

Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü

KAYA MEKANİĞİ

DERS NOTLARI

Prof. Dr. Recep KILIÇ

1. GİRİŞ

İnsanların güvenerek kullandığı en eski, en yaygın olan ve bu özelliğini halen koruyan yapı malzemesi **taş** tır. Ancak barınak ve temel olarak kullanımda kayaya olan güvenin artırılması gereği ortaya çıkmıştır. Kaya üzerindeki yapıların kat sayısının ve kaya içerisindeki yapı boyutlarının büyümesi v.b. gibi nedenler kayayı incelemeden kullanılmaya karşı güveni azaltmıştır.

Kayanın ayrışması ve aşınması ile oluşan, gevşek, çimentosuz kayalar yani zeminler üzerindeki araştırmalar 200 yıldan beri devam etmektedir. Temel olma açısından zeminlerin güvenilirlik dereceleri ancak denenerek ve ölçülerek belirlenmektedir. Zeminlerin bu özelliği nedeni ile zemin mekaniği bilimi gelişmesini kaya mekaniğine göre daha önce sağlamıştır.

İkinci Dünya Savaşı sonrasında başlayan hızlı endüstrileşmeye paralel olarak yapılan;

- büyük barajlar,
- nükleer santraller,
- uzun ve geniş çaplı tüneller,
- madencilik kazıları,
- gökdelenler,
- alışveriş merkezleri
- viyadükler,
- köprüler ve
- bunun gibi büyük ve hassas mühendislik yapıları

temelde bulunan kayanın, güvenilir bir ortam olup olmadığının belirlenmesi için denenmesini ve incelenmesini gerektirmiştir.

Zemine oranla kayanın geçirimsiz, sıkışmaz ve sonsuz kayma direncine sahip olduğu görüşü yaygın olmasına karşılık, yapıların ve yüklerin artması ile meydana gelen yenilme ve deformasyonlar bu kanaatin yanlış olduğunu göstermiştir.

Kayanın mekanik davranışının, yenilme kriterlerinin belirlenmesi ve kaya ortamlardaki yapıların bu verilere göre boyutlandırılması kaya mekaniği biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Kaya mekaniği, kayaların mekanik özelliklerini ve davranışını inceleyen teorik ve uygulamalı, disiplinler arası bir bilim dalıdır. Kayanın çevresindeki kuvvet sahalarına karşı davranışlarını inceler.

Kaya mekaniği, kaya ortamın ilk durum girdilerini belirliyerek, teknik girişimden sonra oluşacak yeni durumu ve dolayısı ile kaya ile yapı arasındaki karşılıklı ilişkileri inceleyen, belirleyen ve buna bağlı olarak yeraltı kaya yapılarını boyutlandıran teknik bilim dalıdır.

Bu konu içerisinde ancak ulaşılabilen kayaların özellikleri tutumları ve değişen gerilme şartlarındaki davranışları incelenebilmektedir.

Ulaşılabilen kaya yerkabuğunun belli bir derinliğe kadar üst kısmını oluşturur. Kayanın sağlam ve masif olupta ulaşılamayan kısmı ile yapısal jeoloji uğraşır.

Kaya mekaniğinin gelişimi 1950 yılından bu yana devam etmektedir. Kaya mekaniğinin gelişimini hızlandıran etkenlerin bazıları şunlardır:

1. Matematik ve fizik gibi temel bilimlerdeki gelişmelere paralel olarak gerilme ve deformasyonların daha duyarlı olarak ölçülebilmesi,
2. Petrol ve madencilikte derin işletmelere geçiş zorunluluğu,
3. Baraj, tünel, yeraltı santrali v.b. gibi yapılarda boyutların artması,
4. Askeri amaçlı yapılar ve yeraltı depolarına olan isteğin artması

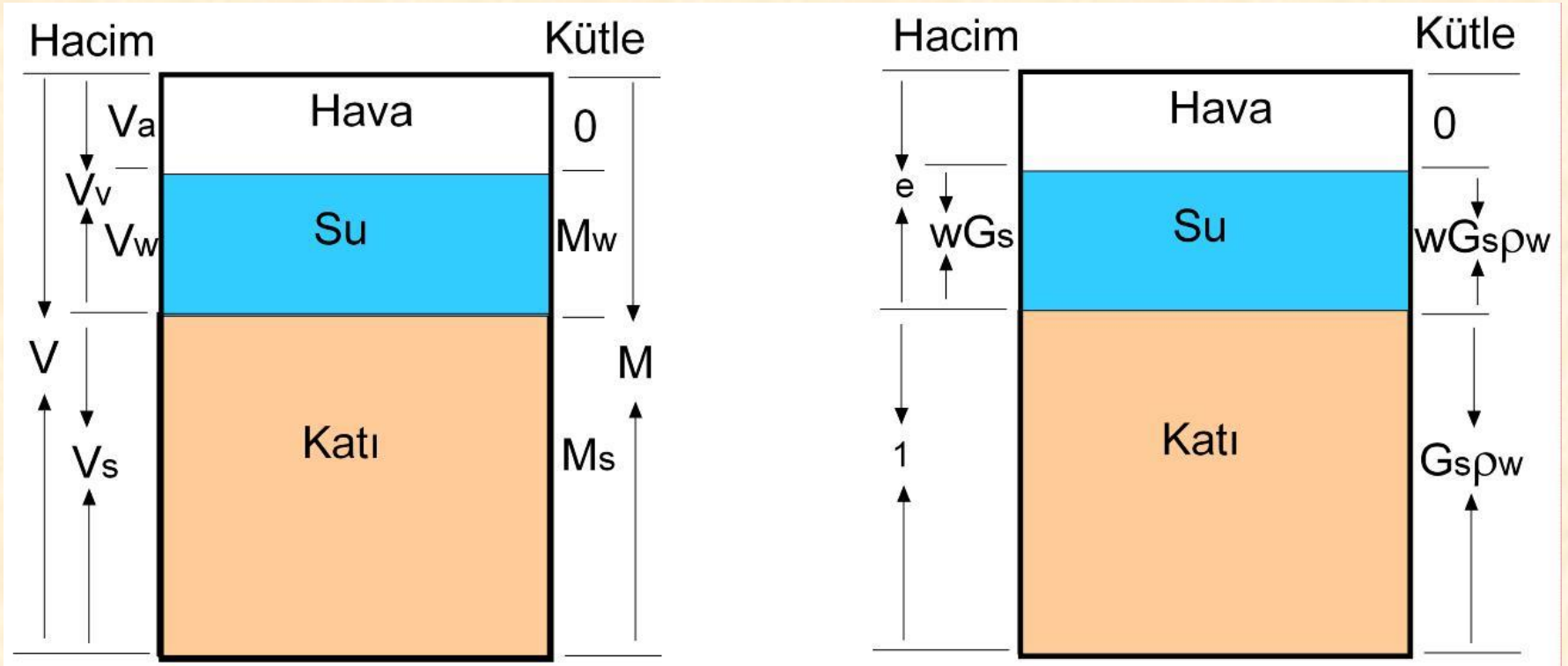
Kaya mekaniğinin inceleme konuları:

Kaya mekaniğinin inceleme konularının başlıcaları aşağıda verilmiştir.

1. Mühendislik amaçlı olarak kayayı mekanik ve jeolojik yönden incelemek.
2. Kayayı tanımlamak ve sınıflandırmak.
3. Kayanın basma, çekme, ve kayma kuvvetleri altındaki dayanımını belirlemek için standart deney yöntemleri ve cihazları geliştirmek.
4. Kayanın statik ve dinamik yükler altındaki yenilme durumlarını incelemek ve ölçmek için deney yöntemlerini geliştirmek.
5. Su ve sıcaklık şartları altında kayanın davranışını incelemek.
6. Kaya ortamda inşaa edilecek yapıların statik problemini araştırmak ve boyutlandırmak.

2. KAYANIN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Kayanın fiziksel özellikleri Şekil 2.1 deki kütle - hacim diyagramı üzerinde açıklanabilir



Şekil 2.1. Kütle - hacim diyagramı

Doğal su içeriği (w): Kayanın boşluklarındaki suyun ağırlığının kuru ağırlığına oranıdır. Yüzde olarak ifade edilir.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_n - W_s}{W_s}$$

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} = \frac{\text{Suyunkütlesi}}{\text{Katininkütlesi}} \times 100 = \%$$

Yoğunluk (ρ): Toplam kütlenin toplam hacme oranıdır.

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{\text{Toplamkütle}}{\text{Toplamhacim}} \quad g / cm^3$$

Birim hacim ağırlığı (γ) : Zeminin ağırlığının hacmine oranıdır. Birimi, metrik sistemde g / cm^3 veya t/m^3 , uluslararası birim sisteminde (SI) kN / m^3 dür.

$$\gamma = \frac{\text{Ağırlık}}{\text{Hacim}} = \frac{W}{V} \quad \gamma = \frac{W}{V} = \frac{M}{V} \cdot g = \rho \cdot g \quad kN / m^3$$

Doğal birim hacim ağırlığı (γ_n): Kayanın doğal haldeki ağırlığının toplam hacmine oranıdır

$$\gamma_n = \frac{W_{tabii}}{V_{toplam}}$$

Kuru birim hacim ağırlığı (γ_k): Örneğin 105 5 oC de kurutulmuş ağırlığının toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_k = \frac{W_{kuru}}{V_{toplam}}$$

Doygun birim hacim ağırlığı (γ_d): Boşlukları tamamen doygün kayanın ağırlığının, toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_d = \frac{W_{doygun}}{V_{toplam}}$$

Gözeneklilik (porozite, n): Toplam boşluk hacminin toplam hacme oranıdır.

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{\text{Toplam boşluk hacmi}}{\text{Kayacın toplam hacmi}} \times 100 = \%$$

Boşluk Oranı (e): Boşluk hacminin, katının hacmine oranıdır. Birimsizdir ve yüzde olarak ifade edilir.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\text{Boşluk hacmi}}{\text{Katının hacmi}} \times 100 = \%$$

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

Özgül ağırlık (G_s): Kayanın birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranıdır. Birimi, metrik sistemde g / cm^3 ve SI sisteminde birimsizdir.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad G_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w}$$

Doygunluk derecesi (Sr):

Kayanın boşluklarındaki suyun hacminin (V_w), boşluk hacmine (V_v) oranıdır.

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

Tamamen kuru kayada, $S_r=0$ ve tamamen doymuş kayada ise $S_r=1$ dir.

Boşluk oranının tanımından eğer katının hacmi 1 birim ise boşluğun hacmi de e dir. Tanelerin kütlesi, $G_s \cdot \gamma_w$ ve su içeriğinin tanımından suyun kütlesi ise $w G_s \cdot \gamma_w$ ya eşittir.

Suyun hacmi $w G_s$ dir.

$$S_r = \frac{w G_s}{e} = \frac{\text{Suyun hacmi}}{\text{Boşluk hacmi}} \times 100 = \%$$

Doygunluk %100 olursa $S_r=1$ dir. Bu durumda;

$$e = w G_s \quad \text{olur.}$$

$$\rho = \frac{G_s(1+\omega)}{1+e} \rho_w \quad \rho = \frac{G_s + S_r e}{1+e} \rho_w$$

Sr =1 için

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \rho_w$$

$$\gamma = \frac{G_s(1+\omega)}{1+e} \gamma_w \quad \gamma = \frac{G_s + S_r e}{1+e} \gamma_w$$

$$\gamma_{batmýp} = \frac{G_s \gamma_w - \gamma_w}{1+e} = \frac{G_s - 1}{1+e} \gamma_w$$

$$\gamma_w = 9.8 kN / m^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Geçirgenlik (Permeabilite, K):

Darcy yasasına göre hesaplanır

$$K=V/i$$

$$V=Q/A$$

Burada;

K= Geçirgenlik katsayısı (m/s, cm/s)

V= Boşluklardan geçen suyun hızı (m/s, cm/s)

Q= Suyun debisi (m³/s veya cm³/s)

A= Alan (m² veya cm²)

Bazı kaya türlerinin geçirimlilik katsayıları Çizelge.2.1 de ve Kayanın eklem durumu, geçirimlilik katsayısı ve sınıflaması Çizelge 2.2. de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı kaya türlerinin geçirgenlik katsayıları

Kaya türü	Geçirgenlik katsayısı (K, cm/s)
Bazalt	10^{-5}
Breş	$10^{-7} - 10^{-8}$
Dolomit	$10^{-8} - 10^{-9}$
Granit	$10^{-10} - 10^{-11}$
Ayrışmış granit	10^{-5}
Kireçtaşı	$10^{-7} - 10^{-10}$
Kuvarsit	$10^{-5} - 10^{-7}$
Şist	$10^{-7} - 10^{-8}$

Çizelge 2.2. Kayanın eklem durumu, geçirimsizlik katsayısı ve sınıflaması (Bell 1992)

Çatlak sıklığına göre kaya kütlesi tanımı	Geçirimsizlik m/s)	Geçirimsizlik derecesi
Çok dar-aşırı derecede dar	$10^{-2}-1$	Çok geçirimli
Dar-orta derecede yakın	$10^{-5}-10^{-2}$	Orta geçirimli
Geniş-çok geniş aralıklı	$10^{-9}-10^{-5}$	Az geçirimli
Eklemsiz	$< 10^{-9}$	Geçirimsiz

3. KAYA SINIFLAMALARI

3.1. Kayanın jeolojik sınıflaması

Oluşumları bakımından kayaçlar genellikle mağmatik, metamorfik ve sedimanter olmak üzere üç grupta toplanır. Bu sınıflandırma başlangıç değil sonuç olarak ortaya çıkmıştır.

Kaya mekaniğinde kayaçların jenetik dağılımlarından ziyade davranışları ile ilgilenilir. Bu nedenle kayaçlar davranışlarına göre Çizelge.3.1 de verilen sınıf ve alt sınıflara ayrılmıştır (Goodman, 1989).

Çizelge 3.1. Kayanın jeolojik sınıflaması (Goodman, 1989).

I. Kristalin dokulu kayalar	Örnekler
1. Eriyebilir karbonat ve tuzlar	Kireçtaşı, dolomit, mermer, kaya tuzu, jips, trona
2. Devamlı band halindeki mika veya diğer düzlemsel mineralliler	Mika şist, klorit şist, grafit şist
3. Devamlı mika bantları içermiyen bantlı silikat mineralliler	Gnays
4. Düzgün tane boyunda dağılmış ve dizilmiş silikat mineralliler	Granit, diyorit, gabro, siyenit
5. Rastgele dizilmiş ve dağılmış çok ince taneli silikat mineralliler	Bazalt, riolit ve diğer volkanik kayalar
6. Çok fazla parçalanmış kayalar	Serpantinit ve milonitleşmiş kayalar
II. Kırıntılı kayalar	
1. Sağlam çimentolu	Silis çimentolu ve limonitli kumtaşı ve çakıltası
2. Az çözülebilir çimentolu	Kalsit çimentolu kumtaşı ve çakıltası
3. Kolay çözülebilir çimentolu	Jips çimentolu kumtaşı ve çakıltası
4. Zayıf çimentolu	Ufalanabilir kumtaşı ve tuf
5. Çimentosuz	Kil, silt, kum, çakıl
III. Çok ince taneli kayalar	
1. İzotrop sert kaya	Hornfels ve bazı bazaltlar
2. Büyük ölçekte anizotrop ancak mikroskopik olarak sert kaya	Çimentolu şeyl ve dağılabilen fissürlü mikalı kumtaşı
3. Mikroskopik olarak sert kaya	Sleyt ve fillit
4. Yumuşak kaya (zemin davranışlı)	Sıkışmış şeyl, tebeşir ve marn
IV. Organik kayalar	
1. Yumuşak kömür	Linyit ve bitümlü kömür
2. Sert kömür	
3. Petrollü şeyl	
4. Bitümlü şeyl	
5. Katranlı kum	

3.2. Sağlam kayanın teknik sınıflaması

Mühendislikte kullanılan bu sınıflamada kırık ve çatlak içermeyen sağlam kayanın (taş) tek eksenli basma dayanımı (σ_c) ile elastisite modülü (E) esas alınmıştır. σ_c değerleri $L/D=2-2.5$ ölçüsündeki silindir şeklinde ($D=40-50$ mm) deney örneklerinden elde edilir. Silindirik kaya örneğinin uzunluğu (L) ve çapı (D) mm cinsinden ifade edilmektedir. Tek eksenli basma dayanımına göre sınıflama Çizelge.3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tek eksenli basma dayanımına göre sınıflama (Deere ve Miller 1966)

Sınıfı	Niteliği	Tek eksenli basma dayanımı kg/cm ²
A	Çok yüksek dayanımlı	>2000
B	Yüksek dayanımlı	1000-2000
C	Orta dayanımlı	500-1000
D	Düşük dayanımlı	250-500
E	Çok düşük dayanımlı	<250

Modül oranına göre sınıflama Çizelge.3.3 de ve Şekil 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.3. E_t/σ_c oranına göre sınıflama

Sınıfı	Niteliği	Elas.mod./Tek eksenli basma dayanımı
Y = Yüksek	Yüksek modül oranlı	>500
O = Orta	Orta modül oranlı	200-500
D = Düşük	Düşük modül oranlı	<200

Tek eksenli basma dayanımı ve modül oranına göre kayalar aşağıdaki gibi 15 guruba ayrılır:

AY, AO, AD

BY, BO, BD

CY, CO, CD

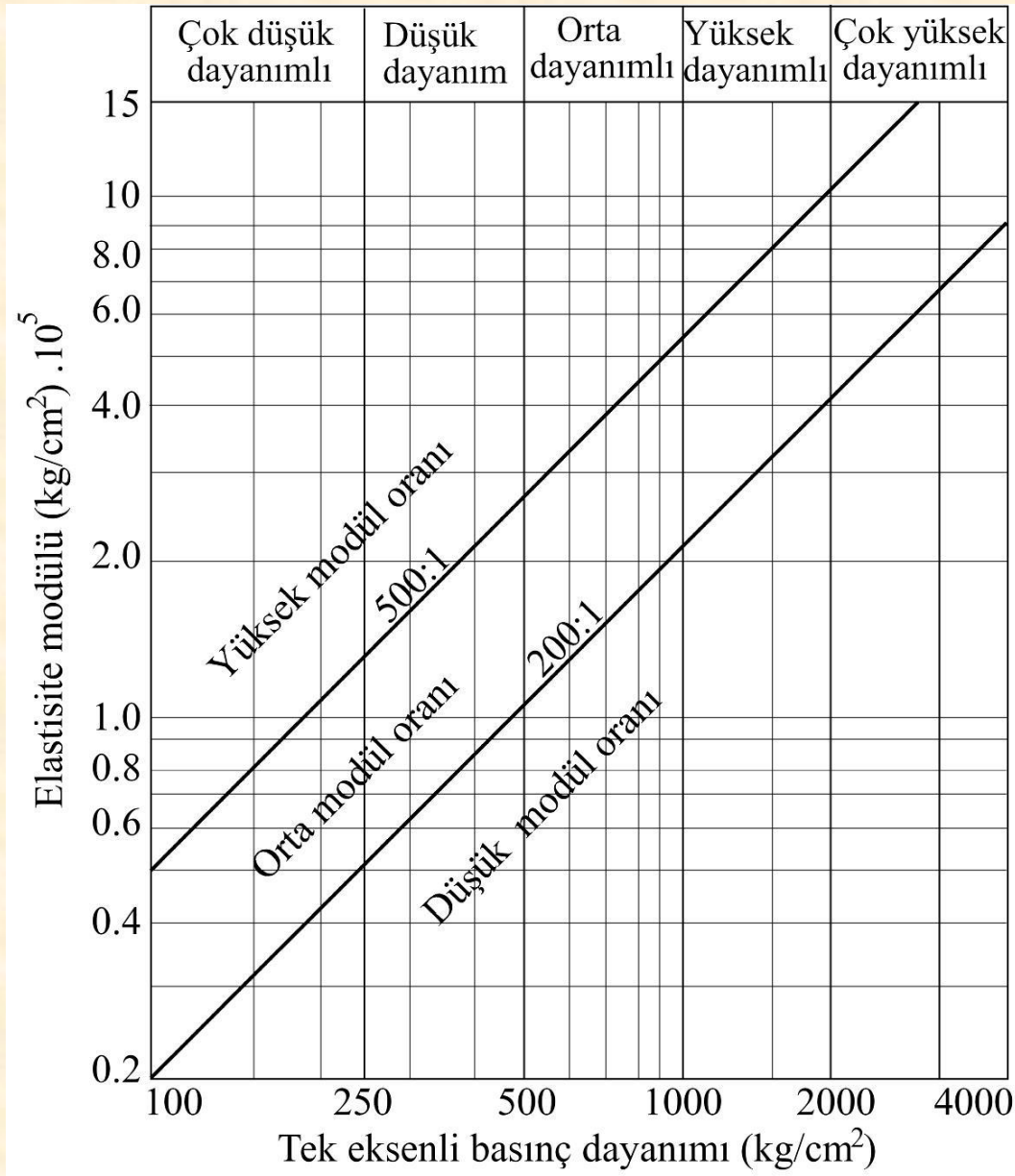
DY, DO, DD

EY, EO, ED

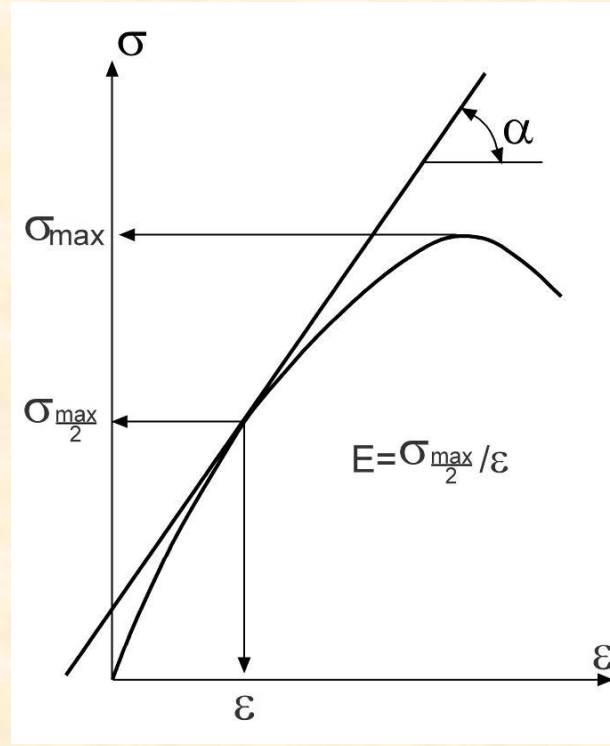
Modül orantısı = E_t/σ_c dır. Burada,

E_t = Teğetsel elastisite modülü olup Şekil 3.2 deki $\sigma_c/2$ değerindeki

σ_c - ϵ eğrisine teğetin yatayla yaptığı açısının tanjant değeridir (eğim).



Şekil 3.1. Sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımı ve modül oranına göre sınıflaması (Deer and Miller 1966)



Şekil 3.2. Teğetsel elastisite modülünün belirlenmesi

Bu sınıflamaya göre kaya grupları aşağıda verilmiştir.

A sınıfı kayalar: Kuvarsit, granit, diyabaz ve bazalt gibi kayalar. Tek eksenli basma dayanımı $c > 200$ MPa olanlar.

B sınıfı kayalar: Sert yapıdaki volkanik kayalar, metamorfik kayalar, iyi çimentolu kumtaşı, sert şistler, kireçtaşı ve dolomitlerin bir kısmı. $100 < \sigma_c < 200$ MPa,

C sınıfı kayalar: Şist, kumtaşı, bazı kireçtaşları, metamorfik kayalardan kloritler ve mika şistler, $50 < \sigma_c < 100$ MPa,

D ve E sınıfı kayalar: Ufalanabilen kumtaşları, tüfler, killi şist, kaya tuzu ve ayrıışmış kayalar, $50 > \sigma_c$ MPa,

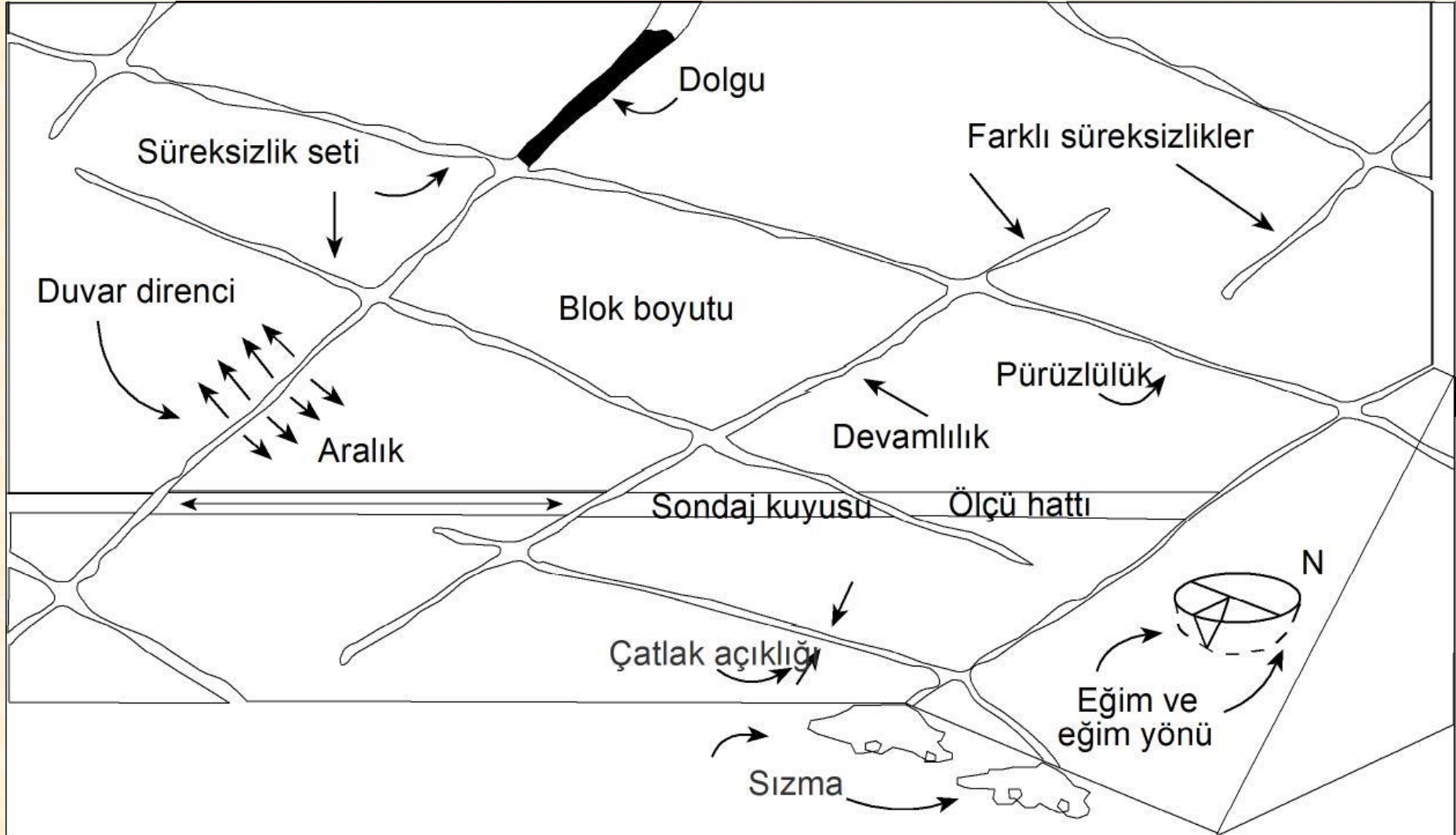
Tam sınıflandırmaya bir örnek;

Kireçtaşı, yüksek dayanımlı, yüksek modül orantılı (BY), ince taneli yoğun ve uniform.

Bunun yanında mühendislik işlerinde kullanılmak üzere süreksizliklerine göre, çatlak özelliklerine ayrışma derecelerine fiziksel, mekanik ve teknolojik özelliklerine göre değişik sınıflandırmalar yapılmıştır.

3.3. Süreksizliklere göre sınıflama

Kayanın farklı süreksizlik özelliklerine göre sınıflamaları (Hudson 1989).



3.3. Süreksizlikler göre sınıflama

Kayanın farklı süreksizlik özelliklerine göre sınıflamaları.

Çizelge 3.4. Tabaka kalınlığına göre kaya sınıflaması (Deere, 1963)

Tabaka Kalınlığı (cm)	Kayaç Tanımı
> 300	Çok kalın tabakalı
300 - 100	Kalın tabakalı
100 - 30	Orta tabakalı
30 - 5	İnce tabakalı
< 5	Çok ince tabakalı

Çizelge 3.5. Çatlaklar arası mesafeye göre sınıflama (ISRM, 1981)

Çatlaklar arası mesafe (cm)	Açıklama
> 200	Çok geniş
60 - 200	Geniş
20 - 60	Orta
6 - 20	Yakın
< 6	Çok yakın

Çizelge 3.6. Çatlaklar arası mesafeye göre kaya sınıflaması (Deere, 1967)

Çatlaklar arası mesafe (cm)	Açıklama
<5 cm	Çok yakın
5 - 30 cm	Yakın
30 - 90 cm	Aralıklı
100 - 300	Uzak
300<	Çok uzak

Çizelge 3.7. Kırıkların sürtünme açılarına göre sınıflaması (ISRM, 1981);

Aralık (derece)	Açıklama
> 45	Çok yüksek
35 - 45	Yüksek
25 - 35	Orta
15 - 25	Düşük
< 15	Çok düşük

Çizelge 3.8. Çatlak açıklığına göre kaya sınıflaması (Deere, 1963)

Çatlak açıklığı (mm)	Açıklama
0	Çatlaksız
0.0 - 0.1	Çok ince çatlaklı
0.1 - 1.0	İnce çatlaklı
1.0 - 5.0	Orta çatlaklı
5.0<	Açık çatlaklı

3.4. Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designatin, RQD) ne göre

Sondajla alınan karot yüzdesinin değişik şekilde ifadesidir. Karot yüzdesi(CR) sondajla alınan karot uzunluğunun, sondaj derinliğine oranıdır.

$$CR = \frac{\text{Karotuzunluğu}}{\text{Kademeilerlemesi}} \times 100$$

RQD ise sondajdan elde edilen karotların boyları 10 cm den fazla olanlarının toplamının kademe ilerlemesine oranı ile elde hesaplanır.

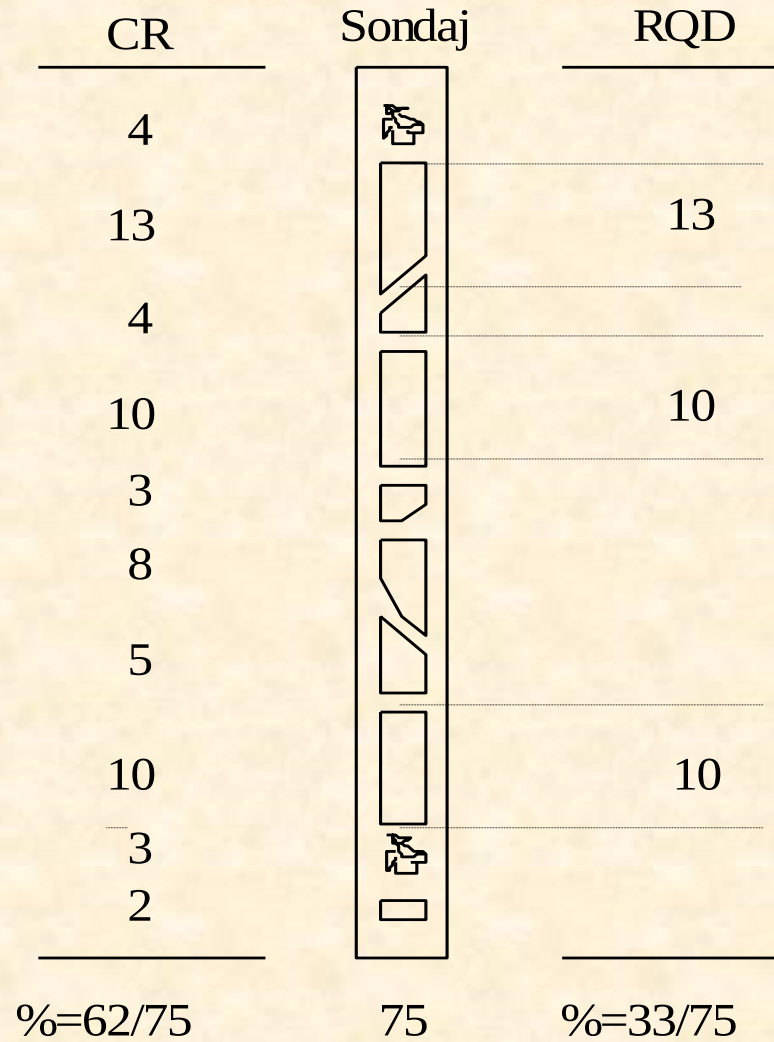
$$RQD = \frac{\sum L_{10}}{H} \times 100$$

H = Sondaj sırasındaki kademe ilerlemesi

1 metre uzunluğundaki aralıkta (karot veya blokta) sayılabilen çatlak sayısı kaya kalitesi hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 3.9. RQD değeri (Deere, 1964) ve 1m deki çatlak sıklığına (Franklin ve diğ., 1971) göre sınıflama

RQD	Kaya Kalitesi	1 m deki çatlak sıklığı
0 - 25	Çok düşük	>15
25 - 50	Düşük	15-8
50 - 75	Orta	8-5
75 - 90	İyi	5-1
90 - 100	Çok iyi	<1



Şekil 3.3. Karot yüzdesi ve RQD hesaplanması

3.5. Ayrışma indeksine göre sınıflama

Bazalt ve diyabaz için önerilen Birleşik Ayrışma İndeksi (Kılıç, 1999).

$$UAI = \sqrt{\left[1 - \frac{C_{pa}}{C_{pi}}\right] \left[1 - \frac{\sigma_{ca}}{\sigma_{ci}}\right]}$$

UAI = Birleşik ayrışma indeksi

C_{pa} = Ayrışmış kayanın P-dalga hızı (m/s)

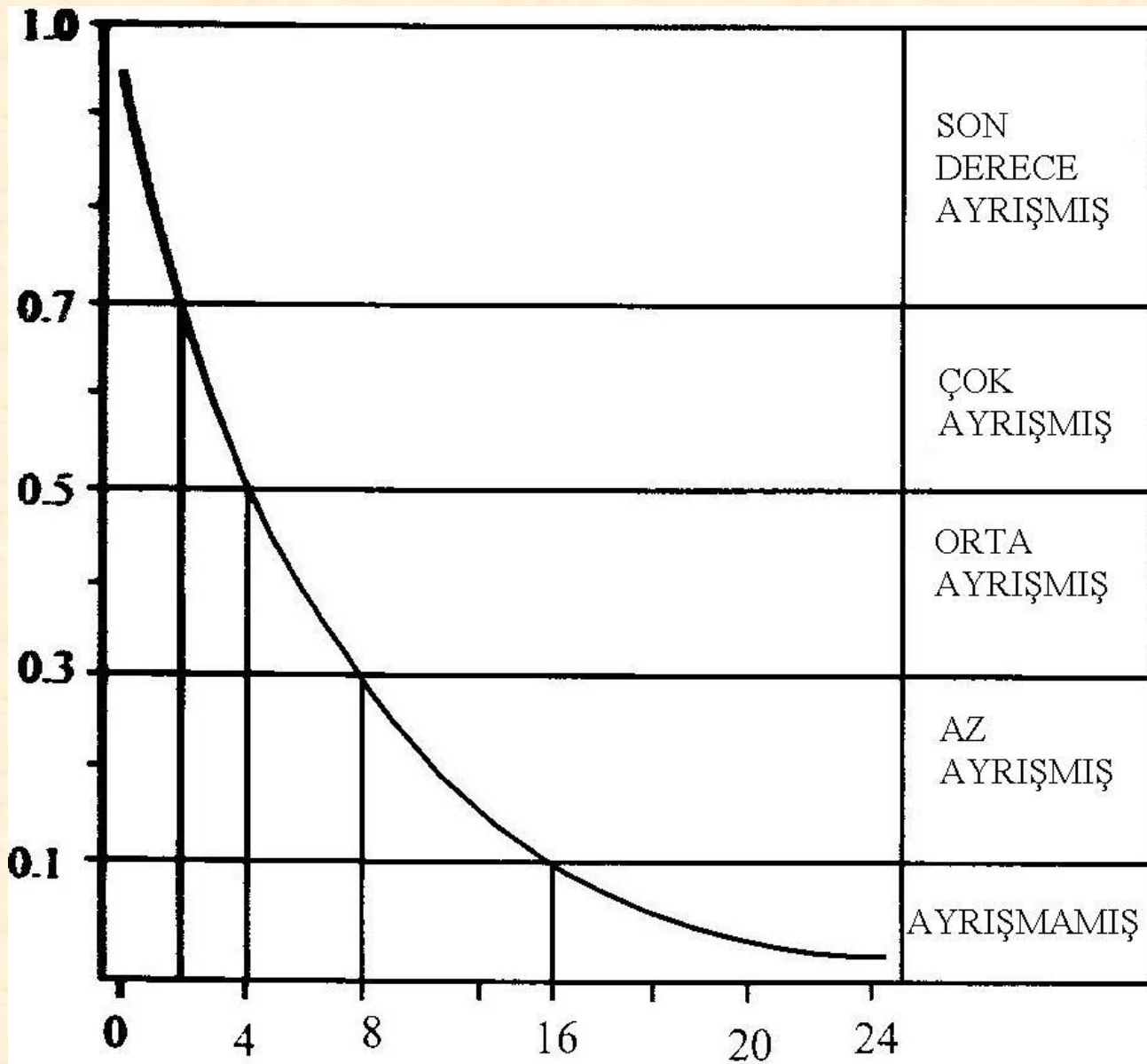
C_{pi} = Sağlam kayanın P-dalga hızı (m/s)

σ_{ca} = Ayrışmış kayanın tek eksenli basma dayanımı (MPa)

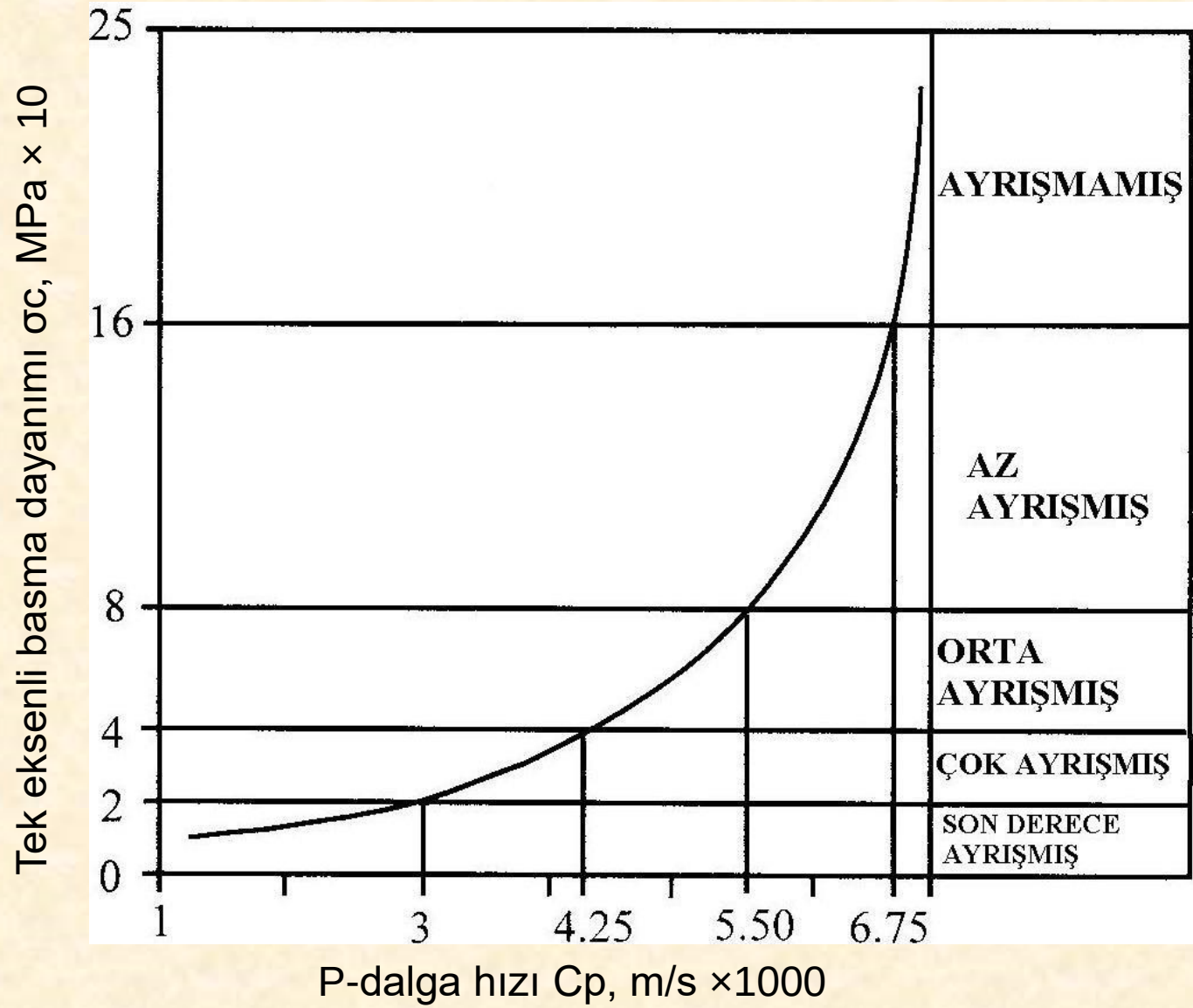
σ_{ci} = Sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımı (MPa)

Çizelge 3.10. Mafik kayaçların ayrışma derecesi ve Birleşik Ayrışma İndeksi

Sınıfı	Ayrışma derecesi	UAI	C_p (m/s)	σ_c (MPa)
I	Ayrışmamış	$< 0,10$	>6750	>160
II	Az ayrışmış	0.10-0.30	6750-5500	160-80
III	Orta ayrışmış	0.30-0.50	5500-4250	80-40
IV	Çok ayrışmış	0.50-0.70	4250-3000	40-20
V	Son derece ayrışmış	$0.70<$	$3000>$	$20>$



Şekil 3.4: Mafik kayalar için tek eksenli basma dayanımı - Birleşik Ayırışma İndeksi ilişkisi

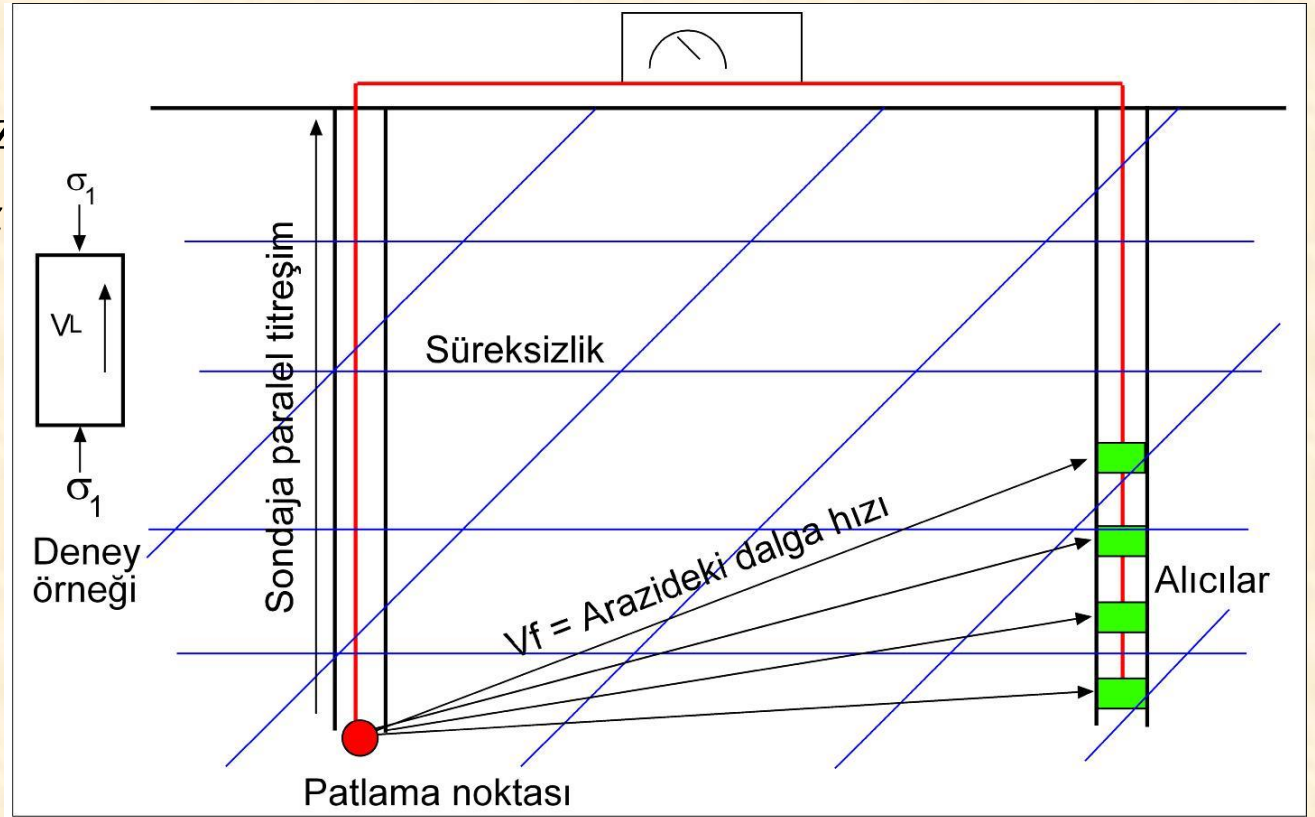


Şekil 3.5: Mafik kayalar için tek eksenli basma dayanımı, P-dalga hızı ve Birleşik Ayırma İndeksi ilişkisi

3.6. Titreşim hızı oranı

Şekil.6 da görüldüğü gibi kayada görülen titreşim hızı V_F , A noktasında yapılan bir patlamanın B, C, D ve F noktalarına ulaştığı süreler tespit edilerek V_F hesaplanır. Ayrıca kayayı temsil eden numune üzerinde laboratuvar da hız (V_L) belirlenir. Buradan da;

$$\frac{V_F}{V_L} = \frac{\text{Arazideki hız}}{\text{Lab.daki hız}}$$



Şekil 3.6. Titreşim hızı oranının belirlenmesi

V_F/V_L oranı aynı zamanda kaya kütlesi kalite indisi olarak kabul edilir. Laboratuvarda hız belirlenirken doğal şartlardaki gerilme numune üzerine uygulanır. Süreksizlikler nedeniyle $V_F < V_L$ ve $V_F/V_L \%100 >$ dır. Hız indisine göre kaya kütlesi sınıflaması Çizelge 3.11 de verilmiştir (Coon ve Merritt, 1970).

Çizelge 3.11. Hız indisi ve kaya kütlesi kalitesi

Hız indisi (V_F/V_L) ²	Kaya kalitesi tanımı
<0.2	Çok zayıf
0.2-0.4	Zayıf
0.4-0.6	Orta
0.6-0.8	İyi

4. KAYADA GERİLMELER

Bir ayırma yüzeyindeki iç kuvvetlerin differansiyel birim alana düşen şiddetine **gerilme** denir. Gerilme birim alana uygulanan iç kuvvettir.

$$\sigma = \frac{dF}{dA}$$

Birimi; kg/cm², Mg/m², lb/ft² = psi, N/mm²,
kN/m² (1 psi = 0.0703 kg/cm²)

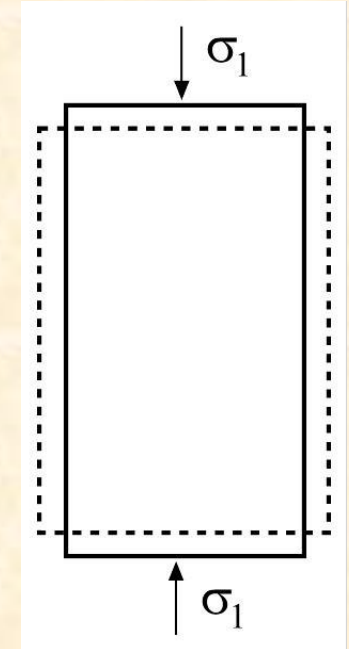
4.1. Normal gerilme

Her hangi bir düzleme dik olarak etkiyen normal kuvvetin birim alana düşen şiddetidir.

4.1.1. Basınç gerilmesi:

Etkime düzlemine doğru yönlendirilmiş normal gerilmelerdir. Kaya mekaniğinde (+) işaretlidir.

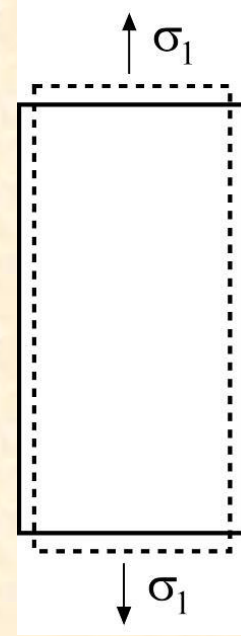
Şekil 4.1. Basınç gerilmesi ve şekil değişikliği



4.1.2. Çekme gerilmesi

Etkime düzleminde uzaklaşan normal gerilmelerdir. Kaya mekaniğinde (-) işaretlidirler.

Şekil 4.2. Çekme gerilmesi ve şekil değişikliği

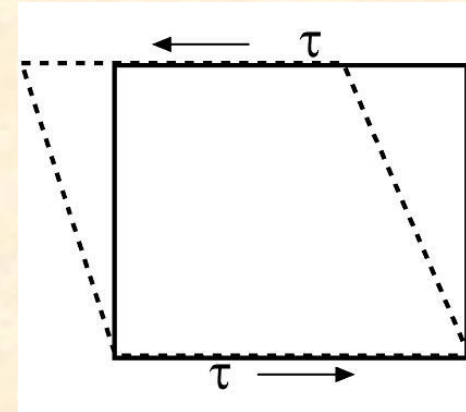


4.2. Makaslama (kayma) gerilmesi

İncelenen kesit yüzeyine paralel olarak etkiyen teğetsel kuvvetlerin birim alandaki değerleridir. Kesme veya makaslama gerilmesi de denir.

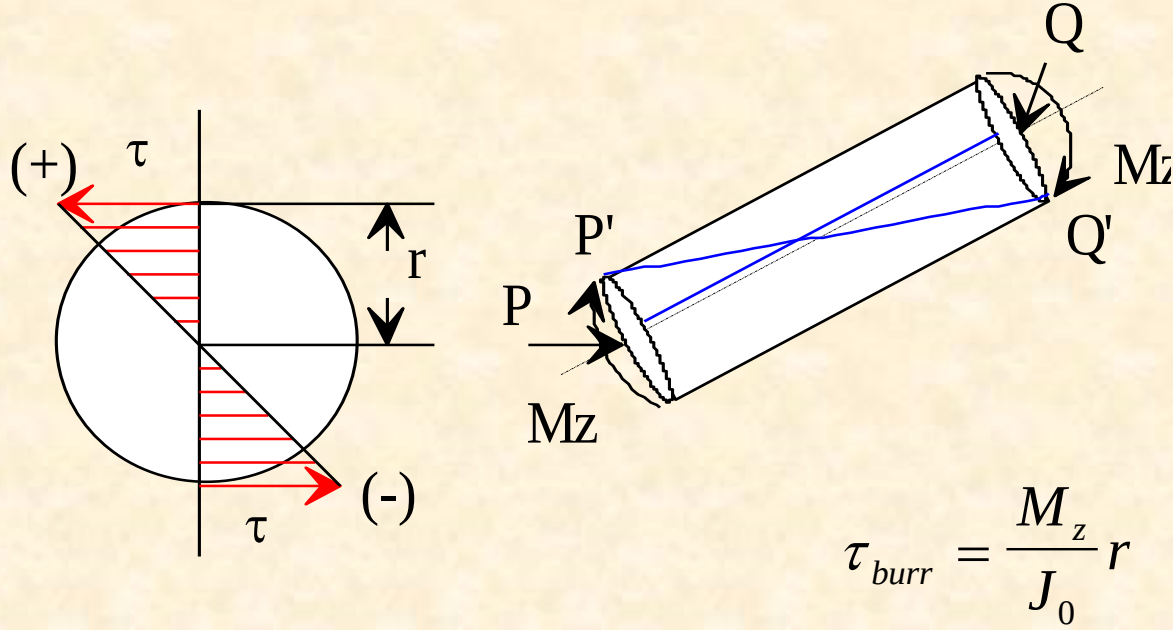
$$\tau = \frac{T}{A}$$

Şekil 4.3. Kayma gerilmesi ve şekil değişikliği



4.3. Burulma gerilmesi

Dönme eksenine dik düzlemler içinde etkiyen zıt yönlü momentlerin cisim içinde oluşturdıkları kesme gerilmeleridir.



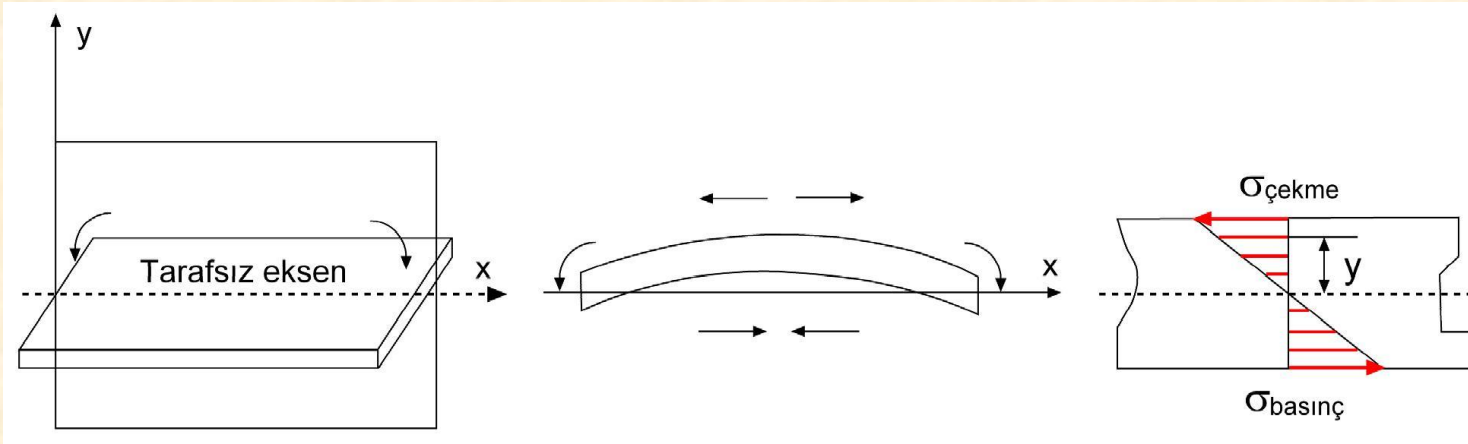
Şekil 4.4. Burulma gerilmesi

Burada M_z , momentin şiddeti; J_0 , cismin polar (kutupsal) atalet momenti ve r incelenen differansiyel alanın burulma ekseninden olan uzaklığıdır.

4.4. Eğilme gerilmesi

Cisme iki ucundan etkiyen ve aynı eğilme düzlemi içerisinde bulunan M_x kuvvet çiftinin (momentlerin) oluşturduğu, eğilme düzlemi içinde yeralan tarafsız eksene dik çekme ve basınç gerilmeleridir.

$$\sigma_{e\delta} = \frac{M_x}{J_x} y$$



Şekil 4.5. Eğilme gerilmesi

Burada: M_x eğilme momenti; J_x , x eksenine göre atalet momenti; y , incelenen differansiyel alanın tarafsız eksenine uzaklığıdır. Cisimler iç ve dış kuvvetlerin etkisinde kalırlar.

5. GERİLME - DEFORMASYON İLİŞKİLERİ

Elastik cisimlerin gerilme altında deformasyonlarını kontrol eden parametrelere **elastik parametreler** denir. Kayaçlardaki deformasyon bu parametrelere bağlıdır. Bunlar ;

Elastisite modülü

Poisson oranı

Kayma modülü

Kompressibilite (hacimsel sıkışma) modülü.

5.1. Elastisite modülü (E)

Hooke kanununa göre mükemmel elastik cisimlerde deformasyon gerilmenin lineer bir fonksiyonudur. Elastisite modülü kayalarda tek eksenli basınç deneyi ile belirlenir. Deney sırasında uygulanan yük manometreden okunurken, deformasyonlar dial gauge veya strain gauge den okunur. Poisson oranının belirlenmesi için eksenel deformasyonun yanında yanıl deformasyonun da okunması gerekir. En hassas ölçümler strain gauge (elektriksel yöntemle) yapılır.

Elastisite (Young) Modülü

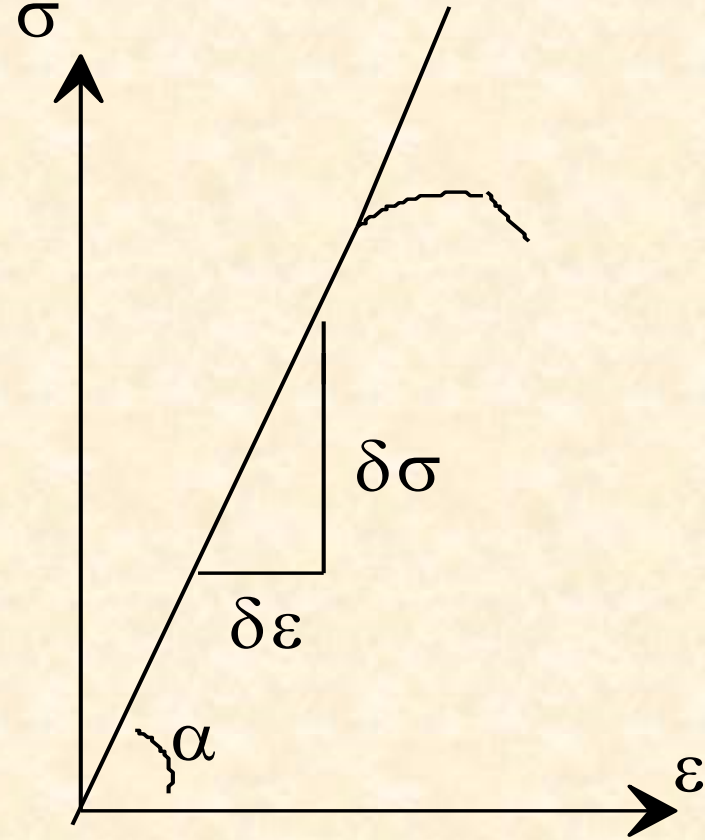
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\sigma = E \varepsilon,$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$E = \tan \alpha$$

$$E = \frac{\delta \sigma}{\delta \varepsilon}$$



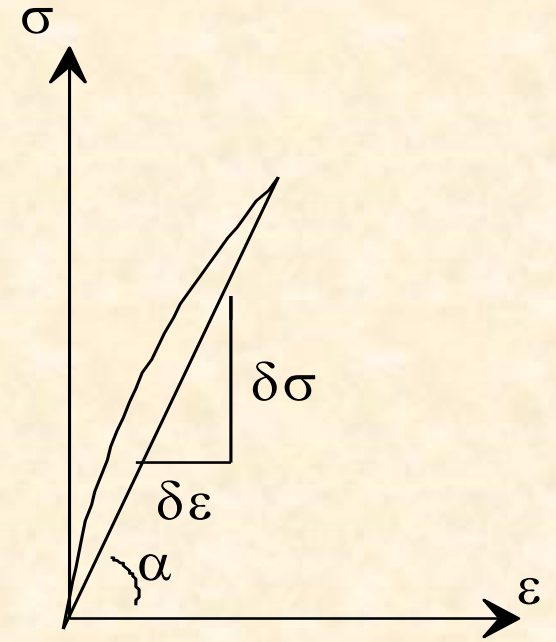
Şekil 5.1. Kayada gerilme-deformasyon ilişkisi

5.1.1. Sekant (kiriş) elastisite modülü

Cisim elastik ancak mükemmel elastik değildir. Sekant elastisite modülü kayacın geniş bir gerilme bölgesinde ortalama bir davranışı için kullanılır.

$$E = \frac{\delta\sigma}{\delta\varepsilon}$$

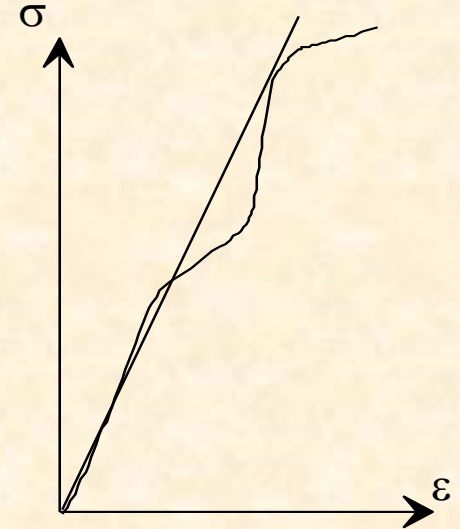
Şekil 5.2. Sekant (kiriş) elastisite modülü



5.1.2. Tanjant elastisite modülü

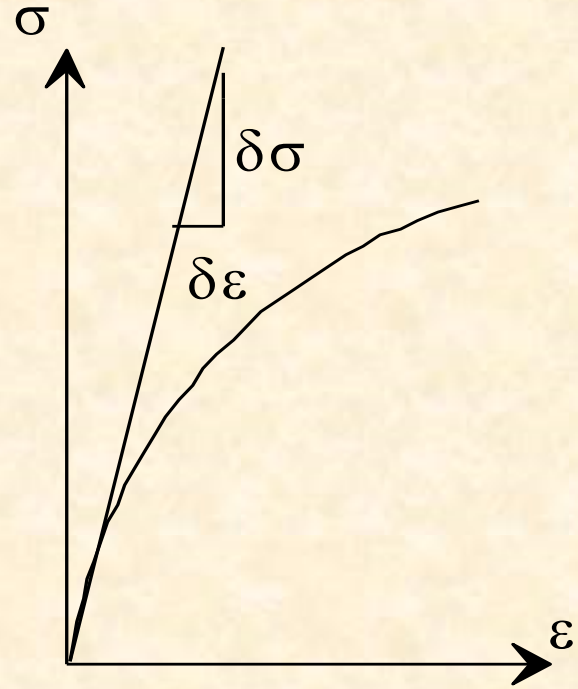
Herhangi bir gerilme için çizilen teğetin eğimi tanjant (teğetsel) elastisite modülünü verir.

Şekil 5.3. Tanjant (teğetsel) elastisite modülü



5.1.3. Başlangıç elastite modülü

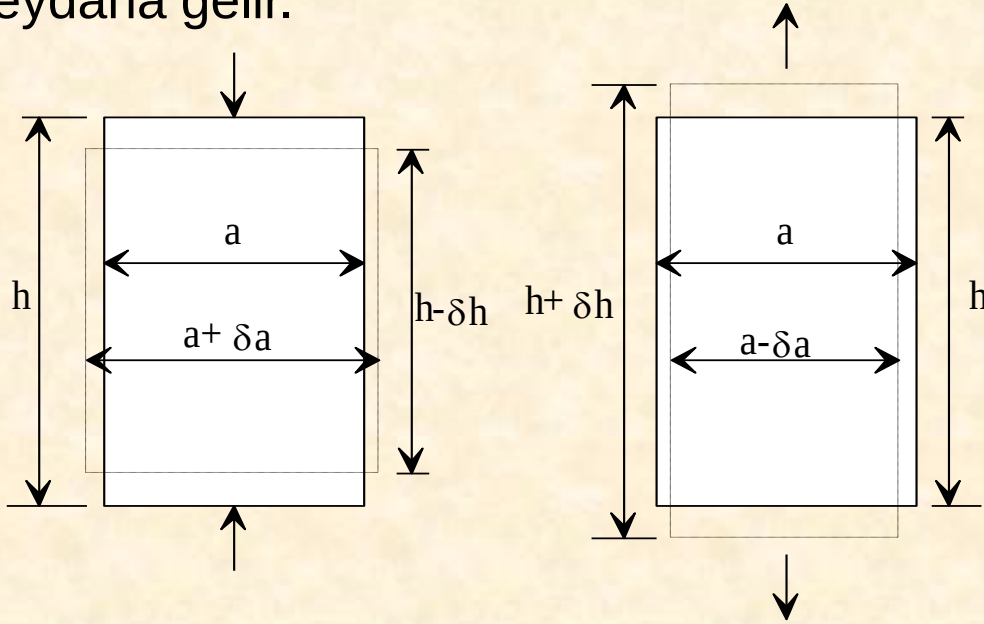
σ - ϵ eğrisinin başlangıç kısmına çizilen teğetin eğimidir. Bu elastisite modülü kazılabilirlik için önemlidir.



şekil 5.4. Başlangıç elastisite modülü

5.2. Poisson Oranı (μ)

Basınç ve çekme kuvvetleri ile kayalarda eksenel ve yanal şekil değişikliği meydana gelir.



$$\varepsilon_2 = -\mu \varepsilon_1$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Şekil 5.5. Basınç ve çekme kuvveti altındaki deformasyonlar

Çizelge 5.1. Basınç ve çekme kuvveti altındaki deformasyon oranları

	Çekme	Basınç
Eksenel şekil değiştirme	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h} (\text{uzama})$	$\varepsilon_1 = -\frac{\Delta h}{h} (\text{kısalma})$
Yanal şekil değiştirme	$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta a}{a} (\text{daralma})$	$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a}{a} (\text{genileşme})$

5.3. Kayma modülü (rijidite modülü, G)

N normal σ bileşeni gerilmesini, kayma kuvveti adını alan T teğetsel bileşeni ise kesit düzlemi için τ kayma gerilmesini meydana getirir.

$$\tau = \frac{T}{A} \quad T = \tau A$$

$\alpha = 45^\circ$ için kayma gerilmeleri maksimumdur ve

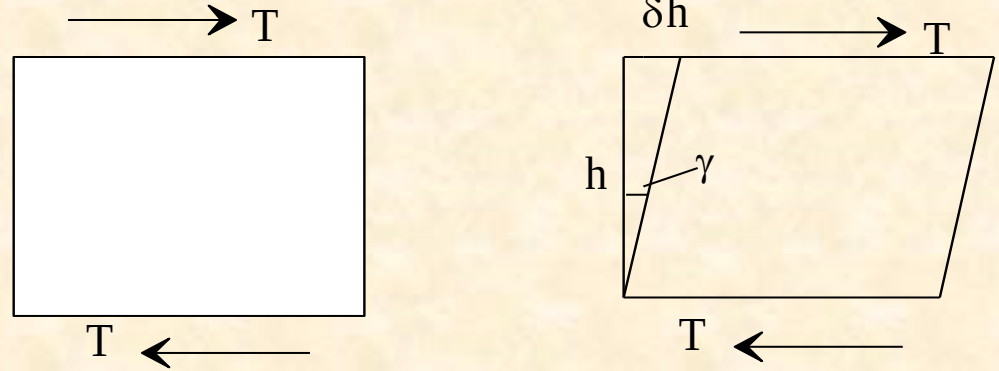
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \quad \text{değerine eşit olur.}$$

Kayma kuvveti bir cisim üzerine etkidiği zaman yukarıdaki Şekil.5.6 da görüldüğü gibi şekil değişikliği meydana gelir. Yani boyutlar değişmemekle beraber açılar bozulur ve 90° lik açılardaki γ değişimi gözönüne alınır.

Radyan cinsinden ifade edilen çok küçük bir açı olan γ değeri;

$$\gamma \cong \tan \gamma = \frac{\Delta h}{h} \quad \text{olup,}$$

e gibi boyutsuzdur.



Şekil 5.6. Kayma kuvveti altındaki şekil değişikliği

Kayma gerilmesi altındaki şekil değiştirmelerde, gerilmenin belli bir değerine kadar, aksenal şekil değiştirmeler gibi Hooke kanununa tabidir. Kaymadaki şekil değişikliği kendilerini meydana getiren kayma gerilmeleri ile orantılıdır.

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad \text{veya} \quad \tau = G\gamma \quad \text{dır.}$$

G kayma modülü olup kayacın cinsine bağlıdır. Birimi gerilmenin birimine eşittir (kg/cm², N/mm², kN/m², MN/m²).

Elastisite modülü, poisson oranı ve kayma modülü arasında aşağıdaki ilişki vardır.

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

5.4. Kompressibilite

İlk hacmi V olan bir cisme gerilme uygulandığı zaman Δv kadar bir deformasyon meydana geldiği kabul edilirse,

$$K = \frac{\Delta \sigma}{\Delta v} \quad \text{gibi bir bağıntı vardır.}$$

$$(V_0 - V = \Delta v$$

K = Kompressibilite (Hacimsel elastisite modülü)

6. CİSİMLERİN MEKANİK DAVRANIŞ TÜRLERİ

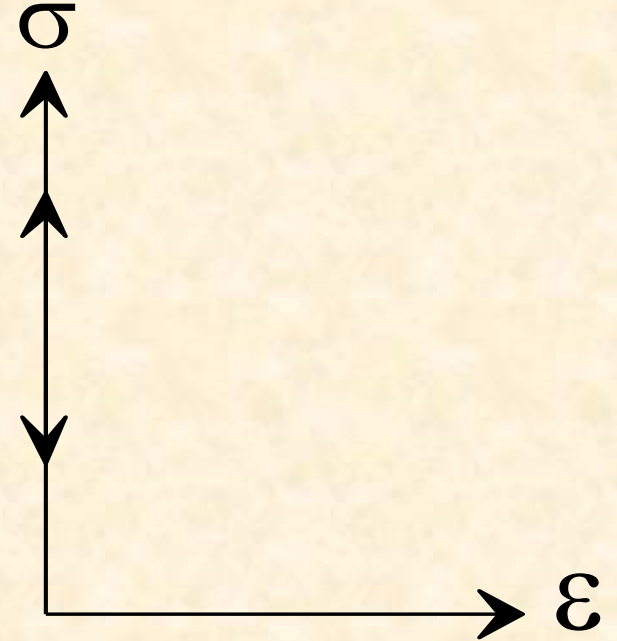
Kuvvetler altındaki cisimler beş şekilde davranış gösterir. Bu davranışlar;

1. Rijit
2. Elastik
3. Plastik
4. Viskoz
5. Karışık

6.1. Rijit davranış

Bir yük altındaki katı davranıştır. İdeal rijit cisimlerde ideal gerilmeyle hiç bir deformasyon meydana gelmez ve şekil değişikliği olmaz.

σ_1 için $\varepsilon = 0$ ve σ_n için $\varepsilon = 0$ dır.

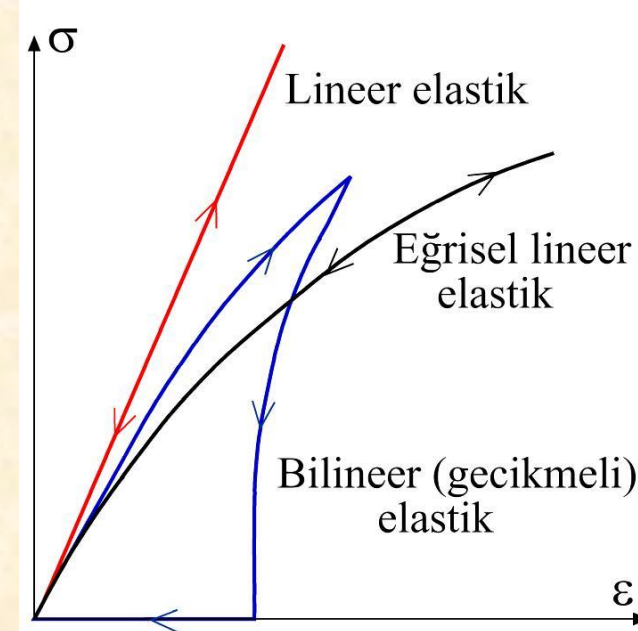


Şekil 6.1. Rijit davranış

6.2. Elastik davranış

Mükemmel elastik cisimlerde , nın lineer bir fonksiyonudur. Elastik sınıra kadar lineer ilişki ile elastik davranış, bu noktadan itibaren plastik davranış başlar. Plastik davranış bölgesine girmiş bir cisim veya kayaya yük uygulanması devam ederse kırılma meydana gelir.

Elastik davranışta meydana gelen şekil değişikliği geriye dönüşlü olmasına karşılık, plastik davranıştaki şekil değişikliği kalıcıdır. Elastik davranış gösteren cisimlere gevrek cisimler denir. Cisimler elastik bölgede bir miktar plastik davranış da gösterebilmektedir.

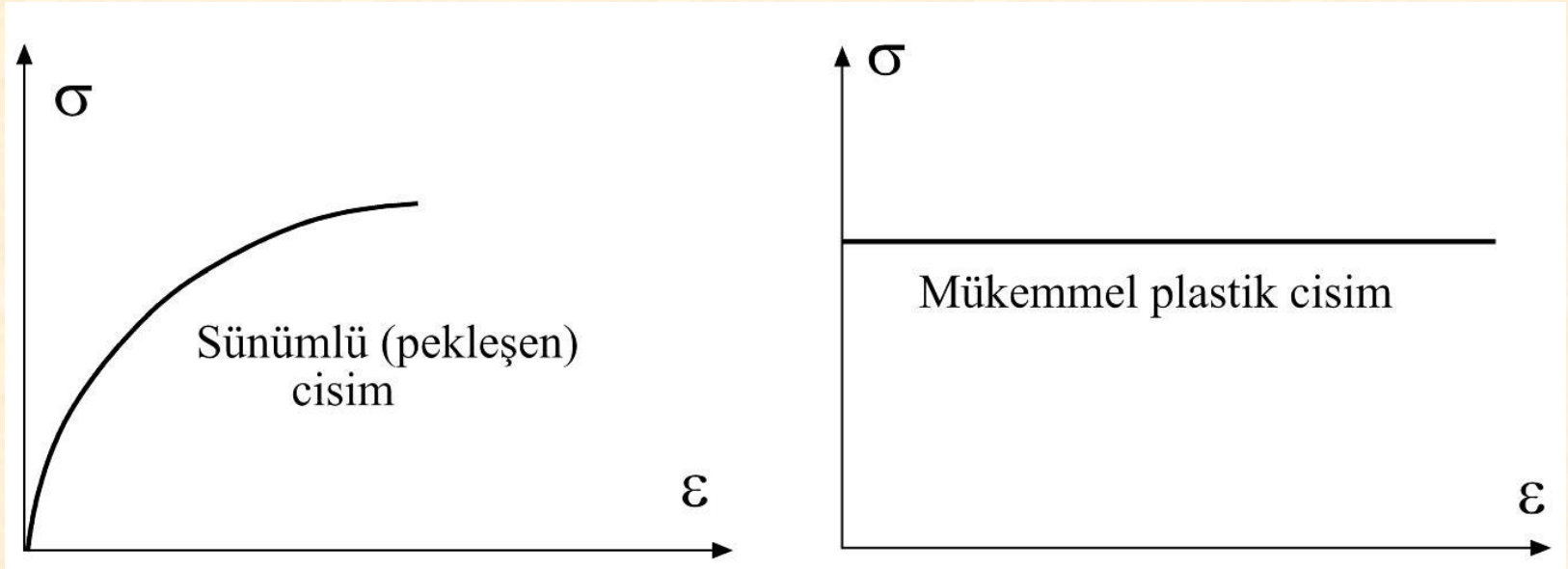


Şekil 6.2. Elastik davranış türleri

6.3. Plastik davranış

Elastik sınırın aşılması ile plastik davranış başlar. σ gerilmesi kaldırıldığı zaman şekil değişikliği ortadan kalkmaz. Uzun süre akma gösteren plastik cisimlere sünümlü (pekleşen) cisimler denir.

Gerilmenin sonlu bir değeri için σ nın sabit kalması halinde, deformasyonun sürekli arttığı cisimlere mükemmel plastik cisimler denir. Zamandan bağımsız olarak düşünüldüğünde viskoz davranışın etkisi de plastiktir.



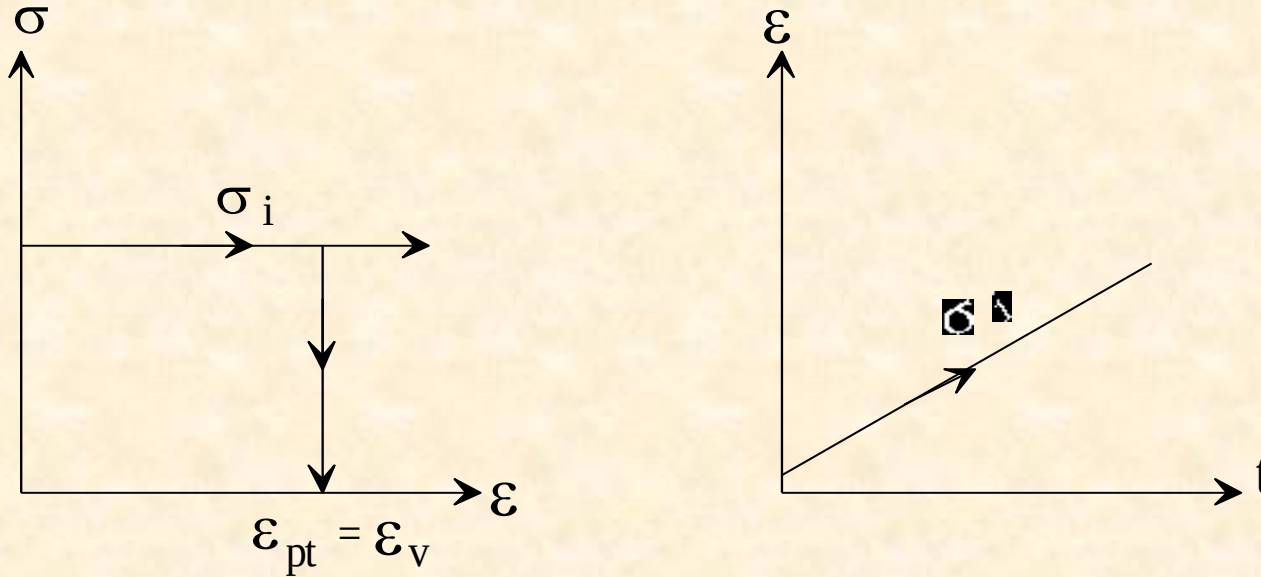
Şekil 6.3. Plastik davranış türleri

6.4. Viskoz davranış

Sabit gerilmeler altında ve zamanla sıvıya benzer özellikteki kalıcı deformasyonlardır. Akışkan ile katı cisim arasında yer alır. Viskoz davranış gösteren cisimler kendi ağılıklarıyla zamana bağlı şekil değiştirirler.

$\sigma_i = \text{sabit iken, } \epsilon = \epsilon f(t)$ diyagramları da çizilir.

$\epsilon_{\text{spt}} = \text{Zamana bağılı olarak plastik boy değişimi}$



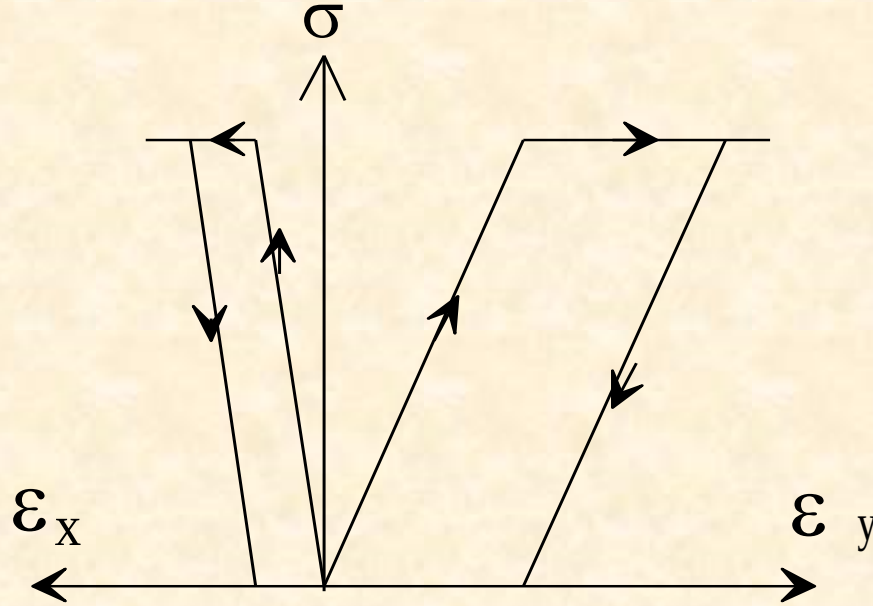
Şekil 6.4. Viskoz davranış

6.5. Karışık tip davranışlar

Rijit, elastik, plastik veya viskoz davranışların bir kısmının veya tümünün bir arada görüldüğü davranışlardır. Başlıcaları aşağıda verilmiştir.

6.5.1. Elasto-plastik

Cisme gerilme uygulandığında önce ideal elastik sonra plastik davranış gözlenir. Gerilmenin kaldırılması ile elastik davranış geriye döner, plastik davranış kalıcı olur.

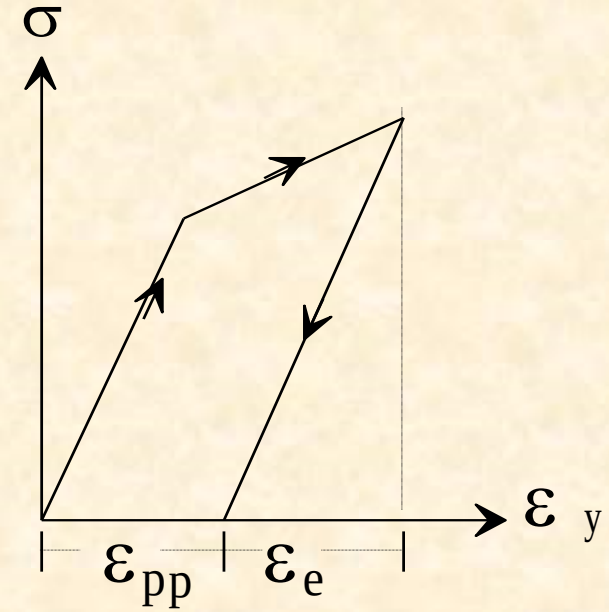


Şekil 6.5. Elasto-plastik davranış

6.5.2. Pekleşen (ideal olmayan) elasto-plastik

Elastik deformasyonlardan sonra, artan gerilmeler altında plastik deformasyonların meydana gelmesi ve boşaltma sırasında elastik kısmın geri dönmesidir.

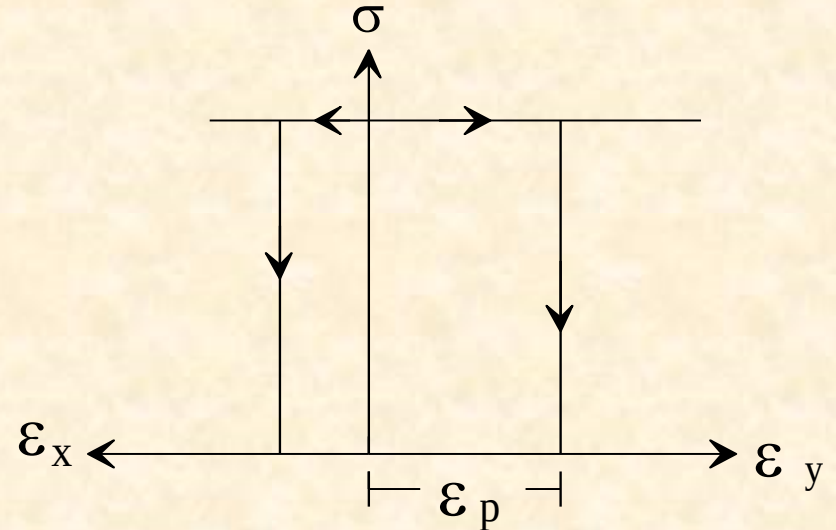
Şekil 6.6. Pekleşen (ideal olmayan) elasto-plastik davranış



6.5.3. Rijit plastik

Elastik davranış göstermeden belirli bir yüklemeden sonra aniden plastikleşen cisimlerin davranışdır.

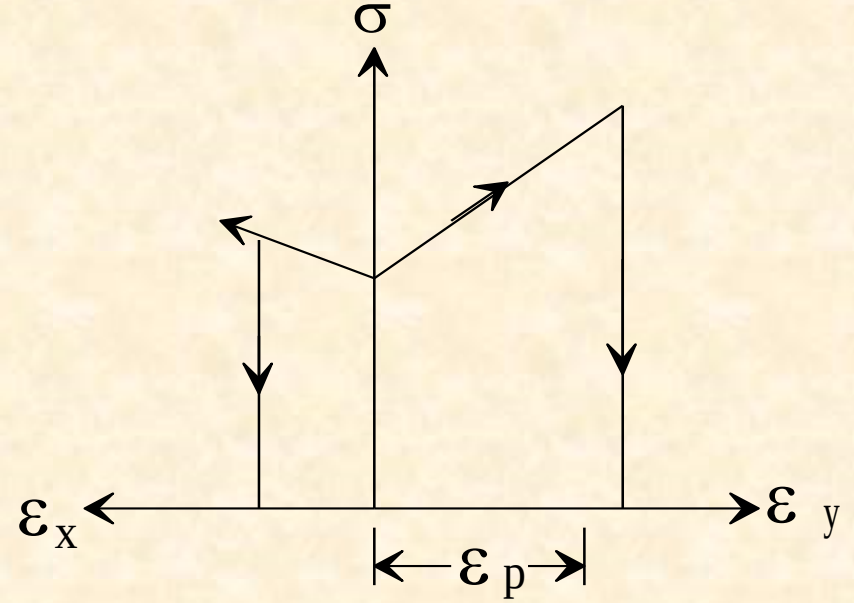
Şekil 6.7. Rijit plastik davranış



6.5.4. Pekleşen rijit plastik

Rijit plastikten sonra gerilme artışı ile meydana gelen plastik davranıştır.

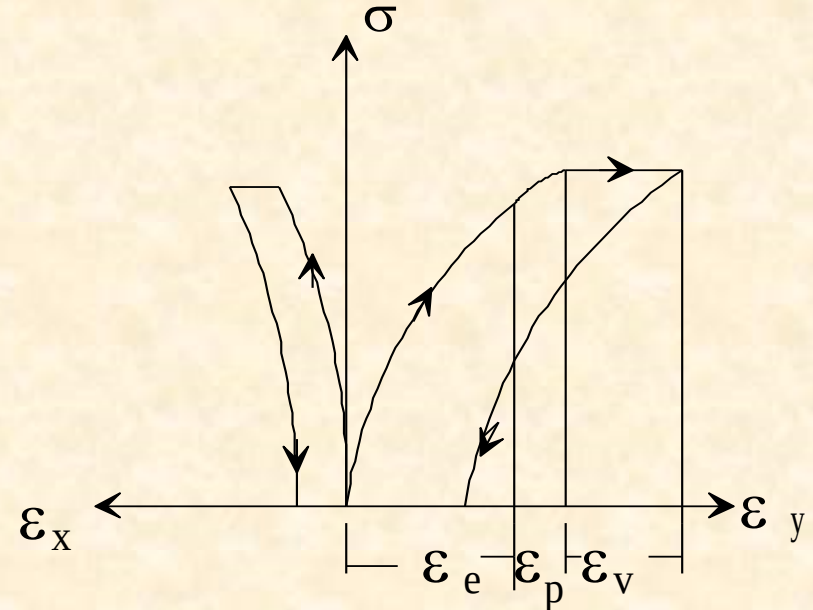
Şekil 6.8. Pekleşen rijit plastik davranış



6.5.5. Elasto-plasto-viskoz davranış

Önce zamandan bağımsız olarak elastik, sonra plastik davranış gösteren bir cismin daha sonra viskoz deformasyon yapmasıdır. Zamanla oluşan bu deformasyonlar artabilir veya giderek azalabilir.

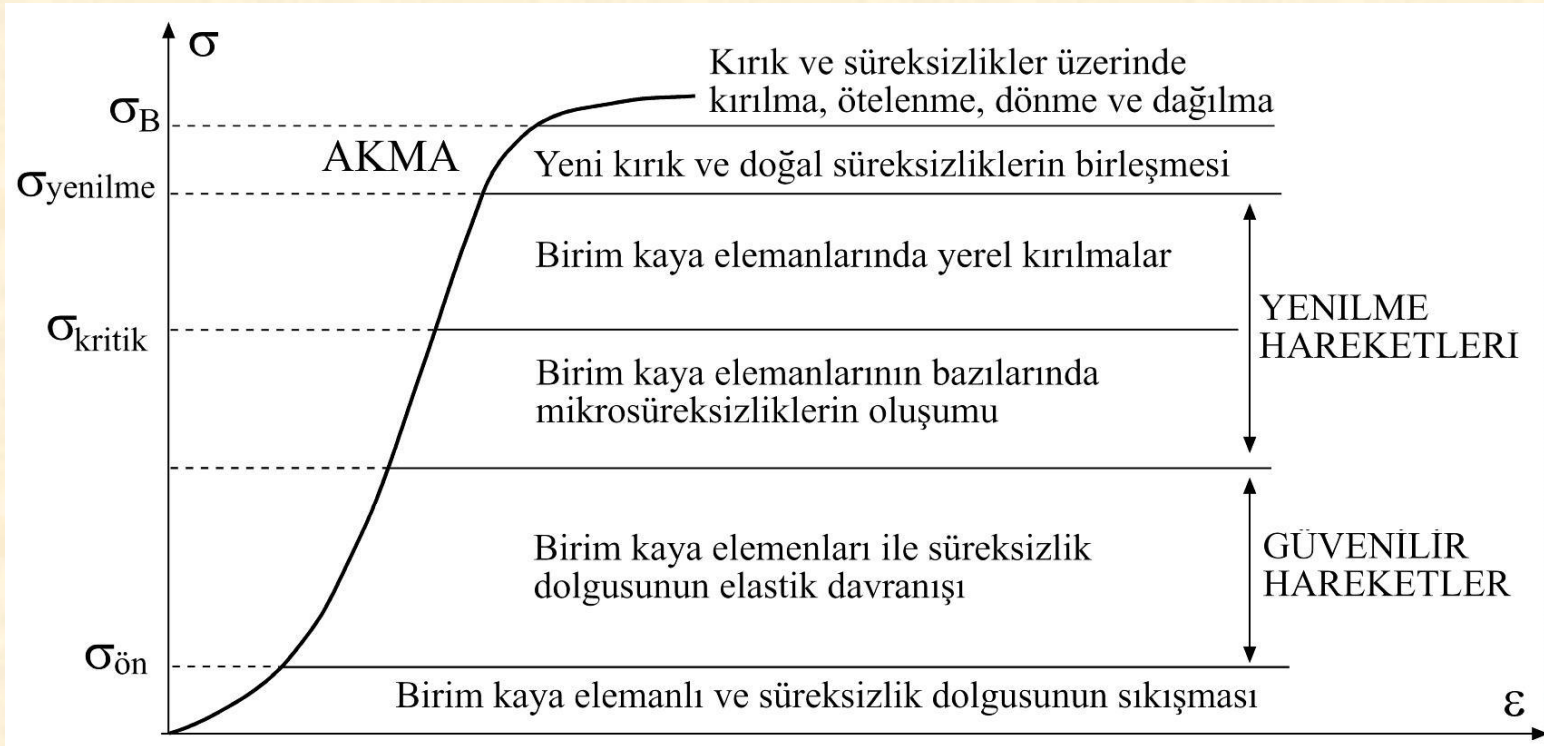
Şekil 6.9. Elasto-plasto-viskoz davranış



8. KAYADA YENİLME ŞARTI

8.1 Kayanın yenilme mekanizması

Kaya, tek eksenli basınca maruz kaldığında sırasıyla güvenilir hareketler, yenilme hareketleri, akma ve sonuçta kırılma ve dağılma olmak üzere dört safhada kırılmaya uğrar. Kayanın yenilme mekanizması, tek eksenli gerilme durumundaki deformasyon ve safhaları Şekil 8.1 de verilmiştir.

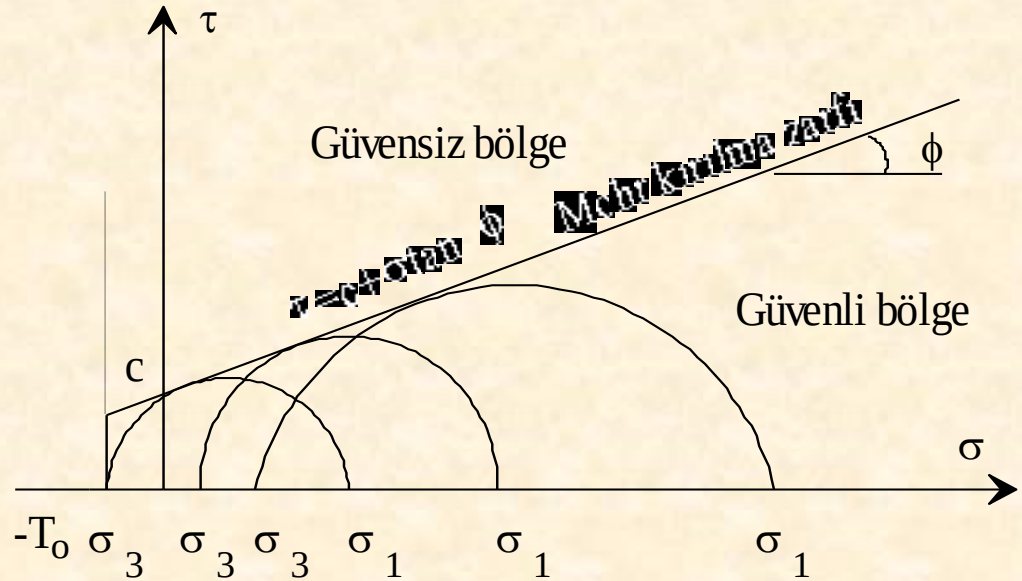


Şekil 8.1. Basınç altındaki kayanın yenilme mekanizması

8.2. Mohr-Coulomb kırılma (yenilme) şartı

Üç eksenli gerilmede yanal basınç arttıkça, asal gerilmede artar. Asal gerilme σ_1 in yanal gerilme σ_3 ile değişimi **kırılma kriteri** olarak bilinir. En basit olanı ve çok bilineni Şekil 39 da görülen Mohr-Coulomb kriteridir. Mohr dairelerine çizilen teğet kırılma zarfını meydana getirir (Şekil 8.2).

Şekil 8.2. Mohr-Coulomb kırılma kriteri



Kırılma aşağıda eşitlik ile ifade edilen şartlarda olmaktadır.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Bu eşitlikte τ kayma gerilmesini, c kohezyonu, σ normal gerilmeyi ve ϕ içsel sürtünme açısını ifade etmektedir.

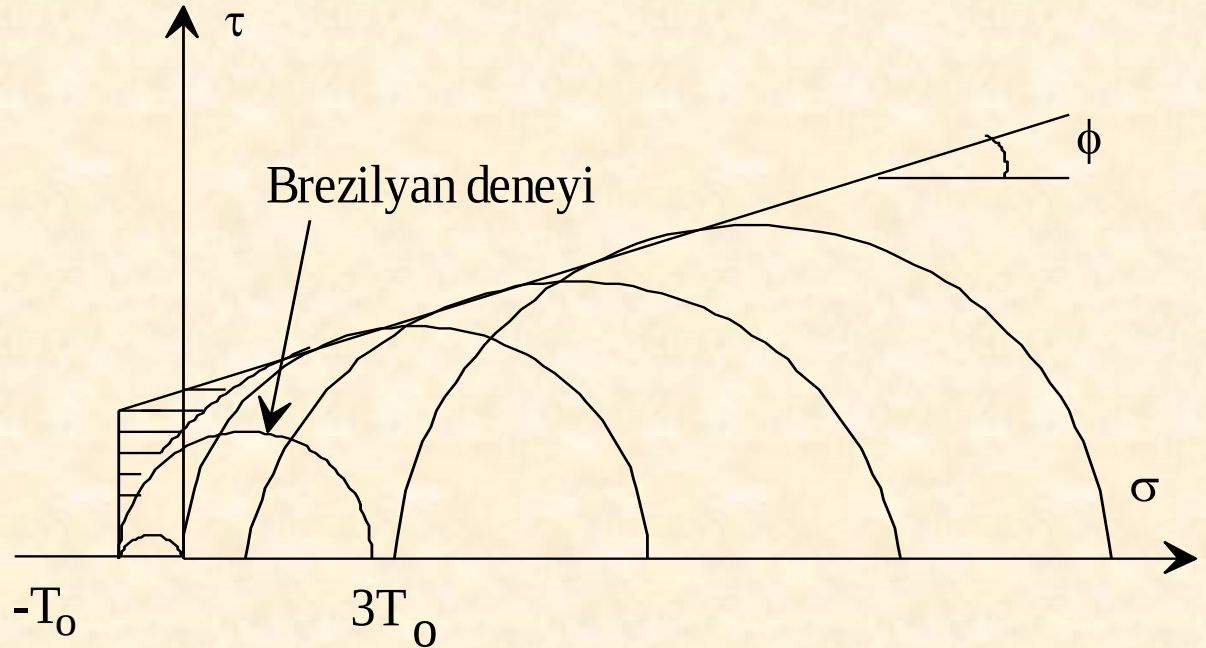
Maksimum yüklemdeki Mohr-Coulomb kriteri;

$$\sigma_1 = q_u + \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

Burada q_u , tek eksenli basma dayanımı, σ_1 , asal gerilme, σ_3 , yanal basınç ve ϕ içsel sürtünme açısını ifade etmektedir (Şekil 8.3). Tek eksenli basma dayanımı ile kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasında ise

$$q_u = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

gibi bir bağıntı vardır.



Şekil 8.3. Çekme bölgesindeki Mohr-Coulomb kriteri ile deneysel zarfın karşılaştırılması. Taralı bölgede, gerilme Mohr-Coulomb kriteri ile elde edilen çekme gerilmesinden daha yüksektir.

Suyun etkisi

Efektif gerilme toplam gerilme ile boşluk suyu basıncı arasındaki farka eşittir.

$$\sigma' = \sigma - u$$

Deviyatör gerilme boşluk suyu basıncından etkilenmez.

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma_1 - u)(\sigma_3 - u) = \sigma_1 - \sigma_3$$

Doygun kaya için;

$$\sigma'_1 = q_u + \sigma'_3 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = q_u + \sigma'_3 \left[\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right]$$

Deviyatör gerilme boşluk basıncından etkilenmediğinden;

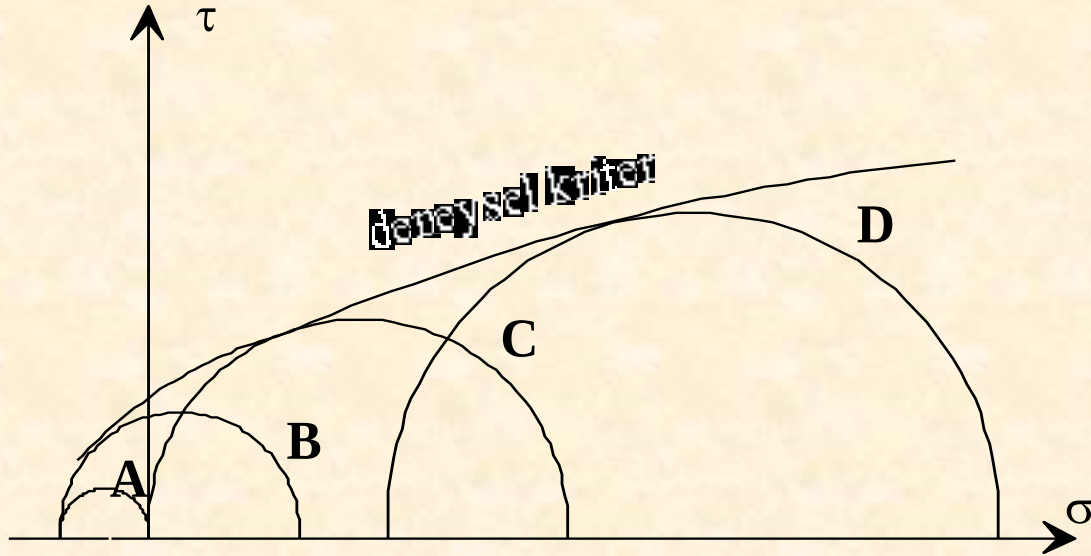
$$\sigma_1 - \sigma_3 = q_u + (\sigma_3 - u) \left[\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right]$$

Kayanın, asal gerilmesi, yanıl basıncı, tek eksenli basınç direnci ve içsel sürtünme açısı bilindiğinde boşluk basıncı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$u = \sigma_3 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - q_u}{\tan^2(45 + \phi / 2) - 1}$$

8.3. Deneysel kırılma şartı

Mohr-Coulomb kriteri laboratuvardaki deneylerle elde edilen değerlerle kolayca hesaplanabilmekte ve uygulama için kesin sonuçlar verebilmektedir. Ancak, Hook (1968), Jaeger ve Cook(1976) Şekil 8.4 de görüldüğü gibi kırılma zarfının tamamen doğru olmadığını, çoğu kayalar için doğru ve parabol şeklinde uzandığını göstermiştir. Griffith, çekme gerilmesi bölgesindeki kırılmanın parabol şeklinde olduğunu söylemiştir.



Şekil 8.4. Deneysel kırılma kriteri Mohr dairelerinden elde edilen zarf ile tanımlanmıştır.
A- doğrudan çekme, B- Brezilyan, C- tek eksenli basma ve D- üç eksenli basma.

Uygulamada, deneysel kırılma zarfı, her kaya türüne uyarlanan en uygun kırılma kriteridir. Çok amaçlı tatmin edici bir formül çekme gerilmesi bileşeni, $\sigma_3 = -T_0$ ve kuvvet kanunu yardımı ile elde edilebilir (Bienieawski, 1974):

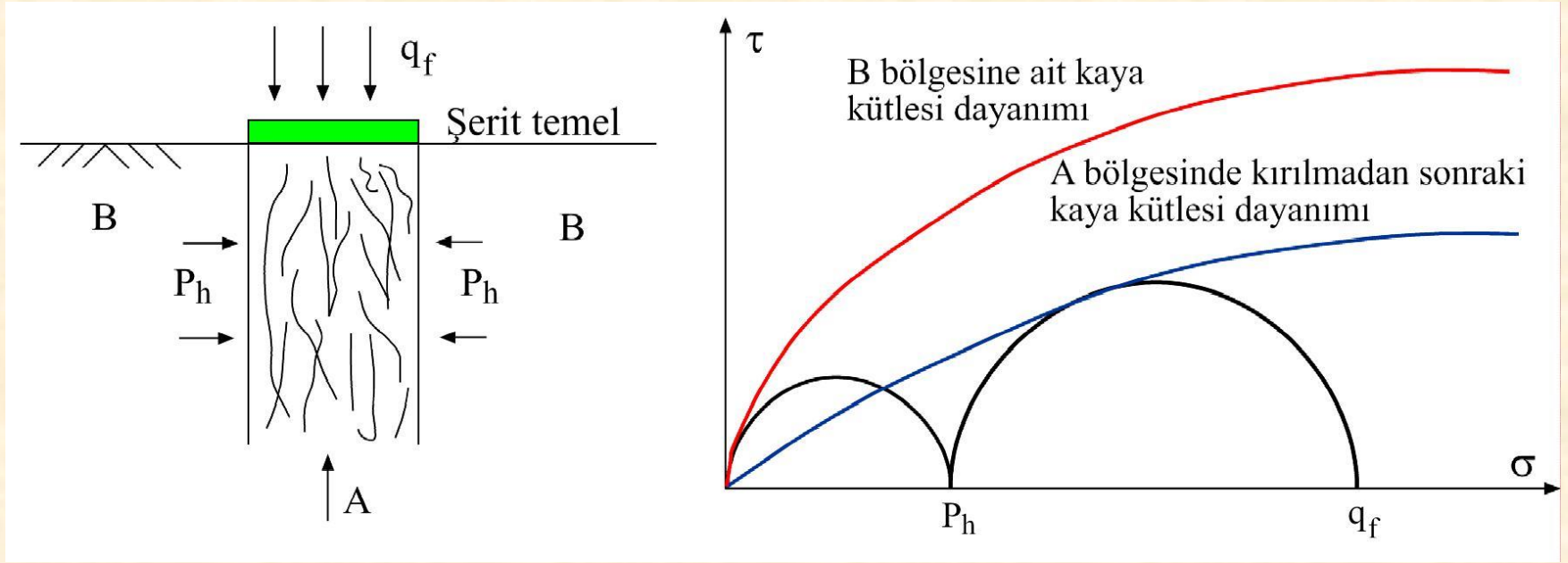
$$\frac{\sigma_1}{q_u} = 1 + N \left(\frac{\sigma_3}{q_u} \right)^M$$

N ve M, noktalar kümesinden elde edilen uygun eğri ile tayin edilebilir

$$\left(\frac{\sigma_3}{q_u}, \frac{\sigma_1}{q_u} - 1 \right)$$

10. KAYANIN TAŞIMA GÜCÜ

Homojen ve çatlaklı bir kaya kütesinin taşıma gücü, temel çevresindeki kaya kütesinin tek eksenli basma dayanımından daha yüksektir ve tek eksenli basma dayanım en düşük sınır olarak alınabilir. Kayanın içsel sürtünme açısı ϕ , tek eksenli basma dayanımı q_u olarak alınırsa Şekil 10.1 de gösterildiği gibi taşıma gücü (Goodman 1989);



Şekil 10.1. Kayada taşıma gücü analizi

$$q_f = q_u (N_\phi + 1) \quad (10.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada;

$$N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{dir.} \quad (10.2)$$

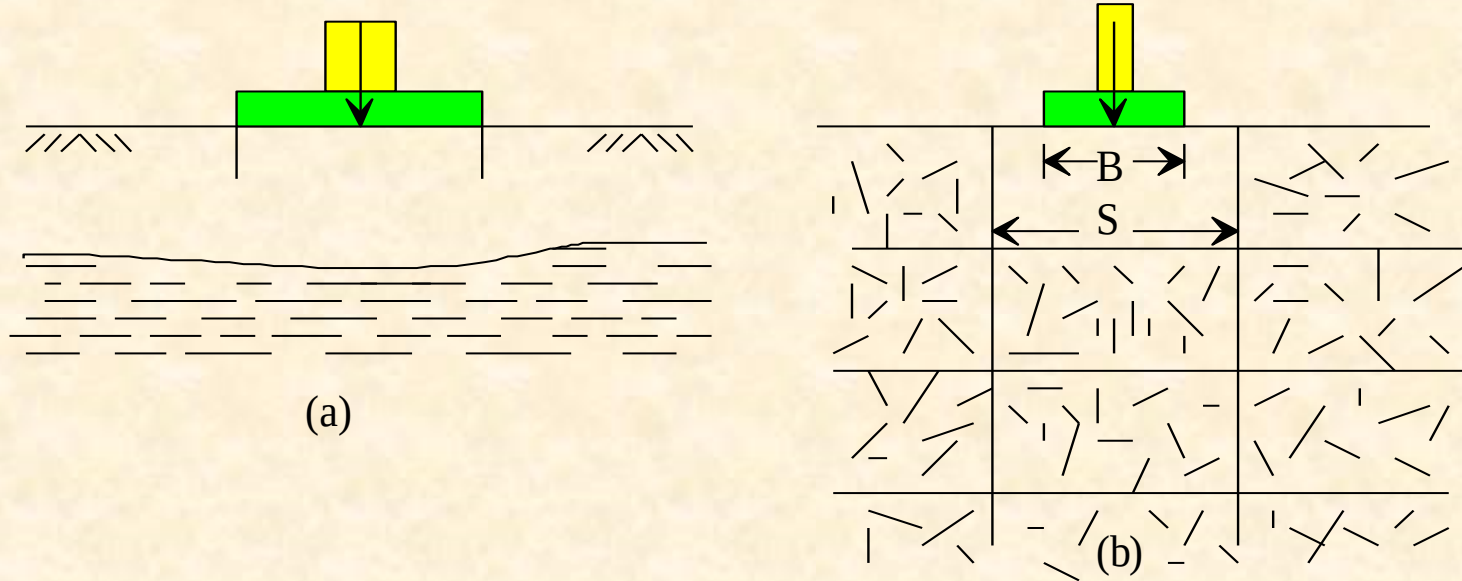
Farklı ortamlar için özel analizler yapılması gerekir. Şekil 10.2 de temel, ince ve kısmen sert kumtaşı altındaki çok yumuşak kil taşı üzerine gelmektedir. Uygulanan yükün etkisi ile üstteki kumtaşı kırılacak ve yük büyük oranda kiltası üzerine gelecektir. Bu nedenle kumtaşı tabakasının taşıma gücü önemlidir. Aksi taktirde alttaki tabakanın özellikleri dikkate alınarak taşıma gücü hesaplanır. Daha sıkı tabakanın direnci, kalın bir kiriş olduğu kabul edilerek analiz edilebilir.

Şekil.10.2 de çatlak açıklığı eşit, çatlaklar arası mesafesi S olan bir blok üzerindeki temel ele alınmıştır. Böyle bir durum örneğin ayrıışmış granitte görülebilir. Eğer temel genişliği B ve birbirine eşit olan çatlakların açıklıkları S ise kaya temelinin taşıma gücü, yaklaşık olarak asal yük altındaki gerilmesine yani kayanın tek eksenli basma dayanımına (q_u) eşittir.

Eğer ayak daha küçük boyuttaki bir çatlak bloğun üzerinde ise taşıma gücü, süreksiz ve homojen kayanın taşıma gücü ile maksimuma ulaşabilir. Yanal gerilmeye uğrayan açık çatlaklı kaya kütlesi için sınır şartları (Goodman 1989);

$$q_f = q_u \left\{ \frac{1}{N_\phi - 1} \left[N_\phi \left(\frac{S}{B} \right)^{(N_\phi - 1)/N_\phi} - 1 \right] \right\} \quad (10.3)$$

(1) ve (3) nolu eşitliklerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile taşıma gücünün üst sınırın S/B oranı (1 ile 5) ve ϕ ile arttığını göstermiştir.



Şekil 10.2. Tabakalı kayalarda (a) ve düşey yönde açık çatlaklı kayalarda temeller

11. KAYAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kayaçları etkileyen faktörler başlıca iki gruba ayrılır.

Çevre faktörleri

Kaya faktörleri

11.1.Çevre faktörleri.

Çevre basıncı

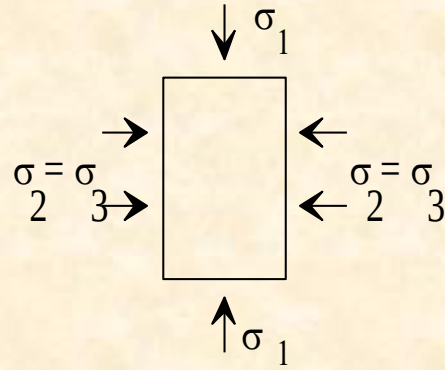
Boşluk suyu basıncı

Sıcaklık

Zaman

11.1.1. Çevre basıncı

Kayaçlara çevresinden uygulanan σ_2 ve σ_3 yanal basınçlarıdır. Uygulanan jeolojik yük ile meydana getirilen basınçlardır. Bazı kayaçlar tek eksenli basınç deneyinde gevrek davranış gösterdikleri halde, yanal basınç uygulandığı zaman asal gerilmelerin büyüdüğü ve kayaların plastikleştiği gözlenmiştir. Bu durum yerkabuğu içine doğru inildikçe σ_1 ve σ_3 lerin artması nedeniyle kayaçların plastikleştiğini açıklamaktadır. Yanal basınç asal gerilmeyi, maksimum basınç gerilmesini ve sünümlülüğü artırır. Bu nedenle yerkabuğu derinliklerinde kayaçların kırılması güçleşir ve sünümlülük artar.



Şekil 11.1. Yerkabuğunda uygulanan gerilmeler

11.1.2. Boşluk suyu basıncı

Kayaçların oluşumları sırasında veya oluşuktan sonra meydana gelen süreksizlikler ve gözenekler içindeki suyun çevreye yaptığı etkidir. Her noktaya ve her yöne aynı hidrostatik basınç gerilmesi uygular. Boşluk suyu basıncı çevre basıncına ters yöndedir. Boşlukların suyla dolması elastisite modülünü %40 oranında artırır.

$$\sigma = \sigma' + u$$

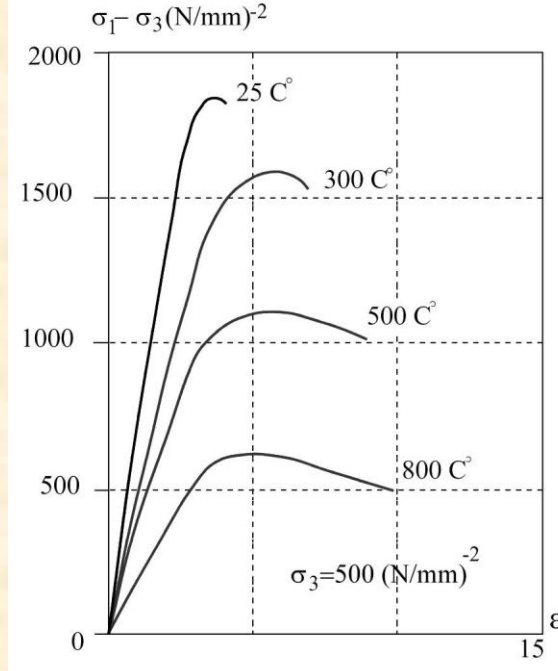
$$\sigma' = \sigma - u$$

Boşluk suyu basıncının artışı ile $\sigma_{\max}$ ve sünümlülük azalır. Gözenekli kayalarda suyun rahatça hareket ettiği durumlarda efektif gerilme denklemi geçerlidir. Ayrıca killi birimlerde su, fiziksel ve kimyasal etki yaptığı gibi c ve ϕ gibi mekanik özellikleri de azaltır. Killi birimler su emdiğinde hacmi genişler, yandaki ve üstteki kayalara ilave yanıl basınç uygular. Jips, anhidrit, kayatuzu, kireçtaşı gibi eriyebilen kayaların basınç mukavemetini düşürür. Hacimsel deformasyon meydana getirir. Serpantinitle suyla temas ettiğinde jelleşir. Bu da basınç dayanımını ve betonla aderans (birbirini tutma) özelliğini azaltır.

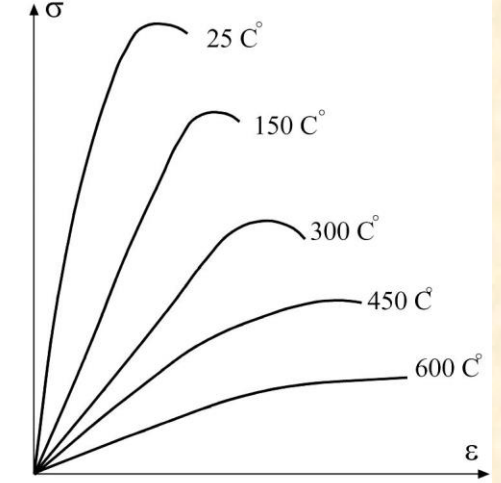
11.1.3. Sıcaklık

Sıcaklık arttıkça kayanın basma dayanımı azalır. Deformasyon miktarı da sıcaklıkla doğru orantılı olarak artar (Şekil 11.2). Sıcaklık arttıkça elastisite modülü azalır (Şekil 11.3)

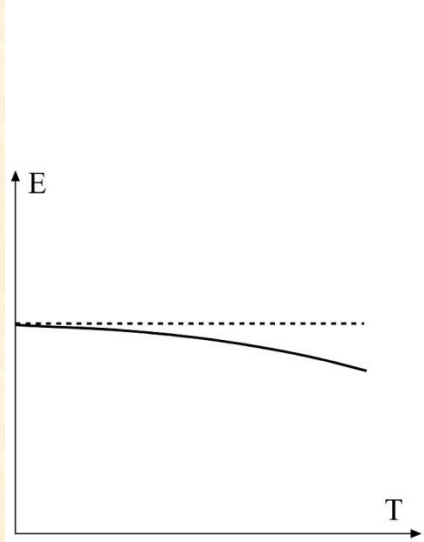
Şekil 11.2. Sıcaklık ile deviyatör gerilme-deformasyon ve gerilme-deformasyon ilişkileri



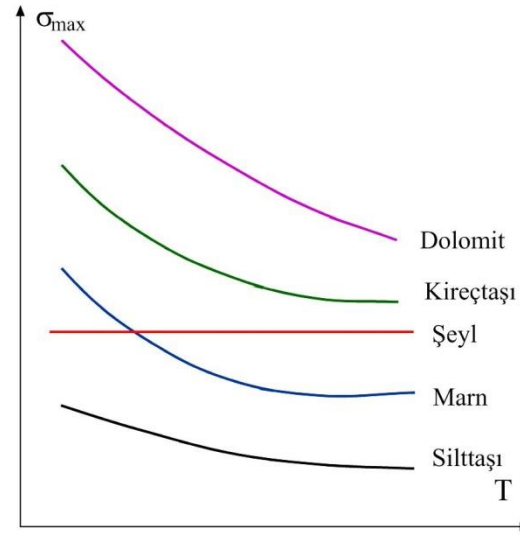
Granitin yüksek sıcaklıklarda deviyatör gerilme-deformasyon ilişkisi (Griggs, 1960)



Sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalır ve sünümlülük artar



Kayalarda sıcaklık arttıkça elastisite modülü azalır

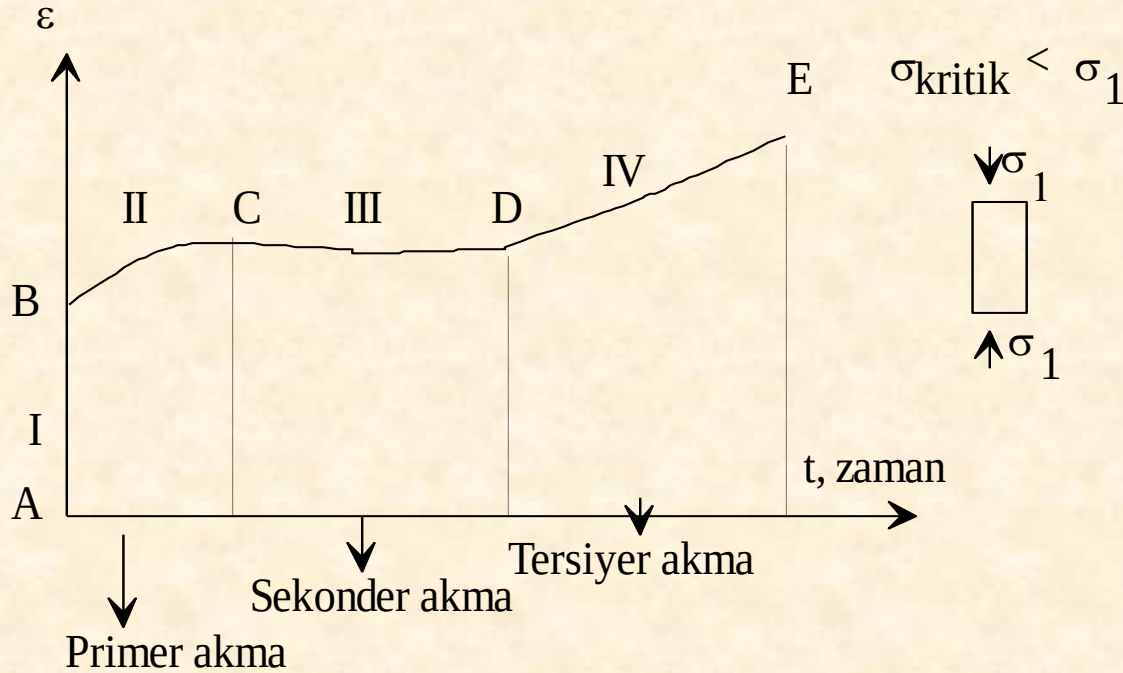


Tortul katablarda maksimum gerilme-sıcaklık ilişkisi

Şekil 11.3. Elastisite modülü-sıcaklık ve maksimum gerilme – sıcaklık ilişkileri

11.1.4. Zaman

Kayaya kritik (elastik sınır) üzerinde bir σ_1 gerilmesi uygulandığında gerilme zaman zaman durdurulmasına rağmen küçük ve elastik olamayan deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu durumda Şekil 11.4 de görüldüğü gibi zamana bağlı deformasyonlar görülmektedir (Şekil 11.4).



Şekil 11.4. Deformasyon ile zaman arasındaki ilişki

I. Lineer elastik davranış bölgesi

II. Geçiş bölgesi

III. Kararlı davranış bölgesi

IV. Hızlı akma bölgesi

Sünme(krip):

Sabit yük altında zamana bağlı olarak deformasyonun artması olayıdır. Belirli bir yüklemenin üzerinde deney sırasında yük sabit tutulursa deformasyonun devam ettiği yükün artırılmasıyla da kırılmaya ulaştığı gözlenir. Deformasyon hızı, gerilme ve elastisite modülünü artırır, sünümlülüğü azaltır. Arazide kayaç davranışlarındaki zamanın etkisi **rheidity** kavramıyla tanımlanır. Rheidity, kayacın viskoz deformasyonunun elastik deformasyonun bin katı olabilmesi için geçen süredir. Bu süre gnays için onbinlerce yıl olmasına karşılık, killerde 15 gün olabilmektedir.

$$\Delta L_{viskoz} = 1000 \Delta L_{elastik}$$

11.2. Kaya Faktörleri

Litoloji

Anizotropi

Hetorejenlik

Süreksizlikler

11.2.1. Litoloji

Kayacın cinsi, minerolojik bileşimi, tane büyüklüğü, dokusu, çimentosu, çimentolanma derecesi, ayrışma özellikleridir.

Minerolojik bileşimin etkisi **mikropetrografik özellik indisi** olarak tanımlanır. Bu indisi hesaplamak için; sondaj karotlarından alınan örneklerden yapılan ince kesitlerde ayrıışmış ve ayrıışmamış minerallerin miktarı polarizan mikroskopla belirlenir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$\text{Mikropetrografik özellik indisi} = \frac{\text{Ayrıışmamış mineral}}{\text{Ayrıışmış, kırılmış mineral}} \times 100$$

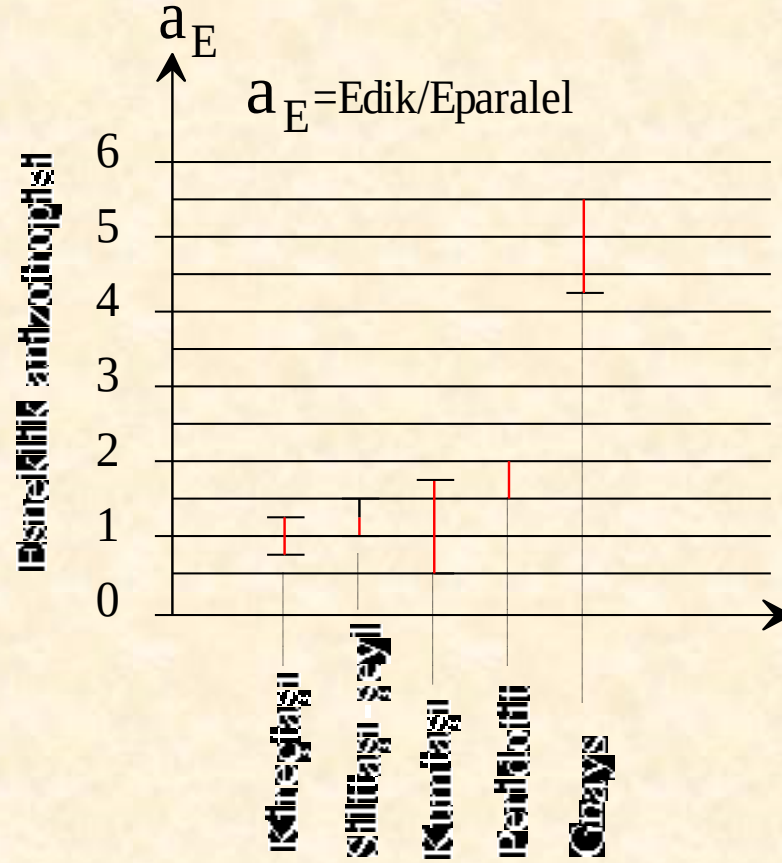
11.2.2. Anizotropi

Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin yönlerle bağlı olarak değişmesine anizotropi denir. Bir veya daha fazla süreksizlik takımı içeren kaya kütlelerinin üzerine etkiyen kuvvetler, kuvvet vektörünün yön ve şiddetine bağlı olarak, kayada farklı deformasyonlar, ötelenmeler ve kırılmalar meydana getirir. Bu süreksiz ortamın, iç dengesindeki bozulmaların (ötelenmelerin ve kırılmanın) başladığı ana kadar, dış ve iç zorlanmalara karşı gösterdiği dirence **kaya dayanımı** adı verilmektedir. Kaya dayanımının yönlerle göre belirlenmesi amacı ile birçok çalışma yapılmıştır (Müller 1958, Sonntag 1958, John 1969 ve Reik 1978). Bu çalışmalarda yalnız asal gerilmelerin konumlarını değil, aynı zaman da asal gerilme oranlarının da ($n=\sigma_3/\sigma_1$) kaya dayanımına etkidiğini göstermektedir. α açısı altında zorlanan kayanın akma sınırına ait anizotropi sayısı;

$$a_{\alpha} = \frac{\alpha_{kayaakma}}{\alpha_{tabakma}}$$

şeklinde tanımlanır.

Bazı kaya türleri için esneklik anizotropisi Şekil 11.5 de verilmiştir.

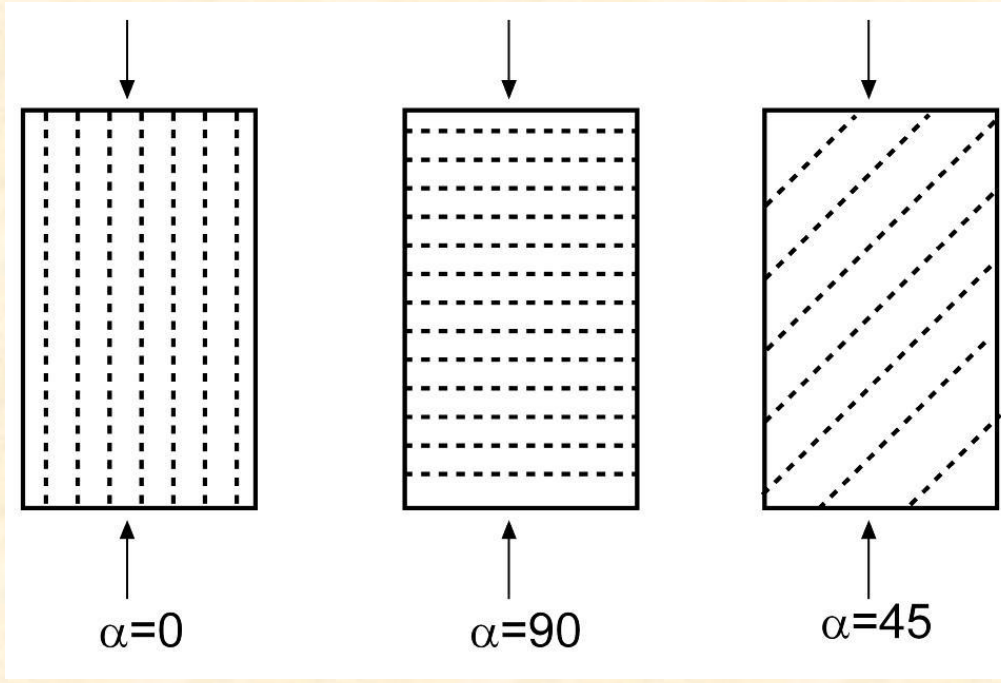


Şekil 11.5. Kaya türleri için esneklik anizotropisi

Peridotit, gnays, kumlu şeyl, siltaşı, kumtaşı ve lamineal ara katkılı kireçtaşlarında daha belirgin olan anizotropinin tabakalaşmaya dik ve paralel doğrultularda elastik katsayılar açısından 0.67 ila 5.43 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Tabakalı yapıdan gelen anizotropinin, özellikle sert ve yumuşak katmanların ardalanması durumunda teorik olarak 25 e çıktığı ve katman kalınlıkları oranına bağlı olarak da, ince katmanların daha yumuşak litolojide olması durumunda 2 ye kadar düşebileceği gözlenmiştir. Esneklik oranlarının 0.3 ila 4 arasında değiştiği hallerde, tabakalı kompleksin ortalama anizotropisinin 1.5 dolayında kaldığı anlaşılmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre asal gerilme oranı arttıkça kayanın anizotropiye bağlı dayanım azalmaktadır. Bu süreksizliklere bağlı dayanımayanım azalması, asal gerilme oranının 4 den küçük olması halinde pek önemli olmamakla birlikte daha yüksek gerilme oranlarında 2.5 ila 5 katına kadar çıkmaktadır. Süreksizlik yüzeylerinin yereldikleri düzlem içindeki paylarını ifade eden ayrılma derecesi küçüldükçe anizotropiye bağlı dayanım azalma oranı düşmektedir.



Şekil 11.6. Anizotrop kayalarda gerilme durumları

11.2.3. Heterojenlik

Kayaçların her noktasında veya her bölümünde farklı özellik göstermesini ifade eden özelliğidir. Kayanın oluşumu sırasında kazanılan özelliğidir. Bu değişiklik kayada farklı ayrışmaya ve farklı sertlikteki kısımların oluşumuna neden olur.

11.2.4. Süreksizlikler

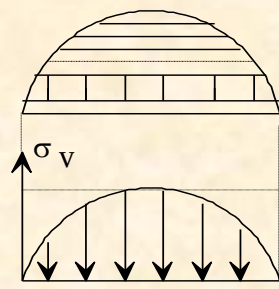
Kayaların oluşumu sırasında veya daha sonra kazandıkları yapı kusurlarıdır. Bunlardan oluşum anındaki süreksizlikler; tabakalanma, laminasyon, lineasyon ve foliasyon yüzeyleridir. Oluşumundan sonra meydana gelen süreksizlikler ise; kıvrım, fay, çatlak, şistiyet yüzeyleri, kırık ve mikrokırıklardır.

Gözle görülüp görülüp görülmeyecek kadar küçük çatlaklara **kırık**, mikroskop ile görülen kırıklara ise **mikrokırık** denir. Yer değiştirmemiş kırıklara **çatlak** adı verilir. Çatlak çekme kuvvetinin etkisi ile meydana gelir. Hareket etmiş kırıklara **fay** denir.

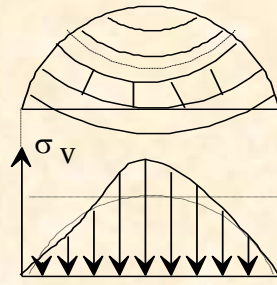
Kayaçların mekanik özellikleri ve davranışları üzerinde süreksizlik durumları litolojiden daha önemlidir. Süreksizliklerin incelenmesinde arazi gözlemlerinin yanında sondajlı ve jeofizik çalışmalar yapılmalıdır. Elde edilen veriler rakamlarla ifade edilmelidir.

12. JEOLJİK YAPININ GERİLME DURUMUNA ETKİSİ

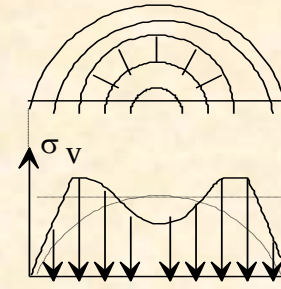
Kıvrımlar, antiklinaller, senklinaller, faylar ve tabakalı tüm yapılar yer kabuğundaki gerilmelerin dağılımında önemli rol oynar. Yeraltı yapılarının yerinin, konumunun, boyutlarının ve geçeceği güzergahın belirlenmesi için gerilmelerin şiddet ve doğrultusunun bilinmesi gereklidir. Aşağıda bazı yapılar altındaki gerilmelere ait örnekler verilmiştir (Şekil.12.1).



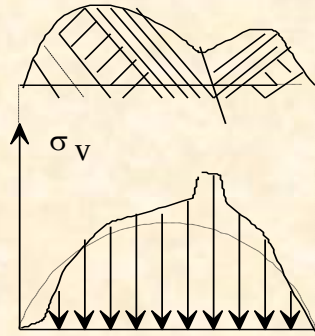
Yatay tabaka



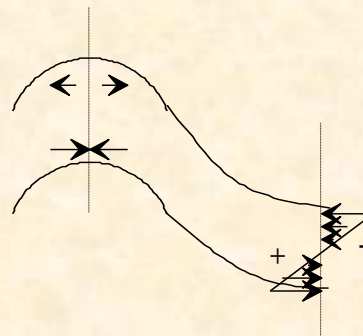
Senklinal



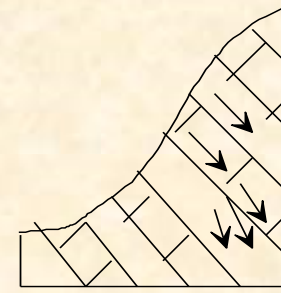
Antiklinal



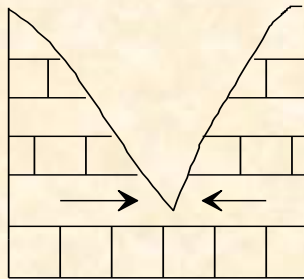
Fay



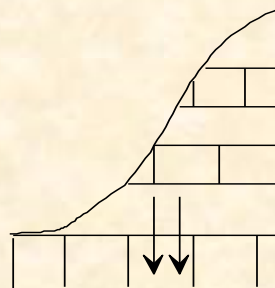
Kıvrım



Deviçine eğimli tabaka



Vadi tabaný



Yatay tabaka



Deviçýna eđimli tabaka

Şekil 12.1. Jeolojik yapının gerilmelere etkisi

Gerilmeler toplam dokanak yüzeylerinden iletilmektedir. Bu dokanak alanı genel süreksizlik yüzeylerinden çok daha küçük olduğundan bu kesimlerde büyük gerilme yığılmaları (yoğunlaşmaları), büyük deformasyonlar, plastikleşmeler ve kırılmalar meydana gelir. Bu nedenle taş ortamdaki dirençlerin daha düşük değerleri kaya ortamlarda kırılmalara neden olabilmektedir.

Aynı zamanda, süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülüğün şekli ve çatlaklı kayanın boyutlarına oranı da kırılma direncini etkilemektedir. Çatlaklı kaya boyutu küçüldükçe pürüzlülüklerin çentik etkisi artmakta, kırıklar kaya içinde kolayca ilerleyerek kayayı hızla parçalayabilmekte ve dolayısıyla kayanın basınç dayanımlarında önemli azalmalar meydana getirmektedir. Kayanın ortasındaki kısımlara göre süreksizliklere yakın bölgelerde önceden daha fazla zorlanma olduğundan dayanım azalmaktadır.

13. TAŞ - KAYA İLİŞKİSİ

Süreksizlik içeren kaya ortamlarda süreksizlik yüzeyleri farklı pürüzlülüklere sahiptir. Bu nedenle kaya yüzeyleri birbirlerine ancak belirli noktalarda değmektedir. Bunun sonucu gerilme dağılımı, çatlak cisimlerinin birinden ötekine aktarılırken homojen kalmamakta ve gerilmenin şiddet ve yönleri değişmektedir.

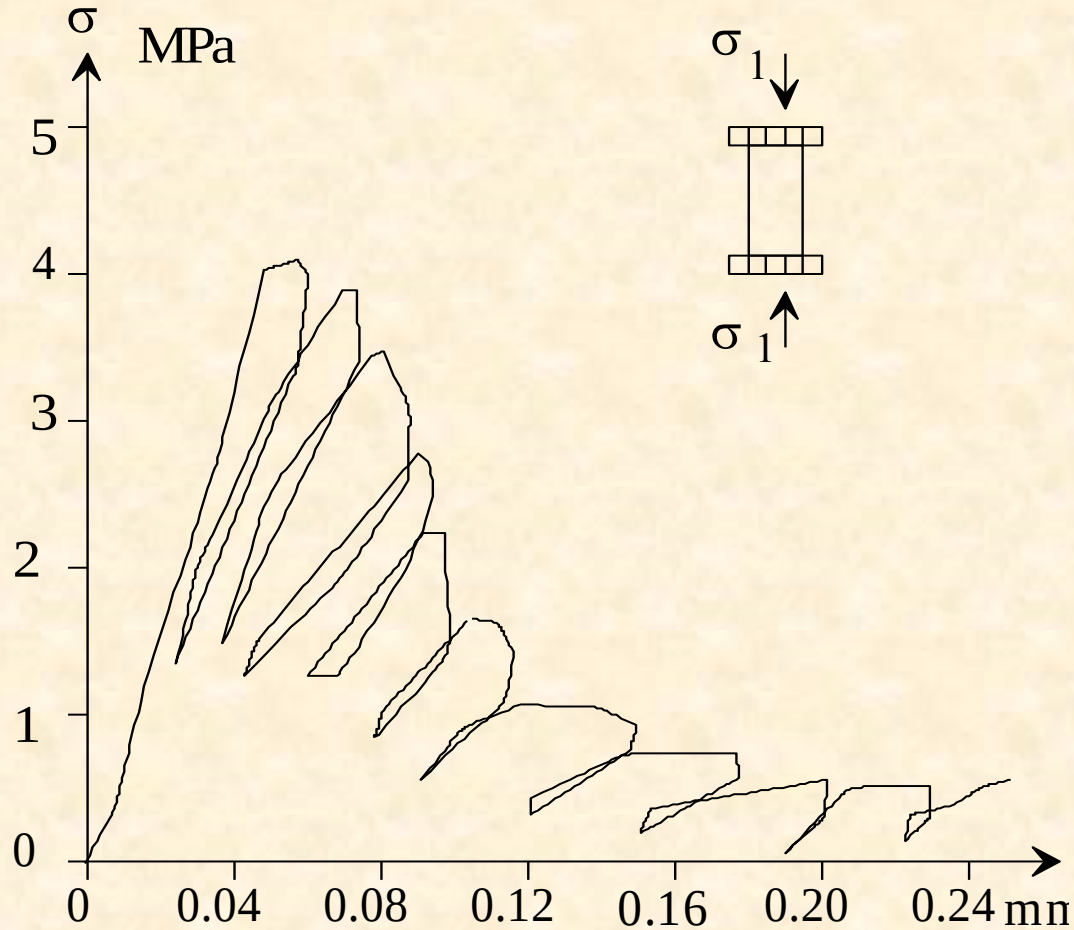
Gerilmeler toplam dokanak yüzeylerinden iletilmektedir. Bu dokanak alanı genel süreksizlik yüzeylerinden çok daha küçük olduğundan bu kesimlerde büyük gerilme yığılmaları (yoğunlaşmaları), büyük deformasyonlar, plastikleşmeler ve kırılmalar meydana gelir. Bu nedenle taş ortamdaki dirençlerin daha düşük değerleri kaya ortamlarda kırılmalara neden olabilmektedir.

Aynı zamanda, süreksizlik yüzeyindeki pürüzlülüğün şekli ve çatlaklı kayanın boyutlarına oranı da kırılma dayanımını etkilemektedir. Çatlaklı kaya boyutu küçüldükçe pürüzlülüklerin çentik etkisi artmakta, kırıklar kaya içinde kolayca ilerleyerek kayayı hızla parçalayabilmekte ve dolayısıyla kayanın basma dayanımlarında önemli azalmalar meydana getirmektedir.

Kayanın ortasındaki kısımlara göre süreksizliklere yakın bölgelerde önceden daha fazla zorlanma olduğundan dayanım azalmaktadır.

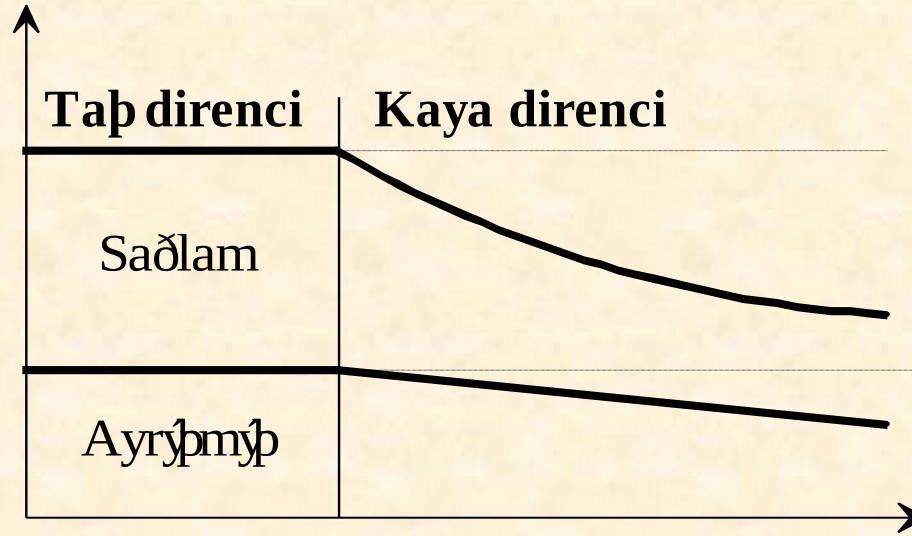
Açıklanan nedenlerle taşın, laboratuvar deneylerinden elde edilen, mekanik özellikleriyle ilgili sayısal değerlerin kaya için aynen geçerli olması beklenemez. Bu değerlerin, ortamın süreksizlik durumuna, kayanın cinsine ve anizotropisine bağlı olarak düşürülmesi gerekir.

Kaya; yenilme ve kırılma sonrasında da, yeni oluşan parçaların sıkışması, kenetlenmesi, ezilmesi ve ufalanarak akması sonucunda bir miktar yük taşımaya devam eder. Psödoplastikleşme ile kaya, dayanımının tümünü yitirmez.



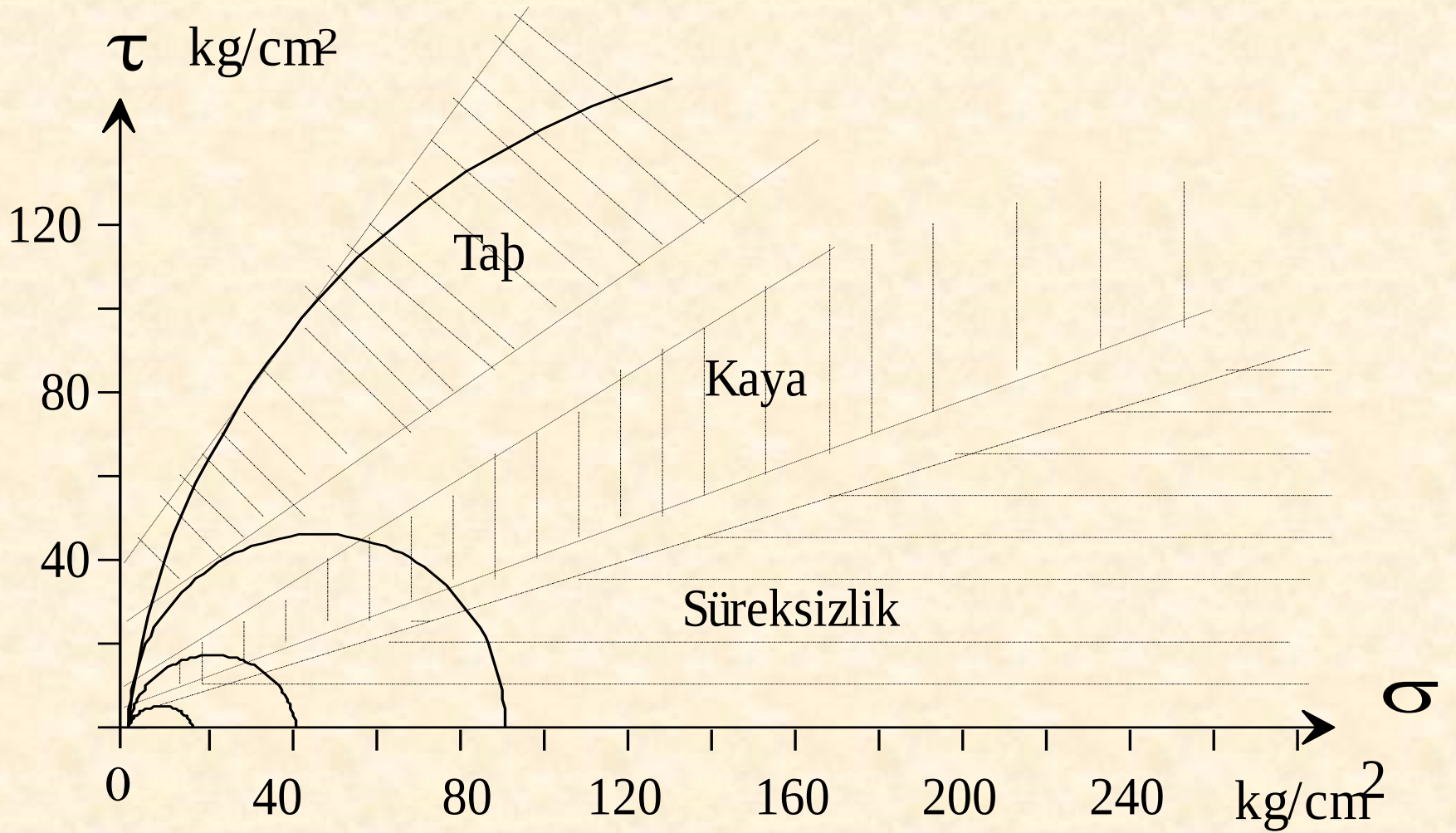
Şekil 13.1. Tekrarlı yükler altındaki kayanın davranışı

Kayanın mekanik özellikleri, arazi ölçümleri sonuçlarından, benzer ortamlarda daha önce kazanılmış deneyimlerden ve ampirik formüllerden yararlanılarak belirlenir. İn-situ ölçümleri gerçeğe yakın değerler vermesine karşılık; zaman, ekonomi ve ekipman gerektirdiğinden kullanılmaları kolay, kazanılmış deneyimler sonucu oluşturulmuş abak ve ampirik formüller projelerin ilk aşamalarında tercih edilmektedir.

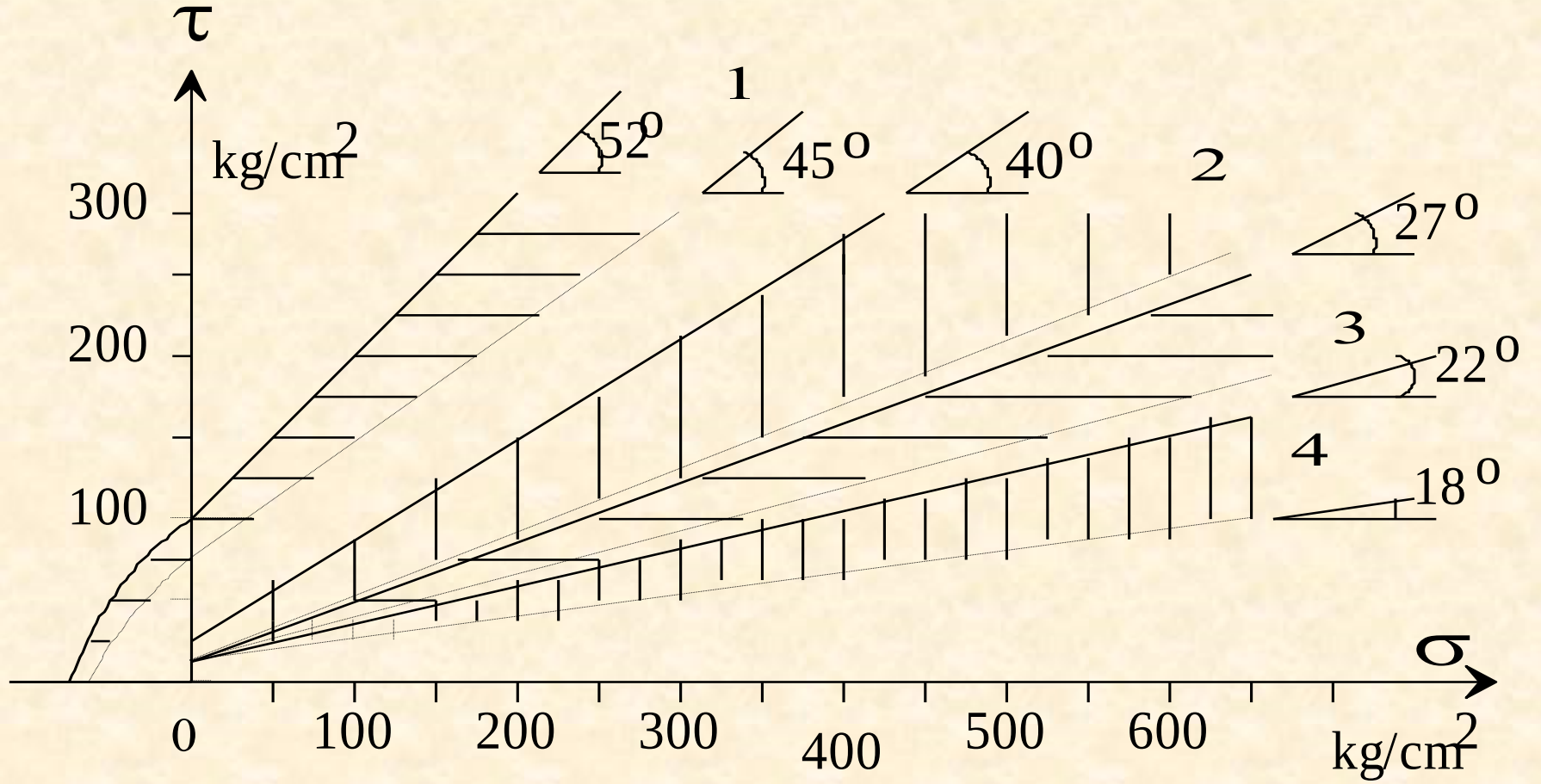


Şekil 13.2. Kayada sağlamlık ve ayrışma derecesinin dayanım üzerine etkisi

Kayanın kırılma zarfı süreksizliklerin kırılma zarfı ile taşın kırılma zarfı arasında bulunur. Yani kaya süreksizlik ile taş arasında bir dayanıma sahiptir (Şekil 13.3).



Şekil 13.3. Taş, kaya ve süreksizliklerin τ - σ arasındaki ilişkileri

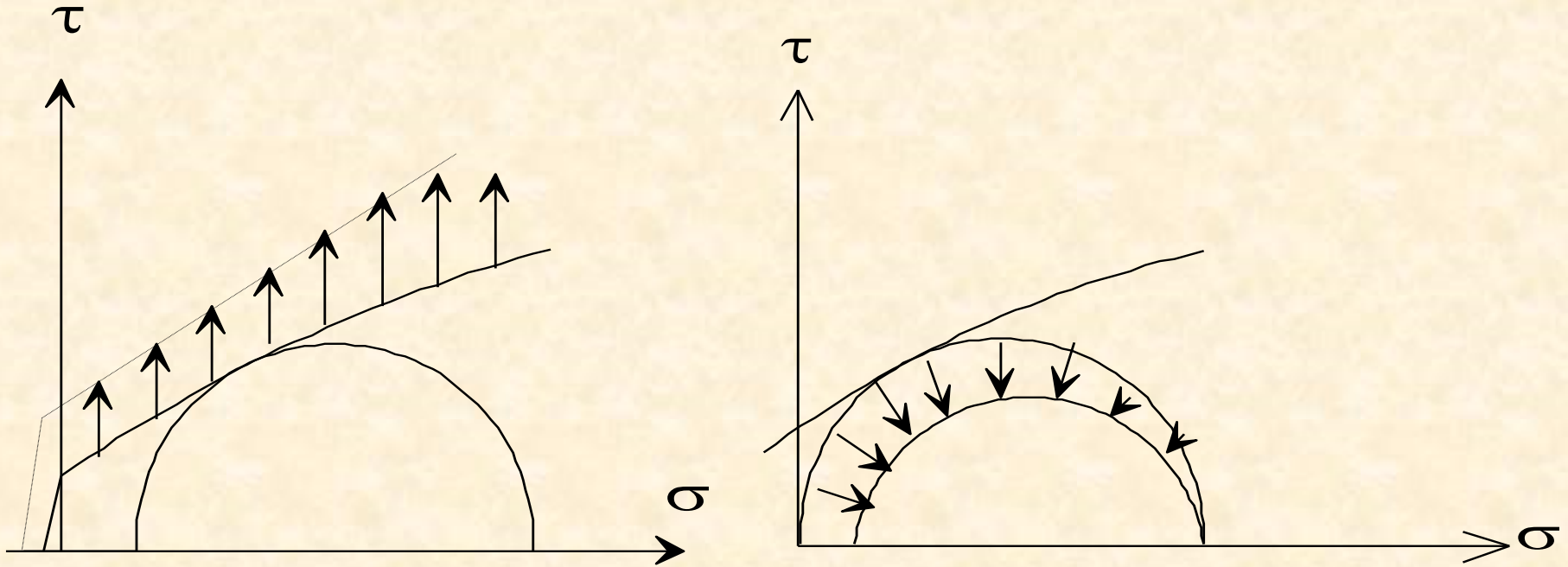


Şekil 13.4. Siltaşının yenilme şartları ve Mohr zarfları (Yüzer ve Vardar 1986)

1. Laboratuvar örneği,
2. Arazide kazı öncesi,
3. Psödoplastikleşme sonrası,
4. Su ve zamanın etkisinden sonra

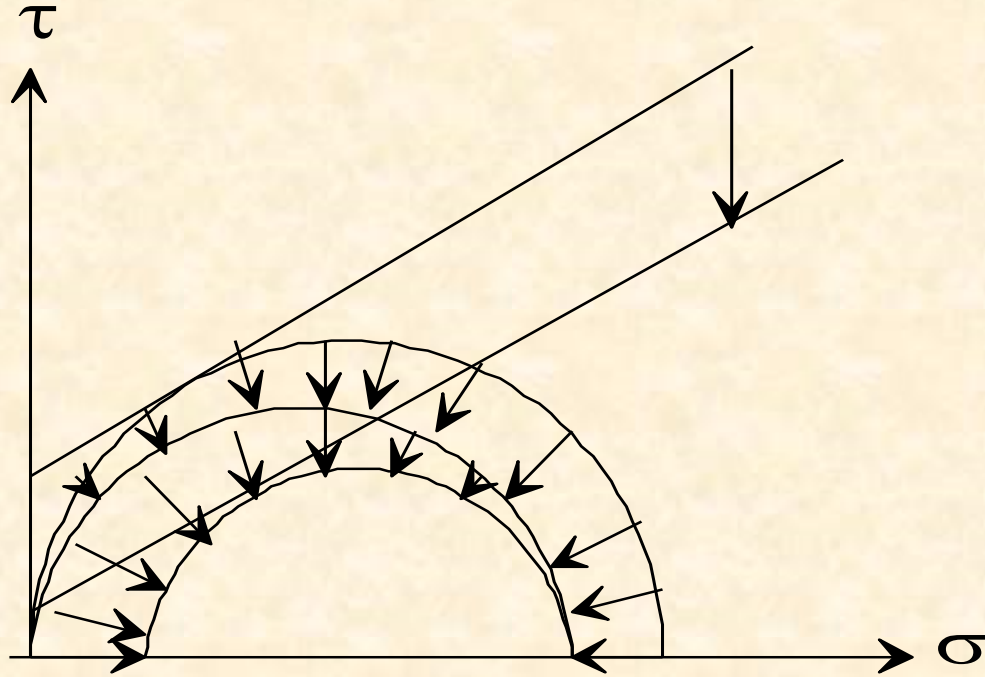
14. KAYALARDA SAĞLAMLAŞTIRMA

Duraylılığın (stabilitenin) artırılması kayanın içsel parametrelerinin değerinin artırılması ile mümkündür. Sağlamlaştırma (ön gerilmeli ankrajlar, enjeksiyon v.b. gibi) uygulanarak tek eksenli gerilme durumu üç eksenli gerilme durumu haline getirilebilir.



Şekil 14.1. Kayanın iyileştirme ile c ve ϕ nin artırılması (a) ve tek eksenliden üç eksenli gerilme durumuna geçişi (b).

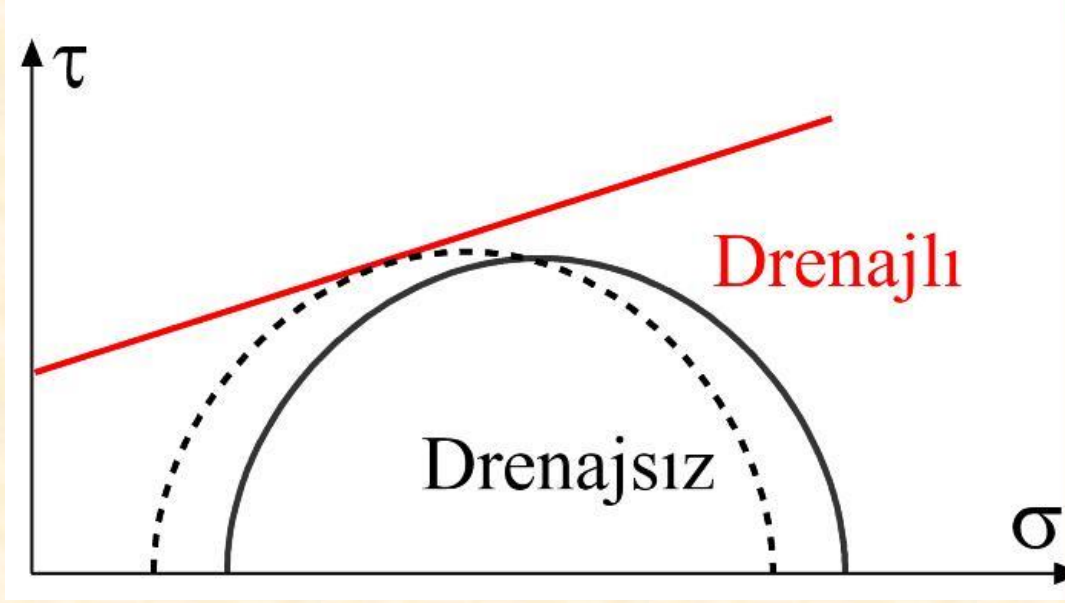
Gerilmelerin bir bölümü tahkimat elemanları gibi taşıyıcı sistemlere aktararak, kaya yapısına etkiyen gerilmelere karşı tepki uygulanır. Kaya bu şekilde sağlamlaştırılarak gerilme durumu olumlu yönde değiştirilebilir.



Şekil 14.2. Kayadaki gerilmenin bir bölümünün tahkimat elemanları yardımı ile azaltılması

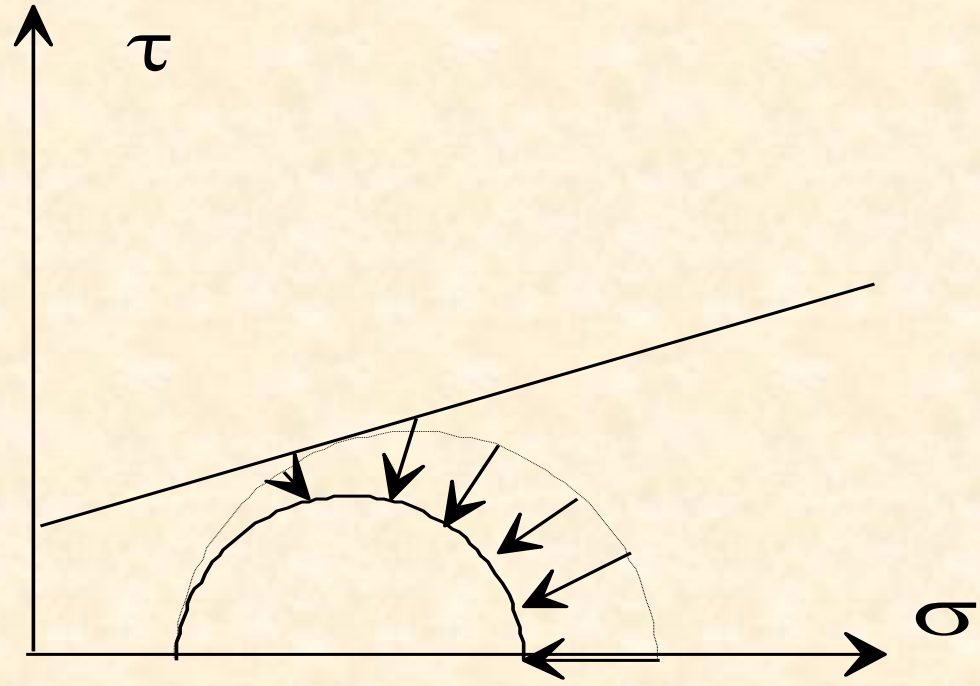
Kazı yüzeyi, içsel parametreleri daha yüksek olan bir malzeme (püskürtme beton) ile kaplanarak kayma gerilmesi artırılarak bir yandan kırılma şartı iyileştirilir diğer yandan üç eksenli gerilme durumuna sokulur.

Kaya yapısında yeterli drenaj sağlanarak gerilme farkı değişmeksizin gerilme durumu olumlu şekilde değiştirilir. (Boşluk suyu basıncı ortadan kaldırılır).



şekil 14.3. Kayada boşluk suyu basıncının drenaj yolu ile azaltılarak gerilmenin azaltılması

Asal gerilmelerin şiddetleri değiştirilerek (Örneğin, yeraltı yapısının dolayının gevşetilmesi) duraylık sağlanabilir.



Şekil 14.4. Kayada yeraltı kazılarında asal gerilmenin azaltılması

15. KAYA MEKANİĞİNDE DENEYLER, ÖLÇÜMLER VE GÖZLEMLER

Kaya mekaniğinde başlıca:

- Taşın davranışlarını,
- Kayanın davranışlarını
- Doğal sınır şartlarını belirlemek
- Kaya yapısının duraylılığını denetlemek ve
- Kaya yapısının optimum boyutlandırılmasını yönlendirmek amacıyla deney, ölçüm ve gözlemler yapılmaktadır.

Bu deney ve incelemeler

Laboratuvar çalışmaları

Arazi çalışmaları olmak üzere iki şekilde yapılır

15.1. Laboratuvar çalışmaları

15.1.1. Taşın dayanımının belirlenmesi (σ_c , σ_t , σ_c , ϕ)

a. Tek eksenli basma dayanımı: σ_c

b. Çekme dayanımı: σ_t

Doğrudan (direkt)

Dolaylı (indirekt), Brezilyan deneyi

c. Çevre basıncı altında kırılma dayanımı (üç eksenli basma deneyleri)

$$\Delta\sigma_B = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (\text{deviyatör gerilme})$$

d. Makaslama dayanımı: τ - σ eğrileri

e. Sıcaklığın kırılma dayanımına olan etkisinin araştırılması:

$$\sigma_c, \sigma_t, \Delta\sigma_B, \alpha(T^{\circ}C)$$

f. Reolojik deneyler: Zamanın kırılma dayanımına olan etkisinin araştırılması:

$$\sigma_c, \sigma_t, \Delta\sigma_B = \alpha(t)$$

g. Nokta yük dayanımı (point load): Anizotropiye bağlı dayanım

- h. Eğilme dayanımı (orta noktadan ve dört noktadan yükleme ile).
- ı. Darbe dayanımı
- j. Aşınma direnci
- k. Suya dayanıklılık indeksi (slake durability)

Taşın deformasyon özelliklerinin belirlenmesi

- a. Tek eksenli gerilme-deformasyon ilişkileri, elastisite modülleri (E_b , E_t , E_s),
Poisson oranı (μ) ve post failure davranışı, plastik deformasyonlar
- b. Üç eksenli gerilme - hacimsel değişimi, $\Delta\sigma$ – $\Delta\mu$ eğrileri
- c. Zamana bağlı deformasyonlar (akma): ε -t diyagramları, kritik deformasyonlar ve kritik süre
- d. Dinamik elastisite modülü: E_{din}

Özel amaçlı deneyler

Erime, kabarma, şişme. gibi olayların basınç zaman ve deformasyonlara bağlı olarak incelenmesi.

Taşın geçirirmliliğinin belirlenmesi

- Radyal geçirirmlilik
- Vakumla 6.3 (cm)

15.1.2. Süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi

- Kuru
- Islak
- Çatlak dolgulu yüzeylerde kayma deneyleri

$$(C_{s_{kuru}}, C_{s_{ýslak}}, \phi_{s_k}, \phi_{s_1}, C_{dolgu}, \phi_{dolgu}, i)$$

15.1.3. Parçalı kayalarda dayanımın belirlenmesi

Asal gerilme oranlarının

- Yenilme dayanımına
- Doku hareketliliğine ve
- Zamana bağlı olarak dayanıma olan etkisi

15.1.4. Model deneyler

1- Fiziksel modellemeler (model malzemesi)

a. Öğretici

b. Benzetim (analojik ve simulatif)

c. Ekivalan (eş değerli)

2- Matematik modeller

FEM (Sonlu elemanlar yöntemi)

15.2. Arazi (in-situ) çalışmalar

15.2.1. Doğal gerilmelerin belirlenmesi

Gerilme boşalması için,

a. Doorstoper

b. İç içe karot alma-Double Overeoring

c. Fotoelastisite (elastik tıkaç)

Gerilme dengelenmesi için,

a. Yassı veren (yassı krika- basınç yastığı)

b. Presiyometre

15.2.2. Sekonder gerilmelerin ölçümü σ_T , σ_R

- a. Yassı krik
- b. Basınç hücreleri
- c. Fotoelastisite
- d. Ankraj çubukları
- e. Radyal (ışınsal) pres

15.2.3. Kaya dayanımının belirlenmesi

- a. Çift yassı krik
- b. Hidrolik çatlatma
- c. Patlatma

15.2.4. Kayanın doku hareketliliğinin belirlenmesi:

- a. Hidrolik krika+ekstansometre
- b. Yassı krika+ekstansometre
- c. Dilatometre
- d. Pressiometre
- e. Konsolidasyon deneyi

15.2.5. Kayma dayanımının belirlenmesi

- a. Çift hidrolik krikolu
- b. Tek hidrolik krikolu

15.2.6. İkincil (sekonder) hareketlerin ölçülmesi

- a. Ekstansometre
- b. Koverjansmetre
- c. Deflektometre
- d. Klizimetre
- e. Dilatometre
- f. Radial pres
- g. Takeometre
- h. Laser

15.2.7. Yeraltı su seviyesinin ve boşluk suyu basıncının ölçülmesi

- a. Piyezometre
- b. Tansiyometre

15.2.8. Özel deneyler ve ölçümler

- I. Jeofizik yöntemler
 - a. P- dalgası hızı
 - b. S- dalgası hızı
 - c. İletkenlik değişimi
- II. Ses dinleme yöntemleri
- III. Geçirgenlik, erime, kabarma v.b. gibi deneyler

15.2.9. Bire birlik model deneyler.

16. KAYA ŞEVLERİNDE DURAYLILIK

16.1. Kütle hareketlerinin genel nedenleri

Kütle hareketinin genel nedeni yerçekimidir. Ancak bu olayı kolaylaştıran ve hızlandıran sebepler vardır. İki ana gruba ayrılır.

- Dış nedenler
- İç nedenler

16.1.1. Dış nedenler

- a. Şev ve yamaç eteklerinde yapılan kazılar
- b. Şev ve yamaç topuklarının sular tarafından oyulması
- c. Aşınma ile şev eğiminin değişmesi
- d. Doğal veya ek yük koyma
- e. Şev üstü örtüsünün kaldırılması ve yüzey sularının sızmasının kolaylaştırılması
- f. Çatlak ve fissürlerde suların donması
- g. Depremler
- h. Yapay patlatma ve sarsıntılar

16.1.2. İç nedenler

- a. Boşluk suyu basıncının artması (u)
- b. Şev malzemesinin kohezyonunun azalması ve içsel sürtünme açısının düşmesi.

16.2. Kaya şevlerinde duraylılığa etki eden faktörler

Duraylılığa etki eden özellikleri, kayanın süreksizlik yüzeylerinin kohezyonu (c) ve sürtünme açısıdır (ϕ). Bir kayaya etki eden τ kayma ve σ normal gerilmeleri arasında;

$\tau = c + \sigma \tan \phi$ bağıntısı mevcuttur.

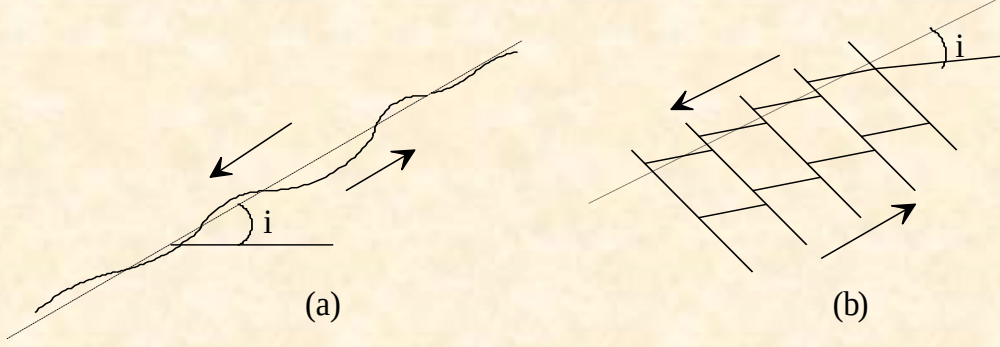
Ayrıca duraylılığı etkileyen diğer sebepler şunlardır.

16.2.1. Süreksizliğin şekli

Süreksizliğin büyüklüğü ve şekli önemlidir. Kılcal çatlak, çatlak, kırık, fay, şistiyet, folyasyon, tabakalaşma, çapraz tabakalanma gibi süreksizliklerin sıklığı, uzanma yönü ve açısı, genişlikleri etkiler.

16.2.2. Çatlak pürüzlülüğü

Çatlak yüzleri düz, pürüzlü veya ondülelidir. Ayrıca merdivenimsi çatlak yüzeyleri de oluşabilir. Pürüzlülük ile c ve ϕ artar.



Şekil 16.1. Kaya çatlaklarında görülen yüzey şekilleri, ondüleli (a) ve merdivenimsi (b)

Ondüleli ve çatlak yüzeyinde etkili sürtünme açısı ϕ_a ;

$$\phi_a = \phi + \phi_r \quad (16.1)$$

$$\phi_r = \phi + i \quad (16.2)$$

Burada,

i = Pürüzlülük açısı

ϕ = Sürtünme açısı

ϕ_a = Etkili sürtünme açısı

ϕ_r = Çatlak yüzündeki merdiven ya da ondülasyon ortalama açısı

Bu değer kesme dayanımı denkleminde yerine konursa

$$\tau = c + \sigma \tan (\phi + \phi_r) \text{ elde edilir.} \quad (16.3)$$

16.2.3. Çatlak dolgu maddesi

Süreksizlik yüzleri bazen dolgusuz ve temiz, bazen de türlü maddelerle dolmuş olarak bulunur. Milonitleşme, fay breşi v.b. gibi.

Süreksizlik yüzlerinde dolgu maddesine bağlı olarak τ - σ ilişkileri;

Dolgu maddesi yoksa τ ve σ mukavemeti yüksek

Dolgu maddesinin kalınlığı 1-10 cm arasında ise τ ve σ orta,

Dolgu maddesi kalınlığı >10 cm ise τ ve σ küçüktür.

Burada dolgu maddesinin dayanımında önemli rol oynar.

16.2.4. Boşluk suyu basıncı

Kayaçlardaki süreksizliklerde bulunan su, kayaların ayrışmasına, birim hacim ağırlığının artmasına ve çatlak suyu basıncının doğmasına sebep olur.

Çatlağı dolduran suyun basıncı (V), çatlak derinliği ve çatlak içindeki su yüksekliği ile artar. V basıncı öndeki bloğun yüzeyine aşağı doğru kaydırıcı etki yapar. Bu su, bloğun tabanındaki süreksizlik içine sızınca burada boşluk suyu basıncı (u) oluşur. Kayan bloğun tabanına etkiyen bu basınç, bloğun yukarı ucundan aşağı ucuna doğru azalır. Su basıncı çatlak yüzeyine dik doğrultuda etki yapan normal basıncın tutucu etkisini azaltır.

16.3. Kaya şevlerinde yenilme modelleri

Süreksizliklerin yönleri ve çatlak sistemlerinin özelliklerine bağlı olarak beş şekilde görülür.

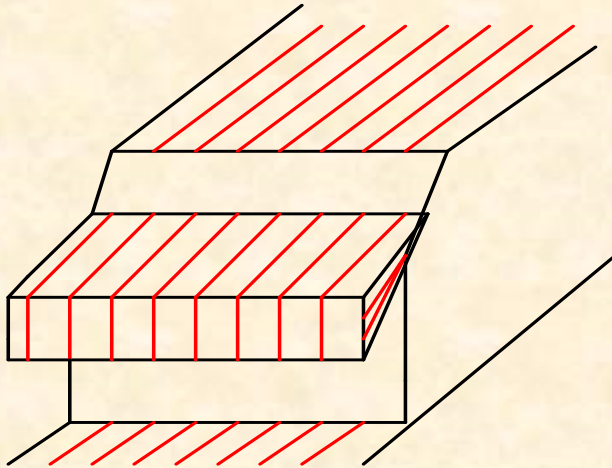
- Düzlemsel kayma
- Dairesel kayma
- Kama tipi kayma
- Karışık tip kayma
- Devrilme

16.3.1. Düzlemsel kayma

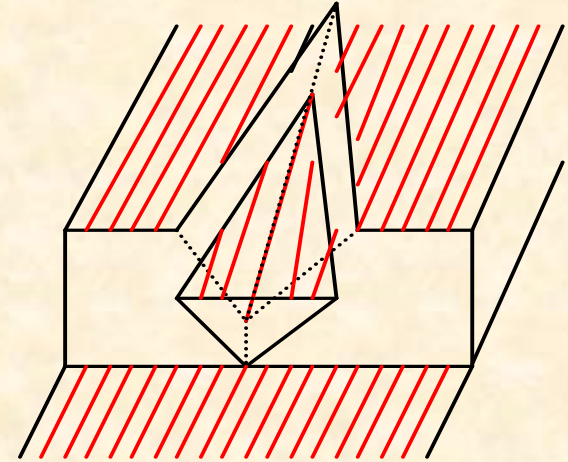
Yerçekimi etkisi ile olur. Bu modelde hakim olan tek yönlü sistem vardır. Örnek: Tabakalanma yüzeyi veya çatlak yüzeyi boyunca üstteki blokun aşağıya kayması.

16.3.2. Kama tipi kayma

İki süreksizlik yüzeyinin tetrahedral blok teşkil edecek şekilde kesişmesi ve bu düzlem boyunca kütlenin hareket etmesi.



Şekil 16.2. Kayada düzlemsel kayma



Şekil 16.3. Kayada kama tipi kayma

16.3.3. Dairesel kayma

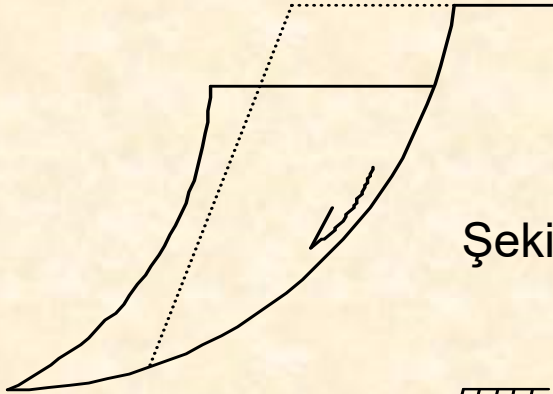
Özellikle kohezyonlu zeminlerde ve bazı kayalarda görülen kayma şeklidir.

16.3.4. Karışık tip kayma

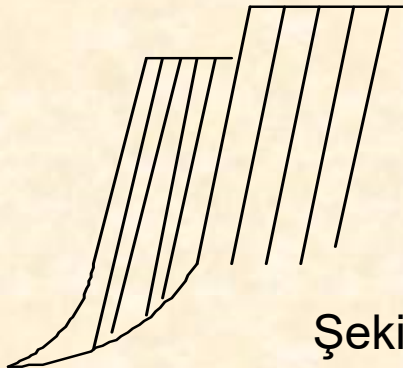
Önce düzlemsel sonra daireysel kayma görülür.

16.3.5. Devrilme

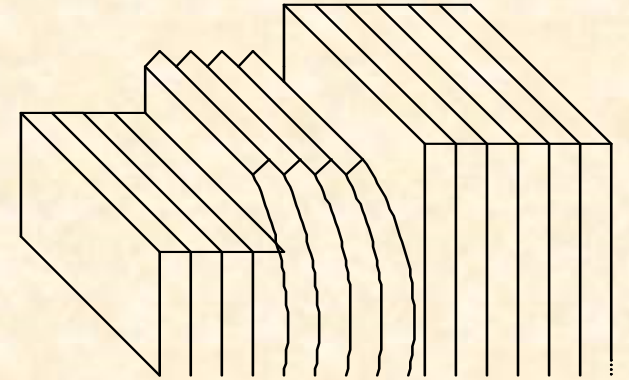
Düşey ya da düşeye yakın süreksizlikler boyunca kaya yamacının aşağıya doğru bükülmesi ve devrilmesi ile oluşur.



Şekil 16.4. Dairesel kayma



Şekil 16.5. Kayada karışık (düzlemsel-dairesel) kayma

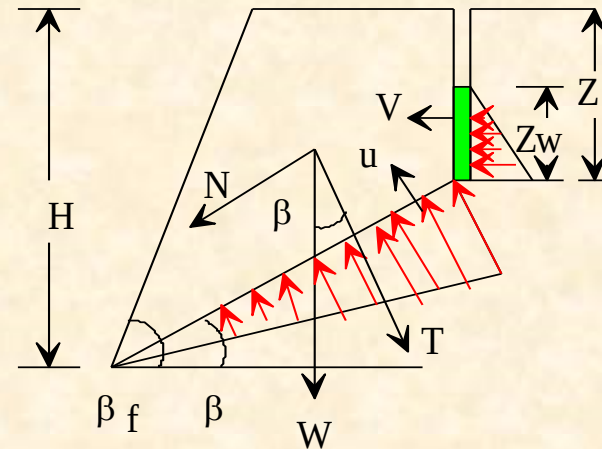
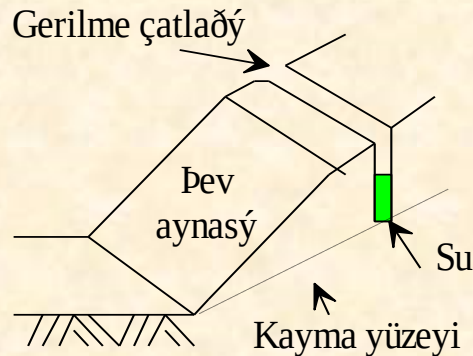


Şekil 16.6. Kayada devrilme

16.4. Düzlemsel kaymada duraylılık analizi

Düzlemsel kaymanın meydana gelebilmesi için aşağıdaki dört şartın sağlanması gerekir.

1. Kayma düzlemi doğrultusu şev aynasına paralel veya yakın olmalıdır. Bu $\pm 20^\circ$ olarak değişebilir.
2. Kayma düzleminin eğimi şevin eğiminden düşük olmalıdır ($\beta_f > \beta$).
3. Kayma düzleminin eğimi kayma yüzeyinin içsel sürtünme açısından büyük olmalıdır ($\beta > \phi$).
4. Kayan kütlenin yan taraflarında kaymayı engelleyen yüzeyler bulunmamalıdır.



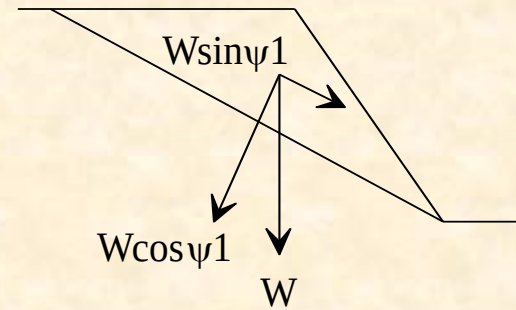
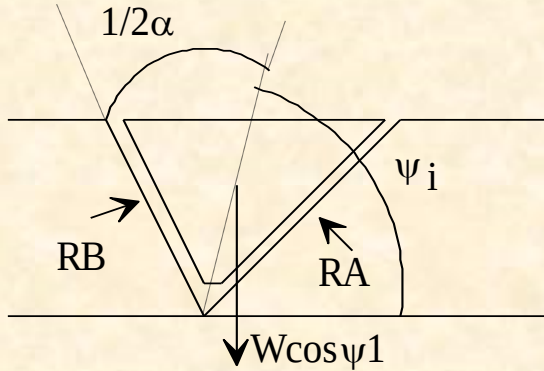
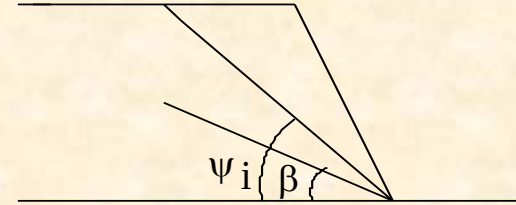
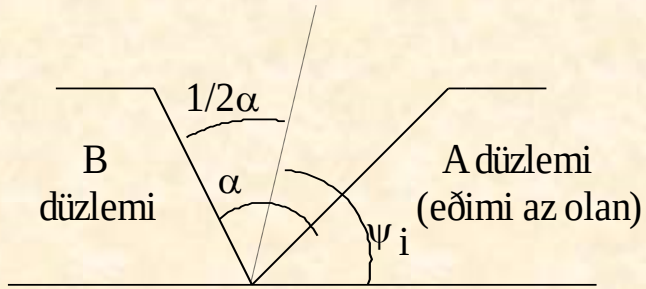
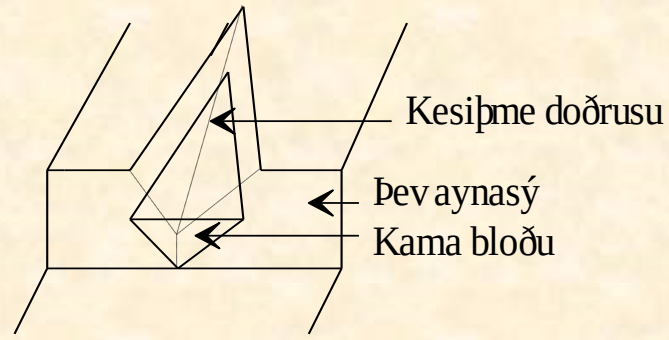
Şekil 16.7. Düzlemsel kaymada etkiyen kuvvetler

16.5. Kama tipi kaymada duraylılık analizi

Kaymaya karşı direncin yalnız sürtünmeden kaynaklandığı ve her iki düzlemdeki sürtünme açısının (ϕ) aynı olduğu varsayılır. Bu durumda güvenlik katsayısı;

$$F = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i} \quad (16.11)$$

Burada R_A ve R_B aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi A ve B düzlemlerince sağlanan normal reaksiyonlardır.



Kesilme doğrusuna dik kesiti

Kesilme doğrusuna paralel kesit

Şekil 16.8. Kama tipi kayma ve tanımlar

Kama üzerinde etkin olan kuvvetleri kesişme doğrusuna paralel ve dik olmak üzere bileşenlerine ayrılırsa;

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \alpha} \quad \text{bulunur.} \quad (16.12)$$

Böylece;

$$F = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{1}{2} \alpha} \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i} \quad (16.13)$$

16.6. Kaya duraylılığını sağlamak için önlemler ve iyileştirme yöntemleri

16.6.1. Dengeleme yöntemleri

Dengeleme yöntemleri yük boşaltma şeklinde gerçekleştirilir.

1. Kazı: Yük azaltılmasıdır, maaliyeti yüksektir. Basamak sayısı maaliyeti

azaltır. Hidrolik beko, dozer v.b gibi araçlar kullanılır.

2. Kavlak düşürme, tarama: Gevşek, askıda olan fırlayabilecek blokların düşürülmesi amacı ile hidrolik kırıcılarla işçiler tarafından yapılır.

Mekanik aletler ulaşım güçlüğünden dolayı kullanılamaz.

16.6.2. Sağlamaştırma yöntemleri

- Şatkrit:

En fazla 2 cm çaplı agrega ile yapılan betonun havalı tabanca ile kaya yüzeyine püskürtülmesi işlemidir.

- Çelik sağlamlaştırma

- a. Kaya saplaması: Yüzeye yakın kayaların sağlamlaştırılmasında ve duraysız büyük kayaların desteklenmesinde kaya ankraji kullanılır.
- b. Halat ankraji: Kaya saplaması ile aynı olup, sağlamlaştırma yanında destek görevi yapar. İstinat duvarlarında da kullanılır.
- c. Ankrajlı kirişler: Beton veya çelikten yapılır. Kaya saplamasının etki alanını artırır.
- d. Ankrajlı halat ağları: Dışarıda duran 1.5-2.5 m çaplı tek gevşek blokları tutmak için kullanılır.
- e. Halatla bağlama: Büyük blokları tutmak için ekonomik, basit bağlama işlemidir.
- f. Kiriş ve halat duvarlar: 20 m ye kadar yüksek şevlerdeki küçük kaya bloklarının şevden düşmesini önlemek için kullanılır.

16.6.3. Destek sistemleri

-Payandalar

-Ahşap, çelik ve betondan üretilir ve dik şevlerin duraylılığını sağlamada kullanılır.

- İstinat duvarları

Şev duraylılığını sağlamak amacı ile taş ve betondan yapılan dayanma yapılarıdır.

- Fore kazık, mini kazık ve betonarme perde duvar ankrajlar

17. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, ampirik tasarım yaklaşımlarının temel esasıdır ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bugün, açılmakta olan tünellerin bir çoğunda sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bunlardan en tanınmış ve kullanılanı bundan 40 sene önce ortaya atılan Terzaghi (1946) sınıflamasıdır. Bu sınıflama geçmişte de yüzlerce tünelin tamamlanmasında başarı ile kullanılmıştır.

Terzaghi sınıflaması daha sonra Deere ve diğ. (1970) tarafından geliştirilmiştir. Ayrıca yapılan bir çok yeni sınıflama sistemleri çeşitli projelerde uygulanmıştır. Terzaghi sınıflamasında önerdiği çelik tahkimata karşılık, yeni sistemler, günümüzde kullanılan kaya saplaması ve püskürtme beton gibi tahkimat elemanları önerilerini getirmiştir. Yeni sınıflama sistemleri, yalnız tünelcilik uygulamalarında değil, büyük yeraltı boşlukları, şevler ve temellerin tasarımı gibi değişik mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Günümüzdeki önemli sınıflama sistemleri ve uygulama alanları aşağıdaki Çizelge 17.1 de verilmiştir.

Çizelge 17.1. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri ve uygulama alanları

Sınıflama sistemi	Öneren	Ülke	Uygulama yeri
1.Kaya yükü	Terzaghi, 1946	ABD	Tünel, çelik iksa
2.Tahkimatsız durma süresi	Lauffer, 1958	Avusturya	Tünel
3.Yeni Avusturya Tunel Yöntemi (NATM)	Pacher ve diğ. 1964	Avusturya	Tünel
4.Kaya kalite katsayısıRQD	Deere and Miller, 1966	ABD	Karot tanımı, tünel
5.Kaya Yapısı Değeri, RSR	Wickham ve dğ., 1972	ABD	Tünel
6 Rock Mass Rating, RMR	Bieniawski, 1973	G. Afrika, ABD	Tünel, maden, kömür
7.Q-Sistemi	Barton ve diğ., 1974	Norveç	Tünel, maden, yeraltı boşluk
8.Temel geoteknik tanıml.	ISRM, 1981	Uluslararası	Genel
9. Birleşik sınıflama	Williamson, 1984	USA	Genel

17.1 Sınıflama sisteminde kullanılan değişkenler

Sınıflama sistemlerinin bir çoğunda aşağıda belirtilen değişkenler kullanılmaktadır:

1. Tek eksenli basma dayanımı
2. Kaya kalite katsayısı RQD
3. Süreksizliklerin:
 - a- Aralığı
 - b- Durumu (pürüzlülük, devamlılık, açıklık, dolgu maddesi v.b. gibi)
 - c- Konumu (doğrultu ve eğimi)
4. Yeraltı suyu durumu
5. Çevre etkileri
 - a- Gerilmeler
 - b- Kazı türü
 - c- Ana süreksizlik düzlemlerinin etkisi

17.2. Kaya Kütlesi Oranı (RMR-Rock Mass Rating)

Jeomekanik kaya kütle sınıflaması olarak da bilinen sistem, ilk defa Bienawski (1973) tarafından geliştirilmiş ve 1974, 1979 ve son olarak da 1989'da değişikliklere uğramıştır. Sistemin uygulanmasında, proje alanındaki kaya kütlesi yapısal alt birimlere ayrılır ve birimle ayrı değerlendirilir. Çizelge 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 ve 17.6 da sınıflamada kullanılan değişkenlerin sınır değerleri ve tanımlamaları verilmiştir. Kaya kütlesinde hesaplanan RMR puanı ve kazı açıklığına göre tünel desteksiz ayakta kalma süresi ilişkisi Şekil 17.1'de verilmiştir. Düz tavanlı yeraltı açıklıklarında destek basıncını hesaplamak için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir (Unal, 1983)

$$P_v = [(100-RMR)/100].\gamma.B \quad (17.1)$$

(B-tünel genişliği, γ -kayacın birim hacim ağırlığı)

Çizelge 17.2. Sınıflama değişkenleri ve puanlamaları

1	Kayaç dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Düşük aralık		
		Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3	Süreksizlik aralığı (m)		>2	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizlik durumu		Çok kaba yüzey Sürekli değil Ayrılmasız Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Ayrılma <1mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Ayrılma <1mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünmeli yüzeyler, fay dolgulu <5mm, 1-5mm açıklıklı ve sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya açık eklem >5mm devamlı süreksizlik		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu durumu	Tünelde ilk 10m den gelen su	Yok	10 l/dk	<25 l/dk	25-125 l/dk	>125 l/dk		
		Eklemd e su basıncı	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		En büyük asal gerilme							
		Genel durum	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su gelişi		
	Puan		15	10	7	4	0		

Çizelge 4. Tünellerde Süreksizlik durumunun etkisi

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Eğim 0°-20° arasında (doğrultudan bağımsız)
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı ilerleme				
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 45°-90°	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Uygun değil	Hiç uygun değil	
0	-2	-5	-10	-10	-12	-5

Çizelge 5. Süreksizlik durumuna göre düzeltme

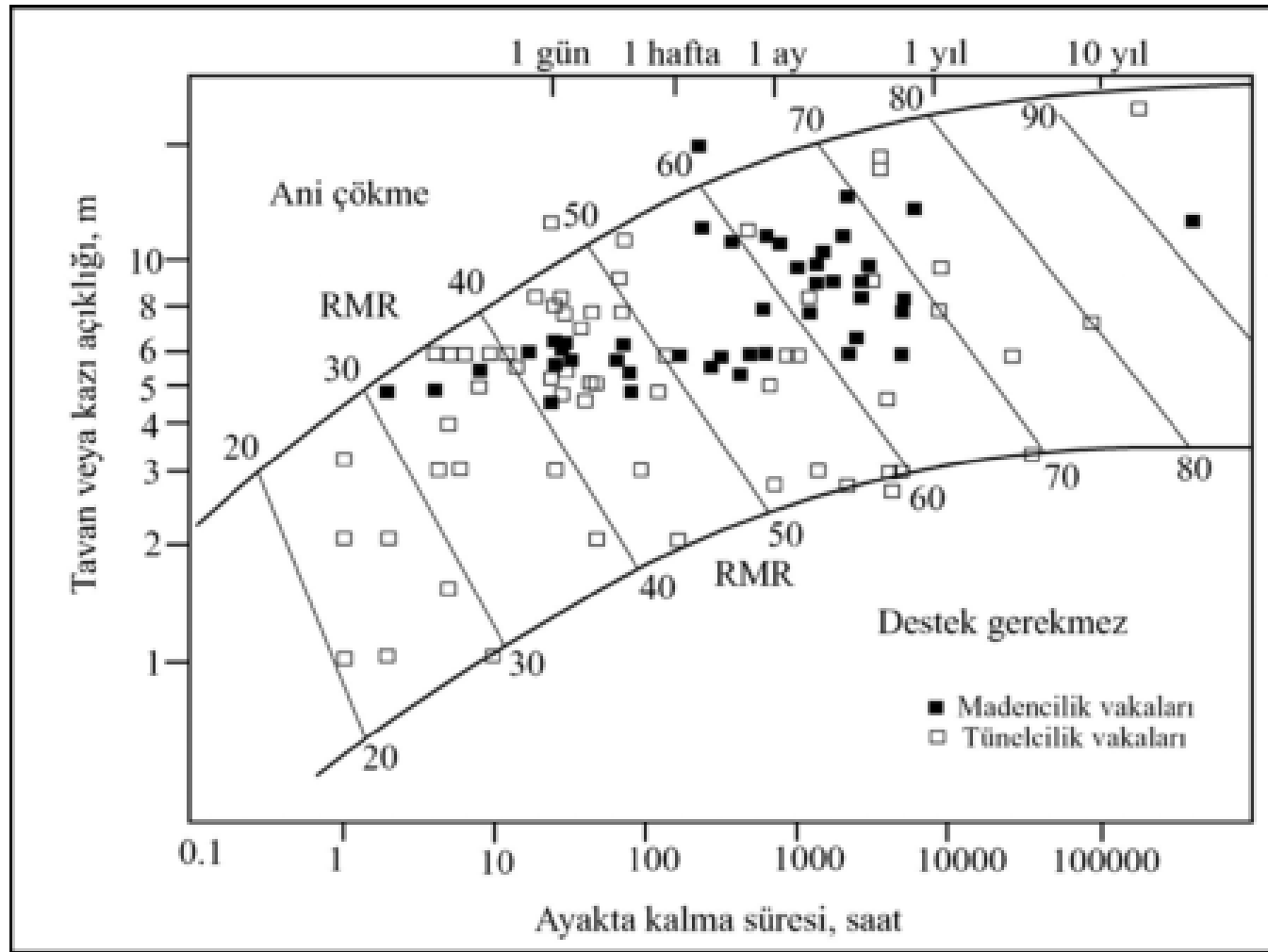
Doğrultu, eğim		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tünel	0	-2	-5	-10	-12
	Temel	0	-2	-7	-15	-25
	Şev	0	-5	-25	-50	-60

Çizelge 6. Kaya sınıf ve puanları

Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

Çizelge 7. Kaya kütle sınırlarının anlamları

Sınıf	I	II	III	IV	V
İksasızgöçmeden durma süresi	15 m açıklık için 10 yıl	8 m açıklık için 6 ay	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 saat	0.1 m açıklık için 30 dk
Kaya kütlesi kohezyonu	>400 kPa	300-400 kPa	250-300 kPa	100-200 kPa	<100 kPa
Kaya kütlesi,φ	<45	35-45	25-35	15-25	<15



Şekil 2.RMR puanına göre tavan açıklığı ve desteksiz ayakta kalma süresi

3. Q (NGI) Kaya Kütle Sınıflaması

Q sistemi Norveç Jeoteknik Enstitüsü'nde Barton vd (1974) tarafından geliştirilmiştir. İskandinavya'da yaklaşık 200 ayrı tünel çalışmaları sonucunda oluşturulan sistem niceliksel olup, iksa tasarımına yöneliktir. 1993 ve 2002 yılında değişikliklere uğramıştır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad \text{bağıntısı ile hesaplanmaktadır.} \quad (3)$$

RQD : Kaya kalite göstergesi

J_n : Eklem takımı sayısı

J_r : Eklem pürüzlülük durumu

J_a : Eklem ayrışma durumu

J_w : Eklemde su azaltma faktörü

SRF : Gerilme indirgeme faktörü olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 9. RQD değer aralıkları ve puanları

1.Kaya tanımı	RQD,%	Notlar
A: Çok düşük	0-25	1. $0 < RQD < 10$ olursa hesaplamada pratik olarak 10 alınır
B: Düşük	25-50	
C: Orta	50-75	
D: İyi	75-90	
E: Çok iyi	90-100	

Çizelge 10.Eklem takımı sayısı puanları ve tanımları

2. Eklem takımı sayısı	J_n	Notlar
A: Masif hiç veya birkaç eklem	0.5-1.0	Kesişmede ($3 \times J_n$) Portalda ($2 \times J_n$) alınır.
B: Bir eklem takımı	2	
C: Bir eklem takımı, düzensiz eklemler	3	
D: İki eklem takımı	4	
E: İki eklem takımı, düzensiz eklemler	6	
F: Üç eklem takımı	9	
G: Üç eklem takımı, düzensiz eklemler	12	
H: Dört veya fazla eklem takımı, düzensiz çok eklemler	15	
J: Tamamen ufalanmış kaya, zemin gibi	20	

Çizelge 11. Eklem pürüzlülüğü sayısı puanları ve tanımları

3. Eklem pürüzlülüğü	J_r	Notlar
(a) Eklem yüzeyleri temasta veya	4	Ortalama eklem aralığı 3m'den fazla ise değerlere 1 eklenmelidir
(b) Temanın 10 cm'den az bir makaslama ile sağlanması		
A: Süreksiz eklemler		
B: Dalgalı-pürüzlü		
C: Dalgalı-düz		
D: Dalgalı-cıralı		
E: Düzlemsel-pürüzlü		
F Düzlemsel-düz		
G: Düzlemsel-cıralı		
(c) Makaslama duvarla temas yok	1.0	Makaslama izleri olan düzlemsel cıralı eklemlerde J_r değeri 1.5 alınabilir
H: Kaya duvarı temasını önleyecek kalınlıkta kil mineralli zon		
I: Kaya duvarı temasını önleyecek kalınlıkta kumlu, çakıllı veya ezilme zonu		

Not : Dalgalı, düzlemsel tanımları eklem en az 2m'lik uzunluğu boyunca olan genel yapısını; pürüzlü, düz, cıralı kavramları yüzeyi daha küçük ölçekte tanımlar.

Çizelge 12. Eklem ayrışma sayısı puanları ve tanımları

4. Eklem ayrışma sayısı	J_a	Yaklaşık ϕ (°)
<i>(a) Kaya yüzeyi ile temasta (mineral dolgu yok, sadece sıvama)</i>		
A: Temas yüzeyi sert dolgu halinde	0.75	-
B: Eklem cidarı ayrılmamış, yüzeysel lekeler var	1.0	25-35
C: Eklem cidarları az ayrılmış, yumuşamayan tipte kumlu parçacıklar, kilsiz ayrılmış kaya, vb	2.0	25-30
D: Siltli ve kumlu, killi sıvama, az miktarda yumuşamayan tipte killi malzeme	3.0	20-25
E: Yumuşayabilen, düşük sürtünmeli kil mineralli sıvama, kaolinit, talk, grafit vb az miktarda şişen kil (sıvama süresiz, kalınlığı 1-2 mm' den az olunca)	4.0	8-10
<i>(b) Temas 10 cm bir makaslama ile sağlanması (ince mineral dolgu)</i>		
F: Kumlu parçalar, kilsiz ayrılmış kaya vb	4.0	25-30
G: Yüksek derecede aşırı konsolide yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	6.0	16-24
H: Orta veya az derecede aşırı konsolide kil, yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	8.0	12-16
J: Şişen killi dolgu, montmorillonit vb (5 mm'den ince, sürekli), Ja, şişen malzeme yüzdesine göre ve temas şartlarına göre değişir	8.0-12.0	6-12
<i>(c) Makaslama duvarla temas yok</i>		
K: Ayrılmış veya ezilmiş	6.0	-
L: Bölgeler, bantlar veya ufalanmış kaya veya kil	8.0	-
M: G,H ve J maddelerine bakınız	8.0-12.0	6-24
N: Siltli veya kumlu kil, az miktarda ince taneli malzeme, bölgesel veya bant şeklinde	5.0	-
O: Kalın, sürekli kil bölgeleri veya bantları (kil için)	10.0-13.0	6-24
P: G,H ve J maddelerine bakınız	13.0-20.0	6-24

Çizelge 13. Eklem suyu indirgeme faktörü puanları ve tanımları

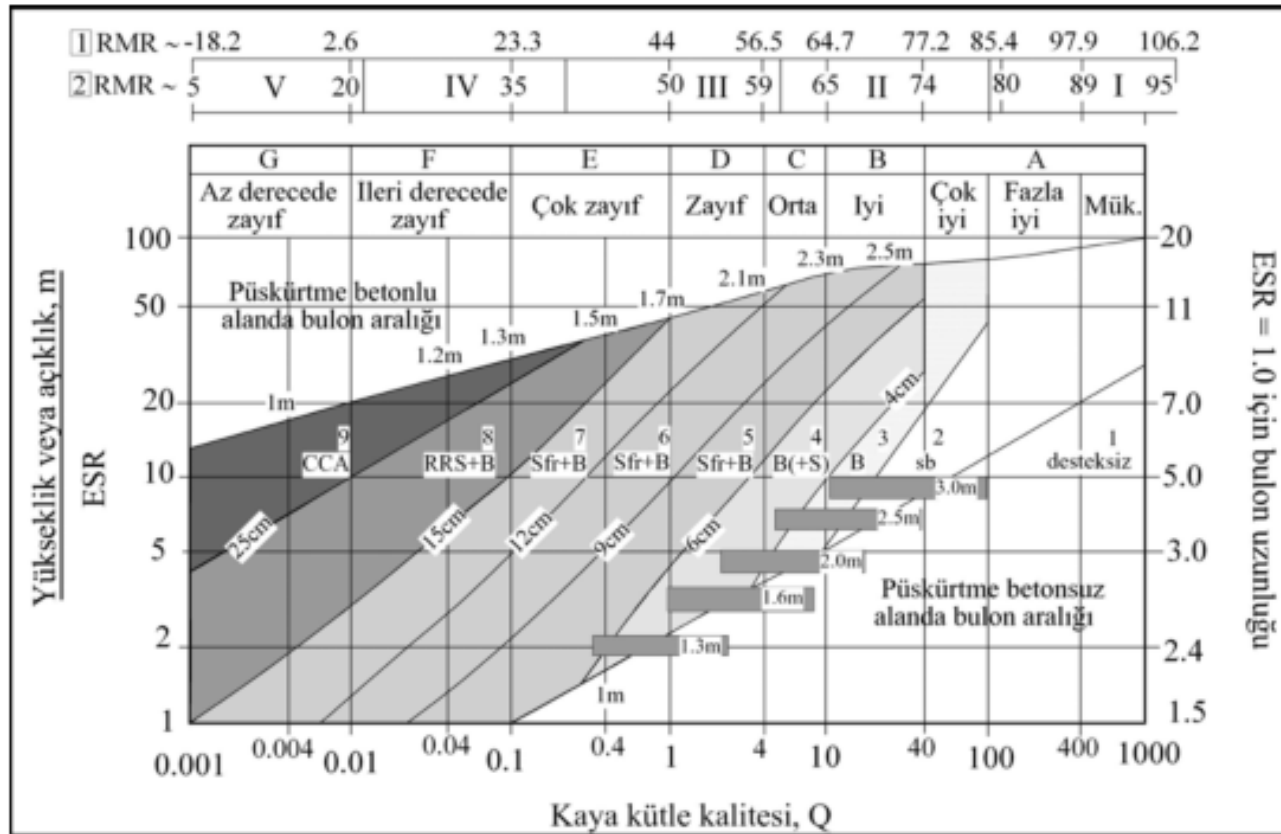
5. Eklem suyu indirgeme faktörü	J_w	Su basıncı, MPa
A: Kuru kazı veya çok az su gelimi, (örn. 5.0 l/dk)	1.0	<0.1
B: Orta derecede su gelimi, eklem dolgularında yıkanma	0.66	0.1-0.25
C: Sağlam kayada fazla su gelimi ve basıncı, dolgunsuz eklemler	0.5	0.25-1.0
D: Fazla su gelimi ve basıncı, dolgularda belirgin yıkanma	0.33	0.25-1.0
E: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalacak şekilde	0.2-0.1	>1.0
F: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalma yok	0.1-0.05	>1.0

Not : C ve F maddeleri genel yaklaşımlar olup, drenaj önlemleri varsa J_w artırılmalıdır.

Çizelge 14. Gerilme azaltma faktörü puanları ve tanımları

6. Gerilme azaltma faktörü	SRF		
<i>(a) Tünel kazısı sırasında kaya kütleğinde gevşeme oluşturabilecek ve kazıyı kesen zayıflık zonları</i>			
A: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi zon oluşumları, çok zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	10		
B: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği <50m)	5		
C: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği >50m)	2.5		
D: Sağlam kayada birçok makaslama zonu, zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	7.5		
E: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	5.0		
F: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	2.5		
G: Gevşek, açık eklemler, yoğun eklemler (herhangi bir derinlikte)	5.0		
<i>(b) Sağlam kaya, kayada gerilme problemleri</i>		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c
H: Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	2.5	>200	<0.01
J: Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli	1.0	200-10	0.01-0.3
K: Yüksek oranda gerilme, çok yakın yapı. Tünel duvarlarının stabilitesinde problemli olabilir	0.5-2.0	10-5	0.3-0.4
L: Masif kayada 1 saat içinde orta derecede dilimlenme	5-50	5-3	0.5-0.65
M: Masif kayada birkaç dakika içinde kaya patlaması ve dilimlenme	50-200	3-2	0.65-1.0
N: Sağlam kayada yamulma şeklinde kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	200-400	<2	>1.0
<i>(c) Sıkışan kaya: Yüksek gerilme altında yumuşayan kayanın plastik deformasyonu</i>			
O: Orta derecede sıkıştıran kaya basıncı	5-10		1-5
P: Yüksek derecede sıkıştıran kaya basıncı	10-20		>5
<i>(d) Şişen kaya: Su içeriğine bağlı olarak kimyasal şişme</i>			
R: Düşük kaya basıncında şişme	5-10		
S: Yüksek kaya basıncında şişme	10-15		

Not : Etkin makaslama zonları kazıyla kesişmezse SRF değerleri %25-50 azaltılır. $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ ise, $0.75\sigma_c$, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0.5\sigma_c$ kadar değer azaltılır. Tünelde tavan derinliği genişlikten az ise SRF 2.5'den 5'e artırılmalıdır. Kazı etkisinden kurtularak genelleştirme yapılabilmesi için SRF = 5, 2.5, 1.0 ve 0.5 değerlerinin artan derinlikle paralel kullanılması önerilir (örn. 0-5, 5-25, 25-250, >250 m)



Şekil 3. Tüneller ve yeraltı açıklıkları için kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerini tespit için Q-destek grafiği (Grimstad, 1993 modifiye hali)