

## KAYA MEKANİĞİNİN MÜHENDİSLİKTEKİ ÖNEMİ VE KAYALARIN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Erhan TİMUR \*)

Fehmi TUNÇOĞLU ••)

### ÖZET :

Günümüzde mühendislik alanında yeraltı çalışmaları, sondaj, büyük ve ağır İnşaatların gelişmesi, Kaya Mekaniğinin önemini artırmıştır. Özellikle Maden ve İnşaat Mühendisliğini ilgilendiren Kaya Mekaniği çalışmaları ve bunlar ile ilgili kayaların bazı mekanik özellikleri bu makalede özetlenmiştir.

### SYNOPSIS :

Subsurface studies, drilling, and the development of large and heavy structures Increased the Importance of Rock Mechanics today. Rock Mechanic activities which are especially related to Mining and Civil engineering and also some mechanical properties of Rocks are summarized in this paper.

### I — Giriş :

II. Dünya Harbinden sonra hızla artan endüstriyel faaliyetler, Maden ve İnşaat Mühendisliği alanında büyük gelişmelere yol açtı. Endüstriyel potansiyeli teşkil eden yeraltı servetlerinden azamî istifade Maden Mühendisliğinin hemen hemen her kolunda özellikle maden işletmeciliği ve sondajcılık kolunda kaya kütlelerinin geçmiş yılların verdiği tecrübeler ile birlikte, daha bilimsel şekilde etüdünü gerektirmiştir.

öte yandan endüstriyel gelişmeler ile ortaya çıkan büyük ve ağır inşaatlar bayındırlık işlerinde de kaya mekaniğinin önemini artırmıştır.

Bu makalede Kaya Mekaniğinin mühendislikteki önemi ve kayaların bazı mekanik özellikleri özetlenmiştir.

### II — Kaya Mekaniğinin Mühendislikteki Önemi ve Kayaların Bazı Mekanik Özellikleri :

Asrımızın başına kadar kaya mekaniği maden mühendislerinin monopolü altında idi.

( \*) Maden Y. Müh. DSİ. Yeraltıları Da. Bşk. İlgü Kaya Mek. P. H. Md. lüğü.

(\*\*) Maden Müh. DSİ. Yeraltıları Da. Bşk. İlgü Kaya Mek. P. H. Md. lüğü.

Bu gün açık ve kapalı maden işletme metodlarının gelişmesi, daha derin sondaj kuyuları açılması, kaya kütleleri içinde teknik, ekonomik ve emniyet yönünden çözülmesi gereken bir çok problemleri ortaya koydu.

Son 20 yıla kadar kaya kütleleri içinde maks. 4 - 5 m. genişliğinde boşluklar açılmış ve temel kayasına da maks. 7 kg/cm<sup>2</sup>, lik yükler aktarılmakta idi. Günümüzde 18 - 20 m. açıklığında tüneller kolaylıkla açılmakta, kaya temellere 70 - 80 kg/cm<sup>2</sup> lik yükler verilmektedir. Artan yükler ve açılan büyük boşluklar sebebiyle kayaların mukavemet ve stabilité etüdüleri geçmiş yıllara nazaran daha çok önem kazanmıştır.

Bugün Maden ve inşaat Mühendisliği alanlarında ilk plânda karşılaşılan kaya mekaniği ile ilgili problemler şunlardır :

#### A — Maden Mühendisliğinde :

1° — Kaya kütleleri içine açılmış büyük boşluklarda tavan, taban ve duvarların stabilitesi.

2° — Kayaların içindeki doğal (tabii) gerilmeleri gözönüne alarak açılan boşluklara verilecek forum hesabı,

3° — Kayaların itki ve deformasyonlarına göre beton kaplama ve her nev'i tahkimat hesabı,

4° — Geniş çaplı ve derin maden kuyularının cidarlarının stabilitesi.

5° — Açık maden işletmesinde kaya yamaçların ve şevlerin stabilitesi, kaya hafriyatları, kütle hareketleri.

6° — Patlayıcı maddelerin çeşitli kaya kütleleri içinde etkisi, meydana getirdiği hasar zonlarının tesbiti.

7° — Kayalarda zamanla meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayların mukavemet ve stabilitesine etkisi.

8° — Kaya özürlerinin etüdü.

a — Heterojenitesi

b — Anizotropisi

c — Mekanik süreksizliği (Diskontinüitesi)

d — içlerindeki doğal gerilme

e — Zamanla şekil değiştirme. (Kaya kabarmaları)

9° — Maden ve petrol sondajlarında açılan derin kuyuların cidarlarının stabilitesi.

10° — Kayaların boşluk ve çatlaklarından sızan her türlü su problemleri.

B — inşaat Mühendisliğinde :

1° — Yeraltı hidroelektrik santrallerinde kayaların doğal (tabii) gerilmelerini göz önüne alarak beton kaplamaların ve santrale verilecek forumun hesabı.

2° — Her türlü kaya hafriyatları.

3° — Kemer barajlarının yanal itkilerini taşıyan kaya yamaçların etüdü.

4° — Kaya temeller üzerine oturtulan çok katlı binaların temel emniyet etüdü.

5° — Büyük köprülerin ankrajı.

6° — Kaya içine açılan araştırma galerileri, geniş nakliyat ve yüksek basınçlı kuvvet tünellerinin stabilitesi.

7° — Kayaların her çeşit İslahı için yapılan çalışmalar (Enjeksiyon v.s.)

Kaya mekaniği saydığımız mühendislik problemlerine yeteri kadar cevap verecek seviyeye henüz erişmemiştir ve zemin mekaniğinin ancak 1940 yılındaki durumundadır. Yavaş ilerlemenin sebepleri kayaların anizotrop, • nadiren homojen, eklemlı, çatlaklı, faylı kısaca mühendislik bakımından mekanik bir süreksizlik gösteren bir ortamın etüdü olmasıdır. Bu etüd arazide çok sayıda pahalı ve güç deneyleri ile kaya numuneler üzerinde yapılan çeşitli lâboratuvar deneylerini gerektirmektedir.

Saydığımız özürleriyle çok kompleks bir ortam olan kaya kütlelerine klâsik elâstisite teorilerini uygulamak çok defa sakıncalı olmaktadır.

Kaya mekaniğinde diğeri bir güçlük kaya kütlelerini teşkil eden en küçük kaya ünitelerinin dahi büyük olmasıdır.

Meselâ çeliği ve zeminleri teşkil eden iri tanelerin büyüklükleri 0,01 -10 cm., çakıl ve betonda 2-10 cm. arasında değiştiği halde kayada kütleleri teşkil eden en küçük homojen bloklar 5-50 cm. arasında bir boyuta sahiptir. Dolayısıyla üzerinde deney yapılacak kaya numunelerinin boyutlarının büyük olması gerekir.

Kayaların mühendislik çalışmaları için gerekli mekanik özelliklerinin arazide tesbiti toplam kaya mekaniği çalışmalarının %' 70 ini kapsamakta, lâboratuvar deneylerine göre daha güvenilir ve daha gerçeğe yakın değerler vermektedir. Lâboratuvar deneyleri için büyük kaya kütlelerini temsil edebilecek nitelikte numuneler alabilmek çok defa mümkün olmamaktadır.

a) Kaya numuneler üzerinde yapılan önemli deneyler :

- 1 — Elâstisite modülü tayini.
- 2 — Serbest basınç ve çekme deneyi.
- 3 — Üç eksenli basınç deneyi.
- 4 — Poisson katsayısı tayini.
- 5 — Akma ve sünme deneyleri.
- 6 — Yoğunluk porozite, emme.
- 7 — Sertlik ve aşınma deneyleri.
- 8 — Petrografik analiz.

b) Arazide yapılan (in situ) deneyleri :

- 1 — Dinamik elâstisite modülü tayini.
- 2 — Statik elâstisite modülü tayini.
- 3 — Doğal gerilme tayini.
- 4 — Kesme mukavemeti tayini.
- 5 — Gaz ve su geçirgenliğinin tayini.'
- 6 - Diğeri araştırma deneyleri.

Arazi ve lâboratuvar çalışmalarının sonuçlarını irdelemek, korrele etmek, deney ve numune sayılarına göre istatistiksel hesaplarım yapıp projeciye teknik doküman olarak vermek ciddi ve dikkatli büro çalışmalarım gerektirir.

Bilindiği gibi bir kaya kütlelerinin mekanik karakterini deneylerden elde edilmiş sonuçların aritmetik ortalaması olarak veremeyiz, bununla birlikte sapma (deviation) ve değişme katsayısı da (Coefficient of variation) ayrıca hesaplanır. Böylece istatistiksel hesap metodları, absisleri mekanik özellikleri bildiren değerler ve ordinatları deney adedi olan histogram eğrileri arazi ve lâboratuvar çalışmalarını ifade etmede yeni bir tatbikat alanı bulmuştur.

Yeraltı ve yerüstü çalışmalarında, kaya kütlelerinin mekanik davranışlarına en etkili

olan bünyelerindeki gerilme durumlarıdır. Üzerinde önemle durulan ve henüz araştırma safhasında olan bu konudan kısaca bahsetmek faydalı olacaktır.

Bilindiği gibi arz kabuğundaki iç gerilme ; doğal (tabii) ve uyarım gerilmelerinin toplamıdır. Uyarım gerilmesi arz kabuğuna insan eliyle uygulanan dış. yükler veya açılan boşluklar yüzünden meydana çıkan gerilmelerdir. Doğal gerilme ise kaya kütlelerinin kendi ağırlıkları, her türlü tektonik hareket, kimyasal, fiziksel bozuşma ve diğer jeolojik olayların hasil ettiği gerilmelerdir.

Mühendislik çalışmalarında bu gerilme durumlarının bilinmesi ve analizi son derece önemlidir. Kayaların serbest yüzeylerinin, şevlerinin, galeri ve tünellerin taban tavanının, sondaj kuyularının cidarlarının stabilitesi yatay içsel gerilmeye bağlıdır.

Tünel ve galerilerin etrafındaki içsel gerilmelerin analizi günümüzde açıklığa kavuşmamıştır.

Terzaghi'nin geliştirdiği bir teoriye göre, galeri veya tünelin üstündeki formasyonun yer yüzüne kadar kalınlığı  $h$  ve özgül ağırlığı  $\gamma$  Y ise düşey gerilme  $\delta_v = h \cdot \gamma$  olur.  $\delta_v, \mu$  poisson oranından dolayı  $\delta_h = \delta_v \left( \frac{\mu}{1-\mu} \right)$  yatay gerilmesini doğuracaktır.

$\mu$ , (poisson oranı) genellikle kayalarda 0 - 0,25 arasındadır. Sağlam ve sert kayalarda  $\frac{1}{8}$ , oranının 0,5 - 0,8 yumuşak ve elastik olmayan kayalarda ise 0,8 - 1 arasında değiştiği arazide yapılan ölçülerle tesbit edilmiştir.

Orojenik hareketler, tektonik hareketler, mağmatik ekrüzyonlar v.s. yatal gerilmelere sebep olabilirler.

Açık maden işletmelerinde, diğer kaya hafriyatlarında, şevlerin serbest yüzeylerinde görülen gevşeme çatlaklıkları ve yataya yakın paralel yapraklanmalar yatay içsel gerilmelerin etkisiyle kaya yüzeylerinin genişlemesinden ileri gelmektedir. Ayrıca yatay içsel gerilmeler hafriyat tabanlarının kaya kabarmalarına, derin sondaj kuyularında kuyu göçmelerine, karot almada güçlükleri ve tünel duvarlarında kaya patlamalarına sebep olurlar.

Asrımızın başlarında isviçreli Jeolog Helm, Terzaghi teorisinden ayrı bir teori ileri sürmüştür. Heim teorisi büyük derinliklerdeki kayaların kendi ağırlıkları sebebiyle sıvılar

gibi davrandığını ve her yönde eşit olan hidrostatik bir basınç altında bulunduğunu kabul eder. Heim, Terzaghi teorileri arazide yapılan deneyler ile kesin olarak doğrulanmamıştır. Her ikisini de doğrulayan sonuçlar elde edilmiştir.

öte yandan bir Fransız mühendisi bir tünelde içsel düşey gerilmelerin tünel ağızlarında orta kısımlarından fazla olduğunu ve bu gerilmelerin tünelin üstündeki formasyonun ağırlığı sebebiyle hasil ettiği düşey basınç değerinin üzerinde olduğunu deneylerle tesbit etmiştir. Tünel ağızlarında gerilmelerin fazla oluşu dağ kütlelerindeki kemerlenme ile (Dağın kenar kısımlarının dağın ağırlığını taşıdığı) izah edilebilir. Fakat düşey içsel gerilmenin tünelin üstündeki formasyonun ağırlığı sebebiyle hasil olan gerilmenin üzerinde olmasının mekanik izahı güçtür.

Kayalarla ilgili mühendislik çalışmalarında göz önüne alınan diğer önemli bir özellik kayaların deformabilitesidir. Kayaların verilen yükler altında yaptığı deformasyonun emniyet sınırları içinde kalması istenir. Kayaların özellikle temel olarak kullanılmasında bu özelliğin son derece hassas etüdü gereklidir. Aksi halde yeraltı ve yerüstü yapılarında kazalara sebebiyet verilir.

Kayaların deformabilitesini kısaca izah etmek için bununla ilgili bazı notasyonları burada belirtmemiz faydalı olacaktır.

Elastisite Modülü ( $E_s$ ) : Kayalarda yalnız geri dönebilen (reversible) olan deformasyonları gözönüne alarak gerilimin deformasyona oranıdır.

$$[E = \frac{P/A}{\Delta L/L} = \text{Gerilim} / \text{Şekil değiştirme (Deformasyon)}$$

$p$  = Uygulanan kuvvet,  $A$  = prizmatik kaya numunenin kesiti,  $\Delta L$  = Boyca uzama veya kısalma,  $L$  = kaya numunenin boyu].

Def ormasyon Modülü ( $E$ ) : Kayaya verilen yük altında kalıcı ve geri dönebilen deformasyonların toplamı olan total deformasyon göz önüne alınarak gerilimin deformasyona oranıdır.

Poisson oranı ( $\mu$ ) : Prizmatik kaya numunesinin enine deformasyonun boyuna deformasyonuna orandır. ( $\mu = 0, - 0,25$  arasındadır.)

Yükleme devresi (cycle) : Kaya yüzeylerinde yapılan yüklemeye deneylerinde verilen yükün belli zaman aralıklarında tedricen belli bir değere çıkarılması ve sonra belli zaman aralıklarında tedricen azaltılmasıdır.

Akma (creep) : Sabit bir yük altında belirli bir zaman sonunda kayanın yaptığı deformasyondur. Kristal strüktürlü bir cisimde retiküler şebekedeki plânın kayması olarak izah edilir. Akma kayanın şeklini değiştirmesine rağmen çok az hacmini değiştirir. Sıcaklıkla artar, basınç ile azalır. Akmanın stabl hale gelmesi, elâstik toparlanmadan (Elastic recovery) daha az zamanda olur. Akma iki ikiye çesittir.

a — Sınırlı akma : Zamanla stabl hale gelir.

b — Evrimlenen akma : Kırılmaya kadar devam eder.

Elâstik toparlanma (Elastic recovery) : Kayaya verdiğimiz yük kalktığında veya belirli bir değere indiğinde belirli bir zaman süresi sonunda geri gelebilen deformasyondur.

Plâstik (Kalıcı) deformasyon : Kayalardaki yüklemeye deneylerinde bir yüklemeye - boşaltma (cycle) sonunda meydana gelen deformasyondur. Maksimum basınçları gittikçe artan cycle'larda bu deformasyonların arttığı müşahade edilir.

Bir cycle'da maksimum basınca erişildiğinde plâstik deformasyonunda maksimumu elde edilmiş olur, basıncın azaltılarak yükün boşaltıldığı anlarda daima sabit kalır.

Kayalardaki plâstik deformasyonla kalıcı deformasyon demek daha doğru olur. Çünkü bunları meydana getiren basınçlar sabit tutulduğunda ilânihaye deformasyon olmaz.

Çatlaklı kayalarda kalıcı deformasyon fazla olur. Kaya içinde su ile dolu bir uzun çatlak düşünelim, çatlağa dik istikametteki gerilimin etkisi ile su sıkışarak çatlağın uç noktalarını parçalar ve oradan kaçır. Böylece çatlak kapanır ve kalıcı deformasyon olur. Zayıf gerilmelerde, gevşeme ile kayanın çatlakları arası açılmıyorsa kalıcı deformasyon ancak kırılma halinde olur.

Tesadüfi, anî kalıcı deformasyonlar : Çatlakların kapanması ve anî kaymaların olması halinde meydana gelir.

Oturma deformasyonları : Yüklemeye deneyinde yüklemeye plâğının oturması, kaya yüzeylerindeki pürüzlerin ezilmesi, yüzeysel gev-

şemenin yok edilmesi sonucunda, ilk cycle'da yüklemenin başlangıcında ortaya çıkar.

Kalıcı deformasyon eşığı : 1. Cycle'da artan basınç öyle bir değere erişir ki, bu değerden sonra kalıcı deformasyon meydana gelmeye başlar, işte bu basınç değerine kalıcı deformasyon eşığı denir.

Geri dönebilen (reversible) deformasyonlar : Kayalara uygulanan basınç ortadan kalktıktan sonra kayanın geri dönebilen deformasyonun değeridir. Bunlar ikiye ayrılır.

a — Anî geri dönebilen deformasyonlar : Hemen hemen zamana bağlı olmayan anî olarak geri dönebilen deformasyonlardır.

b — Gecikmeli geri dönebilen deformasyonlar : Zamana bağlı, yani belirli bir zaman sonunda kayanın başlangıçtaki haline dönmektedir. Çok çatlaklık ve su muhtevası fazla olan kayalarda bu deformasyonlar kuvvetlidir.

Komplezans (complaisance) (J) : Elâstisite modülünün tersi yani  $\frac{1}{E}$  dir. E'nin

hesaplanmasında kullanılan anî deformasyon ise  $E_0$ , gecikmeli deformasyon ise E olarak gösterilir. Bu hallerde komplezanslar J ve J olurlar.

Kayaların deformasyonları aşağıdaki parametrelere tâbidir.

— Yükün süresi

— Belirli bir yükten sonra buna ilâve olacak yüklerin kademe kademe tesir süreleri.

— Sıkışmanın ortalaması ( $\langle \sigma - \sigma_0 \rangle$ )

— Sıcaklık

— Su tenörü

Kayalarda diğer bir deformasyon çeşidi olan tasmanları kısaca izah edelim. Tasmanları kısaca izah edelim. Tasmanlarda kalıcı deformasyonlardır. tki çeşittir.

a — Sıkışma tasmanı : Basıncın etkisi altında porozitelerin azalması, kayaların küçük elemanlarının kırılması sonunda hasıl olan deformasyonlardır. Kayada sıkışma tasmanı sonunda bir hacim azalması olur. Bu tasman anî veya gecikmeli olur.

b — Konsolidasyon tasmanı : Boşluk sularının sıkışma ile çıkması sonucunda olur,

genellikle gecikmeli bir tasmandır, geçirimsiz kayalarda olur.

Kayaların iç sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve kohezyonunu (c) tesbite yarayan arazide kesme deneyleride yapılır. Bu deneylerde kayanın deformasyonunu kırılma haline götürecekt büyük kuvvetler uygulanır.

Kayaların mekanik özelliklerinin tesbitinde önemli bir husus büyüklük, yani makyas tesiridir. Kayadan alınan bir numunenin mekanik özelliği toplu halde tabiatta bulunan kaya kütlelerinin mekanik özelliklerini temsil etmeyebilir. Bundan dolayı mühendislik çalışmalarında arazide yapılan deneylerin sonucuna birinci derecede itibar edilir.

10 — Sonuç :

Günümüzde diğer tabii ilimlere nazaran daha çok gelişme istidadında olan Kaya Mekanigiinden, şüphesiz bütün çalışmalarının he-

men hepsi kayalar ile ilgili olan maden mühendisleri daha ölçüde yararlanacaklardır. Teorik alandaki ilerlemeler ile yarının maden mühendisleri yılların verdiği ampirik kaideler ile birlikte modern matematik ve mekanigi tabiata uygulamak imkânını bulacaktır.

Daha elverişsiz durumda yeraltı servetlerini işletme sonunda olacaklarından muhtemelen kayalar ile ilgili en güç ve en girift mühendislik problemleri ile uğraşacaklardır.

#### R E F E R A N S L A R

- [1] Mesures de pressions de terrains dans les mines de fer de L'est, méthode de mesure. (M.K. Tn-celln, 1952 Octobre, annales de L'institut technique du bâtiment et des travaux publics)
- [2] La Mécanique des Roches. (Talobre, Dunod Paris 1956)
- [3] interpretation de nombreuses mesures de deformations exécutées sur massifs rocheux par E.D.F. (P. Mazenot.) annales de L'institut technique du bâtiment et des travaux publics. - Février 1965