek and Associates, 1979a)

Süreksizlik düzleminin stereografik izdüşümü



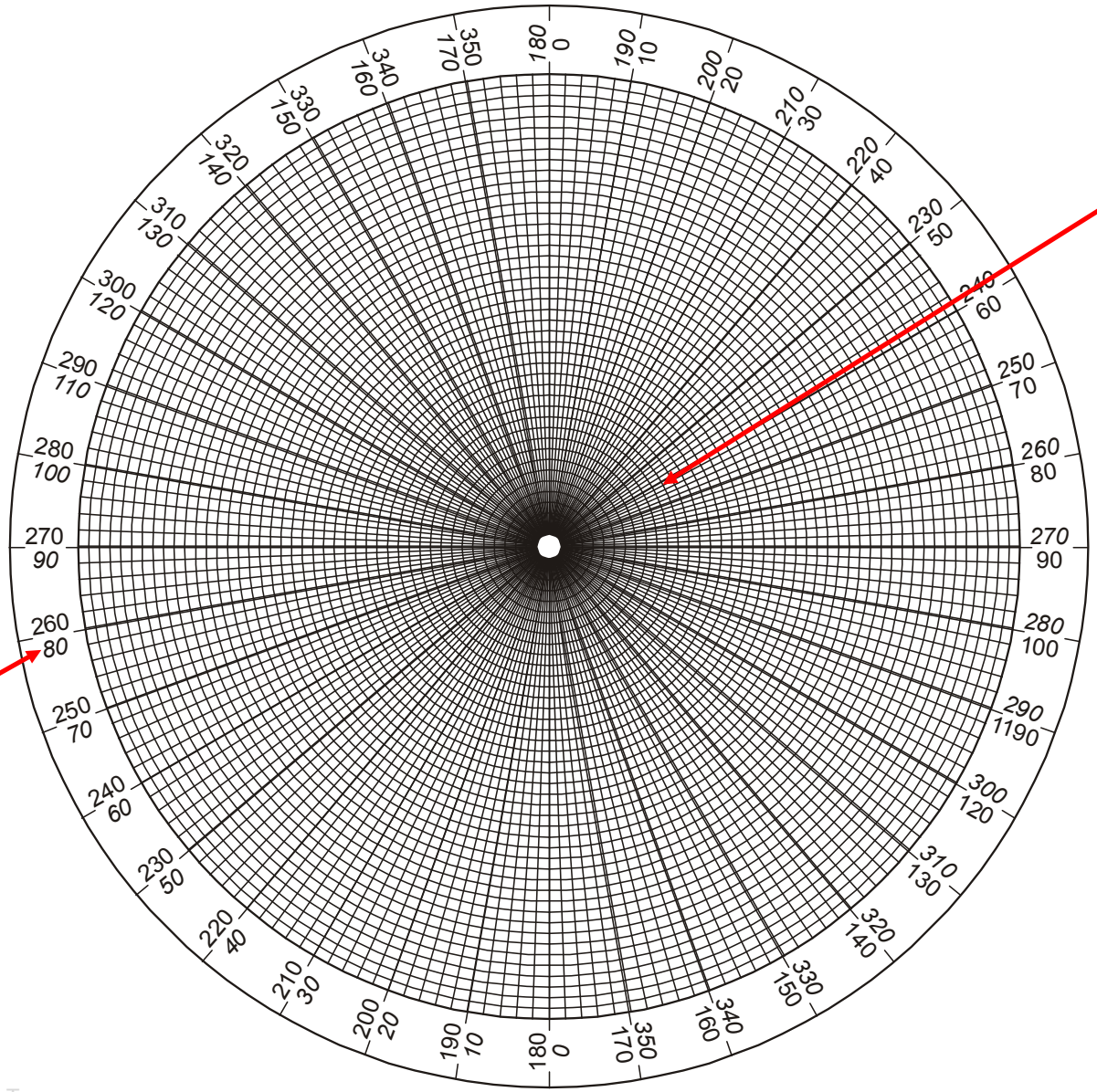
Eş alan stereoneti



Eğim yönü

Eğim

Kutup noktalarının işlenmesi için kullanılan kutupsal net



Eğim

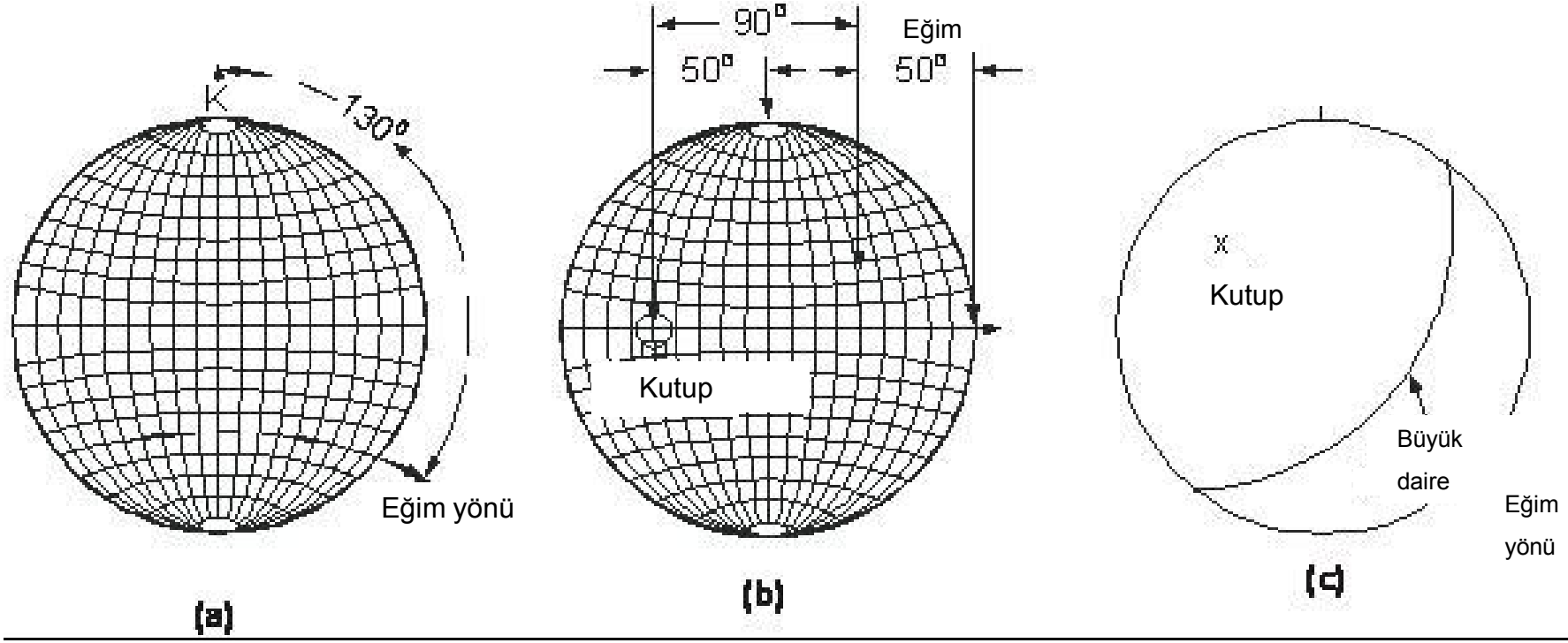
(merkezden

dışa doğru)

Eğim yönü

(*İTALİK*)

Yönelimi (50^0/130) olan bir süreksizliğin eş alan netinde gösterimi



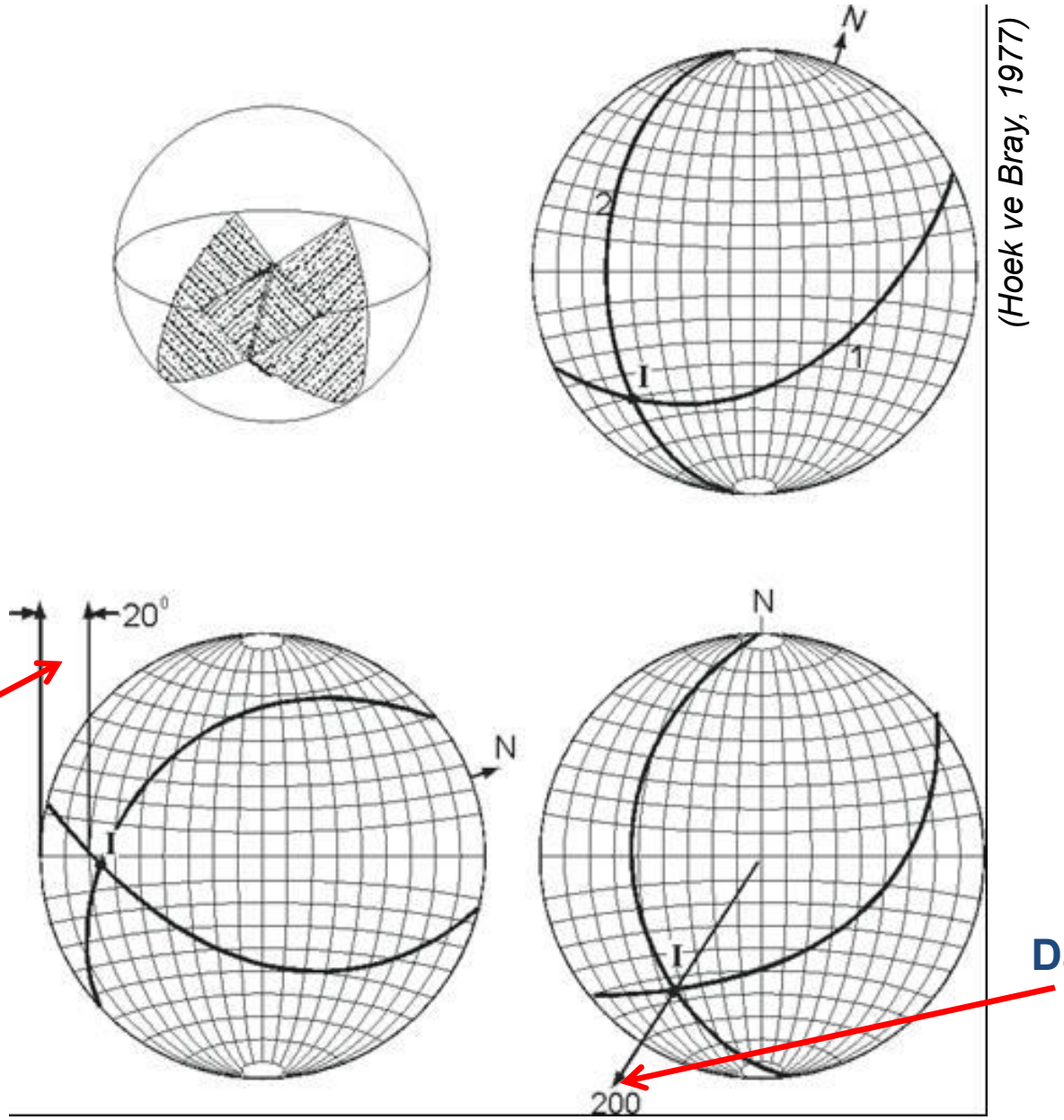
(Hoek ve Bray, 1977)

İki süreksizliğin kesişme notasının eş alan netinde belirlenmesi

ÖRNEK:

Eklem 1: 50°/130

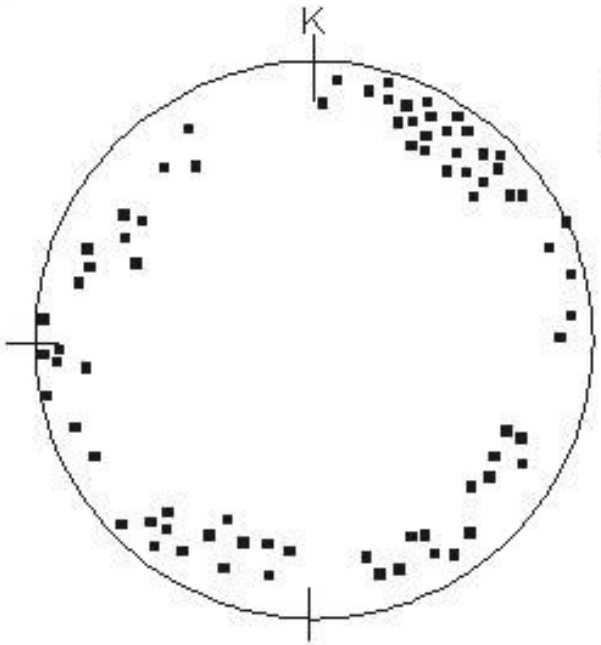
Eklem 2: 30°/250



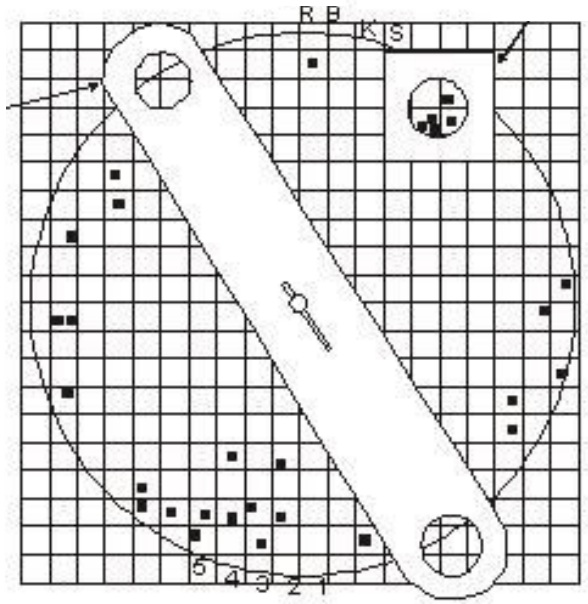
Dalım açısı

Dalım yönü

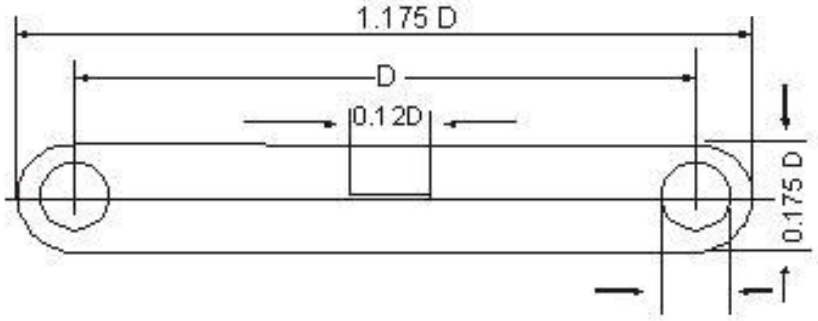
Kontur diyagramlarının hazırlanmasında kullanılan gereçler



Süreksizlik kutuplarının nette dağılımı

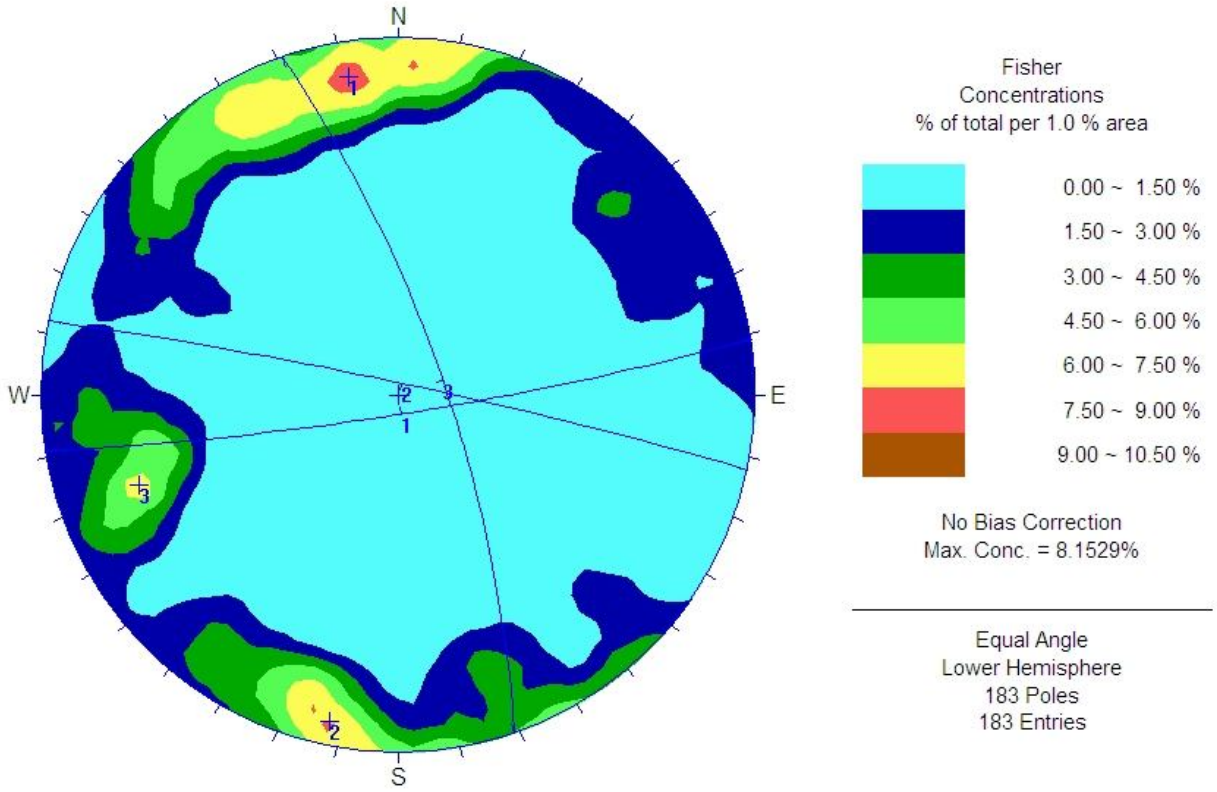


Kutupların sayılması

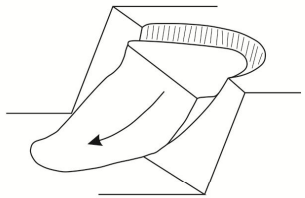


(Ulusay, 2010)

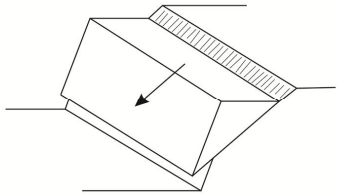
Kontur diyagramı ve ana süreksizlik takımları



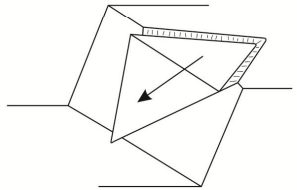
3 Ana Eklem takımı mevcut. Ortalama Yönelimleri: 1. Set: 82/175
2. Set: 85/015
3. Set: 78/072



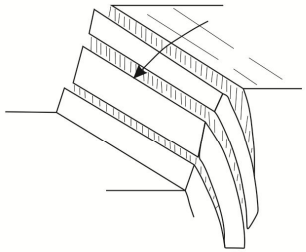
a) Yapısal özelliklerin görülmediği zeminde, artık kayada veya yoğun çatlaklı kayada dairesel kayma.



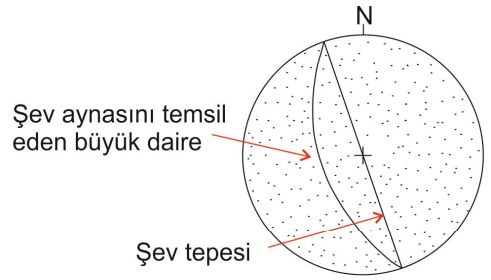
b) Arduvaz gibi belirgin yapısal düzene sahip kayada düzlemsel kayma.

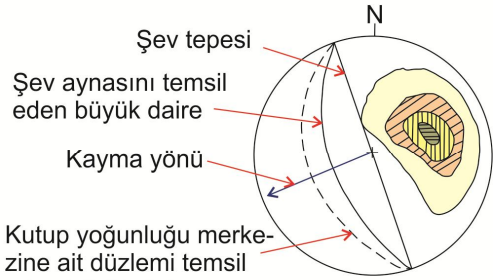


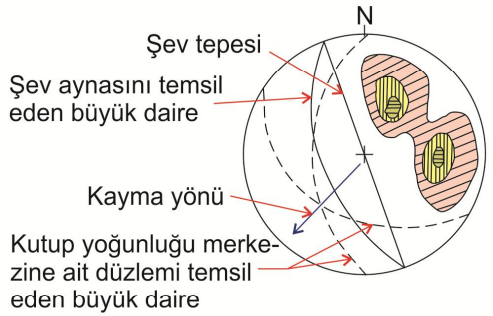
c) Kesişen iki süreksizlik üzerinde kama kayması.

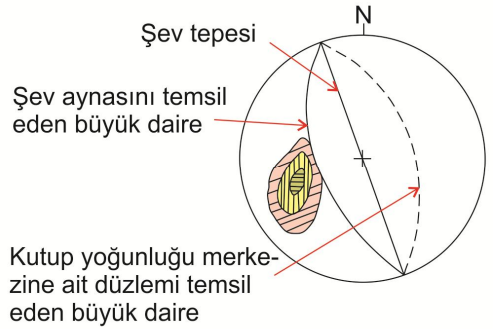


d) Yüksek eğimli süreksizliklerle ayrılarak kolonlu bir yapıya sahip olan sert kayada devrilme.



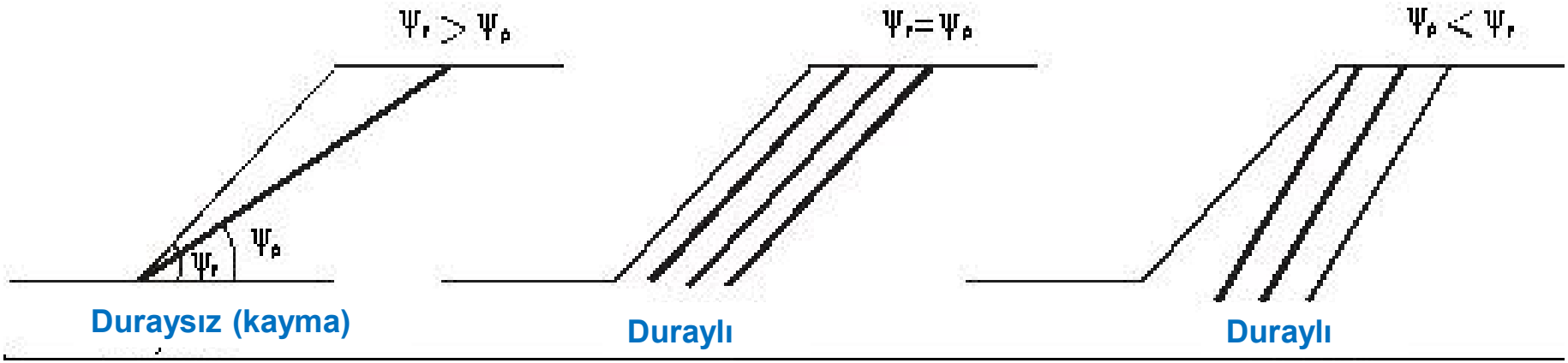


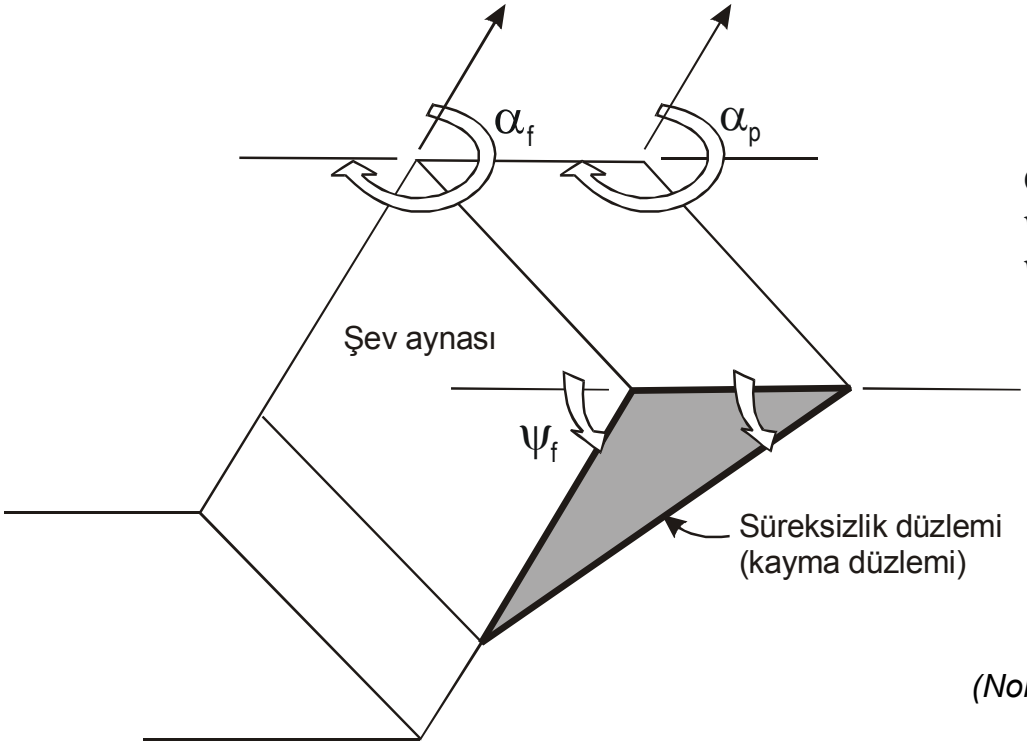




(Hoek ve Bray, 1981)

DÜZLEMSEL KAYMANIN KİNEMATİK ANALİZİ





α_f = Şevin eğim yönü

α_p = Süreksizliğin eğim yönü

ψ_f = Şevin eğim açısı

ψ_p = Süreksizliğin eğim açısı

ϕ = Süreksizliğin p düzleminin içsel sürtünme açısı

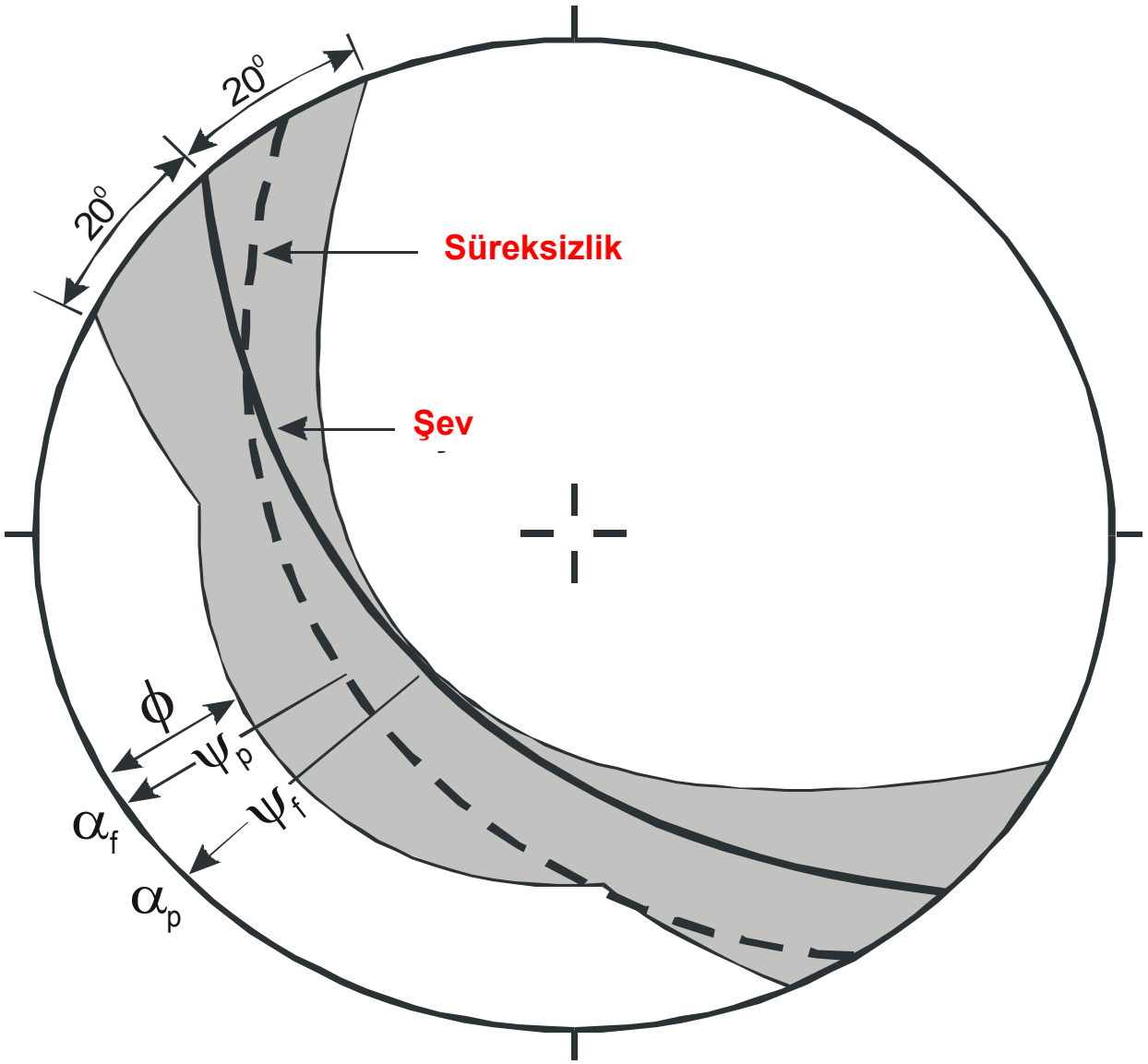
Düzlemsel kayma koşulu:

(1) $\psi_f > \psi_p > \phi$

(2) $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^0$

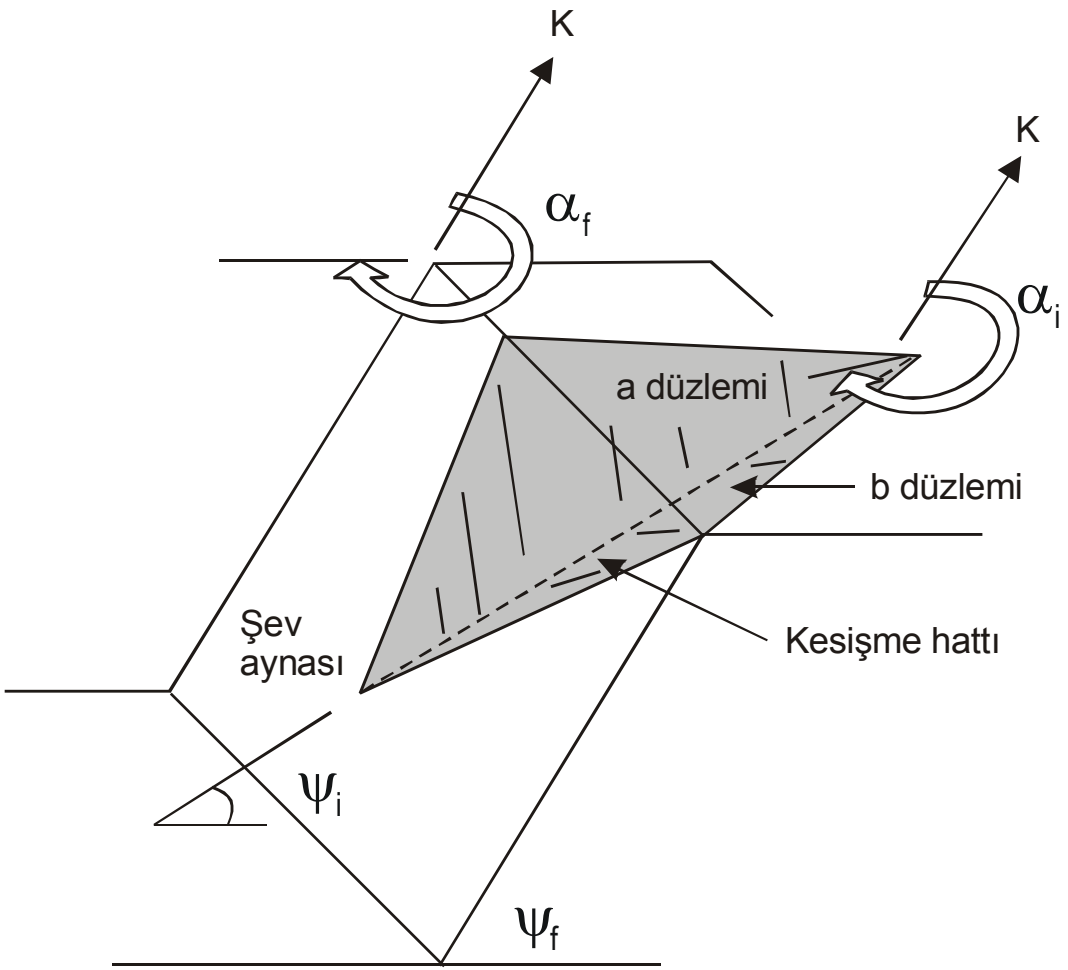
(Norrish ve Wyllie, 1996)

Düzlemsel kayma için kinematik analiz



(Norrish ve Wyllie, 1996)

KAMA TİPİ KAYMANIN KİNEMATİK ANALİZİ



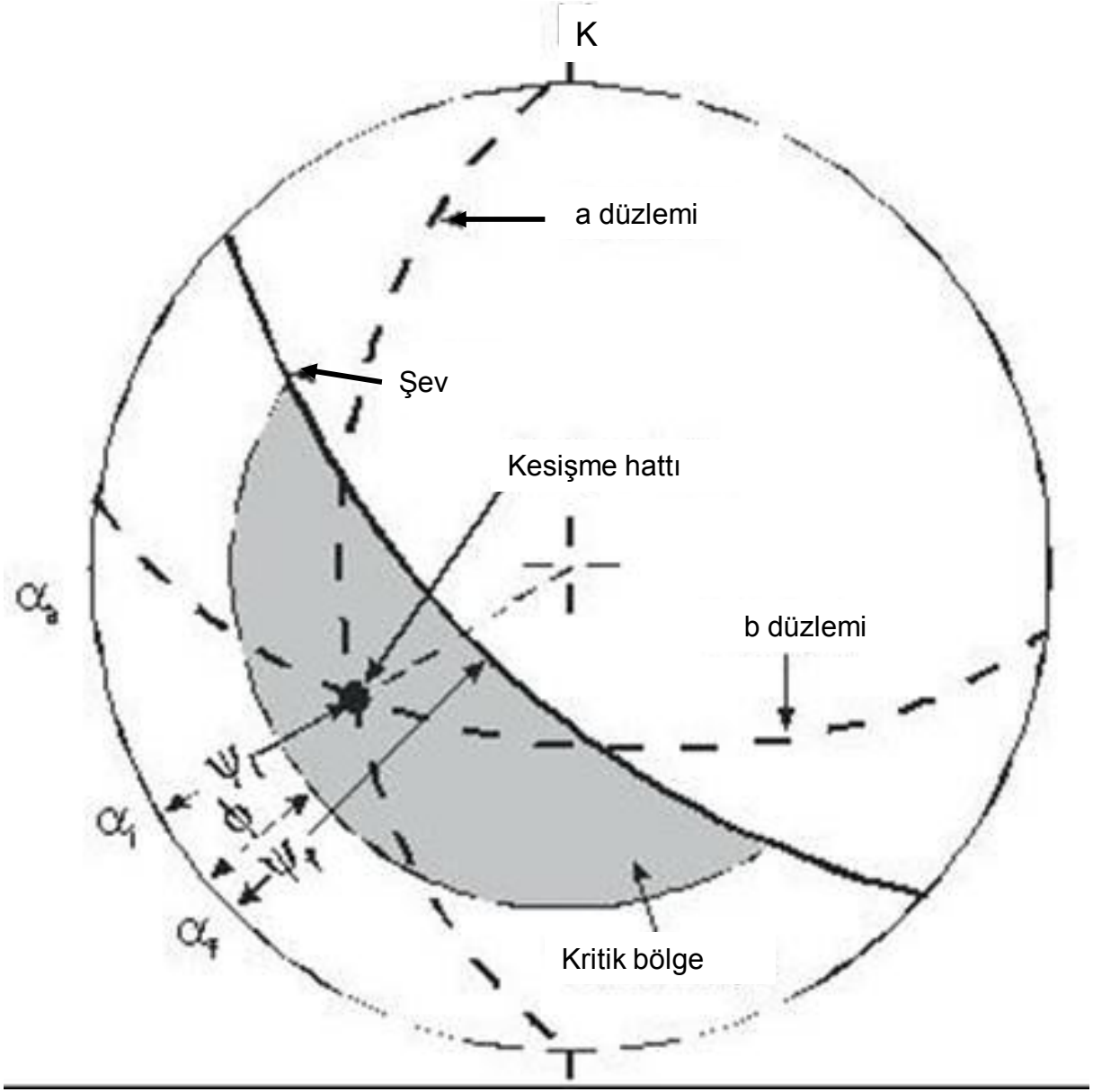
α_f = Şevin eğim yönü
α_a = a düzleminin eğim yönü
α_b = b düzleminin eğim yönü
ψ_f = Şevin eğim açısı
ψ_a = a düzleminin eğim açısı
ψ_b = b düzleminin eğim açısı
ϕ = İçsel sürtünme açısı
ψ_i = Kesişme hattının dalımı
α_i = Kesişme hattının azimutu

Kama tipi kayma koşulu

$$\psi_f > \psi_i > \phi$$

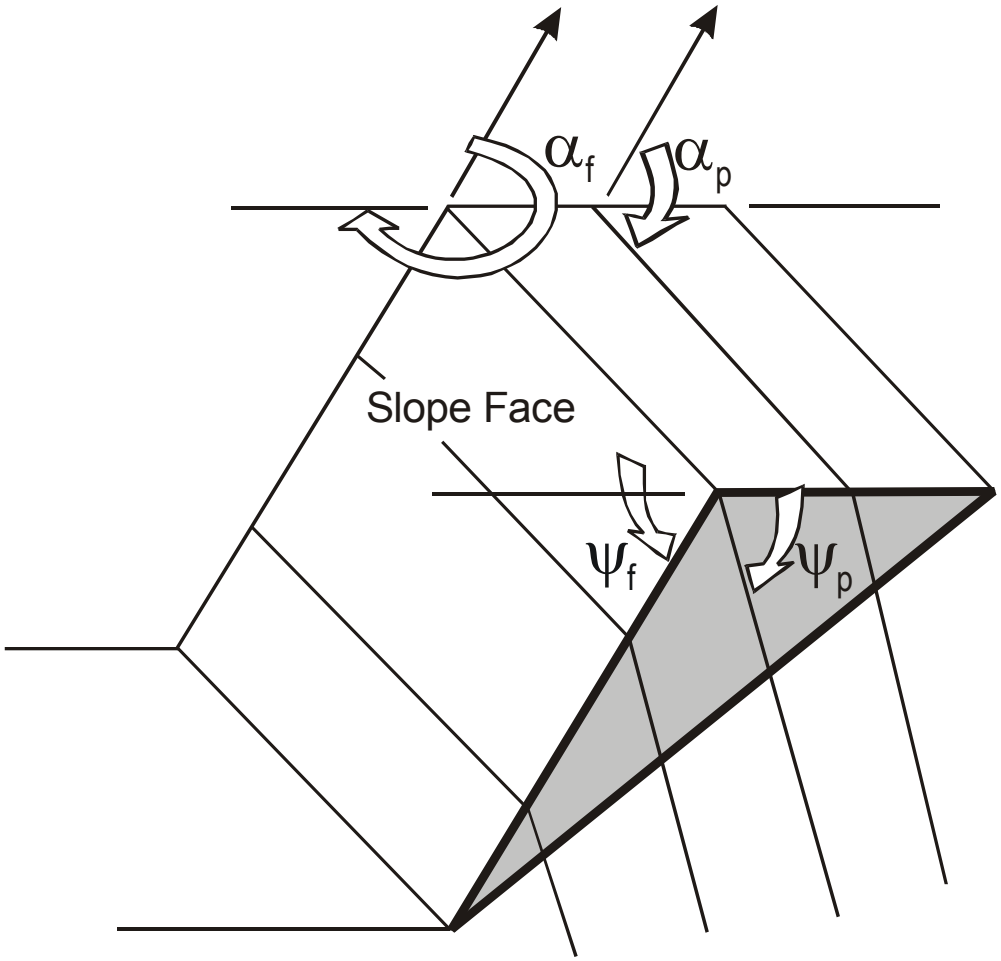
(Norrish ve Wyllie, 1996)

Kama tipi kaymanın stereonette gösterimi



(Norrish ve Wyllie, 1996)

DEVRİLMENİN KİNEMATİK ANALİZİ



α_f = şevin eğim yönü
α_p = süreksizliğin eğim açısı
ψ_f = şevin eğim açısı
ψ_p = süreksizliğin eğim açısı
ϕ = süreksizliğin sürtünme açısı

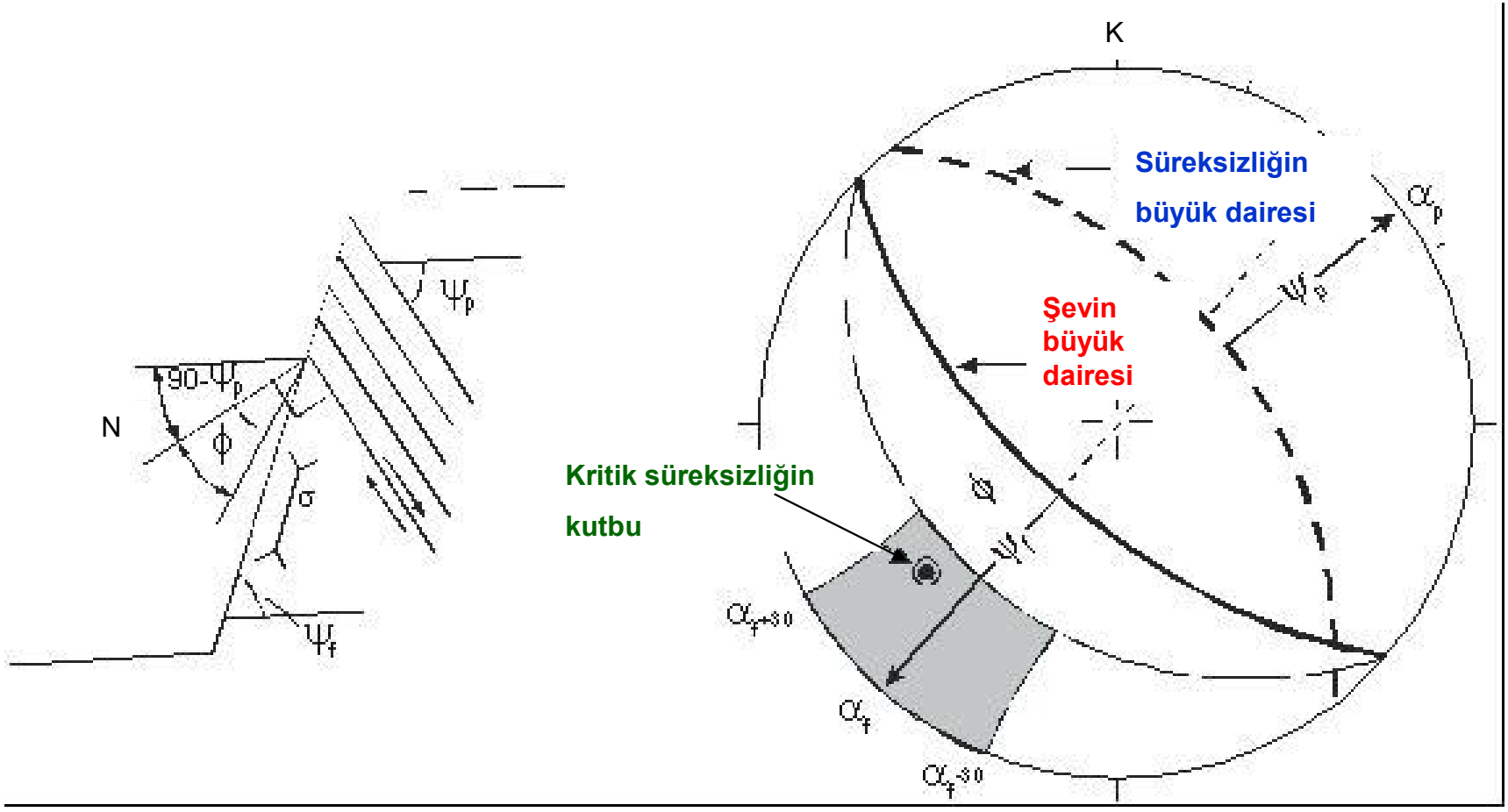
Devrilme koşulu

(1) $(90 - \psi_p) \leq \psi_f - \phi$

(2) $\alpha_p = (\alpha_f \text{ m } 180^0) \text{ m } 30^0$

(Norrish ve Wyllie, 1996)

Devrilmenin stereonette görünümü

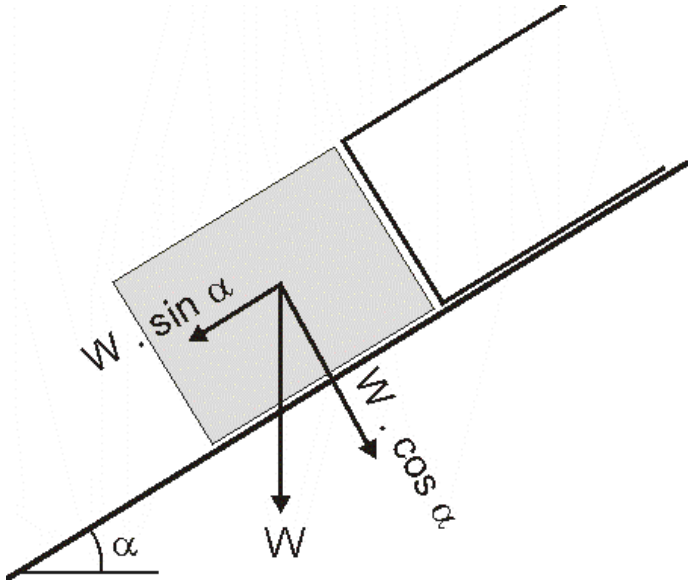


(Norrish ve Wyllie, 1996)

8.1.2.2. LİMİT DENGE ANALİZİ

DÜZLEMSEL KAYMA

Şev duraysızlığının temel mekanizması:
Eğik düzlem üzerindeki blok yer çekimi etkisi altındadır . Ağırlığı ➔ W



W kuvvetinin bileşenleri:

Eğik düzleme paralel yönde: $W.\sin\alpha$

Eğik düzleme dik yönde: $W.\cos\alpha$

Bloğun tabanına etkiyen normal gerilme:

$\sigma=(W.\cos\alpha) / A$

(A: bloğun taban alanı)

Yenilme kriteri:

$\tau= c+\sigma_n.\tan\phi$

Kayma yüzeyinin makaslama dayanımı:

$$\tau = c + [(W.\cos\alpha)/A].\tan\phi$$

$$\text{Güvenlik katsayısı (GK)} = \frac{\text{Kaymaya karşı koyan kuvvetler}}{\text{Kaymaya neden olan kuvvetler}}$$

$$GK = \frac{c.A + [(W.\cos\alpha)].\tan\phi}{W.\sin\alpha}$$

Limit Denge Koşulu → GK=1 **GK<1 Duraysız** **GK>1 Duraylı**

NOT:

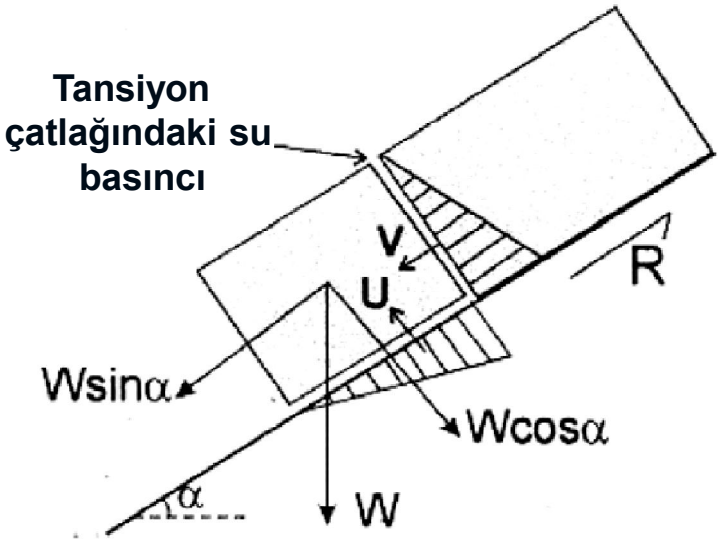
Güvenlik katsayısının (GK), gerek malzeme özelliklerinin gerekse gerilme ortamı, su durumu, depremsellik vb. için verilerin toplanması / belirlenmesi sırasındaki olası belirsizlikler nedeniyle ve yapının boyutu, önemi ve olası bir duraysızlık durumunda yaşanabilecek zarar ve risk durumuna bağlı olarak, 1'den büyük bir değer olması istenir. Şev duraylılığında güvenlik katsayısı (GK), bu hususlar dikkate alınarak 1.1 ile 1.5 arasında bir değer olarak seçilebilir.

Şev duraylılığı analizlerinde güvenlik katsayısı (GK), kaymaya karşı koyan kuvvetlerin kaymaya neden olan kuvvetlere oranı olarak tanımlanabilir. Ancak, tüm mühendislik yapıları için güvenlik katsayısının tanımı aynı değildir. Örneğin, yenilmeye neden olan gerilmenin çekilme türünde olması durumunda, malzemenin çekilme dayanımı önem kazanacaktır. Bu durumda güvenlik katsayısının, malzemeye etkiyen çekilme dayanımının çekilme gerilmesine oranı şeklinde tanımlanması gerekir. Bunun yanı sıra, örneğin taşıma gücü hesaplamalarında belirlenen taşıma gücü değeri, yapının önemine, can ve mal riskine bağlı olarak belirlenen sabit bir GK'ya bölünür.

Tansiyon çatlağında su bulunması durumunda:

Tansiyon çatlağındaki su basıncı (*u*) derinliğe bağlı olarak doğrusal olarak aratacaktır. Bu basıncın etkisiyle bloğa bir toplam su kuvveti (V) etki edecektir.

Su basıncı, tansiyon çatlağı ve bloğun tabanı arasındaki kesişme hattı boyunca gelişir ve su basıncı dağılımı bloğun tabanı boyunca meydana gelir. Suyun yukarı kaldırma kuvveti (U) normal gerilmeyi (σ) azaltır.



Bu durumda:

- Kaymaya neden olan kuvvet artar
- Kaymaya karşı olan sürtünme azalır.
- Hem "V", hem de "U" duraylılığın azalmasına neden olur (Geniş alanlarda etkiyerek çok büyük olabilirler)

Bu nedenle

- **Makaslama dayanımı**
- **Su basıncı**
- **Şev geometrisi (dolayısıyla W)**

Şev duraylılığında önem taşımaktadır.

Kayma yüzeyinin makaslama dayanımı: ⇒ $\tau = c + [(W.\cos\alpha - U) / A].\tan\phi$

Güvenlik katsayısı: ⇒ $$GK = \frac{c.A + [(W.\cos\alpha)-U].\tan\phi}{W.\sin\alpha + V}$$

V : Tansiyon çatlağında kayma yüzeyine paralel yönde etkiyen su kuvveti
U : Bloğun tabanında kayma yüzeyine dik yönde etkiyen su kuvveti

Bu eşitlik en basit şekliyle verilmiş olup, düzlemsel kayma için limit denge analizinin temel düzeyde anlaşılması amaçlanmıştır. Şev geometrisi, tansiyon çatlağının kayma yüzeyine dik ya da eğimli olması durumunda tansiyon çatlağındaki su kuvvetinin bileşenlerinin hesaplanması ve eşitlikte kullanılması, doruk ya da artık makaslama dayanımlarından hangisinin kullanılacağı gibi hususlar, GK eşitliğini bir miktar daha karmaşık hale sokmakla birlikte, temel prensip aynıdır.

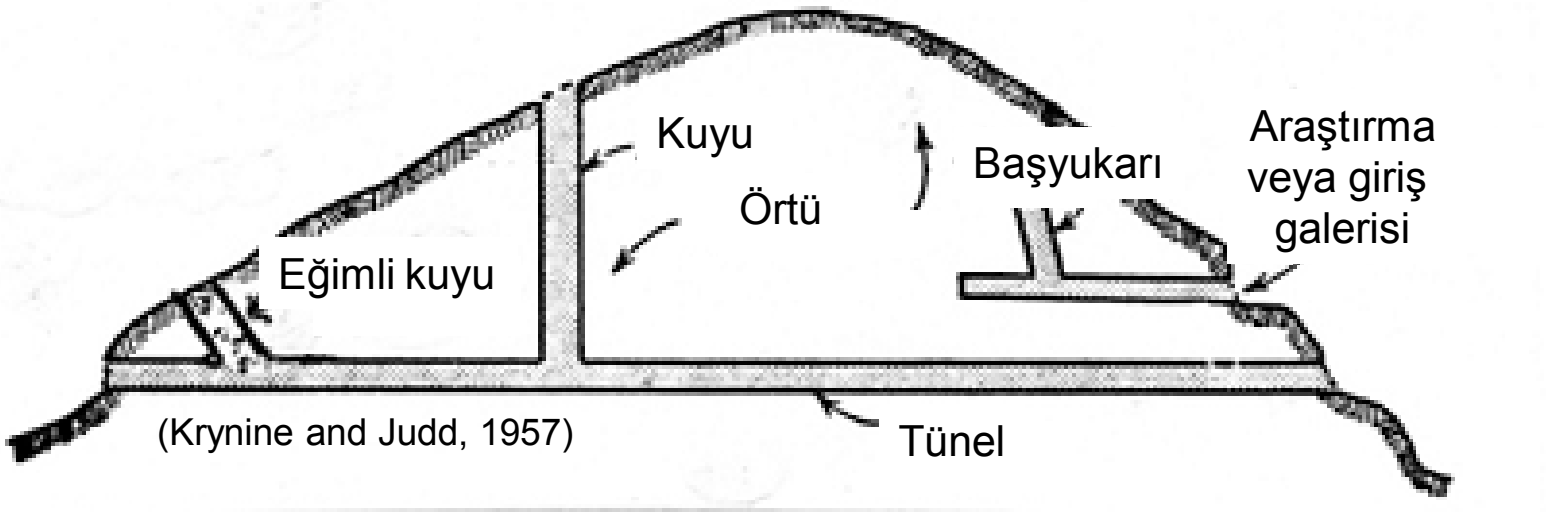
Limit denge analizleri, ayrıca kaya kütlelerinde gözlenen diğer duraysızlık modelleri için de kullanılmakta olup, analiz yöntemleri farklılık göstermektedir.

Bu ders kapsamında diğer modellerin analizlerine değinilmeyecek olup, ayrıntıları ilgili kaynaklarda bulunabilir.

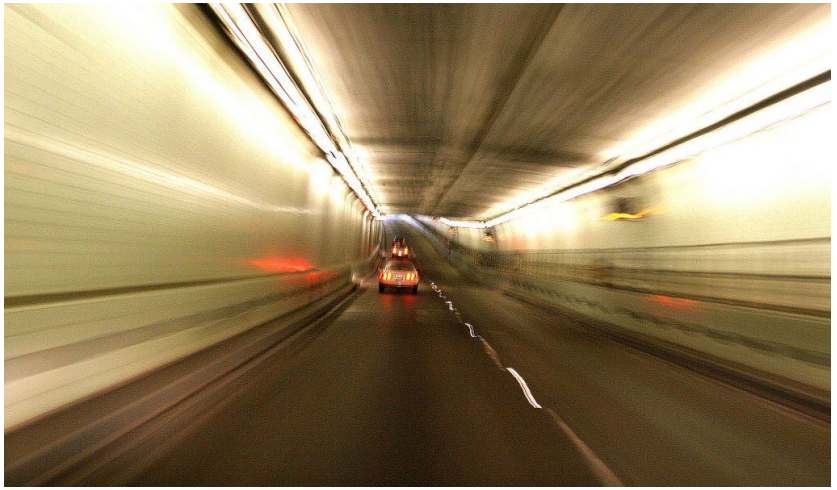
8.2. YERALTI AÇIKLIKLARI

Kısa ve uzun, dikey, eğimli veya yatay yeraltı açıklıkları:

TÜNEL, KUYU, ARAŞTIRMA veya GİRİŞ GALERİSİ, BAŞYUKARI ve EĞİMLİ KUYU



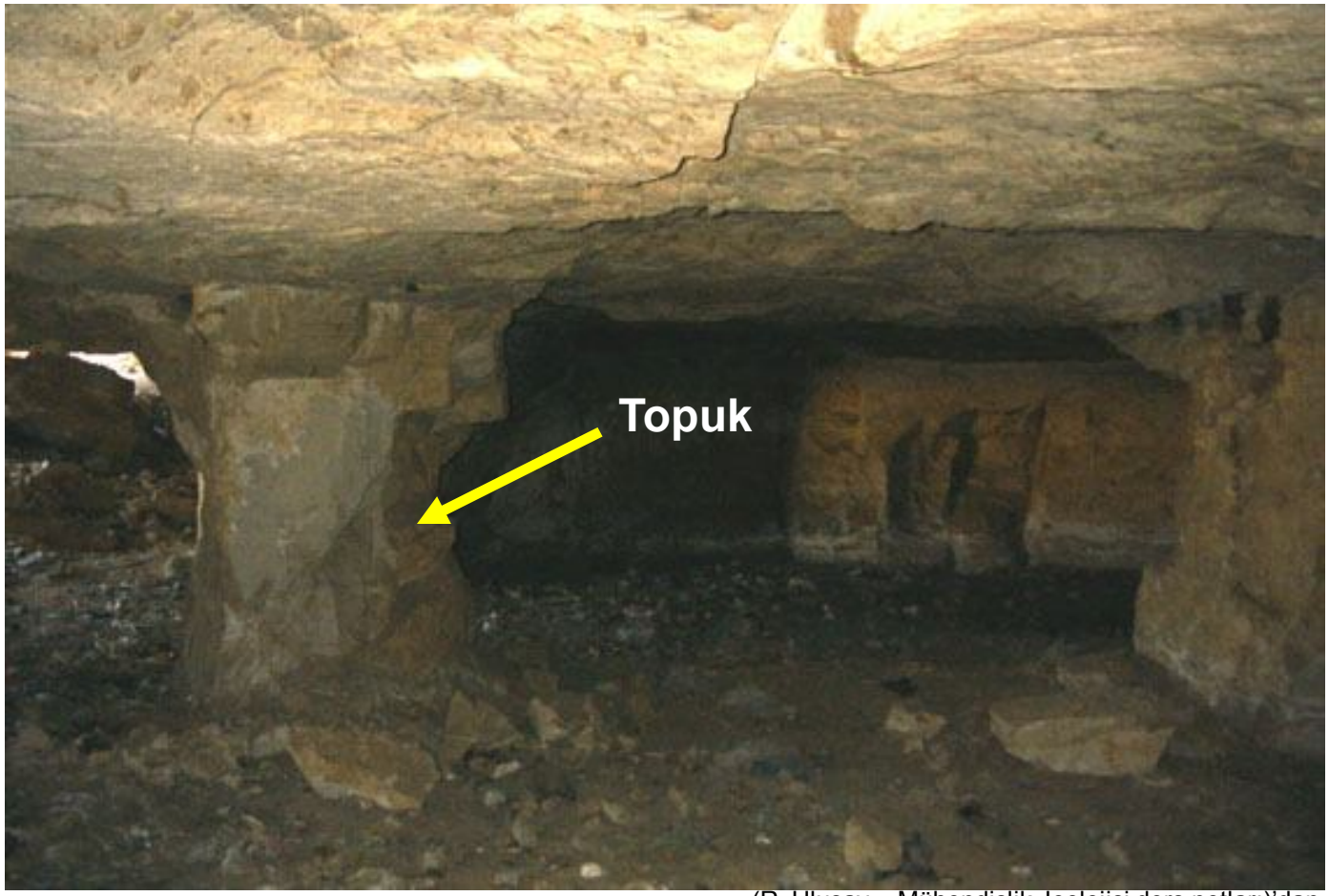
(Krynine and Judd, 1957)



(R. Ulusay – Mühendislik Jeolojisi ders notları)'dan

Geniş veya dar, basit veya karmaşık yeraltı açıklıkları:

YER ALTI BOŞLUKLARI veya ODALARI (Sosyal amaçlı, atık depolama, yeraltı enerji santralleri, enerji depolama gibi amaçlarla inşa edilen yeraltı açıklıkları)



(R. Ulusay – Mühendislik Jeolojisi ders notları)'dan

Yeraltı enerji santrali inşaatı

(R. Ulusay – Mühendislik Jeolojisi ders notları)'dan

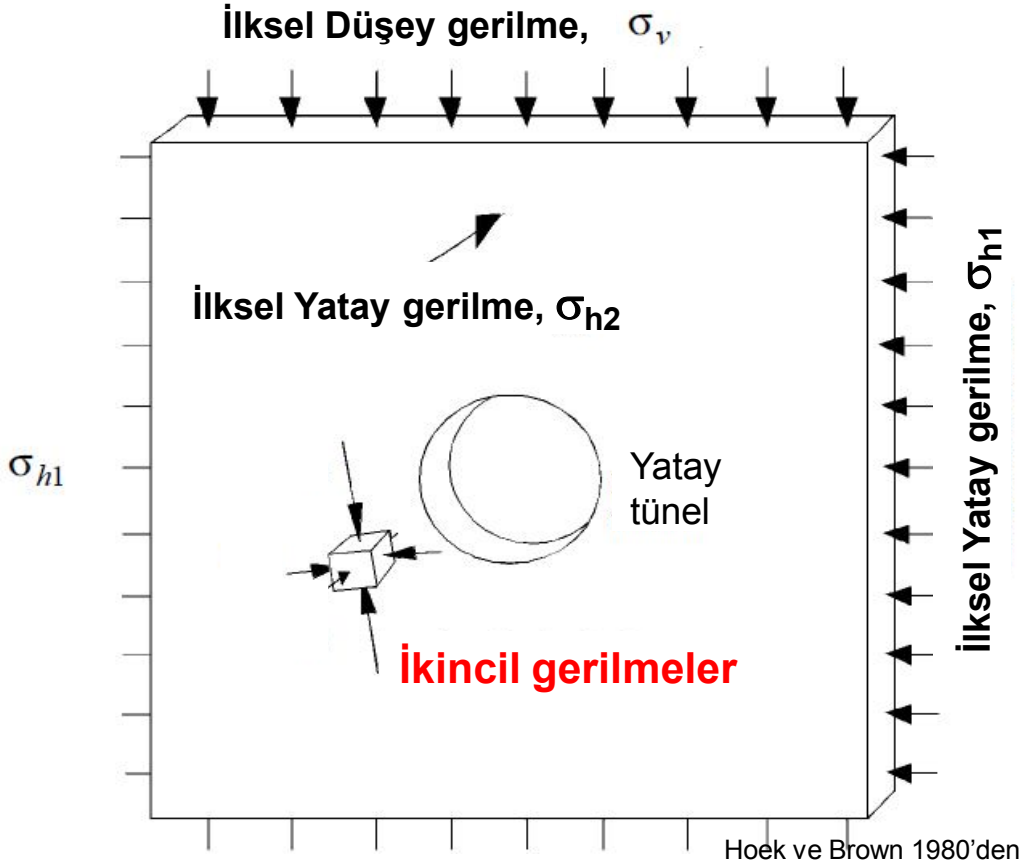
Tuz kubbesi içinde yeraltı doğal gaz depolama boşluğu

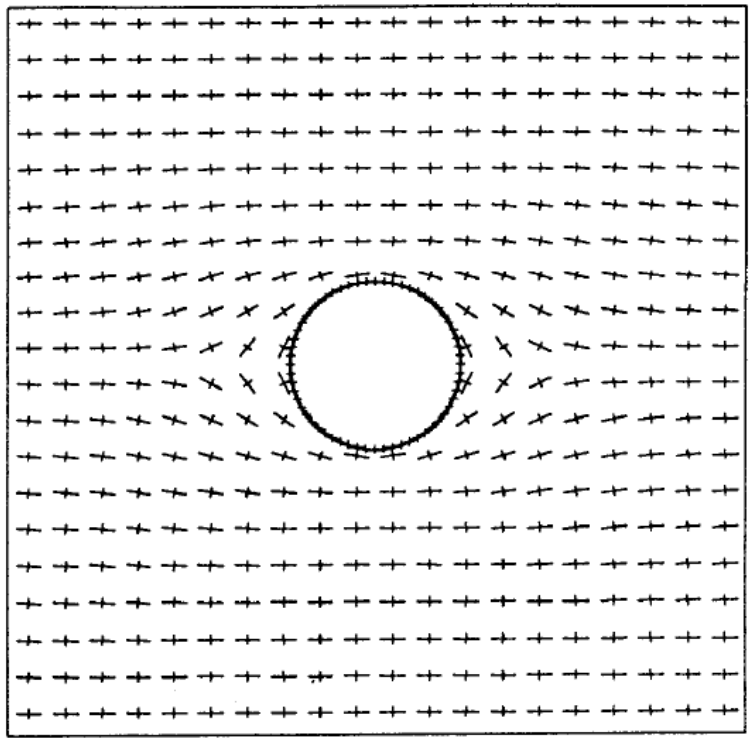
(flexim.com)

8.2.1. Yeraltı açıklıklarının etrafında gelişen ikincil gerilmeler

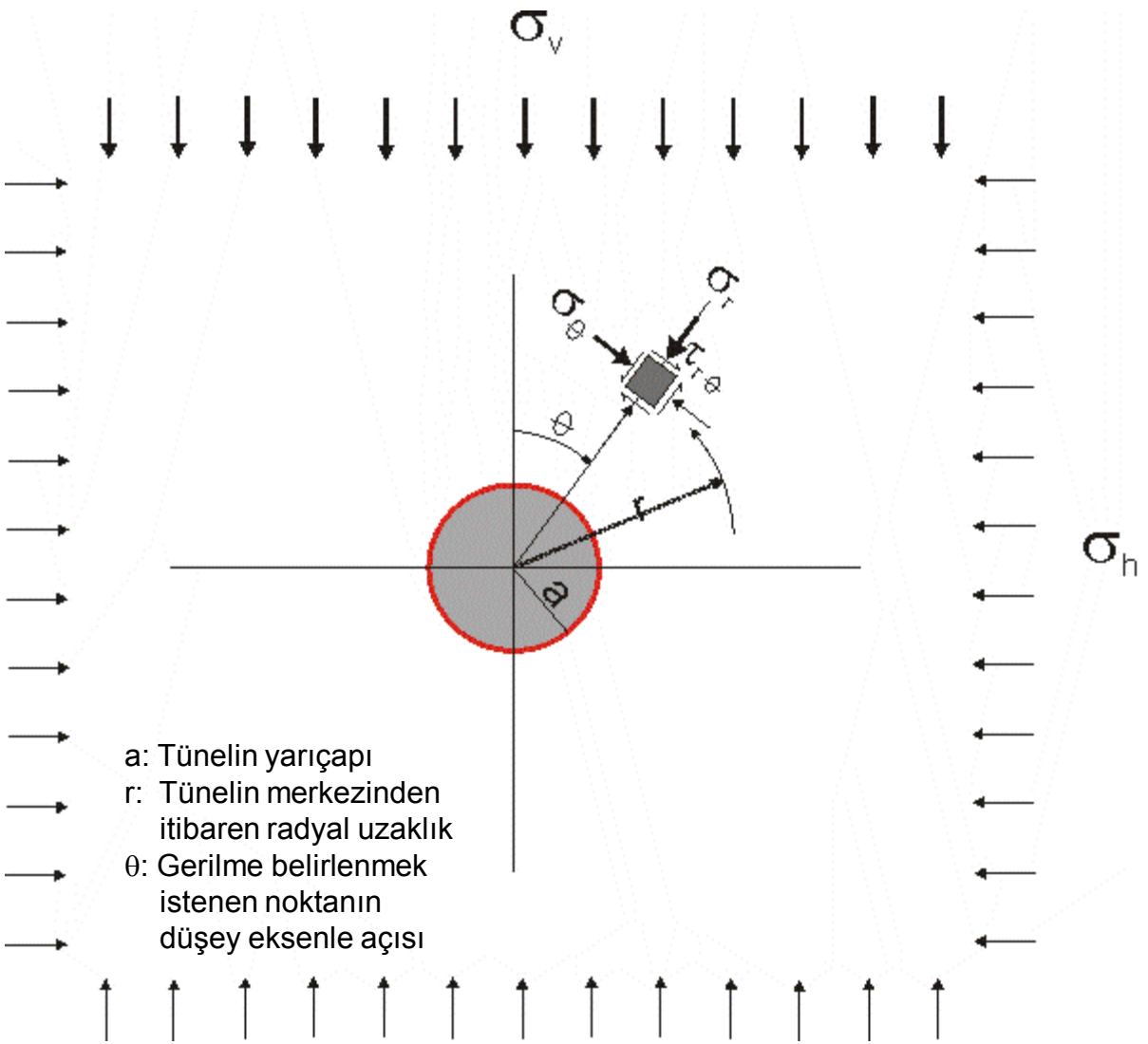
Farklı mühendislik amaçlarıyla değişik yeraltı açıklıları inşa edildiğinde ortamdaki orijinal/bakir/ilksel gerilme durumu bozulmaktadır. Yeraltı açıklığının duraylılığı ise, açıklığın inşası ile oluşan **ikincil/tetiklenmiş gerilmelere**, jeolojik yapıya ve kütlenin dayanımına bağlıdır. Bu nedenle, yapının doğru tasarımlanması için, kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin yanı sıra ortamda gelişecek ikincil gerilmelerin bilinmesi gerekmektedir.

Dairesel açıklık:





Hoek ve Brown 1980'den düzenlenmiştir.



Homojen, izotrop ve doğrusal elastik davranış gösteren bir kaya ortamındaki bir yeraltı açıklığı kesitinde düzlemsel birim deformasyon (plane strain) durumu geçerlidir.

Dairesel kesitli bir tünelin açılması ile tünelin etrafında gelişen ikincil gerilmelerin kutupsal koordinat sisteminde çözümü ise, KIRSCH çözümü olarak bilinir.

Bir noktadaki ikincil gerilmeleri bulmak için KIRSCH EŞİTLİKLERİ:

RADYAL (IŞINSAL) GERİLME :

$$\sigma_r = 0.5\,\sigma_v \left[(1+k)\,(1-a^2/r^2) + (1-k)\,(1-4a^2/r^2 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta\right]$$

TEĞETSEL GERİLME:

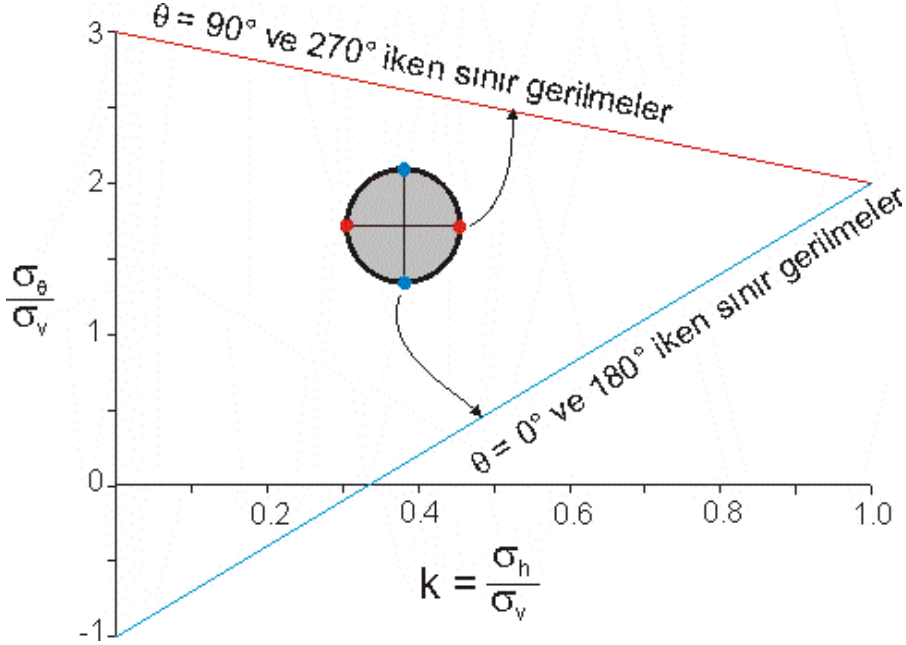
$$\sigma_\theta = 0.5\,\sigma_v \left[(1+k)\,(1 + a^2/r^2) - (1-k)\,(1 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta\right]$$

MAKASLAMA GERİLMESİ:

$$\tau_{r\theta} = 0.5\,\sigma_v \left[(k-1)\,(1 + 2a^2/r^2 - 3a^4/r^4)\sin 2\theta\right]$$

a: Tünelin yarıçapı
r: tünelin merkezinden itibaren radyal uzaklık
θ: Gerilme belirlenmek istenen noktanın düşey eksenle açısı
k: Yatay ilksel gerilmenin (σ_h), düşey ilksel gerilmeye (σ_v) oranı

Yeraltı açıklığının sınırındaki gerilmeler:



Hoek ve Brown 1980'den düzenlenmiştir.

r=a

$\sigma_r = 0$

$\tau_{r\theta} = 0$

$\sigma_\theta = \sigma_v [(1+k) - 2(1-k)\cos 2\theta]$

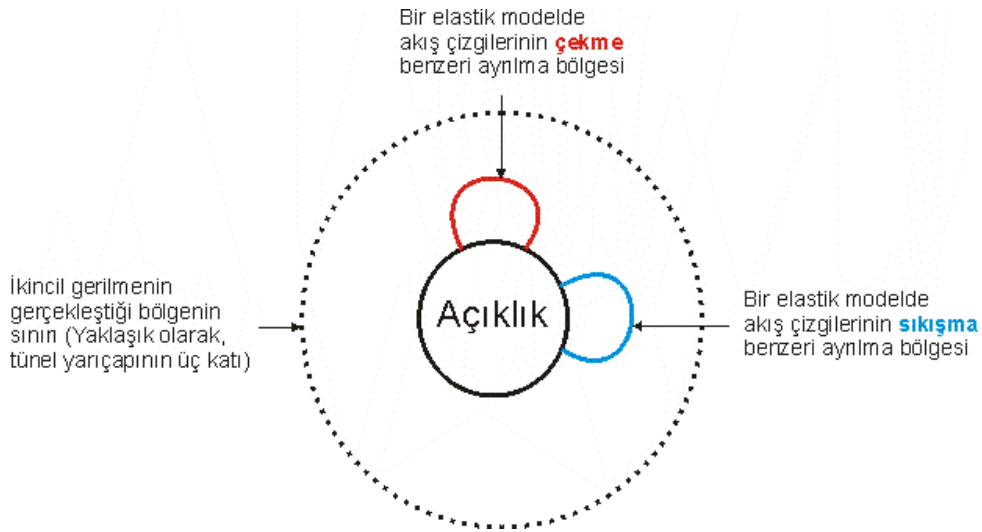
$\theta = 0$ and 180^0 (tavan ve tabanda)

$\sigma_\theta = \sigma_v(3k-1)$

$\theta = 90^0$ ve 270^0 (Yan duvarlarda)

$\sigma_\theta = \sigma_v(3-k)$

Belirli bir "k" değerine kadar:



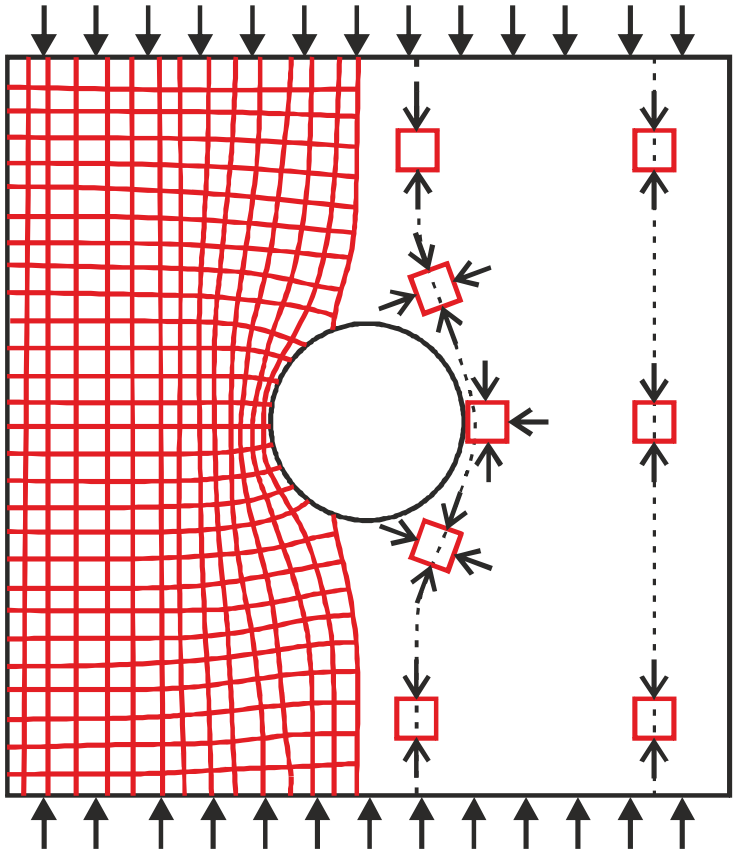
ASAL GERİLMELER:

$$\sigma_1 = 0.5(\sigma_r + \sigma_\theta) + \sqrt{0.25(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}{}^2}$$

$$\sigma_3 = 0.5(\sigma_r + \sigma_\theta) - \sqrt{0.25(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau_{r\theta}{}^2}$$

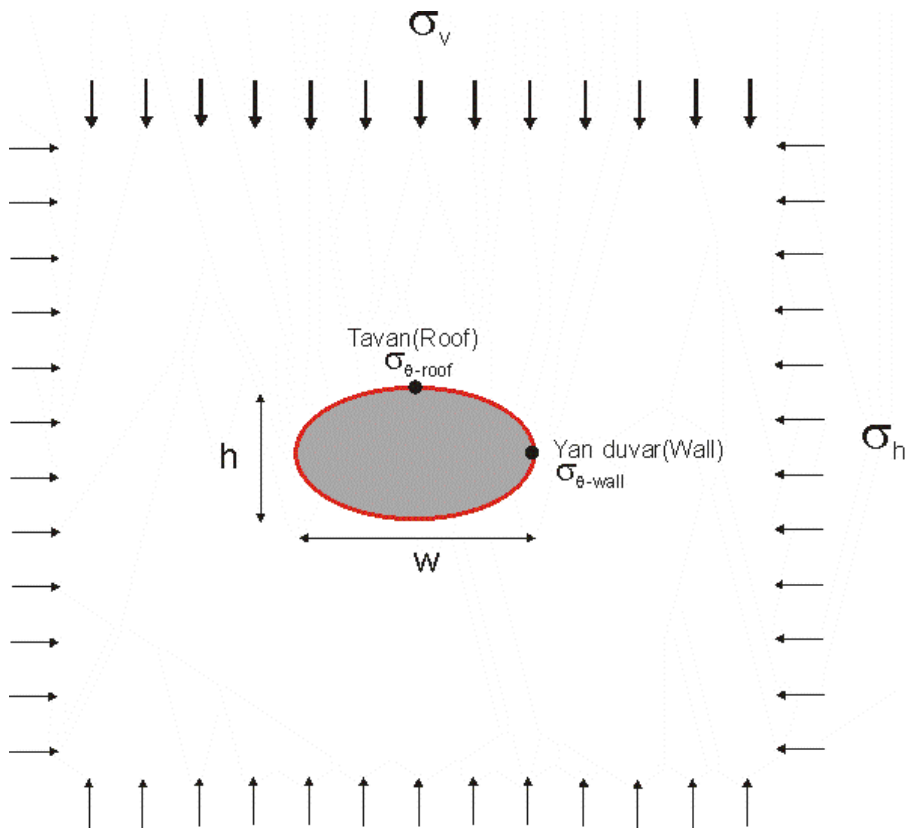
$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau_{r\theta}}{(\sigma_\theta - \sigma_r)}$$

Örneğin; tek eksenli gerilme etkisindeki (k=0) bir plakada açılmış dairesel boşluk etrafındaki en büyük ve en küçük gerilmelerin (asal gerilmeler) akış çizgileri



Hoek ve Brown 1980'den düzenlenmiştir.

Dairesel olmayan açıklık (Elips şekilli):



Tavanda teğetsel gerilme:

$\sigma_{\theta\text{-roof}} = \sigma_v \left[k\,(1+2w/h)-1\right]$

Yan duvarda teğetsel gerilme:

$\sigma_{\theta\text{-wall}} = \sigma_v \left[1+2w/h-k\right]$

(Hoek ve Brown, 1980; Karpuz ve Hindistan, 2008)

Yeraltında açılacak bir boşluğun gerekli tahkimatının tasarımından önce, beklenebilecek yenilme türleri araştırılmalıdır. Bu yenilme türlerini dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

1. Açılan tünelin etrafında oldukça fazla artan gerilme yoğunlaşmalarının oluşturduğu duraysızlık

2. Açılan tünelin bulunduğu ortamda süreksizliklerin konumuna bağlı olarak olası kama bloklarının oluşturacağı duraysızlıklar.

3. Ayrışmanın neden olduğu ve/veya kil, anhidrit gibi mineralleri içeren zayıf kayalarda şişmenin neden olduğu duraysızlıklar

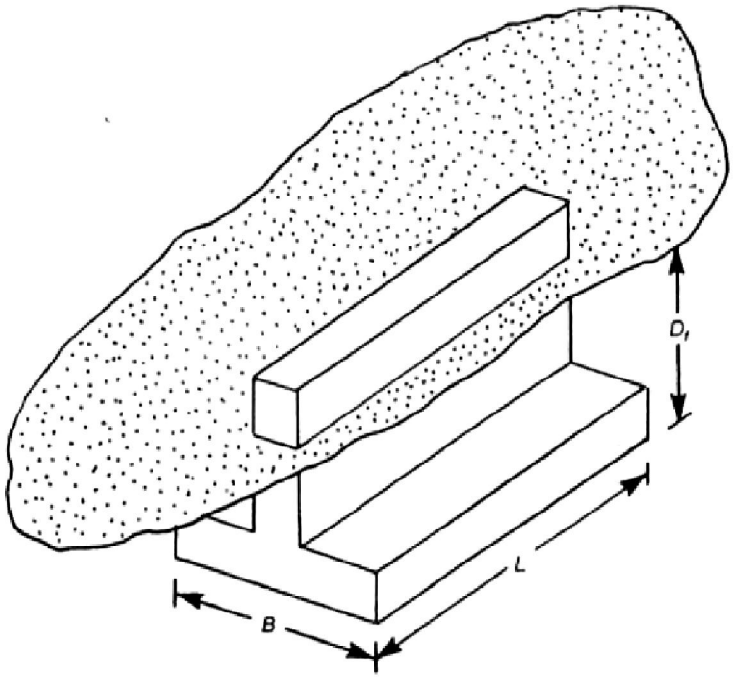
4. Yeraltı suyu akışı veya basıncı nedeniyle oluşan duraysızlıklar

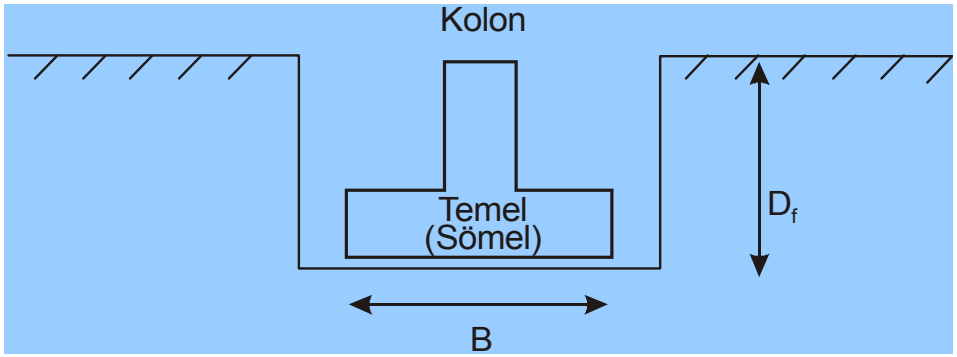
Ders kapsamında bu konulara girilmeyecek olup, ilgili kaynaklarda ayrıntılı bilgiye ulaşılabilir. Ayrıca, yeraltı açıklıklarının analizi için uygulamada etkin bir şekilde kullanılan sayısal çözümlemelerin ayrıntısına ders kapsamında girilmeyecektir.

8.3. TAŞIMA GÜCÜ

Toprak zeminlerde olduğu gibi kaya zeminlerdeki sığ derinlikteki yapı temellerinin de taşıma gücünün belirlenmesine yönelik yaklaşımlar mevcuttur. Ders kapsamında, Bell çözümü (Wyllie, 1992) olarak bilinen taşıma gücü hesabına kısaca değinilecektir.

TEMEL → Kaya veya toprak zemin üzerinde inşa edilen, yapının ağırlığını (yükünü) zemine aktaran ve yapının zeminle temas halinde olan en alttaki kısmını oluşturan yapı elemanı

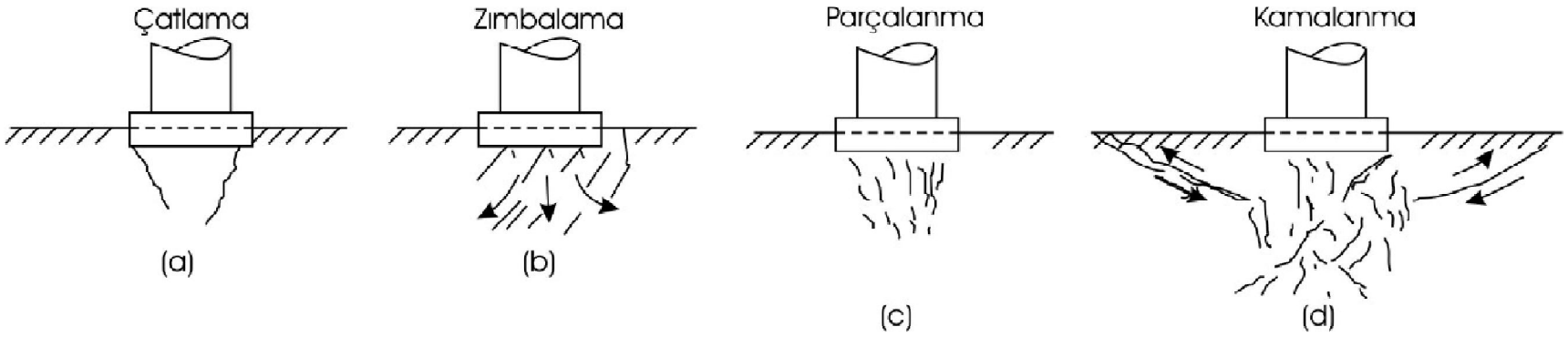




D_f: Temelin derinliği

B: Temelin genişliği

Kaya ortamlarda yapı temeli altında gelişebilecek yenilmeler



Bell Çözümü kullanılarak taşıma gücü hesabı:

$$q_a = \frac{C_{f1}\, cN_c + C_{f2}\, \frac{B\gamma}{2} N_\gamma + \gamma D_f\, N_q}{GK}$$

B: Temel genişliği
γ: Kayanın birim hacim ağırlığı
D_f: Temel derinliği
c: Kaya kütlesinin kohezyonu
ϕ: Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı
N_c, N_γ, N_q: Boyutsuz taşıma gücü faktörleri

$$N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$N_c = 2N_\phi^{0.5}\,(N_\phi + 1)$$

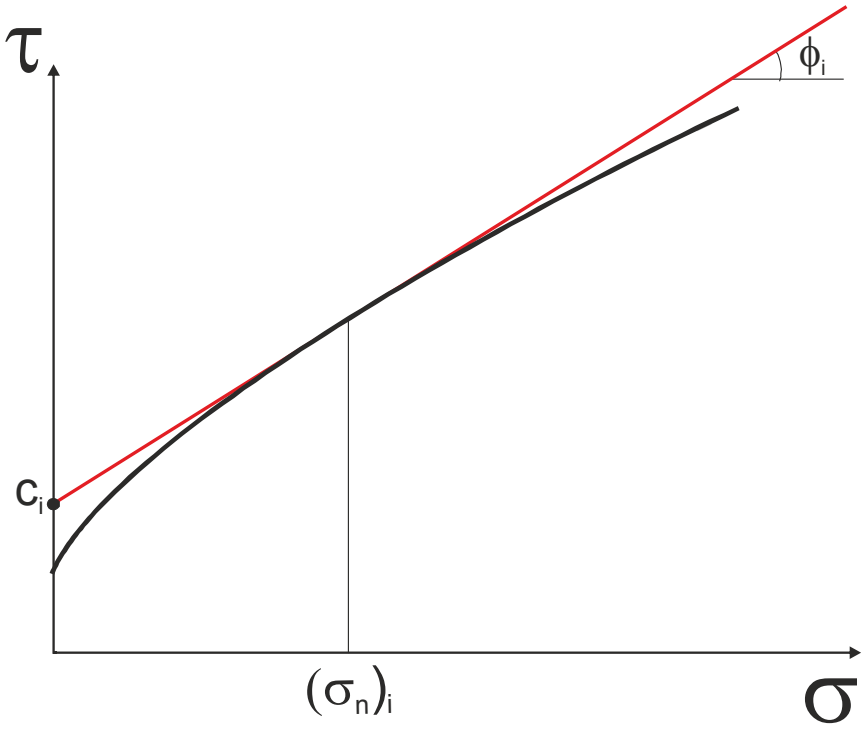
$$N_\gamma = N_\phi^{0.5}\,(N_\phi^2 - 1)$$

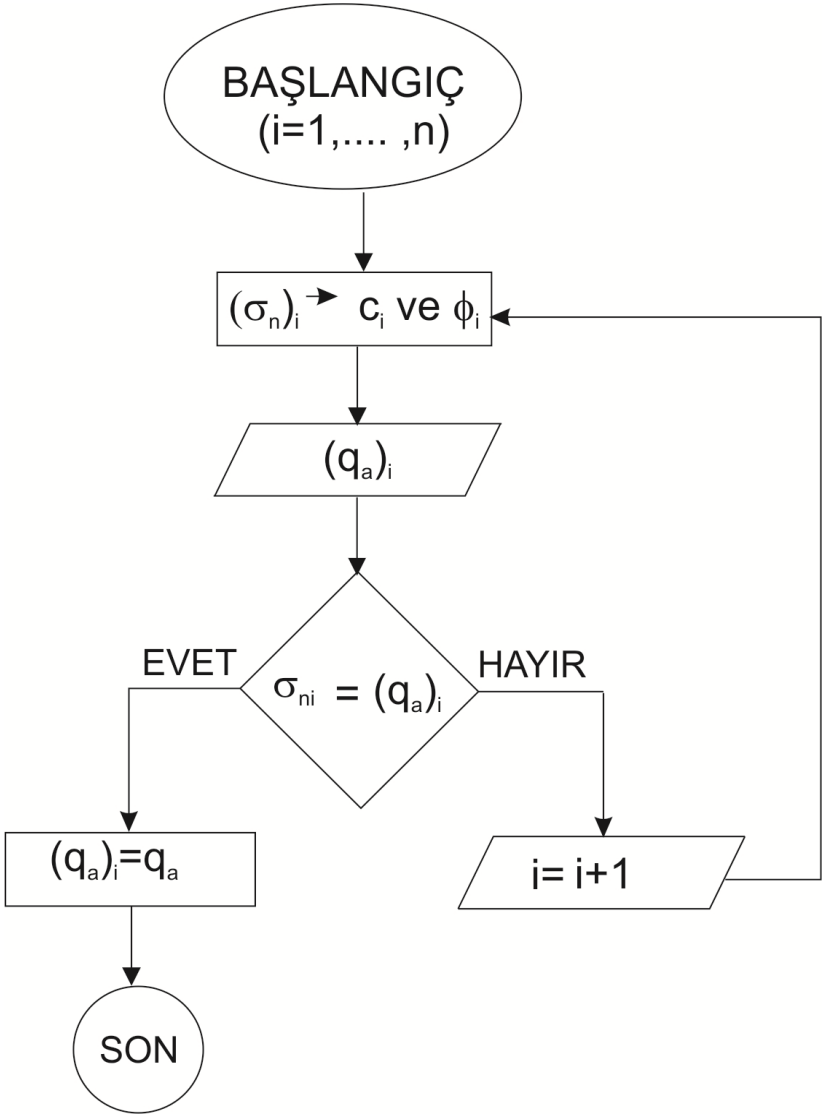
$$N_q = N_\phi^2$$

Temel tiplerine göre düzeltme faktörleri

Temel Tipi	C_{f1}	C_{f2}
Sürekli (L/B)	1.00	1.00
Dikdörtgen:		
L/B = 2	1.12	0.90
L/B = 5	1.05	0.95
Kare	1.25	0.85
Dairesel	1.20	0.70

Kaya kütlesinin yenilme zarfı doğrusal olmadığından BELL çözümü ile taşıma gücünün hesaplanması iterasyon gerektirmektedir.





BAŞARI DİLEKLERİMLE