

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YUMUŞAK KAYAÇLAR İÇİN DİSK
MAKASLAMA İNDEKSİ DENEYİNİN KAYA
KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
VE ŞEHİRİÇİ SIĞ TÜNELLERDE
UYGULANMASI**

Orkun KANTARCI

Aralık, 2009

İZMİR

**YUMUŞAK KAYAÇLAR İÇİN DİSK
MAKASLAMA İNDEKSİ DENEYİNİN KAYA
KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
VE ŞEHİRİÇİ SIĞ TÜNELLERDE
UYGULANMASI**

Dokuz Eylöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliğı Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı

Orkun KANTARCI

Aralık, 2009

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ORKUN KANTARCI, tarafından **DOÇ. DR. C. OKAY AKSOY** yönetiminde hazırlanan “**YUMUŞAK KAYAÇLAR İÇİN DİSK MAKASLAMA İNDEKSİ DENEYİNİN KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI ve ŞEHİRİÇİ SIĞ TÜNELLERDE UYGULANMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Doç. Dr. C. Okay AKSOY

Yönetici

.....

Jüri Üyesi

.....

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Tez alıőması kapsamında yűrűtűlen projeyi 108M151 proje numarasıyla destekleyen TŪBİTAK kurumuna ve bu çalıőmada her tűrlű desteęi veren deęerli tez danıőmanım Doç. Dr. C. Okay AKSOY ‘a teőekkűrű borç bilir, sűzű geçen projenin műhendislik alanında ilgili konu űzerine ıŐık tutmasını dilerim.

Orkun KANTARCI

**YUMUŞAK KAYAÇLAR İÇİN DİSK MAKASLAMA İNDEKSİ
DENEYİNİN KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI ve ŞEHİRİÇİ SİĞ
TÜNELLERDE UYGULANMASI**

ÖZ

Bu tez çalışmasında İzmir metrosu 2. Aşama İnşaatı kapsamında açılan 64 m² kesitli hat tünelleri incelenmiştir. Tünel hattındaki baskın kaya birimleri Yamanlar volkanitleri olarak bilinen, düşük ve orta derece arasında başkalaşım gösteren andezitler; Altındağ oluşumu olarak bilinen, aglomera-kumtaşı-silttaşı-kiltaşı dizisi; Bornova karmaşığı olarak bilinen sarımsı kahverengi filiş ve grimsi siyah filıştır. Elde edilen veriler sonrasında özellikle Bornova Karmaşığında (laminalı – foliasyonlu – anizotrop) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi ile kayaç malzemesinin dayanımının standartlara göre (ISRM ve ASTM) tespitinin çok zor, zaman alıcı ve hatta bazı durumlarda imkansız olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar uygun örnek üzerinde ve tünel aynalarında (çok az miktarda) T.E.B.D. deneyi, Nokta Yük Dayanım Deneyi ve Schmidt Çekici Deneyleri yapıldıysa da sonuçlar tatmin edici bulunmamıştır. Bu nedenle kayaç malzemesinin dayanımının tespitinde Disk Makaslama Dayanım İndeksi kullanılmıştır. Bu veriler kullanılarak kaya kütlelerinin sınıflaması yapılmış, değiştirgeleri hesaplanmış ve sayısal modellemede kullanılmıştır. Sayısal model sonuçlarının sahada yapılan ölçüm ve gözlemlerle uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Disk Makaslama İndeksi, RMR , Kaya Kütle Sınıflaması, Zayıf Kayaç, Metro Tüneli

THE INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF BLOCK PUNCH INDEX IN THE ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEMS FOR WEAK ROCKS AND THE APPLICATION OF SHALLOW URBAN TUNNELS

ABSTRACT

In rock engineering, knowledge and understanding of behavior and characterization of rock masses are essential for the safe design of surface and underground structures. Indirect tests are often employed to predict the UCS empirically, via such as Point Load Index (PLI), Schmidt Hammer (SH) Rebound Number tests.. Recently, Block Punch Index (BPI) test was developed to minimize the errors arisen from the structural deficiencies, especially in laminated-foliated, anisotropic rocks with low RQD and strength. In this study, to benefit from BPI advantage, in order to determine the rock mass behavior in laminated-foliated Bornova Melange (yellowish-brown flysch and greyish-black flysch) and well jointed Yamanlar Volcanics-Altindag Formation, in which the 2nd Stage of Izmir Metro tunnels were excavated the BPI ratings were directly used in RMR calculations and also BPI values were indirectly used to estimate the UCS values of rock materials which were then input in numerical models along with the rock mass strength and modulus of elasticity (E) of rock materials. The results obtained from the numerical models agreed with that obtained from tunnel convergence and ground settlement measurements and have proven that use of BPI values for such rocks will yield reliable results in search of rock mass properties.

Keywords: Block Punch Index, Rock Mass Classification, RMR, Metro Tunneling, Weak Rock Masses

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ.....	2
2.1 Kayaçların Fiziksel Özellikleri	2
2.1.1 Mineral Bileşimi, Yapı ve Dokuları.....	3
2.1.1.1 Mikroskopik İnceleme	3
2.1.1.2 X - Ray	3
2.1.1.3 Civa Gözenek Ölçeri	3
2.1.2 Yoğunluk.....	4
2.1.3 Gözeneklilik ve Boşluk Oranı	6
2.1.4 Doğal Nem İçeriği.....	7
2.1.5 Suya Doymuş Nem İçeriği	8
2.1.6 Doygunluk Derecesi.....	9
2.1.7 Geçirgenlik.....	9
2.1.8 Isıl Özellikler.....	10
2.1.9 Elektriksel Özellikler	10
2.2 Kayaçların Mekanik Özellikleri.....	11

2.2.1 Kayaçların Dayanım Özellikleri	12
2.2.1.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı	13
2.2.1.2 Çekme Dayanımı.....	19
2.2.1.2.1 Direkt Çekme Deneyi.....	19
2.2.1.2.2 Endirekt Çekme Deneyi	21
2.2.1.3 Kayma Dayanımı	28
2.2.1.3.1 Kayma Düzleminde Normal Gerilmelerin Olmadığı Kayma Dayanımı Deneyleri	28
2.2.1.3.2 Kayma Düzleminde Normal Gerilmelerin Oluştığı Kayma Dayanımı Deneyleri	28
2.2.2 Kayaçların Deformasyon Özellikleri	29
2.2.2.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi	30
2.2.2.2 Burkulma Kayma Deneyi.....	32
2.2.2.3 Elastisite Modülü	33
2.2.2.4 Poisson Oranı	33
2.3 Kayaçların İndeks Özellikleri	34
2.3.1 Konik Çentik Deneyi	34
2.3.2 Nokta Yükleme Dayanımı Deneyi	35
2.3.2.1 Çap Deneyleri.....	35
2.3.2.2 Eksenel Deneyler	35
2.3.3 Sertlik	36
2.3.4 Schmidt Çekici Değeri	38
2.3.5 Shore Skleroskop Deneyi.....	38
2.3.6 Kayaçların Şişme Özelliklerinin Tayini.....	39
2.3.7 Suda Dağılma Dayanımı	40
2.3.8 Kaya Kalite Göstergesi	41

BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
3.1 Örnek Hazırlama	42
3.2 Mineral Tane Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	43
3.3 Kaba Yoğunluğun Belirlenmesi.....	45
3.4 Gözeneklilik ve Doluluk Oranının Belirlenmesi	47
3.5 Su Emme Yeteneğinin Belirlenmesi	48
3.6 Tek Eksenli Basma Dayanımı Deneyi	49
3.7 Suda Dağılma Dayanımı	52
3.8 Schmidt Çekici Değerlerinin Belirlenmesi	54
3.9 Disk Makaslama İndeksi Deneyi	56
3.9.1 Örnek Hazırlama	56
3.9.2 Deneyin Yapılması.....	57
3.10 DMİ Deneyinin Rmr Sınıflama Sisteminde Kullanılması Ve Şehir İçi Sığ Tünellerde Uygulaması	67
3.10.1 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri.....	67
3.10.2 Tünel Hattının Coğrafik Durumu.....	71
3.10.3 Kaya Kütle Davranışının RMR ile Belirlenmesi	73
3.10.4 Tünel güzergahında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar.....	76
BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR VE TARTIŞMA	78
4.1 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	79
KAYNAKLAR	80

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde metrolar kentsel ulaşım sistemleri olarak değerlendirilmektedir. Yenilenen ve gelişen şehircilik kavramları arasında ise metro, artık bir yaşam biçimidir. Amacı, kent insanını bir yere ulaştırmak değil, büyük bir kenti yaşanabilir kılmaktır. Temel hedef vatandaşların zaman ve yarar değerlerini en üst seviyeye çıkarmak, rahat ve huzurlu bir ortamda, düzenli ve güvenli koşullarda hizmet sunabilmektir. Bunun için ise güvenlik tedbirlerini elden bırakmadan inşayı ekonomik bir biçimde mühendislik projeleriyle birlikte sürdürmek gerekmektedir.

Mühendislik projelerine yapılan yatırımlar oldukça riskli ve yüksektir. Özellikle madencilik sektöründe bu risk ve maliyet unsurları diğer sektörlerle nazaran daha fazladır. Madenciliğin en önemli özelliklerinden biri geri dönüşün olmayışı ve bilinmeyene doğru bir çalışma oluşudur. Bu nedenle yapılacak olan yatırımlar üzerindeki risk faktörünü minimuma indirmek için daha önceden küçük modeller üzerinde çalışma ve araştırmaların yapılması faydalı olmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda proje için, teknik ve ekonomik açıdan en uygun sonuçlar elde edilmektedir.

Kayaçları mühendislik işlerinde kullanırken, çeşitli özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu özellikleri tayin edebilmek için laboratuvar ve arazide birtakım deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerde modeller yenilenebilmekte, koşullar değiştirilebilmekte ve değişirgelerin belirlenebilmesi için ayrıntıya girilebilmektedir. Ancak unutulmaması gereken bir konu da, bu deneyler laboratuvar koşullarında ve belirli varsayımlar doğrultusunda yapılmaktadır. Oysa doğanın yapısı hiçbir zaman ideal olmamakta ve laboratuvar koşullarıyla uyuşmamaktadır. Bundan dolayı yapılan çalışmalarda tam anlamıyla doğru sonuçlar elde edilememektedir.

BÖLÜM İKİ

KAYAÇLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Mühendislik açısından, yerüstü ve yeraltı açıklıklarının tasarım aşamasında kayacın kazı öncesindeki gerilme durumu ve kazıdan sonra çevre kayaçlardaki gerilme konsantrasyonu hakkında ayrıntılı bir jeoteknik çalışmanın yapılması gerekmektedir.

Kazıdan önce kayaç içindeki gerilmenin nedeni üst örtü tabakasının ağırlığı veya tektonik kuvvetlerdir. Kazıdan sonra açılan boşluk çevresindeki kayaçlarda gerilme, açıklığın şekline, boyutlarına ve kayacın mühendislik özelliklerine bağlı olarak değişik kayaçlar için farklılık gösterir. Bu nedenle kayaç içinde açılan boşlukların tasarımı için kazı öncesi gerilme durumu, değişik şekillerdeki açıklıklar etrafında oluşan gerilme konsantrasyonları ve kayaçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kayaçların mühendislik özelliklerinin (mekanik ve fiziksel) önceden belirlenmesi ile kayaçların davranışları tahmin edilebilir. Burada kayaçların belli başlı mekanik ve fiziksel özellikleri ve belirlenme yöntemleri irdelenecektir.

2.1 Kayaçların Fiziksel Özellikleri

Bu araştırmalarda kayaçların tespit edilmesi gereken bazı fiziksel özellikleri vardır. Bunların başlıca olanları aşağıdadır:

- a) Mineralojik Bileşim
- b) Yoğunluk
- c) Gözeneklilik
- d) Boşluk Oranı
- e) Doğal Nem İçeriği
- f) Suya Doymuş Nem İçeriği
- g) Doygunluk Derecesi
- h) Geçirgenlik

- i) Isıl Özellikler
- j) Elektriksel Özellikler

2.1.1 Mineral Bileşimi, Yapı ve Dokuları

Yapılacak olan petrografik araştırmalar kayacın içerdiği minerallerin ve kayaç dokusu ile yapısının belirlenmesi amacıyla yöneliktir.

Kaya Mekaniğinin amaçlarına uygun olarak yapılan petrografik incelemeler 3 ana başlık altında incelenir (Köse ve Kahraman, 1999).

2.1.1.1 Mikroskopik İnceleme

20 mm x 50 mm x 0,03 mm boyutlarındaki parlatılmış ince kesit örnekleri polarize ışın mikroskobu altında incelenir. Genellikle x100 ile x400 büyültme yeterlidir. Bu inceleme kayaçların mineral içeriklerine (nitel ve nicel) ve optik özelliklerine bağlı olarak yapısının (dokusunun) belirlenmesini sağlar. İkinci bir polarizan filtrenin kullanılması minerallerin optik özellikleri hakkında daha fazla bilginin elde edilmesini sağlar.

2.1.1.2 X - Ray

X - Ray incelemesi kayacın mineral bileşimini ortaya çıkarır. X ışınları minerallerin kristal kafesinden yansır ve bu yansıma sonucu kafes tipleri belirlenebilir. Bu metot örneğin kabarma deneyine tabi tutulduktan sonra içerdiği kabarmabilir veya kabarmayan minerallerin ayrılmasını belirlemek için kullanılır.

2.1.1.3 Civa Gözenek Ölçeri

Bu yöntem petrografide boşluk oranının tayininde kullanılan en etkili yöntemdir. Bu yöntemde civa basınç altında (2000 bar) kayaç içindeki gözeneklere dolar. Bu yolla çapı 3,75 mm olan gözenekler bile dolar. Ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda doğal kayacın yoğunluğu, boşluk oranı ve farklı çaplardaki gözenek yüzdeleri bulunabilir.

Petrografik incelemeler sonucunda kayaçlar tane yapılarına göre sınıflandırılabilirler. Bu incelemelerden elde edilen sonuçlara göre kayaç gözenekliliği ve geçirgenliği hakkında sayısal ifadeler türetilebilir. Kayaç içerisinde kabarma özelliğine sahip minerallerin dağılım ve oranları belirlenebilir ve kayacın

kabarma davranışı hakkında nitel ifadeler elde edilebilir. Belli minerallerin oranları kayacın kazılabilirliği hakkında bilgi verir (Aksoy ve Küçük, 1996).

2.1.2 Yoğunluk

Yoğunluk, kayacın havadaki toplam ağırlığının, tüm boşluklar dahil olmak üzere kayacın toplam hacmine oranıdır. Kayaçların dayanımları, yoğunlukları ile doğru orantılıdır. Yoğunluk arttıkça, kayaç dayanımı artmakta; yoğunluk düştükçe dayanım da azalmaktadır (Köse ve Kahraman, 1999).

Yoğunluk çözümlemesinin amacı, örneklerin yoğunluğunu (kuru veya suya doymuş), gözenekliliğini ve ilgili özelliklerini saptamaktır. Bu özellikleri saptamak için kullanılan terimler ve semboller aşağıda verilmiştir:

Mineral Tane Ağırlığı G_w , Hacmi G_v

Gözenek Su Ağırlığı W_w , Hacmi W_v

Gözenek Hava Sıfır Ağırlık ve Hacmi A_v

Gözenek, Hacim ile $P_v = W_v + A_v$

Bulk Örnek Ağırlığı $B_w = G_w + W_w$

Bulk Örnek Hacmi $B_v = P_v + G_v$

Suyun Yoğunluğu $\rho_w =$ Birim hacimdeki su kütlesi

Bu deneylerde kullanılacak formüller:

$$\text{Su İçeriği} \quad W = \frac{W_w}{G_w} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\text{Doyma Derecesi} \quad S_R = \frac{W_v}{P_v} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\text{Gözeneklilik} \quad n = \frac{P_v}{B_v} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\text{Kayanın Kuru Yoğunluğu} \quad \rho_d = \frac{G_w}{B_v}$$

$$\text{Doymuş Kayanın Yoğunluğu} \quad \rho_s = \frac{(G_w + P_v \cdot \rho_w)}{B_v}$$

$$\text{Mineral Tane Yoğunluğu} \quad \rho_g = \frac{G_w}{G_v}$$

Buradan;

$$\text{Kuru Özgül Ağırlık} \quad d_d = \frac{\rho_d}{\rho_w}$$

$$\text{Doymuş Özgül Ağırlık} \quad d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$\text{Mineral Tane Özgül Ağırlığı} \quad d_g = \frac{\rho_g}{\rho_w}$$

Kayaçların fiziksel özellikleri birbirleriyle sıkı bir ilişki içinde olduğundan, eğer su içeriği, gözeneklilik ve kuru yoğunluk bilinirse;

$$\text{Doyma Derecesi;} \quad S_r = \left(\frac{W \cdot \rho_d}{n \cdot \rho_w} \right)$$

$$\text{Bulk Yoğunluğu;} \quad \rho = \left(\frac{1 + W}{100} \right) \cdot \rho_d$$

$$\text{Mineral Tane Yoğunluğu;} \quad \rho_g = \frac{\rho_d}{\left(1 - \frac{n}{100} \right)} \quad \text{olarak hesaplanır.}$$

Bulk hacmi, B_v , hesaplama;

Yüzdürme Yöntemine göre, örnek en az 1 saat 800 N/m^2 'den az vakum içinde suya batırılarak suya doymuş hale getirilir. Bu işlem sırasında hapsedilmiş havayı giderebilmek için periyodik olarak çalkalama, sallama uygulanır. Doymuş örnek suya batırılarak ağırlığı $0,1 \text{ gr}$ hassasiyetle ölçülür (W_{sub}). Daha sonra örnek üzerindeki suyu gidermek için nemli bez ile kurulanır ve $0,1 \text{ gr}$ hassasiyetle ağırlığı ölçülür (W_{sat}).

$$\text{Örnek Bulk Hacmi;} \quad B_v = \frac{(W_{\text{sat}} - W_{\text{sub}})}{\rho_w}$$

Ağırlıkları alınan örnekler 105 C° 'de sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar kurutulur. Kuruyan örnekler 30 dakika desikatörde soğutulur ve tane ağırlığı ölçülür (Aksoy ve Küçük, 1996). Daha sonra hesaplama işlemlerine geçilir.

$$\text{Kuru Yoğunluk; } \rho_d = \frac{G_w}{B_v}$$

$$\text{Doymuş Yoğunluk; } \rho_s = \frac{W_{sat}}{B_v}$$

$$\text{Gözenek Hacmi; } P_v = \frac{W_{sat} - G_w}{\rho_w}$$

$$\text{Etkili Gözeneklilik; } n_{eff} = \frac{P_v}{B_v} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

$$\text{Tabii Yoğunluk; } \rho_n = \frac{W_n}{B_n}$$

Nem oranı belirlenecek örneğin ilk tabii ağırlığı ölçülür(A). Daha sonra örnek 105C° 'de 24 saat bekletilerek kurutulur. Kurutulduktan sonraki ağırlığı ölçülür (B). Bu verilere dayanarak örneğin nem oranı aşağıdaki formüle göre hesaplanır;

$$\text{Nem Oranı} = \frac{A - B}{B} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

2.1.3 Gözeneklilik ve Boşluk Oranı

Gözeneklilik, gözenek hacminin toplam örnek hacmine oranı olarak tanımlanır. Eğer gözeneklilik bulk hacminden hesaplanırsa "etkili gözeneklilik" ve eğer mineral tane yoğunluğunun belirlenmesinden hesaplanırsa "toplam gözeneklilik" denir. Toplam gözeneklilik kapalı durumdaki gözenekleri de içermektedir.

Gözeneklilik, gerilme ve ısıdaki değişimlerin oluşturduğu içsel gerilmelerin sonucudur. Özellikle çatlak şeklindeki küçük bir gözeneklilik miktarı, kayacın deformasyonu üzerinde çok geniş bir etki yapar. Kayaçların arasında genellikle en geniş gözeneklilik tortul kayaçlarda gözlenir (Köse ve Kahraman, 1999).

Bir kayacın gözenekliliği içinde bulunan gözeneklerin toplam hacminin, kayacın hacmine oranı demektir.

Boşluk oranı ise, kayaçtaki boşlukların hacminin, katıların hacmine oranıdır. Ondalık kesir ile gösterilen boyutsuz bir rakamdır. Kayaçta katıdan kaç defa fazla boşluk olduğunu gösterir.

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

e : Boşluk oranı

V_b : Boşluk hacmi

V_d : Katı hacmi

n : Gözeneklilik 'dir.

Gözenekliliğin yüksek oluşu basınç direncinin az, E modülünün ve yoğunluğun düşük olduğunu, buna karşılık su emmenin çok olduğunu ifade etmektedir.

2.1.4 Doğal Nem İçeriği

Nem içeriğinden bahsederken öncelikle kayaçta su ve suyun davranışı incelenmelidir. Bir kural olarak, su daima akmak için en az dayanım gösteren yolu izler.

Bu yüzden, kırıklar ve diğer kusurlar yeraltı suyunun kayaçta girebileceği en kolay geçitlerdir. Yine bu yüzden, bir kayaçta kırık ve eklem sistemlerinin büyüklüğü ve geometrisi kayacın hidrolik durumunun yorumlanmasında büyük yarar sağlar.

Kayaç gözenekleri, boşluklar, çatlaklar ve kırıklara benzer olarak belli serbest veya bağlı su içerebilirler (Köse ve Kahraman, 1999). Örneğin su filmi, hali hazırda yer kabuğunda çok büyük miktarda yer almaktadır. Bu doku suyu, mekanik olarak akaçlanamaz ve dışarı pompalanamaz. Su filmi, ısı gradyan ve zaman zamanda elektriksel gradyan altında termo-osmotik olarak davranır. Böylelikle kayaçta ince damarlar çatlaklar gibi en zayıf ve küçük boşluklar boyunca hareket eder. Bu tür sular kayaçta zamanla bozulma ve parçalanmaya neden olur (Köse ve Kahraman, 1999).

Büyük gözenekliliğe sahip doğal kayalardaki su içeriği pratik olarak önemlidir. Böyle bir kayacın doyması kayacın dayanımını düşüren gözenek basıncının oluşmasına sebep olur (Ani yüklemde düşük geçirgenlik).

Bir kayacın nem içeriği, kayaç örneğinin içerdiği su ağırlığının (W_{su}), kayacın toplam kuru ağırlığına (W_k) oranı olarak tarif edilebilir. Genellikle % olarak ifade edilir.

$$w = \frac{W_{su}}{W_k} \cdot 100 = \frac{W - W_k}{W_k} \cdot 100$$

W = Nem içeriği

W_{su} = Su ağırlığı

W_k = 24 saat 105°C da etüvde kurutulan örneğin ağırlığı

W = Orijinal örneğin ağırlığı

Su içeriğinin belirlenmesi için kullanılan örneklerin saklanması çok önemlidir. Kazıdan hemen sonra örneğin hava ile teması kesilecek şekilde ambalajlanmalıdır.

Deney için hem karot örneği hem de düzensiz şekilli kayaç örnekleri kullanılabilir.

2.1.5 Suya Doymuş Nem İçeriği

Bir kayada su emmenin az veya çok oluşu diğer fiziksel özellikleri etkilemektedir. Genellikle su emme çok ise gözeneklilik fazla, boşluk ve çatlaklar çok, ayrışma miktarı yüksek demektir. Buna karşılık su emmenin az olması, basınç direnci, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin büyük olmasını göstermektedir (Köse ve Kahraman, 1999).

Deney için en az 5 örnek alınır. $105 \pm 5^\circ\text{C}$ de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur ve tartılarak (W_k) ağırlığı tespit edilir. Sonra en az 24 saat suya daldırılarak emilen su miktar (W_w) bulunur.

Su emme % olarak;

$$W_a = \frac{W_w}{W_k} \times 100 \quad \text{şekline ifade edilir.}$$

$W_a = \text{Su emme (\%)}$

$W_w = \text{Emilen su miktarı (gr)}$

$W_k = \text{Örneğin kuru ağırlığı (pr)}$

Deney örneklerinin her birinin ağırlığı 150-350 gr arasında olabildiğince yassı parçalar halinde ve yaklaşık olarak aynı büyüklükte olmalıdır.

2.1.6 Doygunluk Derecesi

Doygunluk derecesi aşağıda verilen şekillerde belirlenir (Köse ve Kahraman, 1999).

$$S = \frac{V_{su}}{V_b} = \frac{W}{W_d} = \frac{W \cdot \gamma}{n(1 + w) \cdot \gamma_{su}} = \frac{W \cdot G}{e} = \frac{W \cdot G(1 - n)}{n}$$

$S = \text{Doygunluk derecesi}$

$V_{su} = \text{Su hacmi} \quad V_b = \text{Boşluk hacmi}$

$W = \text{Nem içeriği} \quad W_d = \text{Doygun halde nem içeriği}$

$\gamma = \text{Kayaç birim-hacim ağırlığı}$

$\gamma_{su} = \text{Suyun birim-hacim ağırlığı}$

$G = \text{Bağlı yoğunluk}$

$e = \text{Boşluk oranı}$

$n = \text{Gözeneklilik}$

2.1.7 Geçirgenlik

Geçirgenlik gözenekli malzeme özelliğidir ve birbirine bağlı boşluklarda akışkanların sızıntı veya geçişine izin verme olarak bilinir. Akmaya karşı dayanım, kayaç tipine, boşluk geometrisine ve suyun yüzey gerilimine bağlıdır. Geçirgenliğin ifadesinde Darcy yasası geçerlidir.

$$Q = VA = KiAt \text{ (m}^3\text{)}$$

$k = V/i = \text{Kayaç geçirgenlik katsayısı,}$

$i = h/L = \text{Hidrolik eğim,}$

Q = Büyük kesit boyunca toplam akış,

A = Alan, t = Akış süresi,

h = Malzemenin iki ucu arasındaki su seviye farkı,

L = Suyun geçtiği malzeme kalınlığı

Bulunan geçirgenlik katsayısı, suyun birim hidrolik eğim altında kayaktan sızma hızı olarak tariflenir. Geçirgenlik katsayısı, kayaç tipinin boşluk boyutunun, boşluklarda saklı kalan hava, kayaçtaki ısı ve su vizkozitesinin bir işlevidir (Köse ve Kahraman, 1999).

Kayacın mineralojik bileşimine bağlı olarak kayaçlarda yeraltı suyunun hareketi bazı çözülebilir mineral bileşenlerinin çözülmesini doğurabilir. Dolayısı ile kimyasal etkiler, kayaçların mekaniksel özelliklerinde bir değişime neden olabilir. Ayrıca atmosfer ile ilişkilerinden dolayı, kayaçlar atmosferik gazlardan da zarar görebilirler. Ayrıca kayaçların jeolojik şekline bağlı olarak yeraltı boşluklarında yer alabilen yeraltı gazları da kayaçlar üzerinde etki yapabilir.

2.1.8 Isıl Özellikler

Isı ve sıcaklık derecesi, özellikle tünel ve diğer yeraltı yapılarının tasarımı ve inşasında özel bir öneme sahiptir. Sıcaklık derecesindeki yükselme, kayaç dayanımında bir azalmaya ve kayacın duktilliğinde bir artışa neden olur. Bu nedenle, kayaçta ısıl durumların ve jeotermal gradyanın bilinmesinin teknik ve ekonomik açıdan büyük önemi vardır. Özellikle çalışanların sağlık koşulları için ve havalandırma soğutma sistemleri için uygun inşa etme yöntemi seçmede büyük öneme sahiptir (Köse ve Kahraman, 1999).

2.1.9 Elektriksel Özellikler

Birçok kayacın yalıtkan olması sebebiyle, elektriksel özelliklerin tespitinde ana konu yalıtkan sabitinin ölçülmesidir. Kayaçlarda elektriksel özellikler, kayaç tipi, yapısı dokusu, nem içeriği ve gözenekliliğine bağlıdır. Kayaların elektriksel iletkenliği ve yalıtkan sabiti gibi elektriksel özellikleri, kayaçlarda yeraltı suyunun jeoelektriksel gözleminde büyük değere sahiptir (Köse ve Kahraman, 1999). Bunun yanı sıra, iyi loglama, logların yorumlanması ile kayaçların elektriksel profilinin çıkartılmasında ve mineral tanımında elektriksel özellikler önemle kullanılır.

2.2 Kayaçların Mekanik Özellikleri

Kayaçların çoğunun yapıları, kristalin ve amorf parçacıkların çimentolu malzeme ile birleşmelerinden oluşmuştur. Kalkerlerin bir kısmında olduğu gibi kristallerin kimyasal bileşimleri oldukça türdeş olmalarına karşın, granitlerde olduğu gibi kristalin parçalar türdeş değildir.

Kayaçların mekanik özelliklerinin incelenmesi bu kristallerden başlar. Kristallerin arasındaki sınır yüzeyleri o kayacın zayıflıklarını oluşturur. Onlar olmasaydı kayaçlar küçük ölçüde (iki komşu çatlak arası) devamlı sayılabilirdi.

Kristallerin kendilerinin boyut ve şekil değiştirmeleri (deformasyon) onların oluşturduğu kayaçların maruz kaldığı gerilmelerin meydana getirdiği deformasyonların açıkça görülen sonuçlarıdır.

Geniş ölçüde, kırıkların, çatlakların, tabakalaşma düzlemlerinin ve küçük atımlı fayların varlığı, kayaç kitlelerin devamlılığını ortadan kaldıran problemler doğurmaktadır. Bir kayaç kütesinin içinde rastlanan bu arızalar, kayaç kütesine göre küçük boyutta iseler, onların etkisi sadece kayaç kitlesinin mekanik özelliklerini biraz değiştirmek olacaktır. Kayaç kitlesi yine de devamlılık gösterecektir. Eğer bu arızalar büyük çapta iseler, aralarında kalan blokların her bir bütün kayaç kütesinin bir parçası olarak ele alınmalıdır.

Bir kayaç kütesine uygulanan yükler genellikle ağırlık (yerçekimi) yükleri olup basınç gerilmeleri doğurur. Bu koşullar altında, bir kayaç kitlesinin mekanik özellikleri ve devamlılığı, içinde bulunan kırık ve çatlakların yüzeysel sürtünme dayanımlarına bağlıdır. Eğer bu kırık ve çatlak yüzeylerin hiç birinde kayma olmayacaksa, bu kayaç kitlesi, yaklaşık olarak devamlı bir ortam kabul edilebilir ve kayaçtan alınan deney parçasının ortalama özellikleri kayaç kitlesini temsil edebilir (Köse ve Kahraman 1999).

Bu gerilme değişimine maruz kalan bir kayaç kitlesinin davranışı iki faktöre göre değişir.

- a) Kayaç kitlesini oluşturan kayacın mekanik özellikleri
- b) Kayaç kitlesinde bulunan süreksizliklerin (kırık, eklem, faylar) sayısı ve niteliği.

Bu faktörlerin önemlilik dereceleri, yapılacak yapının boyutları ile kayaç kitlesinde bulunan süreksizliklerin aralıkları, mesafeleri arasındaki orantıya göre değişir. Baraj temelleri ve geniş yeraltı boşluklarının kazılmasında, bu süreksizlikler büyük önem taşır.

Arızalı bir jeolojik malzemede, genel olarak kayaçların en önemli mekanik özellikleri olan aşağıda sıralanmış özellikler kontrol edilmelidir.

Bunlar;

- a) Dayanım
- b) Deformasyon
- c) İndeks özellikleri

Yeraltı ve açık ocak çalışmalarında, mekanik özellikler daha çok dayanım özellikleriyle ilişkilidir ve kayaç özellikleri kayaç derinliği ile değişir.

2.2.1 Kayaçların Dayanım Özellikleri

Kaya mühendislik tasarımlarında, kaya dayanım özelliklerinin ve elastik sabitlerinin bilinmesi gerekmektedir. Mühendislik uygulamalarında dayanım, verilen çevrede bir kopmaya sebep olacak birim alana düşen kuvvet olarak kabul edilebilir (Köse ve Kahraman, 1999).

Dayanım özelliklerine kayacın nicel ve nitel bileşimi kayacın sürekliliği ve aşağıdaki diğer faktörler etki eder.

- a- Kayacın tipi,
- b- Kayacın yeri ve çevresi
- c- Her bir mineralin iç dayanımı,
- d- Kayaç mineral tanelerinin birbiriyle bağı,
- e- Nem içeriği
- f- Eklem, çatlak ve her türlü boşluklar,
- g- Deney yöntemi
- h- Deney hızı

1- Süre

Kayaç dayanımı, bozulmamış kayaç örneklerinin üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile saptanabilir. Bu deneyler her yerde kolaylıkla yapılabilen ve yorumlanabilmektedir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Kayaçların tek eksenli basma dayanımlarına göre sınıflandırması (Köse ve Kahraman, 1999).

Dayanım	N/mm ²
Çok Zayıf	< 1,6
Zayıf	1,6-5
Orta	5-16
Sağlam	16-50
Çok Sağlam	> 50

2.2.1.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı

Sondaj karotlarından hazırlanan silindirik kayaç örnekleri üzerine uygulanan en yaygın deney tek eksenli basınç deneyidir. Bu deney tek eksenli pres (Şekil 2.1) ile kayaçların, tek eksenli basınç dayanımları, σ_c , ve elastik sabitlerin (Youngs Modülü, E, Poisson's oranı.) belirlenmesinde kullanılır. Kayaçın tek eksenli basınç dayanımı, kaya kütle sınıflandırmasında kullanılır ve kaya kütlesi dayanımında temel değişirgedir.

Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarının belirlenmesinde uygulanacak deney yöntemi ISRM tarafından verilmiştir (International Society of Rock Mechanics [ISRM], 1979). Önerilen başlıca deney koşulları aşağıdaki gibidir.

- Deney örneği tam bir silindir olmalı, boy/çap oranı 2,0-3,0 arasında ve çapı NX karot çapından daha küçük olmamalı (yaklaşık 54 mm). Örnek çapı en büyük kayaç tanesinin en az 10 katı olmalıdır.
- Örneğin alt ve üst yüzeyleri 0,02mm hassasiyette düz olmalı ve örnek eksenine diklikleri 0,001 rad veya 50 mm için 0,05 mm hassasiyette olmalıdır.
- Örnek ile deney plakaları arasında herhangi bir madde olmamalıdır.

d) Örnekler en fazla 30 günlük olmalı ve deney anına kadar doğal su içeriklerini muhafaza etmeleri sağlanmalıdır.

e) Örneğin yan yüzeyi pürüzsüz olmalı ve düzgünlüğü boyunca 0,3 mm.'den daha küçük bir hassasiyete sahip olmalıdır.

f) Örneğin çapı, üst, orta ve alt kısımlarında ve her kısımda en az iki okuma yapılarak hassas olarak ölçülmelidir. Örneğin yüksekliği 1 mm. hassasiyetle okunmalıdır.

g) Örnek üzerine uygulanan yük belirli bir seviyede olmalı (0,5-1,0 N/mm².s).

h) Eksenel yük, eksenel ve çapsal deformasyonlar deney sırasında ölçülmelidir.

i) En az 5 örnek üzerinde deney tekrarlanmalıdır.

Basit bir deney olmasına rağmen, deney sonuçlarının yorumlanmasında büyük bir özen ve hassasiyet gösterilmelidir. Elde edilen sonuçlar, kayacın doğal yapısına, bileşimine ve deneyde kullanılan örneklerin özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.1 Tek eksenli pres

Aynı mineral bileşiminde, σ_c (tek eksenli basınç dayanımı) gözeneklilik, ayrışma derecesi ve mikro çatlak durumuna göre değişebilir. Örneğin artan gözeneklilik, ayrışma derecesi ve mikro çatlaklı örnekte σ_c azalır, ayrıca artan su içeriği ile σ_c düşebilir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı (farklı gözeneklilik, su içeriği), aynı jeolojik isme sahip kayaç örneklerinin tek eksenli basma dayanımı farklılıklar gösterebilir. Örneğin, kum taşının tek eksenli basınç dayanımı, tane boyutu, yoğunluk, taneler arasındaki çimentolanma durumuna, ve kayacın oluşumundaki ve daha sonra maruz kaldığı basınç ve sıcaklık seviyesine göre farklılık gösterir. Fakat yine de kayacın jeolojik ismi o kayacın mekanik davranışı hakkında kabaca da olsa bazı niteleyici değerler verir.

Örneğin bir kuvars örneği klivaj nedeniyle yönser davranış göstereceğinden, kuvarsın çok sağlam ve kırılmanlı olduğu tahmin edilebilir. Buna benzer özelliklerin bazı kayaçların tipik karakteristiklerini ifade etmelerine karşın, kayaçların sadece jeolojik tanımlarına göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça tehlikeli ve yanıltıcıdır.

Basınç dayanımı, üzerine uygulanan basma yüklerine karşı kayaların kırılmadan önceki dayanma yeteneği olarak tanımlanır. Bu deneyde amaç, düzgün geometrik biçimli kaya örneklerinin (silindir veya prizma şeklinde) tek eksenli veya düşey olarak uygulanan yükler altındaki dayanım sınırının bulunmasıdır. Kayaların basınç dayanımı, hem sınıflama hem de tasarım için gereklidir (Köse ve Kahraman, 1999). Tek eksenli basma deneyinden kayacın içsel sürtünme açısı (θ) ve kohezyonu (C_0) yaklaşık olarak bulunabilir.

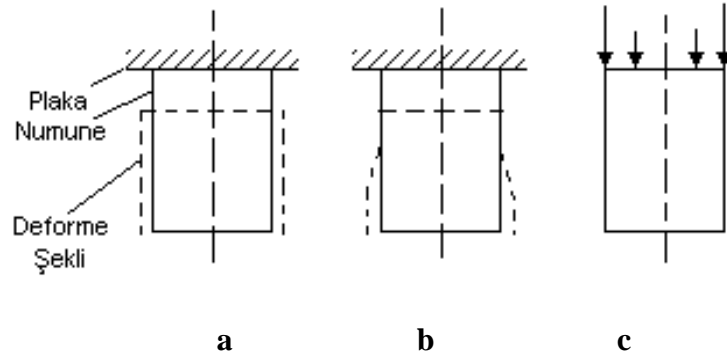
Örneğin basınç uygulanacak yüzeylerin hazırlanması; Eksenel gerilme-deformasyon eğrisi, tam doğrusal olmadan önce başlangıçta yukarı doğru bir içbükeylik verir. Bu etki örnek yüzeylerinin iyi ve standartlara uygun olarak hazırlanması ile minimuma indirgenebilir.

ISRM komisyonunca, 50 mm çaplı örneklerde alt ve üst yüzeyler 0,02 mm hassasiyette düz olmalı ve eksene mümkün olduğunca dik olmalıdır.

Örnek hacminin etkisi; Pratikte, aynı örnek geometrisi için kayacın tek eksenli basma dayanımı (σ_c), örnek hacmine bağlı olarak değişiklik gösterir. Genel olarak σ_c 'nin çok küçük boyutlu örneklerde artan örnek hacmine bağlı olarak azaldığı gözlenmektedir. Bu nedenle örnek çapı en büyük tane çapının 10 katı büyüklüğünde olmalıdır (~50 mm).

Yükleme hızının etkisi; ISRM komisyonu yükleme hızı olarak 0,5-1,0 N/mm².s olarak tavsiye etmektedir. Bu hızda bir yüklemeye örneğin 5-10 dakika içinde kırılmasını sağlamaktadır. Fakat basınç deneyinde yüklemeye hızı yerine deformasyon hızının kontrolü daha önemlidir.

Boy/Çap oranının etkisi; Örnek yüzeyleri ve basınç plakaları arasındaki sürtünme, kayaç ve çelik özelliklerindeki farklılıklardan dolayı, örnek bu dokunak kısımlarında aşırı dayanım göstererek deformasyona uğramaz (Şekil 2.2a). Şekil 2.2b'de örnek alt ve üst yüzünde çapsal gerilmelerin olduğu bir durumu göstermektedir. Bu gerilmelerin sonucunda örnek ile plaka kontağında kayma gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 2.2c). Bu da aksenal gerilmenin temel gerilme olmadığını ve örnek üzerinde sadece aksenal gerilmelerin oluşmadığını gösterir.

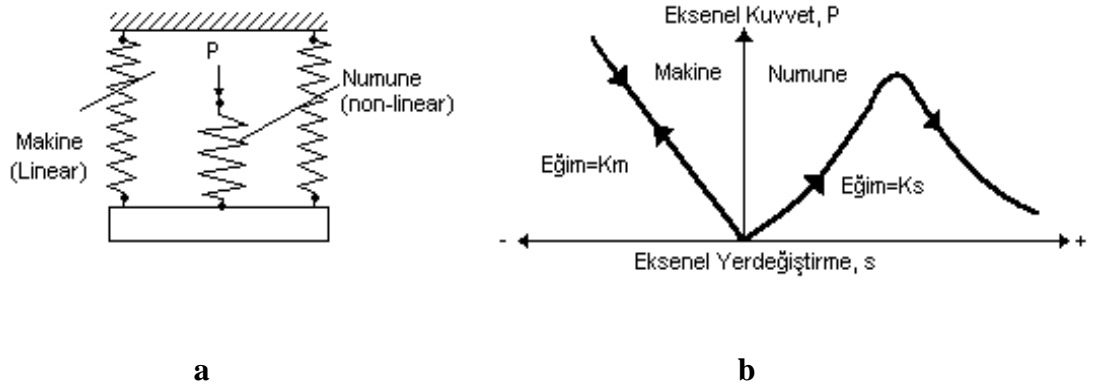


Şekil 2.2 Dayanıma, gerilmeye ve deformasyona örnek yüzeylerinin etkisi

Bu etkilerin bir sonucu olarak, örnek içindeki gerilme dağılımı, örnek geometrisine bağlı olarak değişiklikler gösterir. Boy/Çap oranı arttıkça örnek hacminin oransal olarak düzgün basınca tabi olan kısmı artmaktadır. Bu nedenle laboratuvar çapta yapılan basınç deneylerinde Boy/Çap oranı en az 2 olmalıdır. Daha düşük oranlarda örneğin alt ve üst yüzeylerinde meydana gelen kesme gerilmelerinin

etkisi artmaktadır. Oran arttıkça kesme gerilmesinin etkisi azalmakta ve örneğin orta kısımları sadece basma gerilmesine maruz kalmaktadır.

Deney cihazının etkisi; Şekil 2.3'de örnek ve konvansiyonel deney aleti arasındaki ilişki gösterilmektedir. Örnek ve makine paralel olarak yüklenmiş yaylar olarak şekillendirilmiştir. Pres, yatay katılık sabiti k_m olan bir doğrusal elastik yay ve örnek katılığı değişken olan k_s doğrusal olmayan bir yay ile temsil edilmiştir. Baskı kuvveti ve örnekteki deformasyon pozitif olarak alınmıştır. Örnek sıkıştırıldıkça makine yayı uzamaktadır. Bu uzama deney sırasında deney cihazının sütunundaki uzamaya benzemektedir.



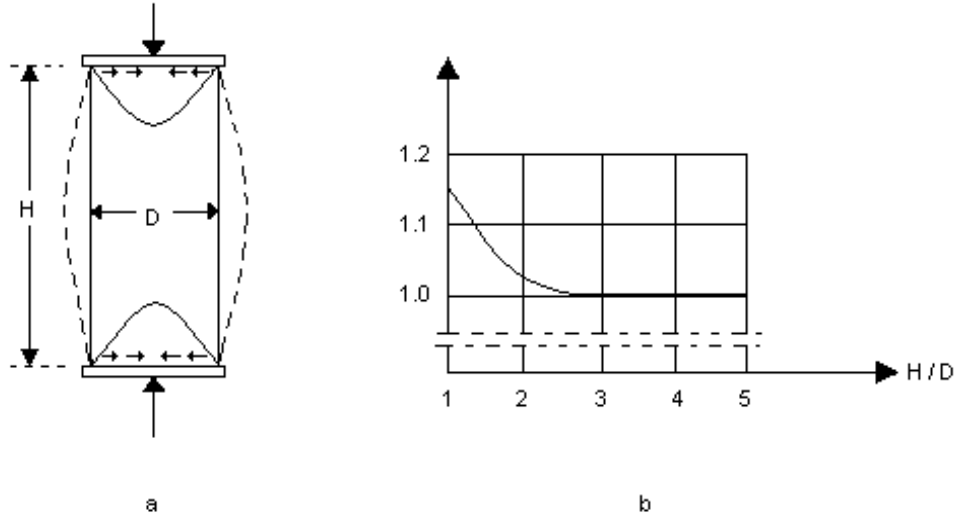
Şekil 2.3 Makine-örnek etkileşiminin yay ile ilişkisi

Maksimum dayanıma (gerilmeye) ulaşıldığında, örnek sıkışmaya devam ederken taşıyabileceği yük tedricen azalır. Bu sebeple pres boşalır ve uzaması azalır.

Çok kırılğan bazı kayaçlar için, tepe sonrası enerji- yer değiştirme veya gerilme-deformasyon eğri bölümleri çok dik olabilir. Bu durumda en sıkı cihazlarda dahi “post peak” deformasyonunu kontrol etmek imkansızlaşır. Bu nedenle, tepe sonrası eğrileri ve ilgili kırılma mekanizması otomatik kontrollü makinelerle tespit edilebilir.

Örneğin su içeriği, dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Bazı durumlarda suya doymuş kayacın dayanımı, kuru kayacın dayanımının % 50'si kadar olabilmektedir. Bu yüzden deney sırasında kayacın doğal su içeriğinin muhafaza edilmesi için uygun bir saklama gereklidir (Köse ve Kahraman, 1999).

Örnek yüzeyi ile plakalar arasında herhangi bir malzemenin konması pek istenmez (Şekil 2.4a). Çünkü kayacın elastisite modülü malzemeninkinden farklıdır.



Şekil 2.4 (a) Tek eksenli basınç dayanımı deneyinin şematik görünümü (b) Deney sonucunun işlevi olarak H/D Oranı

Örnek boyutları ölçüldükten sonra aksenal olarak sabit bir birim deformasyon olacak şekilde yüklenir. Boydaki ve çaptaki birim değişimlerin belirlenebilmesi için silindir yüzeye zorlanma ölçerler yerleştirilir (Şekil 2.4 b). Deney sırasında sürekli ölçümler ve okumalar yapılmalıdır. 30s içinde en az 10 farklı okuma yapılmalıdır. Kayacın tek eksenli basma dayanımı doğrudan olarak gerilme deformasyon eğrisinden bulunabilir(Köse ve Kahraman, 1999).

Deneyde örnek üzerine düşey olarak yük uygulayabilecek hidrolik pres kullanılır. Presin plakaları, örneğin eksenlerine dik olmalıdır. Gerekli toleranslar deformasyonun derecesine göre değişir. Deformasyonun çok küçük olduğu durumlarda hassasiyetin etkisi daha büyüktür.

Örneğin kırıldığı andaki uygulanan basınç değeri;

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{A} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\sigma_b = \text{Basma dayanımı (kg/cm}^2)$$

$$P_{\max} = \text{Kırılma yükü (kg)}$$

$$A = \text{Örneğin basınç uygulanan yüzünün alanı (cm}^2)$$

DeneYler sonucunda bulunan σ değeri dÜzeltme katsayısı ($\sigma_{\text{bdüz}}$) ile çarpılarak dÜzeldiymiş tek eksenli basma dayanımı değeri bulunur.

$$\sigma_{\text{bdüz}} = \frac{\sigma_b}{0,88 + 0,24 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)}$$

DeneY sırasında sonuca etki eden birçok faktör vardır. Bunlar;

a) Örnek L/D oranı: L/D oranı arttıkça, basınç dayanımı düşer ve bükülme söz konusu olur. L/D oranı düştükçe, basınç dayanımı artar ve yan basınç etkisi yaratır.

b) Yükleme Hızı: Yükleme hızı arttıkça basınç dayanımı artar.

c) Örneğin alt ve üst yüzeylerinin paralelliği ve bu iki yüzeyin yanal yüzeye göre dikliği.

d) Yükleme başlıklarıyla, örnek alt yüzeyi arasındaki etkileşim ve yükleme başlığı malzemesinin cinsi.

e) Yüklemenin, örnek düşey eksenine paralelliği.

f) Örneğin büyüklüğü arttıkça, örneğin içermiş olduğu safsızlıklar artar ve basınç dayanımı düşer.

g) Nem oranı arttıkça, basınç dayanımı düşer. (Köse ve Kahraman,1999)

2.2.1.2 Çekme Dayanımı

Doğal kayaç örneklerinin çekme dayanımları iki şekilde belirlenebilir.

a) Direkt çekme deneyi

b) Endirekt çekme deneyi

2.2.1.2.1 *Direkt Çekme Deneyi.* Çekme dayanımı saptanacak kayaçtan alınmış olan örnekten hazırlanan silindir şeklindeki deneY parçasını iki ucundan yakalayarak çekmek suretiyle doğrudan doğruya uygulanan bu çekme deneYinde birçok zorluklar ile karşılaşılmaktadır. DeneY parçasının yakalanmış olan uçlarında, bu yakalamadan doğan basınç gerilmeleri, deneY parçası içinde karmaşık gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır (Köse ve Kahraman, 1999).

Deney örnekleri düzgün, dairesel silindir biçiminde olmalı ve aşağıda belirtilen biçimde ve toleranslar içinde kalmalıdır. Örneğin yan yüzeyi genellikle düz ve örneğin tüm uzunluğu boyunca pürüzlüğü (bir yüzeydekinden yüksek ve alçak noktalar arasındaki fark) 0,13 mm'den büyük olmamalıdır.

Çekme deneyi için silindir biçiminde örnek hazırlanmasında, örnek yüzeylerinin düzgün, pürüzsüz, deney uygulanan kayacı temsil etmeyen oyuk, delik veya diğer düzensizliklerden arı olmasına dikkat etmelidir.

Yüzeyde bu düzensizliklerin bulunduğu noktalarda oluşan gerilme yoğunlaşmaları, normal çekme dayanımlarından daha küçük değerler elde edilmesine yol açar.

Örneğin iki ucu birbirine paralel ve uzun eksenine dik olarak kesilir. Bu iki uç yüzeyin, uzun eksenle yaptıkları dik açıdan sapma miktarı 100 mm'de 1 mm'yi geçmemelidir. Bu deneyde, örnek uçlarının düzlük ve pürüzsüzlük derecesi, basma deneyinde olduğu kadar kritik değildir. Çekme deneyinde örnek uçlarının birbirine paralel ve örneğin uzun eksenine dik olması, çekme yükü uygulamasında önemlidir. Uç yüzeylerin dairesel elmasla kesilmesi yeterlidir. Taşlama ve parlatma işlemleri gereksizdir. Yapıştırma işleminde ters etki yapabilir.

Kayaç örnek boyunun çapına oranı 2,0 – 2,5 ve çapı 54 mm (NX ölçülü karot)'den küçük olmamalıdır. Çekme deneyinde, örnek uzunluğu boyunca en zayıf noktadaki düzlemden kırılacağından bu olasılık, örnek boyu azaldıkça küçülür. Deneyde, standart boydan daha kısa boyda karotlar kullanıldığında, bu durum raporda belirtilmelidir. Çekme deneyi uygulanacak kayaç örneklerinin çapı kayaçta bulunan en büyük mineral boyutunun en az 10 katı olmalıdır (Köse ve Kahraman, 1999). Bu koşul çoğun hallerde örnek çapının en az 54 mm alınması ile sağlanır. Bu durumlarda, istenilen çapta örnek pratikte alınamadığından bu koşulu sağlamayan kayaç örnekleri ile deney yapmak zorunlu olabilir. Bu durumda ve özellikle örnek çapları belirtilen en küçük çaptan (54mm) daha küçük olduklarında dayanım deneyleri bu örneklerle yapılabilir. Deney raporunda bu durum belirtilmelidir.

Deney örneğinin çapı, örnek boyunun ortasına rastlayan bir yerde birbirine dik iki çapın 0,3 mm'lik doğrulukta ölçülmesi ve ortalamasının alınması ile bulunur.

Bulunan ortalama çap örneğin en kesit alanının hesaplanmasında kullanılır. Deney örneğinin boyu 22 mm doğrulukta ölçülür.

Örneğin deney sırasındaki nem miktarı, çekme dayanımı deney sonuçlarına önemli ölçüde etki edebilir. Örnekler hazırlandıktan sonra deney yapıncaya kadar en az 15 gün oda sıcaklığında ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ve normal atmosfer koşullarında tutulmalıdır. Çekme dayanımı deneyin tüm kuru olarak yapılması istendiğinde, etüvde ($105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)'da değişmez aralığa kadar kurutulur (Köse ve Kahraman, 1999).

Çekme dayanımı;

$\sigma_{\text{}} = \frac{P}{A}$ formülü ile bulunur. Burada;

$\sigma_{\text{}} = \text{çekme dayanımı (kg/cm}^2\text{)}$

$P = \text{Kırılma yükü (kg)}$

$A = \text{Alan (cm}^2\text{)}$

2.2.1.2.2 *Endirekt ekme Deneyi*. Bu metotlarda her ne kadar deney parçasında basınç gerilmeleri oluşmakta ise de, kayaçların çekme dayanımlarının diğer dayanımlarına göre daha düşük olmasında dolayı deney parçalarını kırılmasında çekme gerilmeleri etken olmaktadırlar (Köse ve Kahraman, 1999).

Endirekt ekme deneyleri;

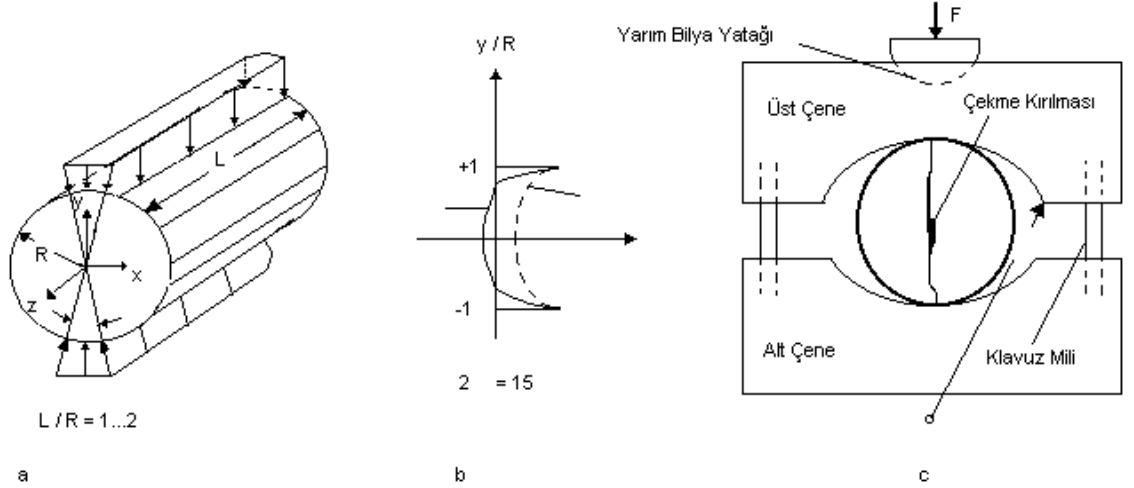
- a) Brazilian deneyi
- b) Eğme deneyi
- c)  eksenli basınç deneyi
- d) Halka ekme deneyi

Bu deneyler arasında en çok kullanılanı Brazilian deneyidir.

Kayaçların ekme dayanımlarının direkt çekme deneyi ile belirlenmesi teknolojik olarak çok zordur. Bu sebeple daha çok endirekt çekme deneyleri kullanılmaktadır.

Bu deneyde silindirik deney örnekleri çapsal olarak sıkıştırmaya tabi tutulur. Yatay (σ_x) ve düşey (σ_y) normal gerilmeleri, y-z kesit düzlemi üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 2.5 a ve b'de görüldüğü gibi x-y eksenli yönündeki normal gerilme, örneğin dış kenarında maksimuma ulaşmaktadır. Brazilian deneyinde yenilme, çapsal olarak etkiyen çekme gerilmesi yüzünden meydana gelmektedir.



Şekil 2.5 Brazilian deneyinde (a,b)Boy-Çap arasındaki ilişki (c) Çelik çeneli aygıt

Örneklerin çekme dayanımları yaklaşık olarak;

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot L} = 0,636 \cdot \frac{P}{D \cdot L} \text{ şeklinde hesaplanabilir.}$$

Yük, örnek üzerine, çapı örnek çapından daha büyük olan çelik çeneler yardımıyla iletilir (Şekil 2.5c). Yükleme plakaları ve örneğin elastik deformasyonu, yükün iletiildiği, karşılıklı iki dokunma yüzeylerinde oluşur. Radyal gerilim dağılımı bu yüzeylerde yoğunlaştığı kabul edilir.

Şekil 2.5.a'da gösterilen yayı gören merkezi açısı, $2\alpha = 10^\circ$ civarında olursa sayısal plaka dokunağındaki basma gerilmelerinin aşırı derecede artmasını önler.

Örnekler çoğunlukla 2 düz plaka ile yüklenir. Düzgün gerilme dağılımı elde etmek için örneklerin üzerine sert keçe şeritler yerleştirilerek verilen yükün örnek yüzeyine dağılması sağlanır.

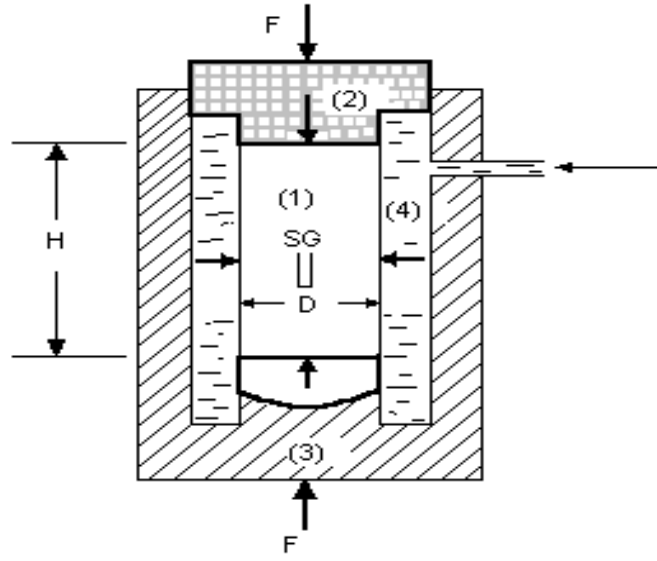
Kayaç düşük deformasyon özelliğine sahipse silindirik yükleme çenelerinin veya sert keçelerin kullanılması $2\alpha = 10^\circ$ koşulunu sağlamayabilir. Bu durumda sayısal

plaka dokunağında aşırı basma gerilmeleri oluşur ve basma dayanımı bölgesel olan aşırı değerler alır.

Makine, örnek üzerine 5 dakika içinde kırılmasını sağlayacak sabit bir gerilme hızıyla veya alternatif olarak , gerilme hızı $0,5 \text{ N/mm}^2.\text{s}$ ile $1,0 \text{ N/mm}^2.\text{s}$ arasında olacak biçimde sürekli olarak uygulanmalıdır.Yükleme hızı, örneğin en az 1-5 dakikada kırılacağı şekilde seçilir. Örneğin çapı en az 50 mm. olmalıdır. L/D oranı mümkün olduğunca küçük olmalıdır. İnce örneklerin elde edilmesi ve hazırlanması oldukça zor olduğundan L/D oranı 1,2 olarak önerilmektedir. Örneğin kalınlığı boyunca düzensizlikler $0,025 \text{ mm}'$ yi geçmemelidir. Örnek yüzeyleri birbirlerine $0,25^\circ$ hata payı ile paralel ve düşey eksene dik olmalıdır. Örnek alt ve üst yüzeyleri $0,25 \text{ mm}$ hassasiyetinde küçük olmalıdır.

Brazilian deneyi kadar önemli bir diğer deneyde 3 eksenli basınç dayanımı deneyidir.Bu deney, silindirik kaya örneklerinin düşey dayanımını yan basıncın işlevi şeklinde belirlemek için yapılmaktadır. İzotropik bir kayacın kayma değiştirgeleri (kohezyon, içsel sürtünme) tek eksenli basma deneyi ile belirlenmemektedir. Bilindiği gibi yer kabuğunda kayalar farklı yönlerdeki basınçlar altında bulunmaktadır. Farklı yönlerden gelen gerilmeler altında bulunan kayaların davranışları ve kırılmaya karşı dayanımları arazi ve laboratuarda 3 eksenli basınç deneyleri ile tespit edilmektedir.

Bir örneğin üç eksenli basma dayanımı ikinci ve üçüncü boyutlarda yan basınç sağlanırken kayacın yenildiği aksenal gerilme düzeyidir. Aynı kaya türünde, farklı yan basınçlarda farklı üç eksenli basma dayanımı değerleri elde edilir. Yan basıncın artması aynı zamanda üç eksenli basma dayanımını artırdığı gibi son dayanımda da fazla birim deformasyonlarla sonuçlanır. Zayıf kayalarda, gerilme-birim deformasyon eğrisinden elde edilen başlangıç teğet modülü, yani basıncın artırılmasıyla belirgin bir şekilde artar. Çok sağlam kayalarda, yanal basıncın artmasıyla dayanım artmasına rağmen genellikle modülüs değerleri yan basıncın değişmesinden çok az etkilenir.



Şekil 2.6 Üç eksenli basınç deneyi (1) silindirik örnek (2) üst tabla (3) alt tabla (4) yağ izolantı

Üç eksenli basma dayanımı deneyleri silindirik örnekler üzerinde yapılır(Şekil 2.6). Örnek çapı 0,1 mm. duyarlılıkta ve en az 54 mm. veya daha büyük olmalıdır. Örneğin çapı kayacın tane yapısına bağlı olmakta ve en iri tane boyutunun 10 katı değerinden küçük olmamalıdır. Örneğin L/D oranı 2-2,5 arasında ve yan yüzeyleri pürüzsüz olmalıdır. Örneklerin deney anındaki nem miktarı basma dayanımı deney sonuçlarına önemli ölçüde etki edebilir. Örnek boyu en az 1,0 mm duyarlılıkta ölçülür.

Örnek hidrolik prese yerleştirilerek önceden belirlenen yan basınç değerine ulaşana kadar düşey yük ve yan basınç aynı oranda birlikte artırılır. Yük ortamı (F) üç ana gerilmenin eşit olacağı şekilde yapılmalıdır. Daha sonra eksensel gerilme σ_1 , selül basıncı radyal basınçla $\sigma_2 = \sigma_3$ sabit kalmak şartıyla örnek kırılana kadar sabit oranda artırılır. Örneğin üzerindeki eksensel yükleme hızı, sabit bir birim deformasyon hızı elde edecek şekilde olmalıdır. Örnek 5-10 dakika içinde yenilecek şekilde yada 0,5-1,0 N/mm².s gerilme hızı ile eksensel yük uygulanır. Yükleme oranındaki değişim %10' dan fazla olmamalıdır. Örneğin alt ve üst yüzeyleri en fazla 0,01 mm ye kadar bir hata ile düzgün olmalı ve örnek eksenine diklik hassasiyeti 50 mm'de 0,05 mm sapmadan küçük olmalıdır. Örneğin yan yüzeyleri pürüzsüz olmalı ve tüm kenar uzunluğu boyunca 0,3 mm sınırı içinde doğrusal olmalıdır.

Örneğin deney anındaki nem miktarı basma dayanımı deney sonuçlarına önemli ölçüde etki edebilir. Örnekler hazırlandıktan sonra deney yapılıncaya kadar 15 gün oda sıcaklığında ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ve normal atmosfer koşullarında tutulmalıdır (Köse ve Kahraman, 1999).

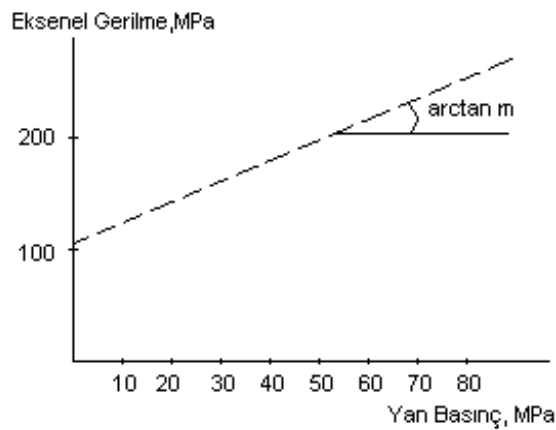
Her yan basınç değeri için en az üç örnek üzerinde deney yapılmalıdır. Fakat yan basınç sayısı dayanım zarfını doğru olarak tanımlamaya yetecek kadar olmalı ve yan basınç değerleri kayanın özelliklerine göre belirlenmelidir.

Üç eksenli basma dayanımı deney verileri ile, kohezyon ve içsel sürtünme açısı iki yöntem kullanılarak hesaplanabilir:

Dayanım zarfı; Farklı örnekler için grup yan basınç değerleri x- ekseninde ve bunlara karşılık gelen ortalama dayanım değerleri y- ekseninde olmak üzere işaretlenir. Dayanım zarfı (Doğru çizgi) bu noktalardan ortalama eğri geçirilerek elde edilir (Şekil 2.7). Doğru eğimi (m) ve doğrunun Y- ekseninde kestiği değer (b) yardımıyla kohezyon ve içsel sürtünme açısı hesaplanır.

$$\phi = \arcsin \frac{m-1}{m+1}$$

$$c = b \cdot \frac{1 - \sin \phi}{2 \cdot \cos \phi}$$



Şekil 2.7 Dayanım zarfı

Mohr zarfı; Aynı yan basınçtaki grup örnek verileri için $\tau - \sigma$ düzleminde mohr daireleri çizilir (Şekil 2.8). Bu dairelere ortak tanjant değerleri çizilir. Bu eğrinin

dikey eksenini kestiği yer kayacın kohezyonunu verir. Zarf eğrisinin eğimi ise kayacın içsel sürtünme açısını verir. Bu dayanım eğrisi bir çok kayaç için doğrusal bir özellik verir ve aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$\tau = \pm(c + \sigma_{\theta} \cdot \tan \phi)$$

$$\tan \phi = \cot 2\theta \quad \text{olduğundan}$$

$$\tau = \pm(c + \sigma_{\theta} \cdot \cot 2\theta)$$

$$\sigma_{\theta} = \text{Yenilme düzlemine etki eden normal gerilme}$$

$$c = \text{Kohezyon}$$

$$\tan \phi = \text{Dayanım eğrisinin eğimi (İçsel sürtünme)}$$

Doğrusal bir mohr zarfı için basma dayanımı ile kohezyon arasındaki ilişki:

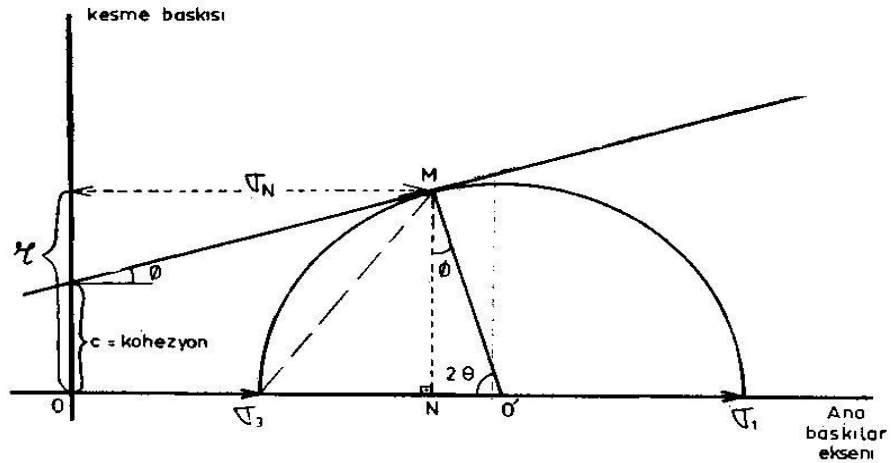
$$\sigma_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos f}{1 - \sin f}$$

Mohr daireleri zarfı bir doğrultuda ise, bu doğrunun yatay eksenle yaptığı açı içsel sürtünme açısı olarak kabul edilir. Zarfın dik eksenle kesişme noktasındaki değer kayacın kohezyonu olarak alınır.

Mohr daireleri zarfı bir doğru değilse; içsel sürtünme açısı değeri, değişik yanal basınçlar için çizilen mohr daireleri ile zarfın kesişme noktalarından mohr dairelerine çizilen teğetlerin yatay eksenle oluşturduğu açıdır. Bu teğetlerin dik eksenle kesişme noktalarından değişik yanal basınçlardaki değerleri elde edilir (Köse ve Kahraman, 1999).

Mohr kırılma zarfı, kayacın kohezyonu ve içsel sürtünme açısı bulunduğundan sonra kayma direnci denklemi;

$$\tau = c + \sigma \cdot \Phi \quad \text{şeklindedir.}$$



Şekil 2.8 Mohr gösterimindeki açılar ve gerilmeler

Kayma direncini veren en iyi yöntem üç eksenli deney olmasına karşın bazı sakıncaları vardır. Bunlar;

- Özel aygıt gereksinimi
- Pahalı bir deney olması
- Sonuçların geç alınmasıdır.

Mohr dairesinden kolayca görüleceği gibi, sadece kayacın basınç dirençlerinin bilinmesiyle Mohr kırılma zarfını analitik olarak tarif etmek mümkündür. Mohr dairelerine çizilen ortak teğet kırılma zarfını tanımlamaktadır (Köse ve Kahraman, 1999).

Yöntem pratik olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- Bu yöntemde, taşın özelliği göz önüne alınmadığından, kırılma zarfı, doğrusal olarak kabul edilmektedir. Oysa kırılma zarfının karakteri tamamen taşın özelliklerine bağlıdır.

- Yöntemin verdiği sonuçlar taşın çekme direncine bağlıdır. Daha önce de belirtildiği gibi kayacın çekme direncini tam olarak saptamak oldukça zordur ve verilen değer kullanılan yöntemle bağlı olarak önemli değişim gösterir.

2.2.1.3 Kayma Dayanımı

Kayma direnci, kesme kuvvetine karşı gösterilen direncin ölçüsü olarak tanımlanır. Kaya mekaniğinde, kaya kütlelerinin kayma dayanımlarının bilinmesine bazı tasarım problemlerinde gerek duyulur. Bunlardan bazıları;

- Yeraltı çalışmalarının duraylılık sorunları
- Kaya şev duraylılık derecelerinin saptanması
- Kayaçlarda oluşturulan yapıların kaymaya karşı duraylılıklarının hesaplanması önemli yer alır.

Kayacın kayma dayanımı şu değişirgelerin toplamıdır;

- Kaya yüzeyindeki harekete karşı yüzeyin sürtünme dayanımı
- Kayaç taneleri arasındaki bağıllığın etkisi
- Kayma yüzeyindeki kohezyon

Genel olarak kayaçların kayma gerilmesi bazı deneylerle saptanır.

2.2.1.3.1 Kayma Düzleminde Normal Gerilmelerin Olmadığı Kayma Dayanımı Deneyleri. Bu tür deneylerde kayma düzlemi boyunca normal gerilme sıfırdır. Buna rağmen direk kayma deneyleri sınırsızdır. Direk katma deneyi dört şekilde uygulanır:

- Tek kayma deneyi
- Çift kayma deneyi
- Yumruk kayma deneyi
- Burulma kayma deneyi

2.2.1.3.2 Kayma Düzleminde Normal Gerilmelerin Oluştığı Kayma Dayanımı Deneyleri. Bu deney iki şekilde yapılır:

- a) Kesme kutusu deneyi
- b) Küpler üzerinde yapılan kayma deneyi

a) Kesme Kutusu Deneyi: Bu deneyde amaç, örneklerin zayıflık düzlemlerinin en yüksek ve kalıcı direk makaslama dayanımını, makaslama düzlemine dik olarak etki eden gerilmelerin işlevi olarak belirlemektir. Bu deneyden elde edilen sonuçlar

genellikle şev duraylılığı problemlerinin denge sınırı çözümlenmesinde ve temellerin tasarımında kullanılır. Deney yapılırken, kaya örneğinin yatımı ve uygulanan yük sistemleri, makaslama düzlemleri ile örnek düzlemi içerisindeki zayıflık düzlemi çakışacak şekilde seçilmelidir.

Zayıflık düzlemi içeren örnekler laboratuara getirilen karotlar arasından özenle seçilmelidir. karotların her iki ucu makaslama yüzey yatımı ile silindir şeklinde ve 8-10 cm. boyunda örnek oluşturulacak şekilde kesilmelidir. Örnekler bundan sonra beton içerisinde kalıplandırılıp, dondurulacaktır. Deney sırasında örneğin kırılma veya bükülmesini önlemek için, beton kalıba alınan örnekler en az 15 günlük bir kür'e bırakılmalıdır (Köse ve Kahraman, 1999).

Deney, hazırlık, pekiştirme ve makaslama aşamalarından oluşur. Örnek, deney için hazır hale getirilir. Normal deplasyon hızı 10 dakika içerisinde 0.05 mm.'den az olduğu zaman pekiştirme aşamasının tamamlandığı kabul edilir ve makaslama aşamasına geçilir. Makaslama aşamasının hedefi, deney hattının en yüksek ve kalıcı direkt makaslama dayanım değerlerini bulmaktır.

b) Küpler Üzerinde Yapılan Kayma Deneyi: Küp şeklinde hazırlanan kaya örneklerinin direkt dayanımı universal basınç deney makinesi, özel aletler veya özel jig (Küp örneklerini saran) yardımıyla bulunur. Küp örneği yatayla 45° 'lik açı yapacak şekilde diyagonal olarak sabit küp kabına yerleştirilir. 45° 'lik jigde, yükleme aletiyle iletilen dikey kuvvet ile kaya örneğinde, kayma kuvveti ve kayma düzlemi örnek yüzeyi boyunca gözlenir.

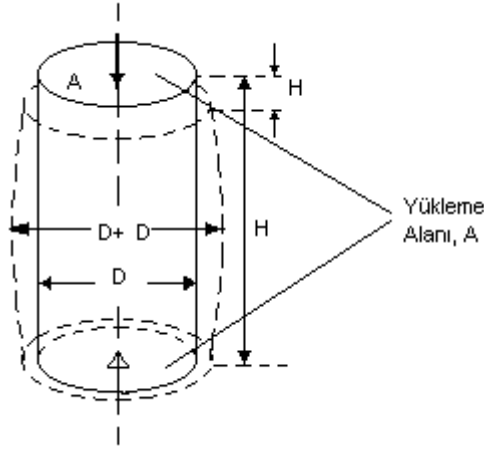
2.2.2 Kayaçların Deformasyon Özellikleri

Çeşitli kazılar sebebiyle, kayaçların fiziksel çevresi içinde bulunduğu gerilme durumları değişir. Yük altında kalan ve gerilme durumlarının değiştiği kayaçalarda çeşitli deformasyonlar oluşur. Bu yönserlik derecesine bağlı olarak iki veya daha fazla elastik sabiti ile açıklanabilir. Bu sabitler kayaç örneklerinin (silindir veya prizma) tek eksenli basma dayanım deneyi ile belirlenebilir. Bazı özel durumlarda burkulma deneyi de yapılabilir. Kaya deformasyonu terimi, kaya örneğinin hacminde ya da şeklinde oluşan değişiklikleri ifade eder. Bu değişiklikler, kayaca yerinde gelen yüklerle ya da tektonik kuvvetlerle olabilir. Üç türlü deformasyondan söz edilebilir (Köse ve Kahraman, 1999).

Bunlar; elastik deformasyon , plastik deformasyon ve viskoz deformasyon.

2.2.2.1 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Deney, doğal su içeriklerini muhafaza eden en az beş adet örnek üzerinde tekrarlanır. Deneyde tam silindir örnekler kullanılır.



Örneğin ortasındaki gerilme durumu

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Deformasyonlar

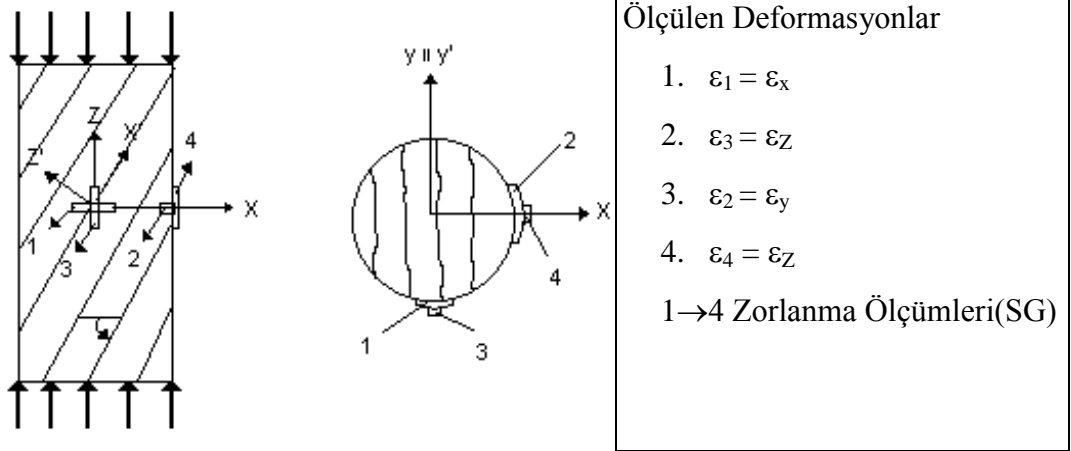
$$\epsilon_{\text{eksenel}} = \frac{\Delta H}{H} \quad \epsilon_{\text{çapsal}} = \frac{\Delta D}{D}$$

Şekil 2.9 Karot üzerinde tek eksenli basınç deneyinin ilkeleri (Köse ve Kahraman, 1999).

H/D oranı en az 2,0 olmalıdır. Bazı durumlarda 2,5-3,0 olabilir. Ancak bu sayede örneğin basınca tabi yüzeylerinde meydana gelen kayma gerilmelerinden örneğin orta kısmını etkilemez ve örneğin büyük bir bölümü tek eksenli gerilme durumunda kalır (Şekil 2.9).

Kayacın deformasyonunu belirlemek için önce, örneğin boyutları ölçülür ve sabit bir deformasyon hızı ile aksenal olarak yüke tabi tutulur. Oluşan deformasyonlar örnek üzerine Şekil 2.10'daki düzene göre yapıştırılan zorlanma ölçerler ile ölçülür.

Şekilde, S61 X yönündeki deformasyonu, S62 Y yönündeki deformasyonu ve S63 ve S64 Z yönündeki deformasyonu ölçer (Köse ve Kahraman, 1999).



Şekil 2.10 Çapraz yönsemez bir kayaç örneği için zorlanma düzeni (Köse ve Kahraman, 1999).

2 ve 4 numaralı zorlanma ölçümleri yönsemez kayaçlar için iptal edilebilir. Fakat çoktüreellikten doğan hataları yok etmek için örnek yüzeyinde çapsal olarak zıt noktalarda ölçümlerin yapılması tavsiye edilmektedir.

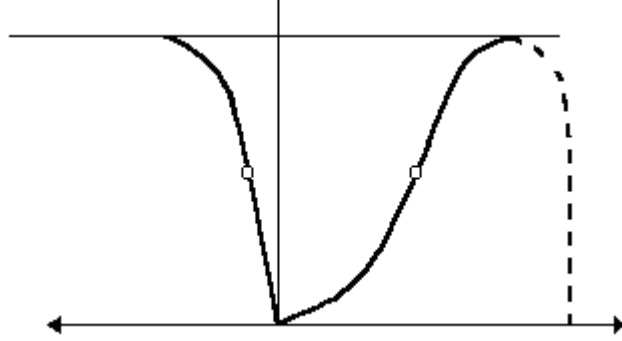
Bütün ölçümler (σ_z , ϵ_x , ϵ_y ve ϵ_z) sürekli gözlenmelidir. 30 saniye aralıklarda en az 10 ölçüm yapılmalıdır. Bir örnek, belli periyotlarda yükleme ve boşaltmaya veya sabit yüke tabi tutularak, kayacın elastik davranışı hakkında daha hassas ve doğru tahmin yapılabilir. Bu sayede, ilk yükleme ve boşaltma için farklı modül ve kayacın zamana bağlı davranışı hakkında farklı durumlar elde edilir. İzotropik bir kayaç üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneyine gerilme-deformasyon eğrisinden young modülü E_{IR} ve poisson oranı ν_{IR} hesaplanabilir.

Ölçümler sonucu, gerilme deformasyon eğrisinin büyük bir bölümünün doğrusal olmadığı durumlarda E_{IR} ve ν_{IR} , gerilme ve deformasyondaki küçük artışlardan hesaplanır.

Önce, ölçülen değerler ile (σ_z , ϵ_x , ϵ_y ve ϵ_z) elastik sabitleri arasında bir eşitlik kurulur. Tek eksenli basınç deneyindeki sınır koşullar için ($\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$) aşağıdaki eşitlikler elde edilir. Örneğin aksenal deformasyonu için,

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad \text{ve} \quad m = \frac{G_2}{E_2}$$

Bu eşitlik Şekil 2.11'de farklı modül oranları n , m ve poisson oranları için grafik olarak gösterilmiştir. İzotropi, paralel ve dik yüklerde oluşan deformasyon oranları E_1 ve E_2 modüllerinin oranına eşittir.



Şekil 2.11 Elastisite modülü ve poisson oranının tek eksenli basma dayanımına göre grafik gösterimi

2.2.2.2 Burkulma Kayma Deneyi

Kayma modülü G_2 yukarıda anlatıldığı şeklin dışında burkulma kayma deneyi ile de bulunabilir.

Burkulma kayma deneyinde, silindir şeklindeki örnek bir buru kolu ile izotropi düzlemine paralel olarak burkulmaya tabi tutulur.

Uygulanan burula orantılı olan ve örnek ekseninden yüzeyine doğru artan bir kayma gerilmesi (τ) oluşur.

$$\tau(r) = \frac{M_t}{I_p} \cdot r \quad I_p = \frac{\pi D^4}{32}$$

Örnek üzerinde oluşan maksimum kayma gerilmesi ($R = \frac{D}{2}$)

$$\tau = \frac{16M_z}{\pi D^3}$$

şeklinde hesaplanabilir.

Kayma gerilmesine bağlı, kayma deformasyonu farklı kesitlerde örnek üzerine yerleştirilen iki zorlanma ölçer sayesinde belirlenebilir.

$$\gamma = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta L} \cdot \pi \cdot D \quad G_2 = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{16 \cdot M_1 \cdot \Delta L}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot \Delta \varepsilon}$$

Bu deney çok özel deney ekipmanı gerektirmesi ve yönsemez yüzeylerinin düşük kayma mukavemeti nedeni gibi dezavantajlara sahiptir (Köse ve Kahraman, 1999).

2.2.2.3 Elastisite Modülü

Genel olarak kayaçların elastisite modülleri kayaç tipi, gözeneklilik, tane büyüklüğü ve su muhtevasından etkilenir. Elastisite modülü tabakalanmaya ve çatlaklara dik olarak ölçüldüğünde, paralel olarak ölçülerden daha büyük değerdedir. Kayaçların elastisite modülünün değişik değerlerde oluşu, kısmen tektürel ve anizotropilerine, kısmen de deney yöntemine bağlıdır (Köse ve Kahraman, 1999).

Eksenel elastisite modülünün (E) hesaplanmasında kullanılan değişik yöntemler aşağıda verilmiştir.

a) Basma dayanımını (σ_u) belirli bir yüzdesine ait gerilme düzeyindeki teğet modülü

b) Gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğruya en yakın olan kısmının ortalama eğimi.

c) Eğri üzerinde sıfır gerilme düzeyi ile basma dayanımının belirli bir yüzdesine ait noktaların birleştirilmesi ile elde edilen kiriş modülü (E) tayin edilir.

2.2.2.4 Poisson Oranı

Poisson oranı (D) değeri, eksenel ve çapsal gerilme birim deformasyon eğrilerinin düşük gerilme düzeyinde doğrusal olmamasından büyük ölçüde etkilenir. Poisson oranı şu eşitlikten bulunur.

$$\nu = - \frac{(\text{Eksenel Eğri Eğimi})}{(\text{Çapsal Eğri Eğimi})} \quad \nu = - \frac{E}{\text{Çapsal Eğri Eğimi}}$$

Buradaki çapsal eğri eğimi yukarıdaki a, b, c şıklarında belirtilen yöntemlerle bulunur.

Poisson oranı, yanal deformasyonun boydaki deformasyona oranıdır. Kayaçlar için Poisson oranı, deformasyonun doğasına göre değişir. Değeri genellikle küçüktür. Yerinde kayaç özelliklerine bağlı olarak elastisite modülü ve poisson oranı değişik

değerler göstermektedir. Kayaçlar türdeş olmayan anizotrop malzemeler olduğundan bu değerler değişik yönlerde farklılıklar gösterir (Köse ve Kahraman, 1999).

2.3 Kayaçların İndeks Özellikleri

Kayaçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi yerüstü ve yeraltı kazılarının tasarımında önemli bir aşamadır. Mekanik özelliklerin (basma dayanımı, çekme ve kayma dayanımı) belirlenmesi oldukça pahalı ve zaman alıcıdır.

Başlangıçta, ekonomik ve jeoteknik sebepler nedeni ile karot alma işinin yapılamadığı durumlarda düzgün olmayan küçük örneklerden faydalanarak kayaçların mühendislik özellikleri hakkında fikir edinmek daha çabuk, basit ve ucuz olan indeks deneyleri ile mümkündür.

2.3.1 Konik Çentik Deneyi

Bu alet kayaçların kazılabilirliklerinin tayini, kayacın dayanım özelliklerinin, hızlı ve çabuk olarak belirlenmesi amacı ile Bretby tarafından geliştirilmiştir.

Konik çentik deneyi, konik şekilli bir ucun kayaca batmasına karşı oluşan direncin ölçülmesi prensibine göre çalışır. Bu alet merkezde sabitlenmiş düz çelik bir yay ile çelik bir çerçeveden oluşur. Yayın bir ucuna koniklik açısı 40° olan Tungsten Karpit uca bağlı bir mikrometre, diğer ucuna ise deney sırasında yaydaki boy değişimini ölçen bir gösterge monte edilmiştir (Köse ve Kahraman, 1999).

Düz bir kayaç plakası, çelik yay ile konik uç arasına yerleştirildikten sonra mikrometrenin vidası kayaç plakası sabitleninceye kadar çevrilir. O andaki mikrometrenin skalasındaki değer P_0 olarak kaydedilir ve gösterge sıfırlanır. Sonra mikrometre, yaydaki sapma 0,635 mm ($\cong 40N$) olana kadar çevrilir. Farklı kayaçlar için uygulanan yük Tablo 2.2'deki gibi ayarlanabilir.

Tablo 2.2 Farklı kayaçlar için konik çentik sapmaları

Kayaç Dayanımı	Yük (N)	Sapma (mm)
Zayıf	12	0,325
Orta	40	0,635
Sağlam (Dayanıklı)	110	1,275

Verniye skalası tekrar okunur ve bu değer P_1 olarak kaydedilir. Daha sonra konik çentik sertlik değeri aşağıdaki gibi hesaplanır (Köse ve Kahraman, 1999).

$$P = P_1 - P_0 \quad (\text{Konik entik Batması})$$

Burada sertlik değeri;

$$CI = \frac{D}{P - D} \quad (D: \text{Yay Sapması, } 0,23; 0,635; 1,27) \quad \text{şeklinde hesaplanır.}$$

NCB konik çentik sertlik değeri ile tek eksenli basınç dayanımı arasında aşağıdaki bağıntı hassas sonuçlar vermektedir.

$$T.E.B.D. = 25 CI - 1,25$$

Bu ilişki çamurtaşı, kil, kömür, kumtaşı, kireçtaşı ve bazı magmatik ve metamorfik kayalar için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Fakat dayanımı yüksek ($>150 \text{ N/mm}^2$) kayalarda bazı kısıtlamalar vardır.

2.3.2 Nokta Yükleme Dayanımı Deneyi

Nokta yükleme dayanımı deneyi hem düzgün silindirik karot örnekleri üzerinde hem de düzensiz şekilli örnekler üzerinde uygulanabilir. Bu deney tek eksenli basma dayanımının tahmini olarak bulunmasına yardımcı olur. Bu yüzden kayaç karakteristiklerinin yaklaşık olarak bulunmasında ve kayaçların sınıflandırılmasında kullanılır (Köse ve Kahraman, 1999).

2.3.2.1 ap Deneyleri

Bu deney için örneğin L/D oranı 1'den büyük olmalıdır. Örnek nokta yükleme aletine yerleştirilir ve aygıtın konik paletleri çap boyu doğrultusunda örneğe değecek şekilde kapatılır. Yükleme yapılan iki nokta arasındaki mesafe ölçülür. Örnek üzerindeki yük devamlı olarak yükseltilecek örneğin 10-60 sn içerisinde kırılması sağlanır ve kırılma anındaki yük kaydedilir.

2.3.2.2 Eksenel Deneyler

Eksenel deney için örneklerin L/D oranı 0,3-1,0 arasında olmalıdır. Uzun örnekler olması durumunda örnek boyunca çap deneyleri yapılarak, eksenel deneyler için

uygun örnekler elde edilebilir. Diğer işlemler çap deneyindeki gibidir. Yönser karot örnekleri olması durumunda ise yükleme doğrultusuna dikkat etmek gerekir.

Düzeltilmemiş nokta yükleme dayanımı, I_s :

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (\text{kN/mm}^2)$$

D =Örnek çapı (mm)

P =Kırılma anındaki yük (kN)

Büyüklik veya çap düzeltme katsayısı, F :

$$F = \left(\frac{D}{A}\right)^{0.45} \quad A = 50 \text{ mm.}$$

Düzeltilmiş nokta yükleme dayanımı indeksi, $I_{s(50)}$:

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

Ortalama $I_{s(50)}$ değerini bulmak için yapılan deney sonuçlarından en yüksek ve en düşük iki değer atılarak geri kalanın ortalaması bulunur.

Basma ve çekme dayanımının hesaplanması: Ortalama olarak basma dayanımı, $I_{s(50)}$ değerinin 20-25 katıdır. Kaba bir değerlendirmeyle $I_{s(50)}$, çekme dayanımının 0,8 katı olarak bulunmuştur.

$$\text{Tek eksenli basma dayanımı} = 24 \cdot I_{s(50)} \quad \text{Tek eksenli çekme dayanımı} = \frac{I_{s(50)}}{0,8}$$

2.3.3 Sertlik

Bir mineralin sertliği o kayaca dıştan gelen bir mekanik etkiye (çizilmeye , bir parçanın içine sokulmasına) karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Yalnızca mineraller için Mohs tarafından sertlik tablosu hazırlanmıştır (Tablo 2.3). Buna göre Bu tablodaki bir mineral kendisinden daha yüksek ölçekte olan mineral tarafından çizilir.

Tablo 2.3 Mohs sertlik tablosu

Sertlik Derecesine Ait Numara (H)	Mineral	Kimyasal Formülü	Özellikleri
1	Talk	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	En yumuşağı tırnakla çizilebilir
2	Jips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Tırnakla çizilebilir
3	Kalsit	$CaCO_3$	Bir bakır para yada toplu iğne ile çizilebilir
4	Fluorit	CaF_2	Çelik ucuyla kolayca çizilebilir
5	Apatit	$Ca_5F(PO_4)_3$	Bir kalsiyum fosfat mineralidir. Çakı ile çizilebilir. Pencere camı ile çizildiğinde H=6.5 sertliğindedir.
6	Feldispat	$KAlSi_3O_8$	İyi kalite çelikten bir bıçak ağzı ile çizilebilir. Çelik ile çizildiğinde H=6.5 sertliğindedir.
7	Kuvars	SiO_2	Çelik , cam ve tüm minerallerce çizilir.
8	Topaz	$Al_2SiO_4(F,OH)_2$	Çok serttir. Değerli bir taştır.
9	Korundum	Al_2O_3	Elmas hariç diğer tüm minerallerden daha serttir. Önemli bir aşındırıcı ve kolay erimeyen endüstri maddesidir
10	Elmas	C	Bilinen en sert cevherdir. Bununla beraber tüm elmaslar aynı sertlikte değildir.

Kaya ve minerallerin sertliklerini ölçmek için üç deney metodu kullanılır; Çentikleme deneyleri , dinamik veya geri tepme deneyleri, kazıma deneyleri.

2.3.4 Schmidt Çekici Değeri

Schmidt sertliği, schmidt çekici ile bulunan bir indeks değeridir. Schmidt çekici silindirik kapalı bir kutu içinde bulunan yay, çekiç ve çekiç kurma düzeneğinden oluşur. Ölçme yapılırken alet gövdesi dik olarak kayaç üzerine bastırılır. Yay ile hareket kazanan çekiç darbeyi kayaca ileten uca çarpar ve geri zıplar. Zıplama değeri indeks değeri olarak saptanır (Tablo 2.4). Alet, hem arazide hem de laboratuarda kullanılabilir. Laboratuar örnekleri 152x76 mm. boyutunda olmalı ve aynı örnekte 20 defa denenmelidir (Köse ve Kahraman, 1999).

Tablo 2.4 Schmidt çekici değerlerine göre kaya sertliği tasviri (ISRM, 1979)

Schmidt Çekici Değeri (Value)	Tasvir Terimi (Descriptive Term)
0-10	Yumuşak (Soft)
10-20	Az Yumuşak (Slightly Soft)
20-40	Az Sert (Slightly Strong)
40-50	Sert (Strong)
50-60	Oldukça Sert (Very Strong)
>60	Çok Sert (Extremely Strong)

2.3.5 Shore Skleroskop Deneyi

Shore sertliği, skleroskop ile bulunan bir indeks değeridir. Belli bir ağırlığa sahip elmas yada sertleştirilmiş metalden yapılmış uca sahip bir çubuk, sabit bir yükseklikten örnek üzerine düşürülür. Yüzeyde küçük bir deformasyon oluşturarak örneğin yapısına göre enerjisini bir kısmını kaybederek zıplar. Deneyi gerçekleştirmek için borunun dibini deney örneğiyle sıkı temas edecek ve örneğin yüzeyiyle dik açı oluşturacak şekilde düşey konuma getirilmelidir. Çekiç, kauçuk pompa kullanılarak belirli bir yüksekliğe getirilir ve düşürülür. Geri zıplama yüksekliği ölçülür. Çekicinin ilk geri zıplamasındaki yükseklik malzemenin sertliğini verir. Bu değer shore sertliği olarak kabul edilir. Kullanılan örneklerin 76x76x50 mm. boyutunda olması ve aynı örnek üzerinde 40 okumanın yapılması gerekir (Köse ve Kahraman, 1999).

Eksenel sapmalardan doğan hataları engellemek için, cihaz üstünde bulunan su terazisi veya şakul kullanılarak düşey konuma getirilmelidir. Skleroskop ile elde edilen en iyi sonuçlar cihazın bir mengene kullanılarak tutturulduğu zaman alınır. Yatay titreşimler, çekicinin serbest düşmesine ve cihazın düşük değerler okumasına yol açtığı için engellenmelidir.

Çentikler çok kısa aralıklarla yapılırsa hatalara yol açabilir. Bu yüzden vuruşlar 5 mm aralıklarla yapılmalı ve her noktaya bir vuruş yapılmalıdır. Darbe okumaları en az 20 değişik noktadan alınmalıdır.

Birçok yazar (Atkinson 1985, Singh 1983, Egretli 1988) shore sertliği ile tek eksenli basma dayanımı arasında aşağıdaki bağıntının var olduğunu belirtmişlerdir.

$$T.E.B.D. = 2,12 S_H - 1,58$$

2.3.6 Kayaçların Şişme Özelliklerinin Tayini

Şişme basıncı indeksi, kayacın mekanik bir performansı olup , su içinde bırakılan kayaca şişme sabit değere gelinceye kadar uygulanan en fazla kuvvetin örnek kesit alanına oranının yüzde olarak ifadesidir.

Şişme tayini yapılacak kayaç örneğinden dik silindir şeklinde deney örneği hazırlanır. Bu örnek çapı, kalınlığının 2,5 katından, kalınlığı ise 15 mm ' den veya örnekteki en büyük mineral tane boyunun 10 katından fazla olacak şekilde ve hacim değişmesi olmayan şartlarda şişme basıncı indeksinin tayinindeki metal halkaya uyacak şekilde olmalı, eksenine göre foliasyon ve tabakalanma eğimi tayin edilmelidir.

Dil silindir şeklindeki örnek çapı kalınlığının 2,5 katından, kalınlığı ise 15 mm'den fazla olacak şekilde olmalıdır. Örnek gözenekli plaka arasına yerleştirilir. Örneğe küçük eksenel kuvvet (10 kN/m^2) uygulanır. Sonra hücre üst gözenekli plakayı kapatacak şekilde su ile doldurulur. Şişme kuvveti zamanın işlevi olarak kaydedilir. Şişme kuvveti sabit bir değere gelinceye kadar kayda devam edilir (Köse ve Kahraman, 1999).

$$\text{Şişme Basıncı İndeksi} = \frac{F}{A}$$

F = Deney boyunca kaydedilen en büyük şişme kuvveti

A = Örnek kesit alanı

2.3.7 Suda Dağılma Dayanımı

Suya dayanıklılık deneyi, su içinde gevşetilip parçalara ayrılmış kayaç parçalarının direncini tayin etmek amacıyla kullanılır. Bu teknik hava şartlarından dolayı açık tip madencilikte ve yayılmalarında kayaç özelliklerinin bozulmasını tespit etmek için en az diğer uygulamalar kadar önemli imkânlar sağlar.

Bu deney sırasında her biri 40-60 gr ağırlığında toplam ağırlığı 450-500 gr gelecek şekilde tüm örneği temsilen 10 tane örnek seçilir. Tamburun kuru ve temiz ağırlığı "A" kaydedilir. Seçilen örnekler tambura yerleştirilir ve 105° C'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Tambur ve örneklerin toplam kuru ağırlığı "B" kaydedilir. Tambur milinin seviyesine kadar akışkanla doldurulur. Deney 10 dakikalık bir periyot için harekete geçirilir. Periyot sonunda tambur kaldırılır ve tertibat, örneklerle birlikte 105°C 'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Bu kurutma sonrasındaki ağırlık "C" kaydedilir. Suya dayanıklılık indeksi, başlangıçtan kuru örneğe doğru % oran olarak hesaplanır (Tablo 2.5).

$$I_d = \frac{W_F - C}{B - C} \cdot 100$$

Burada ;

I_d = Suya dayanıklılık indeksi

B = İşlem başlamadan önce tambur ve fırında kurutulmuş örneğin toplam kütlesi (gr)

W_F = Tambur ve deney sonunda elek üstünde kalan fırında kurutulmuş örneğin deney sonundaki kütleler toplamı (gr)

C = Tambur kütlesi (gr)

Ağırlık bulmada diğer bir yöntem ise, tambur ve tertibatı hariç tutmaktır. Bu durumda örnekleri kuruma tepsisine taşıırken örnek kaybını önlemek gerekir.

Tablo 2.5 Dağılma dayanım sınıflandırması

İndeks Değeri (%)	Dağılma Dayanım Sınıflaması
0 – 30	Çok düşük
30 -60	Düşük
60 – 85	Orta derecede
85 – 95	Orta yüksek
95 -98	Yüksek
98 – 100	Çok yüksek

2.3.8 Kaya Kalite Göstergesi

Karot üzerinde 10 cm'den daha uzun olan karot parçalarının toplamının karot uzunluğuna olan oranına denir. Yüzde olarak ifade edilir. Kayaçların bu değere göre sınıflandırılması Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 Kaya kalite göstergesine göre kaya sınıflandırması

Kaya kalitesi	RQD= K.K.G. (%)
Çok zayıf	0-25
Zayıf	25-50
Orta	50-75
İyi	75-90
Çok iyi	90-100

Pratik tecrübeler çatlak aralığının RQD ile birlikte kayanın niteliği ve onun yükleme ve hafriyata karşı olası uyumu hakkında faydalı bilgiler verebileceğini göstermiştir. Yine de elde edilen rakamlar nitelikçe yol gösterici olarak irdelenmeli, ancak kararların dayanacağı kesin değerler olarak kabul edilmemelidir.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyleerde, İzmir Metrosu 2. Etap Çalışmaları'nın tünellerinden belirli kilometrelerde alınan Çört, Sarımsı Kahverengi Filiş, Silt Taşı, Gri Andezit, Sarımsı Kahverengi Sert Filiş, Kil Taşı, Pembe Andezit ve Grimsi Siyah Filiş örnekleri kullanılmıştır. Bu örneklerden, laboratuarda karot alma makinesiyle karotlar alınmış ve bu karotlar standartlara uygun boyutlarda karot kesme makinesiyle kesilmiş ve parlatılmıştır. Hazırlanan bu örnekler üzerinde aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

- a) Mineral Tane Yoğunluğu
- b) Kaba Yoğunluk
- c) Gözeneklilik ve Boşluk Oranı
- d) Su Emme Yeteneği
- e) Tek Eksenli Basma Dayanımı
- f) Suda Dağılma Dayanımı
- g) Schmidt Sertliği

3.1 Örnek Hazırlama

Kuyulardan alınan büyük boyutta kaya örneklerinin doğal hallerini muhafaza etmek için, örnekler hava geçirmeyecek şekilde sarılıp laboratuarda depolanmıştır. Daha sonra NX (54,7 mm) karotiyerle karot alınmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Karot alma makinesi ve numune alma işlemi

Alınan karotlar kafa kesme makinesi ile düzeltilip deneye uygun şekilde paralel yüzeyler oluşturularak pürüzsüz hale getirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kafa kesme makinesi ve uygulamasından görüntü

3.2 Mineral Tane Yoğunluğunun Belirlenmesi

Piknometre ile mineral tane yoğunluğu deneyinin sonucunda (Şekil 3.3);

Çört'ün $2,70 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,017$,

Sarımsı Kahverengi Filiş'in $2,68 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,015$,

Silt Taşı'nın $2,68 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,003$,

Gri Andezit'in $2,61 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,005$,

Sarımsı Kahverengi Sert Filiş'in $2,71 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,010$,

Kil Taşı'nın $2,51 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,068$,

Pembe Andezit'in $2,65 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,014$,

Grimsi Siyah Sert Filiş'in $2,72 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,006 \text{ gr/cm}^3$,

Grimsi Siyah Filiş'in ise $2,79 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,065$ bulunmuştur (Tablo 3.1).



Şekil 3.3 Deneyleerde kullanılan piknometre

Tablo 3.1 Mineral tane yoğunluğunun hesaplama değerler

Örnek	G_P	G_{NP}	G_{PS}	G_{NPS}	ρ_g
Çört	49,98	69,96	149,53	162,11	2,70
Sarımsı Kahverengi Filiş	49,98	70,05	149,55	162,12	2,68
Silt Taşı	49,96	69,99	149,54	162,09	2,68
Gri Andezit	49,96	69,90	149,53	161,82	2,61
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	49,96	69,95	149,53	162,13	2,71
Kil Taşı	49,95	69,99	149,49	161,54	2,48
Pembe Andezit	49,94	69,96	149,49	161,95	2,65
Sert Grimsi Siyah Filiş	49,95	69,99	149,51	162,19	2,72
Grimsi Siyah Filiş	49,95	69,99	149,51	162,36	2,79

G_P = Piknometrenin boş ağırlığı , G_{NP} = Örnek + Piknometre ağırlığı

G_{NPS} = Örnek + piknometre + saf su ağırlığı G_{PS} = Piknometre + saf su ağırlığı

$$\rho_g = \frac{G_{NP} - G_P}{(G_{PS} + G_{NP}) - G_P - G_{NPS}}$$

3.3 Kaba Yoğunluğun Belirlenmesi

Boy ve çapları ölçülen örneklerin hacimleri hesaplanarak, tabii ağırlıkları ölçülmüştür. Hesaplamalar sonucunda (Tablo 3.2);

Çört'ün kaba yoğunluğu $2,67 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,052$,

Sarımsı Kahverengi Filiş'in $2,37 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,028$,

Silt Taşı'nın $2,57 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,019$,

Gri Andezit'in $2,34 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,087$,

Sarımsı Kahverengi Sert Filiş'in $2,56 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,031$,

Pembe Andezit'in $2,51 \text{ gr/cm}^3 \pm 0,049$,

Sert Grimsi Siyah Filiş'in $2,71 \text{ gr/cm}^3$ yumuşak olanının ise $2,40 \text{ gr/cm}^3$ bulunmuştur.

Tablo 3.2 Kaba yoğunluğun hesaplamasında kullanılan değerler

Örnek Cinsi	Örnek No	Yarı Çap	Boy	Tabii Ağırlık (gr)	Kaba Yoğunluk (gr/cm^3)
		(cm)	(cm)		
Çört	1	2,693	11,050	667,76	2,65
Çört	2	2,690	10,355	651,26	2,77
Çört	3	2,693	11,010	666,16	2,66
Çört	4	2,690	10,780	651,17	2,66
Çört	5	2,693	11,070	666,04	2,64
Sarımsı Kahverengi Filiş	1	2,690	10,960	585,77	2,35
Sarımsı Kahverengi Filiş	2	2,568	10,775	534,99	2,40
Sarımsı Kahverengi Filiş	3	2,665	0,830	567,05	2,35
Silt Taşı	1	2,680	5,550	323,22	2,58
Silt Taşı	2	2,668	5,570	316,40	2,54

Tablo 3.2 Devamı

Silt Taşı	3	2,680	10,925	635,00	2,58
Silt Taşı	4	2,678	10,980	637,27	2,58
Gri Andezit	1	2,693	5,520	302,78	2,41
Gri Andezit	2	2,687	5,550	282,33	2,24
Gri Andezit	3	2,690	10,895	587,43	2,37
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	1	2,673	5,480	322,13	2,62
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	2	2,673	5,320	305,88	2,56
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	3	2,678	5,450	315,25	2,57
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	4	2,690	5,450	315,19	2,54
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	5	2,685	5,350	305,81	2,52
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	6	2,683	5,430	315,50	2,57
SarımsıKahverengi Sert Filiş	7	2,668	5,280	299,66	2,54
Pembe Andezit	1	2,690	5,530	308,89	2,46
Pembe Andezit	2	2,685	5,495	318,98	2,56
Pembe Andezit	3	2,685	5,470	307,20	2,48
Pembe Andezit	4	2,690	5,500	319,21	2,55
Pembe Andezit	5	2,680	5.500	307,31	2,48

3.4 Gözeneklilik ve Doluluk Oranının Belirlenmesi

Deneyle sonuçunda, ortalama gözeneklilik ve doluluk oranları şu şekilde bulunmuştur (Tablo 3.3).

Çört; n = %0,94	Doluluk Oranı = %99,06
Sarımsı Kahverengi Filiş; n = %11,78	Doluluk Oranı = %88,22
Silt Taşı; n = %4,02	Doluluk Oranı = %95,98
Gri Andezit; n = %10,22	Doluluk Oranı = %89,78
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş; n = %5,61	Doluluk Oranı = %94,39
Kil Taşı; n = %35,63	Doluluk Oranı = %64,37
Pembe Andezit; n = %5,32	Doluluk Oranı = %94,68

Tablo 3.3 Gözeneklilik ve doluluk oranı değerleri

Örnek Cinsi	ORT.ÖZ. AĞ.	ORT. BHA	Gözeneklilik n (%)	Doluluk Oranı (%)
Çört	2,70	2,67	0,94	99,06
Sarımsı Kahverengi Filiş	2,68	2,37	11,78	88,22
Silt Taşı	2,68	2,57	4,02	95,98
Gri Andezit	2,61	2,34	10,22	89,78
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	2,71	2,56	5,61	94,39
Kil Taşı	2,51	1,62	35,63	64,37
Pembe Andezit	2,65	2,51	5,32	94,68

$$n = \frac{B.H.A}{Ö.A.} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{Doluluk Oranı} = 100 - n$$

3.5 Su Emme Yeteneğinin Belirlenmesi

Deneyle sonuçunda, ortalama su emme oranları şu şekilde bulunmuştur (Tablo 3.4).

$$W_A = \frac{W_w}{W_k} \cdot 100 \quad W_A = \text{Su Emme (\%)}$$

W_w = Emilen su miktarı (gr) W_k = Örnek kuru ağırlığı (gr)

Tablo 3.4 Su emme oranı hesaplanmasında kullanılan değerler

Örnek No	Örnek Cinsi	Doygun Ağırlık (gr)	Kuru Ağırlık (gr)	Su Emme Oranı (%)	Ort. Su Emme Oranı (%)
1	Çört	190,09	189,56	0,28	0,54
2	Çört	200,35	199,40	0,47	0,54
3	Çört	95,05	94,50	0,58	0,54
4	Çört	102,75	102,12	0,61	0,54
5	Çört	170,70	169,49	0,71	0,54
1	Sarımsı Kahverengi Filiş	138,54	127,72	7,81	6,14
2	Sarımsı Kahverengi Filiş	279,31	260,33	6,80	6,14
3	Sarımsı Kahverengi Filiş	314,94	295,79	6,08	6,14
4	Sarımsı Kahverengi Filiş	183,01	172,75	5,61	6,14
5	Sarımsı Kahverengi Filiş	154,19	147,53	4,32	6,14
6	Sarımsı Kahverengi Filiş	622,65	583,71	6,25	6,14
1	Silt Taşı	239,40	233,52	2,46	2,17
2	Silt Taşı	87,91	85,34	2,92	2,17
3	Silt Taşı	91,14	89,91	1,35	2,17
4	Silt Taşı	121,60	118,78	2,32	2,17
5	Silt Taşı	645,93	634,36	1,79	2,17
1	Gri Andezit	149,17	143,76	3,63	3,51
2	Gri Andezit	111,24	107,52	3,34	3,51
3	Gri Andezit	130,01	124,60	4,16	3,51

Tablo 3.4 Devamı

4	Gri Andezit	155,12	148,66	4,16	3,51
5	Gri Andezit	84,90	82,99	2,25	3,51
1	Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	266,71	261,22	2,06	2,48
2	Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	178,11	172,74	3,01	2,48
3	Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	169,42	165,07	2,57	2,48
4	Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	198,97	194,48	2,26	2,48
5	Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	109,94	107,20	2,49	2,48
1	Pembe Andezit	222,21	215,29	3,11	2,37
2	Pembe Andezit	321,42	315,81	1,75	2,37
3	Pembe Andezit	235,29	230,68	1,96	2,37
4	Pembe Andezit	304,90	300,64	1,40	2,37
5	Pembe Andezit	234,41	225,88	3,64	2,37

3.6 Tek Eksenli Basma Dayanımı Deneyi

Tek eksenli basma dayanımı; cihazın örnek üzerine uyguladığı kırılma yükünün, yükün uygulandığı örnek yüzey alanına oranı şeklinde hesaplanmıştır (Şekil 3.4). Hesaplamalar sonucunda(Tablo 3.5);

Çörtün ortalama tek eksenli basma dayanımı	188 kg/cm ²
Sarımsı Kahverengi Filişin ortalama tek eksenli basma dayanımı	89,98 kg/cm ²
Silt Taşının ortalama tek eksenli basma dayanımı	133,26 kg/cm ²
Sarımsı Kahverengi Sert Filişin ortalama tek eksenli basma dayanımı	115,68 kg/cm ²
Kil Taşının ortalama tek eksenli basma dayanımı	41,06 kg/cm ²
Pembe Andezitin ortalama tek eksenli basma dayanımı	290,49 kg/cm ²
Gri Andezitin ortalama tek eksenli basma dayanımı	145,93 kg/cm ²



Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan 300 ton kapasiteli pres

Tablo 3.5 Tek eksenli basınç dayanımının hesaplanmasında kullanılan değerler

Örnek Cinsi	Örnek No	Alan	Kırılma Yüğü(kg)	T.E.B.D. (kg/cm ²)	Boy	Çap
Çört	B3	23,039	21100	338,261	10,760	5,415
Çört	B15	22,784	1920	31,297	10,900	5,385
Çört	B6	22,700	11540	189,163	11,000	5,375
Çört	B13	22,700	8620	141,298	10,895	5,375
Çört	B14	22,742	12500	204,328	10,795	5,380
Çört	B16	22,827	13910	226,113	10,775	5,390
Sarımsı Kahverengi Filiş	B8	22,573	3220	53,226	10,720	5,360
Sarımsı Kahverengi Filiş	B4	22,742	15700	256,636	10,975	5,380
Sarımsı Kahverengi Filiş	B5	22,742	8310	135,837	10,880	5,380
Sarımsı Kahverengi Filiş	B12	22,363	2230	37,382	10,785	5,335
Sarımsı Kahverengi Filiş	B7	22,321	2180	36,647	10,720	5,330
Sarımsı Kahverengi Filiş	B9	22,658	3390	55,724	10,720	5,370
Sarımsı Kahverengi Filiş	B28	22,238	3220	54,436	10,720	5,320
Silt Taşı	B34	22,531	3230	53,541	11,020	5,355
Silt Taşı	B25	22,615	12920	212,970	10,930	5,365

Tablo 3.5 Devamı

Gri Andezit	AO13	22,827	3630	59,007	10,975	5,390
Gri Andezit	AO14	22,742	9860	161,174	10,850	5,380
Gri Andezit	AO10	22,996	15070	242,263	10,990	5,410
Gri Andezit	AO15	23,081	6720	107,433	10,685	5,420
Gri Andezit	AO12	22,784	7020	114,431	10,850	5,385
Gri Andezit	AO16	22,784	9750	158,933	10,895	5,385
Gri Andezit	AO11	22,827	8540	138,822	10,880	5,390
Gri Andezit	AO7	22,742	9000	147,116	10,855	5,380
Gri Andezit	AO9	22,827	11330	184,174	10,875	5,390
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B36	22,531	4290	71,112	10,860	5,355
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B44	22,700	1350	22,129	10,995	5,375
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B47	22,573	5220	86,286	10,655	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B35	22,531	10320	171,067	10,980	5,355
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B39	22,573	9730	160,836	10,905	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B45	22,615	12350	203,574	10,885	5,365
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B41	22,573	8880	146,786	10,860	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B48	22,615	6070	100,056	10,755	5,365
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B38	22,658	6090	100,106	10,880	5,370
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B43	22,573	8030	132,735	10,660	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B37	22,573	5030	83,146	11,000	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B46	22,658	9000	147,940	10,855	5,370
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B40	22,573	5500	90,915	11,135	5,360
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	B42	22,615	6240	102,859	11,020	5,365
Kil Taşı	B19	22,405	2380	39,785	10,260	5,340

Tablo 3.5 Devamı

Kil Taşı	B23	22,405	3770	63,021	10,825	5,340
Kil Taşı	B20	22,447	3460	57,676	10,850	5,345
Kil Taşı	B24	23,338	240	3,774	10,845	5,450
Pembe Andezit	AO1	22,700	7350	120,481	10,620	5,375
Pembe Andezit	AO2	22,827	14840	241,231	10,760	5,390
Pembe Andezit	AO3	22,615	16730	275,773	10,960	5,365
Pembe Andezit	AO4	22,700	24980	409,470	10,930	5,375
Pembe Andezit	AO5	22,827	25310	411,425	10,890	5,390
Pembe Andezit	AO6	22,742	17410	284,588	10,765	5,380

3.7 Suda Dağılıma Dayanımı

Suya dayanıklılık deneyi, su içinde gevşetilip parçalara ayrılmış kayaç parçalarının direncini tayin etmek amacıyla kullanılır. Bu teknik hava şartlarından dolayı açık tip madencilikte ve yayılmalarında kayaç özelliklerinin bozulmasını tespit etmek için en az diğer uygulamalar kadar önemli imkânlar sağlar.

Bu deney sırasında her biri 40-60 gr ağırlığında toplam ağırlığı 450-500 gr gelecek şekilde tüm örneği temsilen 10 tane örnek seçilir. Tamburun kuru ve temiz ağırlığı "A" kaydedilir. Seçilen örnekler tambura yerleştirilir ve 105° C'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Tambur ve örneklerin toplam kuru ağırlığı "B" kaydedilir. Tambur milinin seviyesine kadar akışkanla doldurulur. Deney 10 dakikalık bir periyot için harekete geçirilir. Periyot sonunda tambur kaldırılır ve tertibat, örneklerle birlikte 105°C 'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Bu kurutma sonrasındaki ağırlık "C" kaydedilir. Suya dayanıklılık indeksi, başlangıçtan kuru örneğe doğru % oran olarak hesaplanır.

Temiz ve kuru olan tamburun ağırlığı ile örnek+tambur ağırlığı ölçüldükten sonra tamburlar cihaza takılarak cihaz 10 dakika döndürülür (Şekil 3.5). Bu işlem sonucunda etüvde kurutulan tambur ve örneğin ağırlığı tekrar ölçülür. İşlem ikinci bir sefer tekrar yapılarak bulunan değerler ile suya dayanıklılık indeksi hesaplanır.

$$I_d = \frac{W_F - C}{B - C} \cdot 100 \quad I_{d-1} = \frac{B - D}{A - D} \cdot 100 (\%) \quad I_{d-2} = \frac{C - D}{A - D} \cdot 100 (\%)$$

Burada ;

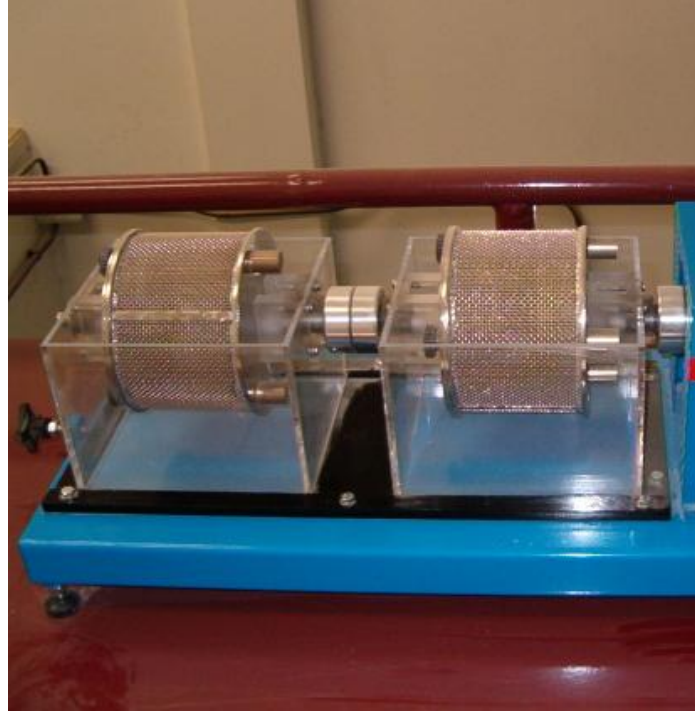
I_d = Suya dayanıklılık indeksi, B = İşlem başlamadan önce tambur ve fırında kurutulmuş örneğin toplam kütlesi (gr)

W_F = Tambur ve deney sonunda elek üstünde kalan fırında kurutulmuş örneğin deney sonundaki kütleler toplamı (gr) C = Tambur kütlesi (gr)

Ağırlık bulmada diğer bir yöntem ise, tambur ve tertibatı hariç tutmaktır. Bu durumda örnekleri kuruma tepsisine taşıırken örnek kaybını önlemek gerekir (Tablo 3.6).

Tablo 3.6 Suda dağılma dayanımının hesaplanması ve değerler

Örnek Cinsi	Tambur + Örnek Ağırlığı	Tambur + Örnek Ağ.(1.çev.)	Tambur + Örnek Ağ. (2. çev.)	Tambur Ağırlığı	$I_{dl} = \frac{(B-D)}{(A-D)} * 100$	$I_{dl} = \frac{(C-D)}{(A-D)} * 100$
Çört	2142,82	2138,66	2137,38	1627,01	99,19	98,95
Sarımsı Kahverengi Filiş	2426,73	2410,17	2389,29	2059,60	95,49	89,80
Silt taşı	2237,24	2224,05	2218,64	1633,40	97,82	96,92
Gri Andezit	1998,55	1992,00	1988,69	1627,01	98,24	97,35
Sarımsı Kahverengi Sert Filiş	2692,00	2688,93	2685,31	2089,71	99,49	98,89
Kil taşı	2041,14	1724,85	1659,09	1633,40	22,43	6,30
Pembe Andezit	2584,00	2582,30	2581,57	2089,71	99,66	99,51
Grimsi Siyah Filiş (Sert)	2355,27	2346,91	2342,85	2089,71	96,85	95,32
Grimsi Siyah Filiş (Yumuşak)	2440,58	2184,12	2152,82	2059,60	32,68	24,47



Şekil 3.5 Suya dayanıklılık deneyinde kullanılan tambur ve tekne

3.8 Schmidt Çekici Değerlerinin Belirlenmesi

Schmidt sertliği, schmidt çekici ile bulunan bir indeks değeridir. Schmidt çekici silindirik kapalı bir kutu içinde bulunan yay, çekiç ve çekiç kurma düzeneğinden oluşur. Ölçme yapılırken alet gövdesi dik olarak kayaç üzerine bastırılır (Şekil 3.6). Yay ile hareket kazanan çekiç darbeyi kayaca ileten uca çarpar ve geri zıplar. Zıplama değeri indeks değeri olarak saptanır. Alet, hem arazide hem de laboratuarda kullanılabilir. Laboratuar örnekleri 152x76 mm. boyutunda olmalı ve aynı örnekte 20 defa denenmelidir. Yapılan ölçümlerde;

Çörtün ortalama Schmidt sertliği 44,825,

Sarı Kahverengi Filişin 23,53,

Silt Taşının 48,40,

Gri Andezitin 33,12,

Gri-Kahverengi Sert Filişin 53,60 ,

Kil Taşının 34,25,

Sert Grafit Şistin 24,95,

Yumuşak Grafit Şistin 23,22 ölçülmüştür. Fakat Altındağ formasyonunda bulunan kil içeren kayaç tiplerinde, suya olan ilgilerinden dolayı arazide yapılan ölçümlerde sağlıklı sonuç alınamamıştır (Tablo 3.7).

Tablo 3.7 Schmidt değerleri

Jeolojik Birim	Kayaç Tipi	Ortalama Schmidt Sertliği
Yamanlar Volkaniti	Gri Andezit	33,12
Altındağ Formasyonu	Kil Taşı	34,25
	Çamurtaşı (Çört)	44,83
	Silttaşı	48,40
Bornova Karmaşığı	Sarımsı-Kahverengi Sert Filiş	53,60
	Sarımsı Kahverengi Filiş	23,53
	Grimsi Siyah Sert Filiş	24,95
	Grimsi Siyah Yumuşak Filiş	23,22



Şekil 3.6 Schmidt çekici

3.9 Disk Makaslama İndeksi Deneyi

Bu deney; standartlara uygun şekilde örnek hazırlanamayan ve özellikle zayıf, kırıklı ve içerdiği sık aralıklı süreksizlikler nedeniyle dilimler halinde ayrılabilen kayalardan hazırlanmış disk şeklindeki örneklerin disk makaslama dayanım indeksi (Disk Makaslama İndeksi, DMİ)'nin tayin edilmesi ve DMİ değerinden tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılır.

Kaya dayanımı, özellikle tek eksenli sıkışma dayanımı, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde ve değişik türde kaya mühendisliği tasarımlarında önemli bir değişirgedir. Dayanımın tayini için standartların veya önerilmiş yöntemlerin önerdiği boyutlarda silindirik örneklerin hazırlanması gerekmektedir. Ancak kayaların sık aralıklı tabakalanma, lamina, şistozite yüzeyi vb. gibi süreksizliklerle bölünmüş olması halinde, dayanım deneyleri ve hatta nokta yükü dayanım indeksi deneyi için bile uygun boyutlarda örnek hazırlanamamaktadır.

Yukarıda belirtilen örnek hazırlamayla ilgili güçlük ve sınırlamaları giderebilecek ve daha küçük örneklerin kullanılacağı indeks deneyler her zaman ilgi çekici olmuştur. Bu amaçla, Hollanda'nın Delft Üniversitesi'nde yapılan bir düzenekle DMİ deneyi ilk kez gündeme gelmiştir (van der Schrier,1988). Ancak ince disk şeklindeki örneklerin kullanıldığı bu araştırmada, az sayıda kaya türü üzerinde çalışılmış ve deneyde örnek boyut etkisi ile DMİ'nin kullanım alanları dikkate alınmamıştır.

Çalışmalar sonucunda, diğer indeks deneylerle karşılaştırıldığında, tek eksenli sıkışma dayanımının DMİ'dan daha az bir hata payıyla dolaylı olarak belirlenebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca bu deneyde boyut düzeltme faktörleri ve kaya malzemesinin dayanıma göre sınıflandırılmasında DMİ'nin alternatif bir değişirge olabileceği de önerilmiştir.

3.9.1 Örnek Hazırlama

Laboratuarda kaya bloklarından karot alma makinesiyle veya doğrudan sondajlardan alınmış karotlardan kalınlığı 5 ile 15 mm arasında ve çapları da tercihen 42 mm (BX)'den az olmayacak şekilde disk örnekler hazırlanır.

Örneklerin alt ve üst yüzeylerinin mümkün olduğunca birbirlerine paralel ve yan yüzeylerinin çikintılardan arındırılmış olmasına dikkat edilmelidir. Gerekliyse,

aşındırma diski kullanılarak yüzeyler düzlenmeli ve birbirlerine paralel hale getirilmelidir.

Örneğin üst yüzeyi ile disk makaslama bloğu arasında herhangi bir plaka konmamalıdır. Örneklerin çapları (D) ve kalınlıkları (t) birbirine dik iki yönde ve 0,1 mm duyarlılıkla ölçülerek, bu değerlerin ortalamaları çap ve kalınlık olarak deney formuna kaydedilir.

Örnekler; ya doğal su içeriklerinde, ya da havada kurutularak deneye tabi tutulmalıdır. Su içeriğinin korunması açısından, örnekler 30 günden fazla bekletilmemelidir. Deneye tabi tutulacak örneklerin sayısı pratik gereksinimlere bağlı olarak belirlenebilir. Ancak tercihen en az beş örnek kullanılmalıdır.

3.9.2 Deneyin Yapılması

(a) Öncelikle nokta yükleme aletinin konik başlıkları sökülür (Şekil 3.7). Örnek, nokta yükleme aletine monte edilmiş olan disk makaslama düzeneğinin alt tablası ile sabitleme plakalarının arasında ortalanarak yerleştirilir. Daha sonra metal kelepçeler örneğe temas ettirildikten sonra vidalar sıkıştırılıp örnek sabitlenir.



Şekil 3.7 Yükleme başlığı, düzenek ve kırılmış örnek

(b) 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.

(c) Deneyin geçerli olabilmesi için, yükleme sonucunda örneğin düzeneğin yükleme başlığının kenarlarına paralel şekilde ve düzgün biçimde üç parçaya ayrılması gerekir (Şekil 3.8). Deneyin bu şekilde sonuçlanması halinde, yenilme anında herhangi bir D çapında ve t kalınlığındaki örneğe uygulanan kuvvet (FtD) yük göstergesinden okunarak kaydedilir. Eğer örnek, yukarıda belirtilen şekilde bir yenilmeye maruz kalmak yerine, paralel kırıklar gelişmeksizin düzensiz bir yenilme gösterirse deney iptal edilir.



Şekil 3.8 Kırılan düzenli ve düzensiz örnekler

Laboratuarda örnekler üzerinde yapılan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Çörtün Ortalama DMİ (Tablo 3.8)	9,54 N/mm ² ±3.70
Sarımsı Kahverengi Filişin Ortalama DMİ (Tablo 3.9)	5,15 N/mm ² ±3.15
Silt Taşının Ortalama DMİ (Tablo 3.10)	9,69 N/mm ² ±5.34
Gri Andezitin Ortalama DMİ (Tablo 3.11)	7,89 N/mm ² ±3.43
Sarımsı Kahverengi Sert Filişin Ortalama DMİ (Tablo 3.12)	11,80 N/mm ² ±7.32
Kil Taşının Ortalama DMİ (Tablo 3.13)	2,55 N/mm ² ±0.75
Pembe Andezitin Ortalama DMİ (Tablo 3.14)	12,57 N/mm ² ±6.50
Sert Grimsi Siyah Ortalama DMİ (Tablo 3.15)	7,36 N/mm ² ±3.48

Tablo 3.8 Çörtün disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
A12	53,90	9,20	14,04	15,64	79,76
A14	53,90	10,60	12,56	11,92	60,80
A52	53,90	9,30	5,40	5,94	30,28
A53	53,90	10,50	8,30	7,97	40,63
A54	53,90	10,35	10,83	10,56	53,85
A55	53,90	9,80	3,83	3,97	20,24
A56	54,00	9,60	5,45	5,77	29,41
A57	54,15	10,00	10,66	10,73	54,75
A58	54,15	10,00	11,52	11,60	59,17
A61	53,95	10,90	7,51	6,90	35,20
A63	53,95	9,80	13,45	13,93	71,04
			Ortalama	9,54	48,65
			Standart Sapma	3,70	18,85

Tablo 3.9 Sarımsı kahverengi filişin disk makaslama indeksi değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
A2	53,65	9,15	2,03	2,29	11,68
A5	53,40	10,80	4,41	4,15	21,16
A6	53,55	9,55	3,36	3,62	18,44
A15	53,75	10,00	8,19	8,33	42,49
A16	53,90	8,90	4,86	5,61	28,63

Tablo 3.9 Devamı

A18	53,85	9,70	6,63	6,97	35,53
A21	53,70	9,40	4,99	5,45	27,81
A22	53,80	9,60	13,33	14,19	72,36
A23	53,80	8,80	6,82	8,01	40,84
A24	53,70	9,65	10,36	10,99	56,03
A25	54,00	10,20	5,28	5,22	26,61
A27	53,80	9,55	2,89	3,09	15,78
A28	53,90	9,30	3,49	3,83	19,56
A36	53,15	10,55	5,40	5,25	26,78
A37	52,00	9,50	5,24	5,92	30,18
A38	53,30	9,80	1,69	1,78	9,08
A39	53,10	9,70	2,08	2,22	11,34
A40	53,55	10,05	2,05	2,09	10,64
A42	53,75	9,40	4,14	4,52	23,04
A50	53,40	10,00	2,71	2,78	14,17
A128	53,20	10,10	1,85	1,89	9,63
			Ortalama	5,15	26,28
			Standart Sapma	3,18	16,20

Tablo 3.10 Silt taşının disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
A89	53,70	10,30	7,71	7,60	38,77
A91	53,90	10,80	5,69	5,29	26,96
A94	53,60	10,40	14,32	14,00	71,38
A95	53,55	11,15	20,36	18,42	93,96
A96	53,70	9,80	19,17	19,98	101,92
A97	53,90	9,75	14,43	15,05	76,75

Tablo 3.10 Devamı

A98	53,65	9,30	4,71	5,22	26,60
A99	53,65	9,65	4,97	5,27	26,90
A103	53,65	10,70	8,08	7,64	38,97
A104	53,55	9,80	20,64	21,60	110,16
A105	53,75	10,90	5,91	5,45	27,82
A106	53,70	9,40	6,72	7,34	37,45
A107	53,70	9,30	4,78	5,28	26,94
A109	53,60	9,80	5,97	6,24	31,83
A110	53,65	9,45	4,71	5,12	26,13
A111	53,65	10,65	14,14	13,44	68,56
A112	53,60	9,60	6,57	7,03	35,85
A113	53,50	9,20	9,13	10,28	52,40
A114	53,60	10,55	7,60	7,31	37,27
A120	53,60	8,90	4,00	4,66	23,74
A121	53,60	9,80	10,75	11,24	57,32
			Ortalama	9,69	49,41
			Standart Sapma	5,34	27,21

Tablo 3.11 Gri andezitin disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
AP32	53,95	9,80	4,92	5,09	25,97
AP33	53,95	9,30	7,93	8,71	44,44
AP34	54,00	7,70	5,44	7,38	37,63
AP35	53,90	10,90	8,26	7,60	38,76
AP36	53,90	9,90	11,75	12,05	61,46
AP37	53,90	11,10	10,79	9,72	49,59
AP38	54,10	9,80	11,81	12,19	62,16

Tablo 3.11 Devami

AP39	54,10	9,90	5,64	5,75	29,32
AP41	54,00	9,90	6,99	7,14	36,44
AP42	54,00	10,40	8,44	8,17	41,65
AP43	54,00	10,30	5,94	5,81	29,61
AP44	54,00	10,40	6,21	6,00	30,62
AP45	54,00	9,80	6,81	7,04	35,91
AP46	54,00	11,70	5,81	4,92	25,09
AP47	54,00	9,60	5,40	5,72	29,16
AP48	54,00	12,00	12,22	10,06	51,31
AP49	54,00	10,60	7,02	6,65	33,91
AP50	54,00	10,90	5,81	5,33	27,20
AP51	54,00	9,85	21,31	21,92	111,78
AP52	54,00	9,65	4,44	4,67	23,84
AP53	53,80	10,55	6,32	6,05	30,85
AP54	53,85	10,40	4,66	4,52	23,06
AP55	53,90	10,00	7,59	7,70	39,25
AP56	53,90	10,10	11,70	11,73	59,80
AP57	53,80	10,65	7,12	6,74	34,36
AP58	54,00	10,05	6,85	6,88	35,11
AP59	54,00	10,60	8,40	7,95	40,55
AP60	54,00	10,05	8,63	8,67	44,24
AP61	54,00	10,80	7,28	6,75	34,41
			Ortalama	7,89	40,26
			Standart Sapma	3,43	17,48

Tablo 3.12 Sarımsı kahverengi sert filişin disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
A126	53,40	9,60	6,42	6,91	35,22
A127	53,80	9,35	4,25	4,66	23,77
A128	53,60	9,80	17,57	18,36	93,65
A129	53,65	10,40	9,13	8,91	45,44
A130	53,70	9,60	7,64	8,15	41,56
A133	53,75	8,80	9,01	10,59	54,03
A134	53,85	9,80	10,75	11,16	56,92
A135	53,90	9,60	6,51	6,91	35,25
A136	53,70	9,45	28,81	31,30	159,61
A137	53,65	10,20	3,81	3,80	19,39
A139	53,60	9,50	6,88	7,44	37,96
A140	54,05	10,20	15,15	14,97	76,32
A141	53,60	10,30	7,68	7,59	38,69
A143	53,60	10,10	25,43	25,70	131,06
A145	53,70	10,10	14,46	14,57	74,30
A146	53,80	9,70	10,25	10,78	55,00
A148	53,65	9,20	17,06	19,13	97,54
A149	53,60	10,60	6,86	6,56	33,48
A150	53,55	9,15	5,91	6,68	34,09
			Ortalama	11,80	60,17
			Standart Sapma	7,32	37,35

Tablo 3.13 Kil taşının disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
A66	53,00	9,40	3,40	3,78	19,27
A68	52,90	11,00	1,94	1,81	9,25
A69	53,40	9,80	1,54	1,61	8,23
A72	53,20	10,35	2,61	2,59	13,20
A73	53,00	9,80	3,67	3,89	19,85
A75	52,90	10,10	2,13	2,19	11,18
A76	53,00	11,25	3,64	3,30	16,85
A77	53,00	10,00	2,01	2,09	10,64
A82	53,15	11,20	2,84	2,58	13,16
A83	53,00	11,30	2,19	1,98	10,08
A84	53,00	9,60	2,42	2,63	13,41
A85	53,20	10,85	2,24	2,11	10,74
			Ortalama	2,55	12,99
			Standart Sapma	0,75	3,82

Tablo 3.14 Pembe andezitin disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
AP1	53,80	8,80	7,08	8,31	42,36
AP2	53,90	10,00	1,71	1,73	8,82
AP3	53,90	9,00	14,38	16,41	83,71
AP4	53,80	9,90	10,04	10,32	52,65
AP5	53,80	9,55	7,56	8,09	41,28

Tablo 3.14 Devami

AP6	53,80	10,85	17,38	16,12	82,20
AP7	53,80	9,10	4,82	5,45	27,79
AP8	53,85	10,25	10,41	10,28	52,42
AP9	53,90	10,80	29,53	27,45	140,00
AP10	53,90	9,40	5,92	6,44	32,82
AP11	53,90	8,60	4,57	5,49	27,98
AP12	53,90	9,60	12,64	13,41	68,41
AP13	54,00	10,35	9,71	9,44	48,16
AP14	53,85	10,75	12,48	11,68	59,57
AP15	53,90	10,10	11,82	11,85	60,44
AP16	53,90	10,60	16,68	15,84	80,78
AP17	53,85	10,80	21,11	19,65	100,23
AP18	53,85	8,60	9,97	11,99	61,15
AP19	53,85	8,85	9,91	11,54	58,86
AP21	53,85	10,40	9,39	9,12	46,52
AP22	54,00	9,80	26,10	27,00	137,72
AP23	53,85	10,15	13,94	13,92	70,98
AP24	53,90	10,80	26,73	24,85	126,73
AP25	53,85	9,65	15,19	16,05	81,88
AP26	53,85	10,70	5,44	5,12	26,10
AP27	53,85	9,05	7,78	8,83	45,05
AP28	53,90	10,50	22,02	21,13	107,76
AP29	54,00	9,00	6,50	7,40	37,75
AP30	54,25	10,00	6,64	6,67	34,03
AP31	54,20	9,40	14,44	15,58	79,45
			Ortalama	12,57	64,12
			Standart Sapma	6,50	33,16

Tablo 3.15 Sert grimsi siyah filiş'in disk makaslama indeks değerleri

Örnek No.	Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Yenilme Yüğü (kN)	Disk Makaslama İndeksi (N/mm ²)	Tahmini Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (N/mm ²)
BP1	53,70	9,75	3,14	3,29	16,79
BP2	53,70	10,45	6,30	6,11	31,14
BP3	53,85	8,85	1,69	1,97	10,04
BP4	53,80	10,00	2,56	2,60	13,27
BP5	53,70	10,75	3,11	2,92	14,90
BP6	53,80	10,00	10,01	10,18	51,90
BP7	53,65	8,20	2,39	3,04	15,52
BP8	53,65	10,40	5,70	5,56	28,36
BP9	53,80	8,10	5,42	6,98	35,60
BP10	53,80	9,90	2,02	2,07	10,57
BP11	53,40	9,90	9,90	10,29	52,46
BP12	53,50	11,20	11,20	10,10	51,51
BP13	53,75	9,25	9,25	10,28	52,43
BP14	53,80	9,85	9,85	10,19	51,95
BP15	53,90	10,00	10,00	10,14	51,71
BP16	53,45	9,40	9,40	10,34	52,73
BP17	53,70	10,20	10,20	10,17	51,85
BP18	53,60	9,45	9,45	10,29	52,49
BP19	53,80	9,30	9,30	10,26	52,33
BP20	53,90	8,40	8,40	10,37	52,87
			Ortalama	7,36	37,52
			Standart Sapma	3,48	17,76

3.10 DMİ Deneyinin Rmr Sınıflama Sisteminde Kullanılması Ve Şehir İçi Sığ Tünellerde Uygulaması

Kaya mühendisliğinde, kaya kütlelerinin davranışını ve karakterizasyonunu belirlemek, yapılacak tasarımın omurgasını oluşturur. Bu tip çalışmalarda kaya malzemesinin dayanımı önemli bir değişkendir. Kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesinde tek eksenli basınç dayanımı (TEBD.) en çok kullanılan deneydir. Bazı durumlarda TEBD, Nokta Yükleme İndeksi (NYİ) ve Shmidt Çekici (SH) gibi deneylerle dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Ancak, bu dolaylı metotlar kaya tipine bağlı olarak geniş aralıklarda sonuçlar verebilmektedir. Son dönemde, bu tip olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla Disk Makaslama İndeksi(DMİ) deneyi geliştirilmiştir. Özellikle laminalı-foliasyonlu, anizotrop, düşük RQD ve dayanıma sahip kayalarda oldukça olumlu sonuçlar veren DMİ'nin uygulamaları laboratuvar çapta kalmıştır. Bu çalışma kapsamında, gerek DMİ'nin kolaylıklarından faydalanmak gerekse diğer olumsuzlukları elimine edebilmek ve DMİ'nin sanayide kullanımını arttırabilmek için, zayıf-çok zayıf, laminalı, foliasyonlu, şistoziteli bir kaya kütlesi olan ve ISRM ve ASTM tarafından önerilen deneyler için hemen hemen standart örnek hazırlamanın imkânsız olduğu Bornova Karmaşığında, eklemli kaya olarak sayılabilecek Yamanlar Volkanitleri ve Altındağ Formasyonlarında açılan İzmir Metrosu 2. Aşama İnşaatı tünellerinde, kaya kütlelerinin davranışını belirlemek için, DMİ direk değiştirge olarak RMR hesaplamasında kullanılmıştır.

3.10.1 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri

Kaya mühendisleri, kaya kütlelerinin davranışlarını ve karakterizasyonlarını belirleyebilmek için çok uzun araştırmalar yapmışlardır. Bu amaçla birçok kaya kütle sınıflama sistemi geliştirilmiştir.. Özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve tecrübe gerektirmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2002). 1946 yılından bugüne kadar geliştirilen kaya kütle sınıflama sistemlerinden bazıları Tablo 3.16'da verilmektedir (Palmström, 2000). Günümüzde en çok kullanılan sistemler RMR (Bieniawski, 1989), Q (Barton, 2002), GSI (Hoek ve ark., 1998) ve RMi (Palmström, 1996) olarak sayılabilir.

Tablo 3.16 Kaya sınıflama sistemleri (Palmström, 2000)

Sınıflama Sistemi	Biçim ve Tip*	Ana Uygulama	Referans
Terzaghi kaya yükleme sınıflama sistemi	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Terzaghi, 1946
Lauffer'in duruş zamanı sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	Tünel tasarımında	Lauffer H., 1958
Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Yetersiz (aşırı gerilmiş) zeminlerin tasarımında ve	Rabcewicz, Müller and
Kaya mekaniği amaçları için kaya	Tanımlayıcı biçim	Kaya mekaniğine veri girişlerinde	Patching and Coates,
Kaya ve zeminler için ortak sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	Bağlantı için parçacıklar ve bloklara dayalı	Deer et al., 1969
Kaya kalite göstergesi (RQD)	Sayısal biçim Yaygın tip	Sondaj loglarına dayalı; diğer sınıflama sistemlerinde kullanılır	Deer et al., 1967
Boyut- dayanım sınıflaması	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Kaya dayanımına ve blok çapına dayalı, çoğunlukla	Franklin, 1975
Kaya yapısı puanı (RSR)	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Wickham et al., 1972
Kaya kütle sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünel, maden ve tesislerin tasarımında	Bieniawski, 1973
Q-sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yer altı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Barton et al., 1974
Biçim sınıflaması	Tanımlayıcı biçim	İletişimde kullanılır	Maluta and Holzer,
Ortak kaya sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	İletişimde kullanılır	Williamson, 1980
Basit jeoteknik sınıflama (BGD)	Tanımlayıcı biçim	Yaygın uygulamalar	ISRM, 1981
Jeolojik dayanım indeksi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yer altı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Hoek, 1994
Kaya kütle indeks sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Genel karakterizasyon, tahkimatın tasarımı, TMB gelişimi	Palmström, 1995

*Sözlük:

— Tanımlayıcı biçim: Düzene veri girişi esasen açıklamalar üstüne kuruludur;

— Sayısal biçim: Sayısal değerlendirmeleri veri girişi değişkenlerinin karakterlerine göre verilmiştir;

— Davranışsal biçim: Veri girişi tüneldeki kaya kütle davranışı üzerine kuruludur;

— Yaygın Tip: Düzen yaygın karakter olarak hizmet vermek için çalışır;

— Fonksiyonel tip: Düzen özel uygulamalar için kuruludur (Örnek olarak kaya tahkimatı).

Kaya tünel niteliği indeksi (Q sistemi) Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin tahkimat sistemleri seçimine yönelik bölümü Grimstad ve Barton tarafından yeniden düzenlenmiştir.

Burada, RQD, boyu 100 mm den daha uzun karot örneklerinin toplamının karot uzunluğuna oranının yüzdesi, J_n , eklem takımı sayısı, J_r , eklem setleri ve dolgulu süreksizliklerin pürüzlülük sayısı, J_a eklem setleri veya dolgulu süreksizlikler için kil dolgusu veya ayrışma derecesi için sayı, J_w , süreksizliklerdeki dolguların yıkanmasına neden olabilecek su geliri ve su basıncına ilişkin sayı, SRF (gerilme azaltma faktörü) ise sert kayalarda sıkışan ve şişen kayalar için dayanım gerilme oranı ve faylanma için kullanılan puandır (Barton, 2002).

Hoek vd. (1995) tarafından düzenlenmiş Tünelcilik Niteliği İndeksi, Q' önerilmiştir. Burada standart Q indeksinde gerilme azaltma faktörü ve eklem su azaltma faktörü 1 kabul edilmiş olup aşağıdaki eşitlik ile gösterilmiştir.

Daha sonra Q sistemi, mühendislik parametreleri ve yeni bir parametre Q_c arasında ilişki geliştirilecek şekilde Barton (2002) tarafından yeniden tanımlanmıştır:

Burada, σ_{ci} , kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımıdır (N/mm^2). Portal bölgelerinde eklem takımı sayısı (J_n) 2 ile çarpılarak Q değerleri elde edilmiştir.

Kaya kütle puanı olan RMR sınıflama sistemi Bieniawski tarafından 1972-1973 yılları arasında geliştirilmiştir. Sistem 1989'ta yeni değişik uygulamalardan derlenen bilgilere göre değişikliğe uğramıştır (Bieniawski, 1989). Bu düzenleme ile RMR sisteminde kullanılan bazı parametrelerin daha doğru tanımlanması için grafikler önerilmiştir.. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) kavramı, Hoek ve Brown (1980, 1988) tarafından önerilen yenilme ölçütünde girdi parametreleri olan malzeme sabitlerinin belirlenmesinde RMR yerine kullanılması için önerilmiştir (Hoek et al. 1995). Özellikle eklemli kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde kullanılacak kütle sabitlerinin doğrudan deneylerle belirlenmesi zor olduğu için, RMR'ın çok zayıf

kaya kütleleri için kullanımı bulunmamaktaydı. GSI'nin belirlenmesi, kaya kütlelerinin yapısı ve süreksizlik yüzeylerinin kalitesine bağlı oluşturulan abak kullanımı ile yapılmaktadır (Hoek, 1999).

Kaya kütle İndeksi (RMi), kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık olarak tahmin edilmesinde kullanılan hacimsel parametrelerden oluşan bir indekstir. Bu indeks Palmström(1996) tarafından geliştirilmiştir. Kaya kütlelerinin dayanımının ve deformasyon modülünün tahmini ve Hoek-Brown dayanım parametrelerinin hesaplanmasında, eklemli kaya kütlelerinden masif kaya kütlelerine kadar uygulanabilmektedir. İndeks, eklemli kaya kütleleri için kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı azalma faktörü olarak aşağıda verilen eşitlik ile kullanılmaktadır.

$$RMi = \sigma_{ci} \cdot JP$$

Burada JP, eklem parametreleri olup ampirik olarak blok hacmi (V_b , m^3) ile eklem koşulu faktörü (j_C) ile ilişkilidir. Eklem koşul faktörü (j_C), eklem pürüzlülüğü (j_R), eklem ayrışması (j_A) ve eklem uzunluğu (sürekliliği) (j_L) yardımıyla hesaplanmaktadır. j_R ve j_A Q sistemindeki J_r ve J_a ile aynı tanımlamaya sahiptir. Genellikle masif kayalar için RMi ile σ_{ci} arasında aşağıda verilen eşitlik bulunmaktadır.

$$RMi = 0,5 \sigma_{ci}$$

Kaya kütlelerinin davranışını ve karakterizasyonunu belirlemede kaya malzemesinin dayanımı önemli bir değiştergedir. Bu amaçla TEBD en çok kullanılan değiştergedir. Bazı durumlarda DMİ ve SH dolaylı yoldan TEBD belirlemede kullanılabilir. Ancak, TEBD için ISRM ve ASTM tarafından önerildiği şekilde örnek hazırlamak zaman alıcı, çok zor özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda, laminalı-foliasyonlu kayalarda hemen hemen imkansız olabilmektedir. Bunun yanında NYİ ile TEBD arasındaki dönüşüm katsayısının 10 ile 50 arasında değişkenlik göstermesi ve karşılaşılan zorluklar (Bieniawski, 1975; Bieniawski, 1989; Aksoy, 2008b; Aksoy, 2009a; Aksoy, 2009b; Das, 1985; Vallejo, ve ark., 1989; Smith, 1997; Broch ve Franklin, 1972; O'Rourke, 1988; Singh ve Sing, 1993; Stacey, 1980; Ulusay ve Gokceoglu, 1997);ve diğer alternatiflerden birisi olan SH ile TEBD tahmininde bozuşma ve kullanılan kompakt enerji nedeniyle yüksek hata

oranına sahip olması (Sonmez ve Tunusluoglu, 2008), diğer alternatiflerine göre dönüşüm faktörü 2,9 ile 7,6 arasında değişen ve özellikle anizotrop, zayıf-çok zayıf kayalarda kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesinde büyük kolaylık sağlayan DMİ'ni ön plana çıkarmıştır. DMİ ile TEBD arasındaki ortalama dönüşüm katsayısı 5,1 olarak verilmektedir (Ulusay ve ark., 2001). TEBD'nın belirlenmesinde karşılaşılan zorluklar, NYİ ve SH deneylerinin yetersizliği ve DMİ deneyinin gelişimi, güçlü yanları, uygulamacıya sağladığı kolaylıklar detaylı olarak literatürde bulunabilir (Sherier, 1988; Sonmez ve Tunusluoglu, 2008; Ulusay ve ark., 2001; Sulukcu ve Ulusay, 2001; Aksoy, 2009a; Aksoy, 2009b; Aksoy, 2009c; Ulusay ve Sonmez, 2002; ISRM, 2007, Unal ve ark. 1992).

Bu çalışmada, İzmir metrosu 2. Aşama İnşaatı kapsamında açılan 64 m² kesitli Tip 1 hat tünelleri incelenmiştir. Tünelin açıldığı birimlere ait bilgiler ileriki bölümlerde detaylıca verilmektedir. Kaya kütlelerinin davranışının belirlenmesinde ve alınacak önlemlerin belirlenmesinde RMR (Bieniawski, 1989) kullanılmıştır. Ancak, özellikle laminalı, foliasyonlu zayıf-çok zayıf kaya kütlesi olan Bornova Karmaşığının davranışının belirlenmesinde yukarıda bahsedilen zorluklar nedeniyle kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesinde TEBD-DMİ-SH yerine Ulusay ve ark. (2001) tarafından önerilen DMİ kullanılmış ve RMR hesaplamasında DMİ oranı direk değiştirge olarak kullanılmıştır. Ayrıca, elde edilen veriler ışığında kaya kütlelerinin dayanımının dolaylı olarak belirlenmesinde Kalamaras ve Bieniawski (1995) tarafından önerilen eşitlikte σ_{ci} yerine TEBD=5,1 DMİ değerleri kullanılmıştır. Elde edilen RMR değerlerinden üretilen kaya kütlelerine ait değiştirgeler sayısal modellemede veri girişi değiştirgesi olarak kullanılmıştır.

3.10.2 Tünel Hattının Coğrafik Durumu

İzmir Metro Projesinin birinci adımla entegre olacak ikinci adımına ait hattın tünel inşası, İzmir Körfezinin güneybatısında, Üçyol ile Fahrettin Altay arasındaki hattı takip eder. Tüneldeki kazı sekiz servis kuyusu üzerinden devam etmektedir. Tünel hattındaki baskın kaya birimleri Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, Yamanlar volkanikleri olarak bilinen, düşük ve orta derece arasında başkalaşım gösteren andezitler; Altındağ oluşumu olarak bilinen, aglomera-kumtaşı-silttaşı-kiltaşı dizisi; sarımsı kahverengi filiş ve Bornova karmaşığı (Aksoy ve ark., 2006; Onargan ve

Aksoy, 2006) olarak bilinen grimsi siyah filistir. Bu kaya tipleri için litolojik birimlerin jeomekaniksel özellikleri tünel yatağı kenarındaki sondaj çalışmalarından elde edilmiştir. Bölgeden alınan örnekler üzerindeki deney sonuçları ve konum bilgisi Tablo 3.17’de sunulmaktadır.

Tablo 3.17 Kayaçların jeomekaniksel özellikleri (Aksoy, 2009a)

Değiştirge	Qa	Kb ₁	Kb ₂	Kb ₃	Kb ₄
DMİ _c , (N/mm ²)	-	5,15	7,36	12,57	9,80
UCS, (N/mm ²)	-	-	-	64,22	49,18
Kohezyon, c (N/mm ²)	0,13	0,18	0,32	4,20	2,40
Su miktarı, w (%)	18	16	15	4	6
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	12	16	19	63	51
Poisson Oranı; ν	0,35	0,3	0,27	0,26	0,24
Doğal birim hacim ağırlığı, γ (kg/m ³)	2000	2630	2680	2780	2720

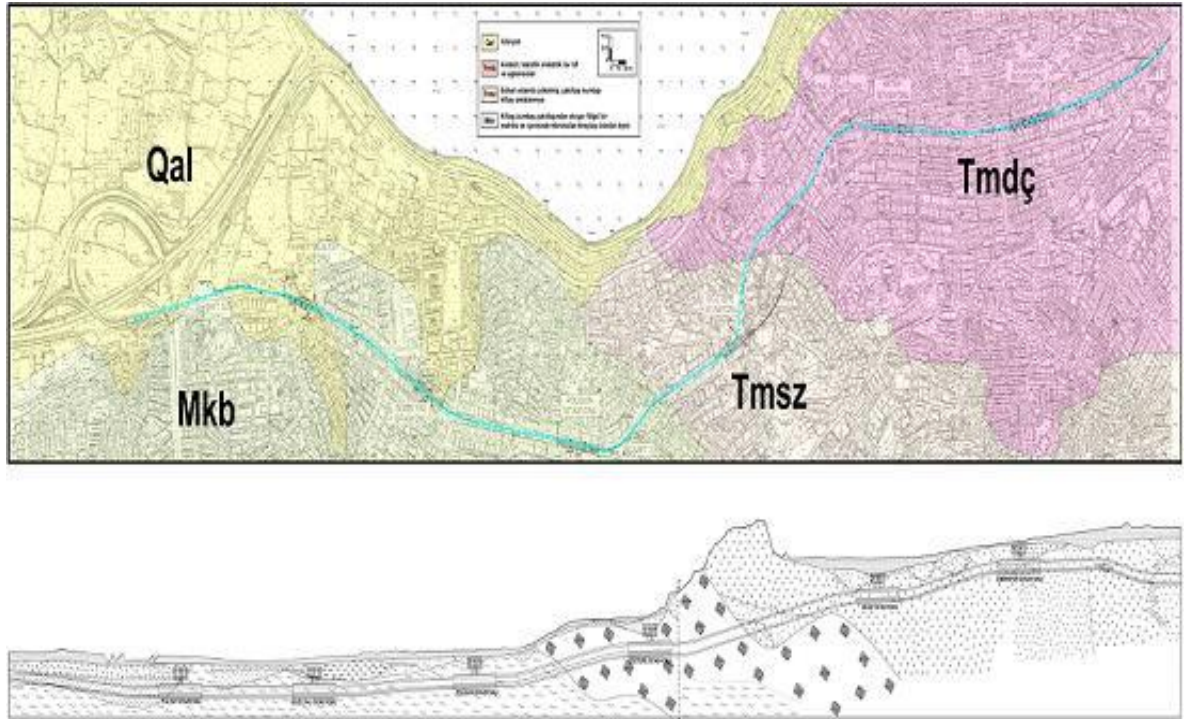
Qa: Alüvyon

Kb₁: Tanelenmiş, şiddetle bozunmaya uğramış Bornova karmaşığı (sarı- kahve)

Kb₂: Kötü bir şekilde bozunmaya uğramış Bornova Karmaşığı (gri siyah)

Kb₃: Az-orta derecede yıpranmış andezit (Yamanlar Volkaniti)

Kb₄: Aglomera-kumtaşı-çamurtaşı-silttaşı sıralaması(Altındağ Formasyonu)



Şekil 3.9 İzmir metrosu 2. aşama inşaatı baskın kaya türleri

3.10.3 Kaya Kütle Davranışının RMR ile Belirlenmesi

Kaya mühendisliğinde, kaya kütlelerinin davranışı yapılacak tasarımlar açısından çok önemlidir (Bieniawski, 1989; Aksoy, 2008a). Kaya kütle sınıflama sistemleri, kaya kütlelerinin davranışının ve karakterizasyonunun belirlenmesinde ön tasarım aşamasında kullanılan yöntemlerdir. RMR bu sistemler içerisinde en popüler olanlardan bir tanesidir. Ancak, RMR zayıf-çok zayıf kayaların sınıflamasında bazı sınırlamalara sahiptir (Aksoy, 2008a; Unal ve ark. 1992; Unal, 1996; Unal ve Ozkan, 1990; Sefarim ve Pereira, 1983; Unal ve ark. 1997a; Unal ve ark., 1997b; Ulusay ve Sonmez, 2002). RMR'ın bu çalışma ile ilgili en önemli sınırlamaları kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesi ve kaya kütlelerinin sınıf aralıklarıdır. Kaya malzemesinin dayanımı belli başlı bileşenlerden ve temel RMR değişirgelerinden birisidir. Bu değişirgenin hesaplanması için tek eksenli basınç direnci ve nokta yük dayanımı önerilmektedir. Alternatif olarak, laminalar ve damarlanmalar gösteren kaya kütleleri için tek eksenli basınç direncinin ve nokta yük dayanımının değerlendirilmesi zordur. Bu durumlar için DMİ süreci daha çok tercih edilir (ISRM, 2007; Ulusay ve ark.; 2001). Ne yazık ki, zayıf bir matrikste bloklar içeren,

karmaşık kaya kütlelerinin sınıflandırılması için RMR süreci yetersiz kalmaktadır (Aksoy, 2008a; Ulusay ve Sonmez, 2002; Unal ve Ozkan, 1990; Unal ve ark. 1992). Buna karşın, farklı dirençte iki malzeme taşıyan çalışma sahalarında, RMR sistemi dışında kalan sınıflandırma sistemleri de sorun çıkarmaktadır.

RMR sistemi için bir diğer kısıt, sınıf aralıklarının belirlenmesidir. Kil içeren ve zayıf kayalar için, özellikle RMR<40 ve RMR ile M-RMR arasında fark edilir sapmaların olduğu kaya kütleleri için daha dar bir aralık belirlemek uygundur (Ulusay, 1991; Unal ve ark., 1992; Ulusay ve Sonmez, 2002; Aksoy, 2008a).

Bu çalışma kapsamında RMR'ın hesap planlamasında kaya malzemesinin dayanım değiştirgesi belirleme aşamasında yukarıda bahsedilen zorlukları ve imkansızlıkları ortadan kaldırabilmek için TEBD, NYİ ve SH yerine Ulusay ve ark. (2001) tarafından önerilen DMİ değerlendirmesi kullanılmıştır. DMİ'nin belirlenmesinde ise ISRM (2007) tarafından önerilen yöntem ve eşitlik kullanılmıştır.

RMR ile ilgili çalışmalar sonucu özellikle zayıf-çok zayıf laminalı-foliasyonlu Bornova Karmaşığı gibi ve Yamanlar Volkanitleri-Altındağ Formasyonu gibi eklemlili sayılabilecek kayalarda DMİ kullanılarak kaya kütle puanlamaları belirlenmiştir. Bu amaçla güzergah boyunca tünel aynalarından alınan örnekler üzerinde 2317 DMİ deneyi yapılmıştır. Bu veriler ışığında elde edilen veriler Tablo 3.18'de verilmektedir (Aksoy, 2009c).

Kaya kütlelerine ait değiştirgeler aşağıdaki eşitliklerden elde edilmiştir. Kaya kütleleri dayanımının belirlenmesinde kullanılan kaya malzemesinin dayanımının dolaylı olarak hesaplanmasında DMİc kullanılmıştır.

$$\sigma_{CMASS} = \sigma_{CI} e^{\frac{RMR-100}{24}} \quad (\text{Kalamaras ve Bieniawski, 1995})$$

$$\sigma_{CI} = 5,1 \text{ DMİ}_c$$

$$E_{mass} = 0,1 \left(\frac{RMR}{10} \right)^3 \quad (\text{Read ve ark., 1999})$$

Burada, σ_{cmass} kaya kütlelerinin dayanımı (N/mm^2), σ_{ci} kaya malzemesinin TEBD'i (N/mm^2), DMİ Disk Makaslama İndeksi (N/mm^2) ve E_{mass} kaya kütlelerinin elastisite modülü (kN/mm^2)

Tablo 3.18 Tünelin jeolojik bilgileri ve DMİ sonuçları (Aksoy, 2009c)

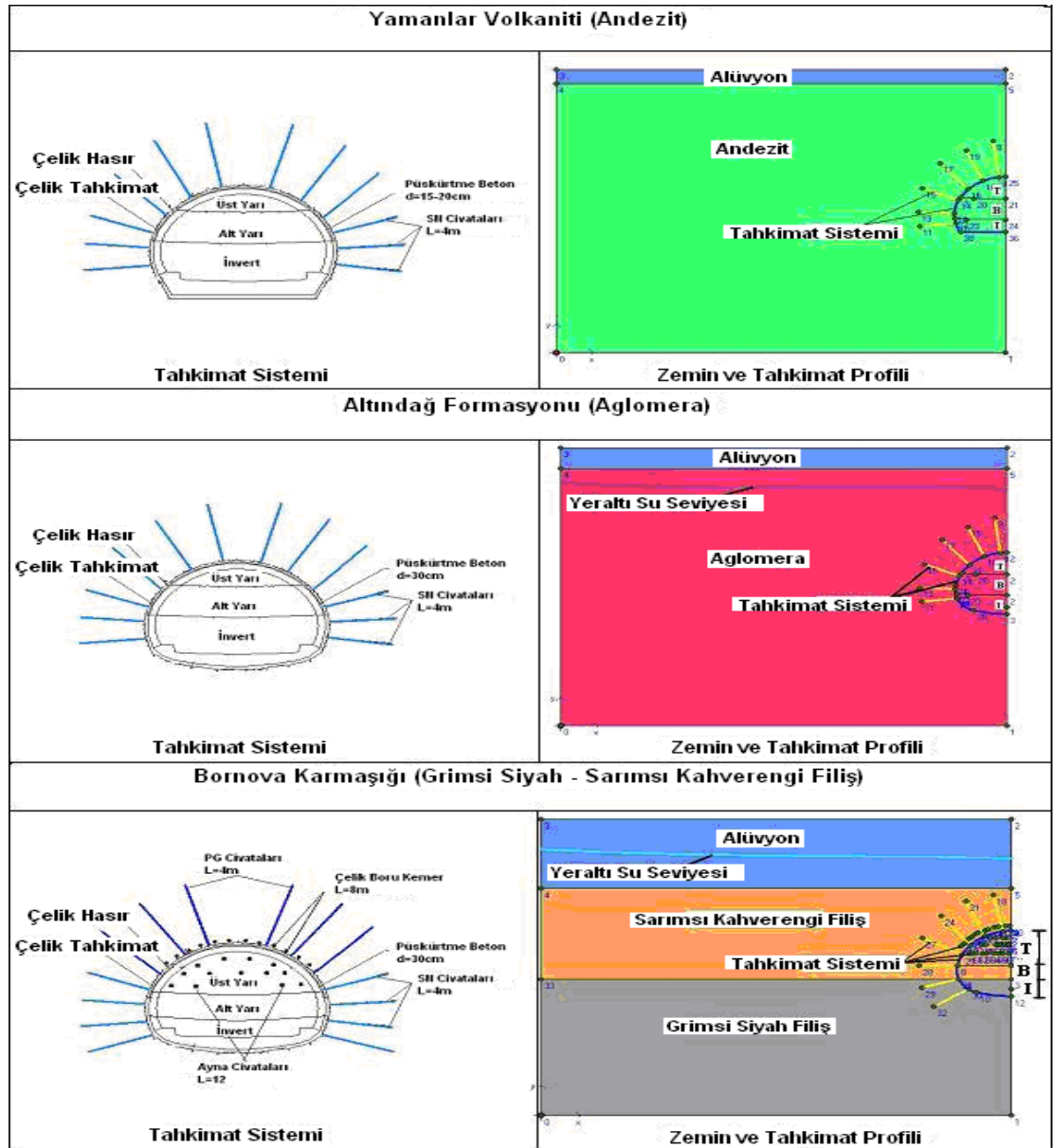
Jeolojik Birim	Kayaç Tipi	DMİ (MPa)	Litolojik Birim Hatırlatmaları
Yamanlar Volkaniti	Andezit	12,5(+6,50)	Yamanlar Volkaniti Az-orta derecede yıpranmış andezit, yer yer masif, girişime uğramamış, UCS: 35-92 MPa, RQD: % 40-70
Altındağ Formasyonu	Aglomera	11,8(+7,32)	Altındağ Formasyonu Aglomera-kumtaşı-çamurtaşı-silttaşı sıralaması, girişime uğramamış, yer yer ağır şekilde yıpranmış, UCS: 27-65 MPa, RQD: % 40-80
	Kumtaşı	7,89(+3,43)	
	Çamurtaşı	2,55(+0,75)	
	Silttaşı	9,69(+5,34)	
Bornova Karmaşığı	Sarı Kahverengi Filiş	5,15(+3,18)	Bornova Karmaşığı Tünel aynasının üstünde: Bornova Karmaşığı, Parçalanmış, ağır şekilde yıpranmış, yapraklanmış, tabakalanmış, kil dolgulu, yer altı suyu ile çok zayıf, sarı kahverengi filiş UCS: NA, RQD: 0-10 Tünel aynasının alt ve kemer kazısında: Bornova Karmaşığı, zayıf bozunmaya uğramış, yapraklanmış, tabakalanmış, şistoziteye uğramış, yer altı suyu ile çok zayıf, gri siyah filiş, UCS: NA, ROD: 0-15
	Gri Siyah Filiş	7,36(+3,48)	

*NA: Uygun Değer Mevcut Değil

3.10.4 Tünel Güzergahında Yapılan Jeoteknik Çalışmalar

Tünel güzergahında yapılan jeolojik çalışmaların yanısıra projelendirme aşamasında 45 adet (toplam 1526,32 m) (ITU, 1993) ve inşaat esnasında 15 adet (283,5 m) (Aksoy ve ark., 2006; Ege Zemin Sondaj, 2006) jeoteknik amaçlı sondaj yapılmıştır. Tünellerin açılmaya başlamasıyla birlikte her ilerlemede tünel aynalarının jeolojik kesiti alınmıştır. Bunun yanında, Pressiyometre ölçümleri, piezometre ölçümleri, inklonometre ölçümleri, rot ekstansometre ölçümleri, tünel içi konverjans ölçümleri ve yeryüzü oturma ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada sayısal modelleme ile karşılaştırma yapabilmek için tünel içi konverjans ölçümleri ve yeryüzü oturma ölçüm değerleri kullanılmıştır. Tünel güzergahının büyük bölümünde yer altı suyu bulunduğu ve bunun tünele etkisi olduğu için yer altı su seviyesi sayısal modellere entegre edilmiştir. Sayısal modeller hem yer altı suyunun bulunduğu yerlerdeki ölçümlerle hem de yer altı suyunun bulunmadığı konumlardaki ölçümlerle kalibre edilmiştir.

Sayısal modellemede, sonlu elemanlar metodu ile çözümlene yapan PLAXIS 3D Tunnel 2,00 versiyonu kullanılmıştır. Sayısal modellemede arazide uygulanan kazı ve tahkimat aşamaları adım adım modele entegre edilmiştir. Şekil 3.10'da her üç kaya yapısında da kullanılan tünel tahkimat sistemleri ve RMR hesaplamasında DMİ'nin kullanılması sonucu elde edilen kaya kütlelerine ait değiştirgelerin kullanıldığı modellerin genel görünümü verilmektedir.

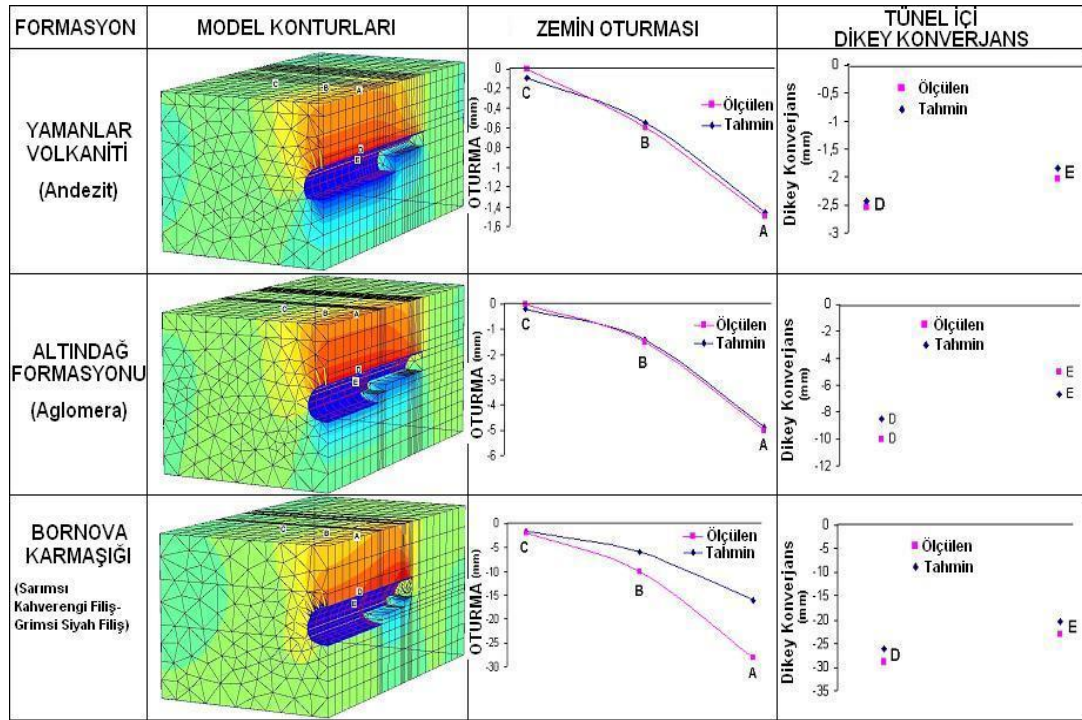


Şekil 3.10 Sayısal modellerin ve tahkimat sistemlerinin genel görünümü

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kaya kütlelerinin davranışı ve karakterizasyonunun belirlenmesinde kullanılan kaya kütlesi sınıflama yöntemleri içerisinde en popüler olan yöntemlerden birisi olan RMR'ın hesaplaması aşamasında, hem zaman zaman zayıf kaldığı zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinin sınıflamasında DMİ'nin kullanılmasına katkı koymak, hem de zayıf-çok zayıf kaya malzemesinin dayanım değiştirgesinin belirlenmesine sağladığı kolaylıklar nedeniyle İzmir Metrosu 2. Aşama İnşaatı kapsamındaki Tip 1 hat tünellerinin davranışını belirleme aşamasında DMİ 'ni direk değiştirge olarak kaya mühendisliğindeki kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ulusay ve ark. (2001) tarafından önerilen DMİ oranı kullanılması vasıtasıyla elde edilen RMR değerlerinden yola çıkarak, kaya kütlesi elastisite modülünün hesaplandığı ve yine Ulusay ve ark. (2001) tarafından önerilen $TEBD=5,1 DMİ_c$ eşitliği vasıtasıyla dolaylı yoldan bulunan kaya malzemesi TEBD'ı kullanılarak kaya kütlesi dayanımının bulunmuştur. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar sayısal modellemede sisteme giriş değiştirgesi olarak kullanılmıştır. Tünel güzergahında yer altı suyunun bulunması nedeniyle yer altı su seviyeleri modellere entegre edilmiştir. Sayısal modeller hem yer altı suyunun bulunduğu konumlardaki hem de yer altı suyunun bulunmadığı konumlardaki ölçümler ile kalibre edilmiştir. Sayısal modeller sonucu elde edilen tünel içi konverjans değerleri ile yeryüzü oturma değerleri, yerinde yapılan ölçümlerle karşılaştırıldığında, bu değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sadece, Bornova Karmaşığında oluşturulan modelde yeryüzü oturmaları ile model arasında fark bulunmaktadır. Tünel içi konverjans değerleri birbiri ile uyum içerisinde. Bunun ana nedeni, geçirgen olan Bornova karmaşığında açılan tünellerde, yer altı suyunun tünelden drenajı ile örtü tabakasında oluşan boşluğun kapanmasıdır. Bu olgu modele yansıtılamamıştır. Sayısal modellerden elde edilen sonuçlar özet halinde Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1 Sayısal model sonuçları

4.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

Kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde kaya malzemesi önemli bir değiştirgendir. Bu değiştirgenin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem tek eksenli basınç deneyidir. Zaman zaman TEBD'nin dolaylı olarak belirlenmesinde NYİ ve SH kullanılabilir. DMİ ise özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda ortalama 5,1 dönüşüm katsayısı ile son yıllarda öne çıkan bir indeks deneyidir. Laminalı-foliasyonlu, anizotrop kayalarda kaya malzemesinin dayanımının belirlenmesinde DMİ büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada, DMİ ile yapılan RMR hesaplamaları sonucu elde edilen değerler kullanılarak kaya kütlelerine ait değiştirgeler belirlenmiş ve bu değiştirgeler sayısal modellerde kullanılarak gerçekle örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sayede, genellikle laboratuvar çalışmaları aşamasında kalan DMİ'nin uygulamada da doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Aksoy, C.O. ve Küçük, K. (1996). *Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi*. Yayınlanmamış Lisans Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Aksoy, C.O., Onargan, T., Güngör, T., Küçük, K. ve Kun, M. (2006). *İzmir metrosu 2. etap projesinin Göztepe ve F. Altay istasyonları arasındaki kazının ve tahkimat sisteminin değerlendirilmesi*, İzmir: DEUEF, DEU-MAG.
- Aksoy, C.O. (2008a). Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications and restrictions. *Journal of Mining Science*, 44(1), 51-63.
- Aksoy, C.O. (2008b). Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by ground water drainage: A Case Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(3), 376-383.
- Aksoy, C.O. (2009a). Performance prediction of impact hammers by block punch index for weak rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1383-1388.
- Aksoy, C.O. (2009b). *The Determination of the ground settlement induced by metro tunnel excavation with the in-situ measurements and numerical modeling: A case study*. Project No: 2005384, Dokuz Eylül University of Scientific Research Bureau, İzmir.
- Aksoy, C.O. (2009c). *The investigation of the applicability of block punch index in the rock mass classification systems for weak rocks and the application of shallow urban tunnels*. TUBITAK Project Number 108M151. DEÜ Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

- ASTM. (1986). *Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens. D 2938*, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (2), 185-216.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications* , USA: John Wiley and Sons.
- Bieniawski, Z.T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, Sept, 1-11.
- Barton, N. R., Lien, R., & Lunde, L. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mecnanics*, 6 (4), 189-239.
- Broch, E. & Franklin, J.A. (1972). The point load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9, 669-697.
- Das, B.M. (1985). Evaluation of the point load strength for soft rock classification. *Proceedings of the 4th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown 220-226.
- Ege Zemin A.Ş. (2006). *İzmir LRT projesinin 2. etap, sondaj çalışması raporu*, Ege Zemin A.Ş., İzmir.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Emprsicl strength criterion for rock masses. *ASCE Journal Of The Geotechnical Engineering Division*, 106 (GT9), 1013-1035.

- Hoek, E. & Brown, E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion. *Proceedings 15th Canadian Rock Mechanics Symposium: Rock Engineering For Underground Excavations*. University of Toronto, 31-38.
- Hoek, E. (1995). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2 (2), 4-16.
- Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology-an engineer's viewport. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M. (2002). Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 57, 151-160.
- Jeoloji Müh. ve Kaya Mekaniği Çalışma Grubu, (1993). *İzmir belediyesi, İzmir metro sistemi (IZRAY), F.Altay-Basmane güzergahının jeolojik mühendisliği (1. Aşama), Rapor No: 9210-TR-03, vol. 1. İ.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.*
- Ulusay, R. & Hudson, J.A. (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. Ankara: Kozan ofset.
- Kalamaris, G.S. & Bieniawski, Z.T. (1995) A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *Proceedings of 8th International Congress of Rock Mechanics*. ISRM, Balkema, Rotterdam, 1, 295-302.
- Köse, H. ve Kahraman, B. (1999) *Kaya mekaniği* (3.baskı) İzmir: DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, 177, 3.1-3.31.
- Onargan, T. & Aksoy, C.O. (2006) *Tip 2 tünel istasyonlarının kazı çalışması üzerine raporu ve İzmir metro projesi 2.etabının üstüne uygulanması projesi* . DEUEF, İzmir, 52.

- O'Rourke, J.E. (1988). *Rock index properties for geoenvironmental design in underground development*. SME reprint 88-48.
- Palmström, A. (1996). *RMI-a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Unpublished PhD Thesis, Oslo University.
- Palmström, A. (2000). On classification systems. *Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference "GeoEng-2000, Melbourne*.
- Read, S.A.L., Richards. L.R. & Perrin, N.D. (1999). Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceedings 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris, 2*, 655-660.
- Sefarim, J.L. & Pereira J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, Lisbon, Portugal*.
- Singh, V.K. & Singh D.P. (1993). Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 11, 269-272.
- Smith, H.J. (1997). The point load test for weak rock in dredging applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 702-702(1).
- Sönmez, H. & Tunusluoğlu, C. (2008). New considerations on the use of block punch index for predicting the uniaxial compressive strength of rock material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1007-1014.
- Stacey, T.R. (1980). A simple device for the direct shear strength testing of intact rock. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 80 (3), 129–130.

- Sulukcu, S. & Ulusay, R. (2001). Evaluation of the block punch index test with prime consideration on size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 1091–111.
- Ulusay, R. (1991). *Geotechnical evaluations and deterministic design consideration from pit-wall slopes at Eskihisar (Yatagan-Mugla) strip coal mine*. Unpublished PhD. Thesis, Middle East Technical University.
- Ulusay, R. & Gokceoglu, C. (1997). The modified block punch index test. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 991–1001.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C. & Sulukcu, S. (2001). Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 1113–1119.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H. (2002). *Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri*. Ankara: Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Unal, E. (1996). *Modified rock mass classification: M-RMR system. Milestone in rock engineering, The Bieniawski Jubilee Collection*, Balkema, Rotterdam.
- Unal, E. & Ozkan, I. (1990). Determination of classification parameters for clay-bearing and stratified rock mass. *Proceedings of the 9th International Conference on Ground Control in Mining*, West Virginia University, Morgantown.
- Unal, E., Ozkan, I. & Ulusay, R. (1992). Characterization of weak rock, stratified and claybearing rock masses. *ISRM Symposium:EUROCK'92 Rock Characterization, Chester, UK*, British Geotechnical Society, London.

Ünal, E., Ulusay, R. ve Özkan, İ. (1997a). *Beypazari trona sahasında kaya mekaniği mühendisliği değerlendirmeleri ve kaya kütle sınıflamaları. Proje Numarası: 97-03-05-02-02*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Ünal, E., Ulusay, R. ve Özkan, İ. (1997b). *Beypazari trona sahasında kaya mekaniği mühendisliği değerlendirmeleri ve kaya kütle sınıflamaları: Sondaj kuyusu TS-3 Site, Proje Numarası: 97-03-05-01-06*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Vallejo, L.E., Walsh, R.A. & Robinson, M.K. (1989). Correlation between unconfined compressive and point load strength for appalachian rocks. *Proceedings of the 30th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, 461-468.

Van der Schrier, S. J. (1988). The block punch index test. *Bulletin International Association Engineering Geology*, 38, 121-126.