

Dr. H. Sönmez-JEM720



BÖLÜM-7

KAYA KÜTLE SINIFLAMALARI

Dr. H. Sönmez-JEM720



Kaya Kütle Sınıflamalarının Amaçları

- Bir kaya kütesinin davranışına etki eden önemli parametreleri tanımlamak
- Kaya kütesini benzer davranışa sahip gruplara ayırabilmeli,
- Her bir kaya kütesi sınıfının karakteristiklerini anlamaya yönelik temel sağlamak
- Bir bölgedeki kaya kütesi durumu ve deneyimini diğerlerinde karşılaşılan koşullarla ve deneyimle ilişkilendirmek
- Mühendislik tasarımı için gerekli sayısal veri ve kılavuz ilkeler üretmek
- Mühendisler ve jeolog arasında iletişim için ortak bir temel sağlamak

Bieniawski (1989'dan)

Dr. H. Sönmez-JEM720



Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilebilecek kazanımlar:

- i. En az sayıda sınıflama parametresi esas alınarak, toplanan verilerle saha çalışmalarının kalitesinin artırılması,
- ii. Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veri sağlanması,
- iii. Daha doğru mühendislik kararlarının alınabilmesinin ve projelerde daha etkin bir iletişimin sağlanması.

RMR'ın ilk geliştirilmesi tünelticilik amaçlı olmakla birlikte, kaya kütlesi kalitesinin bir ölçüsü olması nedeniyle literatürde farklı amaçlara geliştirilen yaklaşımlarda da bir parametre olarak kullanılmıştır.

Dersin bu bölümünde RMR genel olarak verilmekle birlikte, tünel uygulamasına yönelik bir kurguyla sunulmuştur.

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720



Kaya Kütle Sınıflamalarının Tarihçesi

Mühendislik uygulamalarında kaya malzemesinin mekanik özelliklerinin yanı sıra kaya kütle davranışının tanımlanmasına ilişkin tasarıma yönelik gereksinimlerin artmasıyla birlikte kaya kütle sınıflamalarına yönelik çalışmalar 1940'lardan günümüze değerin hala önemli bir araştırma konusu olarak literatürde yerini almıştır.

- İlk kaya kütle sınıflama sistemi 1946 yılına uzanmaktadır. Terzaghi (1946) tarafından önerilen **kaya yükü sınıflaması (Rock Load Classification)**'dir.

Dr. H. Sönmez-JEM720

Literatürdeki yaygın bilinen temel kaya kütlesi sınıflamaları (Bieniawski, 1989'dan düzenlenmiştir.)



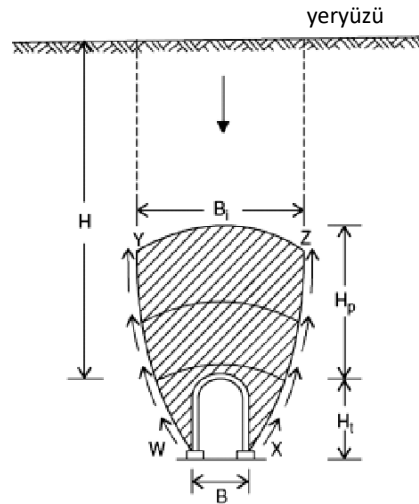
Sınıflamanın Adı	Referans	Kullanım Alanları
Kaya Yüğü (Rock Load)	Terzaghi (1946)	Tünel ve çelik destekleme
Desteksiz durma süresi (Stand-up-time)	Lauffer (1958)	Tünelcilik
NATM	Pacher vd. (1964)	Tünelcilik
Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designation, RQD)	Deere vd. (1973)	Karot loglama ve tünelcilik
RSR kavramı	Wickham vd. (1972)	Tünelcilik
Kaya Kütles Puanlaması (Rock Mass Rating, RMR)	Bieniawski (1973) – ilk öneri- Çok sayıda modifikasyonu olup, ilgili bölümde ayrıntılı olarak verilecektir)	Tünel, madenler, şevler, temeller
Q-Sistemi	Barton vd. (1974) – ilk öneri- Çok sayıda modifikasyonu olup, ilgili bölümde ayrıntılı olarak verilecektir)	Tünelcilik
Kaya Kütle İndeksi (Rock Mass Index, RMI)	Palmstörn (1995)	Tünelcilik
Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI)	Hoek ve Brown (1997) – ilk öneri- Çok sayıda modifikasyonu olup, ilgili bölümde ayrıntılı olarak verilecektir)	Kütlenin dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik çok sayıda ampirik yaklaşıma girdi parametresi

Dr. H. Sönmez-JEM720

TERZAGHI'nin Kaya Yüğü Yaklaşımı



- Tünelin tavanının üstüne gelişen ve tünelin tavanından itibaren yan duvarlarına doğru aktarılan yükü yaratacak bölümün yüksekliğini (H_p) ön görmeyi amaçlar. Tavanın üstünde gelişen bu zonun yarattığı etki kemerlenme etkisi olarak adlandırılır.
- Terzaghi, kemerlenmenin boyutlarının tünelin genişliği (B) ve yüksekliği (H_t) yanı sıra *kaya kütlelerinin özellikleri* tarafından birlikte denetlediğini ön görmüştür. Sınıflamanın temeli bu üç parametreye bağlı olup, bu amaçla sınıflamaya dönük bir tablo da önerilmiştir.
- Bu kaya yükü yüksekliği kullanılarak tünel destek sistemine etki edilecek yükün hesaplanması yapılabilir.
- Literatürdeki sınıflamaya dönük ilk yaklaşımdır.



Dr. H. Sönmez-JEM720



Terzaghi'nin Kaya Küyü Sınıflaması (Kwang ve Man-Sup, 2017'den alınmıştır)

Rock condition	Rock load Hp in feet	Remarks
1. Hard and intact.	Zero	Light lining required only if spalling or popping occurs
2. Hard stratified or schistose**.	0 to 0.25 B	Light support, mainly for protection against spalls.
3. Massive, moderately jointed.	0 to 0.5 B	Load may change erratically from point to point.
4. Moderately blocky and seamy.	0.25 B to 0.35 (B+Ht)	No side pressure
5. Very blocky and seamy	0.35 to 1.10(B+Ht)	Little or no side pressure
6. Completely crushed but chemically intact.	1.10(B+Ht)	Considerable side pressure. Softening effects of seepage towards bottom of tunnel requires either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs.
7. Squeezing rock, moderate depth	1.10 to 2.10(B+Ht)	Heavy side pressure, invert struts required. Circular ribs are recommended
8. Squeezing rock, great depth.	2.10 to 4.50(B+Ht)	
9. Swelling rock	Up to 250 feet, irrespective of the value of (B+Ht)	Circular ribs are required. In extreme cases use yielding support.

Han Fook Kwang and Cho Man-Sup. 2017. Case study comparing from Q-system and Terzaghi's Rock Load Classification. The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17) 28 August – 1 September, 2017, Ilsan (Suoul), Korea

Dr. H. Sönmez-JEM720



- Lauffer (1958) kaya kütesindeki açıklığın desteksiz kalma süresinin kaya kütesinin kalitesiyle ilişki olduğunu ifade etmiştir. Bu yaklaşım bazı değişimler geçirerek daha sonra diğer sınıflama sistemlerinin kullanım alanlarında da yerini almıştır.
- NATM bir sınıflamadan ziyade bir kazı tekniğidir. **NATM**: Prof. Dr. L.V. Rabcewicz Avusturya Alplerindeki deneyimlerle geliştiriyor (1948-1969 yılları arasında).

Rabcewicz'in NATM yöntemine ilişkin tanımı → «*İnce geçici bir destek yerleştirilerek deformasyonlara izin vermek suretiyle kaya basıncının azaltılarak çevre kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son desteklemeye daha az yüklenecek ve sonrasında daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilecektir. Deformasyonlar ölçümlerle gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarımı ile birlikte değerlendirilmelidir.*» Nispeten ucuz bir yöntemdir. Hızı ortama bağlı olup, TBM kadar yüksek ilerleme hızı yoktur.

Dr. H. Sönmez-JEM720

Kaya Kalite Göstergesi (Rock Quality Designation, RQD)

RQD kavramının geliştirilmesi 1964 yılına uzanmakla birlikte, Deere vd. (1967) tarafından literatüre kazandırılmıştır (Bieniawski, 1989)

$$RQD = \frac{\sum \text{LENGTH OF SOUND CORE} > 4 \text{ INCHES (100 mm)}}{\text{TOTAL CORE RUN LENGTH}} \times 100 \%$$

Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

1. Önerilen karot çapı NX (54 mm)
2. Düşey eklemler dikkate alınmaz
3. Sadece kaya karotları dikkate alınacak (ör: zemin niteliğinde kil, olmaz ancak kiltası olur)
4. Karotun çıkarılması sırasındaki oluşan mekanik kırıklar dikkate alınmaz kırıklar

RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)	DESCRIPTION OF ROCK QUALITY
0 - 25 %	VERY POOR
25 - 50 %	POOR
50 - 75 %	FAIR
75 - 90 %	GOOD
90 - 100 %	EXCELLENT

Deere vd. (1974)

Dr. H. Sönmez-JEM720

- RQD bir sondaj loglama parametresi olup, eklemlenme hakkında bilgi de verir.

RQD'nin süreksizlik frekansı ve dolaylı olarak süreksizlik aralığı ile ilişkisi (Priest, 1993'den)

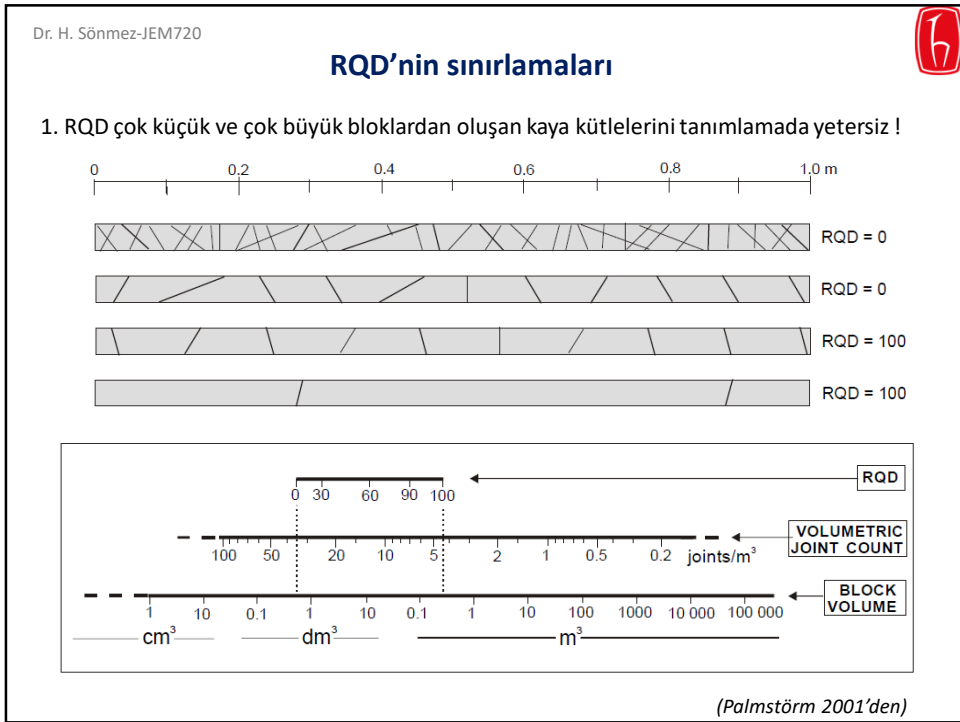
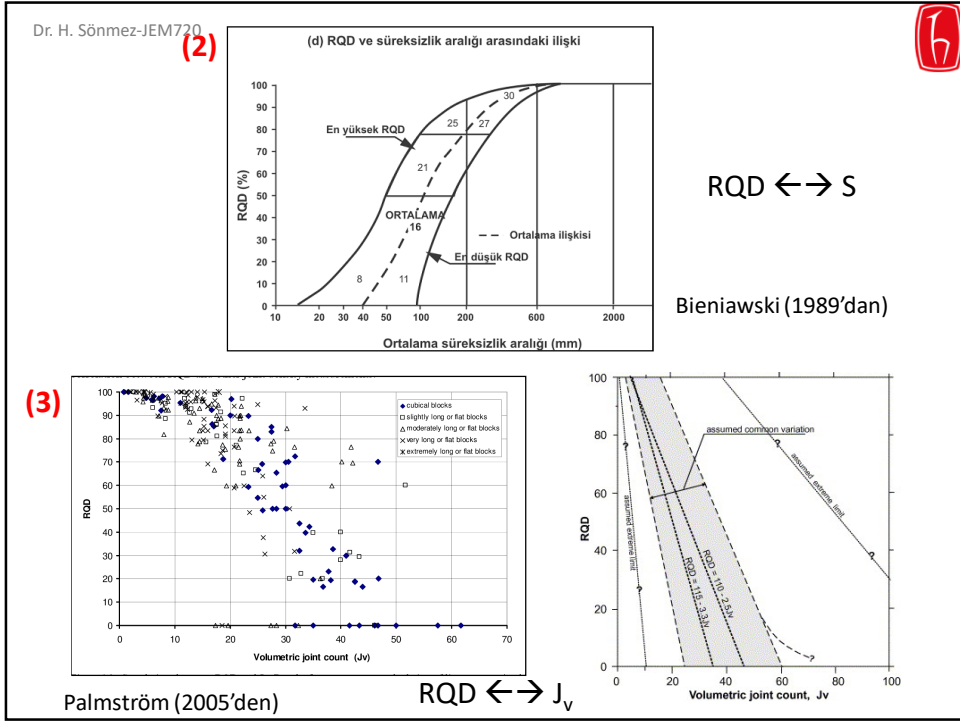
(1)

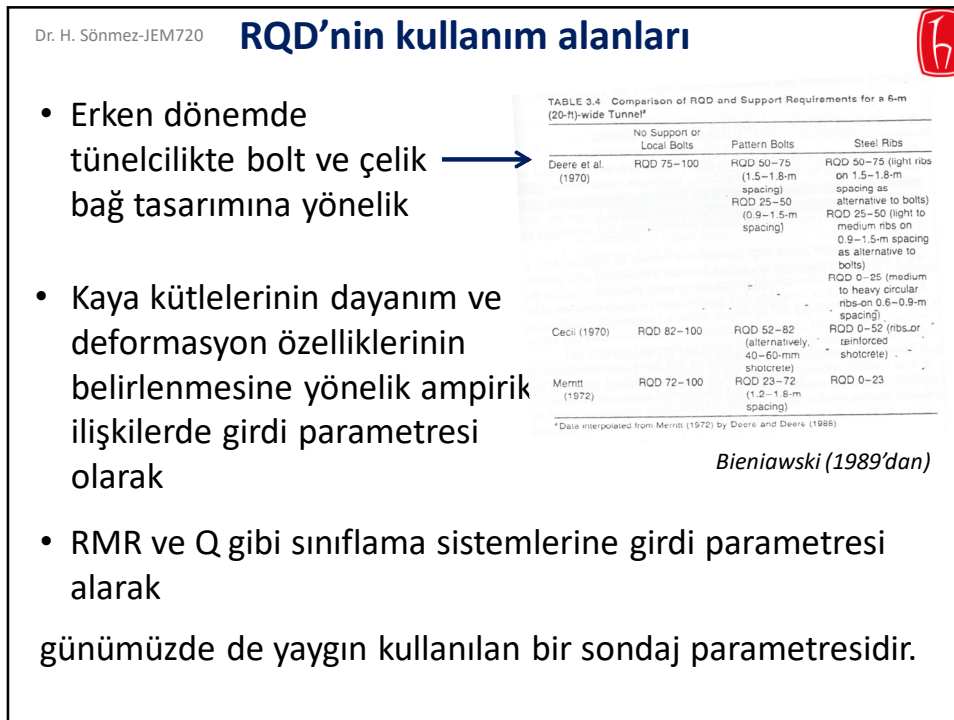
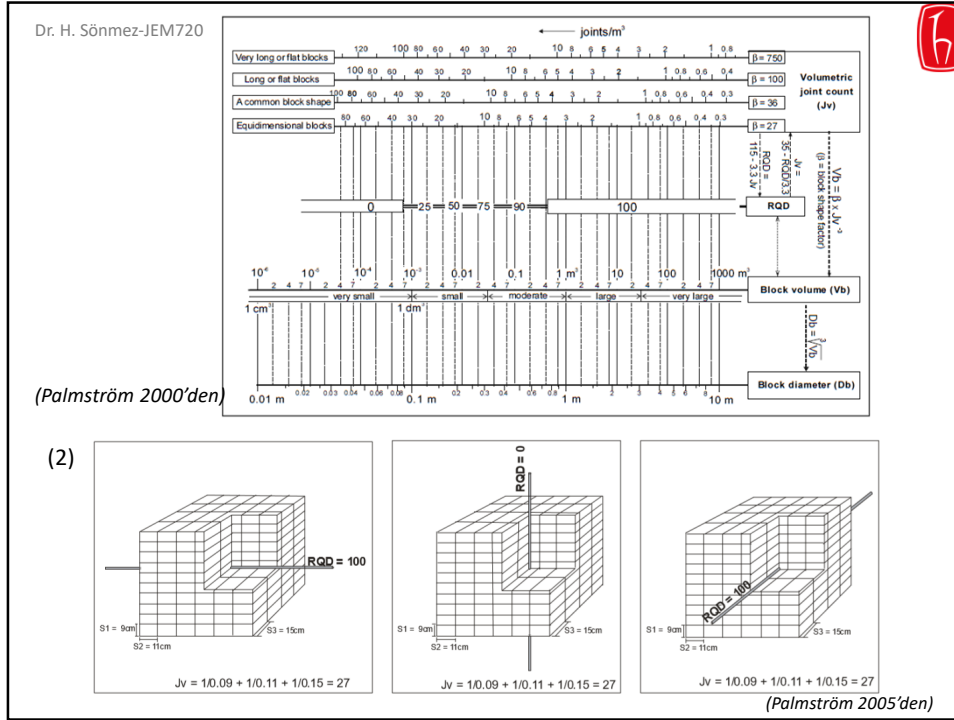
$RQD = 110.4 - 3.68\lambda$

$\lambda = 1/S$
S: süreksizlik aralığı (m)

Theoretical curve
 $RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$

Priest and Hudson (1976)





Dr. H. Sönmez-JEM720

Rock Structure Rating (RSR)



Wickham vd., (1972) tarafından geliştirilen bu yaklaşım kaya kütlesinin kalitesinin tanımlanması için sayısal bir yöntemdir.

Üç parametreden oluşur:

1. **A parametresi:** Kaya türü, sertliği ve jeolojik yapısını dikkate alır.

TABLE 3.5 Rock Structure Rating, Parameter A: General Area Geology*

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decomposed	Massive	Slightly Faulted or Folded	Moderately Faulted or Folded	Intensely Faulted or Folded
Igneous	1	2	3	4				
Metamorphic	1	2	3	4				
Sedimentary	2	3	4	4				
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

*After Wickham et al. (1974).

Bieniawski (1989'dan)

Dr. H. Sönmez-JEM720

2. **B Parametresi:** Eklemlenme modeli ve ilerleme yönünü dikkate alır.



TABLE 3.6 Rock Structure Rating, Parameter B: Joint Pattern, Direction of Drive*

Average Joint Spacing	Strike ⊥ to Axis Direction of Drive			Strike ∥ to Axis Direction of Drive		
	Both		Against Dip	Both		Against Dip
	Flat	Dipping		Flat	Dipping	
1. Very closely jointed, <2 in.	9	11	13	10	12	9
2. Closely jointed, 2–6 in.	13	16	19	15	17	14
3. Moderately jointed, 6–12 in.	23	24	28	19	22	23
4. Moderate to blocky, 1–2 ft	30	32	36	25	28	30
5. Blocky to massive, 2–4 ft	36	38	40	33	35	36
6. Massive, >4 ft	40	43	45	37	40	40

*After Wickham et al. (1974).

°Dip: flat: 0–20°; dipping: 20–50°; and vertical: 50–90°.

2. **C Parametresi:** Su durumu ve eklemlenme koşulları

TABLE 3.7 Rock Structure Rating, Parameter C: Groundwater, Joint Condition*

Anticipated Water Inflow (gpm/1000 ft)	Sum of Parameters A + B					
	13–44			45–75		
	Joint Condition					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, <200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200–1000 gpm	15	11	7	21	16	12
Heavy, >1000 gpm	10	8	6	18	14	10

*After Wickham et al. (1974).

°Joint condition: good = tight or cemented; fair = slightly weathered or altered; poor = severely weathered, altered, or open.

Bieniawski (1989'dan)

$$RSR = A + B + C$$

Dr. H. Sönmez-JEM720



- ✓ Çalışma kapasitesi 24.000 lb olan 25 mm çaplı kaya saplamasının (bolt) uygulama aralığı için:

$$\text{aralık (ft)} = \frac{24}{W} \quad W = 1000 \text{ lb/ft}^2 \text{ cinsinden kaya yükü}$$

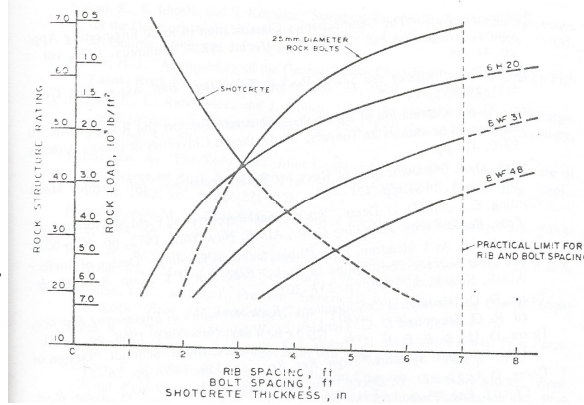
- ✓ Püskürtme beton kalınlığı ise

$$\text{Bolt aralığı (ft)} = \frac{24}{W}$$

veya

$$t = D \frac{65 - RSR}{150}$$

t: püskürtme beton kalınlığı (in),
W: kaya yükü (lb/ft²), D: tünelin çapı (ft)



RSR kavramı: 24 ft (7.3 m) çaplı tünel için uygulama abağı (Wickham vd., 2972'den)

Bieniawski (1989'dan)

Dr. H. Sönmez-JEM720



KAYA KÜTLESİ PUANLAMA SİSTEMİ (ROCK MASS RATING SYSTEM – RMR)

RMR sınıflama sistemi ilk defa Bieniawski tarafından 1973'de önerilmiştir. RMR'in girdi parametreleri genel olarak korunmakla birlikte puanlamadaki gelişimi son versiyonunun önerildiği 1989 yılına kadar sürmüştür. Bazı çalışmalarda Jeomekanik Sınıflama Sistemi olarak da bilinir.

NEDEN KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMİ? AMAÇ NEDİR?

Bieniawski (1988), kaya kütleli sınıflama sistemlerinin başlıca amaçlarını aşağıdaki şekilde belirtmektedir.

- Kaya kütleli davranışını etkileyen önemli parametreleri tayin etmek,
- Kaya kütleli kendi içerisinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kalitedeki kaya kütleli sınıflarını belirlemek,
- Her kaya kütleli sınıfının özelliklerinin anlaşılması amacıyla esaslar oluşturmak,
- Herhangi bir sahadaki kaya kütleli koşullarıyla ilgili olarak kazanılan deneyimleri diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak,
- Mühendislik tasarımı için sayısal veri tabanı ve bir kılavuz oluşturmak,
- Mühendisler arasında ortak temele dayalı teknik iletişimi sağlamak.

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720



RMR (1973 versiyonu)

- İlk kez 1973'de önerilen sistemde aşağıda belirtilen 8 parametre esas alınmakta ve sınıflama bu parametrelere verilen puanlara göre yapılmaktaydı.
 - Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
 - RQD
 - Bozunmanın derecesi
 - Süreksizlik aralığı
 - Süreksizlik açıklığı
 - Süreksizliklerin devamlılığı
 - Yeraltı suyu akışı
 - Süreksizlik yönelimi

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720



İlk kez önerildiği 1973 yılında RMR Sınıflama Sistemi tarafından kullanılan parametreler ile kaya kütlesi sınıflarına göre bunlara ilişkin tanımlama ölçütleri ve değişim aralıkları (Bieniawski, 1973).

No.	Parametre	1	2	3	4	5
		Çok iyi	İyi	Orta	Zayıf	Çok zayıf
1	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
2	Bozunma	Bozunmamış	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Çok fazla bozunmuş	Tamamen bozunmuş
3	Kaya malzemesinin dayanımı	>200	100-200	50-100	25-50	<25
4	Süreksizlik aralığı	>3m	1-3m	0.3-1m	50-300mm	<50mm
5	Süreksizlik açıklığı	<0.1mm	<0.1mm	<0.1-1mm	1-5mm	>5mm
6	Süreksizliğin devamlılığı	Sürekli değil	Yok	Sürekli dolgu yok	Sürekli ve dolgulu	Sürekli ve dolgulu
7	Yeraltı suyu akışı (açıklığın her 10 m'inde)	Yok	Yok	Az <25 lt/dk	Orta 25-125 lt/dk	Fazla >125 lt/dk
8	Eğim ve doğrultü	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR Sistemi'nin 1973'teki versiyonuna göre sınıflama parametreleri için önerilmiş puanlama çizelgesi (Bieniawski, 1973).



No.	Parametre	Sınıf					
		1	2	3	4	5	
1	RQD	16	14	12	7	3	
2	Bozunma	9	7	5	3	1	
3	Kaya malzemesinin dayanımı	10	5	2	1	0	
4	Süreksizlik aralığı	30	25	20	10	5	
5	Süreksizlik açıklığı	5	5	4	3	1	
6	Süreksizliğin devamlılığı	5	5	3	0	0	
7	Yeraltısuyu	10	10	8	5	2	
8	Doğrultu ve eğim	Tüneller	15	13	10	5	3
		Temeller	15	13	10	0	-10

RMR Sistemi'nin 1973'teki versiyonunda kaya kütleli sınıfları ve her sınıf için RMR puanı değişim aralıkları (Bieniawski, 1973).

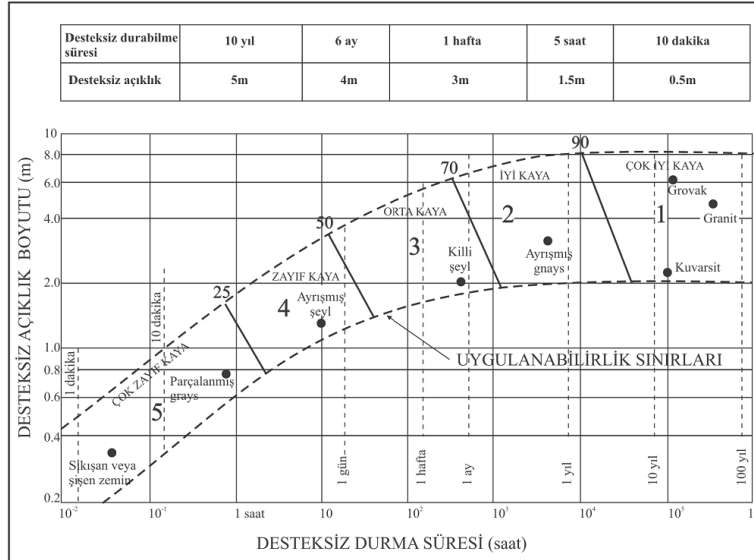
Aralıklar neyi hatırlattı?

Sınıf No.	1	2	3	4	5
Sınıf tanımı	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Toplam puan	100←-90	90←-70	70←-50	50←-25	<25

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR, sisteminin 1973'teki ilk versiyonuna göre "desteksiz açıklık boyutu - desteksiz durma süresi" ilişkisini gösteren grafik (Bieniawski, 1973).



(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

(Çapı: 5-12 m arasında değişen süz tüneller... kazıda delme ve patlatma uygulaması)



RMR Sistemi'nin
1973'teki ilk
versiyonunda
ön destek
sisteminin
seçimi amacıyla
önerilmiş
kılavuz
(Bieniawski,
1973).

Kaya külesi sınıfı	Desteksiz duraylı kalabilme süresi (açıklık)	DESTEK SİSTEMLERİ						
		KAYA SAPLAMALARI		PÜSKÜRTME BETON			ÇELİK BAĞLAR	
		Aralık	Ek destek	Kemer	Yan duvarlar	Ek destek	Türü	Aralık
1	10 yıl (5 m)	GENELLİKLE DESTEK GEREKMEZ						
2	6 ay (4 m)	1.5 - 2.0 m	Tavan kemeninde yer yer hasır çelik	50 mm	-	-	Ekonomik değil	
3	1 hafta (3 m)	1.0 - 1.5 m	Çelik hasır ve kemerde 30 mm'lik püskürtme beton	100 mm	50 mm	Gerekli durumlarda yer yer çelik hasır ve kaya saplamları	Hafif çelik baş profiller	1.5 - 2.0 m
4	5 saat (1.5 m)	0.5 - 1.0 m	Çelik hasır ve kemer ve yan duvarlarda 30- 50 mm'lik püskürtme beton	150 mm	100 mm	Çelik hasır ve 1.5 m aralıkla 3 m uzunluğunda kaya saplamları	Orta aralıklı profiller ve 50 mm kalınlığında püskürtme beton	0.75 - 1.5 m
5	10 dakika (0.5 m)	Önerilmez		200 mm	150 mm	Çelik hasır, kaya saplamları ve hafif çelik bağlar	Ağır çelik profiller yerleştiril- dikten hemen sonra 80 mm kalınlığında püskürtme beton	0.7 m

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR (1974 versiyonu)



1	Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	> 200	100-200	50 - 100	25 - 50	< 25
	Puan	10	5	2	1	0
2	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
	Puan	20	17	14	8	3
3	Süreksizlik aralığı	> 3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 mm
	Puan	30	25	20	10	5
4	Süreksizliklerin yönelimi	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
	Puan	15	13	10	6	3
5	Süreksizlik koşulu	Kapalı: Aynılma < 0.1 mm, sürekliliği değil		Aynılma < 1 mm, sürekliliği ve dolgunluk	Aynılma 1 - 5 mm, sürekliliği, Dolgu < 5 mm	Aynılma > 5 mm, sürekliliği Dolgu > 5 mm
	Puan	15		10	5	0
6	Yeraltı suyu (tünelin 10 m'lik kısmından gelen su)	Yok		< 25 lt/dk	25 - 125 lt/dk	> 125 lt/dk
	Puan	10		8	5	2

Sistemin 1973 versiyonundakinden farklı olan parametreler ve puanlar gri fonla gösterilmiştir.

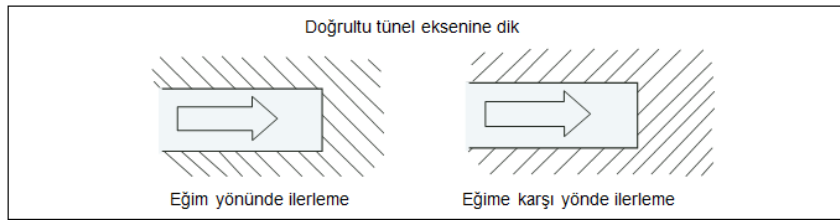
(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR Sistemi'nin 1974 versiyonunda tünellerde süreksizlik yöneliminin etkisinin tanımlanması için önerilmiş ölçütler (Bieniawski, 1974).



Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		*Doğrultuya bakılmaksızın eğim 0° - 20° arasında
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı yönde ilerleme		Eğim	Eğim	
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	Uygun değil



*Bu eğim aralığı için yapılan tanımlama, Bieniawski (1984) tarafından "orta" şeklinde değiştirilmiş olup, günümüzde de bu şekilde kullanılmaktadır.

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR (1976) versiyonu



A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI *

Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 8 MPa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli sıkışma dayanımı tercih edilmeli		
		> 200 MPa	100 - 200 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
1		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	> 3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 mm		
	Puan	30	25	20	10	5		
4	Süreksizlik koşulu	Çok pürüzlü yüzeyler, sürekliliği değil, ayrılma yok, sert eklem, yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler, ayrılma < 1 mm, sert eklem yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler, ayrılma < 1 mm, yumuşak eklem yüzeyi	Kaygan yüzeyler veya dolgu < 5 mm veya 1-5 mm açıklıkta eklem, sürekliliği eklem	Yumuşak dolgu > 5 mm veya açık eklem > 5 mm, sürekliliği eklem		
	Puan	25	20	12	6	0		
5	Yeraltı suyu (tünelin 10 m'lik kısmından gelen su)	Yok		< 25 litre/dk	25 - 125 litre/dk	> 125 litre/dk		
	Puan	10		8	5	2		

* Sistemin 1974 versiyonundakinden farklı olan parametreler ve puanlar gri fonla gösterilmiştir.

B. KAYA SINIFLARI VE PUANLARI

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

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR Sistemi'nin 1976 versiyonundan günümüze değin kullanılan destek sistemleri seçim kılavuzu (Bieniawski, 1976).

(Şekil: At nalı; İnşaat: Delme ve patlatma; Genişlik: 10 m; Düşey gerilme < 25 MPa)

KALICI DESTEK (TAHKİMAT)				
KAYA KÜTLESİ SINIFI	Kazı	Kaya saptamaları* (10 m genişlikteki tünel için)	Püskürtme beton	Çelik destek
I	Tam kesit, 3 m ilerleme,	Bir miktar kaya saptaması haricinde genellikle destek gerektirmez		
II	Tam kesit, 1,0 – 1.5 m ilerleme, komple destek. Aynaya 20 m uzaklıkta.	Kemerin her 2 – 3 m'inde yer yer saptama, tel kafeslerle 2 – 2,5 m aralıktı	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Yok
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1,5 – 3 m ilerleme. Komple destek. Aynaya 10 m uzaklığa kadar gerekli.	3 – 4 m uzunlukta sistematik saptamalar. Kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerde 1,5 – 2 m aralıktı.	Tavan kemerinde 50 – 100 mm, yan duvarlarda 30 mm	Yok
IV	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1,0 – 1.5 m ilerleme, kazıya uygun şekilde aynaya 10' m uzaklığa kadar destek gerekli.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1 – 1.5 m aralıktı, 4 – 5 m uzunlukta sistematik saptama.	Tavan kemerinde 100 – 150 mm ve yan duvarlarda 100 mm	Gereken yerde 1,5 m aralıktı ve yer yer hafif profiller
V	Tavan ve tabanda birlikte ilerleme. Tavandan 0,5 – 1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlatmadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1 – 1.5 m aralıktı, 5 m uzunlukta sistematik saptama.	Tavan kemerinde 150 – 200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm.	Çelik destek, 0.75 m aralıktı orta-ağır profiller

* 20 mm çaplı tamamen reçine dolgulu

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR (1979 versiyonu)

Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım terah edilir	
						5-25 MPa	<1 MPa
	Tek eksenli sıkıma dayanımı	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5-25 MPa	<1 MPa
Puan		15	12	7	4	2	1 0
Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25	
	Puan	20	17	13	8	3	
Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 m	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Puan	20	15	10	8	6	
Süreksizliğin koşulu		Çok pürüzlü yüzeyler, sızdırmaz değil, aynaya çok sert eklem yüzeyleri	Az pürüzlü yüzeyler, sızdırmaz değil, aynaya 1 mm, az bozunmuş yüzeyler	Az pürüzlü yüzeyler, sızdırmaz değil, aynaya 15 mm, az bozunmuş yüzeyler	Kaygan yüzeyler VEYA dolgu < 5 mm VEYA açıklık 1-6 mm	Yumuşak dolgu < 6 mm VEYA açıklık < 6 mm devamlı kaygan yüzeyler VEYA dolgu < 5 mm açıklık 1-5 mm süreksizlikler	
	Puan	30	25	20	10	0	
Yeraltı suyu	Tünelin 10 ml'lik kısmından gelen su	Yok	< 10 litre/dk	10-25 litre/dk	25 - 125 litre/dk	> 125 litre/dk	
	Dönme oranı	ORANI		0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	< 0.5	
Genel koşullar		Tamamen kuru	Nemli	Islak	Danişma	Su akışı	
	Puan	15	10	7	4	0	

B. SÜREKSİZLİK YONELİMİNE GÖRE DÜZELTME*

Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Tünel	0	-2	-5	-10	-12
Temeller	0	-2	-7	-15	-25
Şevler	0	-5	-25	-50	-80

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

* Sistemin 1976 versiyonundakinden farklı olan parametreler ve puanlar gri fonla gösterilmiştir.

Dr. H. Sönmez-JEM720



RMR (1989 versiyonu)

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

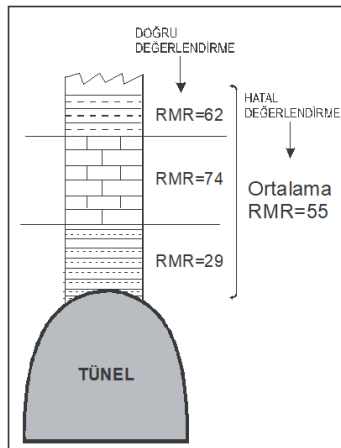
(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

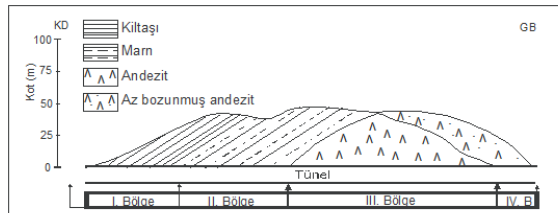


Benzer (üniform) kaya kütlesi bölgelemesi ve doğru – hatalı değerlendirmeye örnekler

Tünel tavanından yukarı



Tünel güzergahı boyunca



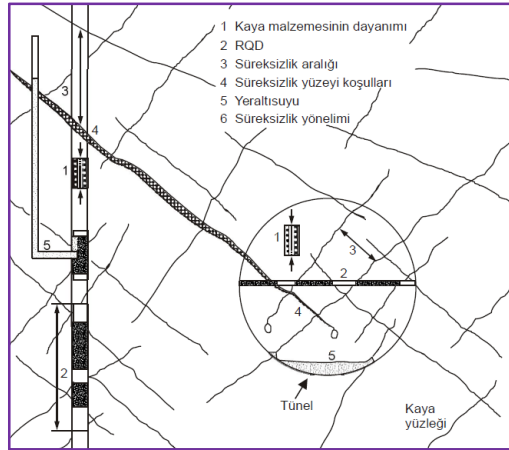
(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720



RMR'in Parametreleri

Arazi de kaya kütlesi mostralarında (yüzlek) ve sondaj karotlarında yapılan gözlem ve deneylerle belirlenen 5'i temel girdi ve biri düzeltme parametresi bulunmaktadır.



(Hudson, 1989)

RMR → 0 ile 100 arasında değişir !

Dr. H. Sönmez-JEM720



- ✓ RMR uygulanırken, kaya kütlesi benzer (üniform) özelliğe sahip bölgelere ayrılmalı ve her bir bölge için RMR ayrı ayrı belirlenmelidir. Bu durum tünel uygulaması temelinde güzergahın bütünü için dikkate alınmalıdır.
- ✓ RMR belirlenirken 5 temel girdi parametresinin her biri için ayrı ayrı değerlendirme yapılmalı ve puanı verilmelidir. EKSİK değerlendirme olmaz !

RMR PARAMETRELERİN PUANLAMASI

RMR'in beş sınıfı üzerinden sunulan genel tablosu kaba bir değerlendirme için kullanılabilir. **ANCAK ayrıntılı bir puanlama için mutlaka grafikler ve ayrıntılı tanımlama çizelgeleri kullanılmalıdır !**

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI*

Sınıf	Parametre	Kaya malzemesinin dayanımı				Diğer parametreler için tek eksenli dayanım tercih edilir.		
		> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	6-25 MPa	1-15 MPa	< 1 MPa
1	Notlu yüzölçümü	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	6-25 MPa	1-15 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	> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Puan	20	15	10	8	6		
4	Süreksizliklerin durumu	Çok pürüzsüz yüzeyler, sızma yok, geniş açıklık, çatlak yüzeyleri	Az pürüzsüz yüzeyler, sızma az, boşluklu yüzeyler	Az pürüzsüz yüzeyler, sızma orta, boşluklu yüzeyler	Kaygan yüzeyler, sızma orta, boşluklu yüzeyler	Yumuşak, sızma orta, boşluklu yüzeyler, sızma orta, boşluklu yüzeyler		
	Puan	30	25	20	10	0		
5	Tünelin 10 m'lik kısmından geçen su	Yok	< 10 litre/dk	10-25 litre/dk	25 - 125 litre/dk	> 125 litre/dk		
	Puan	5	4	3	2	1		
6	Yeraltı suyu	Yok	Orta	Orta	Orta	Orta		
	Puan	0	1	1	1	1		
7	Genel koşullar	Tamamen iyi	İyi	Orta	Danışma	Su sıkı		
	Puan	15	10	7	4	0		

Dr. H. Sönmez-JEM720

1) Kaya malzemesinin dayanımı

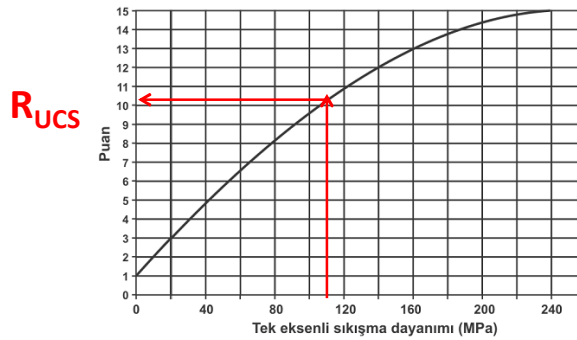
- Laboratuvar da standartlara uygun karotlar üzerinde deneysel olarak (σ_c veya UCS) belirlenir.
- Arazide veya laboratuvar da nokta yükü dayanım deneyi (I_{s50})
- Diğer bir alternatif → Disk Makaslama İndeksi (BPI)

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI*

Kaba değerlendirme →

Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 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

(a) Kaya malzemesinin dayanımı



Dr. H. Sönmez-JEM720

2) Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

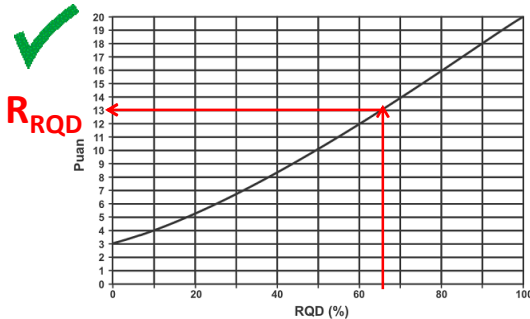
- Jeoteknik sondajlarda sondaj karotlarına ait ölçümlerle → doğrudan ölçülen RQD
- Jeoteknik sondaj verisinin olmadığı durumlarda, kaya mostralarında ölçülen ortalama süreksizlik aralığının (S) veya ortalama süreksizlik frekansının ($\lambda=1/S$) RQD ile arasındaki ilişkilerden

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI*

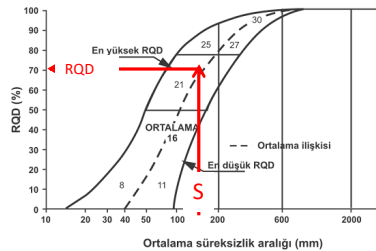
Kaba değerlendirme →

Kaya kalite göstergesi, RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25
	Puan	20	17	13	8

(b) RQD



(d) RQD ve süreksizlik aralığı arasındaki ilişki



veya

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

(Priest ve Hudson, 1976)

Dr. H. Sönmez-JEM720

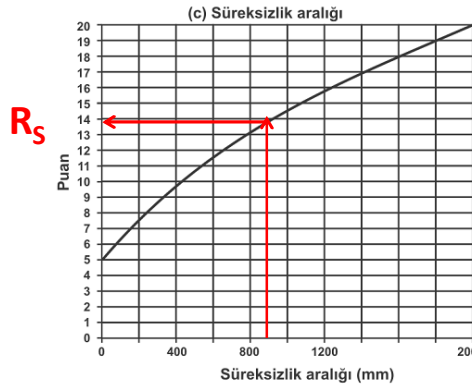
3) Süreksizlik Aralığı (S)

- Mostrada hat etüdü ölçüleriyle
- Jeoteknik sondajlarda ilerleme aralığının ilerleme aralığındaki süreksizlik sayısına bölünmesiyle

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI*

Kaba değerlendirme →

3*	Süreksizlik aralığı	> 2 m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Puan	20	15	10	8	5



Dr. H. Sönmez-JEM720

4) Süreksizlik Yüzey Koşulu

- Mostrada hat etüdü ölçümlerinde süreksizlik yüzeyinde → devamlılık, açıklık, pürüzlülük, dolgu ve bozunma tanımlamalarıyla
- Jeoteknik sondajlarda tanımlamanın kalitesi düşer ve tecrübe gereklidir. Sondajın kalitesi de (iki veya üç tüplü vb.) önemlidir. Örneğin tabaka için yüksek devamlılık, bir birine tam oturan iki yüzeyde kapalı tanımlaması vb.

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI*

Kaba değerlendirme →

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

Süreksizlik yüzeyi koşulunun puanlandırılması için önerilen kılavuz (Bieniawski, 1989).

R_{SK}

Parametre	Puanlar				
	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılık)	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 m (1)	> 20 m (0)
Süreksizlik açıklığı	Yok (6)	< 0.1 mm (5)	0.1-1.0 mm (4)	1-5 mm (1)	> 5 mm (0)
Pürüzlülük	Çok pürüzlü (6)	Pürüzlü (5)	Az pürüzlü (3)	Düz (1)	Kaygan (0)
Dolgu	Sert dolgu			Yumuşak dolgu	
	Yok (6)	< 5 mm (4)	> 5 mm (2)	< 5 mm (2)	> 5 mm (0)
Bozunma	Bozunmamış (6)	Az bozunmuş (5)	Orta derecede bozunmuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

Parametrelere ait puanlar, parantez içinde verilmiştir

Dr. H. Sönmez-JEM720

5) Yeraltı suyu durumu

- i. Mostrada hat etüdü ölçümleri sırasındaki gözlemler
- ii. Tünel açılması sırasında tünele gelen suyun gözlenmesi ve ölçülmesi

Sadece aşağıdaki tablo kullanılır !

 R_w

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	— Veya —	— Veya —	— Veya —	— Veya —	— Veya —
		En büyük asal gerilme	ORANI 0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5
		Genel koşullar	— Veya —	— Veya —	— Veya —	— Veya —	— Veya —
Puan		Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı	
		15	10	7	4	0	

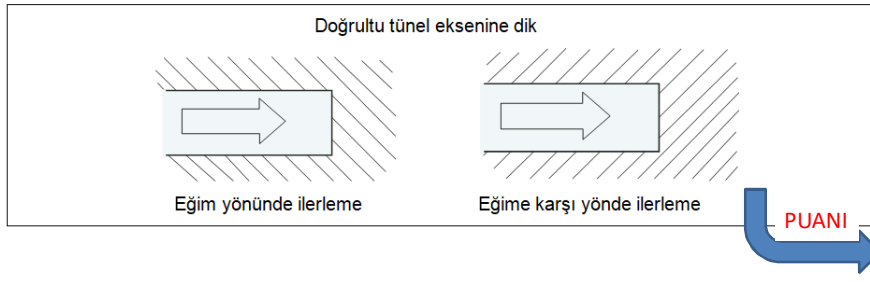
$$\text{Temel RMR} = R_{UCS} + R_{RQD} + R_S + R_{SK} + R_W$$

Dr. H. Sönmez-JEM720

5) Süreksizlik Yönelimi (SY)

- ✓ Tünel, şev ve temel mühendislik uygulamalarının her biri için ayrı ayrı bir DÜZETLME (sıfır veya negatif) puanıdır.
- ✓ Pratikte tünel uygulamaları için dikkate alınabilir bir parametre olmakla birlikte, şev ve temel için uygulama pratiği gelişmemiştir.

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



Dr. H. Sönmez-JEM720

B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME* R_{SY}

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

$$\text{Düzeltilmiş RMR} = \text{Temel RMR} + R_{SY}$$

$R_{SY} \rightarrow$ sifıra eşit veya negatif bir değerdir !

C. KAYA SINIFLARI VE PUANLARI

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

Dr. H. Sönmez-JEM720

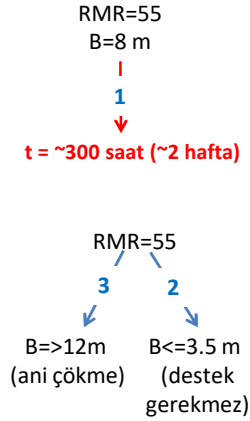
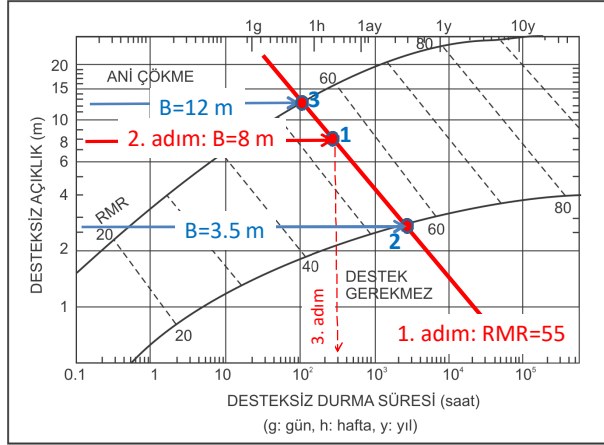
Tünelcilikte RMR değerinin kullanımı**1) Destek Sistemlerinin Belirlenmesi**

BİRİNCİL DESTEK (TAHKİMAT)				
KAYA KÜTLESİ SINIFI	Kazı	Kaya sapmaları* (10 m genişlikteki tünel için uzunluk)	Püskürtme beton	Çelik Destek
I	Tam kesit, 3 m ilerleme.	Bir miktar kaya saplaması haricinde genellikle destek gerektirmez.		
II	Tam kesit, 1.0-1.5 m ilerleme, tam kazı destek. Aynaya 20 m mesafede.	Kemerin her 2-3 m'inde yer yer saplama, tel kafeslerle 2-2.5 m aralıklı.	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Gerekmez
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.5-3 m ilerleme. Tam kazı destek. Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli.	3-4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kederde tel kafesli duvarlar ve kederde 1.5-2 m aralıklı.	Tavan kemerinde 50-100 mm ve yan duvarlarda 30 mm.	Gerekmez
IV	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme. Tavandan 1.0-1.5 m ilerleme. Kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar, gerekli destek.	Tel kafesli duvarlarda ve kederde 1-1.5 m aralıklı, 4-5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 100-150 mm ve yan duvarlarda 100 mm.	Gereken yerde 1.5 m aralıklı yer yer hafif traversler.
V	Tavan ve tabanda birlikte ilerleme. Tavandan 0.5-1 m ilerleme, kazıyla birlikte destek yerleştirilmeli. Patlamadan hemen sonra püskürtme beton uygulanmalı.	Tel kafesli duvarlarda ve kederde 1-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynaya 50 mm.	Çelik ıksalı, 0.75 m aralıklı orta-ağır traversler.

Bieniawski (1989)

Dr. H. Sönmez-JEM720

2) Desteksiz Durma Süresinin Belirlenmesinde



Şekil 4.9. RMR kaya kütle sınıflarına göre desteksiz durma süresi ve desteksiz tavan açıklığı arasındaki ilişki (Bienawski, 1989).

(Ulusay ve Sonmez, 2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

3) Destek Basıncının Hesaplanmasında

Ünal (1983)

$$P = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) \gamma BS$$

Burada;

P: destek basıncı (kN/m²)g: kayanın birim hacim ağırlığı (kN/m³)

B: tünelin genişliği (m)

S : gerilme faktörü (yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı)



Goel ve Jethwa (1991)

$$P = \frac{0.75B^{0.1}H^{0.5} - RMR}{2RMR}$$

Burada;

P: tünel tavanı için kısa süreli destek basıncı (MPa)

B: açıklığın genişliği (m)

H: örtü kalınlığı veya tünelin deriliği (m)

Dr. H. Sönmez-JEM720

4) Kaya Kütlesinin Deformasyon Modülünün (E_M) Belirlenmesinde

$$RMR > 50 \rightarrow E_M = 2RMR - 100 \quad (\text{Bieniawski, 1978})$$

$$RMR < 50 \rightarrow E_M = 10^{(RMR-10)/40} \quad (\text{Serafim ve Pereira, 1983})$$

Yukarıda sunulan bu iki genel eşitliğin sonrasında çok sayıda ampirik ilişki üzerinde çalışmalar mevcuttur. Bunlardan RMR'in yer aldığı bazıları:

$$E_{rm} = E_i [0.0028 RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22.82)] \quad (\text{Nicholson and Bieniawski, 1983})$$

$$E_{rm} = E_i [0.5 (1 - (\cos(\pi * RMR/100)))] \quad (\text{Mitri vd., 1994})$$

$$E_{rm} = E_i 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/4000 \exp(-RMR/100)]} \quad (\text{Sonmez vd., 2006})$$

Burada;

$E_{rm} \rightarrow E_M$ kaya kütlesinin deformasyon modülü

E_i ise kaya malzemesinin elastisite modülüdür.

5) Kaya Kütlesinin Dayanımının Hoek ve Brown ampirik yenilme ölçütüyle belirlenmesinde 1997 yıllarına kadar girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Yerini Jeolojik Dayanım İndeksine (Geological Strength Index, GSI) bırakmıştır.

Dr. H. Sönmez-JEM720

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 tünelleri kalitesi Q altı parametrenin fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

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

Burada;

RQD: Kaya kalite göstergesi

J_n : Eklem takımı sayısı

J_r : Eklem pürüzlülük sayısı

J_a : Eklem alterasyon sayısı

J_w : Eklem su azaltma faktörü

SRF: Gerilme azaltma

faktörüdür.

$RQD/J_n \rightarrow$ kaya kütlesinin yapısını ve blok boyutunu,

$J_r/J_a \rightarrow$ dolgu veya dolgunsuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karakteristiklerini dolayısıyla makaslama dayanımını

$J_w/SRF \rightarrow$ etkin gerilme koşullarını

Q \rightarrow kaya kütlesinin kalitesine bağlı olarak 0.001 ile 1000 arasında değişir !

Dr. H. Sönmez-JEM720

Q PARAMETRELERİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Her bir parametrenin Q eşitliğinde kullanılacak parametrik değerleri için Barton vd. (1974) tarafından önerilen tanımlamaların yer aldığı çizelgeler kullanılır. Ancak bu çizelgelerdeki dip Not'lar dikkatle takip edilmelidir !

1) Kaya Kalite Göstergesi (RQD)

RMR'da tariflendiği gibi mostra veya sondaj karotlarından belirlenir. **Eğer RQD<10 ise eşitlikte RQD=10 olarak alınır.**

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 kullanılır. RQD için 100, 95, 90... vb. gibi 5'lik aralıklar yeterlidir.

Dr. H. Sönmez-JEM720

2) Eklem Takımı Sayısı (J_n)



2. EKLEM TAKIMI SAYISI	(J_n)
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1.0
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	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 ($3.0 \times J_n$) kullanılır.
(3) Tünel girişleri için ($2.0 \times J_n$) kullanılır.

Dr. H. Sönmez-JEM720



3) Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r)

3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI (J_r)

(a) Süreksizlik-kaya dokanağı ve (b) 10 cm'lik bir makaslama öncesi süreksizlik-kaya dokanağı

A. Süreksiz eklem	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

Not: (5) İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m'den büyük ise, J_r 'ye 1.0 eklenebilir.

(6) Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönelmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için $J_r=0.5$ alınabilir.

(7) J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau = \sigma_n \tan(J_r / J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.

Dr. H. Sönmez-JEM720



4) Eklem Alterasyon Sayısı (J_a)

4. EKLEM ALTERASYON SAYISI

	J_a	ϕ (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. Silti 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 killere	4	8-16°

Devamı arkada

Dr. H. Sönmez-JEM720



4. EKLEM ALTERASYON SAYISI	J_a	ϕ (yaklaşık)
(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_a '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	6-24° veya 8-12
N. Siltli veya kumlu kil bantları 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	6-24° veya 13-20

Dr. H. Sönmez-JEM720



5) Eklem Su Azaltma Faktörü (J_w)

5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm ²)	J_w
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 eklemler içeren 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

Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir.
Eğer drenaja yönelik önlemler alınırsa, J_w artar.
(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.

Dr. H. Sönmez-JEM720

6) Gerilim Azaltma Faktörü (SRF)

6. GERİLME AZALTMA FAKTÖRÜ	SRF
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar	
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	10
B. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)	5
C. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış 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 "küçük şeker" görünümüne (herhangi bir derinlikte)	5.0

Devamı
arkada

Dr. H. Sönmez-JEM720

(b) dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	σ_{ci} / σ_t	$\sigma_{\theta} / \sigma_{ci}$	SRF
H. Düşük gerilme, yüzeye 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

Not: (11) Oldukça yönsel (anizotrop) bakır gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c $0.75 \sigma_c'$ 'ye, $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ ise $0.5 \sigma_c'$ 'ye düşürülür. Burada σ_c : tek eksenli sıkışma dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_{θ} en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen).

(12) Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarda ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2.5'ten 5'e artırılması önerilir (H maddesine bakınız)

Devamı
arkada

Dr. H. Sönmez-JEM720



(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma

 σ_e / σ_{ci} SRF

O. Az sıkıştırıcı kaya basıncı

1-5 5-10

P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı

>5 10-20

Not: (13) Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh vd., 1993). Kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı $q = 0.7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ kayanın birim hacim ağırlığıdır (kN/m³) (Singh, 1993)

(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği

SRF

R. Düşük şişme basıncı

5-10

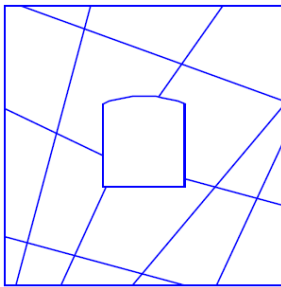
S. Çok yüksek şişme basıncı

10-15

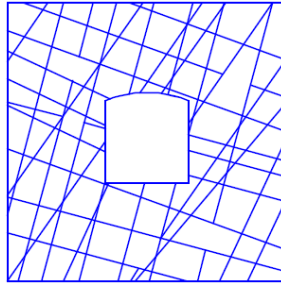
Dr. H. Sönmez-JEM720



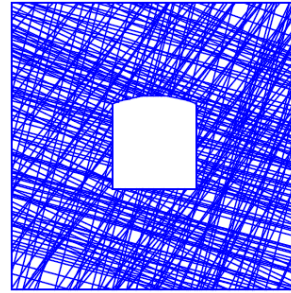
Q değeri ile kaya kalitesi ilişkisi



Q=100 (Masif kaya)



Q=3 (Eklemlı veya bloklu kaya)



Q=0.1 (sık eklemlı kaya)



Dr. H. Sönmez-JEM720

Q – Sisteminde Eşdeğer boyut(D_e) ve ESR kavramı

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.

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

ESR değeri yeraltı açıklığının duraylı kılınabilmesi için yerleştirilen destek sistemi üzerinde etkisi olan bir tür güvenlik katsayısıdır.

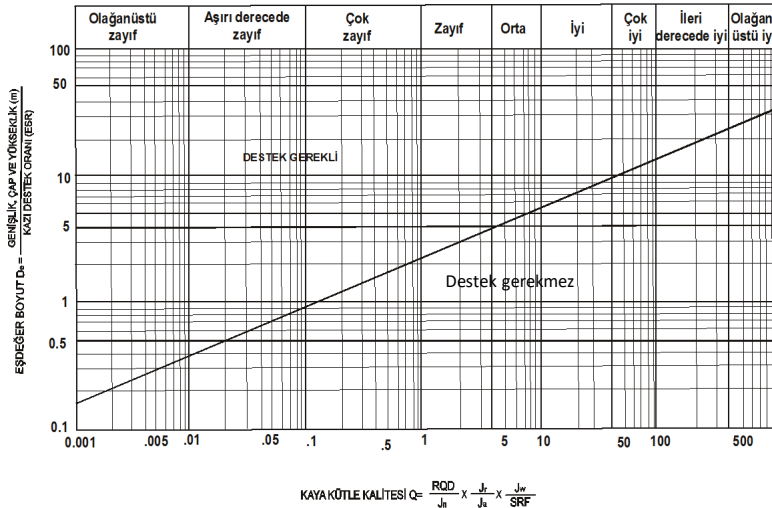
Farklı yer altı kazısı türleri için orijinal (Barton vd., 1974) ve güncelleştirilmiş (Barton ve Grimstad, 1994) ESR değerleri

KAZI TİPİ	Orijinal ESR	Güncelleştirilmiş ESR
A. Kısa süreli (geçici) maden kazıları vd.	3-5	2-5
B. Uzun süreli (kalıcı) maden kazıları, su tünelleri, büyük kazılar için açılan pilot tüneller, geniş yeraltı kazıları	1.6	1.6-2.0
C. Geniş yer altı depolama odaları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, yaklaşım tünelleri	1.3	1.2-1.3
D. Enerji santralleri, büyük (ana) karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel girişleri, ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme bölgeleri	1.0	0.9-1.1
E. Yer altı nükleer enerji santralleri, demiryolu istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar, gaz nakil tünelleri	0.8	0.5-0.8

Dr. H. Sönmez-JEM720

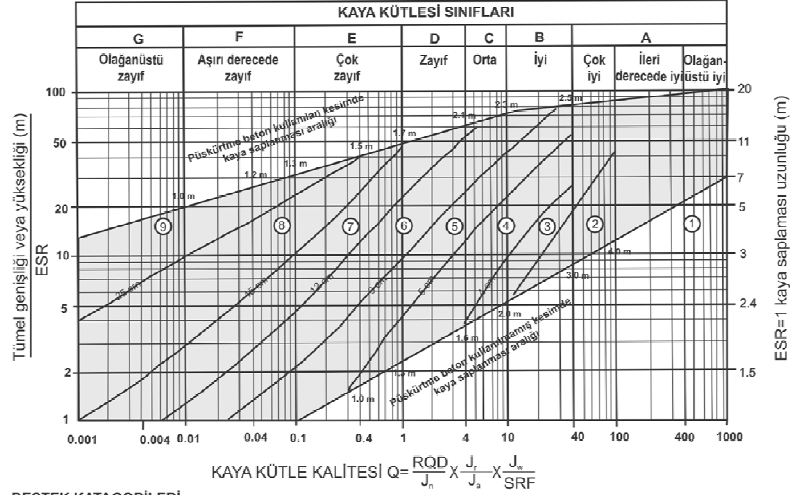
Tünelcilikte Q değerinin kullanımı

1) Destek gerekliliği açısından D_e ve Q ilişkisi



Dr. H. Sönmez-JEM720

2) Destek sisteminin belirlenmesi



DESTEK KATEGORİLERİ

- 1) Desteksiz
- 2) Yerel bulonlama
- 3) Sistemik bulonlama
- 4) Sistemik bulonlama (ve takviyeli, püskürtme beton 4-10 m)
- 5) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton 5-9 cm
- 6) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 9-12 cm
- 7) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 12-15 cm
- 8) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton >15 cm güçlendirilmiş Çelik hasırlı püskürtme beton ve bulonlama
- 9) Beton kaplama
- 5) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton 5-9 cm

Şekil 4.23, Q sistemi için güçlendirilmiş destek sızısı (Grimaldi ve Barton, 1993).

Dr. H. Sönmez-JEM720

3) Kaya Saplaması ve Ankraj Boylarının belirlenmesi (Barton vd., 1974)

	Bulon	Ankraj
Tavan →	$L = 2 + 0.15 \frac{B}{ESR}$	$L = 0.4 \frac{B}{ESR}$
Yan duvar →	$L = 2 + 0.15 \frac{H}{ESR}$	$L = 0.35 \frac{H}{ESR}$

Burada; L: bulon veya ankraj uzunluğu (m), B: kazı genişliği (m) ve H ise kazı boyu (m)'dir.

4) Desteksiz maksimum açıklığın belirlenmesi

$$B_{\max} = 2(ESR)Q^{0.4}$$

Not: Bu amaçla iki önceki slaytta sunulan destek gerekliliği açısından De ve Q ilişkisi grafiği de dikkate alınabilir.

Dr. H. Sönmez-JEM720

5) Tavan Destek Basıncının P_{tavan} belirlenmesi

Grimstad ve Barton (1993)

$$P_{\text{tavan}} = \frac{2}{J_r} Q^{-1/3}$$

$$P_{\text{tavan}} = \frac{2J_n^{0,5} Q^{-1/3}}{3J_r} \text{ (MPa)}$$

(eklem takımı sayısı 3'ten az ise)

6) Kaya Kütlesi Deformasyon Modülünün (E_M) belirlenmesi

Grimstad ve Barton (1993)

$$E_M = 25 \log_{10} Q$$

$$E_M = 10(Q_c)^{1/3}$$

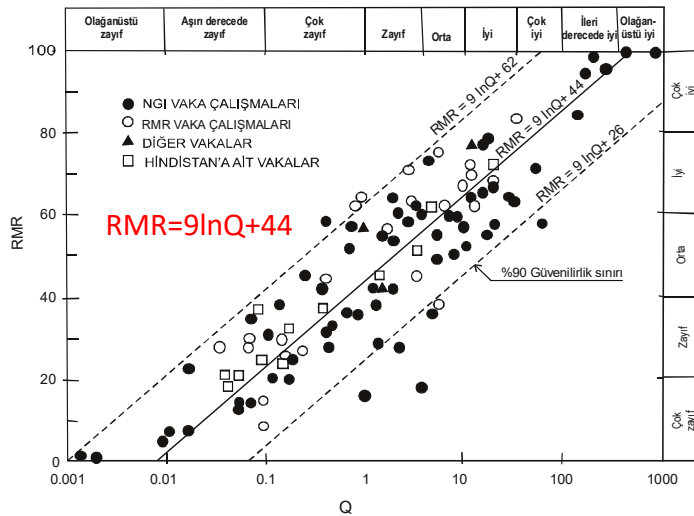
$$Q_c = \sigma_c / 100 \quad (\sigma_c \rightarrow \text{MPa})$$

 $\sigma_c \rightarrow$ kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMR ile Q arasındaki ilişkiler

RMR ve Q benzer amaçlarla önerilen sınıflama sistemleri olup, hala günümüzde kullanım alanına sahiptirler. Bu iki sınıflamanın bir birlerine dönüşümlerine ilişkin aşağıdaki eşitlikler genel bir değerlendirme için kullanılabilir.



Dr. H. Sönmez-JEM720

Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI) ve Kullanım Alanları

- Jeolojik Dayanım İndeksi
 - Kaya Kütlelerinin Yapısı
 - Süreksizliklerin Yüzey Koşulu
 tanımlarıyla kaya kütlelerinin kalitesinin ölçüsünü tanımlar.
- Değeri RMR gibi 0 ile 100 arasında değişebilir.
- Gelişimi Hoek ve Brown yenilme ölçütünün gelişim sürecinde olmuştur. RMR'ı yerini almıştır.
- Kaya Kalitesinin sayısal ölçüsü olması nedeniyle RMR gibi dayanım ve deformasyon parametrelerinin tahminine yönelik ampirik ilişkilerde son yıllarda yoğun kullanım alanı bulmuştur.

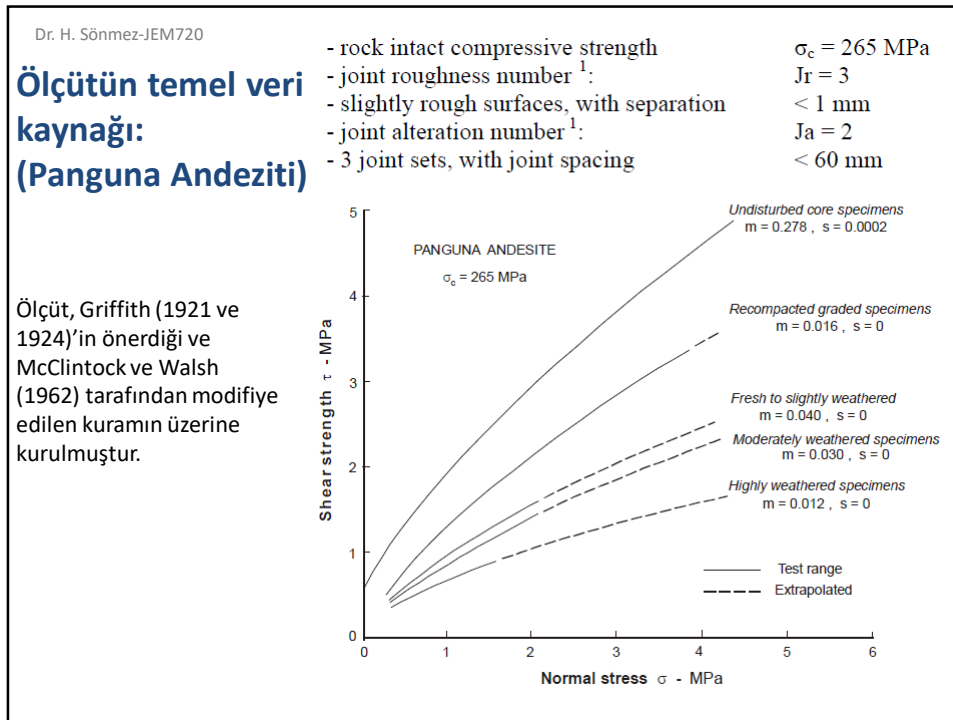
Dr. H. Sönmez-JEM720

HOEK ve BROWN Yenilme Ölçütünün Gelişimi ve GSI




Hoek ve Brown (1980a ve 1980b), tasarım mühendisleri tarafından kullanılmak üzere aşağıdaki koşulları sağlayabilecek bir ölçütün yararlı olacağını düşünmüşlerdir.

- Ölçüt, kaya malzemesinin uygulamada karşılaşılan gerilme koşulları altında göstereceği davranışı tam olarak tanımlamalı,
- Ölçüt, yaklaşık da olsa, çok sayıda süreksizlik takımını içeren kaya kütlelerinin dayanımı hakkında bilgi verebilmelidir.
- Laboratuvarda tayin edilen dayanım verileriyle uyumlu olmalı,
- Kullanıcıya kolaylık sağlaması açısından, mümkün olduğunca boyutsuz parametrelere bağlı, basit bağıntılarla ifade edilmeli
- Eklemlili kaya kütlelerinin yenilmesiyle ilgili uygulama olanaklarını da sağlamalıdır.



Dr. H. Sönmez-JEM720

HB'nin 1980-1988 dönemi

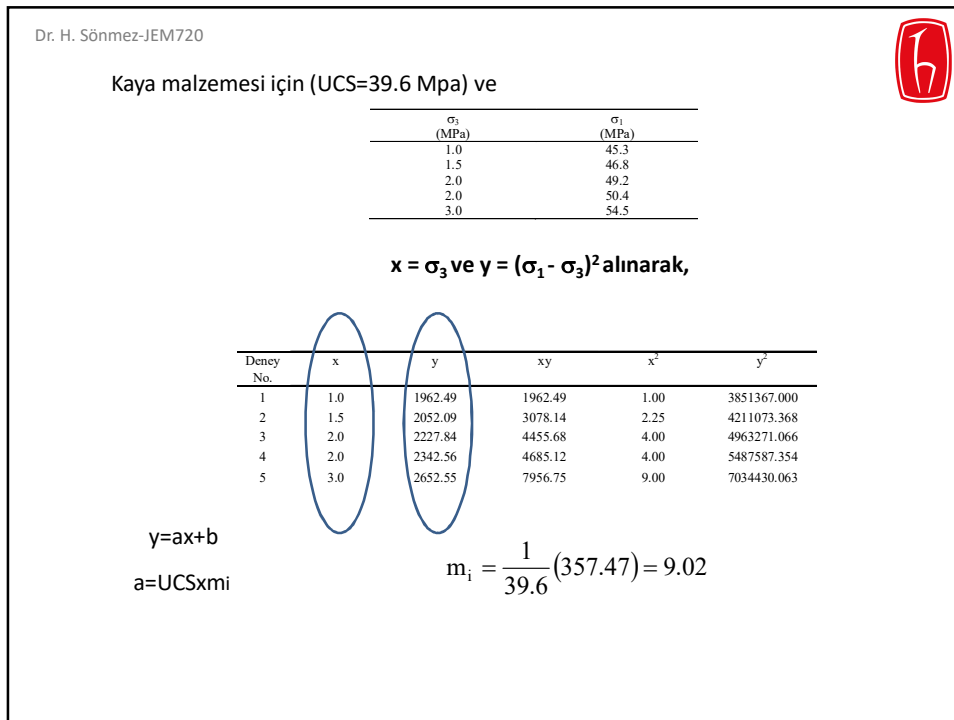
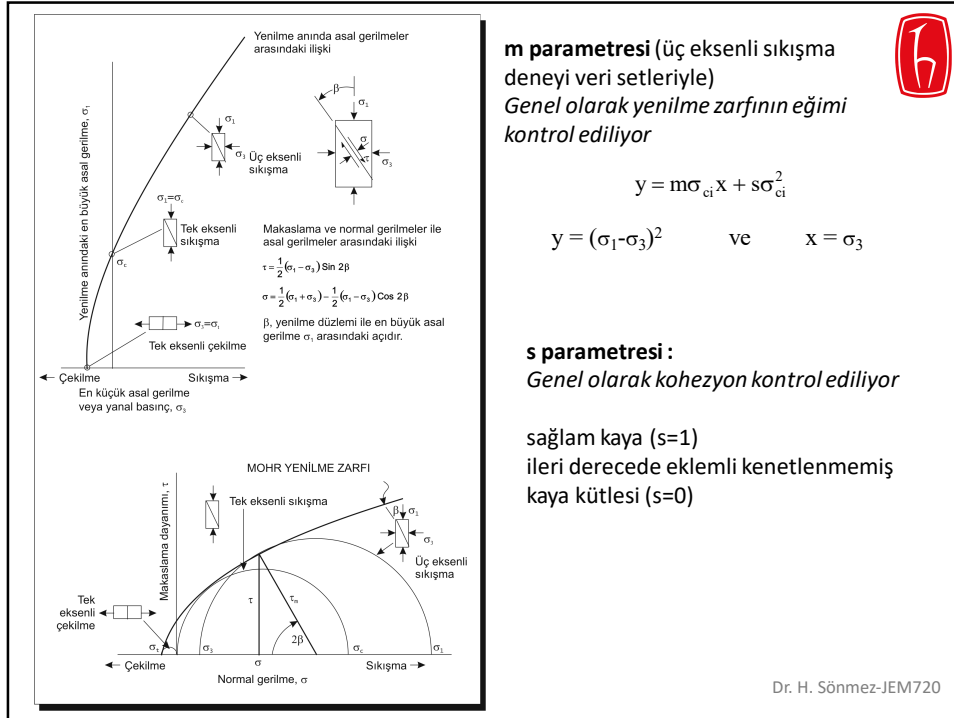


$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_{ci} + s\sigma_{ci}^2}$$

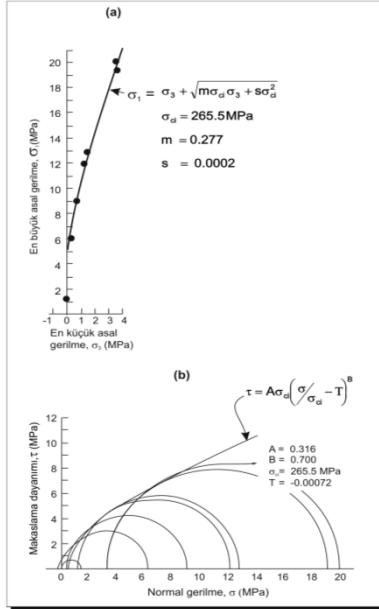
σ_1 ve σ_3 : Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler
 σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
 m ve s: Boyutsuz malzeme sabitleridir.

$$\sigma_{ckk} = \sqrt{s\sigma_{ci}^2} \quad \text{Kütlenin tek eksenli sıkışma dayanımı}$$

$$\sigma_{tkk} = \frac{\sigma_{ci}}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad \text{Kütlenin çekilme dayanımı}$$



Dr. H. Sönmez-JEM720

Makaslama dayanımı (τ - σ)

Görgül yenilme ölçütü:

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

$$\tau = A\sigma_d(\sigma/\sigma_d - T)^B$$

burada

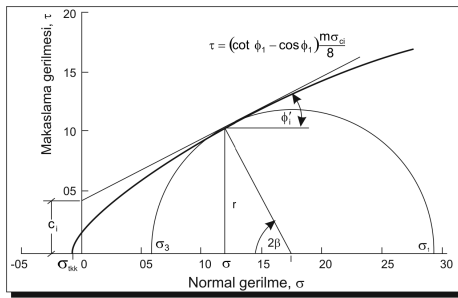
$$T = 1/2(m - \sqrt{m^2 + 4s})$$

	İYİ GELİŞMİŞ KRİSTAL DİLİMLİ OLAN KARBONATLI KAYALAR Dolomit, kireçli ve mermerleşmiş KILILI KAYALAR Çamurcu, siltli, çeyli ve anhidrit (dilimle ekli)	İYİ GELİŞMİŞ KRİSTAL DİLİMLİ OLAN KARBONATLI KAYALAR Dolomit, kireçli ve mermerleşmiş KILILI KAYALAR Çamurcu, siltli, çeyli ve anhidrit (dilimle ekli)	SAGLAM KRİSTALLI VE AZ GELİŞMİŞ KRİSTAL DİLİMLİ KUMLU KAYALAR	KUÇUK TANELİ ÇOK MINERALLI VOLKANİK KAYALAR	IRI TANELİ ÇOK MINERALLI MAGMATİK VE METAMORFİK KAYALAR
KAYA MALZEMESİ	m = 7.0 s = 1.0 A = 0.816 B = 0.658 RMR = 100 Q = 500	m = 10.0 s = 1.0 A = 0.918 B = 0.692 RMR = 85 Q = 100	m = 15.0 s = 1.0 A = 1.044 B = 0.696 RMR = 85 Q = 100	m = 17.0 s = 1.0 A = 1.085 B = 0.696 RMR = 85 Q = 100	m = 25.0 s = 1.0 A = 1.220 B = 0.705 RMR = 85 Q = 100
ÇOK İYİ KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	m = 3.5 s = 0.1 A = 0.651 B = 0.679 RMR = 85 Q = 100	m = 5.0 s = 0.1 A = 0.739 B = 0.692 RMR = 85 Q = 100	m = 7.5 s = 0.1 A = 0.848 B = 0.702 RMR = 85 Q = 100	m = 8.5 s = 0.1 A = 0.883 B = 0.705 RMR = 85 Q = 100	m = 12.5 s = 0.1 A = 0.998 B = 0.712 RMR = 85 Q = 100
İYİ KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	m = 0.7 s = 0.004 A = 0.369 B = 0.669 RMR = 65 Q = 10	m = 1.0 s = 0.004 A = 0.427 B = 0.683 RMR = 65 Q = 10	m = 1.5 s = 0.004 A = 0.501 B = 0.695 RMR = 65 Q = 10	m = 1.7 s = 0.004 A = 0.525 B = 0.698 RMR = 65 Q = 10	m = 2.5 s = 0.004 A = 0.603 B = 0.707 RMR = 65 Q = 10
ORTA KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	m = 0.14 s = 0.0001 A = 0.115 B = 0.646 RMR = 23 Q = 0.1	m = 0.20 s = 0.0001 A = 0.129 B = 0.655 RMR = 23 Q = 0.1	m = 0.30 s = 0.0001 A = 0.162 B = 0.672 RMR = 23 Q = 0.1	m = 0.34 s = 0.0001 A = 0.172 B = 0.676 RMR = 23 Q = 0.1	m = 0.50 s = 0.0001 A = 0.346 B = 0.700 RMR = 23 Q = 0.1
ZAYIF KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	m = 0.04 s = 0.00001 A = 0.115 B = 0.534 RMR = 3 Q = 0.01	m = 0.05 s = 0.00001 A = 0.129 B = 0.539 RMR = 3 Q = 0.01	m = 0.08 s = 0.00001 A = 0.162 B = 0.546 RMR = 3 Q = 0.01	m = 0.09 s = 0.00001 A = 0.172 B = 0.548 RMR = 3 Q = 0.01	m = 0.13 s = 0.00001 A = 0.203 B = 0.556 RMR = 3 Q = 0.01
ÇOK ZAYIF KALİTELİ KAYA KÜTLESİ	m = 0.007 s = 0 A = 0.042 B = 0.534 RMR = 0 Q = 0	m = 0.010 s = 0 A = 0.050 B = 0.539 RMR = 0 Q = 0	m = 0.015 s = 0 A = 0.061 B = 0.546 RMR = 0 Q = 0	m = 0.017 s = 0 A = 0.065 B = 0.548 RMR = 0 Q = 0	m = 0.025 s = 0 A = 0.078 B = 0.556 RMR = 0 Q = 0

Dr. H. Sönmez-JEM720

HB'nin 1988-1990 dönemi**Makaslama dayanımı (τ - σ)**

Dr. J. Bray'ın (Hoek, 1983 ve Hoek 1988'de duyurulan)



Şekil 5.6. Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre Mohr yenilme zarfının ve teğetinin çizilmesi (Hoek, 1983).

$$\sigma_{\text{ckk}} = \frac{2c_i' \cos \phi_i'}{1 - \sin \phi_i'}$$

$$h = 1 + \frac{16(m\sigma' + s\sigma_{ci})}{3m^2\sigma_{ci}}$$

$$Q = \frac{1}{3} \left(90 + \arctan \frac{1}{\sqrt{h^3 - 1}} \right)$$

$$\phi_i' = \arctan \left(\frac{1}{\sqrt{4h \cos^2 Q - 1}} \right)$$

$$\tau' = (\cot \phi_i' - \cos \phi_i') \frac{m\sigma_{ci}}{8}$$

$$c_i' = \tau' - \sigma' \tan \phi_i'$$

Hoek ve Brown (1988)

Dr. H. Sönmez-JEM720



Kaya kütlelerinde örselenme (RMR-m ve RMR-s ilişkisi)

Örselenmiş kaya kütleleri

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{14}\right) \quad s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{6}\right)$$

Örselenmemiş kaya kütleleri

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR - 100}{28}\right) \quad s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)$$

RMR ölçüğe giriyor..

NOT: RMR hesaplamasında su koşulu tamamen kuru (10 puan) ve eklem yönelimi düzeltmesi ise uygun (0 puan) alınacaktır.

Kaya türlerine göre yaklaşık m_i değerleri (Hoek, 1990).

İyi gelişmiş kristal dilinimine sahip karbonatlı kayalar (dolomit, kireçtaşı ve mermer)	$m_i = 7$
Taşlaşmış killi kayalar (çamurtaşı, şeyl, arduvaz)	$m_i = 10$
İyi ve az gelişmiş kristal dilinimine sahip kumlu kayalar (kumtaşı ve kuvarsit)	$m_i = 15$
İnce taneli, poliminerallik magmatik kristalin kayalar (andezit, dolerit, diyabaz ve riyyolit)	$m_i = 17$
İri taneli, poliminerallik magmatik ve metamorfik kayalar (amfibolit, gabro, gnays, granit, norit ve granodiyorit)	$m_i = 25$

Dr. H. Sönmez-JEM720



HB'nin 1992'deki durumu

Kenetlenmemiş (sıfır normal gerilme altında kohezyonsuz)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad S=0 \quad \text{???? Bu çalışmadaki şekliyle kullanımı tartışmalıydı.}$$

0.5 (karekök parabolü) yerine (a) ölçüğe giriyor.

τ - σ_n (c ve ϕ çözümlenmesi) için Balmer (1952) önerilmiştir.

Kaya türlerine göre yaklaşık m_i değerleri (Hoek vd., 1992).

Tane Boyu	Sedimanter Kayalar			Metamorfik Kayalar		Magmatik Kayalar		
	Karbonatlı	Kırıntılı	Kimyasal	Karbonatlı	Silikatlı	Felsik	Mafik	Mafik
İri	Dolomit	Konglomer		Mermer	Gnays	Granit	Gabro	Norit
	10.1	a (20)		9.3	29.2	32.7	25.8	21.7
Orta	Tebeşir	Kumtaşı	Çört		Amfibolit		Dolerit	
	7.2	19.8	19.3		31.2		15.2	
İnce	Kireçtaşı	Silttaşı	Jips		Kuvarsit	Riyyolit	Andezit	Bazalt
	8.4	9.6	15.5		23.7	(20)	18.9	(17.7)
Çok İnce		Kıltaşı	Anhidrit		Sleyt			
		3.4	13.2		11.4			

Parantez içindkiler, tahmini değerleri göstermektedir.

Çizelge 5.4. Kaya kütlelerinin yapısına ve süreksizlik yüzeyi koşuluna bağlı olarak m_i/m_i ve a sabitlerinin belirlenmesi (Hoek vd., 1992).

MODİFİYE EDİLMİŞ HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ		YÜZEY KOŞULU				
$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$ <p> σ'_1: en büyük etkin asal gerilme σ'_3: en küçük etkin asal gerilme σ_c: kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı m_b ve a: kaya kütlelerinin bileşimine, yapısına ve yüzey özelliklerine bağlı sabitler </p>		<p>YAPI</p>				
<p>BLOKLU: İyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütleleri; geniş ve çok geniş arasında değişen blok boyutu</p>		m _i /m _i	0.7	0.5	0.3	0.1
<p>ÇOK BLOKLU: Kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütleleri; orta blok boyutu</p>		m _i /m _i	0.3	0.2	0.1	0.04
<p>BLOKLU/TABAKALI: Kıvrılmış ve faylanmış, pek çok birbirini kesen eklemler; küçük bloklar</p>		m _i /m _i	0.08	0.04	0.01	0.004
<p>PARÇALANMIŞ: Zayıf kenetlenmiş, çok kırılmış kaya kütleleri; çok küçük bloklar</p>		m _i /m _i	0.03	0.015	0.003	0.001
		a	0.5	0.55	0.6	0.6

Jeolojik Dayanım İndeksi
Geological Strength Index

GSI

Sisteminin ilk işaretleri

Ancak GSI telaffuz edilmiyor !

Dr. H. Sönmez-JEM720

Dr. H. Sönmez-JEM720

HB'nin 1995-1997 dönemi

RMR'ın yerine GSI kavramı ölçüte dahil ediliyor.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right)$$

$$GSI > 25 \text{ için} \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad \text{ve} \quad a = 0.5$$

$$GSI > 25 \text{ için} \quad s = 0 \quad \text{ve} \quad a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

Örselenmemiş kaya kütleleri için eşitlikler veriliyor?

Çizelge 5.8. m_1, m_2, s, a ve deformabilite parametrelerinin kaya kütlelerinin yapısına ve süreksizlik yüzey koşullarına göre tahmin çizelgesi (Hoek vd., 1995).

GENELLEŞTİRİLMİŞ HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

σ_1 : en büyük etkin asal gerilme
 σ_3 : en küçük etkin asal gerilme
 σ_c : kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
 m, s ve a : kaya kütlelerinin bileşimine, yapısına ve yüzey özelliklerine bağlı sabitler

YAPI

YAPI	YÜZEY KOŞULLU	ÇOK İYİ Çok pürüzlü, bozunmamış yüzeyler	İYİ Pürüzlü, az bozunmuş yüzeyler	ORTA Yumuşak, orta derecede bozunmuş veya altlı üstü yüzeyler	ZAYIF Kıygan, oldukça bozunmuş; köşeli parçacıklar içeren dolgu veya sıvamalı yüzeyler	ÇOK ZAYIF Kıygan, oldukça bozunmuş, yumuşak kıllı kaplamalı veya dolgu yüzeyler
BLOKLU-3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütleli	m_1 s a m_2 v GSI	0.60 0.190 0.5 75 000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40 000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20 000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9 000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3 000 0.25 34
ÇOK BLOKLU- Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımının keşimiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütleli	m_1 s a m_2 v GSI	0.40 0.062 0.5 40 000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24 000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9 000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5 000 0.25 38	0.07 0 0.5 2 500 0.3 25
BLOKLU/ÖRSLENMİŞ- Birbirini kesen çok sayıda süreksizliklerin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütleli	m_1 s a m_2 v GSI	0.24 0.012 0.5 18 000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 20 000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6 000 0.25 40	0.08 0 0.5 3 000 0.3 30	0.06 0 0.5 2 000 0.3 20
PARÇALANMIŞ- Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının biriktildiğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütleli	m_1 s a m_2 v GSI	0.17 0.004 0.5 10 000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 8 000 0.25 40	0.08 0 0.5 3 000 0.3 30	0.06 0 0.5 1 000 0.3 20	0.04 0 0.6 1 000 0.3 10

Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI)

$GSI = RMR_{76}$

$GSI = RMR_{89} - 5$

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

$GSI = 9 \log_e Q' + 44$

Sadece 20 kaya kütleli sınıfı Ara durumlar ? Sürekli tanımlama yok !

Not 1: Bu çizelgede verilen değerler örselenmemiş kaya kütleleri içindir.
Not 2: Kaya kütlelerinin yerindeki deformasyon modülü E_m , Serafim ve Pereira (1983)'nin önerdiği 5.83 no.lu eşitlikten hesaplanmış olup, birimi MPa'dır.

Dr. H. Sönmez-JEM720

Dr. H. Sönmez-JEM720

Kaya malzemesi için m_i sabitinin değerleri (Hoek vd., 1995).

Kaya türü	Sınıf	Grup	İri	Orta	İnce	Çok ince	
SEDİMANTER	Klastik	Organik	Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kiltaşı 4	
			← Grovak → (18)	← Tebeşir Taşı → (18)			
			← Kömür → (18)	← Kömür → (18)			
			Breş (20)	Sparitlik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8		
			Jips (16)	Anhidrit (13)			
METAMORFİK	Foliasyonsuz	Mermer 9	Hornfels (19)	Kuvarsit 24			
		Düşük foliasyonlu (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)			
		Foliasyonlu*	Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9	
MAGMATİK	Açık	Koyu	Granit 33		Riyolit (16)	Obsidyen (19)	
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)		
			Diyorit (28)		Andezit 19		
			Gabro 27	Dolerit (19)	Bazalt (17)		
			Norit 22				
		Püskürtük piroklastik	Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)		

Parantez içindeki değerler tahminidir.
* Bu değerler, foliasyona dik yönde deney tabii tutulmuş kaya malzemeleri için olup, yenilmenin foliasyon düzlemi boyunca gerçekleşmesi halinde m_i önemli ölçüde farklı olacaktır.

Dr. H. Sönmez-JEM720

Dr. H. Sönmez-JEM720



HB'nin 1997-1999 dönemi

GSI'nın versiyonları öneriliyor.

Dr. H. Sönmez-JEM720



GSI sürekliliği
yöneliyor (GSI
çizgileriyle)

Ancak 25 kaya sınıfı
ara değerlendirme
yok !
Tümüyle tecrübe ön
planda?

YAPI	JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ Kaya kütesinin yapısını ve yüzey koşullarını tanımlayan harf kodları belirlenerek uygun kütü seçilir ve ortalama Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)'nin değeri abaktaki konturlardan tayin edilir.	SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULLARI	
		ÇOK İYİ Çok pürüzsüz, bazı ayrıntılı yüzeyler	İYİ Düz, çok az ayrıntı, daimi oksit sıvımsak yüzeyler
SAĞLAM VEYA MASİF- Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütesi	90	AZALAN YÜZEY KALİTESİ →	
		UYGULANMAZ	
BLOKLU- 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütesi	80	KAYA PARÇALARININ KENETLENME DEREJESİNDE AZALMA	
		70	60
ÇOK BLOKLU- Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımının kesimiyle oluşan çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselenmiş kaya kütesi	60	50	40
		30	20
BLOKLU/ÖRSELENMİŞ-Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütesi	40	30	20
		10	0
PARÇALANMIŞ-Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütesi	20	↓	
		UYGULANMAZ	
FOLİYASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ İnce laminali veya foliyasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayada blokların gelişmesini önemiştir.	10	?	
		Anizotropi ?	

Şekil 5.9. Sağlam veya masif kaya kütesi ile foliyasyonlu-laminali-makaslanmış kayaları da içerecek şekilde düzenlenen GSI sınıflama sistemi (Hoek - 1999)

Dr. H. Sönmez-JEM720

Neden Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological strength Index), GSI ?



- RMR'ın özellikle düşük kaliteli kaya kütlelerini tanımlamasındaki yetersizliği
- Pratik ve gözleme dayalı sınıflama abağı gereksinimi

Bu amaçla, Hoek ve Brown (1997) gözleme dayalı sınıflama abağını, GSI önerdi.

- Sönmez ve Ulusay (1999) Yüzey Koşulu Puanı (Surface Condition Rating, SCR) ve Yapı puanı (Structure Rating, SR) ile **sayısal (quantitative) GSI** abağını geliştirdi.
- Sayısal GSI abağının son şekli Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerildi.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate Box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Covering a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI=38. It is also important to recognise that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration, when individual block sizes are more than approximately one quarter of the excavation dimension, failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.		VERY GOOD Very slight to thin weathered surface	GOOD Slightly to moderately weathered (see state of surface)	FAIR Slightly to moderately weathered or altered surface	POOR Highly weathered surfaces with angular fragments or large angular fragments	VERY POOR Highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →					
INTACT OR MASSIVE- Intact rock specimens or massive in-situ rock masses with very few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A	N/A
BLOCKY-very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80					
VERY BLOCKY-interlocked partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	70					
BLOCKY/DISTURBED-folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	60					
DISINTEGRATED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces	50					
FOLIATED/LAMINATED/SHEARED-Thinly laminated or foliated and tectonically sheared weak rocks. Closely spaced schistosity prevails over other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness	40					
	30					
	20					
	10					
	0					

Dr. H. Sönmez-JEM720

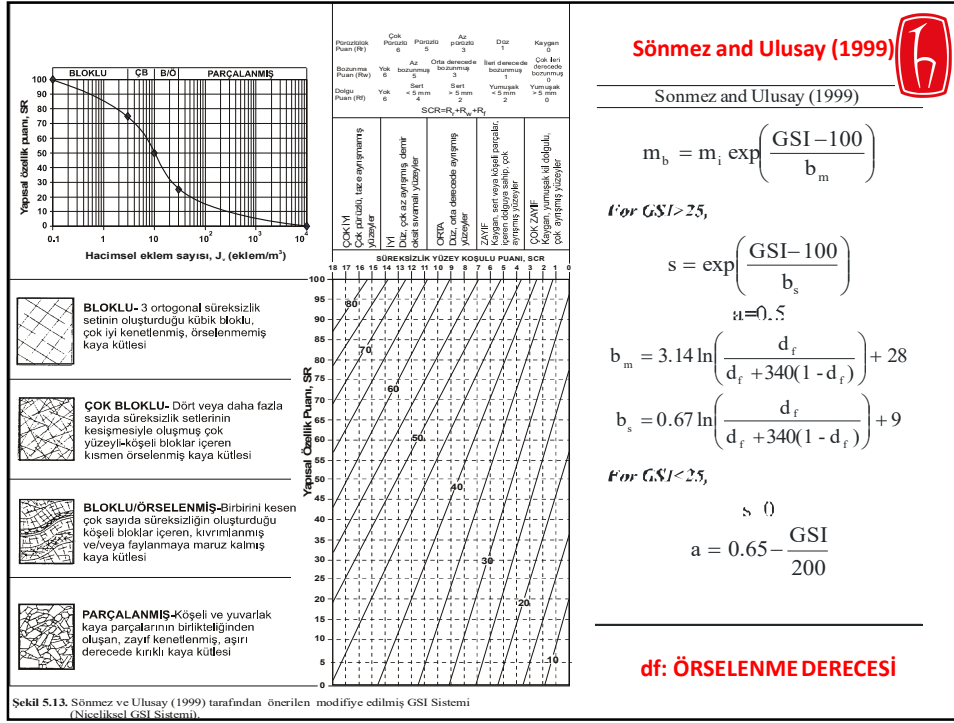


Oldukça gözlemsel

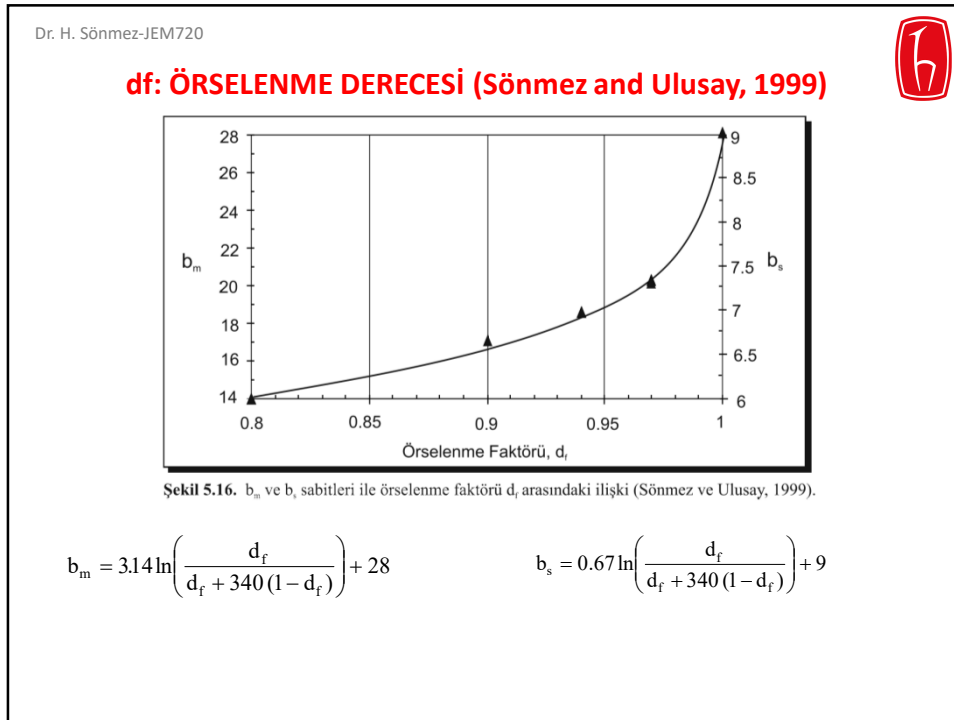
Uzman kullanıcı gerektiriyor.

Çoğu kez UZMAN kullanıcı bile hatalı yorumlayabiliyor.

**Anizotropik kütle
Hoek ve Brown yenilme
ölçütünün doğasına aykırı**



Sekil 5.13. Sönmez ve Ulusay (1999) tarafından önerilen modifiye edilmiş GSI Sistemi (Nispetli GSI Sistemi).





ÖLÇÜTÜN GÜNCEL DURUMU (2002)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Sayısal
(Quantitative) GSI
abağı

Roughness Rating (Rr)	Very rough 6	Rough 5	Slightly rough 3	Smooth 1	Stickensided 0
Weathering Rating (Rw)	None 6	Slightly weathered 5	Moderately weathered 3	Highly weathered 1	Decomposed 0
Infilling Rating (Rf)	None 6	Hard < 5 mm 4	Hard > 5 mm 2	Soft < 5 mm 2	Soft > 5 mm 0
SCR=Rr+Rw+Rf					
VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Smooth, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings	

SURFACE CONDITION RATING, SCR

$$J_v = D_n \left(\frac{1}{S} \right)$$

Dr. H. Sönmez-JEM720

Dr. H. Sönmez-JEM720



Hoek ve Brown Yenilme Ölçütü

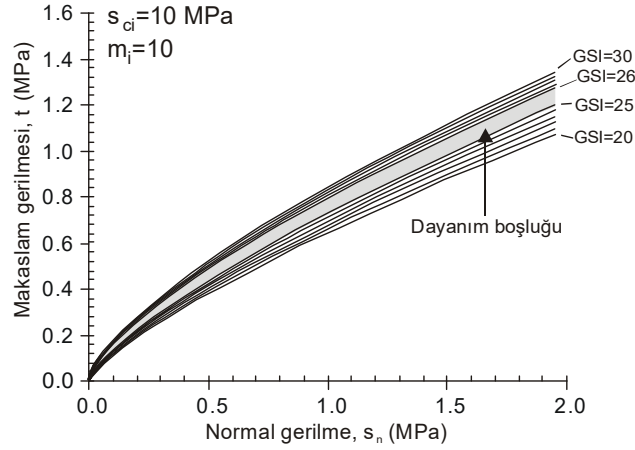
Neden Hoek vd. (2002) bazı modifikasyonlar yaptı?

Sönmez ve Ulusay (2002)

Ancak Hoek vd. (2002)'de hiçbir gerekçe YOK!

Hoek ve Brown (1997)'deki üç önemli sorun:

(1)

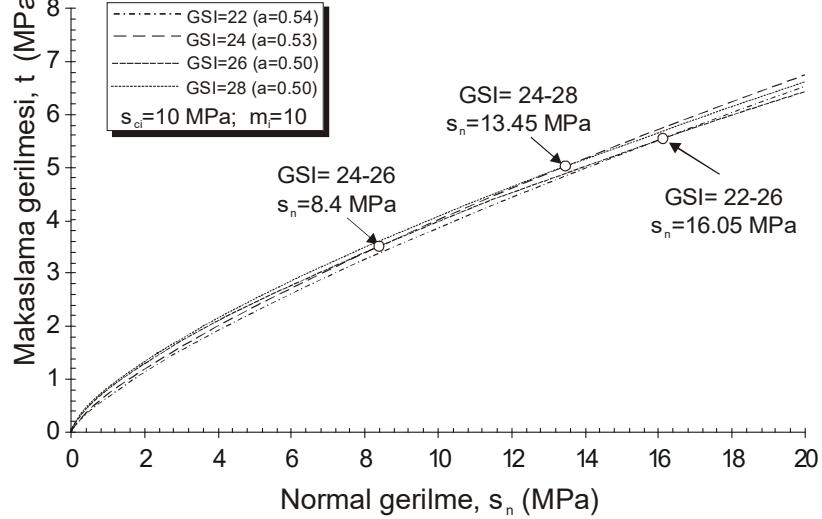


Dr. H. Sönmez-JEM720




(2) 2002 versiyonuna kadar GSI<25 için $s=0 \rightarrow UCS_{k\ddot{u}tle}=0$

(3)



Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 = 3)	Sandstones 17 = 4	Siltstones 7 = 2	Claystones 4 = 2
			Breccias (19 = 5)		Greywackes (18 = 3)	Shales (6 = 2) Marls (7 = 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 = 3)	Sparitic Limestones (10 = 2)	Micritic Limestones (9 = 2)	Dolomites (9 = 3)
		Evaporites		Gypsum 8 = 2	Anhydrite 12 = 2	
Organic					Chalk 7 = 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 = 3	Hornfels (19 = 4) Metasandstone (19 = 3)	Quartzites 20 = 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 = 3)	Amphibolites 26 = 6		
	Foliated**		Gneiss 28 = 5	Schists 12 = 3	Phyllites (7 = 3)	Slates 7 = 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 = 3 Diorite 25 = 5 Granodiorite (29 = 3)			
		Dark	Gabbro 27 = 3 Norite 20 = 5	Dolerite (16 = 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 = 5)		Diabase (15 = 5)	Peridotite (25 = 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 = 5) Andesite 25 = 5	Dacite (25 = 5) Basalt (25 = 5)	Obsidian (19 = 3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 = 3)	Breccia (19 = 5)	Tuff (13 = 5)	



Güncel mi tablosu
Hoek (2007)

* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.
** These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

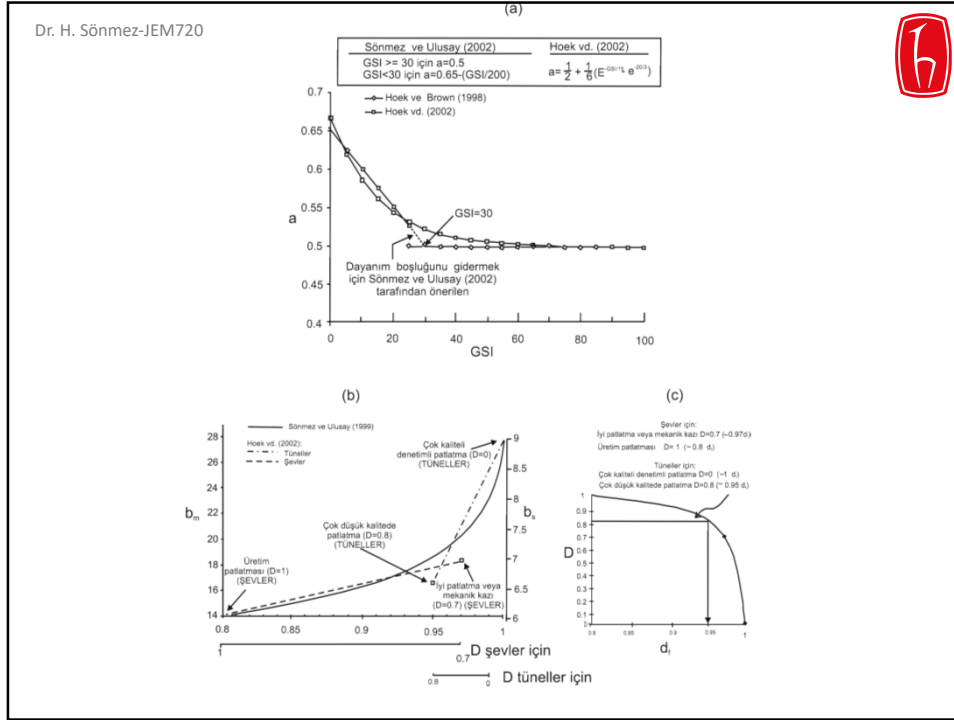
Dr. H. Sönmez-JEM720

Sonmez and Ulusay (1999)	Sönmez vd Ulusay (2002)	Hoek vd (2002)
$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right)$ <p>For $GSI > 25$,</p> $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$ <p>a=0.5</p> $b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 28$ $b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 9$ <p>For $GSI < 25$,</p> <p>s=0</p> $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$ $b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 28$ $b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 9$ <p>For $GSI > 30$,</p> <p>a=0.5</p> <p>For $GSI < 30$,</p> $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$ <p>$b_m = 28 - 14D$</p> <p>$b_s = 9 - 3D$</p> $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI_d/15} - e^{-20/3} \right)$




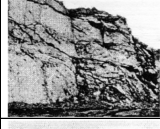

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

m_b and $s \implies$ **GSI**

Dr. H. Sönmez-JEM720



Dr. H. Sönmez-JEM720

Kaya kütlelerinin görüntümü	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 mühendisi şev kazılarında küçük ölçekli patlatma kaya kütlelerinde orta derecede hasara neden olur; özellikle denetimli patlatma yapılsa kaya kütlelerinin görüntümü soldaki fotoğraftaki gibidir. Bununla birlikte, gerilme boşaltımı da bir miktar örselenme yaratır.	D = 0.7 İyi patlatma D = 1.0 Kötü (zayıf) patlatma
	Çok uzun açık işletme şevleri, üretim amaçlı aşırı patlatmadan ve örtü kazısı nedeniyle oluşan gerilme azalından dolayı önemli düzeyde örselenmeye maruz kalırlar. Daha yumuşak bazı kayalarda kazı işlemi ripçileme ve dozer ile yapılabilir ve bu durumda gerilme maruz kalacağı örselenmenin derecesi daha düşük olur.	D = 1.0 Üretim patlatması D = 0.7 Mekanik kazı

Dr. H. Sönmez-JEM720



Konuyla ilgili diğer iki çalışma ve sonrası

- Sönmez, Gökçeoğlu, Kayabaşı ve Nefeslioğlu (2006)
- Hoek ve Diederichs (2006)
- Sönmez ve Gökçeoğlu (2006): Tartışma makalesi
- Hoek ve Diederichs (2006): Tartışmaya cevap

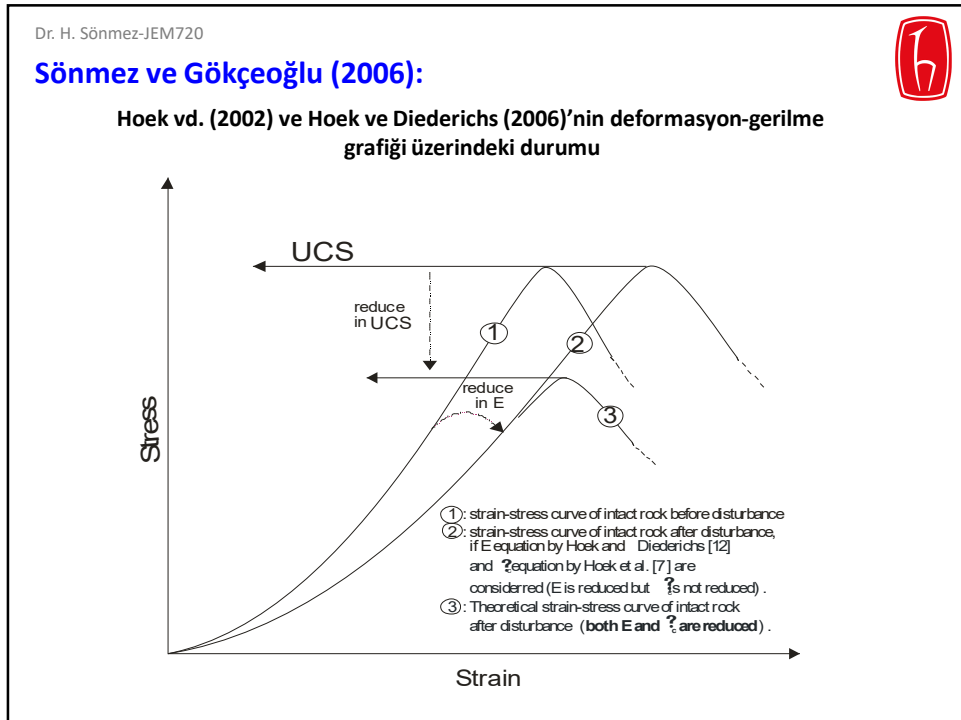
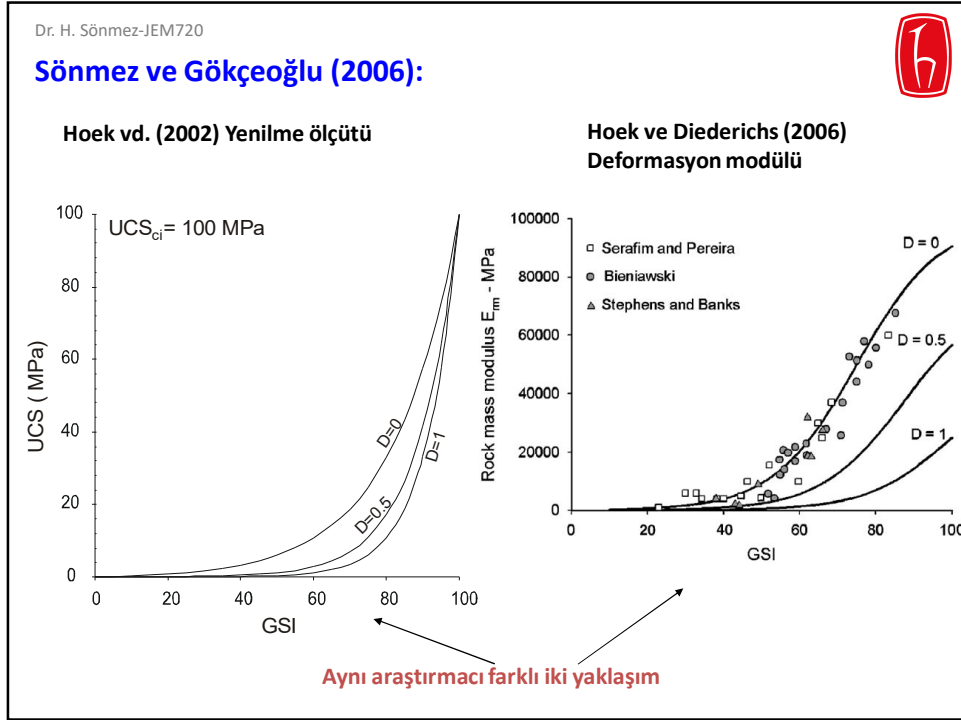
Dr. H. Sönmez-JEM720



Sönmez ve Gökçeoğlu (2006):

- Sönmez, Gökçeoğlu, Kayabaşı ve Nefeslioğlu (2006)
- Hoek ve Diederichs (2006)

Çalışmaları üzerine bir tartışma:



Dr. H. Sönmez-JEM720

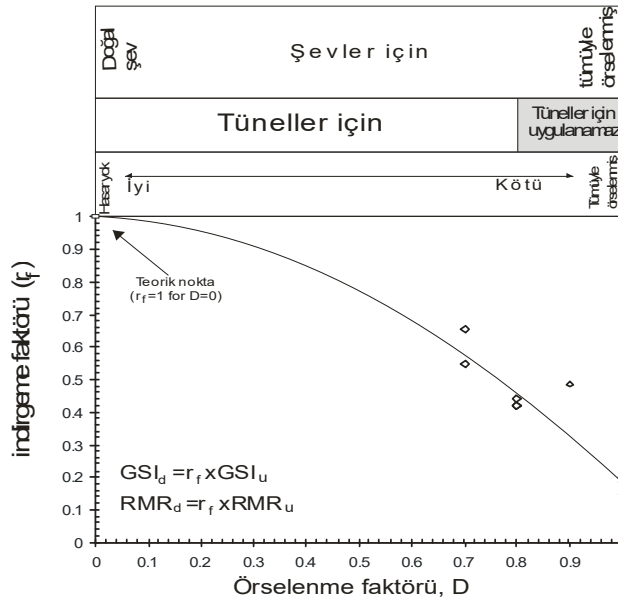
Sönmez ve Gökçeoğlu (2006):

Kaya kütlelerinde örselenme faktörünün kullanımına ilişkin öneri

- Sönmez ve Ulusay (1999) ve Hoek vd. (2002)'deki örselenme faktörü yaklaşımı eşitlikler üzerinde etkilidir. Her ikisi de kavramsal olarak hatalıdır.
- Kaya kütlelerinde örselenme, yeni süreksizliklerin oluşumu ve var olan süreksizliklerin açıklıklarının artması gibi etkiler yaratır. Örselenme etkisi ile kaya kütlelerinin kalitesi azalacaktır. Bu nedenle, GSI, RMR ve Q gibi kütle puanında örselenmenin etkisine göre bir indirim UYGULANMALIDIR. Bieniawski (1989) tarafından RMR'da da önerilmektedir.



Dr. H. Sönmez-JEM720



GSI_d veya RMR_d
Kullanılarak
Örselenmemiş
Eşitlikler dizisi ile
Tasarım yapılmalı.



Dr. H. Sönmez-JEM720

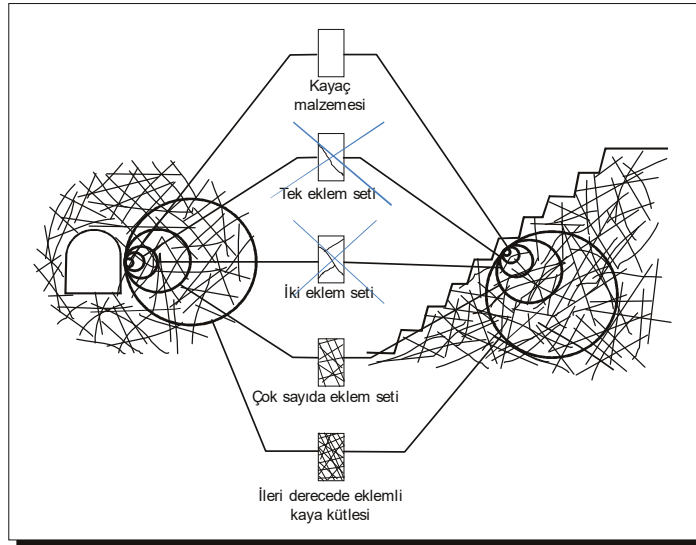


GSİ ile bitlikte ÖLÇÜTÜ hangi kaya kütlelerinde kullanmalıyız !

- En az üç eklem seti içeren
- Süreksizlik aralığı (blok boyutu) ile mühendislik yapısından kaynaklı gerilmeleri etkileyeceği hacim dikkate alındığında 10 veya daha fazla süreksizlik (blok) etkileniyorsa
- Blok şekli de dikkate alındığında kütle homojen ve izotrop kabul edilebiliyorsa
- AYRICA, $s=1$ için süreksizlik içermeyen kaya malzemesi için

ÖLÇÜT kullanılabilir.

Dr. H. Sönmez-JEM720



Şekil 1.7. Örnek boyutunun büyümesine koşut olarak, bir yeraltı açıklığı ile bir kaya şevi malzemesinden kazısında kayaç malzemesinden kaya kütlelerine geçişi gösteren temsili kesitler (Hoek, 1995a'dan).

Dr. H. Sönmez-JEM720



ÖLÇÜTÜN GSI ile birlikte GÜNCEL KULLANIMI İÇİN ÖZET

- Girdi Parametreleri
 - GSI puanı
 - Sayısal GSI abağı (Sönmez ve Ulusay 2002)
 - J_v ile **SR** belirlenecek
 - Pürüzlülük, bozunma ve dolgu tanımlamaları ile **SCR** belirlenecek
 - **SR ve SCR ile GSI** abaktan okunacak
 - Veya orijinal GSI abağından doğrudan tecrübeyle
 - Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı (σ_{ci} veya UCS)
 - Kaya malzemesinin m_i parametresi (üç eksenli sıkışma dayanımı deney veri setleri kullanılarak veya mümkün olmadığı durumda güncel tablodan kaya türü için seçilebilir)
 - Kullanılacak eşitlik serisine göre (Sonmez ve Ulusay 2002 veya Hoek vd., 2002) örülenme durumu (d_f veya D)

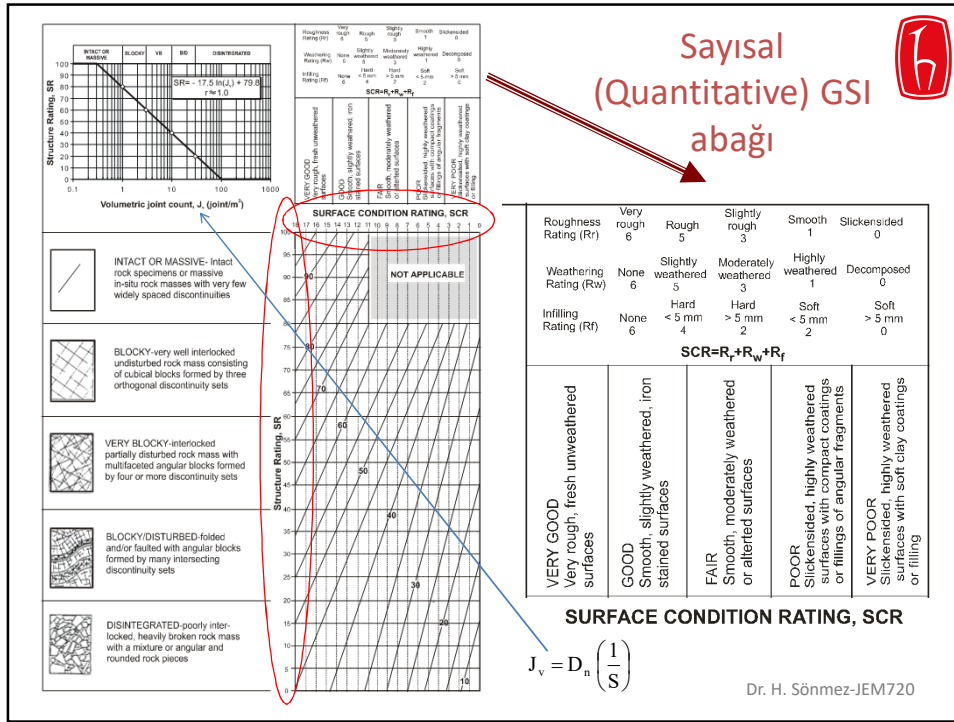
Dr. H. Sönmez-JEM720



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Hoek et al. (1995)	Sonmez and Ulusay (1999)	Sönmez and Ulusay (2002)	Hoek et. al. (2002)
$\frac{m_b}{m_i} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right)$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{b_m}\right)$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{b_m}\right)$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{b_m}\right)$
For $GSI > 25$, $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$ $a = 0.5$	For $GSI > 25$, $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$ $a = 0.5$	$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$ $b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 28$ $b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 9$	$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$ $b_m = 28 - 14D$ $b_s = 9 - 3D$
For $GSI < 25$, $s = 0$ $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	For $GSI < 25$, $s = 0$ $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	For $GSI > 30$, $a = 0.5$ For $GSI < 30$, $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$

df: disturbance factor suggested by Sonmez and Ulusay (1999)
D: disturbance factor suggested by Hoek et al. (2002)



Dr. H. Sönmez-JEM720

Jv nasıl belirlenir?

- Hacimsel Eklem Sayısı (J_v): 1m^3 'lük kaya kütle hacmindeki süreksizlik sayısını ifade eder (Palmström, 1982).

$$J_v = (N_1/L_1) + (N_2/L_2) + \dots + (N_n/L_n)$$

N_1 : Ölçüm hattı boyunca 1. nolu süreksizlik takımına ait süreksizlik sayısı

L_1 : Her bir süreksizlik takımına dik yöndeki ölçüm hattı uzunluğu

Hacimsel eklem sayısına (J_v) göre blok boyutu tanımlaması (Palmström, 1995; ISRM,1981).

Tanım	J_v (eklem/ m^3)
Çok geniş bloklar	<1
Geniş bloklar	1-3
Orta büyüklükteki bloklar	3-10
Küçük bloklar	10-30
Çok küçük bloklar	>30

10'ar metrelik süreksizliklere dik ölçüm hatları boyunca, 4 eklem seti için belirlenen toplam süreksizlik sayıları 6, 24, 5 ve 1'dir. Buna göre:

$$J_v = 6/10 + 24/10 + 5/10 + 1/10 = 3.6/\text{m}^3$$

Ulusay ve Sönmez (2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

J_v nasıl belirlenir?



Uygulamalarda, çoğunlukla ölçüm hattı ile süreksizlik setinin birbirine dik konumda olması mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, gerçek süreksizlik aralıkları ile J_v'nin ifade edilmesi gerekmektedir:

Doğrultusu K10B olan 10 m uzunluğunda bir ölçüm hattı boyunca belirlenen 3 eklem seti için her bir setteki süreksizlik sayısı ve bunların yönelimi aşağıdaki gibidir:

Eklem Set No	Yönelim	Süreksizlik Sayısı
1	73/310	17
2	54/042	7
3	65/120	21

$$J_v = (1/S_1) + (1/S_2) + \dots + (1/S_n) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i}\right)$$

n: eklem seti sayısı

S: gerçek süreksizlik aralığı (m)

Ortalama görünür (a) ve gerçek (S) süreksizlik aralıkları ve eklemlerin doğrultuları ile ölçüm hattının doğrultusu arasındaki açılar da aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Eklem Set No	a (m)	α (°)	β (°)	S (m)
1	0.59	73	50	0.43
2	1.43	54	26	0.51
3	0.48	65	40	0.28

$$J_v = (1/0.43) + (1/0.51) + (1/0.28) = 7.86/m^3$$

Ulusay ve Sönmez (2007'den)

Dr. H. Sönmez-JEM720

Hacimsel eklem katsayısı (J_v)



- J_v, 1 m³'lük kaya kütlesi hacmindeki ortalama süreksizlik sayısıdır.
- Kaya mostrasında hat edütü ile; her bir süreksizlik setine dik ölçüm hatları kullanılarak (sık eklemli kaya kütlelerinde Uygulama pratiği ZOR)
- Ortalama blok (kaya parçası) boyutu ile

ISRM, 1981

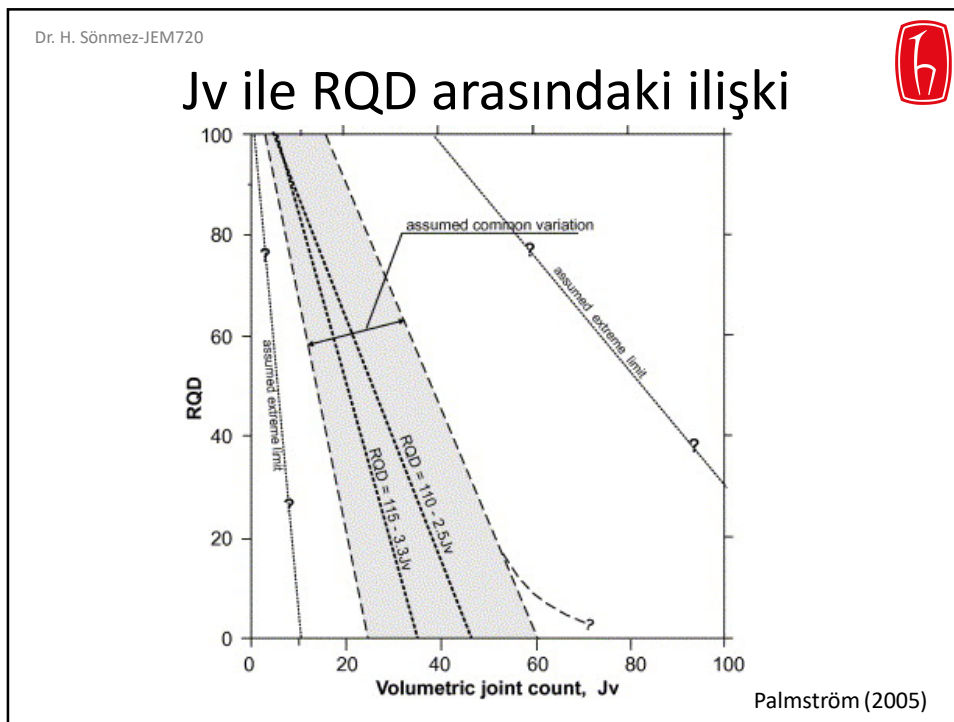
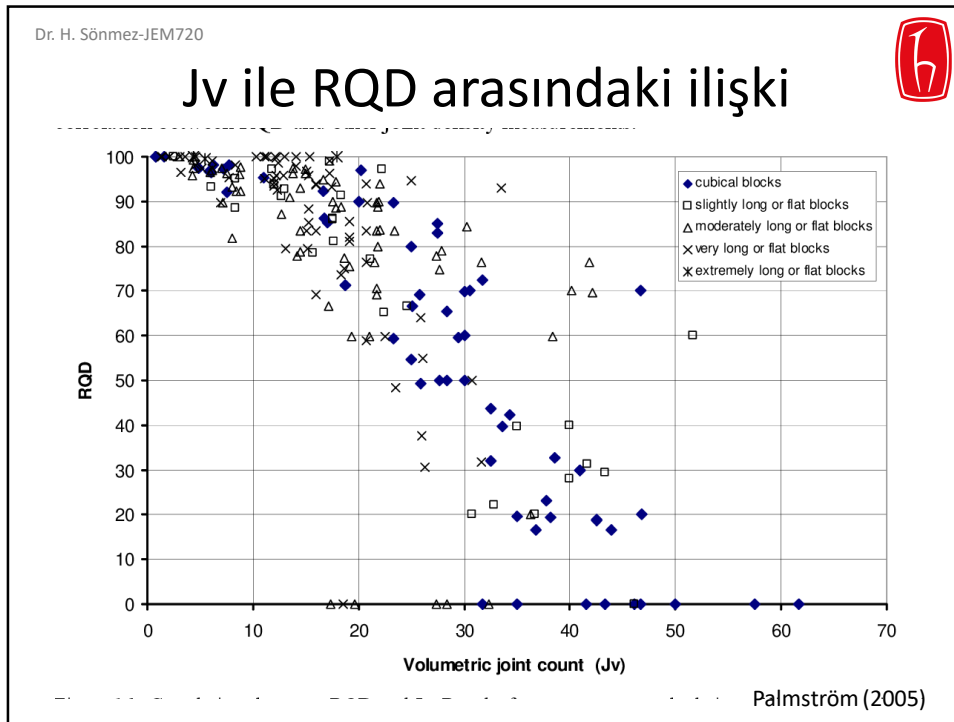
$$J_v = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_n}{L_n}$$

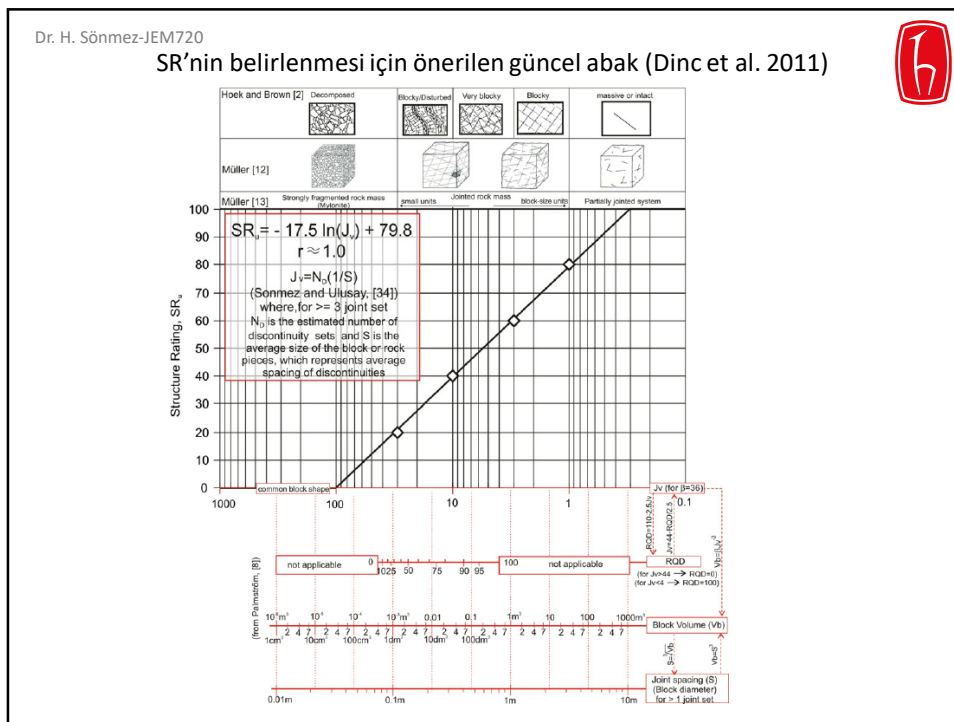
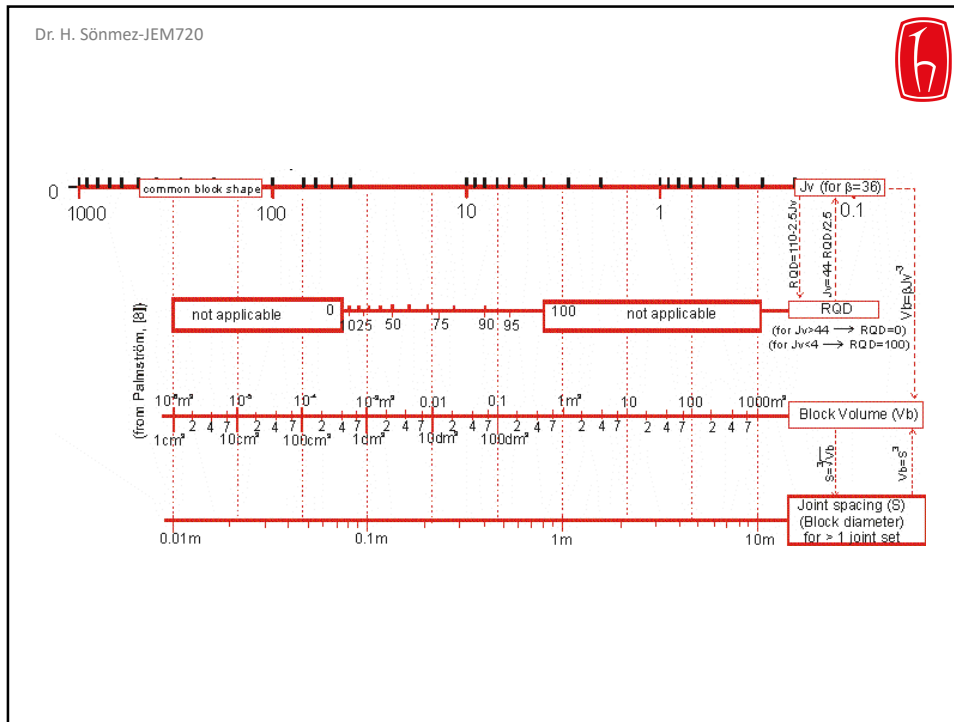
L: ölçüm hattı uzunluğu
N: süreksizlik seti

Sönmez ve Ulusay, 2002

$$J_v = D_n \left(\frac{1}{S}\right)$$

S: ortalama kaya parçası bloğu uzunluğu (ortalama süreksizlik aralığı)
D_n: bloktaki yüzey sayısı (paralel yüzeyler 1 defa sayılacak)





Dr. H. Sönmez-JEM720

Sönmez Ulusay (2002) ve Hoek et al. (2002) ile Mohr-Coulomb parametrelerinin hesaplanması

Aşama 1: Hoek-Brown sabitlerinin hesaplanması (m_s , s ve a).

Hoek vd. (2002)	Sönmez ve Ulusay (2002)
$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{0.0015 \cdot GSI})$	$a = \begin{cases} 0.5 & GSI \geq 30 \\ 0.65 - (GSI - 200) & GSI < 30 \end{cases}$
$m_s = m \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$	$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$
$b_s = 28 - 14D$	$b_s = 3,14 \ln\left(\frac{d}{d_0 + 340(1-d)}\right) + 28$
$b_s = 9 - 3D$	$b_s = 0,67 \ln\left(\frac{d}{d_0 + 340(1-d)}\right) + 9$

D (örselemiş için 0, örselememiş için 1) ve d (örselemiş için 0,8, örselememiş için 1)
Hoek vd. (2002) ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilmiş örnekleme faktörleridir.

Aşama 2: Balmer (1952)'a göre σ_c , c , ϕ ve τ değerlerinin hesaplanması.

- Sıfır ile $\sigma_u/4$ arasında değişen 7 tane σ_c değeri seçin (artışları $\sigma_u/28$ olarak düzenleyin)
- $\sigma_{im} = \frac{\sigma_c}{2} (m_s \cdot \sqrt{m_s^2 + 4s})$
- $\sigma_c = \sigma_c + \sigma_c \left(\frac{m_s \sigma_c}{\sigma_u} + 2 \right)^a$
- $\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_u} = \frac{m_s \sigma_c}{2(\sigma_c - \sigma_u)} + 1$
- $\sigma = \sigma_c + \frac{(\sigma_c - \sigma_u)}{\left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_u} + 1 \right)}$
- $\tau = (\sigma - \sigma_c) \sqrt{\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_u}}$
- $x = \log\left(\frac{\sigma - \sigma_{im}}{\sigma_u}\right)$
- $y = \log\left(\frac{\tau}{\sigma_c}\right)$
- $n=1$ 'den 7'ye kadar $\sigma_c = (n-1) \cdot \sigma_u/28$
- $y = \log A + Bx$
- $B = \frac{\sum xy - \sum x \sum y/n}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$
- $A = 10^{(y - Bx)}$
- Seçilmiş bir σ_c değeri için:
 - $\phi = \arctan\left(AB \left(\frac{\sigma - \sigma_{im}}{\sigma_u}\right)^n\right)$
 - $\tau = A \sigma_c \left(\frac{\sigma - \sigma_{im}}{\sigma_u}\right)^n$
 - $c = \tau - \sigma \tan \phi$

Dr. H. Sönmez-JEM720

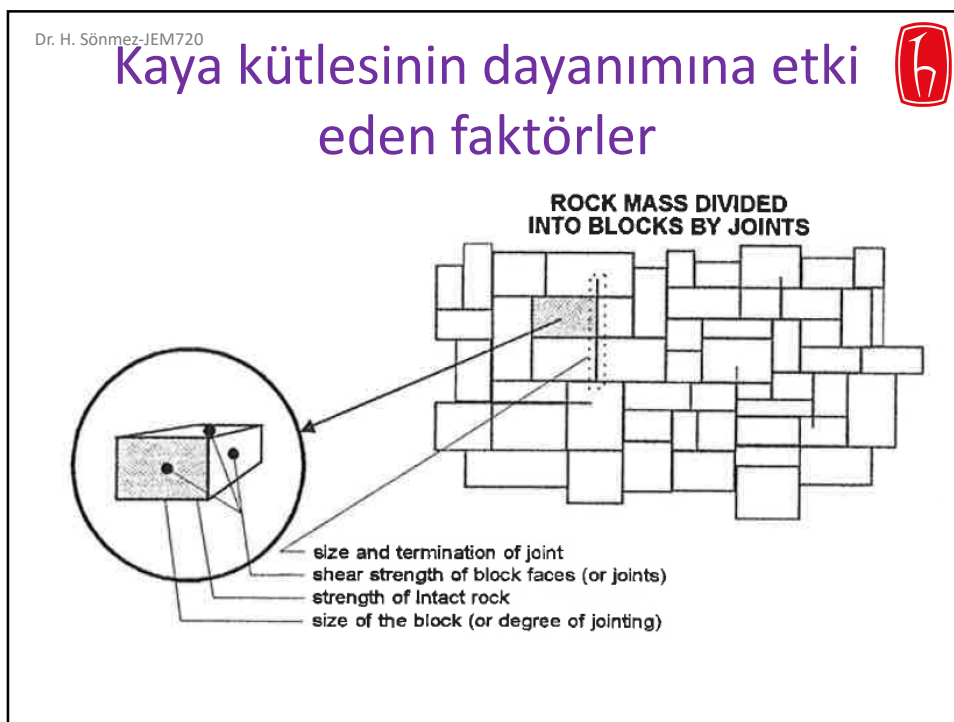
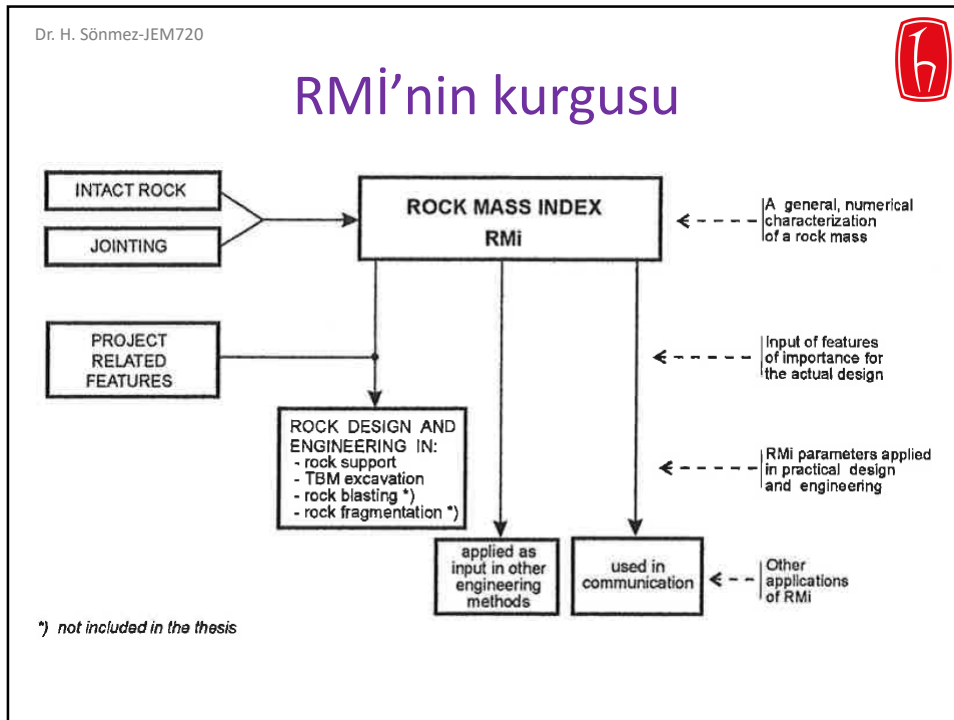
Rock Mass Index (RMI) Sınıflama Sistemi

- ✓ Palmström'ün 1986'dan başlayan ve 1990 ile 1995 arasındaki doktora tez çalışmasının da yer aldığı çalışmalarıyla şekillenmiştir.
- ✓ Sadece kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımının, kaya malzemesinininkinden itibaren bir indirgemeyle bulunmasını hedefler.

$$RMI = \sigma_c \cdot JP$$

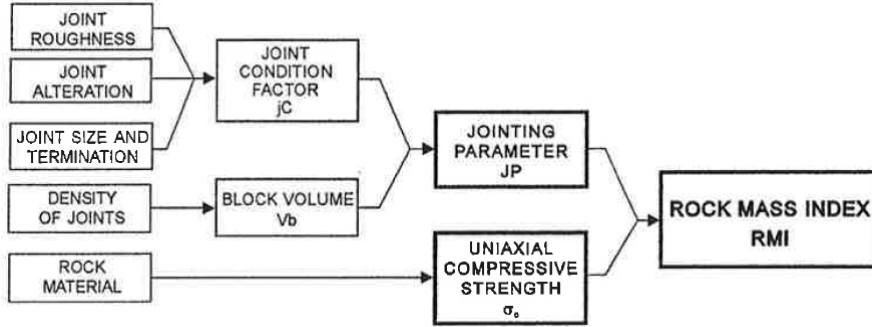
Burada:

- σ_c : kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını
- JP: İndirgeme çarpanı olarak Eklem Parametresini ifade ederken,
- RMI \rightarrow kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımıdır.



Dr. H. Sönmez-JEM720

RMI'nin belirlenmesine yönelik akış şeması



Blok hacmi (the block volume, Vb): Eklemlenme derecesinin ölçüdür.

Eklemlenme durumu faktörü (the joint condition factor, jC): Bloklar arası sürtünmeyi (dirençini) temsil eder. Bu amaçla Barton'un Jr/Ja (eklem pürüzlülüğü sayısı/eklem alterasyonu sayısı) ifadesini temel alır. İlave olarak eklem boyutu ve sonlanmasını da dikkate almıştır.

Dr. H. Sönmez-JEM720

$$jC = jL \cdot jR/jA \longleftrightarrow jR = j_s \cdot j_w$$

jL : eklem boyutu ve devamlılığı faktörü
jR : eklem yüzeylerinin pürüzlülüğü ve eklem düzlüğü (Q sistemindeki Jr'ye benzer)

jA : eklem yüzeylerinin alterasyon faktörü, örneğin kaplama, bozunma ve olası dolgunun varlığı (Q sistemindeki Ja'ye benzer)

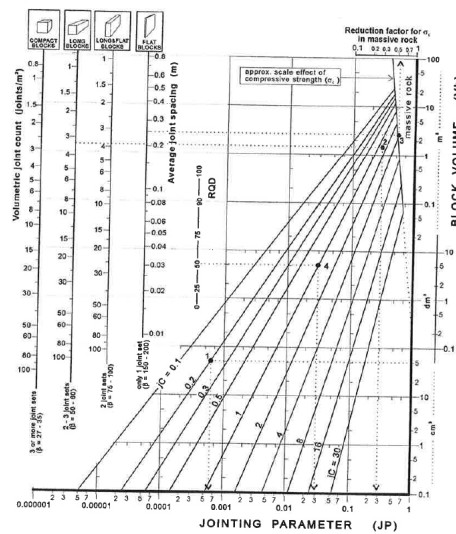
j_s : yüzeyin pürüzlülüğü faktörü
j_w : yüzeyin dalgalılık faktörü

JP'nin bulunmasına ilişkin grafiksel sunum

$$RMI = \sigma_c \cdot JP$$

$$JP = 0.2 \sqrt{jC} \cdot Vb^D$$

$$D = 0.37 jC^{-0.2}$$

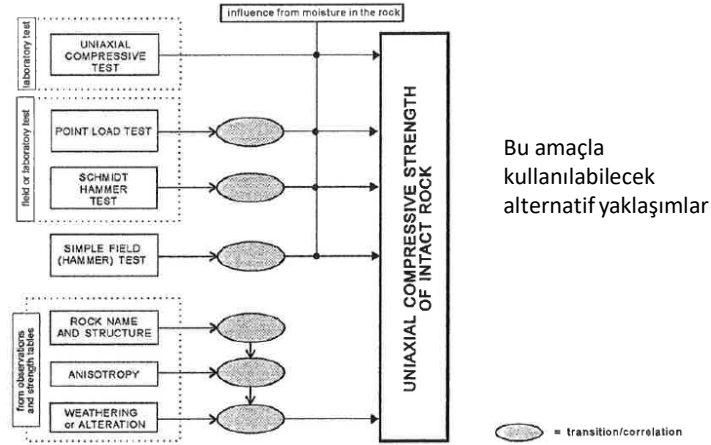


Dr. H. Sönmez-JEM720

RMI'nin girdi parametrelerinin belirlenmesi

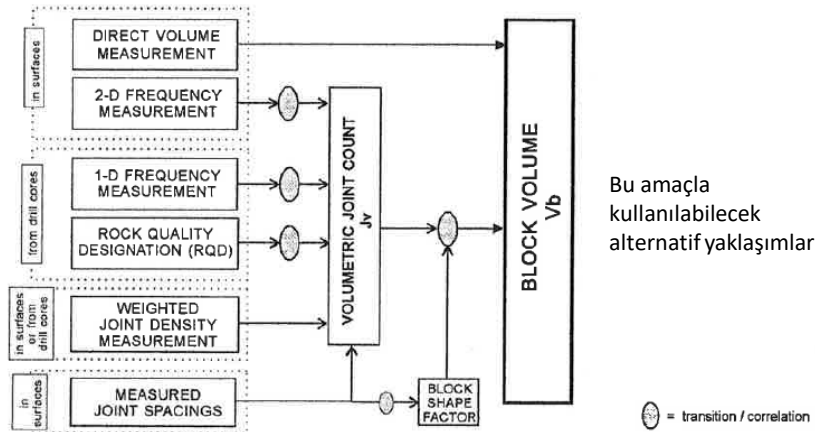


1. Tek eksenli sıkışma dayanımı σ_c



Dr. H. Sönmez-JEM720

2. Blok hacmi V_b



Dr. H. Sönmez-JEM720

3. Eklem Pürüzlülük Puanları (jR veya = js.jw)



TABLE 3 THE RATINGS OF THE SMOOTHNESS FACTOR (js).

TERM	DESCRIPTION	rating of js
Very rough	Near vertical steps and ridges occur with interlocking effect on the joint surface.	3
Rough	Some ridge and side-angle steps are evident; asperities are clearly visible; discontinuity surface feels very abrasive (like sandpaper grade approx. < 30)	2
Slightly rough	Asperities on the discontinuity surfaces are distinguishable and can be felt (like sandpaper grade approx. 30 - 300).	1.5
Smooth	Surface appear smooth and feels so to the touch (smoother than sandpaper grade approx. 300).	1
Polished	Visual evidence of polishing exists, or very smooth surface as is often seen in coatings of chlorite and specially talc.	0.75
Slicksided	Polished and often striated surface that results from friction along a fault surface or other movement surface.	0.6 - 1.5

The description is partly based on Bieniawski (1984) and Barton et al. (1974).

Dr. H. Sönmez-JEM720

$$u = \frac{\text{measured max. amplitude (a)}}{\text{measured length along joint (L)}}$$



TABLE 4 THE RATINGS OF THE JOINT WAVINESS FACTOR (jw).

TERM FOR WAVINESS	undulation	rating of jw
Interlocking (large scale)		3
Stepped		2.5
Large undulation	$u > 3\%$	2
Small - moderate undulation	$u = 0.3 - 3\%$	1.5
Planar	$u < 0.3\%$	1

TABLE 5 RATINGS OF THE JOINT ROUGHNESS FACTOR (jR)

small scale smoothness ^{*)} of joint surface	large scale waviness ^{*)} of joint plane				interlocking (large scale)
	planar	slightly undulating	strongly undulating	stepped	
very rough	3	4	6	7.5	9
rough	2	3	4	5	6
slightly rough	1.5	2	3	4	4.5
smooth	1	1.5	2	2.5	3
polished	0.75	1	1.5	2	2.5
slicksided ^{**)}	0.6 - 1.5	1 - 2	1.5 - 3	2 - 4	2.5 - 5
For irregular joints a rating of jR = 5 is suggested					

^{*)} For filled joints: jR = 1^{**)} For slicksided joints the highest value is used for marked striations.

Dr. H. Sönmez-JEM720

4. Eklem Alterasyon Puanları (jA)



TABLE 6 RATINGS OF THE JOINT ALTERATION FACTOR (jA).

A. CONTACT BETWEEN THE TWO ROCK WALL SURFACES			
TERM	DESCRIPTION	jA	
Clean joints			
-Healed or welded joints	Softening, impermeable filling (quartz, epidote etc.)	0.75	
-Fresh rock walls	No coating or filling on joint surface, except of staining	1	
-Alteration of joint wall:			
1 grade more altered	One class higher alteration than the intact rock	2	
2 grades more altered	Two classes higher alteration than the intact rock	4	
Coating or thin filling			
-Sand, silt, calcite, etc.	Coating of friction materials without clay	3	
-Clay, chlorite, talc, etc.	Coating of softening and cohesive minerals	4	
B. FILLED JOINTS, PARTLY OR NO JOINT WALL CONTACT			
TYPE OF FILLING MATERIAL	DESCRIPTION OF FILLING MATERIAL	Partly wall contact thin filling (< 5 mm ³) jA	No wall contact thick filling jA
-Sand, silt, calcite, etc.	Friction materials without clay	4	8
-Compacted clay	"Hard" clayey material	6	10
-Soft clay	Medium to low over-consolidation of filling	8	12
-Swelling clay	The material shows clear swelling properties	8 - 12	12 - 20

^{*)} Based on joint thickness division in the RMR system (Bieniawski, 1973)

Dr. H. Sönmez-JEM720

5. Eklem Boyutu ve Devamlılığı Puanları (jL)



TABLE 7 RATINGS OF THE JOINT SIZE AND CONTINUITY FACTOR (jL).

JOINT LENGTH	TERM	TYPE	jL	
			continuous joints	discontinuous joints ^{*)}
< 0.5 m	very short	bedding/foliation partings	3	6
0.1 - 1.0 m	short/small	joint	2	4
1 - 10 m	medium	joint	1	2
10 - 30 m	long/large	joint	0.75	1.5
> 30 m	very long/large	(filled) joint , seam ^{*)} or shear ^{*)}	0.5	1

^{*)} Often a singularity, and should in these cases be treated separately. ^{**)} Discontinuous joints end in massive rock

$$jL = 1.5jc \cdot L^{-0.3}$$

L : Eklem boyu (metre)

jc : eklem devamlılığı (devamlı eklemler için jc = 1 for continuous; kesilen -discontinuous- eklemler için jc = 2)

Dr. H. Sönmez-JEM720

RMI sınıflaması



CHARACTERIZATION		RMI VALUE
Term for RMI	Term for rock mass strength	
Extremely low	Extremely weak	< 0.001
Very low	Very weak	0.001 - 0.01
Low	Weak	0.01 - 0.1
Moderately high	Moderately strong	0.1 - 1
High	Strong	1 - 10
Very high	Very strong	10 - 100
Extremely high	Extremely strong	> 100

Diğer bazı RMI'ye benzer yaklaşımlar

$$\sigma_{mr} = \sigma_c \cdot C_g$$
 Hansagi (1965,1965b)

$$\sigma_{rm} = \sigma_{ci} \cdot S^{0.5}$$
 Hoek and Borwn yenilme ölçütü

$$\sigma_{rm} = \sigma_{ci} \cdot S^a$$
 Güncel halı

Kaya malzemesinin UCS'si → İndirgeme faktörü. Hansagi → 'gefüge-factor' (joint factor)
 Masif kayalar için → 0.7 ve eklemlı kayalar için → 0.47



Başarılar dilerim

Prof. Dr. H. Sönmez