

**FIRAT
ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**KAYA VE ZEMİN MEKANİĞİ
İLKELERİ
DERS NOTLARI**

PROF. DR. ZÜLFÜ GÜROCAK

2026

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun güvenerek kullandığı, en eski ve en yaygın yapı malzemesi taş ve topraktır. Bu iki malzeme insanlık tarihi boyunca yapı malzemesi olarak önemli bir yere sahip olmuştur. Ancak, değişen ihtiyaçlar ve bununla birlikte gelişim gösteren teknoloji bu iki malzemenin yapı malzemesi olarak kullanım alanını sınırlamakla birlikte, büyük boyutlara sahip mühendislik yapıların yine bu iki malzeme üzerine oturuyor olması, taşın “kaya” ve toprağın ”zemin” farklı bir açıdan önem kazanmasına neden olmuştur. Büyük yapıların ağırlığından kaynaklanan gerilmeler karşısında bu iki malzemenin davranışlarının bilinmesi, yapının güvenliği açısından önem kazanmış ve araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmelerini sağlamıştır. İşte günümüzde kaya ve zemin mekaniği olarak karşımıza çıkan bu iki bilim dalının gelişimi bu şekilde gerçekleşmiştir.

2. Dünya savaşı sonrasında başlayan hızlı endüstriyellemeye paralel olarak yapılan büyük barajlar, nükleer santraller, viyadükler, köprüler ve bunun gibi büyük ve hassas mühendislik yapıları temelde bulunan kayanın güvenilir bir ortam olup olmadığının belirlenmesi için denenmesi ve incelenmesinin gerektirmiştir. Zemine oranla kayanın geçirimsiz, sıkışmaz ve sonsuz kayma dayanımına sahip olduğu görüşü yaygın olmasına karşılık, yapıların ve yüklerin artması ile meydana gelen yenilme kriterlerinin belirlenmesi ve kaya ortamlardaki yapıların bu verilere göre boyutlandırılması kaya mekaniği biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Kaya mekaniği, kayanın mekanik özelliklerini ve davranışlarını inceleyen, teorik ve uygulamalı, disiplinler arası bir bilim dalıdır. Kayanın çevresindeki kuvvet sahalarına karşı davranışlarını inceler ve kaya ortamın ilk durumunu belirleyerek, teknik girişimden sonra oluşacak yeni durumu ve dolayısıyla kaya ile yapı arasındaki karşılıklı ilişkileri inceleyen, belirleyen ve buna bağlı olarak yapıları boyutlandıran teknik bilim dalıdır. Kaya mekaniği ulaşılabilen kayaların özellikleri, tutumları ve değişen gerilme şartlarındaki davranışlarını inceleyebilmektedir. Ulaşılabilen kaya, yerkabuğunun belli bir derinliğe kadar üst kısmını oluşturur. Kayanın sağlam ve masif olup da ulaşılamayan kısmını ise yapısal jeoloji inceler.

Kaya mekaniğinin gelişimini hızlandıran etkenlerin bazıları şunlardır:

1. Matematik ve fizik gibi temel bilimlerdeki gelişmelere paralel olarak gerilme ve deformasyonların duyarlı olarak ölçülebilmesi,
2. Petrol ve madencilikte derin işletmelere geçiş zorunluluğu,
3. Baraj, tünel, yeraltı santrali vb. yapılarda boyutların gittikçe artması

Kaya mekaniğinin inceleme konularını şu şekilde sıralamak mümkündür;

1. Mühendislik amaçlı olarak kayayı mekanik ve jeolojik yönden inceler,
2. Kayayı tanımlar ve sınıflandırır,
3. Kayanın basınç, çekme ve kayma kuvvetleri altındaki dayanımını belirlemek için standart deney yöntemleri ve cihazları geliştirir,
4. Su ve sıcaklık şartları altında kayanın davranışını inceler,
5. Kayanın statik ve dinamik yükler altındaki yenilme durumlarını inceler ve ölçmek için deney yöntemleri geliştirir,

2. GERİLME VE DEFORMASYON

2.1. Gerilme ve Türleri

Bir kesit (ayırma) yüzeyindeki iç kuvvetlerin diferansiyel birim alana düşen şiddetine gerilme denir. Diğer bir ifadeyle, birim alana uygulana iç kuvvettir.

$$\sigma = \frac{dF(\text{kuvvet})}{dA(\text{alan})}$$

Birimi kgf/cm^2 , N/mm^2 , kN/m^2 dir ve dört tür gerilme mevcuttur. Bunlar;

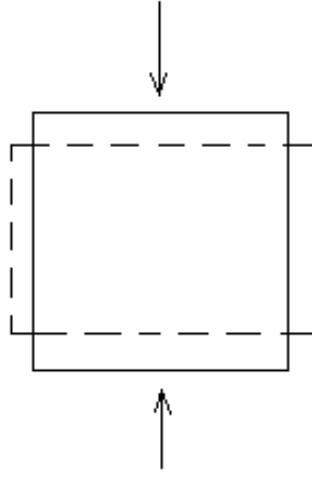
1. Normal gerilme
2. Kayma (teğetsel) gerilmesi
3. Burulma gerilmesi
4. Eğilme gerilmesidir.

Normal Gerilme

Herhangi bir düzleme dik olarak etkiyen, normal kuvvetin birim alana düşen şiddetidir ve iki çeşittir.

a) Sıkışma Gerilmesi

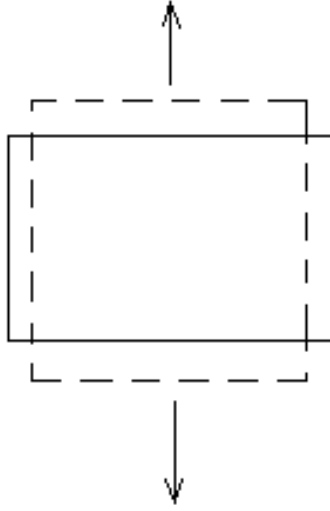
Etkime düzlemine doğru yönlendirilmiş normal gerilmelerdir. Kaya mekaniğinde (+) işaretlidir.



Şekil 1. Sıkışma gerilmesi ve şekil değişikliği

b) Çekme Gerilmesi

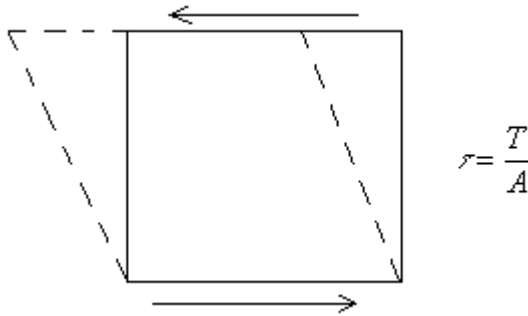
Etkime düzleminde uzaklaşan normal gerilmelerdir. Kaya mekaniğinde (-) işaretlidir.



Şekil 2. Çekme gerilmesi ve şekil değişikliği.

Kayma (Teğetsel) Gerilmesi

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



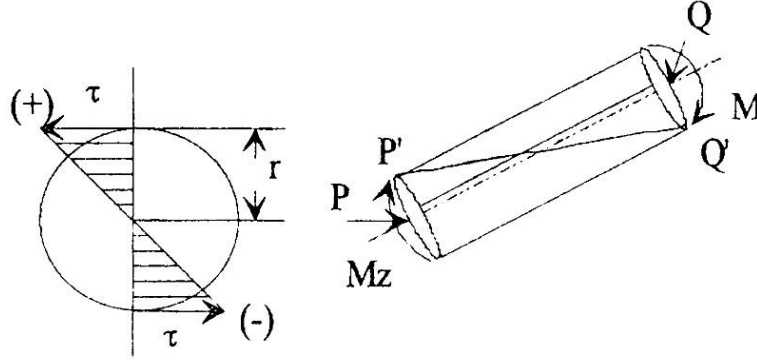
Şekil 3. Kayma gerilmesi ve şekil değişikliği.

Burulma Gerilmesi

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

$$\tau_{burulma} = \frac{M_z}{J_o} r$$

M_z : Momentin şiddeti, J_o : Cismin kutupsal atalet momenti, r : İncelenen diferansiyel alanın burulma ekseninden olan uzaklığı



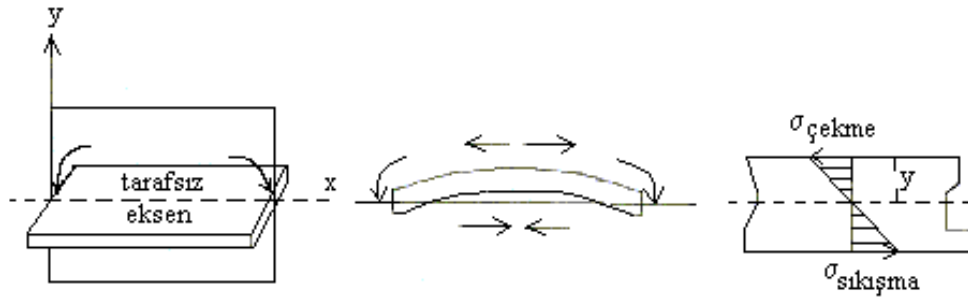
Şekil 4. Burulma gerilmesi.

Eğilme Gerilmesi

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

$$\sigma_{eg} = \frac{M_x}{J_x} y$$

M_x : Eğilme momenti, J_x : x eksenine göre atalet momenti, y : İncelenen diferansiyel alanın tarafsız eksene olan uzaklığıdır.



Şekil 5. Eğilme gerilmesi.

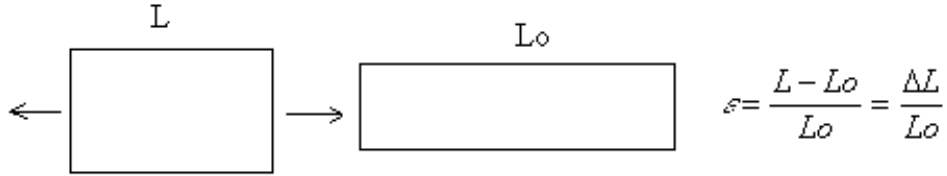
2.2. Deformasyon ve Türleri

Herhangi bir cisim dışarıdan uygulanacak gerilmeler altında şekil değişikliğine uğrar. Meydana gelen bu şekil değiştirme olayına **deformasyon** denir. Cisimlerde meydana gelen deformasyon uygulanan yük, elastik parametreler ve cismin geometrisine bağlıdır. Üç tip deformasyon vardır. Bunlar;

1. Boyuna deformasyon
2. Kuvadratik deformasyon
3. Makaslama deformasyonudur.

Boyuna Deformasyon

Cisme herhangi bir normal gerilme uygulandığında, cismin boyunda meydana gelen deformasyondur. Çekme gerilmesi ile cismin boyunda uzama, eninde daralma; sıkışma gerilmesi ile cismin boyunda kısalma, eninde ise genişleme meydana gelmektedir.



Şekil 6. Boyuna deformasyon

Kuvadratik Deformasyon

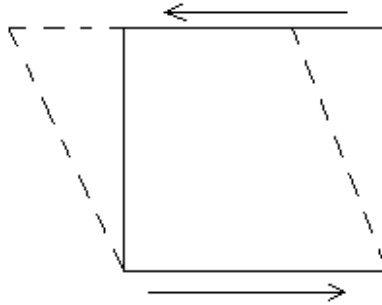
Jeolojik problemlerde en fazla görülen deformasyon tipidir ve

$$\lambda = \left(\frac{L}{L_0} \right)^2 = (1 - \epsilon)^2 \text{ ile ifade edilir.}$$

Kuvadratik deformasyon çözümlerinde Mohr diyagramlarının kullanımı oldukça yaygındır ve büyük kolaylık sağlamaktadır.

Makaslama Deformasyonu

Basit bir kuvvet çiftinin etkisi altında meydana gelen deformasyondur. Sadece şekil değişimi söz konusudur.



Şekil 7. Makaslama deformasyonu ve şekil değişimi.

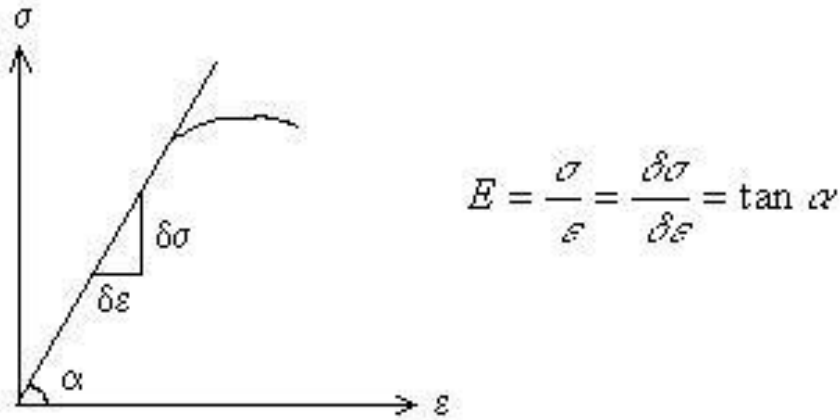
2.3. Gerilme ve Deformasyon İlişkileri

Elastik cisimlerin gerilme altında deformasyonlarını kontrol eden parametrelere **Elastik Parametreler** denir. Kayada meydana gelen deformasyon bu parametrelere bağlıdır. Bunlar;

1. Elastisite (Young) Modülü
2. Poisson Oranı
3. Kayma (Rijidite) Modülü
4. Hacimsel Sıkışma (Kompresibilite) Modülüdür.

Elastisite (Young) Modülü (E_m)

Hook kanununa göre, mükemmel elastik cisimlerde deformasyon gerilmenin lineer bir fonksiyonudur. Yani gerilme ile deformasyon arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Elastisite modülü, kayada yapılan tek eksenli sıkışma deneyi ile belirlenir. Deney sırasında uygulanan yük ve meydana gelen deformasyon miktarları belirlenir. Poisson oranının belirlenmesi için eksenel deformasyon ile birlikte yanal deformasyonun da belirlenmesi gerekir. Okunan değerler σ - ε grafiği ile ifade edilir ve kayadaki gerilme-deformasyon ilişkisinin gösteren grafikten kayanın elastisite modülü belirlenir. Bu grafikte Elastisite modülü, gerilme ile deformasyonu ifade eden eğrinin eğiminin tanjant cinsinden değeridir.

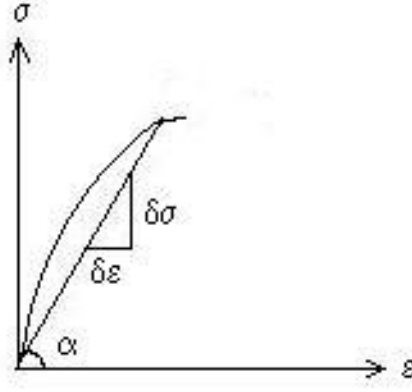


Şekil 8. Kayada gerilme-deformasyon ilişkisi ve elastisite modülünün belirlenmesi.

Elastisite modülü, σ - ε eğrisinden farklı şekillerde belirlenebilmektedir. Bunun sonucu olarak 3 tip elastisite modülü vardır.

a) Sekant (kiriş) Elastisite Modülü

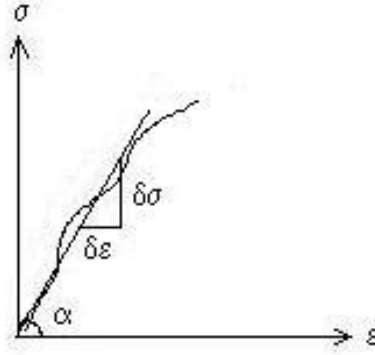
Cisim elastik, ancak mükemmel elastik değildir. Sekant elastisite modülü, kayanın geniş bir gerilme bölgesinde ortalama bir davranışı için kullanılır. Gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıç ve bitiş noktalarını birleştiren bir kiriş çizilir. Bu kirişin eğimi sekant elastisite modülüdür.



Şekil 9. Sekant elastisite modülü.

b) Tanjant Elastisite Modülü

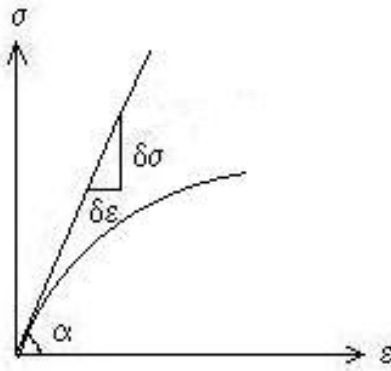
Herhangi bir gerilme için çizilen teğetin eğimi tanjant elastisite modülünün verir.



Şekil 10. Tanjant elastisite modülü

c) Başlangıç Elastisite Modülü

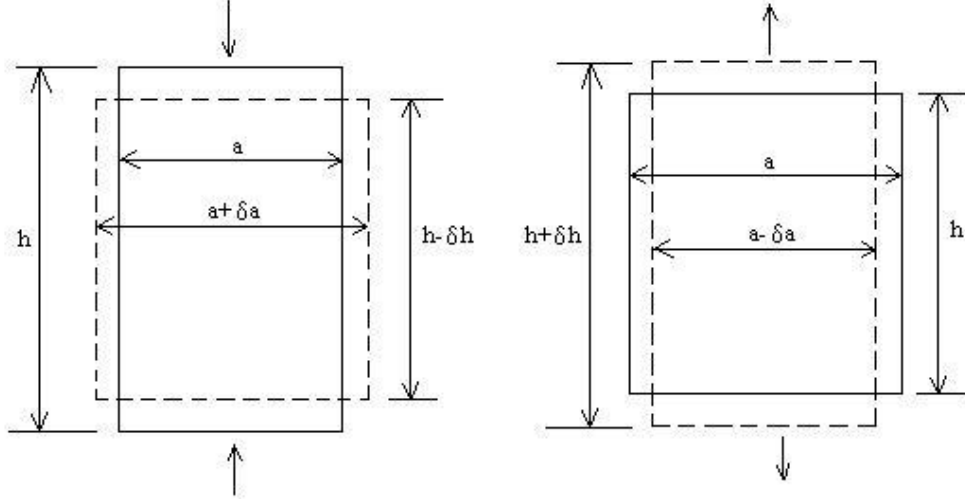
σ - ϵ eğrisinin başlangıç kısmına çizilen teğetin eğimidir. Bu elastisite modülü kazılabilirlik için önemlidir.



Şekil 11. Başlangıç elastisite modülü

Poisson Oranı (μ)

Sıkışma ve çekme kuvvetleri ile kayada aksenal ve yanal şekil değişikliği meydana gelir. Yanal şekil değiştirmenin aksenal şekil değiştirmeye oranı **Poisson Oranı** olarak tanımlanır.



Şekil 12. Sıkışma ve çekme kuvveti altındaki deformasyonlar

Tablo 1. Sıkışma ve çekme kuvveti altındaki deformasyon oranları

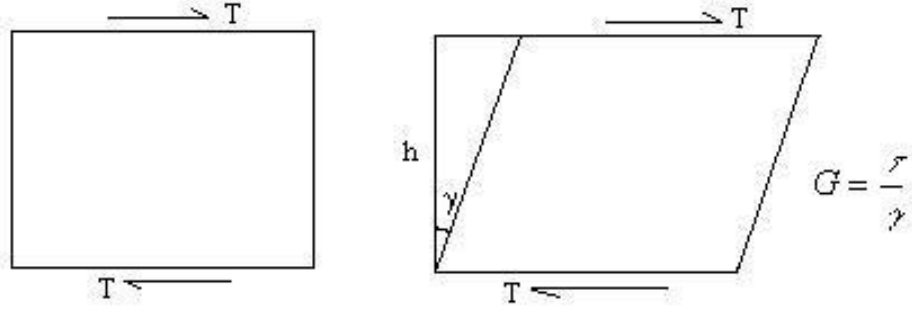
	Çekme	Sıkışma
Eksenel şekil değiştirme	$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h}$ (uzama)	$\varepsilon_1 = -\frac{\Delta h}{h}$ (kısalma)
Yanal şekil değiştirme	$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta a}{a}$ (daralma)	$\varepsilon_2 = \frac{\Delta a}{a}$ (genişleme)
Poisson Oranı $\mu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$		

Kayma (Rijidite) Modülü (G)

Kayma kuvveti bir cisim üzerine etkidiği zaman Şekil 13 te görülen bir şekil değişikliği meydana gelir. Yani boyutlar değişmemekle beraber açılar bozulur ve 90^0 lik açılardaki γ değişimi dikkate alınır. Radyan cinsinden ifade edilen çok küçük bir açı olan γ değeri;

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h} = \tan \gamma \quad \text{olup, deformasyon gibi boyutsuzdur.}$$

Meydana gelen γ açısının uygulanan kayma (kesme) gerilmesine oranı ise kaymanın kayma modülünü verir. Birimi. gerilme birimi ile aynıdır.



Şekil 13. Kayma kuvveti altındaki şekil değişikliği ve γ açısı

Hacimsel Sıkışma (Kompresibilite) Modülü (K)

İlk hacmi V olan bir cisme gerilme uygulandığı zaman, hacminde ΔV kadar bir değişiklik meydana geldiği kabul edilirse, Hacimsel Sıkışma Modülü

$$K = \frac{\Delta\sigma}{\Delta V} \quad \text{dir.}$$

2.4. Gerilme Durumları ve Dağılımları

Asal normal gerilmelerin farklı şiddetleri esas olarak 4 gerilme durumunu oluşturmaktadır.

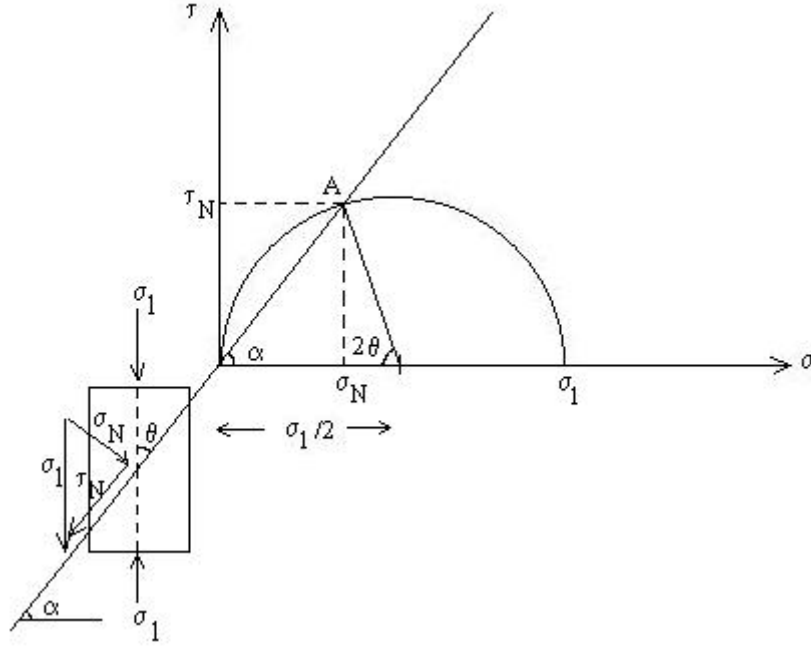
Bunlar;

1. Tek eksenli gerilme durumu
2. İki eksenli gerilme durumu
3. Üç eksenli gerilme durumu
4. İzostatik gerilme durumudur.

Bu gerilme durumları Mohr Daireleri adı verilen daireler ile ifade edilebilmektedir. Mohr gerilme dairesi herhangi bir noktaya etkiyen gerilmelerin durumunu grafiksel olarak gösteren çok yararlı bir araçtır.

Tek Eksenli Gerilme Durumu

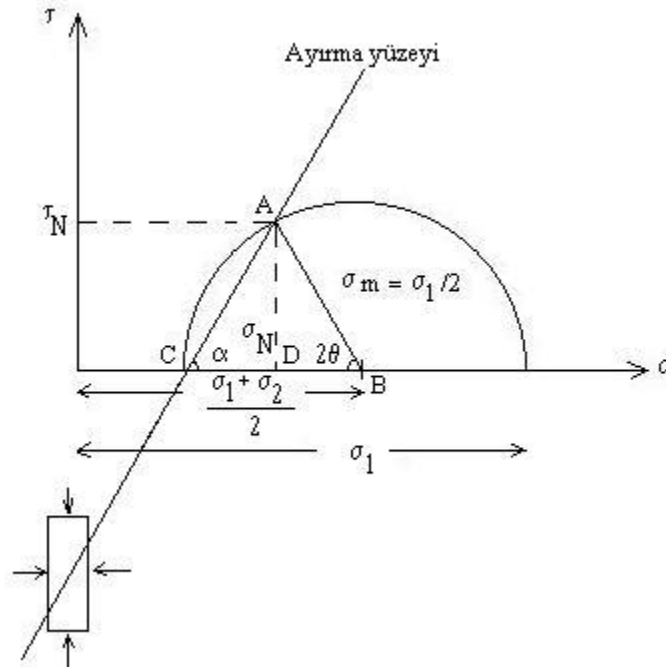
Bu gerilme durumunda σ_1 belli bir değere sahiptir ve $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ dır. Sadece düşey gerilme söz konusudur. Tek eksenli gerilme durumu için Mohr dairesini çizerek, σ_1 asal normal gerilmeye ait normal (σ_N) ve kayma (τ_N) bileşenleri bu daire üzerinde belirlemek mümkündür (Şekil 14). Burada, dairenin merkezinden, ayırma düzleminin düşeyle yapmış olduğu açının (θ) iki katı (2θ) kadar açıyla bir kiriş çizilir. Bu kirişin daireyi kestiği A noktası bulunur. A noktasından inilen dikin yatay eksene kestiği noktanın değeri τ_N , düşey eksene çizilen dikin düşey eksene kestiği noktanın değeri ise σ_N 'i verir.



Şekil 14. Tek eksenli gerilme durumu için Mohr dairesi ve σ_N ile τ_N 'in bulunması.

İki Eksenli Gerilme Durumu

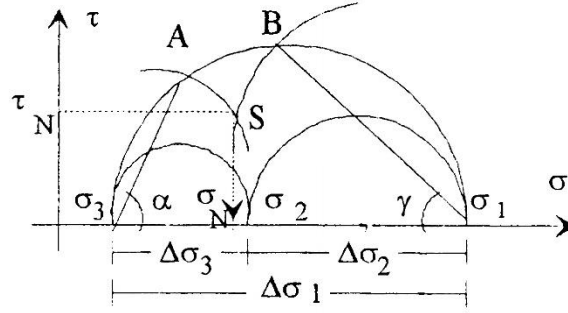
Farklı iki asal normal gerilmenin etkin olduğu gerilme durumudur. Burada $\sigma_1 > \sigma_2$ ve $\sigma_3 = 0$ dır. Bu gerilme durumunda σ_N ve τ_N 'in belirlenmesi tek eksenli gerilme durumu ile aynıdır.



Şekil 15. İki eksenli gerilme durumu için Mohr dairesi ve σ_N ile τ_N 'in bulunması

Üç Eksenli Gerilme Durumu

Bu gerilme durumunda her üç asal normal gerilme de ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) etkilidir. Seçilen ayırma yüzeyinin sırasıyla α , β ve γ açılarını göz önüne alarak σ_N ve τ_N değerlerinin belirlemek mümkündür. Bu amaçla üç eksenli gerilme durumuna ait Mohr daireleri çizilir (Şekil 16) ve aşağıda verilen sıra takip edilerek σ_N ve τ_N değerleri bulunur.

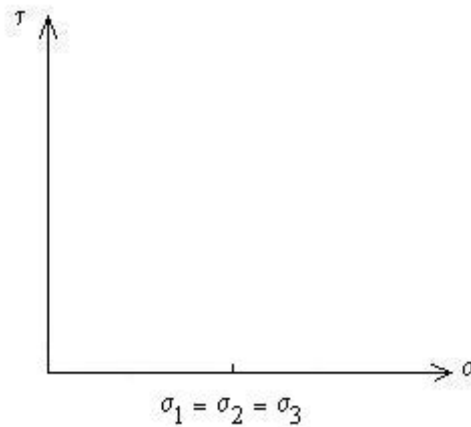


Şekil 16. Üç eksenli gerilme durumuna ait Mohr daireleri ve σ_N ile τ_N değerlerinin çizim yolu ile bulunması.

- α ve γ açıları yardımıyla büyük daire üzerindeki A ve B noktaları belirlenir.
- Merkezi, $\Delta\sigma_3$ çaplı dairenin merkezi olan ve A dan geçen, merkezi, $\Delta\sigma_2$ çaplı dairenin merkezi olan ve B den geçen daireler çizilir.
- Bu dairelerin kesiştiği S noktasının düşey eksendeki değeri τ_N 'i, yatay eksendeki değeri de σ_N 'i verir.

İzostatik Gerilme Durumu

Her üç asal normal gerilmenin şiddeti de aynı ise ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) deviatör gerilmeler oluşmaz. Bu durumda Mohr gerilme daireleri aynı noktada toplanır. Bu gerilme durumunda cismin hangi ayırma yüzeyi seçilirse seçilsin, hiçbir kayma gerilmesi etkili olmaz, sonsuz sağlamdır.



Şekil 17. İzostatik gerilme durumu.

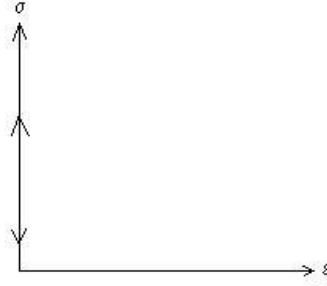
3. CİSİMLERİN MEKANİK DAVRANIŞ TÜRLERİ

Kuvvetler altındaki cisimler beş şekilde davranış gösterir. Bu davranışlar,

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

Rijit Davranış

Bir yük altındaki katı davranıştır. İdeal rijit cisimlerde, gerilmeyle hiçbir deformasyon meydana gelmez ve şekil değişikliği olmaz.



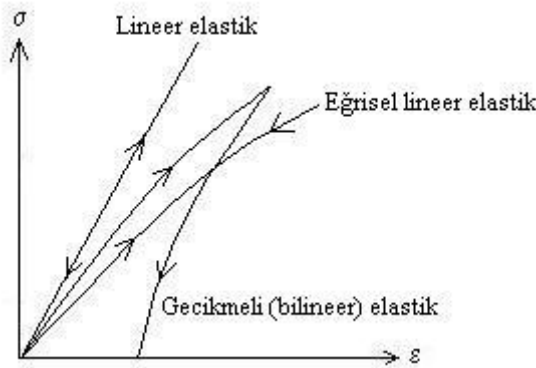
Şekil 18. Rijit davranış.

Elastik Davranış

Mükemmel elastik cisimlerde deformasyon gerilmenin bir fonksiyonudur. Elastik sınıra kadar lineer ilişki ile elastik davranış, bu noktadan itibaren de plastik davranış başlar. Elastik davranışta meydana gelen deformasyon geri dönüşlüdür. Bu davranış türünü gösteren cisimlere gevrek veya elastik cisimler denir. Meydana gelen deformasyonun geri dönüşüm şekline göre;

1. Lineer elastik
2. Eğrisel elastik
3. Gecikmeli (bi-lineer) elastik

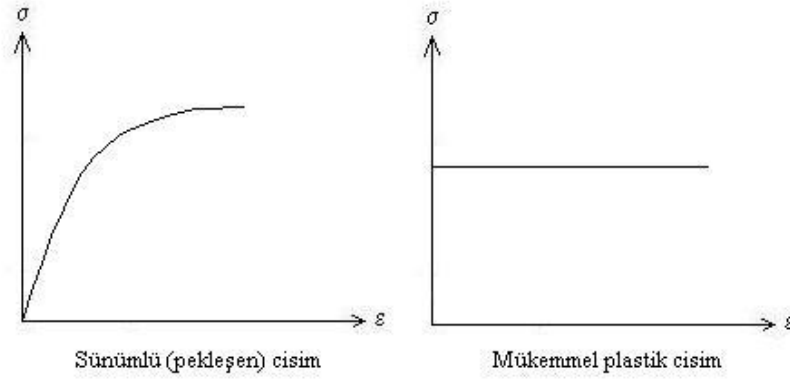
olmak üzere 3 tipi vardır.



Şekil 19. Elastik davranış türleri

Plastik Davranış

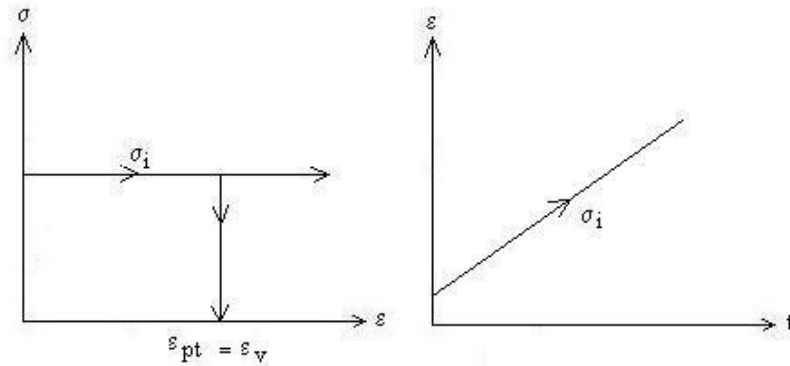
Elastik sınırın aşılması ile plastik davranış başlar. Gerilme kaldırıldığı zaman meydana gelmiş olan deformasyon ortadan kalkmaz. Uzun süre akma gösteren plastik cisimlere **sünümlü (pekleşen) cisimler** denir. Gerilmenin sonlu bir değeri için gerilmenin sabit kaldığı durumlarda, deformasyonun sürekli arttığı cisimlere ise **mükemmel plastik cisimler** denir.



Şekil 20. Plastik davranış türleri.

Viskoz Davranış

Sabit gerilmeler altında ve zamana bağlı olarak, sıvıya benzer özellikteki kalıcı deformasyonlardır. Viskoz cisimler kendi ağırlıklarıyla zamana bağlı olarak şekil değiştirirler.



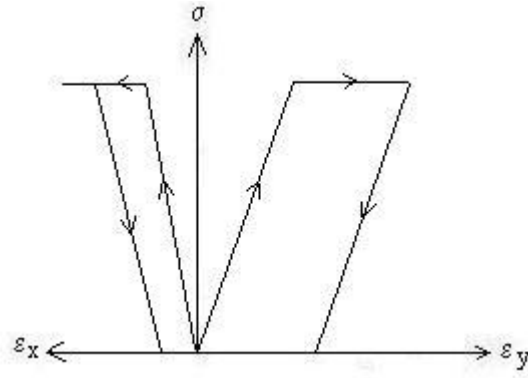
Şekil 21. Viskoz davranış

Karışık Davranışlar

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

a) Elasto-plastik davranış

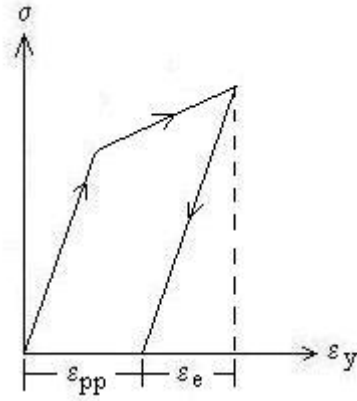
Cisme gerilme uygulandığında önce ideal elastik davranış gözlenir. Gerilmenin artırılması ile plastik davranış gözlenir. Gerilmenin kaldırılması sonucunda, meydana gelen elastik deformasyon geriye döner. Ancak plastik deformasyon kalıcıdır.



Şekil 22. Elasto-plastik davranış

b) İdeal olmayan (pekleşen) Elasto-plastik davranış

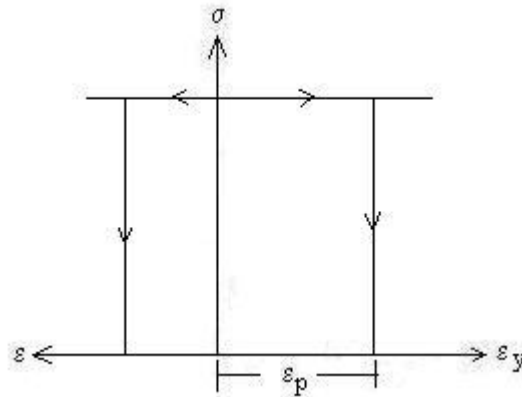
Mükemmel plastik özellik göstermeyen cisimlerde, elastik deformasyondan sonra artan gerilme altında plastik deformasyonun meydana gelmesi ve gerilmenin kaldırılması ile elastik deformasyonun geri dönmesidir.



Şekil 23. İdeal olmayan (pekleşen) elasto-plastik davranış

c) Rijit-plastik davranış

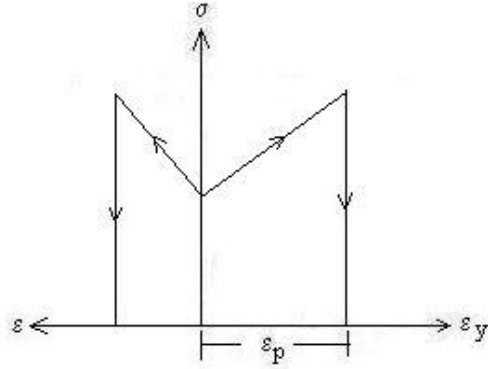
Mükemmel plastik özellik gösteren cisimlerde, belirli bir yüklemekten sonra aniden plastikleşen cisimlerin davranışdır.



Şekil 24. Rijit-plastik davranış

d) İdeal Olmayan (pekleşen) Rijit-plastik davranış

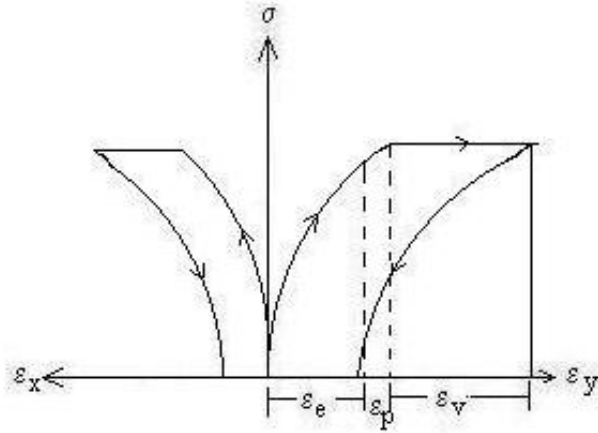
Mükemmel plastik özellik göstermeyen cisimlerde, gerilme artışı ile meydana gelen plastik davranış tipidir.



Şekil 25. İdeal olmayan (pekleşen) rijit-plastik davranış

e) Elasto-plasto-viskoz davranış

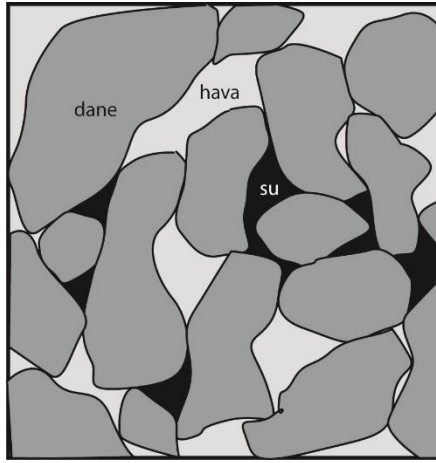
Önce zamandan bağımsız olarak elastik, sonra plastik davranış gösteren bir cismin daha sonra viskoz davranış göstermesidir. Zamana bağlı olarak oluşan viskoz deformasyon azalabilir veya artabilir.



Şekil 26. Elasto-plasto-viskoz davranış

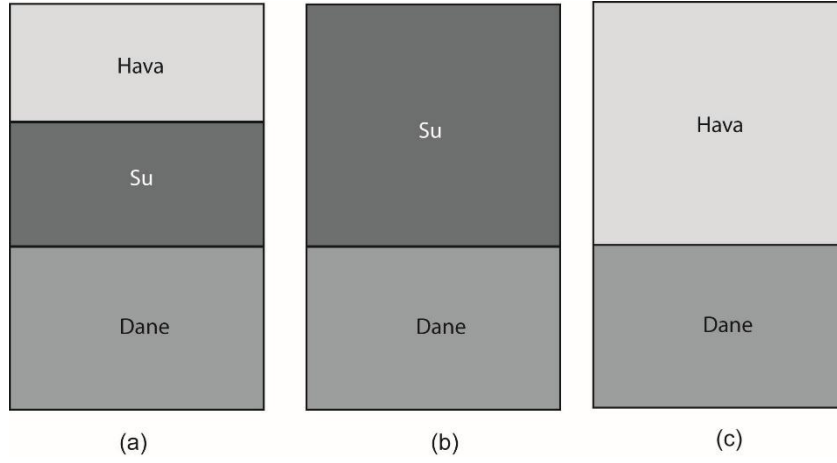
4. KAYA MALZEMESİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Daneler ve daneler arasındaki boşluklardan oluşan kaya malzemesi katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır (Şekil 27). Doygun hale geldiğinde boşluklar su ile dolduğundan katı ve su, kuru halde ise boşluklarda hava olduğundan katı ve hava fazları şeklinde de olabilmektedir. Katı fazı farklı şekil ve büyüklükteki inorganik veya organik daneler, sıvı fazı su, gaz fazını ise hava ve havanın içerdiği su buharı oluşturmaktadır. Kayalarda fiziksel özellikler bu üç fazın özelliklerinin ayrı ayrı ve birbirleriyle olan ilişkilerinin belirlenmesine dayandırılır ve bir kaya malzemesinde hacim ağırlık ilişkileri ile bu özellikler belirlenir.



Şekil 27. Hava ve su ile dolu boşluklar ile katı danelerden oluşan bir kaya birimi

Kaya malzemesini oluşturan daneler ve daneler arasındaki boşlukların kısmen su ve kısmen de hava ile dolu olduğu durum **doğal hal** (Şekil 28a) denir. Boşlukların tamamen su ile dolu olduğu durum **doygun hal** (Şekil 29b), boşluklarda hiç suyun bulunmadığı ve tamamen hava ile dolu olduğu durum ise **kuru hal** (Şekil 30c) olarak ifade edilmektedir. Burada dikkate edilmesi gereken durum, danelerin ve daneler arasındaki boşlukların hacminde herhangi bir değişikliğin söz konusu olmadığı, sadece boşluklardaki suyun ve havanın oranlarında değişiklik olduğudur.

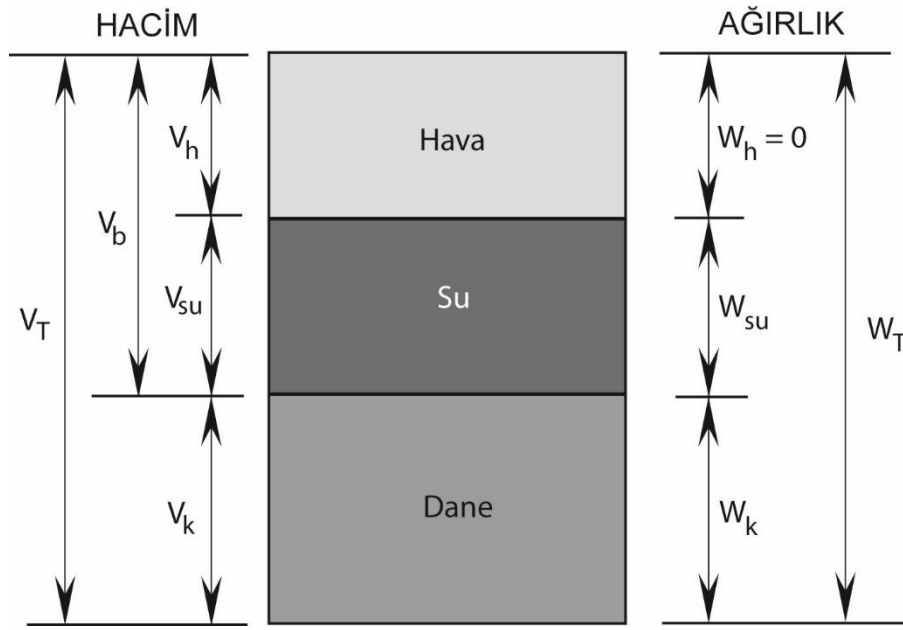


Şekil 28. Doğal, doygun ve kuru haldeki kaya malzemelerine ait faz diyagramları

Kaya malzemesinde hacim-ağırlık ilişkileri ortaya koymakta yararlanılan en kolay yöntem faz diyagramı denilen diyagramları kullanmaktır. Bu diyagramlarda her bir fazın hacim ve ağırlıkları farklı simgeler ile ifade edilmekte, daha sonra bu fazlar arasındaki hacim-ağırlık, ağırlık-ağırlık ve hacim-hacim ilişkileri kolaylıkla formüle edilebilmektedir. Bu ilişkileri incelerken dikkat edilmesi gereken nokta, kaya malzemesinin hangi halde olduğudur. Farklılıklar görülmekle birlikte genel olarak simgelendirme aşağıdaki şekilde yapılmaktadır;

- V_T : Toplam hacim
- V_k : Danelerin (katı) hacmi
- V_b : Boşlukların hacmi
- V_{su} : Boşluklardaki suyun hacmi
- V_h : Boşluklardaki havanın hacmi
- W_T : Toplam ağırlık
- W_k : Danelerin (katı) ağırlığı
- W_{su} : Boşluklardaki suyun ağırlığı

Suya doygun olmayan yani doğal haldeki bir kaya malzemesini Şekil 31’de görüldüğü gibi şematik olarak bir faz diyagramı ile göstermek mümkündür. Faz diyagramının sol tarafında hacim, sağ tarafında ise ağırlık bileşenleri yer almaktadır.



Şekil 29. Kaya malzemesinin hacim ve kütle ilişkilerine ait faz diyagramı

1. Yoğunluk (ρ): Toplam kütlenin toplam hacme oranıdır.

$$\rho = \frac{M_T}{V_T} = \frac{\text{Toplamkütle}}{\text{Toplamhacim}}$$

2. Ağırlık (W): Kaya kütlesi ile yerçekimi ivmesinin (g) çarpımına eşittir.

$$W = M * g$$

3. Birim hacim ağırlık (γ): Kayanın ağırlığının hacmine oranıdır. Birimi, metrik sistemde gr/cm^3 veya t/m^3 , Uluslararası sistemde (SI) kN/m^3 tür.

$$\gamma = \text{yoğunluk} * \text{yerçekim ivmesi} = \rho * g$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{\text{Ağırlık}}{\text{Hacim}}$$

* **Newton:** 1 kg lık kütleye 1 m/s^2 lik ivme kazandırabilen kuvvettir.

Kaya malzemesinin birim hacim ağırlığı, malzemenin doğal kuru ve doymun durumda olmasına göre değişiklik gösterir. Çünkü, kayanın doğal, kuru ve doymun ağırlıkları birbirinden farklıdır. Boşluklar su ile tam dolu ise yani doymun durumda ise ağırlık en fazla, kısmen su ile dolu ise yani doğal halde ağırlık daha az, boşluklarda su olmaması durumunda yani kuru halde ise ağırlık en azdır.

a) Doğal birim hacim ağırlık (γ_n): Kayanın doğal haldeki ağırlığına W_n dersek, doğal ağırlığın toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_n = \frac{W_n}{V_T}$$

b) Kuru birim hacim ağırlık (γ_k): Kayanın kuru ağırlığına W_k dersek, kuru ağırlığın toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_k = \frac{W_k}{V_T}$$

c) Doygun birim hacim ağırlık (γ_d): Boşlukları tamamen su ile doymuş kayanın ağırlığına W_d dersek, doymuş ağırlığın toplam hacme oranıdır.

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V_T}$$

d) Dane birim hacim ağırlık (γ_s): Katı kısmın ağırlığının (kuru ağırlık) katı kısmın hacmine oranıdır.

$$\gamma_s = \frac{W_k}{V_k}$$

e) Batmış birim hacim ağırlığı (γ_b): Kayanın su içerisindeki birim hacim ağırlığıdır.

$$\gamma_b = \gamma_d - \gamma_w$$

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığıdır (Metrik sistemde $\gamma_w = 0.98 \sim 1.00 \text{ gr/cm}^3$, Uluslararası sistemde 9.807 kN/m^3 tür)

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

$$\% \omega = \frac{W_{su}}{W_k} = \left(\frac{W_n - W_k}{W_k} \right) \times 100$$

5. Gözeneklilik (porozite, n): Toplam boşluk hacminin kayanın toplam hacmine oranıdır.

$$\% n = \frac{V_b}{V_T} \times 100$$

6. Boşluk oranı (e): Boşluk hacminin katının hacmine oranıdır.

$$\% e = \frac{V_b}{V_k} \times 100$$

7. Özgül ağırlık (Gs): Kayanın dane birim hacim ağırlığının (γ_s) suyun birim hacim ağırlığına (γ_w) oranıdır. Birimsizdir.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

8. Doygunluk Derecesi (Sr): Kayanın boşluklarındaki suyun hacminin (V_{su}) boşluk hacmine (V_b) oranıdır.

$$\% Sr = \frac{V_{su}}{V_b} \times 100$$

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

9. Ağırlıkça (A_a) ve hacimce (A_v) su emme: Kayanın ağırlığına göre ve hacmine göre su emme yüzdesidir. Ağırlıkça su emme;

$$\% A_a = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100$$

Hacimce su emme ise;

$$\% A_v = \left[\frac{\frac{W_d - W_k}{\gamma_w}}{\frac{W_k}{\gamma_s}} \right] \times 100 \quad \text{ile hesaplanır.}$$

5. KAYA MALZEMESİNİN DAYANIMI

Kayalar gerilmeler altında şekil ve hacim değiştirirler. Kayanın dayanımı, bu gerilmelerin etkisi altında yenilmeye veya göçmeye karşı gösterdikleri dayanıklılık olarak tanımlanır. Bu dayanım, kayaları oluşturan tane ve minerallerin içyapılarına ve bunların dizilişlerine bağlı olduğu kadar, kayanın uğradığı gerilme koşulları, zaman ve deformasyonlarla da ilgilidir.

Kayanın dayanımına etki eden birçok yapısal faktör vardır. Bunların en önemlileri şunlardır;

- 1. Doku:** Kaya içindeki elemanların yada kristallerin büyüklüğü, biçimi, dizilişi dayanıma etki eder. Örneğin, ince taneli kumtaşının dayanımı, iri taneli kumtaşından daha fazladır.
- 2. Kristallenme, çimentolanma derecesi ve çimentonun türü:** Çimentonun boşlukları az veya çok doldurması, kompakt veya boşluklu bir kayanın meydana gelmesine neden olur. Taneleri birbirine bağlayan çimentonun türü silis, kalsit, kil vb. olabilir. Bunlar da dayanıma etki eder. Çimento kil olduğu zaman dayanım düşük, kalsit olduğunda orta, silis olduğu zaman fazladır.

3. **Kenetlenme derecesi:** Kayayı oluşturan kristallerin iyi kenetlenmiş olması dayanımı doğrudan etkilemekte ve artırmaktadır.
4. **Porozite:** Tane veya kristallerin dizilişi, kayanın porozite özelliğini etkilemektedir. Bu ise kayanın dayanımını etkiler. Porozitesi yüksek kayaların dayanımı düşüktür.
5. **Kayanın doygunluk derecesi:** Kayanın su emme derecesi arttıkça dayanımı azalmaktadır.
6. **İzotropi ve homojenite:** Kayanın farklı yönlerdeki özelliğinin aynı veya farklı olması sıkıma dayanımına etki yapar.
7. **Süreksizlikler:** Kayalarda tabakalanma, laminasyon, fissür, mikrofissür, eklem gibi süreksizlikler, kayanın dayanımına etki etmektedir. Kayada süreksizlik düzlemine dik ve paralel doğrultularda uygulanan gerilmeler farklı dayanım sonuçları vermektedir.

Kayanın dayanımını ifade eden iki ana parametre vardır. Bunlar **İçsel Sürtünme açısı (ϕ)** ve **Kohezyon (c)** dur. Bu parametreler, Coulomb tarafından ortaya konmuştur. İçsel sürtünme açısı uygulanan gerilmeye bağlı, kohezyon ise uygulanan gerilmeden bağımsızdır ve **Dayanım Parametreleri** olarak tanımlanırlar. İçsel sürtünme açısı (ϕ) kayayı oluşturan tanelerin, uygulanan gerilmeye birbirine sürtünerek karşı koymasından kaynaklanan bir kuvvettir ve birimi açıdır. Kohezyon ise gerilmeden bağımsızdır ve tanelerin birbirini çekme özelliği olarak tanımlanabilir. Bu iki parametre üç eksenli sıkışma ve kesme deneyleri sonucunda çizilecek olan Mohr yenilme zarfı kullanılarak belirlenirler.

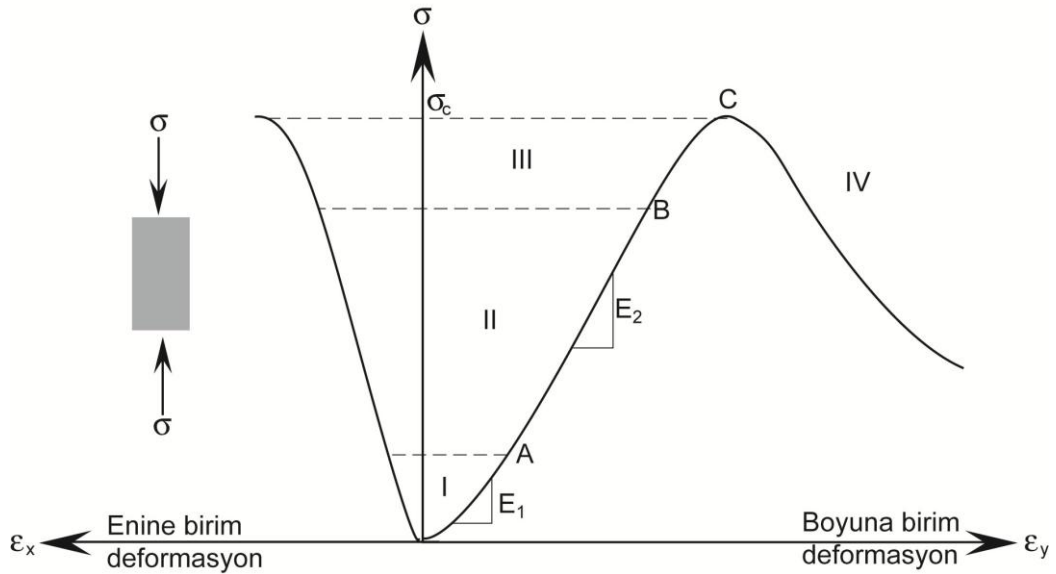
Bir kaya malzemesinin dayanımı, maruz kaldığı gerilmeye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanır. Kayanın maruz kaldığı gerilme, kayanın dayanımını aştığında ise kayada yenilme meydana gelecektir. Kaya mekaniğinde, kayaya etkiyen gerilmenin türüne bağlı olarak tanımlanan dayanım türleri vardır. Bunlar;

1. Sıkışma dayanımı
2. Çekilme dayanımı
3. Makaslama dayanımı
4. Burulma dayanımı
5. Eğilme dayanımı

Bu dayanım türlerinden başka aşınma, nokta yükü, disk makaslama, don ve darbe dayanımları da vardır. Bunların nasıl belirlendikleri xx bölümde anlatılmıştır.

6. KAYA MALZEMESİNİN DEFORMASYON ÖZELLİKLERİ

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 farklılıklar oluşur. Bir kaya malzemesinin gerilme birim deformasyon ilişkisi en basit şekliyle aşağıdaki gibidir.



Şekil 30. Kaya malzemesinde gerilme-birim deformasyon ilişkisi

Genel olarak gerilmeye bağlı olarak kaya malzemesinin deformasyon davranışını, I, II, III ve Yenilme sonrası bölge olmak üzere dört bölgeye ayırmak mümkündür.

I. Bölge: Gerilmenin uygulanmaya başlanmasıyla birlikte kaya malzemesinin içindeki boşluk, çatlak gibi kısımların kapandığı bölgedir (OA arası). Bu bölgede deformasyon fazladır. Gerilme-deformasyon eğrisinin eğimi düşük ve bu nedenle de elastisite modülü (E_1) değeri düşüktür.

II. Bölge: Gerilme- deformasyon eğrisinin doğrusal elastik davranış gösterdiği A ile B arası bölgedir. Örnekteki boy kısalması yanal uzamadan fazladır. Eğrinin eğimi I. Bölgeye göre daha fazladır. Bu bölgede belirlenen elastisite modülü (Young modülü) değerinin (E_2) genel olarak kayayı temsil ettiği düşünülür ve *Ortalama Modül* olarak da isimlendirilir. Söz konusu bölgedeki enine birim deformasyon dikkate alınarak kaya malzemesini temsil eden Poisson oranı (ν) da belirlenebilir.

III. Bölge: Gerilme değerinin artması ve B noktasına ulaşmasından sonra kaya elastik davranış yerine plastik davranış göstermeye başlar. Boşaltma yapıldığı takdirde 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, gerilmenin C noktasına yani kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı değerini (σ_c) aşması sonucu yenilme gerçekleşir. B noktasından sonra kayanın gerilme etkisindeki davranışı sınırlı davranış olarak da adlandırılır.

IV. Bölge: Bu bölge yenilmenin gerçekleştiği bölgedir. Kontrollü yükleme yapıldığı takdirde, örnek kırılarak yenilir ve bu bölgenin davranışı belirlenemez. Birim deformasyon kontrollü deney aleti kullanıldığı takdirde, yenilme sonrası davranışı belirlemek mümkündür. Bu bölgede, kayanın dayanımı hızla düşmesine rağmen, hala bir miktar dayanıma sahip olduğu söylenebilir.

7. KAYA MEKANİĞİNDE YAPILAN LABORATUVAR DENEYLERİ

Bir kaya malzemesinin fiziksel, mekanik ve elastik özelliklerinin belirlenmesinde laboratuvar deneyleri önemli bir yer tutar. Bu deneyler uluslararası ve ulusal kuruluşlar tarafından standardize edilmiştir ve deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında bu standartlar dikkate alınır.

1. Tek Eksenli Sıkışma/Basınç Deneyi

Tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c ya da UCS) olarak da isimlendirilen bu dayanım türü, sıkışma gerilmesi etkisinde olan bir kaya malzemesinin yenildiği andaki gerilme değeridir. Gerek sağlam kaya malzemesinin temel bir mekanik özelliği, gerekse kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde temel bir girdi parametresi olarak kullanılması nedeniyle, bu dayanım türü kaya mekaniği çalışmalarında önemli bir yere sahiptir ve sağlam kaya malzemesinden alınan karot örneğinin (silindirik örnek) laboratuvarında tek eksenli yükleme koşulunda kırılmasıyla belirlenir. Uygulamada, küp örneklerin kullanımı da söz konusudur, ancak en yaygın olanı silindirik örnek kullanımınıdır.

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi ile ilgili olarak birçok standartta (TS, BS, ve ASTM gibi) farklı yöntemler önerilmesine karşın, günümüzde en yaygın olarak kabul görmüş öneri ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemdir. ISRM (2007)'ye göre tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi boy (L)/çap (D) oranı 2.5-3.0 olacak şekilde hazırlanan karot örnekler hidrolük pres yardımıyla sıkışma kuvveti uygulanmakta ve yenilme anındaki yük (F) gerilmenin uygulandığı yüzey alanına (A) bölünerek kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_c) hesaplanmaktadır.

ISRM (2007)'ye göre deney şu şekilde yapılmaktadır.

1. Denedeyde tercihen 54 mm çaplı karot örnekler kullanılır ve bu örnekler boy/çap oranı 2.5-3.0 arasında olacak şekilde, alt ve st yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde kesilir ve bu yüzeyler parlatılır.
2. Örneğin apı, boyu kumpas yardımıyla ölçülür ve kayıt edilir.
3. rnek 5-10 dk aralığında yenilecek şekilde veya saniyede 0.5-1.0 MPa'lık bir gerilme hızıyla yüklenir.
4. Örneğin yenildiği andaki yk kayıt edilir.

Örneğin kırıldığı andaki yük değeri (F) belirlenir ve aşağıdaki eşitlikteki gibi yenilen örneğin kesit alanına (A) bölünerek kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı hesaplanır.

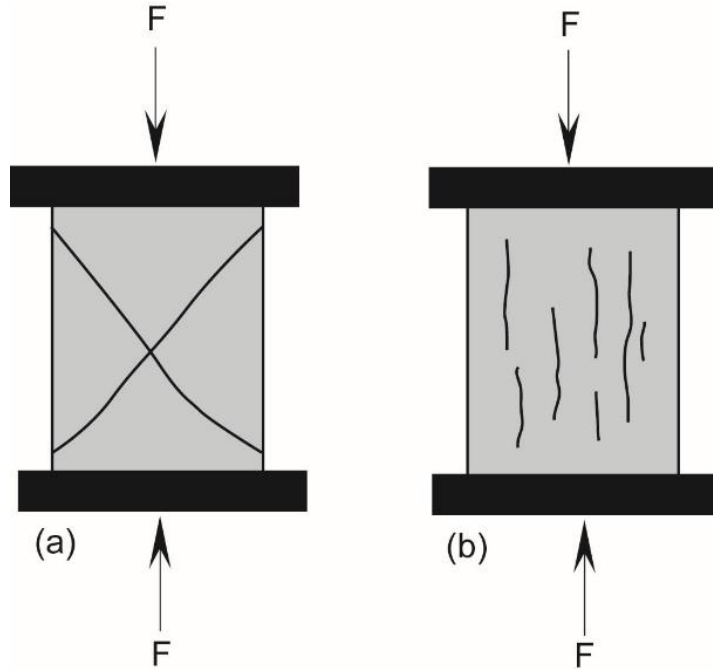
$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Bu eşitlikte,

σ_c : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (kN/m²)

F : Yenilme anındaki kuvvet (kN)

A : Kuvvetin etki dięi alandır (m²)



Şekil 31. Tek eksenli sıkışma deneyi ve farklı yenilme ekilleri

Gevrek kayada, tek eksenli sıkışma deneylerinde örnek alanında değişme olmadan ekil (35a) kırılma meydana gelir. Gevrek özellikte olmayan snml kayada ise ekil değişikliği oluşmakta (ekil 35b) ve yenilme anında örneğin kesit alanı büyümektedir. Bu nedenle snml kayalarda (kıltaşı, killi istler) tek eksenli sıkışma dayanımı, kırılma anındaki yükün, kırılma anındaki kesit alanına oranı olarak tanımlanır.

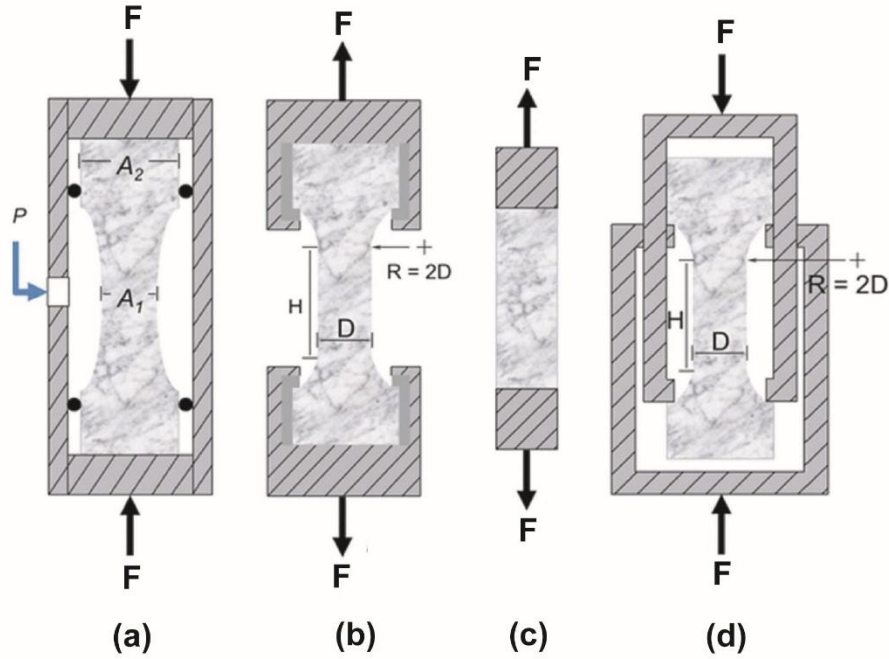
$$\sigma_c = \frac{F}{A_k}$$

A_k : Yenilme anındaki kesit alanıdır.

2. Çekme Deneyi

Kaya malzemesinin çekme gerilmesine gösterdiği direnç olarak tanımlanan çekme dayanımı, silindirik kaya malzemesi üzerinde laboratuvarında yapılan deneyler ile belirlenebilmektedir. Bu deneyler doğrudan ve dolaylı çekme olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir.

Doğrudan çekme deneyi ile ilgili olarak farklı araştırmacı veya kuruluşlar tarafından önerilmiş yöntemler mevcuttur (Şekil 32). Günümüzde doğrudan çekme dayanımının belirlenmesinde ISRM (2007) ve ASTM (2008) tarafından önerilen ve benzer özellikler taşıyan yöntemler (Şekil 34c) tercih edilmekte ve bu yöntemlere göre deneyler gerçekleştirilmektedir.



Şekil 32. Doğrudan çekme deneyi yöntemleri

ISRM (2007)'ye göre deneyin yapılışı şu şekildedir;

- Çapı tercihen 54 mm'den büyük silindirik kaya örnekleri boy (L)/çap (D) oranı 2.5-3.0 arasında olacak şekilde, alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde kesilir.
- Çekme başlıkları örneklere yapıştırıcı kalınlığı en fazla 15 mm olacak şekilde çimento ya da epoksi yardımıyla yapıştırılır.

- c) Örnek, yapıştırıcının sertleşmesi için $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %50 nemli bir ortamda, 5-6 gün bekletilir.
- d) Yükleme hızı örneğin 5 dk içerisinde yenilecek şekilde ayarlanarak deney gerçekleştirilir.

Deney tamamlandıktan sonra yenilme anındaki yük (F) örnek yüzey alanına (A) bölünerek kayanın çekme dayanımı belirlenmektedir.

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

Bu eşitlikte;

σ_t : Kaya malzemesinin çekme dayanımı (kN/m^2)

F : Yenilme anındaki kuvvet (kN)

A : Kuvvetin etki ettiği alandır (m^2).

Kaya malzemesinin çekme dayanımının dolaylı olarak belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem vardır. Bunlar, Brazilian deneyi, üç ve dört nokta eğilme deneyi, halka deneyi, Loung deneyi ve sınırlandırılmış (confined) çekme deneyidir. Bu yöntemlerden en çok tercih edilen ve en yaygın olarak kullanılanı ISRM (1978) ve ASTM D3967 (2008b) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilen Brazilian deneyidir. Bu yöntem, kolay örnek hazırlanması, basit ve ucuz bir deney olması nedeniyle en fazla tercih edilen yöntemdir. ISRM (2007) ve ASTM D3967 (2008b) tarafından standartlaştırılan Brazilian deneyinde silindirik örnekler kullanılmaktadır. Örnek, herhangi bir aparat veya yastık kullanmadan veya farklı yastık ve çeneler arasına yerleştirildikten sonra (Şekil 33), çapsal olarak örnek yenilinceye kadar yüklenir. Çapsal olarak yüklenen kaya örneğinin düşey eksen boyunca sıkışma, yatay eksen boyunca da çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Deney sonunda aşağıdaki eşitlik kullanılarak kaya malzemesinin dolaylı çekme dayanımı hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = \frac{0.636F}{Dt}$$

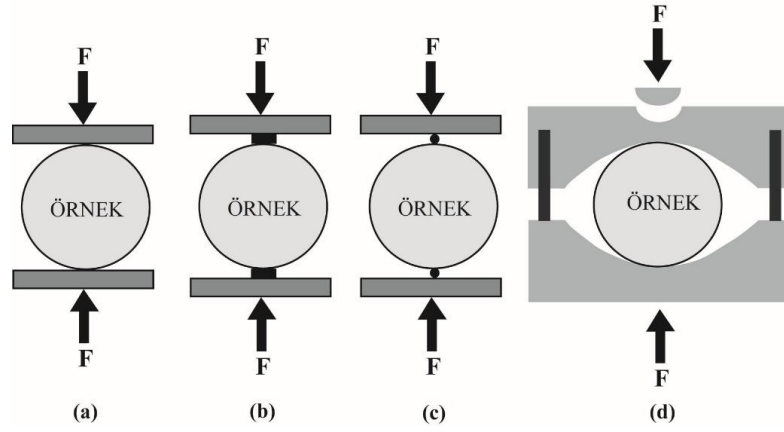
Bu eşitlikte;

σ_t = Kaya malzemesinin Brazilian çekme dayanımı (MPa)

F = Yenilme anındaki kuvvet (N)

D = Örneğin çapı (mm)

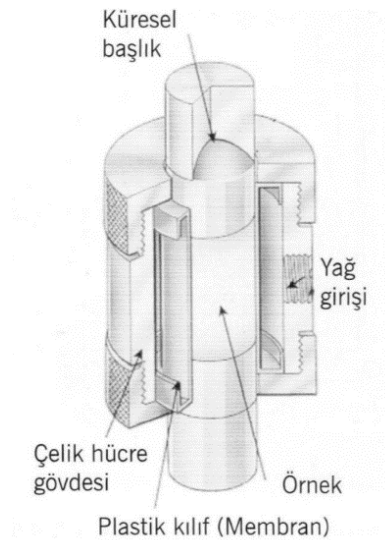
t = Örneğin kalınlığı (mm)'dir.



Şekil 33. Brazilian deneyinde kullanılan yükleme levhaları (a) Düz yükleme levhası, (b) Tamponlu yükleme levhası, (c) Çelik çubuklu yükleme levhası, (d) Yükleme çenesi

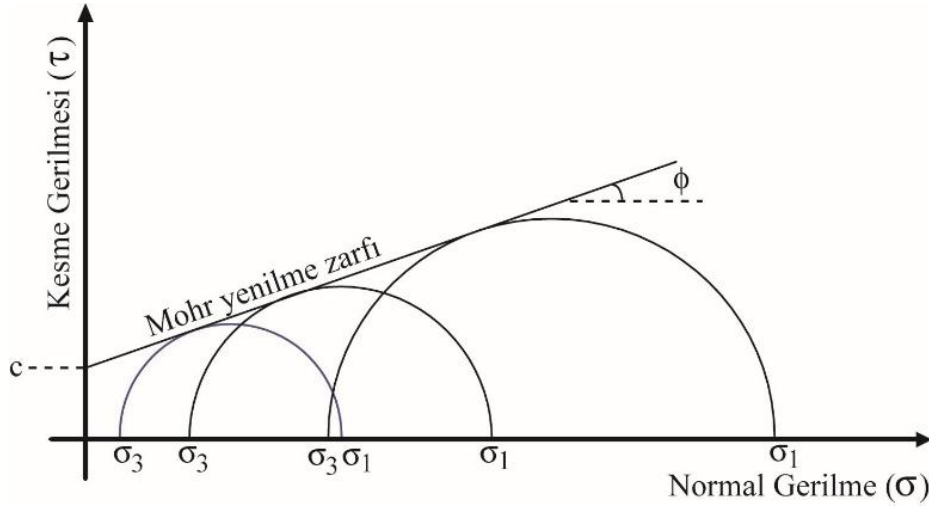
3. Üç Eksenli Sıkışma/Basınç Deneyi

Kaya malzemesinin dayanımı, kayanın kesme kuvvetleri altında yenilme ve deformasyona karşı gösterdiği dayanıklılık olarak tanımlanır ve laboratuvarında üç eksenli sıkışma dayanımı veya kesme kutusu deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu deneylerin ana amacı aslında kaya malzemesinin yenilme zarfının belirlenmesi, yenilme anındaki normal (σ) ve kesme (τ) gerilmeleri arasındaki ilişkinin ortaya konulması, ayrıca dayanım parametreleri olarak adlandırılan kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinin belirlenmesidir. Silindirik kaya örnekleri üzerinde gerçekleştirilen bu deney ISRM (2007) ve ASTM D2664 (2004) tarafından önerilen yöntemlere göre yapılmaktadır. Bu deneyde, hazırlanan örnekler basınç hücresi (Şekil 34) içerine yerleştirildikten sonra belli değerlerde sabit yanıl gerilme (σ_3) uygulanmakta ve her bir yanıl gerilme kademesinde, örnek yenilinceye kadar düşey gerilme (σ_1) uygulanmaktadır.



Şekil 34. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneyindeki basınç hücresi

Aynı deney diğer bir örnek üzerinde yanal gerilme değeri 2 kat artırılarak tekrarlanmakta ve bu en az üç farklı σ_3 değerindeki σ_1 değerleri belirlendikten sonra, yatay eksenin normal gerilmeyi (σ), düşey eksenin ise kesme gerilmesini (τ) ifade eden grafikte her bir deneye ait Mohr daireleri çizilmektedir (Şekil 35). Bu Mohr dairelerine teğet geçen “Mohr Yenilme Zarfı” çizildikten sonra, bu zarfın yatayla olan açısı kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı (ϕ), düşey eksenini kestiği noktanın değeri ise kaya malzemesinin kohezyonu (c)’dur.



Şekil 35. Mohr daireleri, Mohr yenilme zarfı ve kohezyon (c) ile içsel sürtünme açısının (ϕ) belirlenmesi

Kaya malzemesinin ve zeminlerin kesme dayanımı ile dayanım parametreleri arasındaki ilişki Coulomb (1776) tarafından

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

eşitliği ile ifade edilmiştir. Bu eşitlikte;

τ = Kesme gerilmesi

σ = Normal gerilme

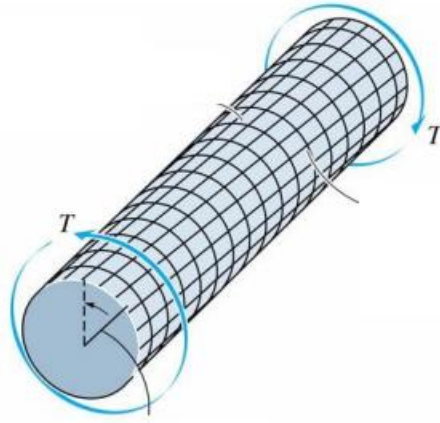
c = kohezyon

ϕ =İçsel sürtünme açısıdır.

4. Burulma Deneyi

Kaya malzemesinin burulma dayanımı kayanın üzerine etkiyen burulma kuvvetlerine karşı gösterdikleri dayanım olarak tanımlanmaktadır. Burulma dayanımını belirlemek için dolaylı kesme deneyi yapılmakta ve deney sırasında silindirik kaya örneği bir moment çifti

etkisi altında deformasyona uğratarak, kayada kesme gerilmeleri oluşturulmakta ve örnek üzerine etkiyen bu gerilmeler kayanın dayanımını aştığı anda kaya yenilmektedir.



Şekil 36. Burulma gerilmesi altındaki malzemenin deformasyonu

Kaya malzemesinin burulma kuvvetleri altında iken yenilme anındaki kesme gerilmesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_o = \frac{16 \cdot M_c}{\pi \cdot D^3} \cdot 100$$

Bu eşitlikte;

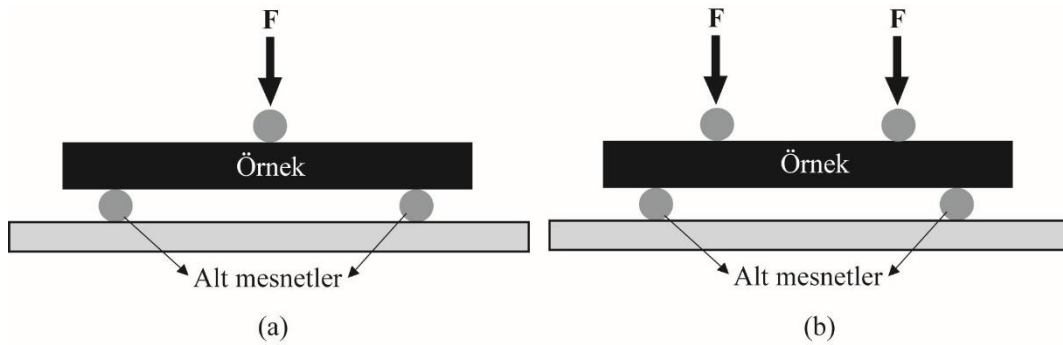
S_o = Kaya malzemesinin kesme dayanımı (kg/cm^2)

M_c = Örneğe etkiyen moment (kg.cm)

D = Örneğin çapı (cm)'dir.

5. Eğilme Deneyi

Kaya malzemesinin eğilme gerilmelerine gösterdiği direnç olarak tanımlanan eğilme dayanımı, Avrupa Norm (EN) ve ASTM C293/C293M (2010a) ve ASTM C78/C78M (2010b) tarafından standartlaştırılmış olan üç ve dört nokta eğilme deneyleri ile belirlenmektedir. Bu deneylerde prizmatik kaya örnekler üzerine uygulanan yükleme ile hem çekme hem de sıkışma gerilmeleri oluşturulmaktadır.



Şekil 37. Üç (a) ve dört (b) nokta eğilme deneyleri

Yükleme ile örneğin en dış kısmında oluşan çekme gerilmesinin malzemenin çekme dayanımına ulaşması anında örnek yenilmektedir. Deneyler yapıldıktan sonra aşağıdaki eşitlikler kullanılarak kaya malzemesinin eğilme dayanımı hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{e3\text{Nokta}} = \frac{3FI}{2bh^2}$$

$$\sigma_{e4\text{Nokta}} = \frac{3FI}{4bh^2}$$

Eşitliklerde;

$\sigma_{e(3\text{Nokta})}$ = Kaya malzemesinin üç nokta eğilmede çekme dayanımı (MPa)

$\sigma_{e(4\text{Nokta})}$ = Kaya malzemesinin dört nokta eğilmede çekme dayanımı (MPa)

F = Kırılma yükü (N)

l = Alt mesnetler arası açıklık (mm)

b = Örneğin eni (genişliği) (mm)

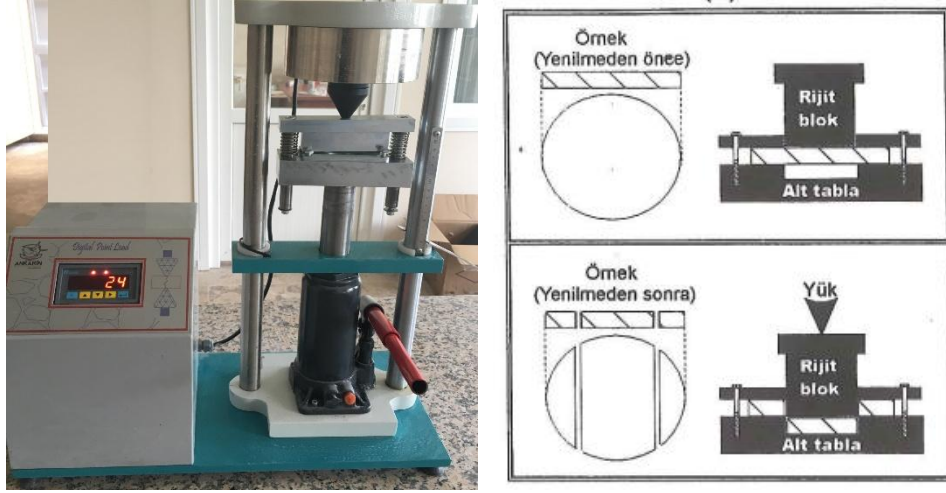
h = Örneğin yüksekliği (kalınlığı) (mm)

6. Disk Makaslama Deneyi

Kaya malzemesinin disk makaslama dayanımını belirlemek amacıyla disk makaslama deneyi yapılır. Bu deney diğer yöntemlere uygun şekilde örnek hazırlanamayan ve özellikle zayıf, kırıklı ve içerdiği sık aralıklı süreksizlikler nedeniyle dilimler halinde ayrılabilen kayaçlardan hazırlanmış disk şeklindeki örneklerin disk makaslama dayanım indeksi (Block Punch Strength Index, BPI)'nin tayin edilmesi amacıyla disk şeklinde hazırlanan örnekler üzerinde aşağıda verildiği gibi gerçekleştirilmektedir.

- Deneyde kalınlığı maksimum 10 mm olan disk örnekler kullanılır.
- Örneklerin alt ve üst yüzeylerinin mümkün olduğunca birbirine paralel ve yan yüzeylerinin çıkıntılardan arındırılmış olmasına dikkat edilir.
- Örnek, nokta yükleme dayanım indeksi deneyi için ISRM (1981) tarafından önerildiği gibi, 10-60 saniye arasında yenilecek şekilde nokta yükleme aletinin pompasının kolu yavaşça hareket ettirilerek yüklenir.
- Deneyin geçerli olabilmesi için, yükleme sonucunda örneğin düzeneğin yükleme başlığının kenarlarına paralel şekilde ve düzgün biçimde üç parçaya ayrılması gerekmektedir. Deneyin bu şekilde sonuçlanması halinde, yenilme anında herhangi bir D çapında ve t kalınlığındaki örneğe uygulanan kuvvet yük göstergesinden okunarak kaydedilir. Eğer örnek

bahsedilen şekilde kırılmazsa paralel kırıklar gelişmeksizin düzensiz bir yenilme gösterirse deney iptal edilir.



Şekil 38. Disk makaslama deneyi aleti ve deneyin yapılışı

Ulusay vd. (2001) düzenli şekilde yenilmiş olan örneklerin düzeltilmiş disk makaslama dayanım indeksi (BPI_c) için, çap ve kalınlık düzeltilmesinin de dikkate alındığı aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$BPI_c = 3499 * D^{-1.3926} * t^{-1.1265} * F_{t,D}$$

Burada,

BPI_c: Çap ve kalınlık düzeltilmesi uygulanarak hesaplanmış disk makaslama dayanım indeksi (MPa)

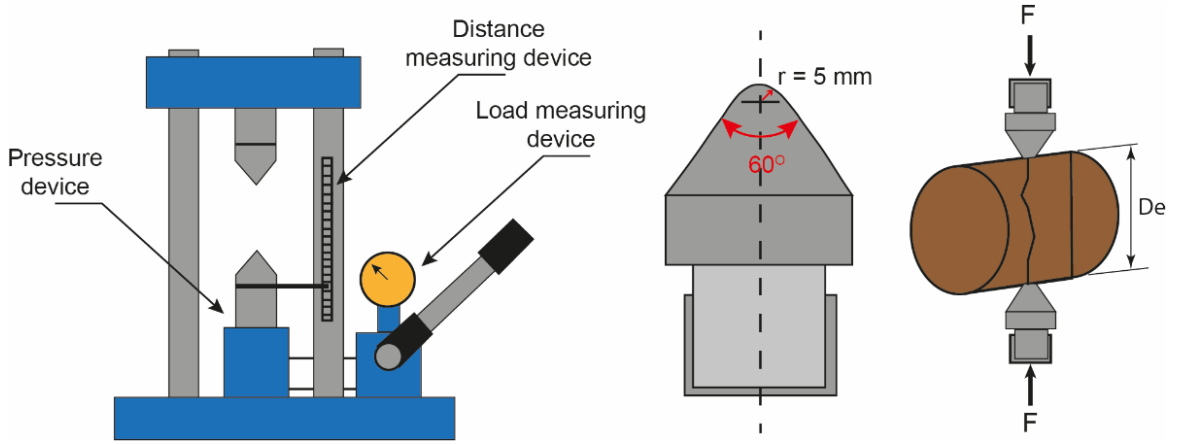
D: Örnek çapı (mm)

t: Örnek kalınlığı (mm)

F_{t,D}: Yenilme anında t kalınlığında ve D çapındaki örneğe uygulanan yük (kN)'tür.

7. Nokta Yüğü Deneyi

Nokta yüğü dayanımı, bir kaya numunesinin iki noktadan yüklenerek kırılmaya karşı gösterdiği direnci ifade eder ve kaya numunelerinin tek eksenli basınç dayanımını (UCS) hızlı ve pratik şekilde tahmin edilmek amacıyla kullanılır. ISRM (1985) yöntemine göre gerçekleştirilen deneyde iki konik uçlu yükleme plakasının kaya numunesine karşılıklı olarak yük uygulaması yapılır.



Şekil 39. Nokta yükü test ekipmanının ve nokta yüklemenin şematik gösterimi.

Nokta Yükü Dayanım İndeksi aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

Farklı boyutlardaki numunelerin karşılaştırılabilmesi için aşağıdaki eşitlik boyut düzeltmesi yapılır ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak dayanım 50 mm'lik standart boyuta indirgenir ve düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) hesaplanır.

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45}$$

Eşitliklerde;

I_s = Nokta yükü dayanımı (MPa)

$I_{s(50)}$ = Düzeltilmiş nokta yükü dayanımı (MPa)

P = Yenilme anındaki yükü (kN)

F = Boyut düzeltme faktörü

D_e = Etkili çap (mm) tır.

Çapsal deneyde karot çapı iken aksenal deney ve blok örneklerde yapılan deneylerde ise aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$D_e = \frac{4A}{\pi}$$

$$A = W \cdot D$$

Eşitlikte;

D = Örnek çapı veya kalınlığı (mm)

W = Örnek genişliği (mm)

8. Don Deneyi

Deney numuneleri, sabit kütleye gelinceye kadar etüvde kurutulur. Numuneler etüvden çıkarılıp uygun bir desikatöre konularak oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra 0,1 g yaklaşımla tartılır (G_0). Bu şekilde kurutulmuş olan deney numuneleri suya doygun hale getirilir ve tekrar dondurucuya konulur. Soğutma hızı, dondurucunun sıcaklığı yaklaşık 4 saatte -20°C 'a kadar düşecek şekilde ayarlanır. Sıcaklık -20°C 'a düştükten sonra numuneler yaklaşık 2 saat bu sıcaklıkta bekletilir. Numuneler bu süre sonunda dondurucudan çıkarılarak $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su içerisine tamamen su altında kalacak şekilde daldırılır ve en az 2 saat bu şekilde bekletilerek buzların tamamen erimesi sağlanır. Bu işlemlerin ardından numuneler tekrar dondurucuya konulur ve -20°C 'a kadar soğutulur. Bu şekilde donma ve çözülme işlemi 25 kez tekrarlanarak her defasında deney numunesinde meydana gelen gözle görülür değişiklikler kaydedilir. Donma ve çözülme işlemlerinin sonunda deney numuneleri $(70 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit kütleye kadar kurutulup desikatörde soğutulduktan sonra 0,1 g yaklaşımla tartılır. Don etkileri sebebiyle koparak ayrılan kısımlardan meydana gelen kütle azalması (don sonu kütle kaybı) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır:

$$D_k = \frac{G_0 - G_k}{G_0}$$

Burada;

D_k : Don sonu kütle kaybı, %

G_0 : Taşın deneyden önceki kütlesi, g,

G_k : Taşın deneyden sonraki kütlesi, g'dır.

örneklerin basınç dayanımında doğal don etkileriyle meydana gelen azalma aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır:

$$\Delta_f = \frac{f_b - f_{db}}{f_b} \cdot 100$$

Burada;

Δ_f : Örneklerin basınç dayanımında meydana gelen azalma, %,

f_b : Örneklerin basınç dayanımı aritmetik ortalaması (donma çözülme işlemine tabi tutulmamış örneklere ait), MPa,

f_{db} : Örneklerin don sonu basınç dayanımı aritmetik ortalaması, MPa

9. Aşınma Deneyleri

Kaya malzemesinin aşınma dayanımı (abrasion resistance), bir kaya numunesinin mekanik sürtünme, darbe, çizilme ve yüzeyden malzeme kopması (spalling) gibi yüzey aşındırıcı etkilere karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle, kaya yüzeyinin zaman içinde aşınmadan dolayı kaybettiği kütle ve hacmin oranı, kaya aşınma dayanımını belirler.

Kaya malzemesinin aşınmaya karşı dayanımı şu deneyler kullanılarak belirlenir;

- (a) Mikro-Deval Aşınma Deneyi (ASTM D6928, 2017)
- (b) Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131/C131M, 2020; ASTM C535, 2024)
- (c) Cerchar Deneyi (ASTM D7625, 2022)
- (d) Böhme Aşınma Deneyi Test (EN 14157, 2017)
- (e) Geniş Disk Aşınma Deneyi (EN 14157, 2017)

Bu aşınma deneylerinden Mikro-Deval ve Los Angeles deneyleri beton agregasının parçalanmaya karşı direncinin belirlenmesinde kullanılırken, Cechar deneyi madencilik sektöründe kesici uç aşınmasının belirlenmesinde, Bohme ve Geniş Disk Aşınma Deneyi ise doğal taşların aşınma direncinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Los Angeles deneyi agreganın parçalanma dayanımını belirlemek için yapılır. Agreganın numunesi, dönen tamburda çelik bilyeler ile birlikte döndürüldükten sonra 1,6 mm açıklıklı elekte kalan malzemenin miktarı tespit edilir. Bu deney hızlı sonuç verdiği için parçalanma direnci değerlendirmesi yaparken en çok tercih edilen deneylerdendir. Bu deney için istenilen örnek hazırlanırken kütlesi en az 15 kg olan dane büyüklüğü 10-14 mm arasında olan malzemeler kullanılır. Örnek yıkanarak sabit kütleyle ulaşıncaya 110 ± 5°C'de etüvde kurumaya bırakılır ve daha sonra oda sıcaklığına soğutulur kütle 5000 ± 5 gr olan örnek tambura yerleştirilir. Kapak kapatılır ve makina 31 devir/dakika ila 33 devir/dakika arasında sabit hızda 500 devir döndürülür. Agreganın kaybının olmaması için açıklık tepsinin tam üstüne getirilerek, agregalar tepsiye aktarılır. Agreganın kaybının olmaması için özenle bilyeler tepside alınır. Tepsideki malzeme, 1,6 mm'lik elek kullanılarak yıkanıp elekten geçirilir. 1,6 mm'lik elekte kalan kısım, 110±5°C'deki etüvde sabit kütleyle erişinceye kadar kurutma işlemi tekrarlanır. Los Angeles kat sayısı LA aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Burada;

m: 1,6 mm'lik elek üzerinde kalan fraksiyondur, gr



Şekil 40. Los Angeles deney aleti ve uygulaması

Mikro Deval aşınma dayanımı deneyi agreganın aşınma dayanımını belirlemek için yapılır. Bu deneyde, merdanelerle kırma işlemi esnasında 1,6 mm'den daha küçük bir dane büyüklüğüne getirilen orijinal numunelerin yüzdesini ifade eden Mikro-Deval katsayısı tayin edilir. 10-14 mm arasında dane büyüklüğüne sahip, her birinin kütlesi 500 ± 2 gr olan deney örnekleri hazırlanır ve ayrı ayrı farklı tamburların içine yerleştirilir. Her bir tambura, 5000 ± 5 gr'lık bir yük oluşturması için yeterli gelecek şekilde çelik bilye ilave edilir ve her bir tambura $2,5 \pm 0,05$ lt su ilave edilir. Kapağı kapatılan her bir tambur, iki adet mil üzerine yerleştirilir. Tamburlar, 100 ± 5 devir/dak hızda 12000 ± 10 devir oluncaya kadar eksiksiz döndürülür.

Deneyden sonra, ortaya çıkabilecek agrega kaybının oluşmamasına dikkat edilerek, agrega ve çelik bilyeler bir kaptan toplanır. Tamburun içi ve kapağı özenle bir yıkama şişesi kullanılarak yıkanır ve yıkanan malzeme toplanır. Tüm malzeme ve yıkama suları, 8 mm göz açıklıklı koruyucu bir elek ile korunan 1,6 mm göz açıklıklı elek üzerine dökülür. Dökülen malzeme, temiz su ile yıkanır. Herhangi bir dane kaybı oluşmadan, 8 mm göz açıklıklı koruyucu elekte tutulan agrega daneleri özenle çelik bilyelerden ayrılır. Agreganın daneleri elle veya elek üzerindeki bilyeler mıknatıs kullanılarak agregadan ayıklanır. 8 mm göz açıklıklı koruyucu elekte bulundurulmuş agrega daneleri, bir tepsi içerisine alınır. 1,6 mm göz açıklıklı elekte bulundurulmuş agrega daneleri de aynı tepsi içerisine alınır. Tepsi ve içerisindeki malzeme etüvde $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de kurumaya bırakılır. 1,6 mm göz açıklıklı elekte bulundurulmuş agrega kütlesi tayin edilir. 1,6 mm göz açıklıklı elekte bulundurulmuş kütle miktarı (m), en yakın gr'a yuvarlanarak not edilir.

Tüm deney numuneleri için hesap yapılırken Mikro-Deval katsayısı (MDE) 0,1 birim yaklaşımla aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır:

$$MDE = \frac{500-m}{5}$$

Burada;

MDE : Mikro-Deval katsayısı (ıslak şartlarda),

m : 1,6 mm göz açıklıklı elek üzerinde tutulan fraksiyonun kütlesi, gr'dır.



Şekil 41. Mikro-Deval deneyinin uygulanışı

Böhme aşınma deneyi beton yol, hava meydanı, merdiven basamakları, döşemeler gibi yerlerde kullanılan malzeme aşınmaya dayanıklılığının belirlenmesi için yapılır. Böhme aşındırıcı diski, esas olarak belirlenen bir izde aşındırıcıyı alarak dönen bir disk, bir numune tutucu ve yükleme cihazından meydana gelir.



Şekil 42. Böhme aşınma deneyi alet ve uygulanışı

Yük uygulandığı zaman diskin dönme hızı (30 ± 1) devir/dakika'dır. Öncelikle örnekler hassas terazi ile tartılır. Daha sonra deney izine zımpara tozu konulur. Temas yüzü sürtünme şeridine

(deney izi) gelecek şekilde örnek tutucusuna yerleştirilen örnek aksenal olarak (294 ± 3) N yük ile yüklenir. Örneğe, her biri 22 dönüşten meydana gelen 16 çevrim uygulanır. Daha sonra numunenin üzerindeki tozlar iyice temizlendikten sonra numunenin boyutları 0.01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülür ve numune hassas terazide tartılır.

Kayanın Böhme aşınma direnci

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{P}$$

Eşitliği ile hesaplanır.

Burada;

$$\Delta V = \text{Toplam hacim kaybı (cm}^3/50 \text{ cm}^2)$$

$$\Delta m = \text{Toplam ağırlık kaybı (gr /50 cm}^2)$$

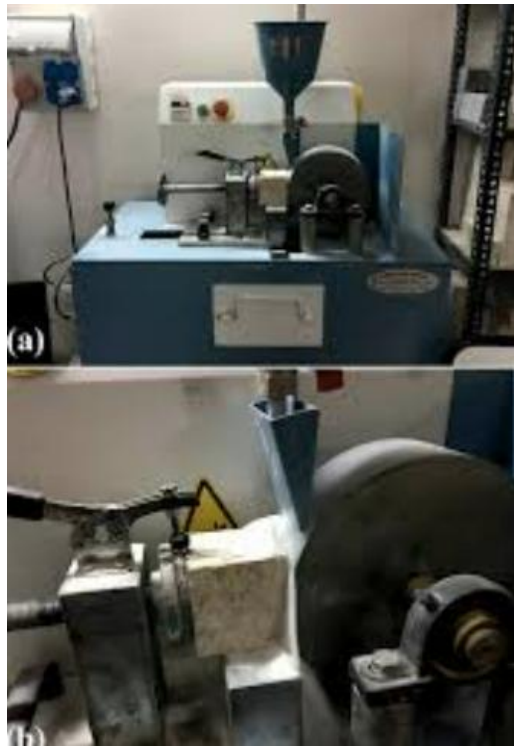
$$P = \text{Numune yoğunluğu (gr/cm}^3\text{)'dur.}$$

Cerchar aşındırıcılık indeksi, kayaçların aşındırıcılığının sınıflandırılması, keski aşınması, keski değişim maliyeti ve kayaç dayanımı gibi önemli parametrelerin doğru tahmin edilmesinden yaygın kullanılan bir deney yöntemidir. Deney taze kırılmış veya kesilmiş kayaç numuneleri üzerine uygulanır. Genellikle Brazilian çekme deneyinde kırılan numunelerin ara yüzeyleri bu deneyde kullanılmaktadır. Deney; 160 kg/mm^2 çekme dayanımı olan 90° tepe açılı konik bir uç 7 kg bastırma kuvveti ile örnek üzerinde yaklaşık 1 saniye sürede 1 cm çekilmekle ve uçta oluşan aşındırma yüzeyi kayaç örneğinin aşındırıcılığını vermektedir. Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir uçla farklı yönlerde 5 kez tekrarlanarak yapılmaktadır. Konik uçların uç kısımlarında oluşan aşınma yüzeyinin çapı ışık yansımali 25X büyütmeli mikrometre ölçekli bioküler mikroskop altında ölçülmektedir. 1/10 mm'lik aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak kabul edilmiştir. Cerchar aşınma indeks değeri 5 çizimin aritmetik ortalaması alınarak bulunur. Kayaçların Cerchar aşındırıcılık indeksi yardımı ile keski tüketimi hesaplanır.



Şekil 43. Cerchar aşınma deneyi aleti ve uygulaması

Geniş Disk Aşınma Deneyi (GDA), doğaltaş olarak kullanılan kayaçların aşınma dirençlerinin belirlenmesi için önerilmiş ve prizmatik örnekler üzerinde gerçekleştirilen bir deney yöntemidir. Deney aletine yerleştirilen prizmatik kaya örneğini örneğin üzerinde bulunduğu kızaklı tutucu mekanizma, askıdaki 14 (± 0.01) kg'lık ağırlığa sahip bir yük etkisiyle örneği aşındırıcı diske itmektedir. Deney süresince örnek ve aşındırıcı disk arasında standartta önerilen aşındırıcı toz (alüminyum oksit) akışının sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. Aşındırıcı diskin 75 devir sonunda örnek üzerinde meydana getirdiği oluğun sınırları cetvel kullanılarak en az iki kat büyütmeli büyüteç altında 0.5 mm kalınlığa sahip kurşun kalemle çizilir. Elde edilen paralel çizgiler arasındaki yatay uzaklık Geniş Disk Aşınma değeri (mm) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 44. Geniş disk aşınma deneyi aleti ve uygulaması

10. Darbe Deneyi

Kayanın darbe dayanımını belirlemek amacıyla darbe deneyi yapılır. Bu deneyde kenar uzunluğu 4 cm olan ve darbe kuvveti uygulanacak yüzeyi ve oturma yüzeyi birbirine paralel küp şeklinli kaya örnekleri hazırlanır. Darbe dayanımı deney aleti Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Aletin şahmerdan tokmağı dökme demirden yapılmıştır ve tokmağın alt tarafına yerleştirilmiştir. Sert çelikten yapılan tokmağın başlık kısmı ile birlikte toplam kütlesi ($50 \pm 0,5$) kg dır. Aletin dökme demirden yapılmış örs kısmının kütlesi yaklaşık 500 kg'dır. Deney örneği, darbe dayanımı deney aletinin örsü üzerindeki başlığın ortasına yerleştirilir. Çelik plaka deney numunesi üzerine, numunenin kenarlarından eşit miktarda taşacak şekilde

konulur. Ardından tokmak ardarda deney numunesinin kırıldığı, çatladığı varsayılanaya kadar serbestçe düşürülür. Birinci darbeye tokmağın düşme yüksekliği, deney numunesinin her cm^3 'ü için $196 \text{ kPa} \cdot \text{cm}^3$ 'lük bir darbe işi elde edilecek şekilde hesaplanır. Tokmağın ağırlığı 50 kg , deney numunesinin her cm^3 'ünün düşme yüksekliği $0,04 \text{ cm}$ olduğuna göre, 1. darbeye $V \text{ cm}^3$ hacmindeki deney numunesi için tokmağın düşme yüksekliği

$$H = 0,04 \cdot V \text{ (cm)}$$

eşitliği ile bulunur.

Burada;

H : Tokmağın düşme yüksekliği, cm,

V : Deney örneğinin hacmi, cm^3 'tür.

Birinci darbeden sonra, izleyen her darbeye düşme yüksekliği, bir önceki yüksekliğe ilk düşme yüksekliği (H) eklenerek hesaplanır. Deney numunesi kırılıncaya kadar bu işleme devam edilir ve darbe sayısı (n) belirlenir. Deney sırasında düşme yüksekliğinin artmasına rağmen geri sıçrama miktarı artmazsa veya azalır, deney numunesi parçalanmış sayılır ve bu durumda darbe sayısı dikkate alınmaz. Kaya malzemesinin darbe dayanımı aşağıdaki bağıntılardan birisiyle hesaplanır.

Toplam darbe işinin hesaplanması ise

$$D = \frac{A}{V} \text{ (MPa) eşitliği ile yapılır.}$$

Burada;

D : Taşın darbe dayanımı, MPa,

A : Toplam darbe işi, $\text{MPa} \times \text{mm}^3$

V : Deney numunesinin hacmi, mm^3 'dir.

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \\ &= P \cdot H_1 + P \cdot H_2 + P \cdot H_3 + \dots + P \cdot H_n \end{aligned}$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Eşitlikte;

P : Darbe dayanımı deney aletinin tokmak kütlesi, 50 kg ,

H_1, H_2, H_n : Tokmağın düşme yükseklikleri, mm,

Toplam darbe sayısı ile darbe dayanımı ise

$$D = n(n + 1) \text{ (MPa)}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Burada;

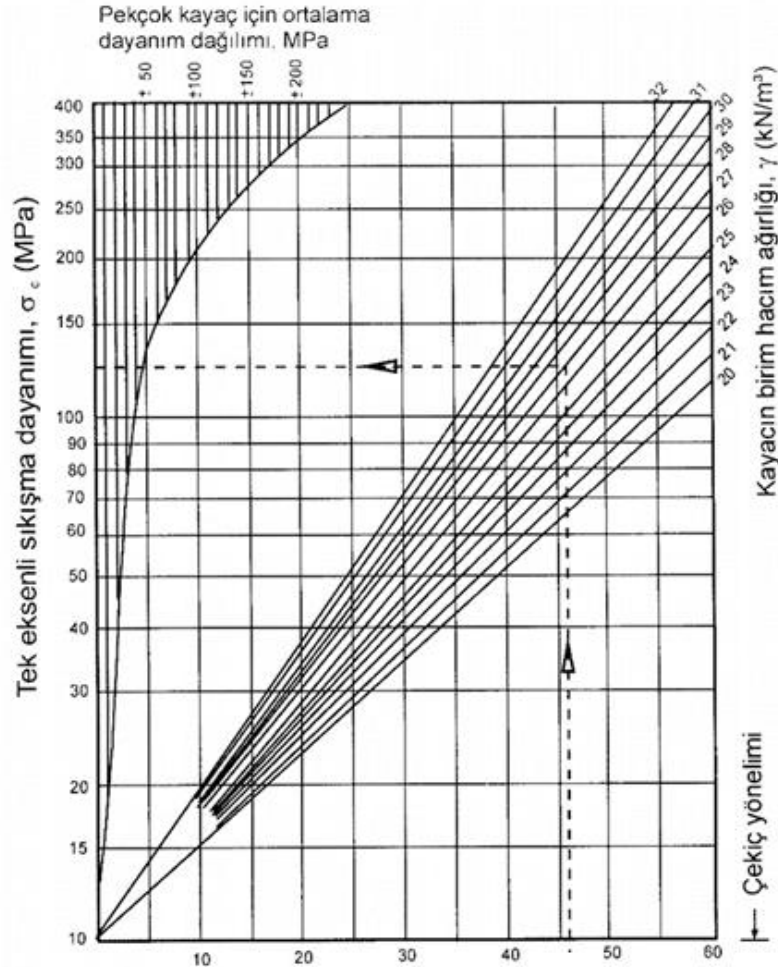
D : Taşın darbe dayanımı, MPa,

n : Kırılmaya sebep olan darbe sayısıdır.

11. Schmidt Çekici deneyi

Bu deney, Schmidt çekici kullanılarak, kayaların Schmidt geri sıçrama (Schmidt sertliği) sertliğinin tayini ve dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Schmidt çekici 1948 yılında beton numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) tahmini için geliştirilmiş basit bir deney düzeneğidir. 1960'lı yıllardan itibaren de kaya mekaniği alanında kullanılmaya başlanmıştır. Schmidt çekici aynı zamanda beton ve kayaç numunelerinin yüzey sertliklerinin de belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Schmidt çekiçleri darbe enerjilerine göre sınıflandırıldığında 2'ye ayrılmaktadır. Bunlar; L ve N tipi çekiçlerdir. L tipi çekiçlerin darbe enerjisi 0,735 Nm'dir ve N tipi Schmidt çekicinin darbe enerjisi 2,207 Nm'dir. Ancak laboratuvarında karot numuneleri üzerine sertlik deneyi yapılırken N tipi çekiç yerine L tipi çekiç kullanılmaktadır. Deneyde, çekiçle kaya malzemesinin yüzeyine 10 farklı noktaya uygulama yapılır ve geri sıçrama değerleri kayıt edilir. Daha sonra bu değerlerden en düşük 5 değer silinir. Geriye kalan 5 değer aritmetik ortalaması kayanın Schmidt sertliğidir. Kayanın Schmidt sertliği kullanılarak kaya malzemesi sertliğe göre sınıflandırılabilir. Ayrıca, Şekil 45'te verilen abak kullanılarak kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı da tahmin edilebilmektedir.



Şekil 45. Schmidt çekici deneyi ile tek eksenli sıkışma dayanımının belirlendiği abak

12. Suda dağılmaya karşı dayanıklılık deneyi

Bu deneyde amaç, taş numunesinin standart iki çevrim süresince kurumaya ve ıslanmaya bırakılması durumunda, parçalanmaya ve zayıflamaya karşı gösterdiği dayanıklılığın belirlenmesidir. Deney için her biri (40-60) g gelen yaklaşık 10 adet düzensiz şekilde parça deney örneği, toplam (450-550) g kadar olacak şekilde hazırlanır. Kayanın en büyük dane boyu 3 mm'den fazla olmamalıdır. Deney örneklerinin köşelerinin birbirine çarparak mekanik parçalanmaya neden olmaması için, seçilen parçalar mümkün olduğunca küresele yakın şekilde olmalı ve gerekirse parçaların köşeleri yuvarlatılır. Örnek, deney öncesi temiz bir tambura yerleştirildikten sonra etüve konur ve sabit kütleye ulaşıncaya kadar 6 saat, veya tercihen 12 saat süreyle kurumaya bırakılır. Kuruma sonunda tambur içindeki örnekle birlikte tartılarak tambur ve örnek kütlesi A, tayin edilir. Ardından örnek soğutulduktan sonra deneye başlanır. Kullanılan tamburlar, kapakları ile birlikte tartılarak kütleleri D, kaydedilir. Tambur, şeffaf hazne içine yerleştirilir ve tamburun ekseninin 20 mm altına kadar sıcaklığı 20°C olan su ile doldurulur. Motor çalıştırılarak, tamburlar 20 devir/dakika hızla 10 dakika süre ile döndürülür. 10 dakika sonunda tambur hazneden alınarak kapağıyla ve içinde kalan örneklerle birlikte tekrar etüve konularak sabit kütleye ulaşıncaya kadar 12 saat süreyle kurumaya bırakılır. Kuruma sonunda tambur ve kalan örneklerin toplam kütlesi B, tayin edilir. Ardından bu aşamalar tekrarlanır ve ikinci çevrimin sonunda tambur ile içinde kalan örneklerin toplam kütlesi C, tayin edilir.



Şekil 46. Suda dağılmaya karşı dayanıklılık deney aleti

Suda dağılmaya karşı dayanıklılık indeksi (ikinci çevrime göre) tamburda en son kalan malzemenin deneyin başlangıcındaki malzemeye oranı şeklinde ifade edilir ve aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$I_{d2} = \frac{C - D}{A - D} \cdot 100$$

Burada;

I_{d2} : İkinci çevrim suda dağılmaya karşı dayanıklılık indeksi, %,

A : Tambur ve örneğin toplam kütlesi, g,

B : Birinci çevrim sonunda tambur ve kalan örneğin toplam kütlesi, g,

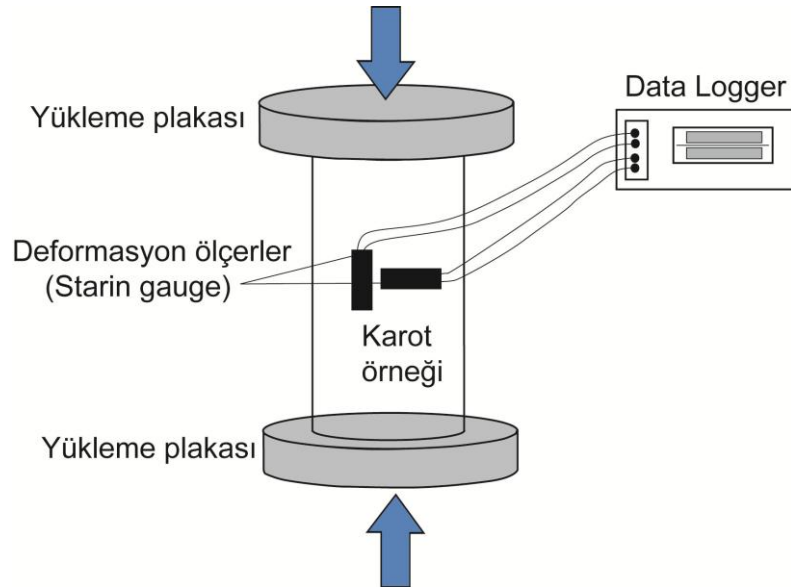
C : İkinci çevrim sonunda tambur ve kalan örneğin toplam kütlesi, g,

D : Tamburun kütlesi, g

12. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı deneyi

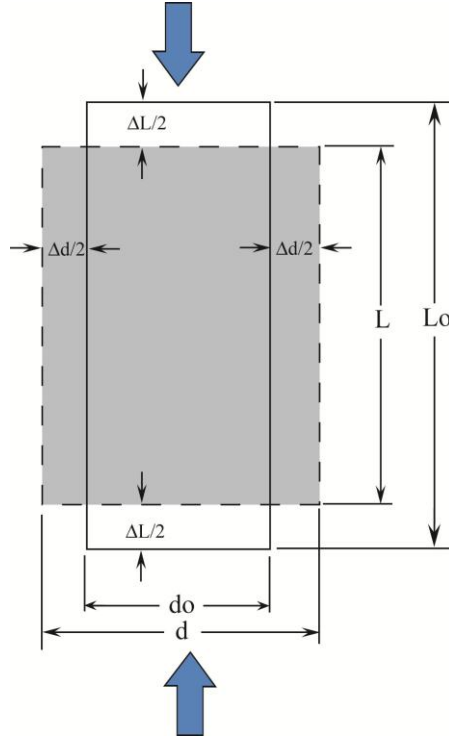
Kaya malzemesinin elastisite modülü ve Poisson oranı silindirik şekilli kaya malzemesi örneklerinde tek eksenli sıkışma dayanımının deneyi yapılırken örnekte meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların ölçülmesi ile elde edilen veriler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemle göre sıkışma gerilmesi altındaki kaya örneklerinde meydana gelen boyuna ve enine deformasyonları ölçmek için Şekil 47’de şematik olarak verildiği gibi örneklere deformasyon ölçerler (strain gauges) yapıştırılır. Karot örneğinin deformasyon ölçerler yapıştırılacak orta kesimi zımpara ile temizlendikten sonra, boydaki deformasyonu ölçmek için örneğin uzun eksenine paralel, enine deformasyonları ölçmek için ise örneğin uzun eksenine dik doğrultuda deformasyon ölçerler (strain gauges) yapıştırılmıştır. Bu deformasyon ölçerler ise kablolar vasıtasıyla data loggera bağlanır ve böylece, sıkışma gerilmeleri altında örneğin boyunda ve eninde meydana gelen deformasyonlar ölçülür.



Şekil 47. Tek eksenli sıkışma deneyi sırasında deformasyonların ölçümü

Şekil 48’de görüldüğü gibi sıkışma gerilmesi altında kalan kaya malzemesinin boyunda ΔL kadar kısalma, eninde ise Δd kadar genişleme meydana gelmektedir.



Şekil 48 Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi sırasında meydana gelen boyuna ve enine deformasyonların şematik gösterimi

Deney sırasında ölçülen boyuna ve enine deformasyon değerleri ile bu deformasyonların oluştuğu gerilme değerleri kullanılarak Şekil 49’deki gibi σ - ϵ eğrileri çizilerek, bu eğrilerden aksenal deformasyon eğrisinde birim gerilmeye karşılık gelen birim aksenal deformasyon değerleri belirlendikten sonra, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak örneğin sıkışma elastisite modülü (E_c) belirlenmektedir.

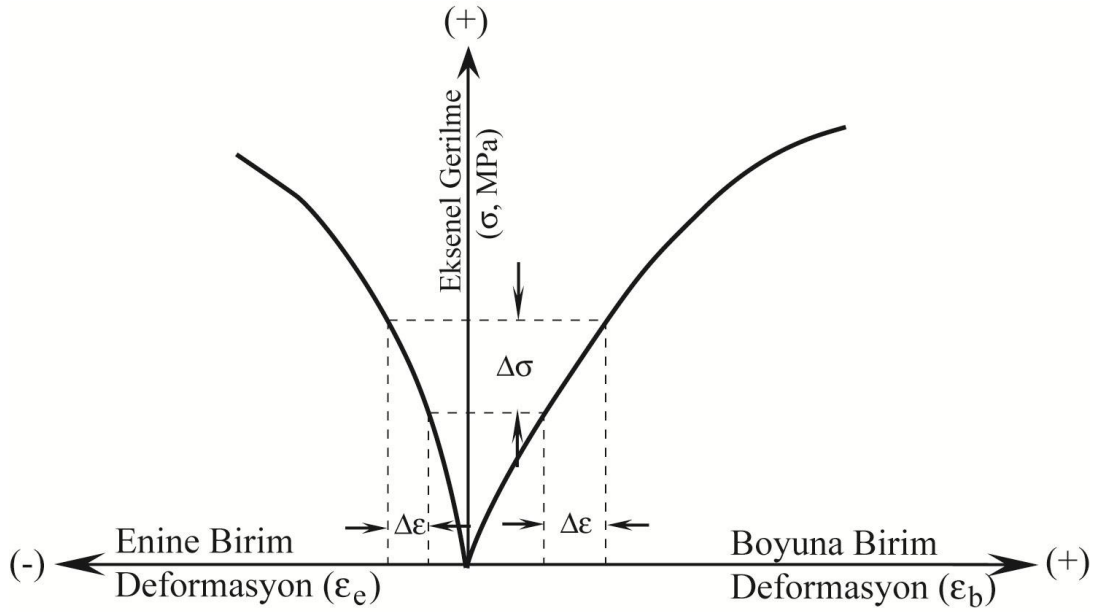
$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

Bu eşitlikte,

E_c : Kaya malzemesinin sıkışma elastisite modülü (MPa)

$\Delta\sigma$: Birim gerilme (MPa)

$\Delta\epsilon$: Aksenal birim deformasyondur.



Şekil 49. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyinde $\sigma - \varepsilon_b$ ve ε_e grafikleri

Örneğin sıkışma Poisson oranı (ν_c) ise, Şekil 5.5'te şematik olarak verilen $\sigma - \varepsilon$ eğrilerinden belirlenen, $\Delta\sigma$ 'ya karşılık gelen $\Delta\varepsilon_b$ ve $\Delta\varepsilon_e$ değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

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

Bu eşitlikte;

ν : Poisson oranı

$\Delta\varepsilon_e$: Birim gerilmeye karşılık gelen enine birim deformasyon

$\Delta\varepsilon_b$: Birim gerilmeye karşılık gelen boyuna birim deformasyondur.

8. KAYA MALZEMESİNDE BOZUNMA/AYRIŞMA

Kayanın fiziksel veya kimyasal etkiler ile daneler arasındaki bağların kopması parçalanması, ufalanması ve ilksel özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanan bozunma veya ayrışma, kaya malzemesinin fiziksel özellikleri ve mekanik davranışlarına etki eden en önemli faktörlerden birisidir. Dolayısıyla kaya mekaniğinde kayanın bozunma veya ayrışma derecesinin belirlenmesi oldukça önemli bir yere sahiptir. Kayalarda meydana gelen bu olayın gerçekleşmesinde etkin olan birçok faktör vardır. Bunlar;

1. Sıcaklık değişimi
2. Erime
3. Donma-çözülme
4. Suların kimyasal etkileri

5. Hidrotermal çözeltiler
6. Bitki kökleri ve organizma
7. Gaz çıkışları

Kayanın, herhangi bir kimyasal etki olmaksızın fiziksel etkenler ile (sıcaklık, yağış, rüzgar gibi) mekanik etkiler ile küçük parçacıklara ayrılması bozunma (weathering), bu parçalanmanın kimyasal etkiler sonucu olması durumu ise Ayrışma (alteration) olarak tanımlanmaktadır. Fiziksel olarak meydana gelen bozunmada kaya parçalanmakta ancak bileşiminde herhangi bir değişiklik olmazken, ayrışmada kayayı oluşturan dane ve minerallerin mineralojik yapıları değişime uğramakta ve ikincil minerallere dönüşebilmektedir.

Bozunmada etkin olan faktörleri şu şekilde açıklamak mümkündür.

1. Kayaların üzerinden yük kalkması (erozyon, buzul erimesi, heyelan vb.) sonucunda oluşan kalıcı gerilmelerin etkisiyle yüzeye yakın seviyelerde çatlakların oluşmasına bağlı olarak kaya parçalanabilmekte ve daha kolay bozunabilir hale gelmektedir.
2. Çatlaklardaki suyun donması sonucunda suyun hacminin yaklaşık %9 artmaktave oluşan buz basıncı ile kayanın parçalanmaktadır. Buzun donması ve erimesi ile oluşan bu döngü uzun sürede kayada yeni çatlakların oluşmasında ve kayada parçalanmalara neden olmaktadır.
3. Kaya içerisinde sızan suların içerisinde çözülmüş halde bulunan minerallerin çatlaklarda yeniden kristalleşmesi ve ikincil minerallerin oluşması sonucunda bu minerallerin çatlak yüzeylerine yaptığı basınç sonucunda kayada parçalanmalar meydana gelmektedir.
4. Özellikle gece ve gündüz arasındaki büyük ısı farklılığının yaşandığı bölgelerde, bu ısı farklılığına bağlı olarak kayada genleşme ve büzülme oluşmaktadır. Meydana gelen bu genleşme-büzülme olayı sonucunda kayayı oluşturan daneler arasındaki bağ veya çimento zayıflamakta ve kopmakta, böylece kaya parçalanıp ufalanmaktadır.
5. Bitkilerin varlığı ve gelişim sonucunda bitki köklerinin büyümesi ile kaya mekanik olarak parçalanmaktadır. Böylece, diğer faktörlerin etkisinin artması ve bozunmanın daha hızlı gelişmesi söz konusu olmaktadır.

Zemin		VI	Rezidüel zemin
KAYA + ZEMİN		V	İleri derecede bozunmuş
		IV	Fazla bozunmuş
		III	Orta bozunmuş
KAYA		II	Az bozunmuş
		I	Bozunmamış (Taze)

Şekil 50. Kaya kütlelerinde derinliğe göre bozunma zonları ve sınıfları

Ayrışmada, bozunmadan farklı olarak kayada kimyasal ve mineralojik değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimleri sağlayan etkenler farklı olduğundan meydana gelen ayrışmanın türü de oksidasyon, karbonatlaşma, erime, hidroliz gibi farklı isimler ile ifade edilebilmektedir. Ayrışma yüzeye yakın ve derinlerde olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Yüzeye yakın seviyelerde meydana gelen ayrışmada en önemli etkenler yağış suları, oksijen, karbondioksit ve organik asitlerdir. Yüzeysel ayrışmanın derinliği kayanın geçirirliliğine, yer altı suyuna, iklim koşullarına ve kayanın petrografik özelliklerine bağlıdır. Derinlerde oluşan ayrışmada ise daha çok derinlerden yükselen hidrotermal suların kayalarda oluşturduğu kimyasal etkiler sonucunda oluşmaktadır.

9. KAYA KÜTLELERİNİN TAŞIMA GÜCÜNÜN HESAPLANMASI

Genel olarak mühendislik projeleri zeminler veya kaya kütleleri üzerinde veya içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, yapı temellerinin oturduğu kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin bilinmesi hem tasarım hem de projenin yapım aşamasında oldukça önem taşımaktadır. Bu mühendislik özelliklerinin başında ise taşıma gücü gelmektedir.

Bilidiği gibi kaya kütlesi süreksizler ile kaya malzemesinin birlikte oluşturduğu sistemdir ve bozunmaya uğramış, aşırı derecede eklemli veya boşluklu olmadıkları takdirde, taşıma gücü değerleri yüksek olduğu için ve zeminlere karşılaştırıldığında yok denecek kadar az oturma miktarına sahip oldukları için yapı temelleri için en uygun ortamlardır. Bu olumlu özelliklerine rağmen, mühendislik tasarımlarda kaya kütlelerinin de taşıma güçlerinin, yani yenilmeden binayı taşıyabileceği maksimum gerilme değerinin bilinmesi projenin maliyeti ve güvenliği açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla yapılan jeoteknik çalışmalar genel olarak “Zemin Etüdü” olarak adlandırılır. Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile bina temellerinin üzerine oturacağı kaya kütlelerinin aşağıda verilen özelliklerinin belirlenmesi gereklidir;

Süreksizliklerin yönelim, devamlılık, sıklık, açıklık, dolgu türü ve kalınlığı gibi mühendislik özellikleri

Kaya malzemesini dayanım ve deformasyon gibi mühendislik özellikleri

Kaya kalite Göstergesi (RQD)

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Temel kayanın derinliği

Bozunma veya ayrışmanın derecesi ve derinliği

Kaya kütlelerinin sismik özellikleri

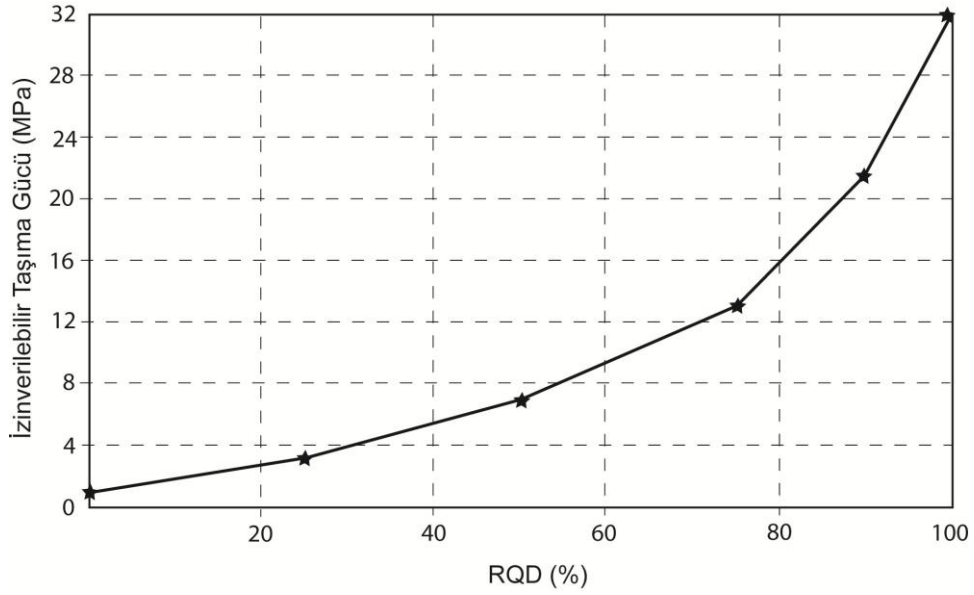
Günümüze değin kaya kütlelerinin taşıma gücü konusunda yapılan çalışmalarda genel olarak yukarıda sıralanan çalışmalardan elde edilen parametre veya parametreler kullanılmıştır.

RQD Değerini Esas Alan Yöntem

Eklemli kaya kütlelerinde RQD değeri kullanılarak izin verilebilir taşıma gücü hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamının yapılabilmesi amacıyla kaya kütlelerinin belli RQD değerlerine karşılık gelen izin verilebilir taşıma gücü değerleri Tablo 2’deki gibidir. RQD nin çizelgede verilen değerler dışındaki ara değerleri ise interpolasyon yöntemi ile belirlenir.

Tablo 2. RQD değerlerine göre izin verilebilir taşıma gücü değerleri

RQD	q_a (kg/cm²)	q_a (MPa)
100	328	32
90	220	21.5
75	130	13
50	70	7
25	33	3.2
0	10	1
q _a > σ _c ise q _a = σ _c alınır.		



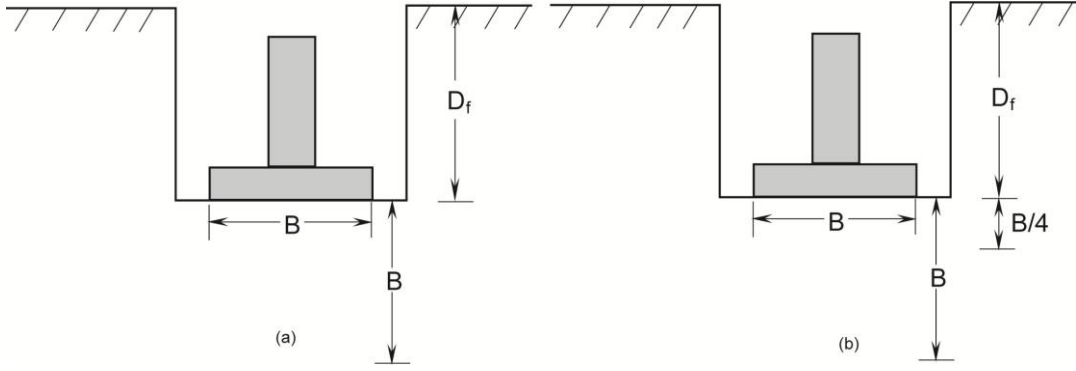
Şekil 51. Kayada taşıma gücü için RQD- q_a ilişkisi grafiği

Kayada RQD (Kaya Kalite Göstergesi) değeri, jeoteknik amaçlı araştırma sondajlarından elde edilen kaya karotlarında yapılan ölçümler ile hesaplanır. Elde edilen karotlardan 10 cm ve daha büyük boylu olanların toplam uzunluğunun sondaj uzunluğuna oranı RQD değerini verir.

$$\%RQD = \frac{10\text{cm ve daha uzun boylu karotların toplam uzunluğu}}{\text{Toplam ilerleme uzunluğu}} \times 100$$

Bu yöntemde kullanılacak RQD değeri temel kotundan itibaren temel genişliği (B) kadar bir derinliğin ortalama RQD değeridir (Şekil 52). Eğer temel genişliğinin 1/4 ü kadar derinliğe kadar kaya kalitesi çok düşük ise bu kısmın, yani 1/4B kadar derinliğin RQD değeri kullanılır (Şekil 52) veya bu kısım kazılarak kaldırılır.

Bu yöntemde kullanılacak RQD değeri temel kotundan itibaren temel genişliği (B) kadar bir derinliğin ortalama RQD değeridir (Şekil 52). Eğer temel genişliğinin 1/4 ü kadar derinliğe kadar kaya kalitesi çok düşük ise bu kısmın, yani 1/4B kadar derinliğin RQD değeri kullanılır (Şekil 52) veya bu kısım kazılarak kaldırılır.



Şekil 52. Hesaplama için kullanılacak RQD değerinin belirlenmesi

Peck vd. (1974) Yöntemi

Süreksizlik içeren kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücünün belirlenmesinde Peck vd. (1974) tarafından önerilen RQD ve σ_c değerlerinin kullanıldığı eşitlik yaygın olarak kullanılmaktadır. Basit ve pratik olması nedeniyle uygulamada en çok kullanılan bu yöntemde Şekil 53'te verilen grafikten kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımının yüzde kaç oranında indirgeneceği belirlenir ve belirlenen bu indirgenme katsayısı (DF) kullanılarak kaya kütlelerinin izin verilebilir taşıma gücü hesap edilir.

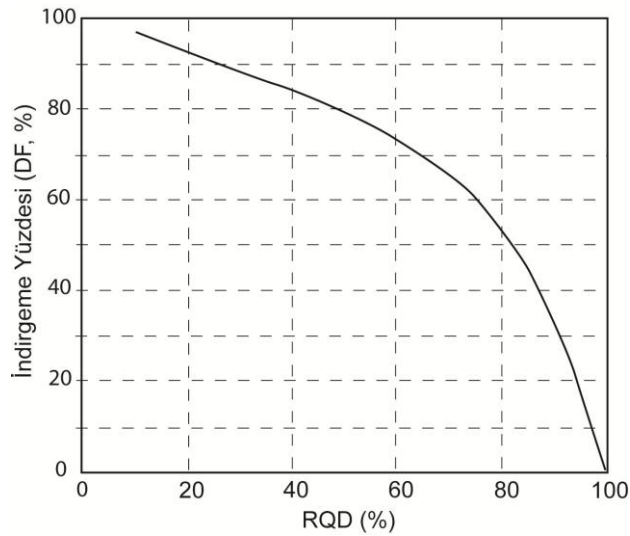
$$q_a = \sigma_c - (\sigma_c * DF)$$

Burada;

q_a : İzin verilebilir taşıma gücü (MPa),

σ_c : kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)

DF : İndirgenme katsayısıdır.



Şekil 53. İzin verilebilir taşıma gücü için RQD ve DF ilişkisi

Imai vd. (1976) Yöntemi

Kaya kütlelerinin taşıma gücünün hesaplanmasından Imai vd. (1976) tarafından önerilen yöntemde kaya kütlelerinin V_p (P dalgasının yayılma hızı) değerinden yararlanılarak aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

$$q_u = 10V_p^3$$

Burada;

q_u : nihai taşıma gücü (kgf/cm²)

V_p : P dalgasının yayılma hızıdır (km/sn)

Bell Çözümü

Az eklemlili zayıf kayalarda inşa edilen temeller için, izin verilebilir taşıma gücü Bell çözümü olarak adlandırılan eşitlikle belirlenebilir (Wyllie, 1992);

$$q_a = \frac{cC_{f1}N_c + C_{f2} \frac{B\gamma}{2} N_\gamma + \gamma \cdot D_f N_q}{GK}$$

Burada

B: Temelin genişliği

γ : Sağlam kayanın birim hacim ağırlığı

D_f : Temelin derinliği

c: Kayanın kohezyonu

N_c , N_γ ve N_q : Taşıma gücü faktörleri

C_{f1} ve C_{f2} : Düzeltme faktörleri

GK: Güvenlik katsayısıdır.

Taşıma gücü faktörleri boyutsuzdur ve

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

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

$$N_q = N_\phi^2$$

$$N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \text{ eşitlikleri ile belirlenir.}$$

Temelin yüzeye oturduğu ($D_f = 0$) durumlarda izin verilebilir taşıma gücü formülü aşağıdaki gibidir;

$$q_a = \frac{c \cdot C_{f1} \cdot N_c}{GK}$$

Bu eşitliklerdeki düzeltme faktörleri Tablo 3'ten, Güvenlik katsayısı ise Tablo 4'ten belirlenir.

Tablo 3. Düzeltme faktörleri

Temel tipi	Cf1	Cf2
Sürekli (L/B>6)	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

Tablo 4. Yapı türlerine ve araştırma niteliğine göre güvenlik katsayıları

Sınıf	Tipik yapılar	Sınıf özellikleri	Araştırma niteliği	
			Mükemmel tasarlanmış	Sınırlı
A	Demiryolu köprüleri Ambarlar, Yüksek fırınlar İstinat duvarları, Silolar	En büyük tasarım yükü uygulanır	3.0	4.0
B	Otoyol köprüleri, Hafif sanayi yapıları, İşyeri binaları	En büyük tasarım yükü her zaman uygulanmaz	2.5	3.5
C	Apartmanlar ve resmi binalar	En büyük tasarım yükü uygulanmaz	2.0	3.0