

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAYA YAPILARININ DAVRANIŞININ**  
**BELİRLENMESİNDE YENİ BİR METOD OLAN**  
**KAYA YAPISI İNDEKSİ ÜZERİNE BİR**  
**ÇALIŞMA**

**Vehbi ÖZACAR**

**Temmuz, 2010**

**İZMİR**

**KAYA YAPILARININ DAVRANIŞININ  
BELİRLENMESİNDE YENİ BİR METOD OLAN  
KAYA YAPISI İNDEKSİ ÜZERİNE BİR  
ÇALIŞMA**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı**

**Vehbi ÖZACAR**

**Temmuz, 2010**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**VEHBİ ÖZACAR**, tarafından **DOÇ DR. C. OKAY AKSOY** yönetiminde hazırlanan “**KAYA YAPILARININ DAVRANIŞININ BELİRLENMESİNDE YENİ BİR METOD OLAN KAYA YAPISI İNDEKSİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

---

**DOÇ. DR. C. OKAY AKSOY**

Danışman

---

Jüri Üyesi

---

Jüri Üyesi

---

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŐEKKÖR

Tezimi hazırlamamda katkısı bulunan Prof. Dr. Sabit GÖRGEN ve Doç Dr. C. Okay AKSOY hocalarıma ve aileme içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Vehbi ÖZACAR

## **KAYA YAPILARININ DAVRANIŞININ BELİRLENMESİNDE YENİ BİR METOD OLAN KAYA YAPISI İNDEKSİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

### **ÖZ**

Kaya mühendisliğinde, kaya kütlelerinin davranışlarının kestirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisi kaya kütle sınıflama sistemleridir. Bu konuda birçok sistem geliştirilmiştir. Bu sistemler içerisinde en çok kullanılan sistemler RMR, Q, GSI ve RMI'dir. Yer altı ve yerüstü madencilik tasarımlarında çok sık kullanılan bu sistemler incelendiğinde, hepsinin kendi içinde ve uygulandıkları yerlerde bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Genel olarak bakıldığında ise bu sistemler özellikle zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde bazı sınırlamalara ve yetersizliklere sahip olabilmektedir. Bazı sistemler zaman içerisinde geliştiricileri tarafından modifiye edilmiş olsa da bu sorun devam ede gelmektedir.

Özellikle ülkemiz koşullarında yapılan uygulamalarda yaşanan sıkıntıların ana nedeninin, bu sistemlerin değişik ülkelerde ve değişik ülke şartlarında geliştirilmiş olması olarak düşünülmektedir. Kaya yapılarının davranışının belirlenmesinde çalışmanın yapılacağı lokasyonun önemi olduğu düşünülmektedir.

Bahsi geçen sistemler incelendiğinde, kaya davranışlarının bazı değiştiregelere bağlı olarak atanan puanlarla belirlendiği görülmektedir. Bu sistemler her ne kadar kaya davranışlarını belirlemede değiştiregeleri kullansa da her tip kaya kütlelerinin davranışının kestirilmesi aynı mantık içerisinde yapılmaktadır. Bu durumda, çok zayıf kaya kütleleri ile sağlam kaya kütlelerinin aynı mantık içerisinde değerlendirilmesi söz konusudur. Aslında bu durum beraberinde bazı yanlışları da getirmektedir. Genel olarak sağlam kayalarda başarılı olan bu sistemler zayıf kaya kütlelerinde çok da başarılı sayılmamaktadır. Bunun en önemli nedeni bütün kaya kütle tiplerinin aynı mantık içerisinde değerlendirilmesidir.

Kaya kütlelerinin yapısal olarak farklı yapılar sunması, davranışlarının da farklı olacağını göstermektedir. Bu nedenle, bütün kaya kütlelerini aynı mantık içerisinde değerlendirmek ve bu mantığa bağlı davranış kestirimi yanlış gözükmektedir. Zaten

bu durum bu sistemlerin sağlam kayalarda başarılı fakat zayıf-çok zayıf kayalarda sınırlamaları ve yetersiz bazı uygulamaları oluşu nedeniyle görölmektedir.

Bu tezin amacı, kaya kütlelerini yapısal olarak farklı sınıflara ayırmak, bu sınıflardaki kaya kütleleri için farklı değerlendirme yöntemleri geliştirmek, geliştirilen sistemin madencilik uygulamalarındaki başarı durumunu tespit etmek, değişik değiştirgelerin (dayanım, yer altı suyu, blok durumu vb) farklı kaya yapılarındaki etkilerini araştırarak ölkemiz koşullarına ve ölkemizde yapılan madencilik çalışmalarına uygun yeni bir sistem geliştirmektir.

**Anahtar sözcükler:** Kaya kütle sınıflama sistemleri, Kaya Yapısı İndeksi, KYİ

# **A STUDY ABOUT ROCK STRUCTURE INDEX WHICH IS A NEW METHOD TO DETERMINE THE BEHAVIOR OF ROCK STRUCTURE**

## **ABSTRACT**

Rock mass classification systems are one of the using methods to establish behaviors of rock masses in rock engineering. Many systems are developed about this subject. RMR, Q, GSI and RMI are the most commonly used systems. These systems are commonly used in underground and opencast designs. When these systems are analyzed, it is seen that they have both advantages and disadvantages in themselves and at the applying places. Otherwise these systems have restrictions and disabilities, especially about determining of poor-very poor rock mass behaviors. Though some systems are modified by their developers, this problem continues.

Especially it is thought that the developing of these systems at different countries and different country conditions are the main reasons of the troubles happened in our country's conditions. It is thought that the location of the working area is important about determining rock mass behavior.

In these systems, rock behaviors are determining by points depending on some parameters. Although these systems are using different parameters to estimate rock behavior, they have the same mentality about establishing behaviors of all type rock mass. Very poor rock mass and good rock mass are evaluated in the same mentality and this situation causes some troubles. The systems are not successful at poor rock mass which are successful at good rocks. And the most important reason of this is, evaluating all the type of rock mass in the same mentality.

Different structures of rock mass indicate that their behaviors are different too. Therefore it seems wrong to evaluate all type of rock mass in same mentality and estimating of behavior depending same mentality. This situation is already seen when these systems have restrictions and disabilities at poor-very poor rock.

The purpose of this thesis is, arranging rock mass structurally in classes, developing different evaluation methods for the rock masses in these classes, determining the success of developed system at mining operations, developing a new system suitable with our country's conditions and mining operations by researching effects of different parameters (strength, ground water, block condition etc.) to different rock structures.

**Key Words:** Rock mass classification systems, Rock Structure Index, RSI.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	II
TEŞEKKÜR .....	III
ÖZ .....	IV
ABSTRACT .....	VI
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - KAYA KÜTLE KARAKTERİZASYONU .....</b>	<b>3</b>
2.1 Süreksizlikler .....	3
2.1.1 Süreksizlik Türleri.....	4
2.1.2 Süreksizlik Aralığı .....	9
2.1.3 Süreksizliklerin Devamlılığı .....	14
2.1.4 Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü ve Dalgalılığı .....	15
2.1.5 Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı.....	18
2.1.6 Dolgu Malzemesinin Özellikleri.....	20
2.1.7 Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi ve Dayanımı .....	27
2.1.8 Süreksizlik Yüzeylerindeki Su Durumu .....	31
2.1.9 Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Takımı Kavramı .....	32
2.2. Kaya Malzemesi Mekanik Özellikleri.....	34
2.2.1 Tek Eksenli Basma Dayanımı .....	37
2.2.2 Nokta Yük Dayanımı .....	39
2.2.3 Schmidt Sertliği .....	41
2.2.4 Disk Makaslama Dayanım İndeksi Deneyi (Block Punch Index) .....	42
2.2.5 Suda Dağılma Dayanımı .....	44
2.3 RQD'nin Kaya Kütle Karakterizasyonundaki Rolü.....	45

2.4 Boyut Etkisi .....	45
2.5 Yapısal Özellik.....	46
2.6 Örselenme Faktörü.....	47
2.7 Blok Boyutunun Etkisi .....	50
<b>BÖLÜM ÜÇ - YENİLME KRİTERLERİ.....</b>	<b>53</b>
3.1 En Büyük Normal Gerilme Kriteri.....	53
3.2 En Büyük Kesme Gerilmesi (Coulomb) Kriteri .....	54
3.3 Mohr-Coulomb Kriteri .....	56
3.4 Griffith Kriteri.....	56
3.5 Tresca Kriteri (En Büyük Kesme Gerilmesi) .....	57
3.6 Von Mises Kriteri.....	57
3.7 Hoek ve Brown Görgül Yenilme Kriteri.....	58
<b>BÖLÜM DÖRT - KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ.....</b>	<b>61</b>
4.1 RMR Sınıflama Sistemi.....	61
4.1.1 Sistemin 1989'daki son versiyonu.....	61
4.1.2 RMR Sınıflama Sistemi'nin uygulama alanları .....	65
4.1.3 RMR Sınıflama Sistemi'nin kullanımı sırasında yapılan hatalar .....	65
4.2 Q Sınıflama Sistemi .....	68
4.2.1 Q Sistemi'nin Sınırlamaları.....	72
4.3 GSI Sınıflama Sistemi .....	73
4.3.1 GSI'nin tayini için RMR Sistemi'nin 1976 versiyonunun kullanılması ...	74
4.3.2 GSI'nin tayini için RMR Sistemi'nin 1989 versiyonunun kullanılması ...	74
4.3.3 GSI'nin tayini için Q Sistemi'nin kullanılması .....	75
4.3.4 Yenilme ölçütüyle ve GSI Sistemi'yle ilgili sınırlamalar ve sorunlar .....	77
4.4 RMI Sınıflama Sistemi .....	79
<b>BÖLÜM BEŞ - KAYA YAPISI İNDEKSİNİN TEMELİ .....</b>	<b>81</b>
4.1 Gereksinim.....	81
4.2 Kriterler-Değişirgeler .....	85

4.3 Kaya Yapısı İndeksi'nin Tanıtımı .....	86
4.4 Kaya Yapısı İndeks Abağı .....	89
<b>BÖLÜM ALTI - SONUÇ.....</b>	<b>90</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>92</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Kaya mühendisliğinde, kaya kütlelerinin davranışlarının kestirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisi kaya kütle sınıflama sistemleridir. Bu konuda birçok sistem geliştirilmiştir. Bu sistemler içerisinde en çok kullanılan sistemler RMR, Q, GSI ve RMI'dir. Yer altı ve yerüstü madencilik tasarımlarında çok sık kullanılan bu sistemler incelendiğinde, hepsinin kendi içinde ve uygulandıkları yerlerde bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Genel olarak bakıldığında ise bu sistemler özellikle zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde bazı sınırlamalara ve yetersizliklere sahip olabilmektedir. Bazı sistemler zaman içerisinde geliştiricileri tarafından modifiye edilmiş olsa da bu sorun devam ede gelmektedir.

Özellikle ülkemiz koşullarında yapılan uygulamalarda yaşanan sıkıntıların ana nedeninin, bu sistemlerin değişik ülkelerde ve değişik ülke şartlarında geliştirilmiş olması olarak düşünülmektedir. Kaya yapılarının davranışının belirlenmesinde çalışmanın yapılacağı lokasyonun önemi olduğu düşünülmektedir.

Bahsi geçen sistemler incelendiğinde, kaya davranışlarının bazı değiştirgelere bağlı olarak atanan puanlarla belirlendiği görölmektedir. Bu sistemler her ne kadar kaya davranışlarını belirlemede değiştirgeleri kullansa da her tip kaya kütlelerinin davranışının kestirilmesi aynı mantık içerisinde yapılmaktadır. Bu durumda, çok zayıf kaya kütleleri ile sağlam kaya kütlelerinin aynı mantık içerisinde değerlendirilmesi söz konusudur. Aslında bu durum beraberinde bazı yanlışları da getirmektedir. Genel olarak sağlam kayalarda başarılı olan bu sistemler zayıf kaya kütlelerinde çok da başarılı sayılmamaktadır. Bunun en önemli nedeni bütün kaya kütle tiplerinin aynı mantık içerisinde değerlendirilmesidir.

Kaya kütlelerinin yapısal olarak farklı yapılar sunması, davranışlarının da farklı olacağını göstermektedir. Bu nedenle, bütün kaya kütlelerini aynı mantık içerisinde değerlendirmek ve bu mantığa bağlı davranış kestirimi yanlış gözükmemektedir. Zaten bu durum bu sistemlerin sağlam kayalarda başarılı fakat zayıf-çok zayıf kayalarda sınırlamaları ve yetersiz bazı uygulamaları oluşu nedeniyle görölmektedir.

Bu tezin amacı, kaya kütlelerini yapısal olarak farklı sınıflara ayırmak, bu sınıflardaki kaya kütleleri için farklı değerlendirme yöntemleri geliştirmek, geliştirilen sistemin madencilik uygulamalarındaki başarı durumunu tespit etmek, değişik değiştirgelerin (dayanım, yer altı suyu, blok durumu vb) farklı kaya yapılarındaki etkilerini araştırarak ülkemiz koşullarına ve ülkemizde yapılan madencilik çalışmalarına uygun yeni bir sistem geliştirmektir.

## **BÖLÜM İKİ**

### **KAYA KÜTLE KARAKTERİZASYONU**

#### **2.1 Süreksizlikler**

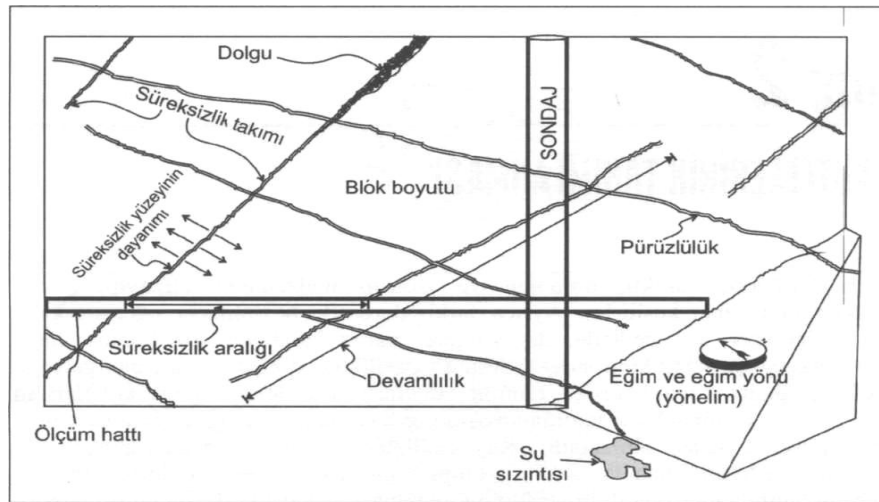
Sürekli, homojen ve izotrop malzemeler olmayan kaya kütleleri, çeşitli süreksizlikler tarafından kesilirler. Ayrıca bozunmaya uğramış kaya türlerini de içerirler. Bu nedenle, dış yüklere maruz kalabilen söz konusu kaya kütlelerinin davranışı, içerdikleri süreksizliklerin özellikleri dikkate alınmadan gerçeğe yakın şekilde analiz veya önceden tahmin edilemez. Kaya kütlelerinin özelliklerinin sağlıklı bir şekilde tanımlanmasına ve kaya mühendisliği uygulamalarında önem kazanmasına bu durum neden olmaktadır. Mühendislik yapısının duraylılığını denetleyecek jeolojik unsurların ve bunların fiziksel özelliklerinin tanımlanmasıyla ilgili verilerin toplanması ve kaya kütlelerini temsil edecek bir modelin oluşturulması işlemi kaya kütlelerinin tanımlanması olarak adlandırılır. Kaya kütleleri tanımlanırken en önemli kısım süreksizliklerin özelliklerinin belirlenmesidir. Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre süreksizliklerin özellikleri aşağıda belirtilen amaçlara yönelik olarak tayin edilir.

- (a) Jeolojik yapının ortaya konulması,
- (b) Kaya kütlelerinin mühendislik sınıflaması ve
- (c) Kaya kütlelerinin duraylılığı (örneğin, şev duraylılığı veya yeraltı açıklıklarının tavanlarında oluşan blokların duraylılığı vb.), deformasyonu, sıvı iletimi, patlatma ve destek tasarımı gibi uygulamalarda kullanılan kinematik, analitik, sayısal veya görgül yöntemler için veri sağlanması.

Süreksizliklerin özellikleri yüzleklerde (mostrada) veya sondaj karotlarında değişik ölçüm tekniklerinden yararlanılarak tayin edilir ve/veya tanımlanır. Kaya kütlelerinin tanımlanması amacıyla, süreksizliklerin aşağıda belirtilen ve Şekil 2.1'deki blok diyagramda şematik olarak gösterilen fiziksel parametreleri belirlenir (ISRM, 1981):

- (a) Süreksizliğin türü
- (b) Süreksizlik aralığı
- (c) Süreksizliğin devamlılığı
- (d) Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü ve dalgalılığı
- (e) Süreksizlik yüzeyinin açıklığı
- (f) Dolgu malzemesinin özellikleri
- (g) Süreksizlik yüzeyinin dayanımı ve bozunmanın derecesi
- (h) Süreksizlik yüzeyindeki su durumu
- (i) Süreksizliğin yönelimi ve süreksizlik seti (takımı) sayısı
- (j) Blok boyutu

Aşağıdaki bölümlerde sırayla yukarıda maddeler açıklanmışlardır.



Şekil 2.1 Kaya kütlelerinin tanımlanmasında süreksizliklerin esas alınan başlıca özellikleri (Hudson, 1989)

### 2.1.1 Süreksizlik Türleri

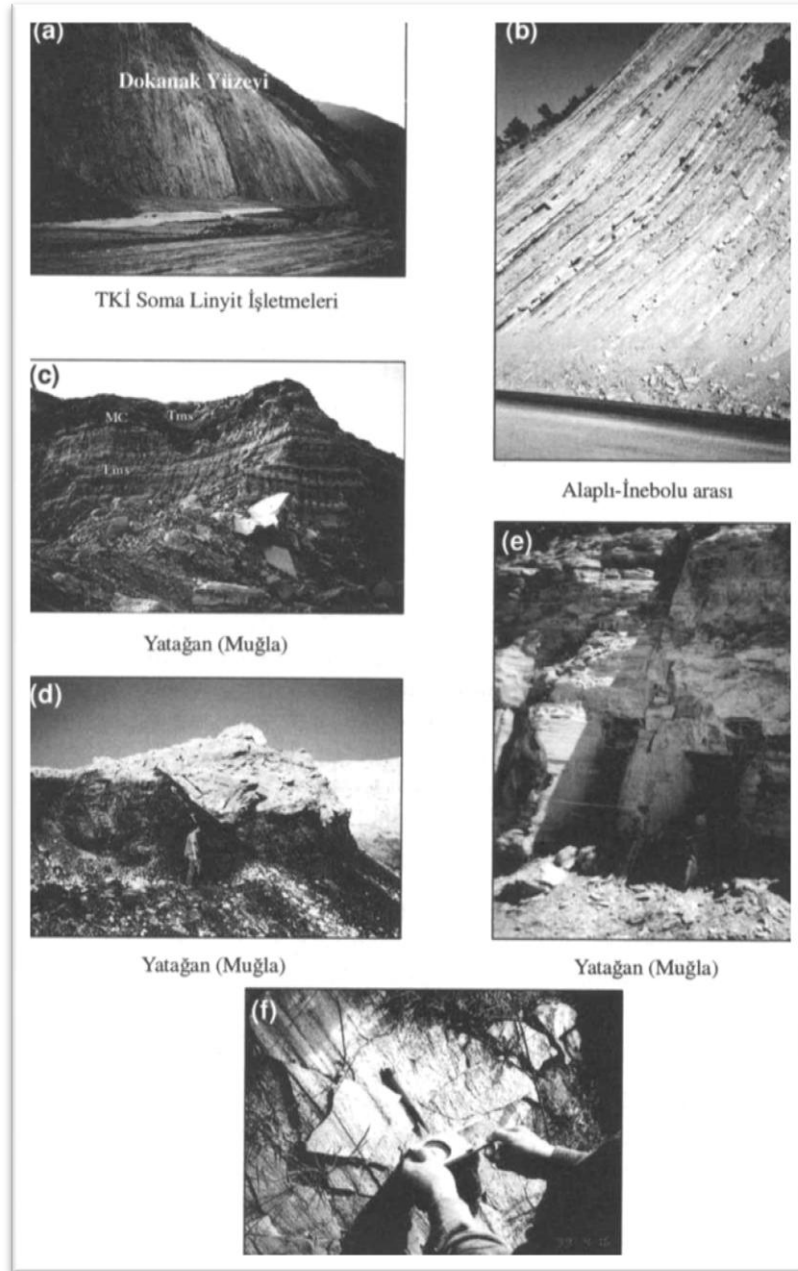
Süreksizliğin türünün belirlenmesi süreksizliklerin özellikleri belirlenirken öncelikli sırada yer alır. Ulusay ve Sönmez (2007) başlıca yapısal süreksizlik (zayıflık düzlemi) türlerinin tanımları aşağıdaki şekilde vermiştir.

Dokanak; iki farklı litolojik birim arasındaki sınır olup, bu sınır uyumlu, ya da uyumsuz veya geçişli olabilen bir süreksizlik yüzeyidir (Şekil 2.2a) (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Tabaka düzlemi; sedimanter kayaların oluşumu sırasında tane boyu ve yönelimi, mineralojik bileşim, renk ve sertlik gibi faktörlerdeki değişime bağlı olarak gelişen bir yüzeydir (Şekil 2.2b). Tabakalanma, her zaman ayrık bir süreksizlik yüzeyi olmayabilir ve bazı durumlarda kaya malzemesi içinde hafif bir renk değişimi şeklinde de gözlenebilir (Şekil 2.2c). Tabaka düzlemleri arasındaki uzaklık, birkaç milimetreden (laminasyon) metre (çok kalın tabaka) boyutuna kadar değişebilir. Sedimanların mineralojisindeki değişimler, tabakalanma yüzeyleri arasında ince kil seviyelerinin oluşumuna veya sıvama şeklindeki yüzey kaplamalarına neden olabilir. Bu durum, kil dolgulu fay ve eklem yüzeylerindeki benzer mühendislik sorunlarının gelişmesine yol açabilir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Fay ve makaslama zonu; yüzeyi boyunca birkaç santimetreden kilometrelerce uzunluğa kadar göreceli bir yerdeğiştirmenin meydana geldiği makaslama yenilmesine maruz kalmış yüzeylerdir (Şekil 2.2d). Fay, tektonik hareketler sırasında gelişen makaslama gerilmesinin kaya kütleindeki bir düzlemin makaslama dayanımını aşması sonucu meydana gelen bir kırık şeklinde de tanımlanmaktadır (Kersten, 1990). Fay kırığının yüzeyleri arasında; parçalanmış kaya parçalarının oluşturduğu fay breşi, çok ince taneli malzemeyle temsil edilen fay dolgusu, kil vb. zayıf malzemeler de yer alabilir. Faylar, çoğu kez tek bir düzlem olmaktan çok, birbirine paralel veya yarı paralel konumlu gruplar halinde gelişebilirler ve bunlar fay zonu veya makaslama zonu şeklinde adlandırılırlar. (Ulusay ve Sönmez, 2007).





Şekil 2.2 Değişik süreksizlik türleri: (a) dokanak, (b) tabakalanma düzlemleri, (c) renk farklılığından ayırtılan tabakalanma, (d) fay düzlemi, (e) sistematik eklem setleri, (f) dilinim (klivaj) (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Eklem;** yüzeyi boyunca herhangi bir yerdeğıştirmenin meydana gelmediğı doğal kırıktır. Kırık yüzeyleri, örtü yükünün kalkması (gerilmenin boşalması), patlatma vd. nedenlerle birbirlerinden bir miktar uzaklaşmış (açılmış) olmakla birlikte, aralarında gözle görülür göreceli bir hareket söz konusu değildir. Yer kabuğunda 1 km derinliğe

kadar kaya kütlelerinde gözlenebilen eklemler; birkaç milimetreden metrelerce uzunlukta, açık, dolgulu veya kapalı (sıkı) olabilirler. Eklemler, genellikle düzlemsel yüzeyli, yan paralel gruplar veya takımlar halinde gelişirler ve bu eklemlere sistematik eklemler adı verilir (Şekil 2.2e). Düzensiz bir geometriye sahip ve birbirine paralel olmayan eklemler ise, sistematik olmayan eklemler şeklinde tanımlanırlar (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Dilinim (Klivaj);** ince taneli kayalarda, sıkıştırıcı kuvvete dik yönde oluşmuş, sık aralıklı ve birbirine paralel yönde gelişmiş zayıflık düzlemleridir. Mekanik anlamda, makaslama yüzeylerini oluşturan bu yüzeyler boyunca kayma söz konusu olabilir (Şekil 2.2f). Spencer (1969) ile Whitten ve Brooks (1972), başlıca iki tür dilinim tanımlamışlardır. Bunlardan kırık dilinimi, minerallerin birbirine paralel yönde bir dizilim göstermedikleri, çimentolanmış veya kaynaşmış paralel süreksizlikler şeklinde tanımlanır. Spencer (1969), bu tür dilinimin oluşum mekanizmasında litolojinin ve gerilme koşullarının makaslama, açılma ve sıkıştırma süreçlerine neden olduğunu ve bunların da sağlam kayada ince dilimler halinde çok yakın aralıklı süreksizliklerin gelişmesine yol açtığını belirtmiştir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Diğer bir dilinim türü ise, *akma dilinimi* olup, yeniden kristallenme ve mika gibi yapraksı minerallerin birbirlerine paralel şekilde yönelmelerine bağlı olarak, bir foliasyon yapısının oluşumuyla gelişmektedir. Bu tür dilinim, genel olarak, ince taneli kayaların yüksek sıcaklık ve/veya yüksek basınç altında başkalaşıma (metamorfizmaya) uğramış olmalarıyla yakından ilgilidir. Dilinim; özellikle sleyt, fillit ve şist gibi kayalarda gözlenmekle birlikte, dilinim düzlemlerinin çoğu önemli derecede çekilme dayanımına sahip oldukları için süreksizlik ağı kapsamında değerlendirilmezler. Bununla birlikte dilinim, bu tür kayaların deformabilite ve dayanım özelliklerinde önemli düzeyde bir yönserliğe neden olmaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Fisür;** Fookes ve Denness (1969) tarafından "sürekli bir malzemeyi ufak birimlere ayırmadan bölen süreksizlik" olarak tanımlarken, Priest (1993) tarafından ise, "iki yönde gözlenebilen, ancak üçüncü yönde sınırlanan düzlemsel süreksizlik" şeklinde tanımlamaktadır. Dolayısıyla bir ölçüde farklı anlamlara gelebilen fisür

kavramının, herhangi bir özel süreksizlik türünün tanımlanması amacıyla kullanılmasına ve diğer kavramlarla karıştırılmamasına dikkat edilmelidir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Foliasyon (Yapraklanma);** yüksek basınç ve/veya yüksek sıcaklık altında farklılaşma veya minerallerin tercihli yönelimi nedeniyle ortaya çıkan metamorfik kökenli zayıflık yüzeyleridir. Şistozite bir tür foliasyon olup, yassı ve elipsoidal tanelerin birbirlerine en büyük gerilmeye dik yönde dizilmesiyle oluşur. Şistozite yüzeyleri genellikle kaygandır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Damar;** çevre kayasından farklı özellikteki bir malzeme tarafından doldurulmuş kırıktır. Damar kavramı, genel olarak, ince dolgulu düzlemler için kullanılır ve yüzeyleri ayırık olmadığı için zayıf bir süreksizlik olarak değerlendirilmez (Ulusay ve Sönmez, 2007).

**Süreksizlik türleri;** bundan sonraki bölümde değinilecek olan süreksizlik veri formlarına veya jeoteknik sondaj loglarına kaydedilirler ve Tablo 2.1'de verilen ve uluslararası literatürde kabul görmüş simgeler kullanılarak tanımlanırlar (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Tablo 2.1 Süreksizlik türleri için veri formlarında ve jeoteknik loglarda tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan simgeler.

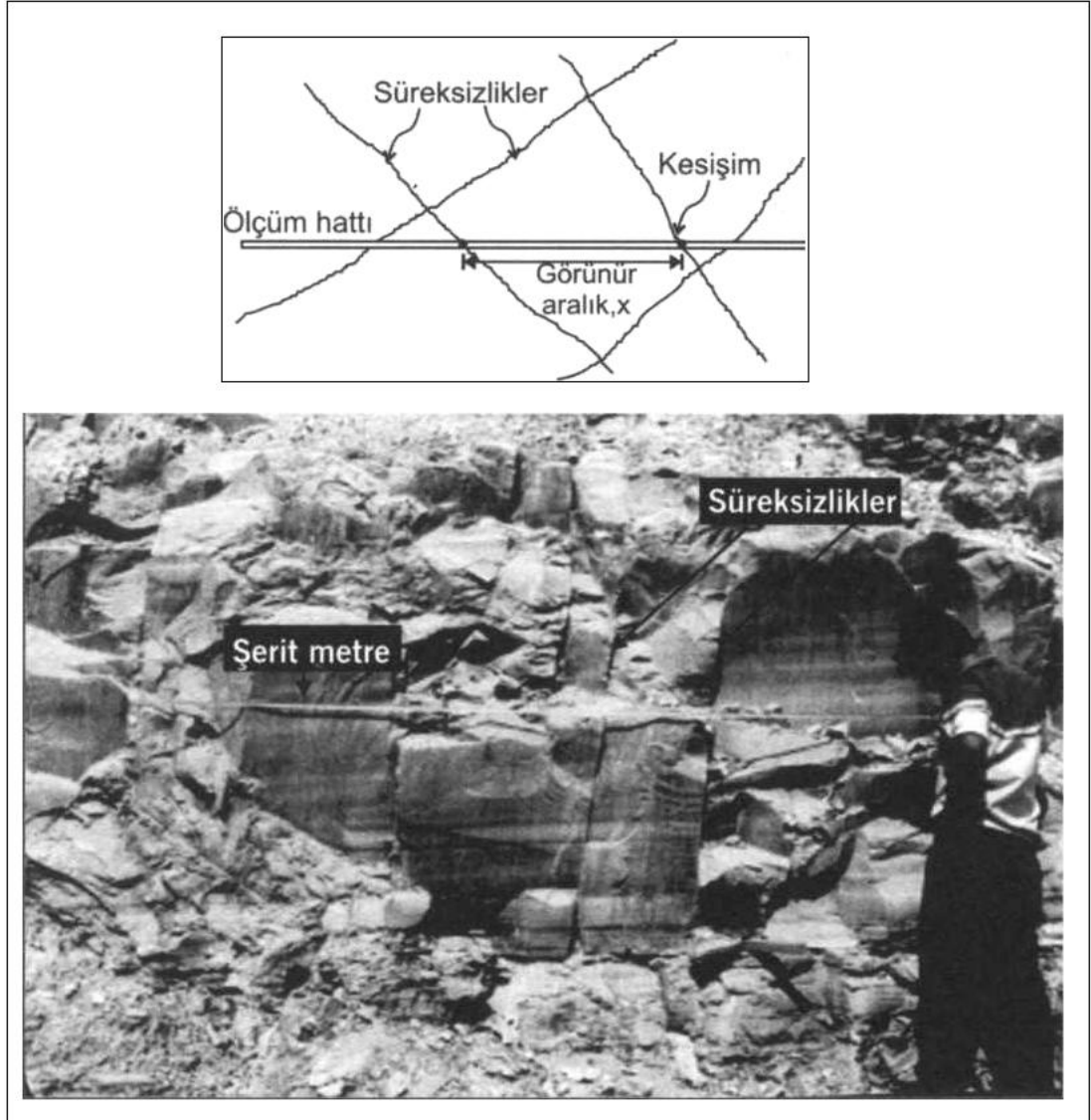
Süreksizlik türü	Simge
Dokanak	Co
Tabakalanma	B
Fay	F
Fay zonu	FZ
Makaslama zonu	SZ
Ekleme	J
Foliasyon (yapraklanma)	F <sub>0</sub>
Dilinim (Klivaj)	C
Damar	V
Şistozite	S
Fisür	F

### 2.1.2 Süreksizlik Aralığı

Kaya kütlelerinde komşu konumlu iki süreksizlik veya birbirine paralel eklemlerden oluşan bir süreksizlik takımındaki iki süreksizliğin arasındaki uzaklığa süreksizlik aralığı denmektedir. Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre süreksizlik veya bunun tersi olan süreksizlik sıklığı, ya da eklem sıklığı parametresi; süreksizlik yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla kullanılmasının yanı sıra, kaya kütlelerinin geçirgenliğini ve kaya malzemesinin oluşturduğu blokların boyutlarını denetleyen bir parametre olması nedeniyle de kaya kütlelerinin en önemli özelliklerinden biridir. Bu parametre, kaya kütlelerinin dayanımı ve davranışı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğundan dolayı yerüstü kazılarının ve açıklıklarının duraylılıklarını da doğrudan etkilemektedir. Süreksizlikler arasındaki mesafenin düşük olması, yeraltı açıklıklarının duraylılığının sağlanmasını zorlaştıran bir faktör olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple, süreksizlikler arası mesafenin tanımlanması kaya mühendisliği uygulamalarında önem taşır.

Mostra yüzeyi serilen şerit metre boyunca şerit metreyi kesen süreksizliklerden ölçülebilen süreksizlik aralığı (Şekil 2.3), sondaj karotlarının incelenmesinden de tayin edilebilir. Ancak uygulamada şerit metrenin her zaman süreksizlik setlerine dik yönde serilmesi mümkün olamadığından, Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre iki tür açıklık ölçülebilmektedir.

- (a) Görünür aralık (şerit metre veya sondaj eksenini boyunca karşılaşılan süreksizlikler arasındaki uzaklık; Şekil 2.4a'da "a" mesafesi)
- (b) Gerçek aralık (birbirine paralel yönde gelişmiş süreksizliklerin oluşturduğu bir süreksizlik takımına ait iki süreksizlik düzlemi arasındaki dik mesafe; Şekil 2.4b'de S mesafesi)



Şekil 2.3 Ölçüm hattı boyunca süreksizlik aralığının tayini ve bir hat ölçümünden görünüm (Ulusay ve Sönmez, 2007).

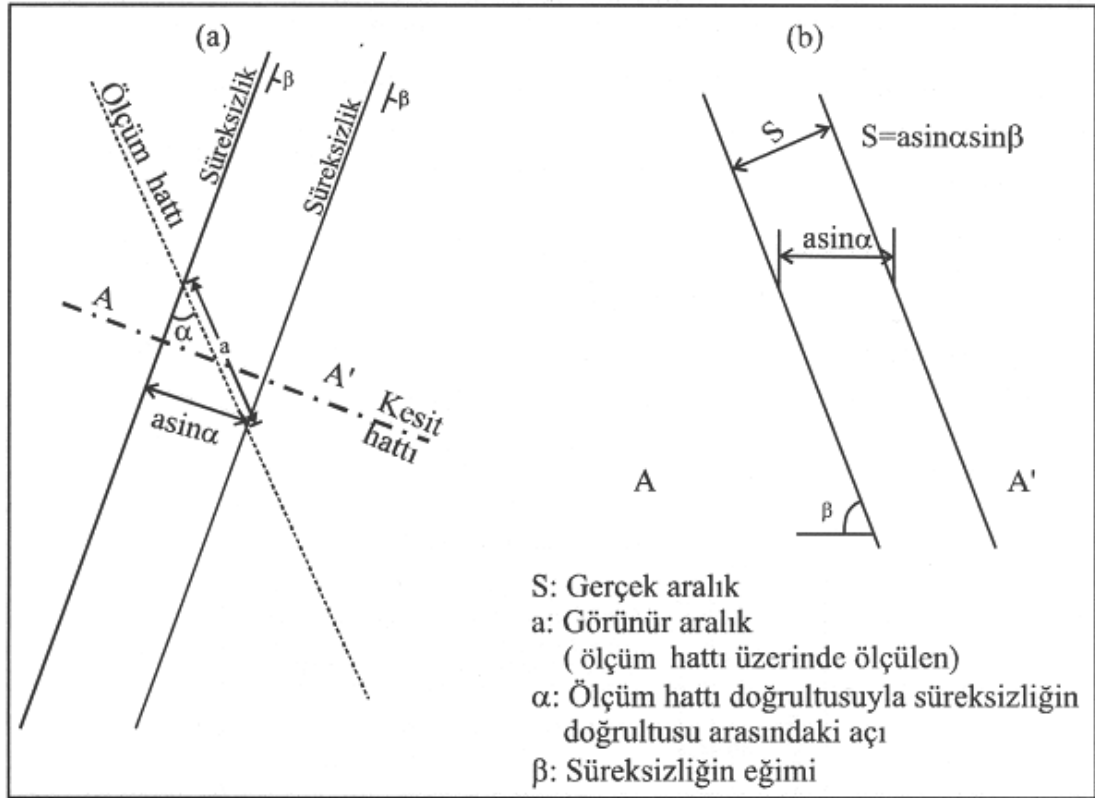
Ortalama süreksizlik aralığı ( $x$ ) ve süreksizlik sıklığı aşağıdaki ifadelerden belirlenir.

$$x = L/N \quad (2.1)$$

$$\lambda = N/L \quad (2.2)$$

Burada;  $L$  ölçüm hattının uzunluğu,  $N$  ise ölçüm hattını kesen süreksizliklerin sayısıdır.  $x$  ve  $\lambda$  parametreleri istatistiksel analiz sonucunda belirlenmedikleri ve eşitlik 2.1 ve 2.2'den hesaplandıkları için, genel bir değerlendirmedirler. Bu yüzden ortalama süreksizlik aralığının daha duyarlı bir şekilde belirlenmesi amacıyla istatistiksel dağılım modellerinden yararlanılması tercih edilmektedir. Priest ve Hudson (1976), homojen kaya kütlelerinde süreksizlik aralığının, genellikle, istatistiksel dağılım modellerinden negatif eksponansiyel dağılıma iyi uyduğunu belirlemişlerdir. Buna göre, süreksizlik aralığı değerlerinin dağılımının tayini için aşağıda verilen negatif eksponansiyel dağılım eşitliği kullanılmaktadır.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2.3)$$



Şekil 2.4 Görünür (a) ve gerçek aralık (b) parametreleri arasındaki ilişki.

Türkiye'de değişik kaya kütlelerinde yapılan benzeri çalışmalarda da (Ayday, 1989; Ulusay, 1991; Gökçeoğlu, 1997; Ulusay vd., 1998), süreksizlik aralığı parametresinin aynı dağılım modeline uyduğu saptanmıştır. Eklemlenmiş bir marn kaya

kütlesinde yapılan ölçümlerin negatif eksponansiyel dağılıma uygunluğunu gösteren süreksizlik aralığı histogramları Şekil 2.5'te örnek olarak verilmiştir. Süreksizlik aralığı parametresinin tanımlanması amacıyla ISRM (1981) tarafından kaya kütleleri için önerilen ölçütler Tablo 2.2'de verilmiştir.

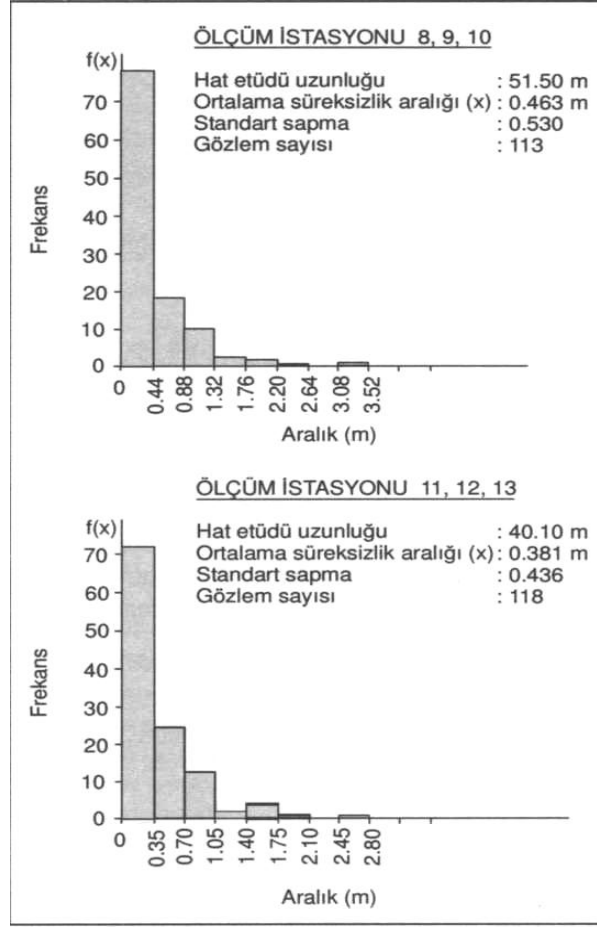
Tablo 2.2 Süreksizlik aralığını tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

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

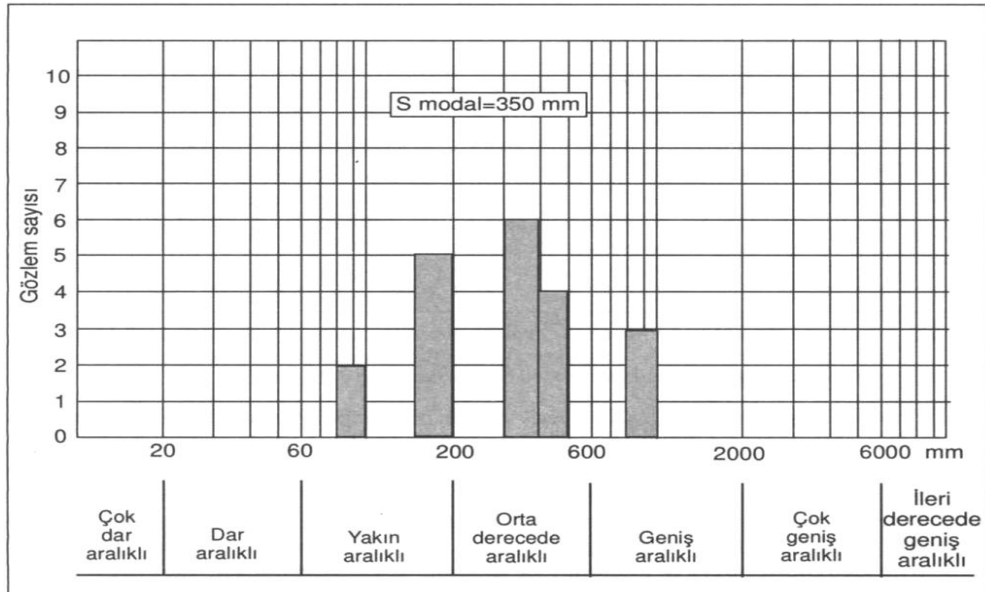
Şekil 2.6'da, süreksizlik aralığı parametresine ilişkin dağılımların, Tablo 2.2'de verilen tanımlama ölçütleri ve aralıkları esas alınarak, histogram şeklinde değerlendirildiği görülmektedir. Daha çok sondaj karotları üzerinde yapılan değerlendirmelerde kullanılan Tablo 2.3, süreksizlik veya eklem sıklığı parametresine ait sınıflama aralıkları ve tanımları ve eşdeğer ortalama süreksizlik aralıklarını vermektedir (Golder Associates, 1979a).

Tablo 2.3 Süreksizlik aralığı ve sıklığı sınıfları (Golder Associates, 1979a).

Sınıflama	Ortalama süreksizlik aralığı, $\bar{x}$ (m)	Ortalama süreksizlik sıklığı $\lambda$ , ( $m^{-1}$ )
Masif	$\bar{x} > 1$	<1
Az çatlaklı- kırıklı	$0,3 < \bar{x} < 1$	1-3
Kırıklı- çatlaklı	$0,1 < \bar{x} < 0,3$	3-10
Çok çatlaklı- kırıklı	$0,02 < \bar{x} < 0,1$	10-50
Parçalanmış	$\bar{x} < 0,02$	>50



Şekil 2.5 Eklemlı bir marn kaya kütlesi için süreksizlik aralığı histogramları (Ulusay, 1991'den).



Şekil 2.6 Gözlemlerden elde edilen verilere göre modal, en küçük ve en büyük süreksizlik aralıklarını gösteren örnek bir histogram (ISRM, 1981).



### 2.1.3 Süreksizliklerin Devamlılığı

Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre kaya kütlesi kavramı, süreksizlik düzlemleri tarafından bloklara ayrılmış bir sistemi ifade eder. Ancak süreksizlik düzlemleri de üç boyutlu uzayda sonlanırlar. En yüksek devamlılığa sahip süreksizlik türü olan tabakalanma düzlemleri bile havza kenarlarında sonlanır. Süreksizliklerin iz uzunluğu bir kaya yüzleğinde gözlenebildiği için, bunların devamlılıklarının ölçülmesi de çoğu kez üzerinde çalışılan yüzlek alanı ile sınırlanmaktadır.

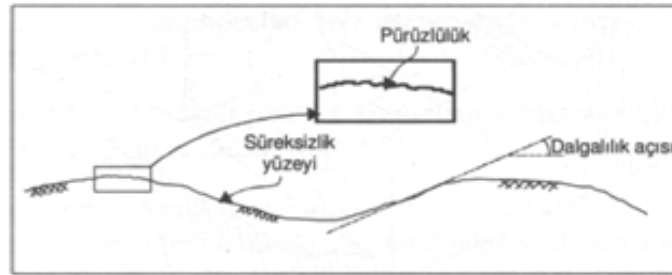
Süreksizliklerin devamlılığı, süreksizliklerin bir düzlemdeki alansal yayılımının göstergesi veya boyutları olup, duraylılığı etkileyen önemli bir parametredir. Kazı duraylılığı üzerinde devamlılığın artması daha olumsuz etki yapmaktadır. Şekil 2.7a'da görüldüğü üzere eğimi bir şev aynasının tersi yönde, fakat devamlılığı az olan eklemler şevlerde devrilme duraysızlığı açısından daha az kritik iken, aynı yönelime sahip, fakat devamlılığı yüksek olan süreksizlik sistemleri, devrilme duraysızlığı açısından şevi daha kritik bir konuma getirebilmektedir (Şekil 2.7 b).



Şekil 2.7 Süreksizliklerin devamlılığının şevlerde duraysızlık modelinin gelişimi üzerindeki etkisine bir örnek: (a) devamlılığı düşük süreksizlikler (devrilme meydana gelmez), (b) yüksek devamlılığa sahip süreksizliklerin neden olduğu devrilme duraysızlığı (Ulusay ve Sönmez, 2007).

### 2.1.4 Süreksizlik Yüzeylerinin Pürüzlülüğü ve Dalgallığı

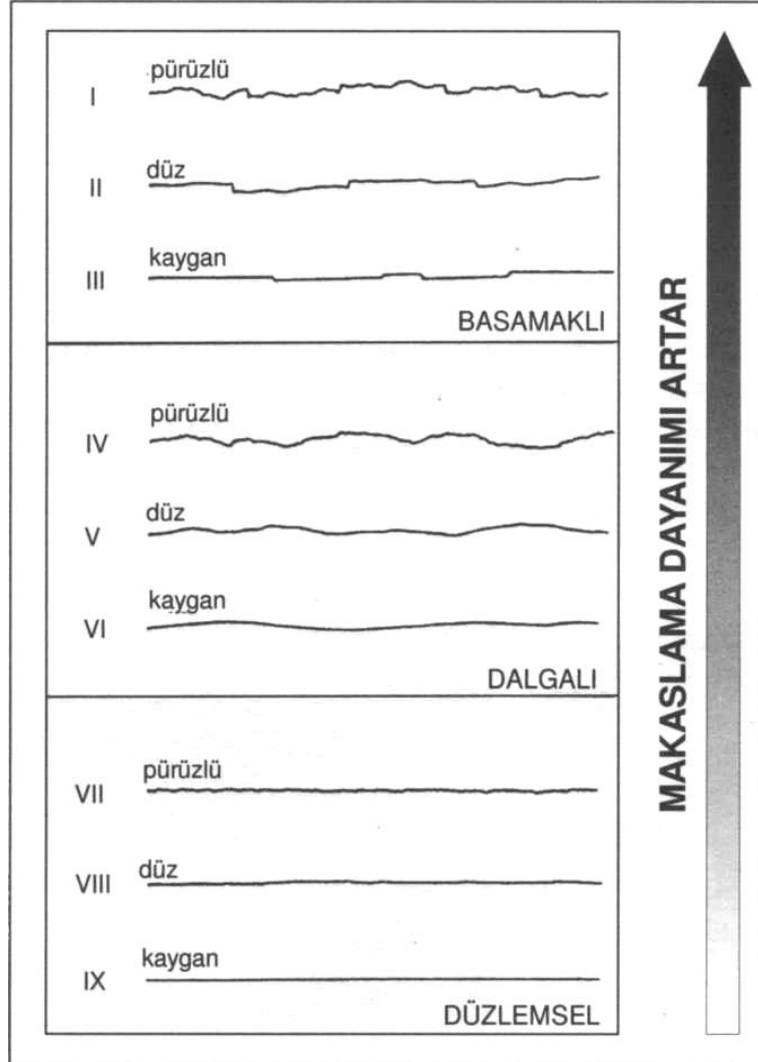
Ulusaya göre; pürüzlülük ve dalgallık sırasıyla, bir süreksizlik yüzeyinin küçük ve büyük ölçekte düzlemsellikten sapmasının bir ölçüsüdür. Dalgallık, düzlemsellikten büyük ölçekteki bir sapmayı karakterize ederken, küçük ölçekteki sapmalar ise pürüzlülük olarak tanımlanır (Şekil 2.8). Süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımında, her iki özellik de önemlidir. Ancak süreksizlik açıklığının, ya da dolgu malzemesinin kalınlığının artmasıyla, pürüzlülüğün süreksizliğin makaslama dayanımı üzerindeki etkisinin azalmasına sebep olmaktadır. Pürüzlülük, laboratuvar ölçeğindeki küçük veya arazi deneylerine uygun boyutlardaki orta ölçekli süreksizlik örneklerinin makaslama dayanımını etkilerken, dalgallık süreksizlik düzleminin konumuna göre makaslama yer değiştirmesinin yönünü etkiler (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Süreksizlik yüzeylerinin dalgallığı ve pürüzlülüğü

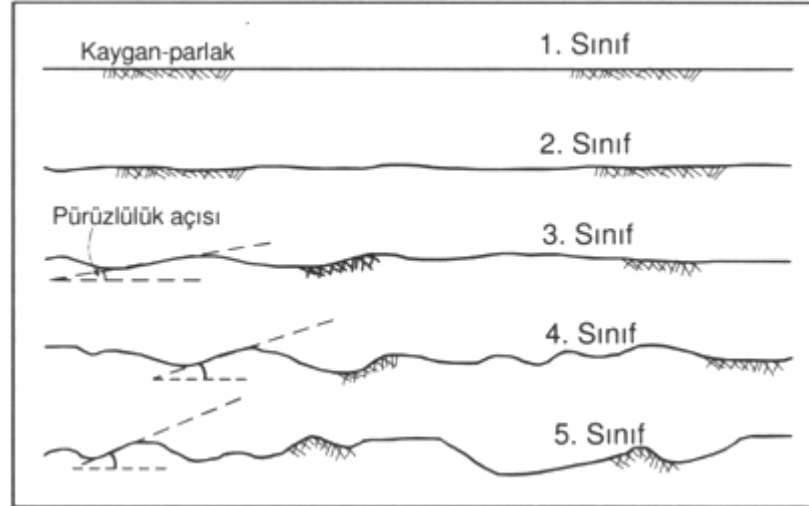
Kaya mühendisliği çalışmalarında çoğu kez proje bütçesinin ve zamanın sınırlı olması nedeniyle kalitatif pürüzlülük tanımlamalarına başvurulur. Bu amaçla ISRM (1981) tarafından önerilen ölçüte göre, süreksizlik yüzeyi üzerinde ve orta ölçekte gözlem yapmak üzere, süreksizlik yüzeyi Şekil 2.9'da verilen tipik pürüzlülük profilleri ile karşılaştırılarak pürüzlülük tanımlanır. Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre profiller; "basamaklı", "dalgalı (ondüleli)" ve "düzlemsel" şeklinde üç orta ölçek grubuna ayrılmakta ve ayrıca her grupta küçük ölçek bazında "pürüzlü", "düz" ve "kaygan" şeklinde bir alt sınıflanma yapılmaktadır. Süreksizlik yüzeyinde bir makaslama yer değiştirmesinin meydana geldiğine dair parlak ve kaygan bir yüzeyin gözlenmesi halinde kaygan terimi kullanılmaktadır. Şekil 2.9'dan görüleceği gibi

pürüzlülük I numaralı profile doğru arttığında, süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı artmaktadır.



Şekil 2.9 Pürüzlülüğün kalitatif olarak belirlenmesinde kullanılan pürüzlülük profilleri (ISRM, 1981'den).

Şekil 2.10'da süreksizlik profilleri esas alınarak yapılan bir diğer pürüzlülük tanımlaması görülmektedir. Tablo 2.4'te verilen tanımlamalar esas alınarak, bu profiller ölçüm yapılan süreksizlik yüzeyleri ile karşılaştırılır. Bu yöntemde pürüzlülük ölçümü tanımlama göreceli olarak daha kolay ve kalitatif bir yöntemdir.

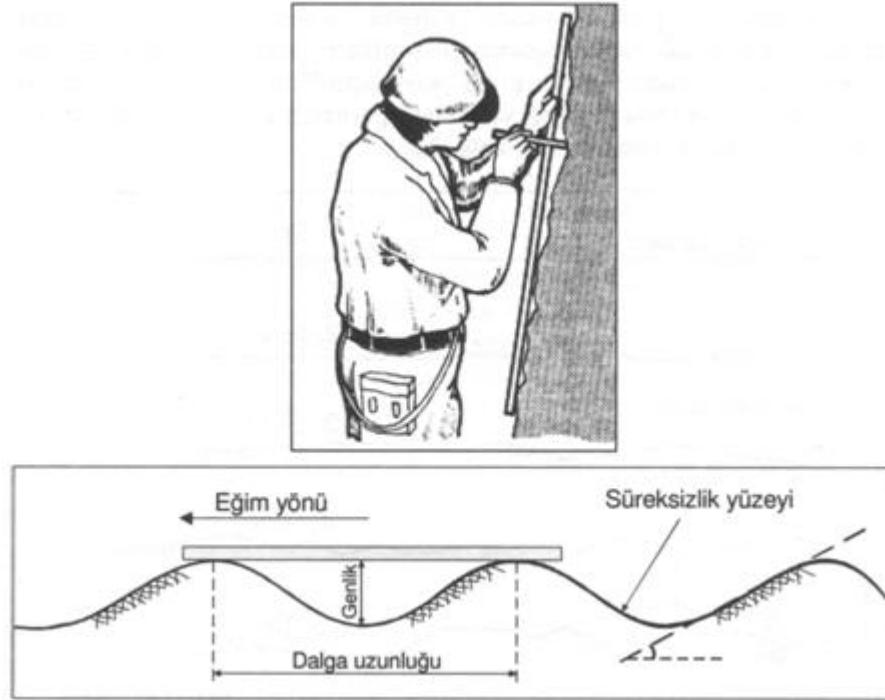


Şekil 2.10 Pürüzlülük sınıfları (Golder Associates, 1979a).

Tablo 2.4 Pürüzlülük ve dalgalılık sınıflamaları (Golder Associates, 1979a).

Tanımlama		Sınıf
Pürüzlülük	Kaygan-parlak	1
	Düz	2
	Pürüzlü	3
	Çıkıntılı	4
	Basamaklı	5
Dalgalılık	Düzlemsel	1
	Az dalgalı	2
	Dalgalı	3
	Kavisli	4
	Kıvrımlı	5

**Dalgalılığın ölçülmesi:** Süreksizlik yüzeyi profillerinin değerlendirilmesi amacıyla ayrıca büyük ölçekte dalga boyu ve genlik de ölçülmelidir. Bu amaçla Şekil 2.11'de gösterilen yöntem kullanılır. Söz konusu yöntemde; 1 m uzunluğunda bir cetvel süreksizlik yüzeyine dayanır ve yüzeyin cetvele olan uzaklığı ölçülür. Bu ölçüm, yüzey boyunca değişik noktalarda tekrarlanır ve süreksizlik yüzeyinin genliğini verir (Ulusay ve Sönmez, 2007).



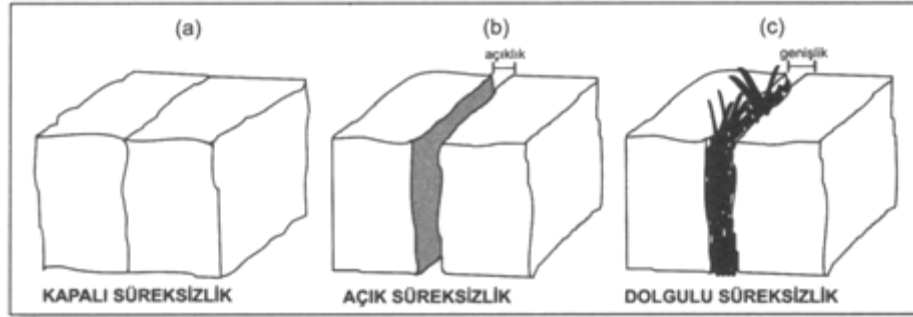
Şekil 2.11 Süreksizliklerin dalga boylarının ve genliklerinin ölçülmesi (Ulusay ve Sönmez, 2007).

### 2.1.5 Süreksizlik Yüzeylerinin Açıklığı

Eğer süreksizlik yüzeyi temiz ve kapalı olduğunda süreksizlik yüzeylerinin açıklığının ölçülmesi gerekmeyebilir. Fakat süreksizlik yüzeyi açık olduğu durumlarda ise, açıklığın ölçülmesi gerekmektedir. Bu terim, süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki dik uzaklık olup, su veya herhangi bir dolgu malzemesi tarafından doldurulmuş olabileceği gibi boş da olabilir (Şekil 2.12). Süreksizlik yüzeyleri arasındaki açıklıkların sebebi, genellikle gerilme azalması veya dolgu malzemesinin süreksizlikten yıkanma veya buna benzer yollarla uzaklaşmasıyla yakından ilgilidir. Süreksizlikler çok düz yüzeylere sahip değilse, 0,1 mm veya 1,0 mm genişliğindeki açıklıkların süreksizliklerin makaslama dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Açıklığın ölçülmesi amacıyla yüzleklerde floresanslı boya (Snow, 1970), sondajlarda iz bırakan paker (Barr ve Hocking, 1976) ve benzeri gibi yöntemler

kullanılmakla birlikte, milimetre bölmeli şerit metre veya mikrometre ile yapılan ölçüm basit ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.13). Bu yöntem, Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre ölçüm hattını kesen tüm süreksizliklerin açıklıkları kaydedilerek yapılır. Diğer bir seçenek olarak da, başlıca süreksizlik takımında açıklığın ölçüm hattı boyunca gösterdiği değişimin ölçülmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Kapalı, açık ve dolgulu süreksizlikler (ISRM, 1981'den).



Şekil 2.13 Yumuşak dolgulu bir süreksizlik yüzeyinde mikrometre ile açıklık ölçümü.

Mekanik kazı, patlatma gibi olaylardan dolayı kaya yüzleklerinde gözlenen süreksizlik açıklıkları çoğunlukla örselenmiş açıklıklardır. Bu nedenle, kaya kütlelerinde yüzeyden içe doğru ölçülen açıklıklara göre yüzeyde ölçülen açıklıklar biraz daha geniştir. Süreksizlik açıklıklarının tanımlanması amacıyla ISRM (1981) tarafından önerilmiş ölçütler Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5 Süreksizlik açıklığının tanımlanmasına ilişkin ölçütler (ISRM, 1981).

Açıklık	Tanımlama	
<0,1 mm	Çok sıkı	"Kapalı" yapılar
0,1-0,25 mm	Sıkı	
0,25-0,5 mm	Kısmen açık	
0,5-2,5 mm	Açık	"Boşluklu" yapılar
2,5-10 mm	Orta derecede geniş	
>10mm	Geniş	
1-10 cm	Çok geniş	"Açık" yapılar
10-100 cm	Aşın geniş	
>100 cm	Boşluklu	

Açıklık parametresi değerlendirilirken, her süreksizlik seti için ortalama açıklık değeri belirlenir ve ortalama değerden daha geniş açıklığa sahip süreksizlikler, yerleri ve yönelimleri (eğim/eğim yönü) ile birlikte tanımlanır. Ayrıca aşın derecede geniş aralıklı (10-100 cm) süreksizlikler ve/veya boşluklu (>1m) yapıya sahip kaya kütleleri fotoğrafları da çekilerek kaydedilir (ISRM, 1981).

### 2.1.6 Dolgu Malzemesinin Özellikleri

Dolgu malzemesi, süreksizliğin arasını dolduran ve çoğunlukla süreksizliğini doldurduğu kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemedir. Kil, kum, silt, breş ve milonit sıkça rastlanan dolgu malzemesi çeşitleridir. Dolgunun kalınlığı, süreksizliğin iki yüzeyi arasındaki uzaklık olarak tanımlanır. Kalsit, kuvars vb. gibi yüksek dayanımlı mineraller haricinde, dolgulu süreksizlikler dolgusuz veya pürüzlü yüzeylere göre daha düşük makaslama dayanımına sahiptirler ve dayanımda en zayıf nokta olup bu nedenle dayanım üzerinde daha etkin bir rol oynamaları beklenir.



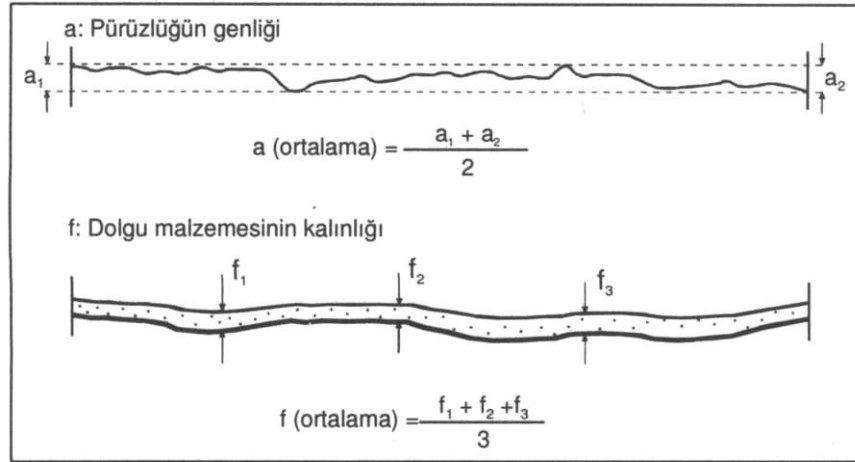
Şekil 2.14 Süreksizlik boşluğunda kil dolgu



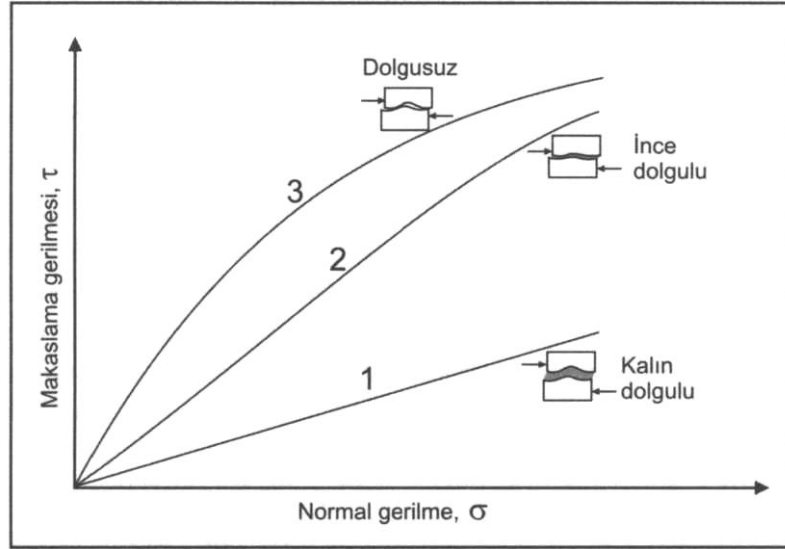
Şekil 2.15 Süreksizlik boşluğunda kuvars dolgu



Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre eğer dolgu malzemesinin kalınlığı ( $f$ ) süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğünün genliğinden ( $a$ ) büyükse, süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı dolgunun makaslama dayanımı tarafından denetlenir (Şekil 2.16). Pürüzlü ve pürüzsüz süreksizliklerde dolgu malzemesinin makaslama dayanımına etkisi, Şekil 2.17'de verilen yenilme zarflarıyla gösterilmiştir. Düşük normal gerilme ( $\sigma$ ) düzeylerinde süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımım ( $\tau$ ), dolgunun makaslama dayanımı denetlenmektedir (Şekil 2.17; 1 no.lu zarf). ince dolgulu süreksizliklerde normal gerilmenin artmasıyla pürüzlü yüzeyler dolguyu ezerek kenetlenirken, yenilme zarfının eğimi de artmaktadır (Şekil 2.17; 2 no.lu zarf). Dolgusuz, ancak pürüzlü bir süreksizlik yüzeyinde ise, normal gerilme arttıkça pürüzlülükler (çıkıntılar) yenilmekte ve süreksizlik boyunca meydana gelen yer değiştirme, dolayısıyla makaslama dayanımı, doğrudan düz süreksizlik yüzeyleri tarafından denetlenmektedir.



Şekil 2.16 (a) Dolgu malzemesinin kalınlığı ve pürüzlü süreksizlik yüzeyinin genliği arasındaki ilişki (ISRM, 1981'den).



Şekil 2.17 Dolgu malzemesinin kalınlığının süreksizliğin makaslama dayanımına etkisi (Hoek ve Bray, 1981'den düzenlenmiştir).

Dolgu malzemesinin özellikleri arasında aşağıda verilenler en önemli özellikler olup, tanımlanmaları gerekir (ISRM, 1981).

- (a) Mineraloji
- (b) Tane boyu dağılımı
- (c) Aşırı konsolidasyon oranı
- (d) Su içeriği ve geçirgenlik
- (e) Dolgunun daha önce maruz kaldığı makaslama yer değiştirmesi
- (f) Süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğü
- (g) Dolgunun kalınlığı
- (h) Süreksizlik yüzeyini oluşturan kayanın kırılma veya parçalanma özelliği

Yukarıda verilen tipik dolgu özelliklerinden arazide tanımlanabilecek olanlarla ilgili olarak ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütleri ana hatlarıyla aşağıda belirtilmiştir.

**Genişlik:** Dolgulu süreksizliklerin en küçük ve en büyük kalınlıkları %10 duyarlılıkta ölçülmeli ve ortalama genişlik değeri hesaplanmalıdır. Bu amaçla milimetre bölmeli şerit metre veya mikrometre kullanılır (ISRM, 1981).

**Bozunmanın derecesi:** Süreksizlik yüzeyi boyunca gelişen bozunma süreci sırasında türemiş bozunma ürününün doldurduğu süreksizlikler, ayrılmış veya parçalanmış kaya malzemesine ait dolgu malzemesini içerirler. Bu tür durumlarda aşağıdaki tanımlamalar dikkate alınır (ISRM, 1981).

**Ayrılmış:** Kaya; orijinal dokusunu koruyan, ancak minerallerin bir bölümünün veya tamamının bozunmaya uğrayarak toprak zemin gibi davrandığı bir malzemeye dönüşmüştür (ISRM, 1981).

**Parçalanmış:** Kaya, orijinal dokusunu korumakla birlikte, kırılma ancak minerallerin bozunmaya uğramadığı bir özelliğe sahiptir (ISRM, 1981).

**Mineraloji:** Drenajlı (akaçlamalı) koşulların egemen olduğu uzun süreli duraylılığı denetleyen bir faktör olması nedeniyle, dolgulu süreksizliklerde dolgunun içerdiği ince tane miktarı önemli olup, bunun miktarı ve türü tayin edilmelidir. Bu belirleme, özellikle dolguda aktif (şişen) killerin varlığı halinde daha da önem kazanır. Montmorillonit gibi aktif kil minerallerini içeren şişen killere karşılaşılması halinde, mümkünse, su içeriği tayinlerinin yapılmasında ve ayrıca şişme basıncı deneyleri için örnek alınmasında yarar vardır (ISRM, 1981).

**Tane boyu:** Süreksizliklere ait dolgu malzemeleri; kil, silt, kum ve kaya parçacıklarının yüzdeleri belirlenerek kabaca tanımlanabilir. Dolgu malzemesinden standart elek analizleri için genellikle yeterli miktarda örnek alımı güç olduğundan, bu işlem her zaman gerçekleştirilemez. Tane boyu dağılımının yanı sıra, killi dolgu malzemelerinin kıvam limitlerinin (likit limit, plastik limit, plastisite indeksi ve büzülme limiti) tayin edilmesi de önerilmektedir (ISRM, 1981).

**Dolgu malzemesinin dayanımı:** Dolgu malzemeleri, özellikle bu malzemelerin en zayıf özelliğe sahip olan ince taneli bölümü Tablo 2.6'da verilen basit indeks tanımlama deneyleri yapılarak dayanım özellikleri açısından değerlendirilebilir. Bu tablodaki tanımlamalar; uzun sürede drene olan kil, siltli kil veya kumlu silt ve kil karışımları gibi kohezyonlu toprak zeminlere uygulanır (ISRM, 1981).

**Önceki yerdeğiştirme:** Dolgulu bir süreksizliğin daha önce makaslama yer değiştirmesine maruz kalıp kalmadığının belirlenmesi de önem taşır. Bu amaçla, dolguda kaygan yüzeylerin ve makaslama izlerinin varlığına bakılır (ISRM, 1981).

**Su içeriği ve geçirgenlik:** Dolgulu bir süreksizliğin ve özellikle kil dolgunun su içeriği ve geçirgenliği, Tablo 2.7'de verilen ölçütler esas alınarak pratik bir şekilde tanımlanabilir (ISRM, 1981).

Tablo 2.6 Toprak zeminlerin drenajsız makaslama dayanımlarının değerlendirilmesi için tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

Dayanım simgesi	Tanım	Sahada tanımlama ölçütü	Tek eksenli sıkışma dayanımı, $\sigma_c$ (MPa)
S <sub>1</sub>	Çok yumuşak zemin	El, yumruk haline getirilerek zeminde 2,5 cm civarında bir derinliğe kadar bastırılabilir.	< 0,025
S <sub>2</sub>	Yumuşak zemin	Başparmak, zeminin içinde birkaç inç'lik derinliğe kadar bastırılabilir.	0,025-0,05
S <sub>3</sub>	Katı zemin	Başparmak, orta derecede bir çabayla zeminde birkaç inç'lik derinliğe kadar bastırılabilir.	0,05-0,10
S <sub>4</sub>	Sert zemin	Başparmakla kilde çentik oluşturulabilir, ancak zemine parmakla girilmesi için büyük çaba gerekir.	0,10-0,25
S <sub>5</sub>	Çok sert zemin	Zemine elle bastırılarak nüfuz edilemez.	0,25-0,50
S <sub>6</sub>	Aşırı derecede sert zemin	Zeminde tırnakla çentik oluşturulması güçtür.	>0,50

Tablo 2.7 Dolgulu süreksizlikler için su durumunu tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

W <sub>1</sub>	Dolgu malzemesi, aşırı derecede konsolide olmuş ve kurudur. Geçirgenliğin çok düşük olması nedeniyle süreksizlik yüzeyi boyunca önemli bir su akışı gözlenmez.
W <sub>2</sub>	Dolgu malzemesi nemli olmakla birlikte, serbest su akışı yoktur.
W <sub>3</sub>	Dolgu malzemesi ıslaktır ve yer yer su damlacıkları gözlenir.
W <sub>4</sub>	Dolgu malzemesinin yıkanmış olduğuna ilişkin belirtiler vardır. Ancak sürekli su akışı söz konusu değildir.
W <sub>5</sub>	Dolgu malzemesi yerel olarak yıkanmıştır ve yıkanma kanalları boyunca belirgin su akışı vardır.
W <sub>6</sub>	Dolgu malzemesi tamamen yıkanmıştır ve çok yüksek su basıncı söz konusudur.

(ISRM, 1981)'e göre dolgulu süreksizliklerin tanımlanması için projenin veya araştırmanın boyutlarına ve önemine bağlı olarak belirlenecek parametreler aşağıda verilmiştir.

*I. Geometri:*

Genişlik

Yüzey pürüzlülüğü

Süreksizlik yüzeyinin durumunu gösteren taslak çizim

*II. Dolgunun tipi:*

Mineraloji Tane boyu

Bozunmanın derecesi

Dolgunun indeks parametreleri

Şişme potansiyeli

### *III. Dolgu malzemesinin dayanımı:*

Basit tanımlama deneyleri

Makaslama dayanımı

Aşın konsolidasyon oranı

Yerdeğiştirmenin olup olmadığı

### *IV. Sızıntı:*

Su içeriği ve geçirgenlik için nicel veri

## **2.1.7 Süreksizlik Yüzeylerinin Bozunma Derecesi ve Dayanımı**

Süreksizlik yüzeylerinin çevresindeki, özellikle süreksizlik yüzeylerinin dolgusuz ve birbiriyle temas halinde olması koşulunda, kayanın dayanımı makaslama dayanımı açısından çok önemlidir. Genelde yüzeye yakın kesimlerde kaya kütleleri bozunmuş olmaktadır, daha derine gidildiğinde ise hidrotermal süreçlere bağlı olarak alterasyona uğramış olabilirler. Bu sebeple kaya malzemesinin bozunma derecesi süreksizlik yüzeylerinin dayanımını büyük ölçüde etkiler. Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre süreksizlik yüzeylerinin dayanımını bu denli yakından ilgilendiren bozunmanın, mekanik parçalanma ve kimyasal ayrışma gibi iki önemli sonucu vardır. Genel olarak kaya üzerinde fiziksel (mekanik) ve kimyasal faktörler birlikte etkiler. Ancak, iklim koşullarına bağlı olarak, bunlardan biri diğerinden daha baskın olabilir. Fiziksel bozunma, süreksizliklerin açıklıkları boyunca meydana gelir ve kayanın parçalanması sonucu komşu minerallerde dilinim ve kırıkların gelişerek yeni mikro süreksizliklerin oluşumuna neden olur. Kimyasal bozunma ise, kayalarda renk değişimi ve özellikle silikat minerallerinin kil minerallerine dönüşmesiyle sonuçlanmaktadır. Ancak kuvars gibi dayanıklı bazı mineraller bu etkilere karşı direnç göstererek değişmeden kalırlar. Bu sebeple süreksizliklerdeki, süreksizlik yüzeylerinde gözlenen dolgu tanımlanması gereklidir.

ISRM, 1981'e göre arazi çalışmaları sırasında pratik olarak kullanılacak bozunma sınıflaması ölçütleri, kaya kütlesi ve kaya malzemesi için sırasıyla Tablo 2.8 ve 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.8 Kaya kütlelerinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama (ISRM, 1981).

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

Dayanım basit deneylerden veya Schmidt çekicinden yararlanılarak bulunabilmektedir. Tablo 2.10'da belirtilen basit deneyler, arazide kaya malzemesi üzerinde kolaylıkla yapılabilmektedir. Fakat bu deneylerden elde edilen dayanım tamamen göreceli olmaktadır.

Tablo 2.9 Kaya malzemesinin bozunma derecesiyle ilgili sınıflama (ISRM, 1981).

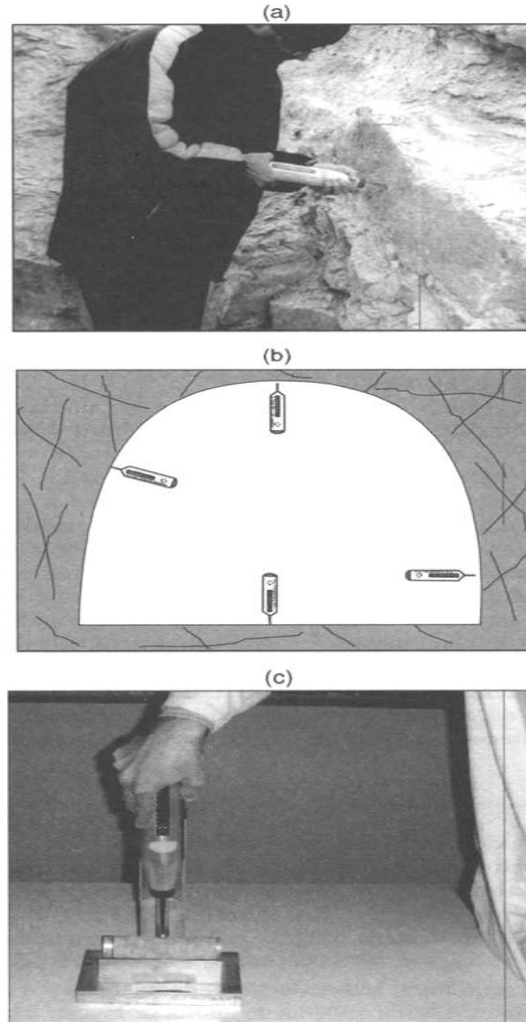
Tanım	Tanımlama ölçütü
Taze (bozunmamış)	Kaya malzemesinin bozunduğuna ilişkin belirgin bir gösterge yoktur.
Rengi değişmiş	Orijinal kaya malzemesinin rengi değişmiş olup, renkteki değişimin derecesi belirgindir. Renk değişimi sadece bazı mineral taneleriyle sınırlı ise, bu durum kayıtlarda belirtilmelidir.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

Tablo 2.10 Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli sıkışma dayanımına ve arazi tanımlamalarına göre sınıflandırılması (ISRM, 1981).

Simge	Tanım	Saha tanımlaması	Tek eksenli sıkışma dayanımı, $\sigma_{ci}$ (MPa)
R <sub>0</sub>	Aşırı derecede zayıf kaya	Kayanın yüzeyinde tırnak ile çentik oluşturulabilir.	0,25-1,10
R <sub>1</sub>	Çok zayıf kaya	Jeolog çekiciyle sert bir darbeye uyalanan kaya, çakı ile doğranabilir.	1,0-5,0
R <sub>2</sub>	Zayıf kaya	Kaya, çakı ile güçlkle doğranır. Jeolog çekici ile yapılacak sert bir darbe kayacın yüzeyinde iz bırakır.	5,0-25
R <sub>3</sub>	Orta derecede sağlam kaya	Kaya, çakı ile doğranamaz. Kaya örneği, jeolog çekici ile yapılacak tek ve sert bir darbeye kırılabilir.	25-50
R <sub>4</sub>	Sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile birden fazla darbenin uygulanması gerekir.	50-100
R <sub>5</sub>	Çok sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	100-250
R <sub>6</sub>	Aşırı derecede sağlam kaya	Kaya örneği, jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	>250



Dayanımı tahmin etmekte kullanılan Schmidt çekici deneyi, eklem yüzeylerinin sıkışma dayanımını veren ve arazide kolaylıkla uygulanabilen pratik bir yöntemdir. Deney sırasında çekiç süreksizlik yüzeylerine dik yönde tutulur (Şekil 2.18a). Deneyin yapılacağı yüzeydeki döküntülerin sıkışma dayanımını etkilememesi açısından temizlenmiş olması çok önemlidir. Ulusay ve Sönmez (2007)'e göre bu deney, çok dar aralıklı süreksizlikleri içeren gevşek kaya kütleleri için uygun değildir. Bu tür koşullarda, kaya kütlesi ortamından alınmış küçük blok örnekler laboratuvarında metal bir kanala yerleştirildikten sonra (Şekil 2.18c) Schmidt çekici uygulanmalıdır (ISRM, 1981).

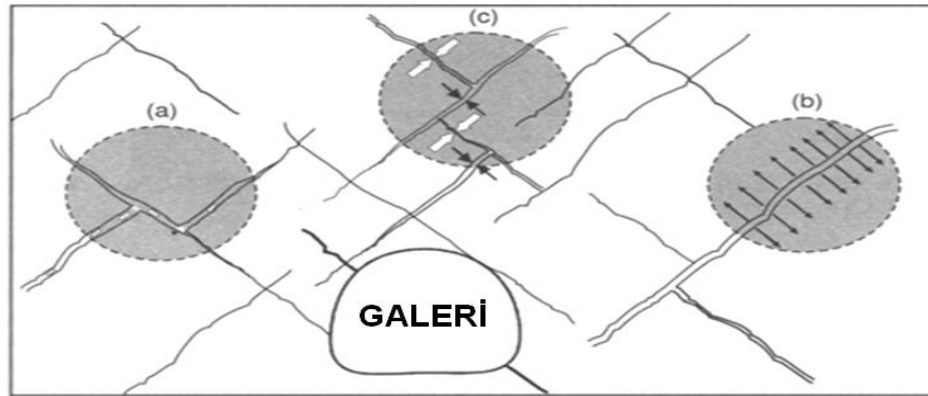


Şekil 2.18 Schmidt çekici deneyinin: (a) arazide süreksizlik yüzeyinde; (b) tünelde farklı konumlarda ve (c) laboratuvarında yapılması. (Ulusay ve Sönmez, 2007).

### 2.1.8 Süreksizlik Yüzeylerindeki Su Durumu

Kaya kütlelerinde suyun sızması, birbirleriyle bağlantılı süreksizlikler boyunca oluşan akışla gerçekleşir. Süreksizlikler boyunca sürekli bir su akışının olması kaya kütlelerinin ve süreksizliklerin mekanik ve hidrojeolojik özellikleri değiştirebilir (Şekil 2.19a). Aynı zamanda süreksizlik yüzeyleri arasında oluşan su basıncı normal gerilmeyi ve buna bağlı olarak makaslama dayanımını azaltır (Şekil 2.19b) veya yüksek normal gerilmeler altında süreksizliklerin hidrolik iletkenliği azalır (Şekil 2.19c).

Kaya kütlelerinin hidrojeolojik özelliklerinin tayini amacıyla sondaj yapılmasının ve bu sondajlar boyunca pompaj ve izleme deneyleri gibi arazi deneylerinin gerçekleştirilmesinin yanı sıra, yeraltı suyu tablasının belirlenmesi, piezometre yerleştirilmesi vb. türdeki uygulamalar yaygındır (Ulusay ve Sönmez, 2007). Bununla birlikte, kaya mühendisliği çalışmalarının ilk aşamalarında genellikle pek fazla sondaj yapılmadığı için, hidrojeolojik özellikler başlangıçta daha çok gözleme dayalı tanımlamaları esas alan ölçütlerle belirlenir. Bu amaçla ISRM (1981) tarafından önerilmiş olan ve kazı aynalarında yapılacak gözlemleri esas alan su sızıntısıyla ilgili tanımlamalardan yararlanılmaktadır. Dolgusuz ve dolgulu süreksizlikler için önerilen bu tanımlamalar Tablo 2.11'de verilmiştir. Ayrıca dolgusuz ve dolgulu süreksizlikler için su sızıntılarını sınıflama ve tanımlama ölçütleri Tablo 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.19 Kaya kütlelerinde süreksizlikler boyunca su akışı ve olası etkileri (Hudson, 1989).

Tablo 2.11 Dolgusuz ve dolgulu süreksizlikler için su sızıntılarını sınıflama ve tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

Sızıntı sınıflaması	Tanımlama
<b>DOLGUSUZ SÜREKSİZLİKLER</b>	
1	Süreksizlik yüzeyi kapalı ve kuru, su akışı gözlenmiyor
2	Süreksizlik yüzeyi kuru' ve suyun aktığına ilişkin bir gösterge yok
3	Süreksizlik yüzeyi kuru, ancak suyun akmış olduğuna ilişkin izler (yosunlanma gibi) var
4	Süreksizlik yüzeyi nemli, ancak su akışı yok
5	Süreksizlik yüzeyinde damlalar halinde sızıntı var, ancak sürekli bir akış gözlenmiyor
6	Süreksizlik yüzeyi boyunca sürekli bir su akışı var (lt/dk olarak ölçülebilir veya basınç düşük, orta ve yüksek şeklinde tanımlanabilir)
<b>DOLGULU SÜREKSİZLİKLER</b>	
1	Dolgu malzemesi aşırı konsolide olmuş malzemeden oluşuyor ve geçirgenliğinin az olması nedeniyle önemli derecede su akışı görülüyor
2	Dolgu ıslak, yer yer su damlacıkları gözleniyor
3	Dolgu malzemesi su damlalarıyla ıslanmış
4	Dolgu malzemesinin yıkanmış-ıslanmış olduğuna ilişkin izler ve sürekli su akışı gözleniyor
5	Dolgu malzemesi yerel olarak yıkanmış-taşınmış ve yıkanma kanalları boyunca dikkate değer miktarda su akışı var
6	Dolgu malzemesi tamamen taşınmış, su basıncı yüksek

Tablo 2.12 Kaya kütleleri için su sızıntılarını sınıflama ve tanımlama ölçütleri (ISRM, 1981).

Sızıntı sınıflaması	Tanımlama
1	Süreksizlik yüzeyleri kuru, sızıntı yok
2	Çok az sızıntı gözleniyor
3	Orta derecede akış, sürekli akışın gözlemlendiği süreksizlikler belirlenmeli
4	Önemli miktarda akış gözlenen süreksizlikler belirlenmeli
5	Ender olarak yüksek miktarda su akışı gözleniyor

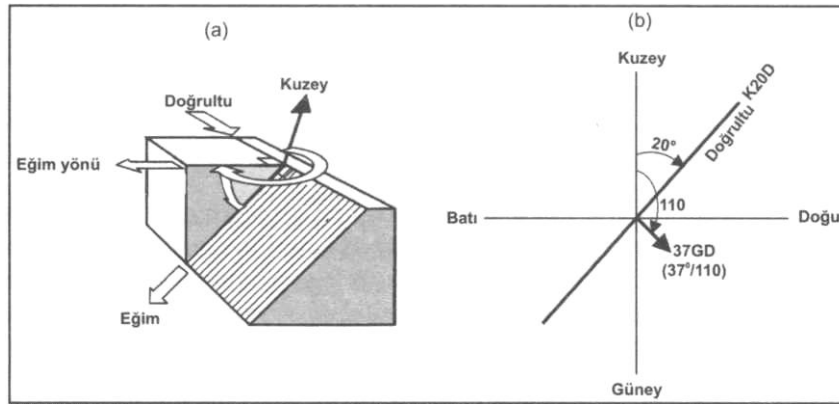
### 2.1.9 Süreksizliklerin Yönelimi ve Süreksizlik Takımı Kavramı

Süreksizliklerin uzaydaki konumları, özellikle genel jeoloji çalışmalarında esas alınan eğim ve doğrultuları parametreleriyle tanımlanır. Eğim ve doğrultu ise jeolog pusulası vasıtasıyla ölçülmektedir (Şekil 2.20). Fakat arazi uygulamalarında

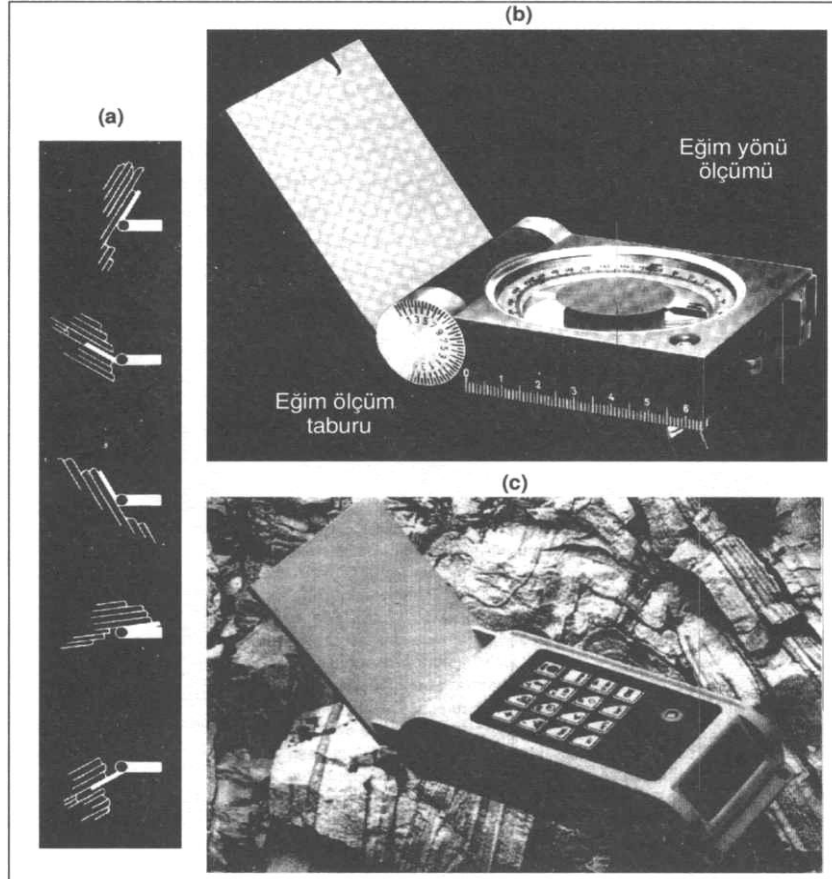
zamandan tasarruf amacıyla, doğrultu yerine eğim yönünün ölçülmesi tercih edilmektedir. Bir süreksizlik düzleminin yatay düzlemle yaptığı açıya eğim denilmektedir. Kuzeyden itibaren saat yönünde ölçülen ve kuzey yönü ile eğim çizgisinin yatay düzlemdeki izdüşümü arasındaki açı ise, eğim yönü olarak tanımlanır (Şekil 2.21a). Doğrultu ve eğim yönü arasında 90°'lik bir fark vardır (Şekil 2.21b). Eğim ve eğim yönü, klasik jeolog pusulasından biraz farklı olan pusulalarla ölçülür (Şekil 2.22a). Bu pusulalarla eğim, pusulanın sırtındaki tamburdan, eğim yönü ise iç kadrandan ölçülmektedir (Şekil 2.22b). Arazide ölçülen süreksizlik yönelimi verileri ise, grafiksel olarak "gül diyagramları ve histogramlar" ve "stereografik izdüşüm" teknikleriyle değerlendirilir.



Şekil 2.20 Bir süreksizlik düzleminin yöneliminin pusula ile ölçümü (Ulusay ve Sönmez, 2007).



Şekil 2.21 (a) Doğrultu, eğim ve eğim yönü kavramlarını gösteren blok diyagram ve (b) doğrultu ve eğim yönü arasındaki ilişkiye bir örnek (Ulusay ve Sönmez, 2007).



Şekil 2.22 (a) Eğim ve eğim yönünün ölçümü, (b) eğim ve eğim yönünü ölçen pusula (Cocla Compass) ve (c) aynı pusulanın verileri depolayabilen elektronik donanımlı dijital modeli. (Ulusay ve Sönmez, 2007).

## 2.2. Kaya Malzemesi Mekanik Özellikleri

Kayaçların çoğunun yapıları, kristalin ve amorf parçacıkların çimentolu materyal ile birleşmelerinden oluşmuştur. Kalkerlerin bir kısmında olduğu gibi kristallerin kimyasal bileşimleri oldukça homojen olmalarına karşın, granitlerde olduğu gibi kristalin parçalar homojen 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 kütesinin mekanik özelliklerini biraz değiştirmek olacaktır. Kayaç kütesi 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 kütesinin 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 kütesi, yaklaşık olarak devamlı bir ortam kabul edilebilir ve kayaçtan alınan deney parçasının ortalama özellikleri kayaç kütesini temsil edebilir.

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

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

Bu faktörlerin önemlilik dereceleri, yapılacak yapının boyutları ile kayaç kütlesinde 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.

Kaya mühendislik dizaynlarında, kaya dayanım özelliklerinin ve elastik sabitlerinin bilinmesi gerekmektedir. Mühendislik uygulamalarında dayanım, verilen çevrede bir kopmaya sebep olacak birim alana düşen kuvvet olarak kabul edilebilir.

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
- ı- Süre

Kayaç dayanımı, bozulmamış kayaç örneklerinin üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile saptanabilir. Bu deneyler her yerde kolaylıkla yapılabilmekte ve yorumlanabilmektedir. Bu bölümde kaya malzemesi dayanım ve indeks özelliklerinden, Kaya Yapısı İndeksi (KYİ) kapsamında kullanılan deneyler verilecektir.

### **2.2.1 Tek Eksenli Basma Dayanımı**

Sondaj karotlarından hazırlanan silindirik kayaç numuneleri üzerine uygulanan en yaygın deney tek eksenli basınç deneyidir. Bu deney kayaçların, tek eksenli basma dayanımları,  $\sigma_c$ , ve elastik sabitlerin (Youngs Modülü, E, Poisson's oranı..) belirlenmesinde kullanılır. Kayacın tek eksenli basma dayanımı, kaya kütle sınıflandırmasında kullanılır ve kaya kütlesi dayanımında temel parametredir. Şekil 2.23'te deneyde kullanılan pres görülmektedir.

Kayaçların tek eksenli basma dayanımlarının belirlenmesinde uygulanacak deney yöntemi ISRM tarafından verilmiştir (ISRM, 1978). Önerilen başlıca deney koşulları aşağıdaki gibidir.

- a) Deney numunesi tam bir silindir olmalı, boy/çap oranı 2,0-3,0 arasında ve çapı NX karot çapından daha küçük olmamalı (yaklaşık 54mm). Numune çapı en büyük kayaç tanesinin en az 10 katı olmalıdır.
- b) Numunenin alt ve üst yüzeyleri 0,02mm hassasiyette düz olmalı ve numune eksenine diklikleri 0,001 rad veya 50 mm için 0,05 mm hassasiyette olmalıdır.
- c) Numune ile deney plakaları arasında herhangi bir madde olmamalıdır.
- d) Numuneler en fazla 30 günlük olmalı ve deney anına kadar doğal su içeriklerini muhafaza etmeleri sağlanmalıdır.
- e) Numunenin yan yüzeyi pürüzsüz olmalı ve düzgünlüğü boyunca 0,3 mm.'den daha küçük bir hassasiyete sahip olmalıdır.
- f) Numunenin çapı, üst, orta ve alt kısımlarında ve her kısımda en az iki okuma yapılarak hassas olarak ölçülmelidir. Numunenin yüksekliği 1 mm. hassasiyetle okunmalıdır.
- g) Numune üzerine uygulanan yük belirli bir seviyede olmalı (0,5-1,0 Mpa/saniye).
- h) Eksenel yük ve eksenel ve çapsal deformasyonlar deney sırasında ölçülmelidir.



i) En az 5 numune üzerinde deney tekrarlanmalıdır.



Şekil 2.23 Tek eksenli basma dayanımını belirlemede kullanılan 300 ton basınç verebilme özelliğine sahip pres

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

Aynı mineral bileşiminde,  $\sigma_c$  (tek eksenli basma dayanımı) porozite, ayrışma derecesi ve mikro çatlak durumuna göre değişebilir. Örneğin artan porozite, ayrışma derecesi ve mikro çatlaklı numunede  $\sigma_c$  azalır, ayrıca artan su içeriği ile  $\sigma_c$  düşebilir.

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı (farklı porozite, su içeriği), aynı jeolojik isme sahip kayaç numunelerinin tek eksenli basma dayanımı farklılıklar gösterebilir.

Örneğin, kum taşının tek eksenli basma 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 numunesi klivaj nedeniyle anizotropik davranış göstereceğinden, kuvarsın çok sağlam ve kırılğan olduğu tahmin edilebilir. Buna benzer özelliklerin bazı kayaçların tipik karakteristiklerini ifade etmelerine karşın, kayaçların sadece jeolojik tanımlarına göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça tehlikeli ve yanıltır.

Basma 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 basma dayanımı, hem sınıflama hem de tasarım için gereklidir. Tek eksenli basma deneyinden kayacın içsel sürtünme açısı ( $\theta$ ) ve kohezyonu ( $C_o$ ) yaklaşık olarak bulunabilir. Tablo 2.13'te Kayaçların tek eksenli basma dayanımlarına göre sınıflandırılmaları verilmektedir.

Tablo 2.13 Kayaçların tek eksenli basma dayanımlarına göre sınıflandırılması

Dayanım	MPa
Çok Zayıf	< 1.6 MPa
Zayıf	1.6-5 MPa
Orta	5-16 MPa
Sağlam	16-50 MPa
Çok Sağlam	> 50 MPa

### 2.2.2 Nokta Yük Dayanımı

Nokta yükleme dayanımı testi hem düzgün silindirik karot numuneleri üzerinde hem de düzensiz şekilli numuneler üzerinde uygulanabilir. Bu deney tek eksenli basma dayanımının tahmini olarak bulunmasına yardımcı olur. Bu yüzden kayaç

karakteristiklerinin yaklaşık olarak bulunmasında ve kayaçların sınıflandırılmasında kullanılır.

### **-Çap Deneyleri**

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

### **-Eksenel Deneyler**

Eksenel deney için numunelerin L/D oranı 0,3-1,0 arasında olmalıdır. Uzun numuneler olması durumunda numune boyunca çap deneyleri yapılarak, eksenel deneyler için uygun numuneler elde edilebilir. Diğer işlemler çap deneyindeki gibidir.

Düzeltilmemiş nokta yükleme dayanımı,  $I_s$  :

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (\text{kPa})$$

D=Numune 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.

$$\text{Tek eksenli basma dayanımı} = 24 \cdot I_{s(50)}$$

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

### 2.2.3 Schmidt Sertliği

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 kayaya üzerine bastırılır. Yay ile hareket kazanan çekiç darbeyi kayaya ileten uca çarpar ve geri zıplar. Zıplama değeri indeks değeri olarak saptanır. Alet, hem arazide hem de laboratuvarda kullanılabilir. Laboratuvar örnekleri 152x76 mm. boyutunda olmalı ve aynı örnekte 20 defa denenmelidir. Tablo 2.14'te Schmidt Çekici değerlerine göre kaya sertliği tasvirleri, Şekil 2.24'te ise deneyde kullanılan Schmidt Çekici görülmektedir.

Tablo 2.14 Schmidt Çekici değerlerine göre kaya sertliği tasviri (ISRM, 1978)

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)



Şekil 2.24 Schmidt Çekici

#### ***2.2.4 Disk Makaslama Dayanım İndeksi Deneyi (Block Punch Index)***

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 (Block Punch Strength Index, D.M.D.İ.)'nin tayin edilmesi ve D.M.D.İ. 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 parametredir. 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.

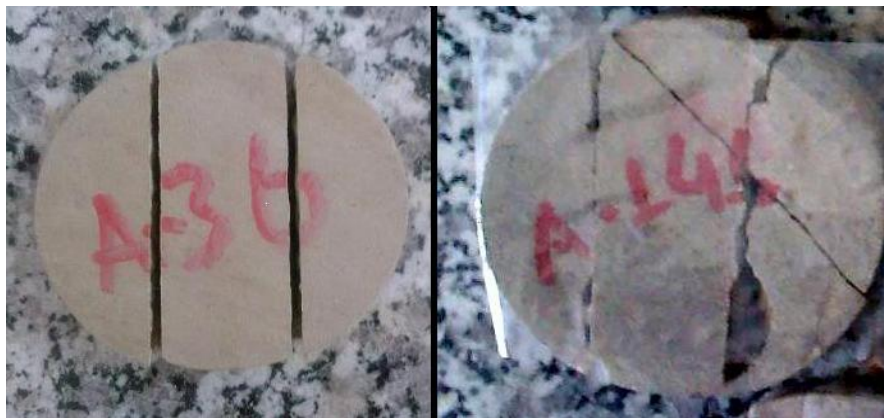
Yukarıda belirtilen örnek hazırlamayla ilgili güçlük ve sınırlamaları giderebilecek ve daha küçük örneklerin kullanılabilceği indeks deneyler her zaman ilgi çekici olmuştur. Bu amaçla, Hollanda'nın Delft Üniversitesi'nde yapılan bir düzenekle D.M.D.İ. deneyi ilk kez gündeme gelmiştir (Schirer,1988). Ancak ince disk şeklindeki örneklerin kullanıldığı bu araştırmada, az sayıda kaya türü üzerinde

çalışılmış ve deneyde örnek boyut etkisi ile BPI'nın kullanım alanları dikkate alınmamıştır.

Çalışmalar sonucunda, diğer indeks deneylerle karşılaştırıldığında, tek eksenli sıkışma dayanımının D.M.D.İ.'den daha az bir hata payıyla dolaylı olarak belirlenebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca bu deneyde boyut düzeltme faktörleri ve kaya malzemesinin dayanıma göre sınıflandırılmasında D.M.D.İ.'nin alternatif bir parametre olabileceği de önerilmiştir. Şekil 2.25'te deney düzeneği, Şekil 2.26'da ise deney numuneleri gözükmektedir.



Şekil 2.25 Yüklemeye başlığı, düzenek ve kırılmış numune



Şekil 2.26 D.M.D.İ deneyinde düzenli kırılan ve düzensiz kırılan numuneler

### 2.2.5 Suda Dağılma Dayanımı

Suda dağılma dayanımı testi, 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 numuneyi temsilen 10 tane numune seçilir. Tamburun kuru ve temiz ağırlığı "A" kaydedilir. Seçilen numuneler tambura yerleştirilir ve 105° C'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Tambur ve numunelerin toplam kuru ağırlığı "B" kaydedilir. Tambur milinin seviyesine kadar akışkanla doldurulur. Test 10 dakikalık bir periyot için harekete geçirilir. Periyot sonunda tambur kaldırılır ve tertibat, numunelerle birlikte 105°C 'de sabit ağırlığa kadar kurutulur. Bu kurutma sonrasındaki ağırlık "C" kaydedilir. Suya dayanıklılık indeksi, başlangıçtan kuru numuneye doğru % oran olarak hesaplanır.

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

Burada ;

$I_d$  : Suya dayanıklılık indeksi

B : İşlem başlamadan önce tambur ve numunenin toplam kütlesi (gr)

$W_F$  : Tambur ve deney sonunda elek üstünde kalan fırında kurutulmuş numunenin deney sonundaki kütleler toplamı (gr)

C : Tambur kütlesi (gr)

Ağırlık bulmada diğer bir yöntem ise, tambur ve tertibatı hariç tutmaktır. Bu durumda numuneleri kuruma tepsisine taşırken numune kaybını önlemek gerekir. Dağılma dayanım sınıflandırılması Tablo 2.15'te görülmektedir.

Tablo 2.15 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 RQD'nin Kaya Kütle Karakterizasyonundaki Rolü

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 aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.16 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

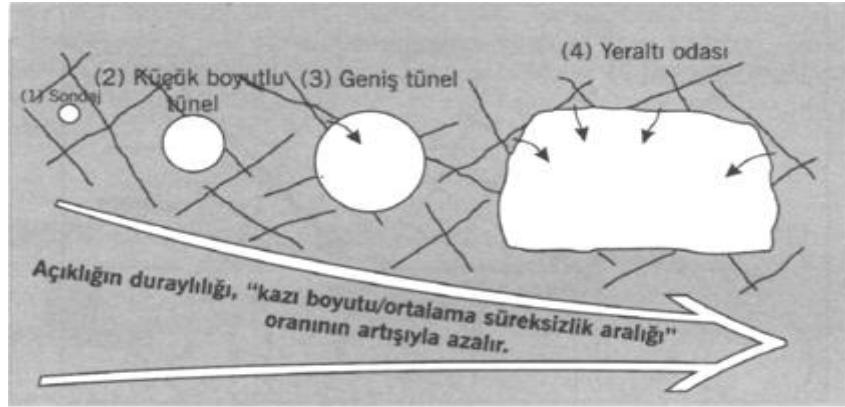
Pratik tecrübeler çatlak aralığının RQD ile birlikte kayanın niteliği ve onun yükleme ve hafriyata karşı olası uyumu hakkında faydalı bilgiler verebileceğini göstermiştir. Yine de elde edilen rakamlar nitelikçe yol gösterici olarak irdelenmeli, ancak kararların dayanacağı kesin değerler olarak kabul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

### 2.4 Boyut Etkisi

Bu kısımda Şekil 2.23'de görüldüğü üzere kaya külesini değerlendirirken sadece kaya külesinin kalitesini kazı boyutu olmaksızın değerlendirmenin yanlışlığı



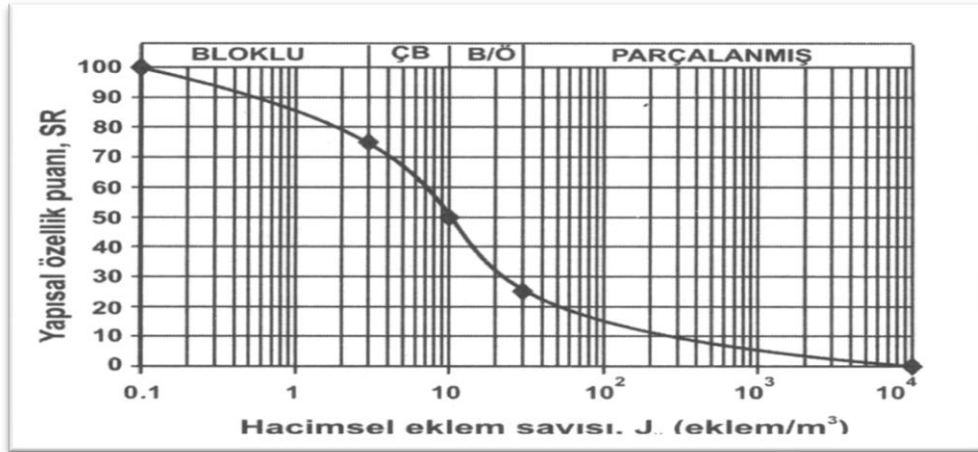
belirtilmek istenmiştir. Eklemlı kaya kütlesi ortamında yeraltı açıklığının boyutu büyüdükçe, kaya malzemesinin barındırdığı süreksizliklerden dolayı oluşan blokların boyutunu aşacağı için karşılaşılan zorluklar 4 numaralı açıklıkta açıkça görülmektedir. Burada açıklığın stabilitesi açıklığın boyutu ve kaya kütlesinin davranışıyla denetlenmektedir. Dolayısıyla bu örnek, tasarım parametreleri seçiminin tasarımdaki önemini vurgulanmaktadır



Şekil 2.27 Kazı boyutlarının artışıyla kaya kütlesi kavramının önem kazanmasını gösteren şematik kesit (Ulusay ve Sönmez, 2007).

## 2.5 Yapısal Özellik

Yapısal özellik, GSI sistemine 1999 yılında Sönmez ve Ulusay tarafından eklenmesi önerilmiştir. Aşağıdaki çizelgeden de görülebileceği gibi incelenen kaya kütlesinin kalitesi arttıkça, Yapısal Özellik Puanı artmaktadır. Diğer bir deyişle,  $m^3$  başına düşen çatlak sayısı azaldığında kaya kütlesi ve yapısal özellik puanı artmaktadır.  $M^3$  başına düşen çatlak sayısı arttığında ise kaya malzemesi kalitesi ve buna bağlı olarak Yapısal Özellik Puanı düşmektedir.



Şekil 2.28 Yapısal özellik puanı çizelgesi (Sönmez ve Ulusay, 1999'dan düzenlenmiştir).

## 2.6 Örselenme Faktörü

GSI ölçütünü geliştirenler tarafından daha önce dikkate alınmayan örselenme faktörü, ölçütün son versiyonuna dahil edilmiş ve Eşitlik 2.5'de "D" simgesiyle gösterilmiştir. "D", patlatma hasarı ve kazı sırasında gelişen gerilme boşalmasına maruz kalan kaya kütlelerinin örselenme derecesine bağlı bir faktördür. "D" faktörü, örselenme koşulu için daha önce Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen  $b_m$  ve  $b_s$  parametreleriyle benzerlik taşımaktadır. Bu faktör, örselenmemiş kaya kütlesi için sıfırdan örselenmiş kaya kütlesi için 1'e kadar değişen değerler almakta olup, D'nin seçimi için önerilmiş kılavuz Tablo 2.14' te verilmiştir.

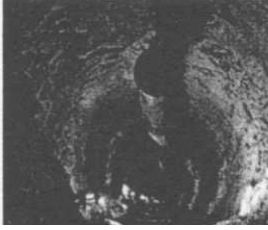


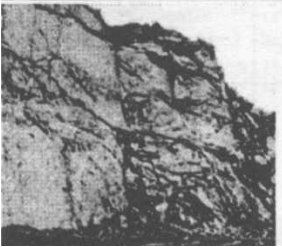

$$B = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (2.5)$$

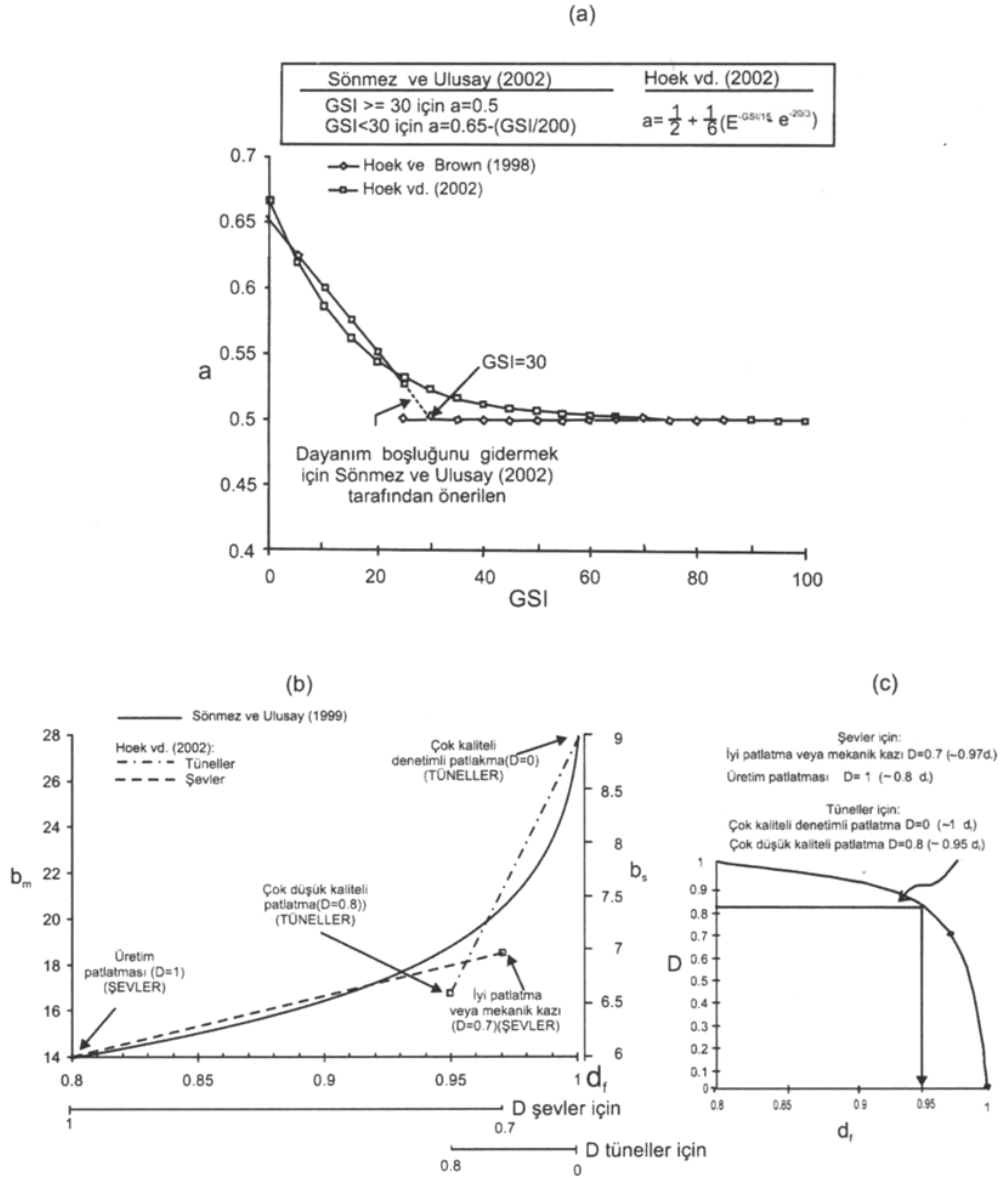
$m_b$  parametresi de yeni versiyonda GSI'nin tüm değerleri dikkate alınabilecek şekilde düzenlenerek aşağıdaki ifadeyle verilmiştir.

$$M_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2.6)$$

Gerek Sönmez ve Ulusay (2002), gerekse Hoek vd. (2002) tarafından yapılan ölçütle ilgili değişiklik önerileri Tablo 2.14'te ve grafik olarak Şekil 2.29'da karşılaştırılmıştır. Şekil 2.29a, GSI=30 değerinde her iki değişiklik önerisine göre hesaplanan "a" değeri için en fazla % 4'lük bir fark söz konusu olup, GSI-a ilişkileri her iki öneride de oldukça benzerdir.

Tablo 2.17 Örselenme faktörü D'nin tahmini için kılavuz (Hoek vd., 2002).

Kaya kütlelerinin görünümü	Kaya kütleleri tanımı	Önerilen D değeri
	Yüksek kaliteli denetimli patlatma veya tünel açma makinesiyle yapılan kazı tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur.	D = 0
	Düşük kaliteli kaya kütlelerinde (patlatma yapılmamış) mekanik olarak veya elle yapılan kazı, tüneli çevreleyen kaya kütlelerinde en düşük derecede örselenmeye neden olur. Sıkışan zemin sorunu önemli derecede taban kabarmasına yol açar ve soldaki fotoğraftaki gibi geçici bir taban betonu dökülmediği takdirde önemli düzeyde örselenme olur.	D = 0 D = 0,5 Taban betonu yok
	Çok kötü kaliteli patlatma sert kaya tünellerinde çevre kayasının 2-3 m içine nüfuz edecek şekilde şiddetli yerel hasara neden olur.	D = 0,8
	İnşaat mühendisliğiyle ilgili şev kazılarında küçük ölçekli patlatma kaya kütlelerinde orta derecede hasara neden olur; özellikle denetimli patlatma yapılırsa kaya kütlelerinin görünümü soldaki fotoğraftaki gibidir. Bununla birlikte, gerilme boşalımı da bir miktar örselenme yaratır.	D = 0,7 İyi patlatma D = 1,0 Kötü (zayıf) patlatma
	Çok uzun açık işletme şevleri, üretim amaçlı aşın patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilme azalımından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripperleme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda şevin maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.	D = 1,0 Üretim patlatması D = 0,7 Mekanik kazı

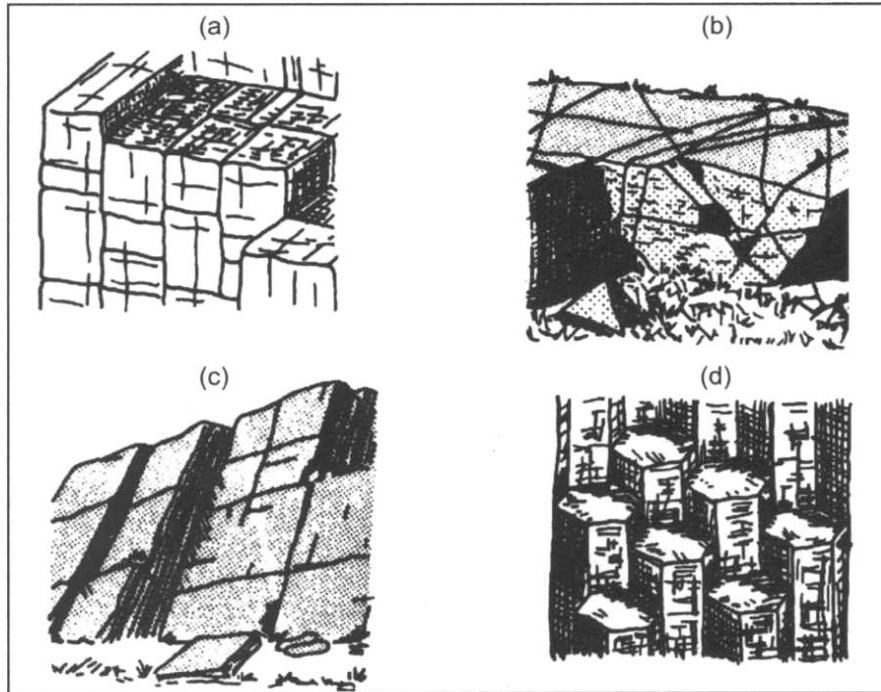


Şekil 2.29 Ölçütün 2002 yılındaki son versiyonu için Hoek vd. (2002) ile Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen değişikliklerin karşılaştırılması: (a) GSI-a ilişkisi; (b) örselenme faktörleri ve (c)  $d_rD$  ilişkisi (Sönmez ve Ulusay, 2002'den).

## 2.7 Blok Boyutunun Etkisi

Blok boyutu kaya kütlelerinin davranışının önemli bir göstergesi olup, süreksizlik aralığı, takım sayısı ve yönelimi gibi faktörler oluşan blokların şeklini tayin eder. Blok büyüklüğüne ve şekline göre ISRM (1981) tarafından kaya kütleleri için önerilen gruplandırma ve tanımlamalar aşağıda, bu tanımlamalara esas olan kaya kütlelerinin arazideki görünüşleri ise Şekil 2.30'da verilmiştir.

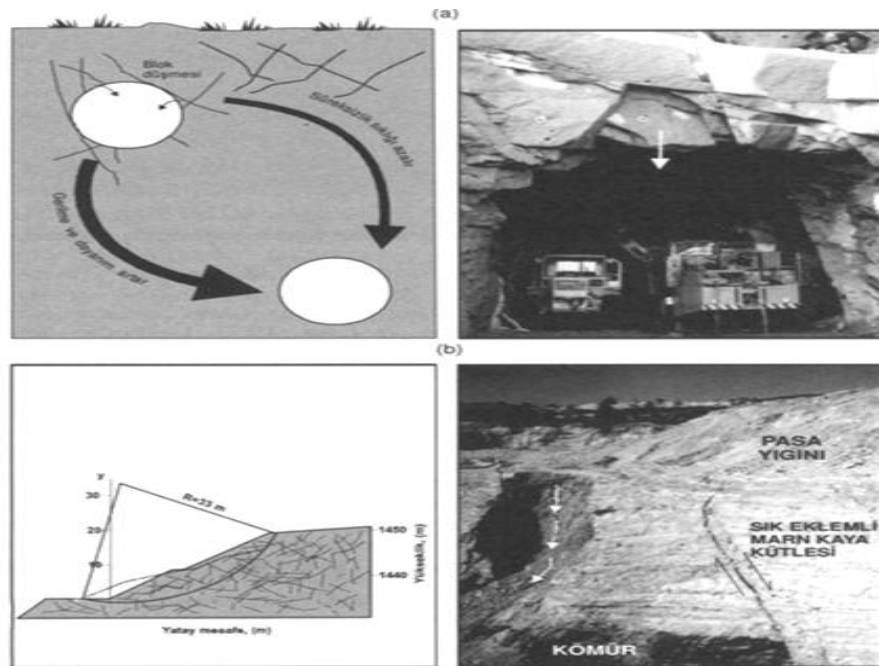
- (a) Masif: Birkaç süreksizlik veya çok geniş aralıklı süreksizlikler içeren kaya kütleleri,
- (b) Bloklı: Yaklaşık eş boyutlu bloklardan oluşan kaya kütleleri,
- (c) Yassı/plaka: Bir boyutu diğerlerine göre daha küçük olan blokları içeren kaya kütleleri,
- (d) Kolonsal: Bir boyutu diğer iki boyutundan daha büyük bloklardan oluşan kaya kütleleri,
- (e) Düzensiz: Blok boyutunda ve şeklinde belirgin farklılıklar gözlenen kaya kütleleri,
- (f) Parçalanmış: Çok sık eklemli (şeker kübü şeklinde) kaya kütleleri.



Şekil 2.30 (a) Bloklı, (b) düzensiz, (c) yassı/plaka ve (d) kolonsal yapıya sahip kaya kütleleri (ISRM, 1981'den).

Blok boyutu ve bloklar arası makaslama dayanımının ortaklaşa etkisi, belirli gerilme koşulları altındaki kaya kütlelerinin mekanik davranışını denetler. Geniş bloklardan oluşan kaya kütleleri daha az deformasyona uğramaya eğilimli olup, örneğin yeraltı açıklıklarında iyi bir kemerlenme ve kenetlenme gösterirler. Blok boyutunun küçülmesiyle yeraltı açıklığının tavanındaki ve yan duvarlarındaki tetrahedral blokların serbest kalıp yerçekiminin etkisi altında düşmesi veya süreksizliklerin kesişme hattı boyunca kayması sonucu duraysızlık gelişebilir (Şekil 2.31 a). Şevlerde ise, kaya kütlelerinin küçük boyutlu bloklardan oluşması koşulunda, süreksizlik denetimli duraysızlıklar yerine, toprak zeminlerde olduğu gibi, dairesel bir duraysızlık türü ile karşılaşmaktadır (Şekil 2.31 b).

Blok boyutu; tipik blokların ortalama boyutuyla (blok boyutu indeksi,  $h$ ) veya bir kaya kütlelerinde birim hacimde gözlenen süreksizliklerin toplam sayısı (hacimsel eklem sayısı,  $J_v$ ) tanımlanır. Ayrıca ağırlıklı eklem yoğunluğu ( $wJ_d$ ) da benzeri amaçla kullanılan diğer bir parametredir.



Şekil 2.31 Süreksizlik seti; sayısının ve süreksizlik aralığının artmasının kaya kütlelerinde yapılan mühendislik uygulamalarında duraysızlık modeli üzerindeki etkilerine örnekler: (a) tünellerde blok oluşumu (Hudson, 1989) ve (b) şevlerde kütleli (dairese) yenilme (Ulusay, 1991)

## BÖLÜM ÜÇ

### YENİLME KRİTERLERİ

Kayaların belirli gerilme şartları altında ya iki ya da çok parçaya ayrılarak kırıldığı veya belli bir sınırın üzerinde kalıcı deformasyona uğrayarak yenildiği tanımı daha önce belirtilmişti. Yenilmenin olabilmesi için kayanın etkisinde kaldığı gerilmenin kayanın dayanımından daha büyük olması gerekir. Diğer bir deyişle, kaya dayanımının aşılması şartı aranır. Bu şartın oluşması için de gerilmeler arasındaki farkın -deviatorik gerilme- en büyük olması gerekir. Veya kesme gerilmesinin en büyük olması gerekir. Kayaya etkiyen gerilmenin yönü basma veya çekme şeklinde olabilir. Ayrıca gerilmeler, tek eksenli olabileceği gibi üç eksenli de olabilir. Yenilmede en önemli iki parametre, gerilme ve deformasyondur. Tasarım aşamasında bunlardan en az biri girdi olarak kullanılır. Kaya maddeleri ve/veya kütleleri için aynı anda geçerli olabilecek bir kriter henüz yoktur. Daha önce de belirtildiği gibi, kayalar oldukça heterojen, gevrekten sünümlüye kadar değişen özellikler göstermektedir. Bu nedenle pek çok araştırmacı tarafından çok sayıda yenilme kriterleri geliştirilmiştir. Bunlar üç ana grup altında toplanırlar:

- Teorik,
- Fiziksel,
- Görgül (Empirik).

Bu bölümde bu kriterlerden kayalar için yaygın olarak kullanılanlar anlatılacaktır.

#### 3.1 En Büyük Normal Gerilme Kriteri

Kaya üzerine etkiyen asal gerilmelerden birisinin, kayanın çekme veya basma dayanımını aşması durumunda yenilmenin oluştuğunu belirten kriterdir. Matematiksel ifade ile,

$$\sigma_3 \geq -\sigma_t \quad \text{çekmede kırılğan (gevrek) yenilme koşulu}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_c \quad \text{basmada yenilme koşulu}$$

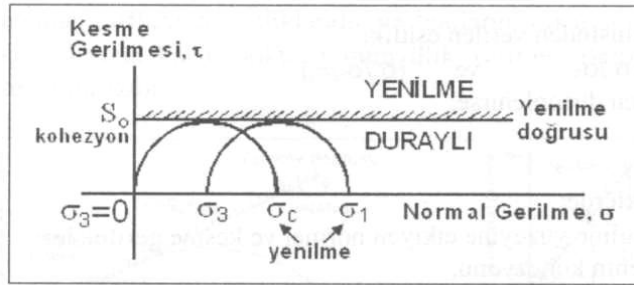


### 3.2 En Büyük Kesme Gerilmesi (Coulomb) Kriteri

İki boyutlu yükleme durumunda, en büyük ve en küçük normal gerilmelerin farkının yarısı olan en büyük kesme gerilmesinin,  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ , kaya malzemesinin kesme dayanımını aşması halinde yenilme beklenir. Şekil 3.1'deki kesme gerilmesi-normal gerilme ilişkisindeki yatay yenilme zarfının üzerine düşen gerilme durumları yenilme gösterirken altındakiler duraylıdır.

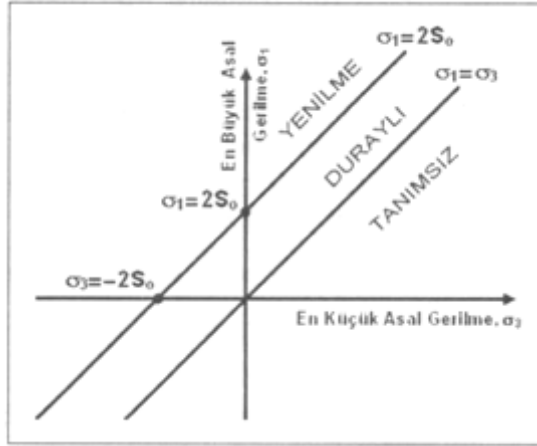
$$\tau_{max} = [(\sigma_1 - \sigma_3)/2] \geq S_0$$

Burada  $S_0$ ; malzemenin kohezyonu,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  asal gerilmelerdir.



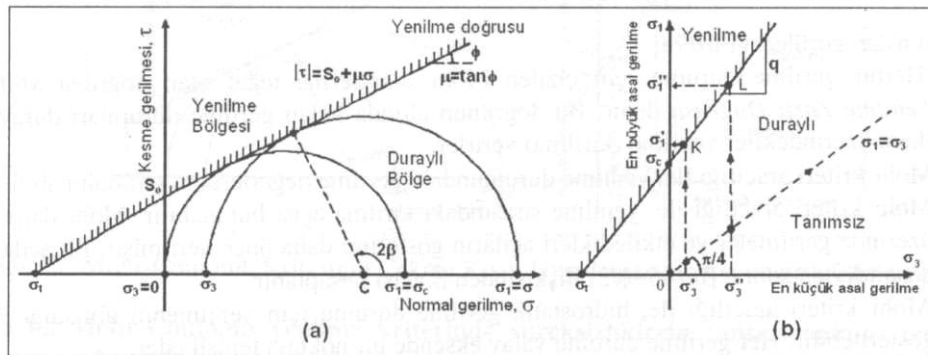
Şekil 3.1 Coulomb Kriterinin Normal Gerilme-Kesme Gerilmesi Cinsinden Gösterimi.

Bu kriterin asal gerilmeler cinsinden ifadesi de Şekil 3.2'de çizilmiştir. Şekil 3.2'deki  $[(\sigma_1 - \sigma_3)/2] \geq S_0$  doğrusunun (zarfının) üzerindeki gerilme durumları yenilmeyi verirken,  $(\sigma_1 = \sigma_3)$  doğrusunun altındaki gerilme durumları tanımsızdır. Çünkü, bu bölgede  $\sigma_3 > \sigma_1$  koşulu sağlanır ki bu durum bizim baştan kabul ettiğimiz en büyük asal gerilme  $\sigma_1$ 'dir ilkesine uymaz. Bu iki doğrunun arasına düşen gerilme durumları ise duraylılık gösterirler.



Şekil 3.2 Coulomb Kriterinin Asal Gerilmeler Cinsinden Gösterimi.

Coulomb yenilme kriteri ile ilgili olarak Şekil 3.3'ten de görüleceği üzere, yenilme zarfı (doğrusu) yatay olduğundan eğimi sıfırdır, dolayısıyla sürtünme açısı da sıfırdır. Bu kriterde sürtünmenin etkisi yoktur ve kaya örneği her koşulda en büyük asal eksenle her zaman  $45^\circ$ lik açı yaparak kırılır. Bu çok ideal bir durumdur ve pratikte gerçekleşmesi mümkün değildir. Dolayısıyla yenilmeyi tam temsil etmediği görülmektedir. Bu kriter, sürtünmeyi de içerecek şekilde modifiye edildiğinde  $\tau_\theta \geq S_o + \mu\sigma_\theta$  eşitliği yazılır. Coulomb kriterinin asal gerilmeler cinsinden en genel yazılımını Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Sürtümlü Coulomb Kriterinin Geometrik Gösterimi.

### 3.3 Mohr-Coulomb Kriteri

Mohr kriteri; kesme gerilmesinin artarak belli bir kritik değere (kesme dayanımı), veya asal gerilmelerin en küçüğünün çekme dayanımına ulaşması halinde yenilmenin olacağını ifade eder. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki şekilde belirtilmektedir;

$$\tau_{\theta} = f(\sigma_{\theta}) \quad \text{veya} \quad \tau_{\theta} \geq S_o + \sigma_{\theta} \tan\Phi$$

$$\sigma_3 \geq -\sigma_t \quad \sigma_3 \geq -\sigma_t$$

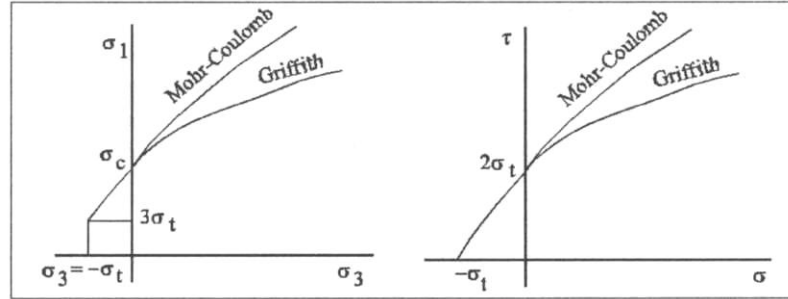
- Mohr dairelerine teğet olan doğruya Mohr Yenilme Zarfı Doğrusu denir. Bu doğrunun altında kalan kısım duraylı iken, üzerindeki kısım (kırılma) bölgesidir.
- Mohr kriteri kullanılarak, yenilme halindeki gerilme değerlerine ulaşılabilir  $(\sigma_1, \sigma_3)$ .
- Mohr kriteri kullanılarak, yenilme sırasındaki kırılma açısına ulaşılabilir.

$\tan\Phi = \mu$  olduğundan dolayı, Mohr kriterinin, sürtünmeli Coulomb kriterinin aynısı olduğu kolayca görülmektedir. Bu yüzden bu iki kriter birleştirilerek Mohr-Coulomb kriteri olarak anılmaktadır.

### 3.4 Griffith Kriteri

Yenilme kriterlerinin en eskilerinden biri olarak bahsedilmekte olan bu kriter ve çekme dayanımını esas alır. Griffith kriterine göre, bir malzeme, çekme gerilmesine tabi tutulduğunda, içinde ucunda büyük gerilme yoğunlaşmaları oluşan mikro çatlaklar (Griffith çatlak) oluşur. Bu çekme gerilmeleri söz konusu malzemenin çekme dayanımını geçerse çatlak oluşumuna sebebiyet verir ve çatlaklar büyüyerek yenilgiyle sonuçlanır.

Griffith kriteri hem asal gerilmeler hem de  $\sigma$ - $\tau$  cinsinden Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Griffith Yenilme Kriterinin Gösterimi.

### 3.5 Tresca Kriteri (En Büyük Kesme Gerilmesi)

Tresca kriterine göre yenilme,  $\sigma_o/2$  değerine en büyük kesme gerilmesinin ulaştığı durumda gerçekleşir. Bu kritere göre;

$$\sigma_1 - \sigma_3 = S_1 - S_3 = \sigma_o$$

Burada, asal gerilme sapmalarını  $S_1$  ve  $S_3$  temsil etmektedir. Buna göre çekme ve basma durumlarında yenilme gerilmeleri her iki durum için de  $\sigma_o$  değeridir. Ancak, bu yaklaşım metaller için doğru kabul edilse de kaya malzemesi için uygun değildir (Tresca, 1968).

### 3.6 Von Mises Kriteri

Bu kriter,  $J_2$  (gerilme sapma sabiti) değeri sabit alınarak tanımlanmıştır. Buna göre;

$$2\sigma_o^2 = (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2$$

$$\sigma_3 = -\sigma_1, \sigma_2 = 0 \text{ ve } \sigma_1 = \left(\frac{\sigma_o}{3}\right)^{1/2}$$

şeklinde tanımlanır. Daha çok metal üzerine yapılan çözümlenmeler için uygun olan bu kriter çatlaklar üzerine yapılan deneysel çalışmalarda zaman zaman kullanılmaktadır.

### 3.7 Hoek ve Brown Görgül Yenilme Kriteri

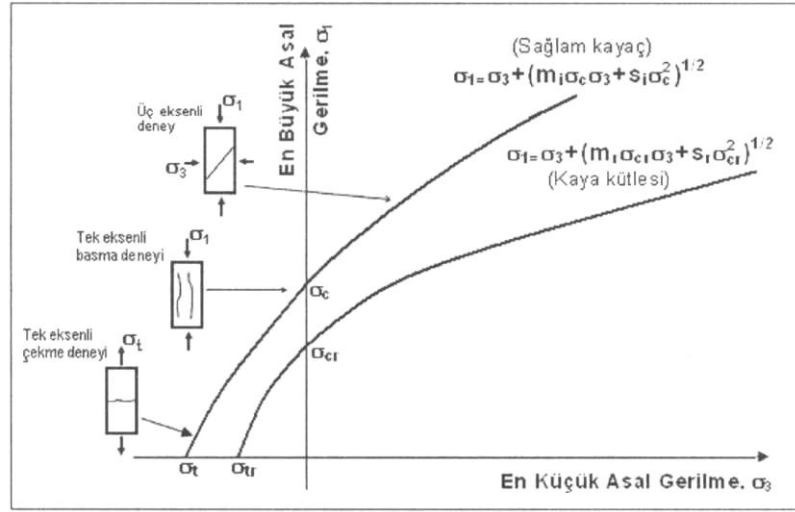
Hoek ve Brown (1980) yenilme kriteri, kaya kütlelerinin yenilmesini temsil etmesi açısından önemli ve araştırmacıların deneyimlerine de dayanan görgül (empirik) bir kriterdir. Söz konusu araştırmacılar, deney verileri ile yenilmenin ve kaya davranışını irdeleyerek aşağıda verilen görgül ilişkiyi önermişlerdir (Şekil 3.5).

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

Burada,  $\sigma_1, \sigma_3$  : yenilme anında uygulanmakta olan en büyük ve en küçük asal gerilmeler,

$\sigma_c$  : kaya maddesi tek eksenli basma dayanımı,

$m, s$  : kayanın özelliklerine, cinsine ve  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  maruz kalmadan önceki süreksizliklerin derecesine bağlı istatistiksel parametrelerdir. Diğer bir deyişle, diğer kriterlerde olan sürtünme açısı ve kohezyonun karşılığı olarak denk gelmektedirler.



Şekil 3.5 Hoek ve brown empirik yenilme kriterinin gösterimi.

'm' ve 's' için kaya örnekleri çatlaklıysa ve  $m_r$  ile  $S_r$  biliniyorsa, çatlaklı kaya kütlelerinin tek eksenli basma ve çekme dayanımları aşağıdaki formülden bulunur;

$$\sigma_{cr} = \sigma_c \sqrt{S_r} \quad \text{ve} \quad \sigma_{tr} = \frac{\sigma_c}{2} [m_r - (m_r^2 + 4s_r)^{1/2}]$$

Laboratuvar deneyleri ile belirlenen çatlaksız kaya maddelerinin tek eksenli basma dayanımlarının aksine kaya kütlelerinin basma dayanımları yukarıda verilen eşitliklerden hesap edilirler. Eşitliklerde kullanılan  $m_r$ 'nin bazı kaya birimleri için önerilen pratik değerleri aşağıda Tablo 3.1 ve 3.2'de, kumtaşları ve siltaşları için önerilenler ise Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1 Bazı kaya grupları için önerilen 'm<sub>i</sub>' değerleri (Ünal ve Tutluoğlu, 1986).

Kaya grupları ve tipik türler	Hoek ve Brown (1980) m <sub>i</sub>	Betournay ve diğer. (1991) m <sub>i</sub>
İyi gelişmiş kristal klivajı gösteren karbonatlı kayalar: Dolomit, Kalker, Mermer, vb.	7	7,5
İnce taneleri çimentolanmış tortul kayalar: Çamurtaşı, Kiltaşı, Siltaşı, Şeyi, vb. (tabakalanmaya dik)	10	7,3
İrice taneleri çimentolanmış, yüksek dayanımı olan kristalli, az gelişmiş klivaj gösteren tortul kayalar: Kumtaşı, Kuvarsit, vb.	15	13,5
İnce taneli, çok mineralli, mağmatik kristalin kayalar: Andezit, Dolerit, Diyabaz, Riyolit, vb	17	3,3
İri taneli, çok mineralli, mağmatik ve metamorfik kristalin kayalar: Amfibolit, Gabro, Gnays, Granit, Norit, Kuvarsdiorit, vb	25	9,5

Tablo 3.2 Hoek ve diğer.(1992) tarafından bazı kaya türleri için belirlenen 'm<sub>i</sub>' değerleri.

Tane Boyutu	TORTUL			METAMORFİK		MAĞMATİK		
	Karbonat	Kırıntılı	Kimyasal	Karbonat	Silikat	A. renkli	Koyu renkli	
İri	Dolomit 10,1	Konglom. 20		Mermer 9,3	Gnays 29,2	Granit 32,7	Gabro 25,8	Norit 21,7
Orta	Tebeşir 7,2	Kumtaşı 18,8	Çört 19,3		Amfibolit 31,2		Dolerit 15,2	
İnce	Kalker 8,4	Siltaşı 9,6	Jips 15,5		Kuvarsit 23,7	Riyolit 20	Andezit 18,9	Bazalt 17
Çok ince		Kiltaşı 3,4	Anhidrit 13,2		Sleyt 11,4			

Tablo 3.3 Kumtaşları ve siltaşları için önerilen bazı 'm<sub>i</sub>' değerleri.

Araştırmacılar	Kumtaşı	Siltaşı
Hoek ve Brown (1980)	14,3 (6,4-27,3)	10,0* (--)
Betournay ve diğer., (1991)	21 (6,8-22,8)	7,3* (--)
Hoek ve diğer., (1992)	18,8 (--)	9,6 (--)
Gerçek ve Müftüoğlu (1993)**	13,2 (7,4-25,5)	7,4 (3,9-9,1)

(\*)Tüm çimentolanmış tortul kayalar için önerilen değerler.

(\*\*)Zonguldak havzasından (Asma ve Gelik) alınan örnekler.

## **BÖLÜM DÖRT**

### **KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ**

#### **4.1 RMR Sınıflama Sistemi**

RMR Sınıflama Sistemi, ilk kez 1972-1973 yılları arasında Bieniawski (1973) tarafından geliştirilmiştir. Bieniawski'nin o dönemde Güney Afrika Bilimsel ve Sanayi Araştırma Merkezi (CSIR)'nde çalışıyor olması nedeniyle, adı daha sonra "Kaya Kütle Puanlama Sistemi (Rock Mass Rating System - RMR)" olarak değiştirilen bu sistem, uygulamacılar tarafından uzun yıllar boyunca "CSIR Jeomekanik Sınıflama Sistemi" olarak anılmıştır. Sistemin geliştiricisinin uyarılarına rağmen, ancak 1980'lerin sonuna doğru RMR adının kullanımı yaygınlaşmıştır. Başlangıçta bu sistem, Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılmış tünellerde yaptığı gözlemler ve bu gözlemlerden kazandığı deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Sistem, 1989'a kadar geçen 15 yıllık süre içinde yapılan gözlemler ve yeni veriler esas alınarak, birkaç kez değişikliğe uğramıştır. 1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sistem son şeklini almıştır. Sistemin zaman içerisinde sık sık değişikliğe uğraması, uygulamacıların bu değişiklikleri izleyebilmelerini ve bunlara kısa sürede uyum sağlamalarını güçleştirmiştir. Bu nedenle, daha sonraki dönemlerde bile zaman zaman sistemin eski versiyonlarının kullanıldığı görülmektedir.

##### **4.1.1 Sistemin 1989'daki son versiyonu**

İlk önerildiği 1973'ten bu yana birkaç kez modifiye edilen sistem, 1989'da yapılan değişikliklerle (Bieniawski, 1989) son şeklini almış ve bu haliyle günümüze değin kullanıla gelmiştir. Bu dönemde sistemde yapılan başlıca değişiklikler ve getirilen yenilikler,

-Kaya malzemesinin dayanımına, RQD'ye ve süreksizlik aralığı parametrelerine ait puanların, sınıflama parametreleri çizelgesinde verilen aralıkların yanı sıra, daha



duyarlı bir puanlama amacıyla yeni geliştirilen "parametre-puan" grafiklerinden doğrudan belirlenmesi,

-Süreksizlik koşuluna ait; süreksizlik devamlılığı, aralığı ve pürüzlülüğü ile dolgu ve bozunmanın derecesi gibi parametrelerin ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlamalara göre gruplandırılıp, her gruba ayrı puan verilerek daha duyarlı bir puanlamanın yapılması,

-Özellikle yeraltı maden işletmeciliği amacıyla açılan galerilerde patlatma, faylara yakınlık ve gerilme değişimlerinin kaya kütlesi sınıf puanı (RMR) üzerindeki etkilerinin de dikkate alınması amacıyla bir dizi düzeltme faktörünün önerilmesi,

-Uzun süreli gözlemler ve ölçümler esas alınarak, desteksiz durma süresi grafiğinin yeniden düzenlenmesi

şeklinde sıralanabilir. RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonunun parametreleri ve düzeltme katsayıları aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.1 RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (kaya sınıfları ve puanları) (Bieniawski,1989).

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

Tablo 4.2 RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (kaya sınıflarının bazı özellikleri) (Bieniawski,1989).

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama desteksiz kalabilme süresi	15m açıklık için 20 yıl	10m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	2,5m açıklık için 10 saat	1m açıklık için 30 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	< 100
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı (derece)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Tablo 4.3 RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (sınıflama parametreleri ve puanları) (Bieniawski,1989).

1*	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	4-10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2*	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3*	Süreksizlik aralığı		>2m	0,6-2m	200-600 mm	60-200 mm	<60mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4**	Süreksizlik koşulu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm. Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm. Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu < 5 mm veya 1-5 mm açık eklem, sürekli eklem	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm kalınlıkta veya açık eklem > 5 mm devamlı süreksizlikler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı-suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk		
		Eklemdeki su basıncı ORANI En büyük asal gerilme	0	0,0-0,1		0,2-0,5	>0,5		
		Genel koşullar	Veya	Veya	Veya	Veya	Veya		
	Puan		15	10	7	4	0		

Tablo 4.4 RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (tünelde süreksizlik eğim ve doğrultusunun etkisi) (Bieniawski,1989).

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

Tablo 4.5 RMR Sınıflama Sistemi'nin son versiyonu (süreksizlik yönelimine göre düzeltme) (Bieniawski,1989).

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

Tablo 4.6 Patlatma ( $A_B$ ) ve başlıca zayıflık düzlemleriyle ( $A_w$ ) ilgili düzeltme katsayıları.

<b>(A) Patlatma Düzeltmesi (<math>A_B</math>)</b>			
<b>Koşullar / Yöntem</b>		<b>Uygulanabilir terim</b>	<b>Düzeltilme katsayısı, <math>A_B</math></b>
1.	Makineyle kazı	Hasarsız	1,0
2.	Denetimli patlatma	Çok az hasar	0,94-0,97
a.	Pratik olarak patlatmada tüm deliklerin izleri gözlenebilir.		
b.	Gevşemiş bloklar veya açılmış süreksizlikler söz konusu değildir.		
c.	Aşırı sökülme: Genellikle 15 cm'den az, ender olarak 30 cm'den azdır		
d.	Eklemler arasında yeni kırıklar yok veya çok azdır.		
3.	İyi klasik patlatma	Orta derecede hasar	0,90-0,94
a.	Bazı patlama deliklerinin izleri gözlenebilir.		
b.	Az sayıda gevşek bloklar söz konusu olabilir ve bazı eklemler açılabilir.		
c.	Aşın sökülme: Yaygın olarak 30 cm, yerel olarak 30 cm'yi aşabilir.		
d.	Sağlam kaya bloklarında ve eklemler arasında kılcal çatlaklar gelişebilir.		
4.	Kötü klasik patlatma	Şiddetli hasar	0,90 (en iyi) 0,80 (en kötü)
a.	Patlatma deliklerinden sadece birkaçı gözlenir.		
b.	Açıklığın tavanında çok sayıda gevşemiş blok gözlenir. Çok sayıda eklem açılmış ve bloklar düşebilecek hale gelmiştir.		
c.	Aşın sökülme: Genellikle 30 cm'den büyük, yerel olarak 1 m veya daha fazladır.		
d.	Patlatmayla ilgili herhangi bir bilgi yok.	Orta derecede hasar	0,90 (göreceli)
<b>(B) Başlıca Zayıflık Düzlemleriyle İlgili Düzeltme (<math>A_w</math>)</b>			
<b>Koşul</b>		<b>Düzeltilme, Katsayısı <math>A_w</math></b>	
1. Zayıflık düzlemi yok		1,0	
2. Sert dayklar		0,90	
3. Yumuşak cevher zonları		0,85	
4. Ana kaya/cevher dokanak zonları veya homojen olmayan tavan kayası		0,80	
5. Kıvrımlar (senklinal ve antiklinaller)		0,75	
6. Münferit fay zonları		0,70	

#### ***4.1.2 RMR Sınıflama Sistemi'nin uygulama alanları***

RMR Sınıflama Sistemi; başta tünel, galeri, yeraltı odaları gibi yeraltı açıklıklarının kazısı olmak üzere, çok sayıda alanda uygulanmaktadır. Bu kaya kütlesi sınıflama sisteminden başlıca üç önemli veri elde edilmektedir (Bieniawski, 1988).

Tüm jeolojik parametrelerin ortaklaşa etkisini yansıtan ve kaya kütlesinin genel koşullarıyla ilişkili "kaya kütlesi kalitesi" elde edilen verilerin başında gelmektedir. Bu veri, çalışılan saha genelinde kaya kütlesi koşullarının karşılaştırılmasına veya kaya kütlelerinin "çok iyi kaya"dan "çok zayıf kaya"ya kadar tanımlanarak, farklı kalitedeki kaya kütlelerinin sınırlarının belirlenip bölgelendirme haritalarının veya kesitlerinin hazırlanmasına olanak sağlar.

Bu sınıflama sisteminden elde edilen diğer önemli bir veri de, bir kılavuzdan yararlanılarak kaya kütlesi kalitesi ve kazı yöntemine göre ön tasarım amacıyla destek türlerinin seçimidir. Sistem, bu kılavuzla birlikte her kaya sınıfı için; kaya yükü, desteksiz durma süresi, desteksiz açıklık boyutu vb. gibi parametrelerin tahminine olanak sağlamaktadır.

RMR Sistemi'nin sağladığı olanaklardan biri de, RMR puanının kullanılarak kaya kütlesinin bazı mühendislik özelliklerinin (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) tahmin edilebilmesidir.

#### ***4.1.3 RMR Sınıflama Sistemi'nin kullanımı sırasında yapılan hatalar***

RMR Sınıflama Sistemi'nin kullanımının basit oluşu ve sınıflama parametrelerinin yeraltı açıklıklarında yapılan haritalamayla veya kaya yüzleklerindeki hat etütlerinden ya da sondaj karotlarından belirlenmesi, sistemin Q Sistemi (Barton vd., 1974) ile birlikte bugüne değin uygulamada en yaygın olarak tercih edilen iki yöntemden biri olmasını sağlamıştır. Bu sınıflama sistemi, ağırlıklı olarak tünelcilik çalışmalarının yanı sıra, kömür madenciliği ve sert kaya madenciliğinde ve ayrıca,

bazı sınırlamalar ve tartışmaya açık hususlar bulunmakla birlikte, temel ve şev duraylılığı çalışmalarında da uygulanabilmekte, ya da bu tür çalışmalara uyarlanabilmektedir. Ayrıca bir önceki bölümde belirtildiği gibi, sistemin diğer bir avantajı da, başta destek sistemi olmak üzere, kaya kütlelerinin laboratuvarında tayini güç olan jeomekanik parametrelerinin görgül yöntemlerle belirlenmesine, desteksiz durma süresi ve destek basıncı gibi ön tasarıma yönelik parametrelerin kestirimine olanak sağlamasıdır.

Yukarıda değinilen avantajlarına karşın, sistemin kendi doğasından kaynaklanan bazı sınırlamalarının olduğu, ayrıca sürekli değişime uğramasına bağlı olarak zaman zaman hatalı kullanıldığı da bir gerçektir.

RMR Sınıflama Sistemi, ağırlıklı olarak yeraltı açıklıklarının kazısı sırasında veya sonrasında yapılan çok sayıda gözleme dayalı görgül bir yöntem olduğu için, mühendislik uygulamaları ve tasarım açısından hatalı değerlendirmelerin yapılmasına neden olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, bu sistemin kullanılmasıyla zaman zaman tasarımda aşın güvenli veya güvensiz tarafta kalınmasına yol açabilecek çıktı (sonuç) verileri elde edilebilmektedir. Güvenli ve ekonomik bir tasarımın yapılabilmesi için, tasarım çıktıları saha gözlemleri ve arazi ölçüleriyle karşılaştırılmalı, gerekiyorsa tasarımda değişikliğe gidilmelidir.

Sistemdeki en önemli sınırlamaların, hatta bir ölçüde belirsizliklerin başında gelen parametre, süreksizlik yönelimi kavramı ve bununla ilgili düzeltme puanıdır. Tünel vb. gibi yeraltı açıklıkları için süreksizlik yönelimine ilişkin tanımlamalar ve atanan puanlar konusundaki belirsizlik, sistemin 1974 versiyonunda yapılan eklemelerle büyük ölçüde giderilmiştir. Bununla birlikte, ileri derecede eklemeli veya parçalanmış kaya kütlelerinde inşa edilen yeraltı açıklıklarının ön tasarımı amacıyla bu sistemin kullanılması durumunda, yönelim parametresiyle ilgili bir belirsizlik ortaya çıkmaktadır. Çünkü bu denli yoğun (sık aralıklı) ve gelişigüzel konuma sahip süreksizlikler içeren kaya kütlelerinde süreksizlik yöneliminin etkisi ortadan kalkmakta ve malzeme ufak bloklar ve/veya parçalar halinde açıklığın içine düşme eğilimi göstermektedir. Bu tür koşullarda süreksizlik yönelimine bakılmaksızın,

destek sisteminin hemen yerleştirilmesi zorunluluğu vardır. Dolayısıyla, güncel haliyle RMR sisteminin bu tür koşullar altında bir sınırlamaya sahip olduğu ve yeni bir parametreye gereksinim duyulduğu açıktır.

Ayrıca RMR Sistemi'nin kaya şevlerinde uygulanması durumunda süreksizlik yöneliminin şevin konumuna göre nasıl değerlendirileceği ve yönelim düzeltmesi puanının seçimi konularındaki belirsizlikler, yeraltı açıklıkları için söz konusu olan belirsizlikten çok daha fazladır. Kaya şevleri için hem yönelim parametresinin tanımlanması konusu açık değildir, hem de bazı durumlarda, özellikle düşük RMR puanına sahip zayıf kaya kütlelerinde -60 gibi değerlere varan düzeltme puanlarının uygulanmasıyla negatif RMR değerleri edilebilmektedir.

Güncel RMR Sistemi'nde, yeraltısuyu koşulları da bir parametre olarak dikkate alınmakla birlikte, suyun ince tabakalı ve kil içeren zayıf kaya kütlelerinde yapacağı olumsuz etkileri de tanımlayacak bir parametre bulunmamaktadır. Ayrıca, sistemde kaya kütlelerinin bozunma derecesinin tayini için kullanılan ölçütler de görsel tanımlamalara dayanmakta, dolayısıyla bir ölçüde öznel değerlendirmelere neden olabilmektedir. Bu özelliklerin sisteme dahil edilmemiş olması, özellikle zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında bazı sınırlamalarla karşılaşılmasına yol açmaktadır. Suyun zayıf kaya kütlelerindeki tahrip edici etkisinin de tanımlanabilmesi amacıyla Ünal ve Özkan (1990)'ın RMR'ı modifiye ederek önerdikleri M-RMR Sistemi'nde; suda dağılmaya karşı duraylılık deneyinin de yapılarak, bu deneylerden elde edilecek suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi aracılığıyla bir bozunma katsayısının kullanılmasını önermişlerdir.

RMR Sistemi, kaya malzemesinin dayanımını da bir sınıflama parametresi olarak dikkate almakta ve bu amaçla tek eksenli sıkışma dayanımını veya nokta yükü dayanım indeksini kullanarak puanlama yapılmasını önermektedir. Ancak lamina, şistozite yüzeyi vb. gibi sık aralıklarla tekrarlanan zayıflık düzlemlerini içeren kaya kütlelerinden alınmış kaya malzemesi örneklerinde bu deneylerin yapılması için gereksinim duyulan standart boyutta örneklerin hazırlanması çoğu kez olanaklı değildir. Dolayısıyla bu tür kaya kütleleri ortamlarında dayanım parametresinin

tayiniyle ilgili sınırlamalar ortaya çıkmakta veya oldukça kaba tahminler yapılarak bir dayanım değerinin seçilmesi zorunda kalınmaktadır. Söz konusu güçlüğün aşılabilmesi amacıyla dayanım parametresi için alternatif olabilecek bazı basit indeks deneylerin de sisteme dahil edilmesinde yarar vardır. (Ulusay ve Sönmez, 2007)

#### 4.2 Q Sınıflama Sistemi

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak adlandırılan kaya kütlesi sınıflama sistemi 70'li yılların başlarında Barton vd. (1974) tarafından özellikle tünel tasarımı için geliştirilmiştir. Kaya tünelcilik kalitesi Q, birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak aşağıdaki ifadeden hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Burada;

RQD: Kaya kalite göstergesi

J<sub>n</sub>: Eklem Takımı Sayısı

J<sub>r</sub>: Eklem Pürüzlülük Sayısı

J<sub>a</sub>: Eklem alterasyon sayısı

J<sub>w</sub>: Eklem Su Azaltma Faktörü

SRF: Gerilme Azaltma Faktörü'dür.

Bu sistem, mevcut tünellerden elde edilen 1000'den fazla vakaya ait deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Gerilme azaltma faktörü (SRF) ile ilgili olarak Grimstad ve Barton (1993) ve Barton ve Grimstad (1994) tarafından yapılan bir değişiklik dışında, Q sistemi önemli bir değişikliğe maruz kalmamıştır. Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.7 Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Barton ve diğer., 1974 ve Barton,)

1. RQD	KAYA KALİTE GÖSTERGESİ TANIMI
0-25	A. Çok zayıf
25-50	B. Zayıf
50-75	C. Orta
75-90	D. İyi
90-100	E. Çok iyi (mükemmel)
Not: (1) RQD < 10 (0 dahil) ise Q'nun hesaplanmasında RQD için 10 gibi nominal bir değer RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.	
2. EKLEM TAKIMI SAYISI	(J <sub>n</sub> )
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0,5-1,0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemeler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde	15
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20
Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için (3,0 x J <sub>n</sub> ) kullanılır. (3) Tünel girişleri için (2,0 x J <sub>n</sub> ) kullanılır.	
3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI	(J <sub>r</sub> )
(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslamadan önceki süreksizlik-kaya dokanağı	
A. Süreksiz eklemeler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1,5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5
F. Düz, düzlemsel	1,0
G. Kaygan, düzlemsel	0,5
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
(c) Makaslanmış kesimde süreksizlik-kaya dokanağı yok	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1,0
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki kumlu, çakıllı ya da parçalanmış zon	1,0



Tablo 4.8 Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Eklem alterasyon sayısı) (Barton ve diğer., 1974 ve Barton,)

4. EKLEM ALTERASYON SAYISI		Ja	<> (yaklaşık)
(a) Kaya-süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)			
A.	Yüzeyler sıkı, sert, yumuşamayan geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	0,75	
B.	Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-30°
C.	Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	20-25°
D.	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25°
E.	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örneğin kaolinit veya mika). Ayrıca klonit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	8-16°
(b)	10 cm'lik makaslamadan önceki süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları) F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30°
G.	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	6	16-24°
H.	Orta ve düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	8	12-16°
J.	Şişen kil mineralleri -örneğin mont-morillenit (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm.) J <sub>a</sub> 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12°
(c)	Makaslanma durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşulunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)		6,8 veya 8-12	6-24°
N.	Siltli veya kumlu kil banılan veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5.0	-
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşulunun tanımlanması için G, H, ve J'ye bakınız)		10, 13 veya 13-20	6-24°

Tablo 4.9 Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Eklem su azaltma faktörü) (Barton ve diğer., 1974 ve Barton,)

5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm <sup>2</sup> ) J <sub>w</sub>	
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örneğin genel olarak <5 l/dk.)	<1	1,0
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	1-2,5	0,66
C. Dolgusuz eklem içerden sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	2,5-10	0,5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	2,5-10	0,33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	>10	0,2-0,05
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	>10	0,1-0,05
<b>Not:</b> (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir. Eğer drenaja yönelik önlemler alınır, J <sub>w</sub> artar. (9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.		

Tablo 4.10 Q Sisteminin girdi parametreleri ve değerleri (Gerilme azaltma faktörü) (Barton ve diğer., 1974 ve Barton,)

6. GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF		
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar			
A. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	10		
B. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği < 50 m)	5		
C. Kil veya kimyasal olarak ayrılmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)	2,5		
D. Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7,5		
E. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği < 50 m)	5,0		
F. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)	2,5		
G. Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemler "küp şeker" görünümüne (herhangi bir derinlikte)	5,0		
(b) dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	$\sigma_{ci}/\sigma_T$	$\sigma_{ci}/\sigma_T$	SRF
H. Düşük gerilme, yüze yakın, açık eklemler	>200	<0,01	25
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0,01-0,3	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L. Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0,5-0,65	5-50
M. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	3-2	0,65-1	50-200
N. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	<2	>1	200-400
(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma	$\sigma_\theta/\sigma_{ci}$	SRF	
O. Az sıkıştırıcı kaya basıncı	1-5	5-10	
P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı	>5	10-20	
(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği	SRF		
R. Düşük şişme basıncı	5-10		
S. Çok yüksek şişme basıncı	10-15		

Q değeri ile ilgili olarak yer altı açıklıklarının duyarlılığı ve destek gereksinimleri açısından Barton vd.(1974) "Eşdeğer boyut,  $D_e$ " adını verdikleri bir parametreyi de tanımlamışlardır.

$$D_e = \frac{\text{Kazının genişliği, çapı veya yüksekliği (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}}$$

Eşitlikteki ESR değeri yeraltı açıklığının duraylı kılınabilmesi için yerleştirilen destek sistemi üzerinde etkisi olan bir tür güvenlik katsayısıdır. Yeraltı kazısının türüne ve amacına göre ESR değerleri ilk kez Barton vd. (1974) tarafından önerilmiş, ancak daha sonra Barton ve Grimstad (1994) bazı değişiklikler yaparak ESR değerlerini güncelleştirmişlerdir. ESR için günümüzde bu son değişiklikler dikkate alınmaktadır.

#### **4.2.1 Q Sistemi'nin Sınırlamaları**

Q sisteminin başlıca üstünlüğü, kaya özelliklerindeki küçük değişimlere karşı göreceli olarak duyarlı olmasıdır. Buna karşın, çok sayıda girdi parametresini ve bunlara ilişkin karmaşık tanımlamaları içermesi, özellikle yeterli deneyimi olmayan uygulamacılar açısından sistemin başlıca sınırlaması olarak değerlendirilmektedir.

Q sisteminde yer alan F ve G genellikle zayıflık zonlarında, sıkışan ve şişen kayalarda veya çok aşırı su gelirinin olduğu ortamlarda geçerlidir. Ancak bu koşullar, ayrıntısı Palmstrom ve Broch (2006) tarafından belirtilen nedenlerden dolayı, karakterize edilmeleri çok güç olan koşullardır. Bu nedenle, bu koşullarla ilgili destek sistemlerinin seçimi konusunda sadece kaya kütlesi sınıflaması esas alınarak karar verilmesi zordur. Bu tür durumlarda sınıflama sistemlerinin sadece kısmen yansıtıkları yerel ve doğal koşullar önemli rol oynarlar. Bu nedenle pratik kullanım açısından, yaklaşık olarak  $0,1 < Q < 40$  aralığı Q sisteminde destek seçimi için en iyi çahşan bölge olarak dikkate alınabilir. Ayrıca genişlik veya yükseklik/ESR eksenini de oldukça genişdir. Uygulamada en küçük açıklık boyutları 2-3 m iken, hiçbir uygulamacı tavanının veya duvarlarının yüksekliği 30-40 m'den daha büyük olan açıklıkların destek sistemine sadece Q sistemini kullanarak karar vermez.

Q sisteminde,  $J_r$ ,  $J_a$  ve özellikle  $J_n$ 'nin kullanıcıya bağlı olarak hatalı şekilde karakterize edilmesi ve bunun da Q değerine yansımaları mümkündür. Ayrıca kaya kütleleri için önem taşıyan süreksizlik yönelimi, boyutu, devamlılığı ve açıklığı ile kaya dayanımı gibi parametreler Q sisteminde dikkate alınmamaktadır. Ayrıca SRF etkin gerilme durumunu yansıtmaktan ziyade, bir çeşit düzeltme faktörüdür.

### 4.3 GSI Sınıflama Sistemi

Görgül yenilme ölçütünü geliştiren Hoek ve Brown, ölçütün gelişim süreci içinde  $m$  ve  $s$  kaya kütleli sabitlerini arazi gözlemleri ve ölçümleriyle ilişkilendirerek belirleme çabası içinde olmuşlardır. Bu araştırmacılar, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyonunu denetleyen özelliklerin Bieniawski (1973-1989) ve Barton vd. (1974) tarafından geliştirilen kaya kütleli sınıflama sistemlerinin esas aldığı özelliklerle olan benzerliklerini göz önünde bulundurarak, bu sınıflama sistemlerinin yenilme ölçütünün malzeme sabitleri  $m$  ve  $s$ 'in belirlenmesi amacıyla kullanılabilmesini düşünmüşlerdir. Bu düşüncelerini yenilme ölçütüne yansıtmakla birlikte, araştırmacılar söz konusu sınıflama sistemlerinin ölçüt tarafından kullanılmasıyla ilgili bazı sorunların ortaya çıkabileceğini de fark etmişlerdir. Örneğin; ileri derecede eklemlili bir kaya kütleli yapılan bir tünel kazısı için gerekli destek sisteminin belirlenmesi amacıyla  $Q$  tünelcilik kalitesi indeksinin kullanımı sırasında, kaya kütleliindeki gerilme koşulları "gerilme azaltma faktörü" parametresiyle dikkate alınabilmektedir.

Destek seçimine alternatif bir yaklaşım olarak, aynı kaya kütleli için Hoek - Brown yenilme ölçütünden de yararlanılabilir ve ölçütten elde edilen parametrelerden kaya kütleliinin dayanımı tayin edilerek desteklenmesi gereken kayanın çevresindeki aşın gerilmeye maruz kalmış zon belirlenebilir. Yenilme ölçütünde  $m$  ve  $s$  sabitlerinin belirlenmesinde bir girdi parametresi olan GSI'nin tayini için  $Q$  sisteminden yararlanılması halinde,  $Q$  sisteminde ayrıca gerilme azaltma faktörü de dikkate alındığından, arazi gerilmelerinin etkisi analizde iki kez hesaba katılmaktadır. Benzeri soranlar,  $Q$  Sistemi'ndeki "su azaltma faktörü" ve RMR Sistemi'ndeki "yeraltısuyu parametresi" ile "yönelim düzeltmesi" için de geçerli olup, tüm durumlarda bu faktörlerin iki kez dikkate alınması söz konusu olabilmektedir. Bu tür soranların en aza indirilmesi gerektiğini öngören ölçütün geliştiricileri (Hoek vd., 1995; Hoek, 1995a), GSI'nin RMR ve  $Q$  sınıflama sistemlerinin kullanılarak belirlenmesinde aşağıda belirtilen hususların dikkate alınmasını önermişlerdir.

#### **4.3.1 GSI'nin tayini için RMR Sistemi'nin 1976 versiyonunun kullanılması**

GSI'nin tayini için RMR'ın 1976 versiyonunun kullanılması halinde, kaya kütlesi tamamen kuru varsayılarak, yeraltı suyu koşulu için 10 puan ve süreksizlik yönelim koşulu için ise "çok uygun" tanımlaması seçilmekte ve 0 puan verilmektedir. Bu varsayımlara göre, RMR76'dan elde edilecek en düşük puan 18 olmaktadır. Buna göre,  $RMR_{76} > 18$  olması koşuluyla,

$$GSI = RMR_{76}$$

alınabilir. RMR Sistemi'nin 1976 versiyonuna göre 18'den küçük değerler ( $RMR_{76} < 18$ ) elde edilememesinden dolayı, daha düşük kaliteli kaya kütleleri için GSI'nin tahmininde RMR Sistemi yerine Q Sistemi'nin kullanılması önerilmiştir (Hoek vd., 1995).

#### **4.3.2 GSI'nin tayini için RMR Sistemi'nin 1989 versiyonunun kullanılması**

GSI'nin tayini için RMR89'un kullanılması halinde; yeraltı suyu puanı olarak 15, süreksizlik yönelimi puanı için ise 0 değerleri esas alınmaktadır. Bu değerlere göre en düşük RMR puanı 23 olmaktadır. Bu durum, sistemin 1976 ve 1989 versiyonları arasında 5 puanlık bir fark yaratmaktadır. Söz konusu farklılığın giderilebilmesi amacıyla,  $RMR_{89} > 23$  olmak koşuluyla GSI'nin,

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

ifadesinden tahmin edilmesi önerilmiştir.  $RMR_{89} < 23$  koşulunda ise, yine Q Sistemi'nin kullanılması gerekmektedir.

### 4.3.3 GSI'nin tayini için Q Sistemi'nin kullanılması







GSI'nin, Barton vd. (1974) tarafından önerilen ve daha sonra Grimstad ve Barton (1993) tarafından sadece tünel destek seçim kılavuzu modifiye edilen Q Sistemi'nden belirlenmesi halinde; RQD, eklem set sayısı ( $J_n$ ), eklem pürüzlülük sayısı ( $J_r$ ) ve eklem alterasyon sayısı ( $J_a$ ) parametreleri dikkate alınmaktadır. Q Sistemi'nin diğer iki parametresi olan su azaltma faktörü ( $J_w$ ) için kuru kaya kütlesi ve gerilme düzeltme faktörü (SRF) için ise orta derecede gerilme koşulları varsayılarak, bu parametrelere 1 puan verilir. Gerilme koşulları ile su basıncının, Hoek - Brown ölçütünden yararlanılarak yapılan analitik ve sayısal çözümlerinde de dikkate alınması nedeniyle, bunların bir de sınıflamaya katılarak ikinci kez kullanılmasını önlemek amacıyla bu yaklaşıma gidilmektedir. Bu nedenle, GSI'nin tahmini amacıyla Q Sistemi'nin klasik ifadesi aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

Modifiye edilmiş Q değeri ( $Q'$ ), GSI'nin tahmini için aşağıdaki eşitlikte kullanılır (Hoek vd., 1995).

$$GSI = 9 \log_e Q' + 44$$

En küçük  $Q'$  değeri 0,0208 olup, bu değerden yaklaşık 9 gibi bir GSI hesaplanır. GSI abağı aşağıda verilmiştir.

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ		SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU	
Kaya kütesinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kutu seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.		AZALAN YÜZEY KALİTESİ →	
YAPI		ÇOK İYİ Çok pürüzlü, taze ayrılmamış yüzeyler	İYİ Düz, çok az ayrılmış, demir oksit sıvımalı yüzeyler
		ORTA Düz, orta derecede ayrılmış yüzeyler	ZAYIF Kaygan, sert veya köşeli parçalar içeren, dolguya sahip, çok ayrılmış yüzeyler
		ÇOK ZAYIF Kaygan, yumuşak kil dolgululu, çok ayrılmış yüzeyler	
	<b>SAĞLAM VEYA MASİF</b> - Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi	90	UYGULANMAZ
	<b>BLOKLU</b> - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi	80	
	<b>ÇOK BLOKLU</b> - Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının keşişmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütlesi	70	
	<b>BLOKLU/ÖRSELENMİŞ</b> -Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi	60	
	<b>PARÇALANMIŞ</b> -Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi	50	
	<b>FOLİASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ</b> İnce laminalı veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayada bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.	40	
		30	
		20	
		10	
		UYGULANMAZ	

Şekil 4.1 GSI abağı

#### ***4.3.4 Yenilme ölçütüyle ve GSI Sistemi'yle ilgili sınırlamalar ve sorunlar***

1997-1999 yılları arasında GSI Sistemi'nde yapılan son değişiklikler dikkate alınarak, ölçütü ilgili bir takım sınırlamalar ve sorunlar saptanmıştır.

Her şeyden önce, görsel ve öznel sayılabilecek bir değerlendirmeye dayanan güncel GSI Sistemi'nde, kaya kütlesi sınıfları için önerilen GSI puanları oldukça geniş bir dağılım aralığı sergilemekte, dolayısıyla bu durum GSI değerlerinin duyarlı şekilde belirlenmesi açısından bir sınırlama olarak gözükmektedir. Bununla birlikte Hoek (1998), jeolojik ortamın bu denli duyarlı bir değerlendirmeye açık olmadığını ve tek bir GSI değeriyle kaya kütlelerinin tanımlanmasını pek gerçekçi bulmadığını ifade etmiştir. Araştırmacı, bu yaklaşımıyla ilgili bir örnek olarak; saha gözlemlerine göre tanımladığı bir kaya kütlesinin GSI değerini %90 güvenilirlik sınırları içinde  $25 \pm 5$  olarak belirlemiş ve buna göre kaya kütlesinin "bloklü/örselenmiş" veya "parçalanmış/zayıf şeklinde tanımlanacağını belirtmiştir. Bu değerlendirmeye göre, kaya kütlesinin birden fazla GSI sınıfına dahil edilmesi gibi bir belirsizlik söz konusu olmaktadır. Aynı araştırmacı ayrıca, kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımının, mi sabitinin ve GSI'nin normal dağılım göstereceğini belirtmiş, ancak normal dağılımla temsil edilecek GSI değerlerinin ortalama ve standart sapmalarının güncel GSI abaklarından nasıl belirleneceği hususunu yanıtızsız bırakmıştır.

Ölçütün son versiyonunda (Hoek ve Brown, 1997; Hoek, 1998, Hoek vd., 1998) patlatmaya bağlı olarak kaya kütlelerinde meydana gelecek örselenmenin nasıl değerlendirileceği hakkında net bir açıklamada bulunmamakta ve kaya kütlesi sabitleri örselenmemiş kaya kütlesi koşuluna göre hesaplanmaktadır. Sönmez vd. (1998), değişik kaya kütlelerinde açılmış üç farklı şevde gelişmiş duraysızlıklar için yaptıkları geriye dönük analizlerin sonucunda, Hoek-Brown yenilme ölçütünün RMR puanını da içeren 1998 yılına ait versiyonunun örselenmiş kaya kütlesi koşulu için uygulanabilir olduğunu belirlemişlerdir. Buna karşın, ölçütün son versiyonunda; kaya kütlelerinde patlatmaya bağlı olarak gelişecek örselenmenin, kaya kütlesinin örselenmeden önceki GSI değerini ortalama 10 puan civarında düşüreceği belirtilmiş ve patlatmaya maruz kalmış bu tür yüzeylerden tayin edilen GSI puanlarının



dengelenmesi amacıyla belirlenen GSI puanlarının aynı kolonda bir satır yukarı çıkılarak/yeniden saptanması önerilmiştir. Bu yaklaşım, kazı sırasında patlatma yapılmış yüzeyler için bir ölçüde doğru olabilir. Ancak Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından yapılan hesaplamalar, GSI abağında gerekçesi yetersiz görülen bu bir satırlık oynamanın kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımını %70 civarında değiştirebileceğini göstermiştir. Patlatma açısından dikkate alınması gereken diğer bir husus ise, patlatmanın şiddetine bağlı olarak örselenme derecesinin de değişeceği. Dolayısıyla Hoek ve Brown'ın bu yaklaşımı tartışmaya açıktır. Diğer taraftan; uygulanan kazı yöntemi, fay ve makaslama zonu gibi başlıca zayıflık düzlemleri veya teknik girişim sırasında gerilme koşullarındaki değişimler gibi hususlar, kaya kütlelerini etkileyen yerel faktörler olup, birer kaya kütleleri sabiti değillerdir. Bu nedenle, bu gibi yerel faktörlerin etkilerinin de dikkate alınarak GSI puanında düzeltme yapılması gerekmektedir.

Ölçütün son versiyonuyla ilgili olarak pratik açıdan önem kazanan ve yanıtlanması gerekli diğer bir husus da "sadece örselenmemiş kaya kütleleri koşulunun esas alındığı Hoek-Brown ölçütünün son versiyonunda, GSI'nin kazı veya patlatma yapılmadan önce kaya yüzleklerinden veya sondaj karotlarından belirlenmesi koşulunda, kazı yönteminin kaya kütleleri üzerindeki etkisinin nasıl değerlendirileceğinin dikkate alınmamış olması"dır. Bu değerlendirmelerin ışığında, örselenme etkisinin Hoek ve Brown (1997)'in önerdiği şekilde değerlendirilmesinin tartışmalı olacağı görülmektedir. Ayrıca, aynı araştırmacılar tarafından önerilen ve örselenme etkisini gözlemleyen söz konusu yaklaşımın, uygulamadan seçilmiş yerüstü ve yeraltı kazılarında sınırlı ve bu görüşü destekleyici sonuçların elde edildiğine ilişkin bir çalışmaya da literatürde rastlanmamıştır.

Hoek vd. (1998), foliasyonlu veya lamina içeren, ancak bloklu bir yapı göstermeyen makaslanmış zayıf kayaları da güncel GSI sınıflama sistemine dahil ederek, beşinci grup bir kaya kütleleri daha önermişlerdir. Ancak Hoek (1995a), görgül yenilme ölçütünün, homojen ve izotrop olarak kabul edilebilirlikleri dikkate alınarak, sadece kaya malzemelerine veya ileri derece eklemlenmiş kaya kütlelerine uygulanabileceğini ve davranışı büyük ölçüde süreksizlikler tarafından denetlenen,

makaslanmış ve foliasyona sahip kaya kütlelerinde ölçütün geçerli olamayacağını vurgulamıştır. Söz konusu follasyonlu/laminalı ve makaslanmış kayaların dayanım ve deformasyon özellikleri, sık aralıklarla dizilmiş makaslama ve kaygan foliasyon yüzeyleri boyunca meydana gelen yer değiştirmeler tarafından denetlenmektedir. Bu tür kaya kütlelerinin izotrop ve homojen olmayan özellikleri ve ölçütün geliştiricilerinden Hoek'un konuyla ilgili yukarıdaki görüşleri de dikkate alındığında, bu kayaları içeren yeni bir kaya kütle grubunun güncel GSI Sistemi'ne dahil edilmesi pek gerçekçi görülmemektedir.

GSI'nin belirlenmesinde kullanılan kaya kütle parametrelerine bakıldığında, bunların dayanım kavramıyla ilgili olmadıkları görülmektedir. Dolayısıyla bu indekse verilen isim açısından da yanlış anlamaya neden olabilecek bir kavram kargaşası söz konusu olup, indeksin adında da örneğin "jeolojik kütle indeksi" vb. gibi bir değişiklik yapılmasında yarar vardır. Bununla birlikte, bu adın yaygın kullanımını dikkate alınarak, bu kitapta isim değişikliği konusunda ısrarcı olunmamış ve bu indeks yine GSI adıyla kullanılmıştır.

Sonuç olarak, yukarıda değinilen belirsizliklerin ve sınırlamaların giderilerek, GSI puanının ölçülebilir veriler esas alınmak suretiyle belirlenmesi için bazı değişikliklere gereksinim duyulduğu açıktır.

#### **4.4 RMI Sınıflama Sistemi**

Kaya kütle İndeksi (RMI), kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık olarak tahmin edilmesinde kullanılan hacimsel parametrelerden oluşan bir indekstir. Bu indeks Palmström (1995) tarafından geliştirilmiştir. Kaya kütlelerinin dayanımının ve deformasyon modülünün tahmini ve Hoek-Brown dayanım parametrelerinin hesaplanmasında, eklemlili kaya kütlelerinden masif kaya kütlelerine kadar uygulanabilmektedir. İndeks, eklemlili kaya kütleleri için kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı azalma faktörü olarak aşağıda verilen eşitlik ile kullanılmaktadır.

$$RMI = \sigma_{ci} \times J_P$$

Burada  $J_P$ , 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  $\sigma_{ci}$  arasında aşağıda verilen eşitlik bulunmaktadır.

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

Kaya birimleri için hesaplanan RMI değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Kaya kütlesi indeksi (RMI) verileri ve hesaplanan parametrelere örnekler.

Parametre, sembol, birim		Fillit	Çok bozunmuş fillit	Tektonik breş	Orta derecede bozunmuş granodiyorit	Çok bozunmuş granodiyorit
Veri	Tek eksenli basınç dayanımı. $\sigma_a$ , MPa	30	1,5	15	30,8	26
	Eklem düzgünlük faktörü, $j_s$	1	1-1,5	2	1,5-2	2
	Eklem dalgalılık faktörü, $j_w$	1,5-2	2	1	1	1
	Eklem ayrışma faktörü, $j_A$	6	12	8-12	4	4-6
	Eklem uzunluk faktörü, $j_l$	0,75	0,75	1	1	1
	Eklem süreklilik faktörü,	1	1	1	1	1
	Kaya kalite belirteci. RQD	26	10	28	50	24
Hesaplanan	Eklem pürüzlülük faktörü, $j_R$	1,5-2	2-3	2	1,5-2	2
	Eklem boyut faktörü, $j_L$	0,75	0,75	1	1	1
	Blok hacmi, $V_b$ , $dm^3$	2,005	1,224	2 146	5,115	1,876
	Eşdeğer blok çapı, $D_b$ , m	0,13	0,11	013	0,17	0,12
	Eklem koşulu faktörü, $J_C$	0,19-0,25	0,125-0,188	0168-0,25	0,375-0,5	0,333-0,5
	Eklem parametresi, $J_P$	0,0035-0,0048	0,0016-0,0027	00032-0,0050	0,0114-0,015	0,0064-0,0098
	Kaya Kütlesi İndeksi. RMI (ortalama)	0,105-0,145 (0,125)	0,002-0,004 (0,003)	0,047-0,075 (0,061)	0,351-0,463 (0,407)	0,166-0,255 (0,211)

## **BÖLÜM BEŞ**

### **KAYA YAPISI İNDEKSİNİN TEMELİ**

#### **4.1 Gereksinim**

Kaya mühendisliğinde tasarım yaparken kullanılan yöntemlerden birisi kaya kütle sınıflama sistemleridir. Bu sistemler içerisinde değerlendirilen kaya kütleleri değişik değerlendirmelere (parametre) bağlı olarak belli bir puanlama sistemi içerisinde puanlanır. Bazı sistemlerde ise bu işlem görgül şekilde yapılır. Şu an kullanımda olan kaya kütle sınıflama sistemlerinin hepsi sağlam kaya kütlelerinde ufak değişiklikler içermekle birlikte başarılı görülmektedir. Ancak, zayıf-çok zayıf kaya kütleleri, laminalı-foliasyonlu, özellikle anizotropi içeren, çimento içinde tane içeren (block-in-matrix) gibi kaya kütlelerinde bu sınıflama sistemlerinin bazı sınırlamaları olduğu ve yetersiz kaldığı görülmektedir. Bütün bunlara ek olarak, kaya kütle sınıflama sistemleri içerisinde puanlama yapanlar aynı mantıkla değişik kaya kütlelerini değerlendirmekte ve davranışını belirlemektedir. Oysa ki, değişik kaya yapısına sahip olan kaya kütlelerini aynı mantıkla değerlendirmek ve bu değerlendirmeler üzerinden tasarımılandırmaya gitmek zaman zaman problemler doğurmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, daha önce geliştirilmiş olan kaya kütle sınıflama sistemlerinin zayıf kaldığı, yetersiz kaldığı, başarısız olduğu durumları elimine edecek, her bir kaya yapısını değişik mantık ve değerlendirmeler ile inceleyecek, ülkemiz koşullarına uygun, kaya kütlelerini yapısal olarak inceleyecek yeni bir kaya kütle sınıflama sisteminin temeli oluşturulmaya çalışılmıştır.

Sonuçta, oluşturulan Kaya Yapısı İndeksi madencilik ve inşaat sektöründe (yer altı-açık işletme, patlatma, tünel, baraj vb.) tasarımılandırmada kullanılabilir olacaktır.

Aşağıda; temeli oluşturulan ve bundan sonraki çalışmalar ile desteklenerek son halini alacak olan KYİ'nin içereceği felsefe anlatılacaktır.

Yapılan tez kapsamında yeni bir kaya kütle sınıflama sisteminin ana felsefesi oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu felsefenin diğer sınıflama sistemlerinin yetersiz kaldığı konularda daha yetkin olması planlanmaktadır. Genel olarak

bakıldığında püskürtme betonu tahkimat olarak öneren ilk sistem olan ve Wickham. vd. tarafından geliştirilen Kaya Yapısı Puanı (KYP) ile benzerlik göstermesine rağmen bazı konularda ayrı metodoloji benimsenmiştir. KYP geliştirilirken kullanılan çalışmalar genelde çelik bağlarla desteklenen küçük tünellerdir. Bu amaçla sistem içerisinde 3 parametre grubu mevcut idi. Bunlar, Jeoloji Parametresi (Kaya Kökeni, Kaya Sertliği, Jeolojik Yapı), Geometri Parametresi (Eklem Aralığı, Eklem Yönelimi, Tünel Açım Yönü) ve Zemin su gelirinin kaya yapısına etkisini inceleyen Parametre. Yukarıda değinildiği üzere bu sistemin küçük tünellerde geliştirilmiş olması nedeniyle daha geniş açıklıklara sahip olan tünellerde, yer altı açıklıklarında, madencilikte uygulama alanı bulamamıştır. Ek olarak, bu sınıflama ile yapılan puanlamalarda ciddi sıkıntılar mevcuttur (Hoek, 2006).

Günümüzde en çok kullanılan yöntemlerden birisi de Bieniawski tarafından Güney Afrika'da geliştirdiği RMR sistemidir. Bu sistem ilk gündeme geldiği tarihten itibaren geliştiricisi tarafından toplam 5 defa modifiye edilmiş, puanlama aralıkları değiştirilmiştir. Orijinalde İnşaat Mühendisliği disiplinlerinde kullanılan bu yöntem madencilikte biraz ön yargı ile ele alınmış ve zaman içerisinde ortaya çıkan yetersizlikleri çeşitli araştırmacılar tarafından düzeltilmeye çalışılmıştır. Özellikle zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinin davranışının belirlenmesi konusunda yetersiz kalabilmektedir. Örneğin, laminalı-foliasyonlu kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde kaya malzemesinin dayanımının tespiti oldukça zordur. Bu sistem dahilinde önerilen Tek Eksenli Basınç Dayanımı deneyi bu tip kayalarda oldukça zor, çoğu zaman imkansız olabilmektedir. Önerilen Nokta Yük Dayanımı Deneyinde ise yapraklanmalar ve ezilmeler sonucu doğru sonuçların elde edilmesi çok zor olmaktadır. Schmidth Çekici ile yapılan kestirmelerde ise yapılan deneyin istatistiksel katsayısı yüksek olması ve değişik kayalarda değişik korelasyon katsayısı vermesi bu yöntemlerle tek eksenli basınç dayanımının kestirilmesi önündeki en önemli problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Sönmez ve Tunusluoğlu, 2008). Aksoy vd. 2010 bu tip kayalarda T.E.B.D. kestiriminde Disk Makaslama Dayanım İndeksi deneyinin kullanılabileceği ve buradan elde edilen değerler ile kaya kütle sınıflama sistemlerinde hesaplamaların yapılabileceğini söylemektedir. Bu sistem içerisinde diğer bir sorun ise yer altı suyunun durumudur. Yer altı suyunun kaya

kütlesine olan etkisini bütün kaya kütleleri için aynı mantık içerisinde değerlendirip, puanlama yapılması çok yersizdir. Son yapılan araştırmalarda, yer altı suyunun sadece kaya kütesinin değil aynı zamanda kaya malzemesinin de dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğu ve bu etkinin tasarımlandırma çalışmalarında göz önüne alınması gerektiğine dair bulgular mevcuttur. RMR sisteminin bir çok versiyonunun oluşu ise sistemin kullanımında önemli hataları beraberinde getirmekte ve aynı dili konuşan uygulayıcılar arasındaki iletişimde sorunlar yaşatmaktadır.

Norveçte Nick Barton tarafından geliştirilen Kaya Tünelcilik Kalite İndeksi olarak da bilinen Q sistemi ise yapısal olarak RMR'a benzemektedir. Önemli farkı kaya sınıfı aralıklarından kaynaklanmaktadır. Yine bu sistem de zaman içerisinde değişikliklere uğramıştır. Bu değişiklikler, sistemin daha iyi sonuçlar vermesine yönelik değişiklikler olmasına rağmen son önerilen sistemde de zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinde yetersiz kalabilmektedir. Q sistemini analiz ettiğimizde, Blok boyutlarını temsil eden parametreler, Bloklar arası makaslama dayanımını temsil eden parametreler ve Aktif gerilmeyi temsil eden parametrelerin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Bu fonksiyon logaritmik bir fonksiyondur. Kaya kütlelerinin davranışı çok özel örnekler dışında non-lineerdir. Ancak, Q tarafından önerilen logaritmik fonksiyonun sağlam kayalarda başarılı olması ve zayıf-çok zayıf kaya koşullarında yetersiz olduğu durumların ortaya çıkması, sistemin orijinal halinin Norveçte geliştirilmesi ile ilintilidir. Daha sonra zaman içerisinde sistemin Norveç dışına çıkararak çalıştırılması ile karşılaşılan sorunlar çözümlenerek sistem modifiye edilmiştir. Evert Hoek'un Kaya Mühendisliği kitabında bahsettiği gibi sistem bir yer altı kırıcı odası gibi tesislerin tasarımında kullanıldığında tahkimat yönünden sıkıntılar ortaya çıkabilmektedir. Sistemin parametrelerinden birtanesi RQD'dir. Zayıf-çok zayıf olağanüstü zayıf kayalarda RQD çoğunlukla sıfır olmaktadır. Bu durumda Q sistemi çalışamaz duruma gelmektedir.

Çok yaygın kullanımı olan RMR ve Q sistemleri kaya kütesinin kalitesini niceliksel olarak belirlemektedir. Bu iki sistem benzer parametreleri kullanmaktadır. Ancak, parametrelere farklı değerler vermektedir. Diğer sistemlerden en önemli

farkları ise diğer sistemlerden farklı parametreler kullanmalarıdır. Bu nedenle yetersiz kaldıkları durumlar da genel olarak benzerlik göstermektedir.

Son yıllarda geliştirilen fakat geliştiricileri dışında çok fazla uygulayıcı kitlesine ulaşamayan diğer bir sistem ise Kaya Kütle İndeksidir (RMI). Bu sistemin dayandığı en önemli parametre blok boyutlarıdır. Blok boyutları eklemli bir kaya kütlelerinde önem arz eder. Ancak, masif-sağlam, zayıf-çok zayıf, laminalı-foliasyonlu-şistozite içeren kayalarda blok boyutları tasarımda düşünüldüğü kadar etkin değildir. Bu sistemde tek eksenli basınç dayanımını bir parametre olarak (dolaylı ya da direk) içeriğinde barındırır. Yukarıda bahsedildiği üzere bu parametrenin belirlenmesinde yaşanan sıkıntılar RMI içinde geçerli olmaktadır. Ayrıca, ileri derecede parçalanmış kayalarda bu sistemin başarısı sorgulanmalıdır. Bu tip kayalarda blok boyutu çok küçük fakat dayanım genelde yüksektir. Karakterizasyonda ise bu durum yüksek dayanımlı küçük bloklu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip kayalarda yüksek açılı şev uygulamaları sık görülür.

Bir yenilme kriterinden yola çıkılarak geliştirilen Jeolojik Dayanım İndeksi önümüze son yıllarda kullanımı artan bir sistem olarak çıkmaktadır. Bu sistemde diğerleri gibi zaman içerisinde değişime uğramıştır. Yine bu sisteminde içeriğinde barındırdığı bazı parametrelerden dolayı bazı yetersizlikleri mevcuttur. En önemli parametresi mi sabitinin tesbitidir. Örneğin, bu sabit Amfibol için 25-31, şist için 4-8 aralığındadır. Tasarımcının bu aralıklardan hangisini kullanması gerektiği konusundan net bir açıklama yoktur. Bu sistemde bazı ampirik formüllerle parametre elde edilmesi yoluna gidilmiştir. Ancak, bu formüllerin içeriğinde GSI'nin parametre olması bu sistemin zayıf ve yetersiz olduğu gözlemlenen kaya kütlelerinde önemli problemlere neden olmaktadır. Bunun en önemli örneği, Yunanistanda Atina metrosunda geliştirilerek GSI abağına eklenen Foliasyonlu-Laminalı kaya grubu için yeterli açıklamanın geliştiriciler tarafından yapılmaması olarak verilebilir. Bu sistem içerisinde de kaya kaliteleri aynı mantık ile değerlendirilip, abaktaki puanı belirlenmektedir. Yer altı suyunun etkisi ise bu abakta görülmemektedir. Harun Sönmez ve Reşat Ulusay tarafından önerilen Yapısal Özellik Puanı ve Hacimsel Eklem sayısı grafiği dikkate alınmamıştır. Halbuki abağa bakıldığında sağlam veya

masif kayada ve parçalanmış kayada blok boyutlarının önemi göz önüne gelmektedir. GSI'da tanımlanan örselenme faktörü hakkında da bir takım anlaşılmayan durumlar söz konusudur. Özellikle zayıf kayalarda mekanik kazı yapılması durumunda örselenme faktörünün "0" alınmasının kazıyı yapan darbeli kırıcı yada kollu kazıcının tüneli çevreleyen zayıf kayalarda hiçbir etkisinin olmadığı gibi anlamsız bir ifade görülmektedir. Oysaki, zayıf-çok zayıf kayalarda özellikle darbeli kırıcılar tüneli çevreleyen ve plastik bölgede kalan kayayı örselemektedir.

#### 4.2 Kriterler-Değişirgeler

Oluşturulması düşünölen Kaya Yapısı İndeks abağında kullanılacak kriterler, değıştirgeler altı ana sınıfta sınıflandırılmış olup aşığıda sıralanmıştır. Bu sınıflamalarda kullanılacak olan parametreler yanlarında verilmiştir. Söz konusu parametrelerden bazıları daha önceki bölümlerde ayrıntılı verildiğı için tekrar ayrıntılı olarak anlatılmamışlardır.

**Dayanım:** Bu sınıfta belirleyici parametrelerin, T.E.B.D., Schmidt Sertliğı, Nokta Yük Dayanımı ve Disk Makaslama Dayanım İndeksi olması düşünölmektedir.

**Yeraltı Suyu:** Bu sınıfta belirleyici parametrenin, Suda Dağılma Dayanımı olması düşünölmektedir.

**Süreksizlik Özellikleri:** Bu sınıfta belirleyici parametrelerin, süreksizliğın aralığı, dolgusu, pürüzlölüğü, bozuşması gibi kriterler olması düşünölmektedir.

**Sağlam Karot Verimi:** Sağlam karot verimi, karotiyerden elde edilen sağlam karot uzunluğının toplam manevra uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır.

**Karot Verimi ve Karot Tipi:** Karot verimi, karotiyerden sağlam olması gözetilmeksizin elde edilen karot uzunluğının manevra uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Karot tipi ise, elde edilen karotun fiziksel durumuna göre sınıflandırılmaktadır (Parçalanmış, ufalanmış vb.).



**Boyut Etkisi ve Yapısal Durum:** Bu sınıfta, kaya kütleindeki blok boyutları ve söz konusu kaya kütlelerinin  $m^3$ 'teki süreksizlik oranı göz önünde bulundurulacaktır.

### 4.3 Kaya Yapısı İndeksi'nin Tanıtımı

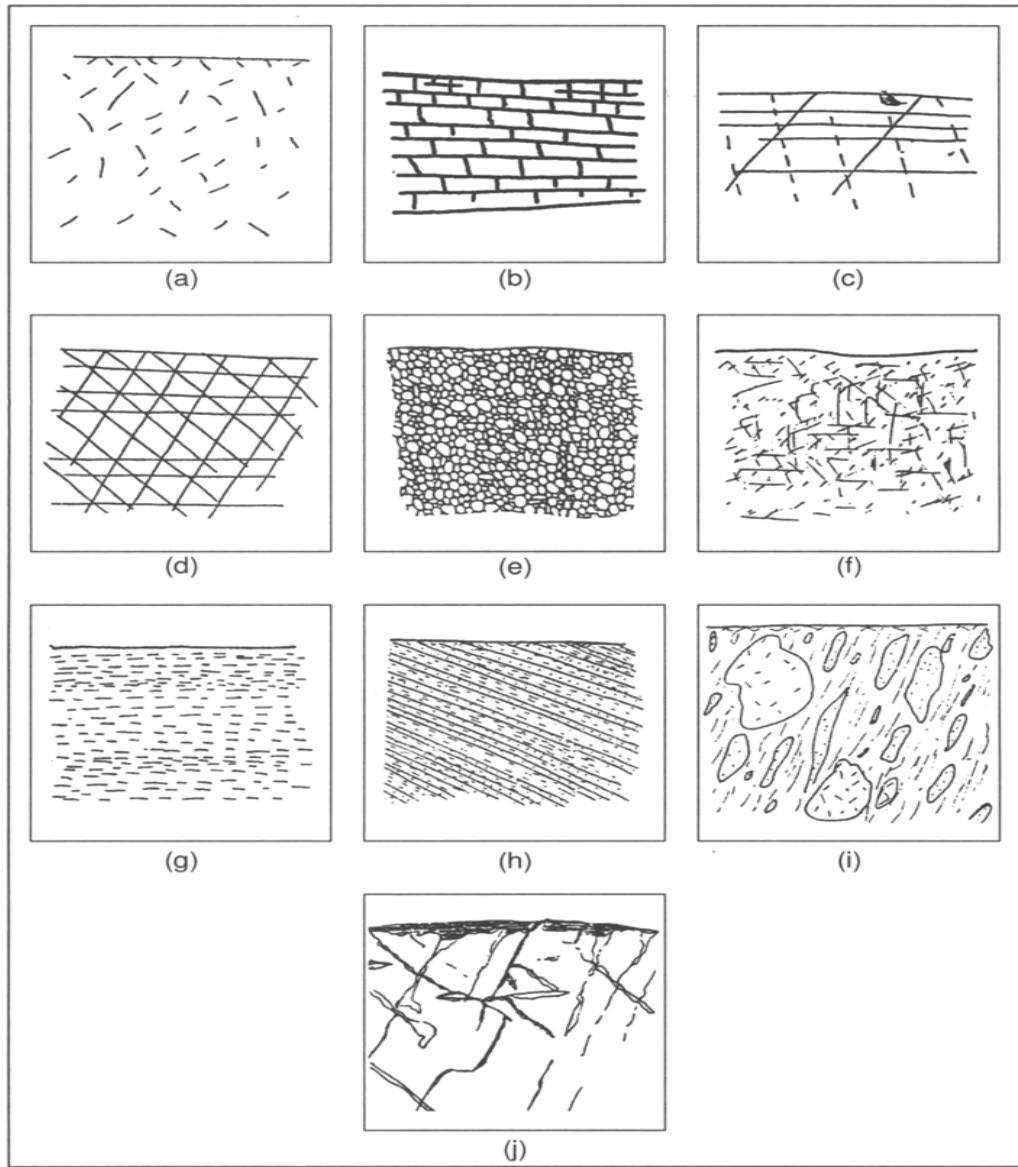
Kaya kütleleri, yapısal ve mekanik özellikleri açısından başlıca dokuz ana gruba ayrılırlar (Goodman, 1995). Söz konusu kaya kütlelerinin genel özellikleri aşağıda tanımlanmıştır.

- (a) **Eklemsiz (masif) kaya kütleleri:** Söz konusu kaya kütleleri, bozunma zonunun alt tarafında bulunurlar. Masif kumtaşları ve granitik kayalar ile foliasyon içermeyen temel kaya kütleleri bu gruba örnek verilebilir. (Şekil 4.1a).
- (b) **Kısmen eklemli kaya kütleleri:** Söz konusu kaya kütleleri; üçten az sayıda, devamlılığı fazla eklem setlerini içeren ve kazıldıkları zaman münferit blokların elde edilemediği kaya kütleleridir. (Şekil 4.1b). Bu tür kaya kütleleriyle ilgili mühendislik hesaplamalarında, özellikle kırık mekaniğinin esasları göz önünde bulundurulur.
- (c) **Kısmen bloklı kaya kütleleri:** Söz konusu kaya kütleleri; açık veya yumuşak malzeme tarafından doldurulmuş, sayısı üçten az olan eklem setlerini içermesinin yanı sıra, kapalı ikincil süreksizlikleri de içerirler (Şekil 4.1c). Bu kapalı eklem setlerinden birinin deformasyona bağlı olarak açılması halinde, gerçek anlamda kaya kütlelerinde bir bloklanma gelişebilir.
- (d) **Bloklı kaya kütleleri:** Yumuşak dolgu içeren veya açık, devamlılığı yüksek, üçten fazla sayıda süreksizlik takımı içeren kaya kütleleri bu sınıfta yer alırlar (Şekil 4.1d). Söz konusu kaya kütleleri çok sayıda süreksizlik tarafından bölünmüş olduğu için, kazı sırasında blok kolaylıkla elde edilir.

- (e) **Çok gözenekli kaya kütleleri:** Bu tür kaya kütlelerinde önemli miktardaki gözenekler; poro-elastisite, akışkan içeriği, akışkanın hareketi ve gerilme altında gözeneklerin tahrip olması gibi nedenlerle kayanın mekanik davranışını etkilerler. (Şekil 4.1e).
- (f) **İleri derecede fisürlü kaya kütleleri:** Fisürlü kayalar, önemli ölçüde kırılmalığa ve yönserliğe (anizotropiye), ayrıca tüm mekanik özellikleri açısından sapmalara neden olan, sık aralıklı küçük süreksizlikler içerirler. (Şekil 4.1f). Bu tür kaya kütlelerinden örnek alımı ve deney yapılması oldukça güç olup, bunlar mekanik davranışları açısından sıkı-fisürlü killerle benzerlik gösterirler (Ulusay ve Sönmez, 2007).
- (g) **Sıkışan ve şişen kaya kütleleri:** Bu tür kaya kütleleri, suyla temas ettiklerinde ani veya gecikmeli olarak çatlayarak hacim değişimine uğrarlar ve aktif kil minerallerini içerirler. (Şekil 4.2g). Ayrıca yüzeyde atmosferik koşullar altında bozunmaya uğrayan bu tür kaya kütlelerine zemin mekaniğinin temel ilkeleri ve yöntemleri uygulanır (Ulusay ve Sönmez, 2007).
- (h) **Aykırı kayaların karışımı:** Bu grupta yer alan kaya kütleleri; düzenli birardalanmaya sahip litolojik birliktelikleri (örneğin, ritmik tabakalı kumtaşı ve şeyl; Şekil 4.2h), izotrop ve gelişigüzel karışımları (örneğin, çekirdek taşlarıyla birlikte saprolit) ve foliasyonlu gelişigüzel karışımları (örneğin, serpantin ve melanj; Şekil 4.2i) içerebilir. Günümüzde bu tür kayaların mekanik anlamda değerlendirilmesi için geliştirilmiş ayrıntılı yöntemler ve sınıflama sistemleri mevcut olmamakla birlikte, eşdeğer malzeme modellerinin (fiziksel modeller) kullanıldığı özel yöntemler önerilmiştir (Lindquist ve Goodman, 1994; Medley ve Goodman, 1994; Sönmez vd., 2006a).

- (i) **Boşluklu kaya kütleleri:** Bu grupta çözünebilir özellikteki kireçtaşları, dolomit, jips, kaya tuzu ve çözünebilir bir çimento ile tutturulmuş kırıntılı sedimanter kayalar yer almaktadır (Şekil 4.1j) (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Yukarıda tanımlanan kaya kütlesi türleriyle ayrı ayrı karşılaşılabileceği gibi, birden fazla kaya kütlesi türünün birarada bulunabileceği ortamlar da söz konusu olabilmektedir. Örneğin, oldukça gözenekli bir kaya, aynı zamanda bloklu olabilir veya bloklu bir kaya kütlesi de devamlılığı az olan fisürleri içerebilir.




Şekil 5.1 Kaya kütlesi türleri: (a) masif kaya, (b) kısmen eklemlı kaya kütlesi, (c) kısmen bloklu kaya kütlesi, (d) bloklu kaya kütlesi, (e) çok gözenekli kaya kütlesi, (f) ileri derecede


fisürlü kaya, (g) sıkışan ve şişen kaya, (h) düzenli karışımlar, (i) düzensiz karışımlar (melanj) ve (j) boşluklu kayalar (Goodman, 1995).

#### 4.4 Kaya Yapısı İndeks Abağı

Oluşturulması düşünülen Kaya Yapısı İndeks abağında Kaya kütle kalitesi arttıkça dayanım artmakta, kaya kütle yapısı azaldıkça ise dayanım azalmaktadır. Ayrıca her kaya kütle sınıfı da kendi içinde 4 alt sınıfa ayrılmakta ve bunlar yapısal indeks puanına göre sıralanmaktadır. Oluşturulması düşünülen Kaya Yapısı İndeks abağı Şekil 4.2 'de görülmektedir.

	<b>Yapısal İndeks</b>			
Masif ve Gevrek Kaya Kütleleri	+ 			
Bloklu ve Eklemlı Kaya Kütleleri				
Tabakalı Kaya Kütleleri				
Parçalanmış-Örselenmiş Kaya Kütleleri				
Ardalanmalı Kaya Kütleleri				
Matriks İçinde Bloklar				
Sıkışabilen-Şişebilen Kaya Kütleleri				
	-			

**Dayanım**

+  -

Şekil 5.2 Kaya yapısı indeks abağı

## BÖLÜM ALTI

### SONUÇ

Bu tez çalışmasında KYİ'nin temeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında her kaya sınıfı kendi içinde, kendi sınıfına özgü parametreler ile değerlendirilmiştir. Örnek olarak, granitten oluşan bir formasyonda su durumuna çok fazla ağırlık verilmezken, killi bir formasyonda su durumu önemsenmiştir. Bunun yanında; fliš içeren bir formasyonun dayanımının belirlenmesi için Disk Makaslama Dayanım İndeksi önerilirken, sağlam bir formasyonda Tek Eksenli Basınç Dayanımı önerilmiştir. Bu temel ve ana felsefe çerçevesinde tez içerisinde bahsedilen parametrelerin KYİ ile ilişkisi zaman içerisinde yapılacak çalışmalar ile tamamlanacaktır.

Günümüzde çok sık kullanım alanı bulan ve ön tasarım aşamalarında kullanılan kaya kütle sınıflama sistemleri bazı konularda yetersiz kalabilmekte bazen de sınırlı kalabilmektedir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, RQD'ye bağlı olan Q sınıflama sistemi zayıf-olağan üstü zayıf kaya koşullarında çok sık rastlanan RQD'nin 0 olduğu durumlarda işlevini yitirmektedir. Bu tip kayalarda standartlara uygun şekilde numune hazırlamak çok zor hatta bazen imkânsız olabilmektedir. Bu durumda 2002 yılında yenilenen  $Q_c$  hesaplaması da zorluklar içermektedir.

Aynı şekilde RMR sistemi de RQD'yi bir değiştirge olarak bünyesinde barındırmaktadır. Zayıf-Çok zayıf kayalarda ve ileri derece eklemlili kayalarda yukarıda bahsedilen durumdan dolayı kaya kütlelerine RQD'ye bağlı bir puan ataması yapılamamaktadır.

RMI sınıflama sisteminde ise bu tip kayalarda karakterizasyonda karşılaşılan Aşırı dayanaklı-Aşırı düşük sınıfı bir tünel inşaatında ya da şev stabilitesi problemlerinin çözümünde uygulayıcıyı yanıltabilmektedir.

GSI'da ise 1999 yılında modifiye edilmiş halinde Laminalı-Foliasyonlu kaya sınıfı için geliştiricileri de herhangi bir açıklama getirememektedir. Bu nedenle ardanmalı, ileri derece eklemlili, Block-in-Matriks tipi kayalarda bu sistemin

kullanımında çok dikkatli olunması gerekmektedir. Ayrıca, yeraltı suyunun kaya kütlelerine etkisi bu sistem içerisinde dikkate alınmamaktadır. Bozuşma ise kaya kütesinin stabilitesine etki eden önemli parametrelerden olmasına rağmen bu sistemde bir değiştirge olarak bulunmamaktadır.

Kaya kütle sınıflama sistemlerinde yapılan sondajlardaki incelemelerde sadece RQD dikkate alınmaktadır. Oysa ki, karot verimi ve sağlam karot verimi de önemli birer parametredir. RQD sondörün marifetine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Karot verimi ve sağlam karot verimi de sondöre bağlı olmakla beraber bir değiştirge olarak kullanıldığında RQD'den daha hassas sonuçlar vereceği düşünölmektedir.

Kaya malzemesinin dayanımı diğer önemli değiştirgelerden birisidir. Ancak, bu parametreyi standartlara uygun şekilde elde edemiyorsak bunun yerine nokta yükleme indeksi veya schmidt hammer deneylerinin kullanabilmekteyiz. Fakat, bu deneylerinde yukarıda bahsedilen sakıncalarının olduğu bilinmektedir. KYİ'de Disk Makaslama Dayanım İndekside dayanım parametresinin dolaylı olarak belirlenmesinde kullanılacak bir deney olacaktır.

Bu bilgiler ışığında, özellikle zayıf-çok zayıf kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında daha hassas sonuçlar vereceğine inandığımız KYİ'nin temellerini bu tez çalışması oluşturmaktadır. Oluşturulan ana felsefe ve temelin üzerine sahada ve laboratuvarında yapılacak ölçüm, gözlem ve analizler eklenerek KYİ son halini alacaktır.

## KAYNAKLAR

- Aksoy, C. O., (2009), Performance Prediction of Impact Hammers by Block Punch Index for Weak Rock Masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol: 46(8), 1383-1388.
- Aksoy, C. O., Kantarci, O., Ozacar, V., (2010), An Example for Estimation of Rock Mass Deformations Around an Underground Opening by using Numerical Modeling, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2010, 47(2); 272-278.
- Ayday, C, (1989). *Statistical analysis of discontinuity parameters of Gölbaşı (Ankara) andesites, Süpren (Eskişehir) marble and Porsuk Dam (Eskişehir) peridotite*. PhD Thesis, Middle East Technical University, Geological Engineering Department, Ankara, 186 p.
- Barr, M. V., and Hocking, G., (1976). *Borehole structural logging employing a pneumatically inflatable impression packer*. Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, Balkema, Rotterdam, pp. 29-34.
- Fookes, P. G., and Denness, B., (1969). Observational studies on fissure patterns in Cretaceous sediments of southeast England. *Geotechnique*, 19 (4), 453-77.
- Gerçek, H. and Müftüoğlu Y. V. (1993) *Failure Characteristics of Coal Measure Rocks*, International Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, A Regional Symposium of ISRM, İstanbul, Vol. 6, No. 2 pp. 329 – 334.
- Golder Associates, (1979). *Instruction Manual-I: Geotechnical Data Collection*. UNDP Training Project, Contract No: Con. 97/78, 56 p.

- Goodman, R. E., (1995). Block theory and its application. *Geotechnique*, 45 (3), 383-423.
- Gökçeoğlu, C, (1997). *Killi, yoğun süreksizlik içeren ve zayıf kaya kütlelerinin mühendislik sınıflamalarında karşılaşılan güçlüklerin giderilmesine yönelik yaklaşımlar*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 214 s (yayımlanmamış).
- Hoek, E., and Brown, E. T., (1980). *Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy*. Stephen Austin and Sons, London, 527 p.
- Hoek, E., and Bray, J. W., (1981). *Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy*, Stephen Austin and Sons Ltd., London, 3rd edition, 358 p.
- Hoek, E., Wood, D., and Shah, S., (1992). *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses*. ISRM Symposium: Eurock '92-Rock Characterization, J. A. Hudson (ed.), Thomas Telford, pp. 209-213.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B., (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 edition*. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273.
- Hoek, E., and Diederichs, M. S., (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43 (2), 203-215.
- Hudson, J. A., (1989). *Rock Mechanics Principles in Rock Engineering Practice*. Butterworths, 72 p.



- ISRM, (1978). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 16, 135-140.
- ISRM, (1981). *ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring*. E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211 p.
- Lindquist, E. S., and Goodman, R. E., (1994). Strength and deformation properties of a physical model melange. *Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium*, Balkema, Rotterdam, pp. 843-856.
- Medley, E., and Goodman, R. E., (1994). Estimating the block volumetric proportions of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). *Proceedings of the 1st North American Rock Mechanics Symposium*, Balkema, Rotterdam, pp. 851-858.
- Priest, S. D., and Hudson, J. A., (1976). Discontinuity spacing in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13, 135-48.
- Priest, S. D., (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman&Hall, 473 p.
- Schrier, J. S., (1988). The block punch index test. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 38, 121-26.
- Snow, D. T., (1970). The frequency and apertures of fractures in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 7, 23-40.

- Sönmez, H., and Ulusay, R., (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 36 (6), 743-60.
- Sönmez, H. and Ulusay, R., (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, 26, 77-9.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Medley, E.W., Tuncay, E., and Nefeslioğlu, H.A., (2006). Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 554-561.
- Sönmez H, Tunusluoğlu C., (2008). New considerations on the use of block punch index for predicting the uniaxial compressive strength of rock material. *Int J Rock Mech Min Sci*;45:1007–14.
- Spencer, E. W., 1969. *Introduction to the Structure of the Earth*. Mc Graw-Hill, New York.
- Tresca, H., 1868, Memorie sur l'ecoulement des Corps Solides, *Mem. pres. div. Sav. Acad. Sci., Inst. Fr.*, v.18, pp.733-799.
- Ulusay, R., 1991. *Geotechnical evaluations and deterministle design considerations for pitwall slopes at Eskihsar (Yatağan-Muğla) strip coal mine*. PhD Thesis, Middle East Technical University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey, 340 p (yayımlanmamış).
- Ulusay, R., and Gökçeoğlu, C, (1998) . An experimental study on the size effect in block punch index test and its general usefulness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35 (4/5), 628-29 (In: NARMS' 98-ISRMI International Symposium, June 3-5, Cancun, Mexico),

Ulusay, R. ve Sönmez, H. (2007). *Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri* (2. Baskı). TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Ünal, E. ve Tutluoğlu, L., (1986), *Kaya Mekaniği İlkeleri*, TKİ Genel Md.lüğü, 86-03-05-01-010 kod nolu Proje, ODTÜ Maden Müh.Böl., Maden İşletme Anabilim Dalı, Ankara, 223 s.

Whitten, D. G. A., and Brooks, J. R. V., (1972). *A Dictionary of Geology*. Penguin, Harmondsworth.