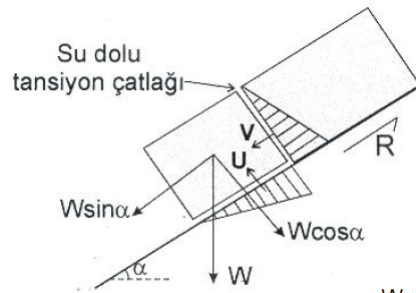


Dr. H. Sönmez –JEM719



Bölüm 3: ŞEVLERİN DURAYLILIĞINDA KULLANILAN JEOMEKANİK PARAMETRELER

Şev Duraysızlığının Genel Mekanizması



Kayma yüzeyine etkiyen normal gerilme
 $\sigma = (W \cos \alpha) / A$ (A: kayan bloğun alanı)

Kayma yüzeyinin makaslama dayanımı
 $\tau = c + \sigma \tan \phi$
 $\tau = c + [(W \cos \alpha) / A] \tan \phi$

Kaymaya kaşı koyan kuvvet
 $R = \tau A$
 $R = cA + (W \cos \alpha) \tan \phi$

$$W \sin \alpha = cA + (W \cos \alpha) \tan \phi \quad \text{(denge durumu)}$$

Kayma yönündeki kuvvet Kaymaya kaşı koyan kuvvet

$$W \sin \alpha + v = cA + (W \cos \alpha - u) \tan \phi \quad \text{(su basınçlarıyla birlikte denge durumu)}$$

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719



Makaslama Dayanımı

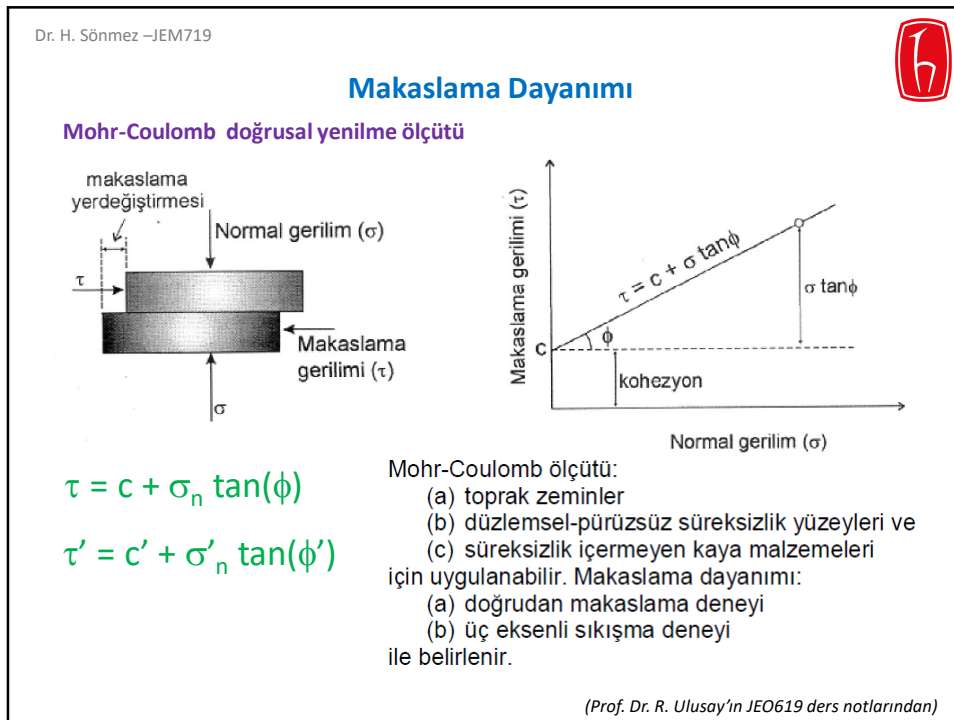
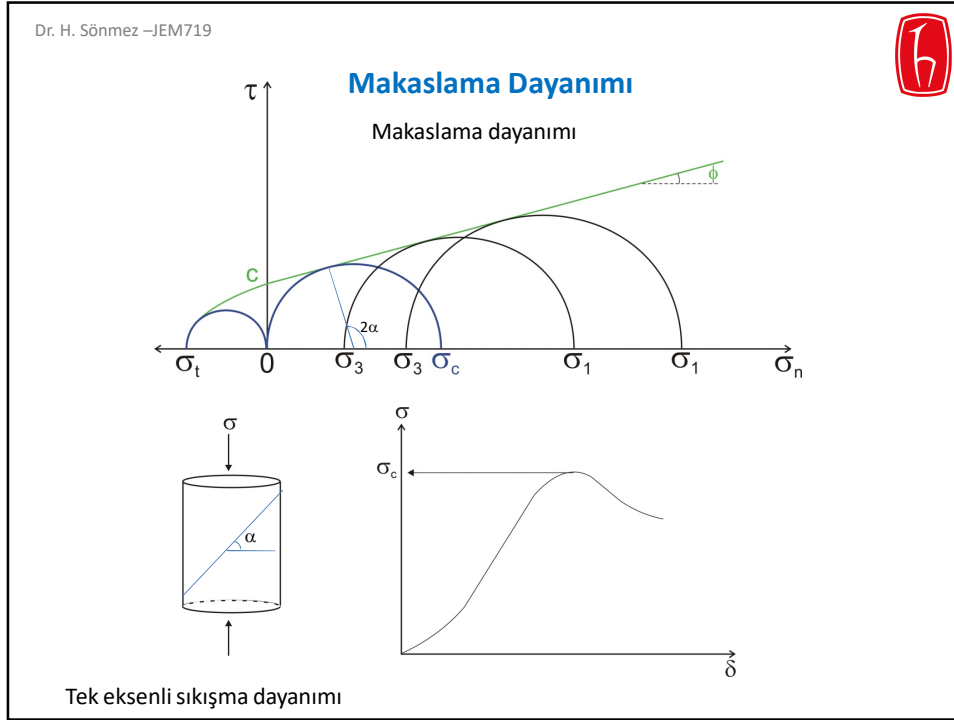
HATIRLAYALIM !

Dayanım nedir ve ne tür dayanımlardan söz edilir?

- Bir çizme kuvvet (F) etkidiğinde etkidiği alana bölünmesiyle ($\sigma = F/A$) elde edilen büyüklük gerilmedir.
- Uygulanan kuvvetin (gerilmenin) başlaması ve artmasıyla cisimde artan deformasyon gelişir.
- Gerilme altındaki cismin kırıldığı (yenildiği) andaki gerilme büyüklüğü dayanım olarak tanımlanır.

Şevlerin duraylılığı açısından önemli kuvvet, gerilme ve dayanım türleri

Sıkışma kuvveti → Sıkışma gerilmesi → Sıkışma dayanımı
 Çekme kuvveti → Çekilme gerilmesi → Çekilme dayanımı
 Makaslama kuvveti → Makaslama gerilmesi → Makaslama dayanımı

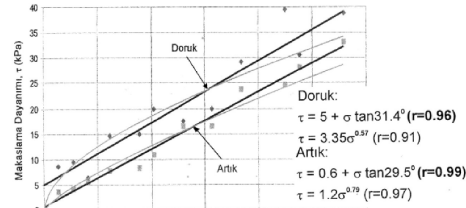
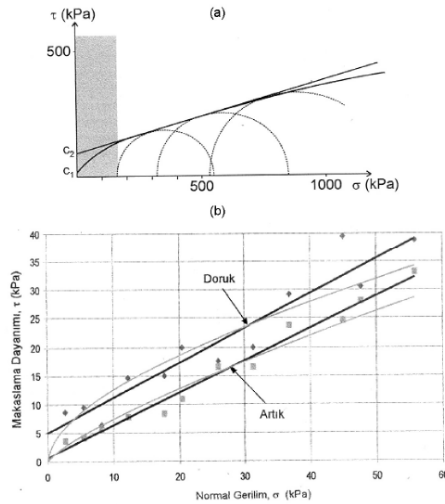


Dr. H. Sönmez –JEM719

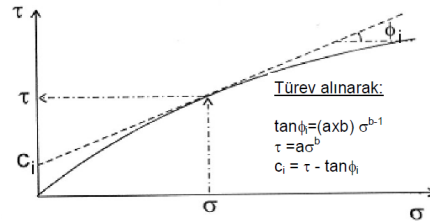


Makaslama Dayanımı

Eğrisel yenilme ölçütü



Düz ve pürüzsüz tabakalanma yüzeylerinin doğrusal ve eğrisel yenilme zarfları ile makaslama dayanımları ve korelasyon katsayıları (Ulusay vd., 2000)



Anlık kohezyon ve anlık içsel sürtünme açısı

$$\tau = a\sigma^b \text{ (toplam gerilim) } \quad \text{veya} \quad \tau = a(\sigma')^b \text{ (etkin gerilim)}$$

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719



HOEK ve BROWN Yenilme Ölçütü

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

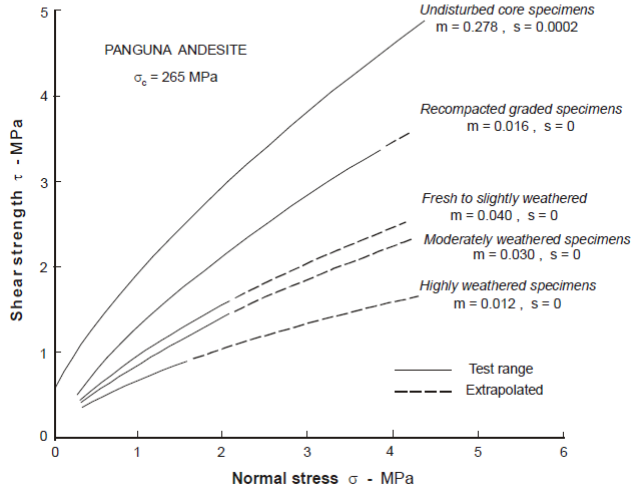
- Ölçüt, kaya malzemesinin uygulamada karşılaşılan gerilme koşulları altında göstereceği davranışı tam olarak tanımlamalı,
- Ölçüt, yaklaşık da olsa, çok sayıda süreksizlik takımını içeren kaya kütlelerinin dayanımı hakkında bilgi verebilmelidir.
- Laboratuvarında tayin edilen dayanım verileriyle uyumlu 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 –JEM719

Ölçütün temel veri kaynağı: (Panguna Andeziti)

Ölçüt, Griffith (1921 ve 1924)'in önerdiği ve McClintock ve Walsh (1962) tarafından modifiye edilen kuramın üzerine kurulmuştur.

- rock intact compressive strength $\sigma_c = 265$ MPa
- joint roughness number $J_r = 3$
- slightly rough surfaces, with separation < 1 mm
- joint alteration number $J_a = 2$
- 3 joint sets, with joint spacing < 60 mm



Dr. H. Sönmez –JEM719

HB'nin 1980-1988 dönemi

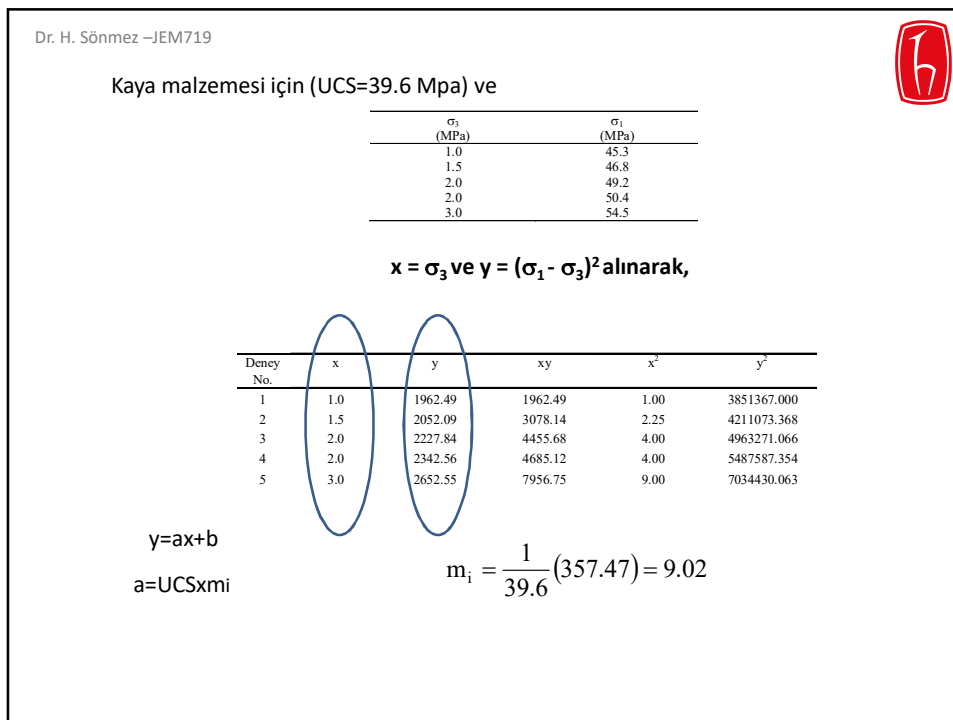
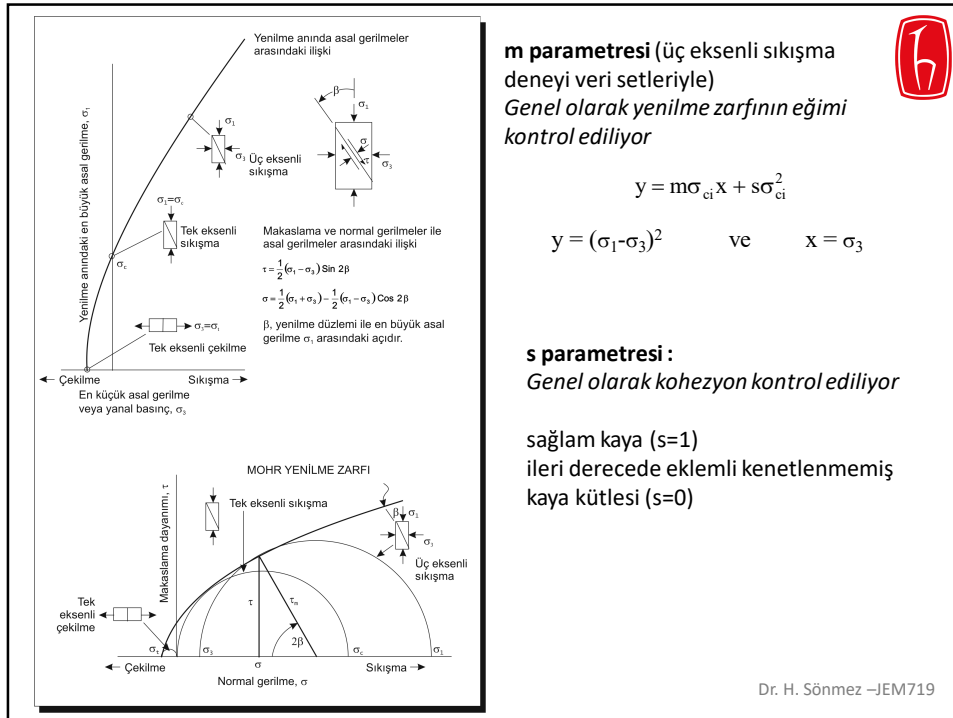


$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_{ci} + s\sigma_{ci}^2}$$

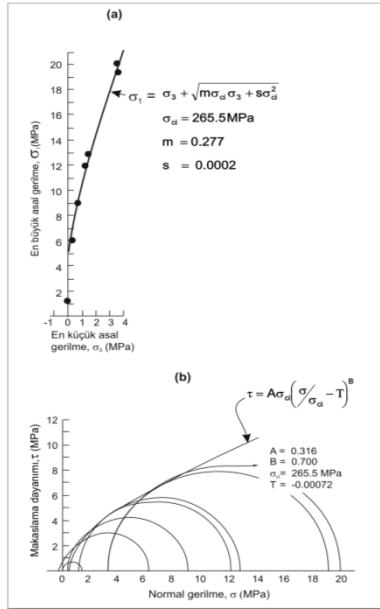
σ_1 ve σ_3 : Yenilme anındaki en büyük ve en küçük asal gerilmeler
 σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı
 m ve s: Boyutsuz malzeme sabitleridir.

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

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



Dr. H. Sönmez –JEM719

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

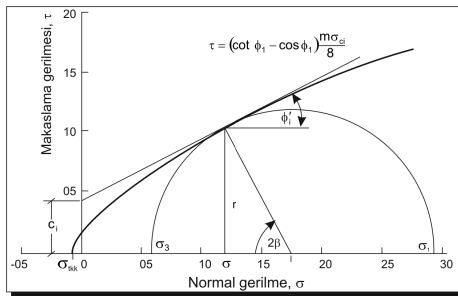
$$T = 1/2(m - \sqrt{m^2 + 4s})$$

	İYİ GELİŞMİŞ KRİSTAL DİLİMLİ OLAN KARBONATLI KAYALAR Dolomit, kireçli ve mermerleşmiş KILILI KAYALAR	İYİ GELİŞMİŞ KILILI KAYALAR Çamurcu, siltli ve keşil ve mermerleşmiş (dilimle alaklı)	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 –JEM719

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 –JEM719



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

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

NOT: RMR hesaplamasında su koşulu tamamen kuru (10 puan) ve eklem yönelimi düzeltilmesi 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 –JEM719



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) ölçüte giriyor.


$\tau - \sigma_n$ (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 10.1	Konglomerat a (20)		Mermer 9.3	Gnays 29.2	Granit 32.7	Gabro 25.8	Norit 21.7
		Orta	Tebeşir 7.2					
İnce	Kireçtaşı 8.4		Silttaşı 9.6	Jips 15.5	Kuvarsit 23.7	Riyyolit (20)	Andezit 18.9	Bazalt (17.7)
		Çok ince	Kıltaşı 3.4	Anhidrit 13.2				

Parantez içındekiler, tahmini değerleri göstermektedir.

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



MODİFİYE EDİLMİŞ HOEK-BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ		YÜZEY KOŞULU					
$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$ <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>					
	m _b /m _i	0.7	0.5	0.3	0.1		
	a	0.3	0.35	0.4	0.45		
	m _b /m _i	0.3	0.2	0.1	0.04		
	a	0.4	0.45	0.5	0.5		
	m _b /m _i	0.08	0.04	0.01	0.004		
	a	0.5	0.5	0.55	0.6		
	m _b /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

Dr. H. Sönmez –JEM719

Dr. H. Sönmez –JEM719



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

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

Örselenmemiş kaya kütleleri için eşitlikler veriliyor?

Çizelge 5.8. m_i, m_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, 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 Kaygan, oldukça bozunmuş; köşeli parçacıklar içeren dolgu veya sıvamalı yüzeyler	ÇOK ZAYIF Kaygan, oldukça bozunmuş, yumuşak kıllı kaplamalı veya dolgu yüzeyler
BLOKLU-3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütleli	m/m s a E_{pr} 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/m s a E_{pr} 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/ÖRSELENMİŞ- Birbirini kesen çok sayıda süreksizliklerin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütleli	m/m s a E_{pr} 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 0.55 2 000 0.3 20
PARÇALANMIŞ- Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının biriktirilmesinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütleli	m/m s a E_{pr} v GSI	0.17 0.004 0.5 10 000 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 0.55 1 000 0.3 20	0.04 0 0.60 1 000 0.3 10

Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI)

$GSI = RMR_{76}$

$GSI = RMR_{89} - 5$

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

$GSI = 9 \log_e Q' + 44$

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

Dr. H. Sönmez –JEM719

Dr. H. Sönmez –JEM719

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

Kaya türü	Sınıf	Grup	İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kiltaşı 4
				← Grovak → (18)		
	Klasik	Organik		← Tebeşir Taşı → (18)		
				← Kömür → (18)		
	Karbonatlı	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8		
	Kimyasal		Jips (16)	Anhidrit (13)		
METAMORFİK		Foliasyonsuz	Mermer 9	Hornfels (19)	Kuarsit 24	
		Düşük foliasyonlu	Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
		Foliasyonlu*	Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAGMATİK	Açık		Granit 33		Riyolit (16)	Obsidyen (19)
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)	
	Koyu		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.

Resim şu anda görüntülenmiyor.

HB'nin 1997-1999 dönemi

GSI'nin versiyonları öneriliyor.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Dr. H. Sönmez –JEM719

JEOLOJİK DAYANIM İNDEKSİ
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.

YAPI

SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULLARI
ÇOK İYİ
Çok pürüzsüz, taze ayrılmamış yüzeyler
İYİ
Düz, çok az ayrılmış, demir oksit ayrılmamış yüzeyler
ORTA
Orta derecede ayrılmış yüzeyler
ZAYIF
Kırılgan, sert veya köşeli parçalar içeren, ayrılmış, siltli, çok ayrılmış yüzeyler
ÇOK ZAYIF
Kırılgan, yumuşak ve dolguak, çok ayrılmış yüzeyler

AZALAN YÜZEY KALİTESİ →

YAPI	SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULLARI	AZALAN YÜZEY KALİTESİ
SAGLAM VEYA MASIF - Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütesi	90	UYGULANMAZ
BLOKLU - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselememiş kaya kütesi	80	
ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının keşmişleriyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren, kısmen örselemiş kaya kütesi	70	
BLOKLU/ÖRSELENMİŞ -Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütesi	60	
PARÇALANMIS -Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, ağır derecede kırık kaya kütesi	50	
FOLIASYONLU-LAMİNALİ-MAKASLANMIŞ İnce lammalı veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Diğer süreksizlik takımlarına oranla daha egemen olan sık aralıklı gıtozite yüzeyleri kayada bloklanmanın gelişmesini önemiştir.	40	
	30	
	20	
	10	
	UYGULANMAZ	

KAYA PARÇALARININ KENETLENME DEREJESİNDE AZALMA ↓

? Anizotropi ?

Sekil 5.9. Sağlam veya masif kaya kütesi ile foliasyonlu-laminali-makaslanmış kayaları da içerecek şekilde düzenlenmiş GSI sınıflama sistemi (Hoek, 1999)

Dr. H. Sönmez –JEM719

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. Choosing a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI is 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 fresh, unweathered surface	GOOD Slightly to moderately weathered (no staining) surfaces	FAIR Slightly to moderately weathered or stained surfaces	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	60			
	BLOCKY/DISTURBED-folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets		50	40		
	DISINTEGRATED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces			30	20	
	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				10	
		N/A	N/A			

Dr. H. Sönmez –JEM719

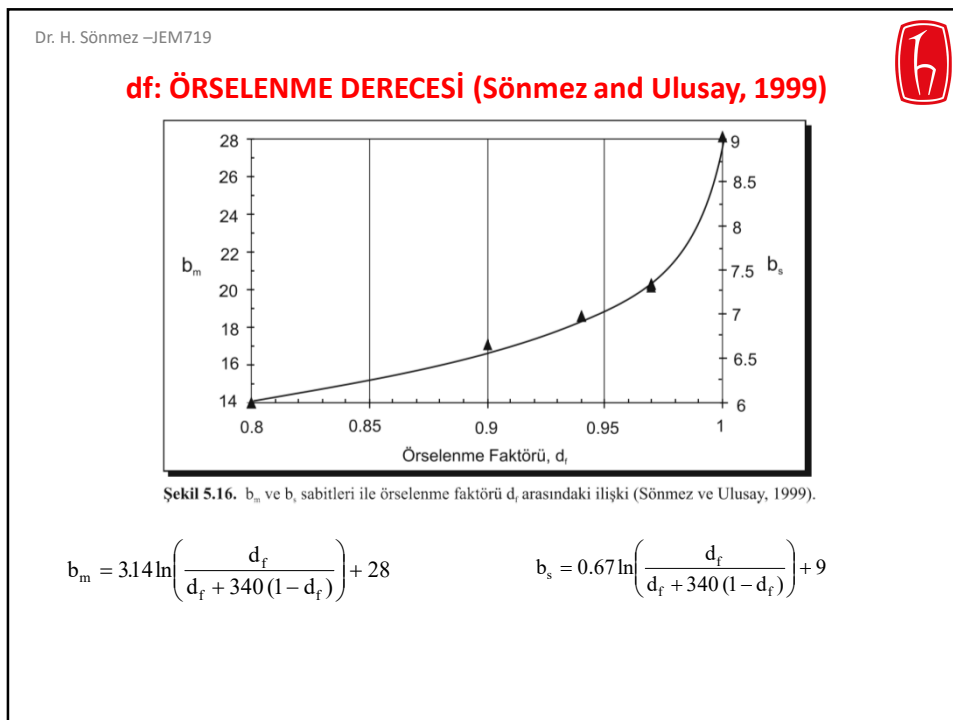
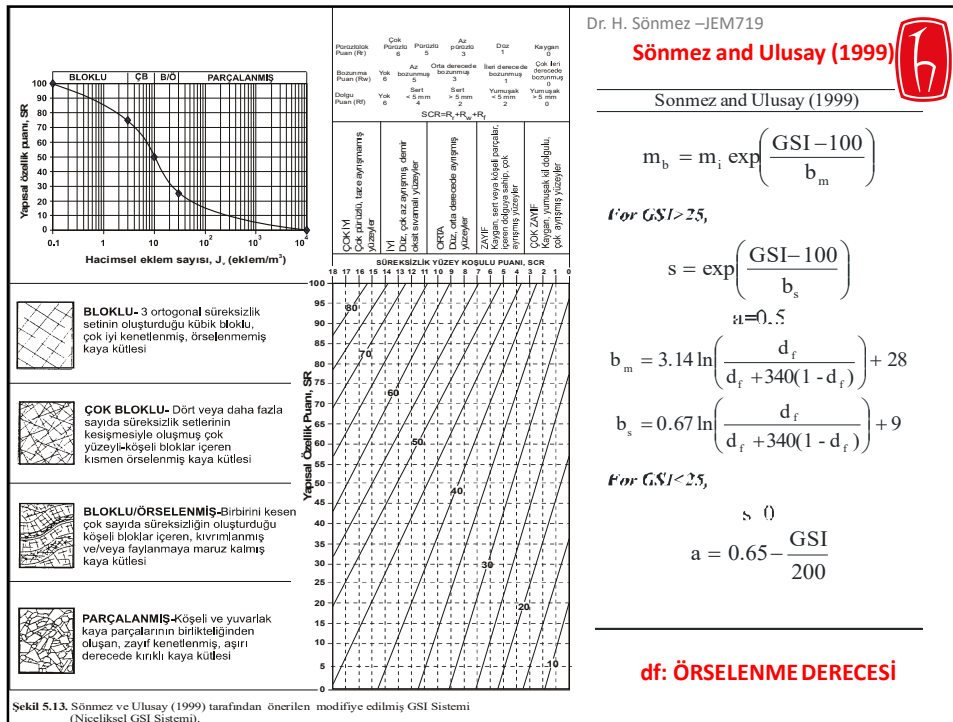


Oldukça gözlemsel

Uzman kullanıcı gerektiriyor.

Çoğu kez UZMAN kullanıcı bile hatalı yorumlayabiliyor.

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



Dr. H. Sönmez –JEM719



ÖLÇÜTÜN GÜNCEL DURUMU (2002)

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

SURFACE CONDITION RATING, SCR

**Sayisal
(Quantitative) GSI
abağı**

	Very rough 6	Rough 5	Slightly rough 3	Smooth 1	Stickensided 0
Roughness Rating (Rr)					
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=R_r+R_w+R_f					
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 –JEM719

Dr. H. Sönmez –JEM719



Hoek ve Brown Yenilme Ölçütü

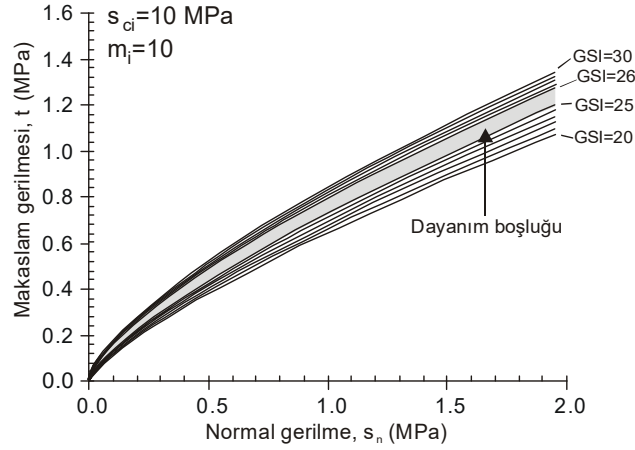
Neden Hoek vd. (2002) bazı modifikasyonlar yaptı?

Sönmez ve Ulusay (2002)

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

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

(1)

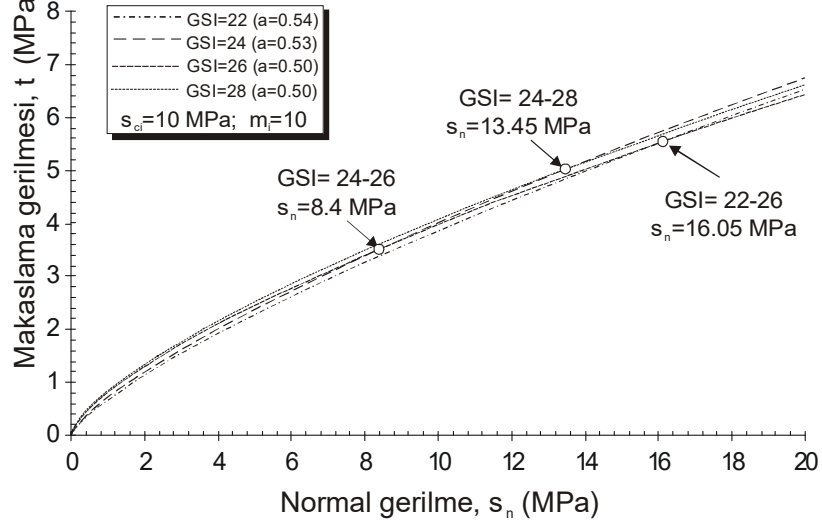


Dr. H. Sönmez –JEM719



(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)	

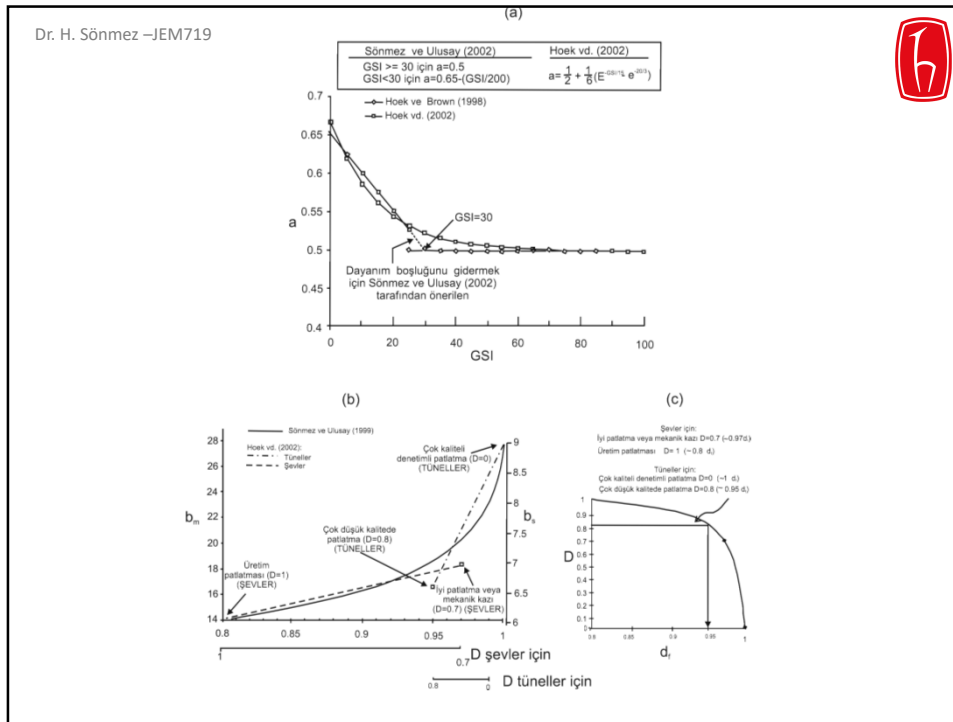
* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.
** These values are for intact rock specimens tested normal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

Güncel mi tablosu
Hoek (2007)

Dr. H. Sönmez –JEM719

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> $s = 0$ $a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_m}\right)$ $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$ $b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 28$ $b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_r}{d_r + 340(1 - d_r)}\right) + 9$ <p>For $GSI > 30$,</p> $a = 0.5$ <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>$b_m = 28 - 14D$ $b_s = 9 - 3D$</p> $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI_d/15} - e^{-20/3} \right)$
$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$		<p>m_b and $s \implies GSI$</p>

Dr. H. Sönmez –JEM719



Dr. H. Sönmez –JEM719

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 ripraplama 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 –JEM719



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

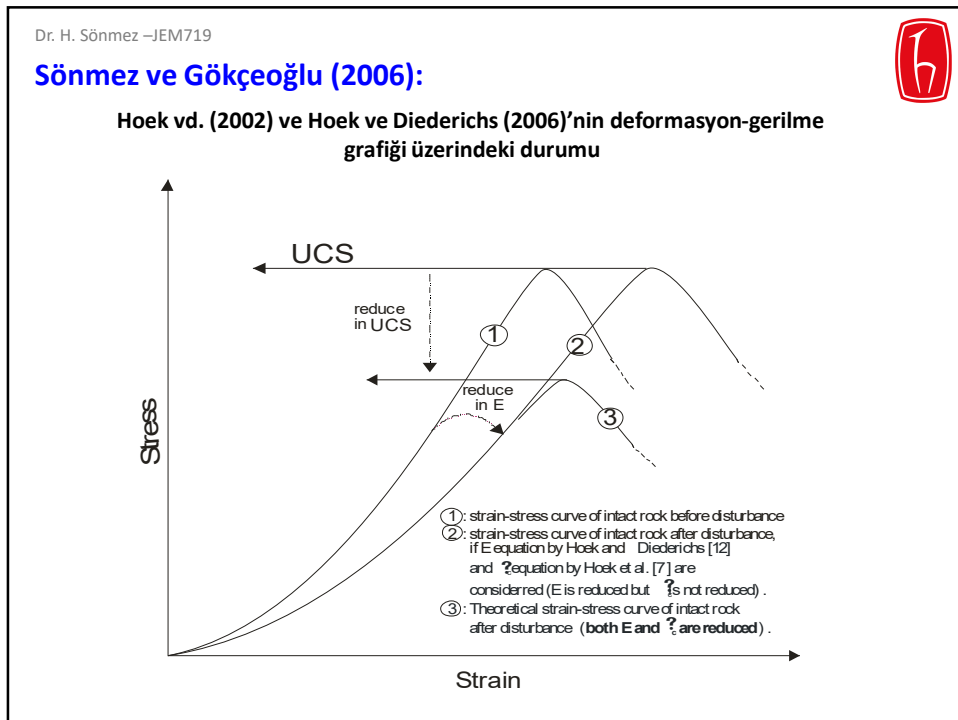
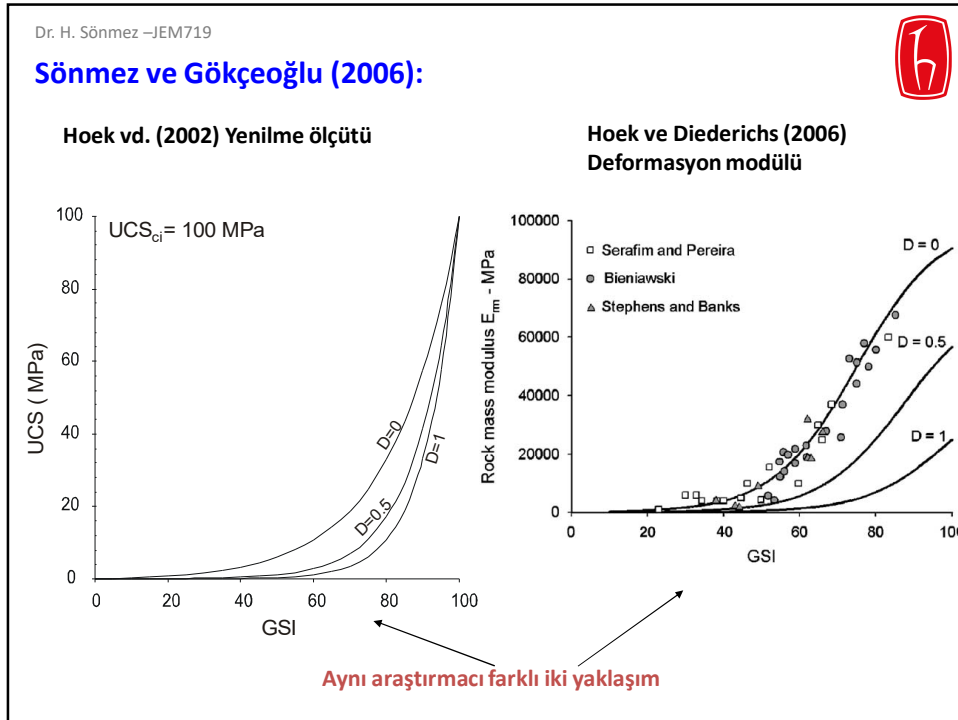
Dr. H. Sönmez –JEM719



Sönmez ve Gökçeoğlu (2006):

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

Çalışmaları üzerine bir tartışma:



Dr. H. Sönmez –JEM719

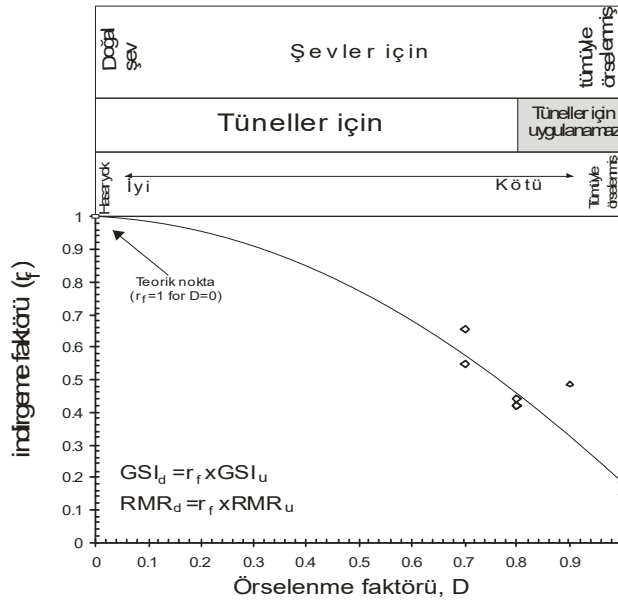


Sönmez ve Gökçeoğlu (2006):

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 –JEM719



GSI_d veya RMR_d
Kullanılarak
Örselenmemiş
Eşitlikler dizisi ile
Tasarım yapılmalı.

Dr. H. Sönmez –JEM719

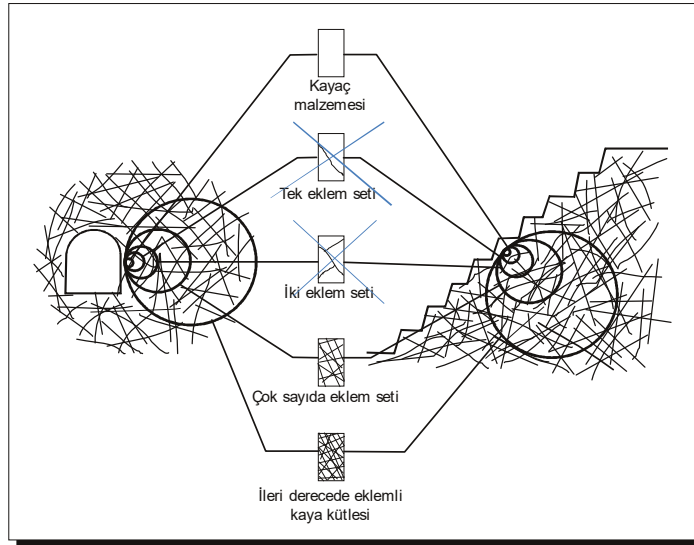


ÖLÇÜTÜ hangi kaya kütlelerinde kullanmalıyız !

- 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 –JEM719



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 –JEM719

ÖLÇÜTÜN GÜNCEL KULLANIMI İÇİN ÖZET



- Girdi Parametreleri
 - GSI puanı
 - Sayısal GSI abağı (Sönmez ve Ulusay 2002)
 - Jv 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) örselenme durumu (d_f veya D)

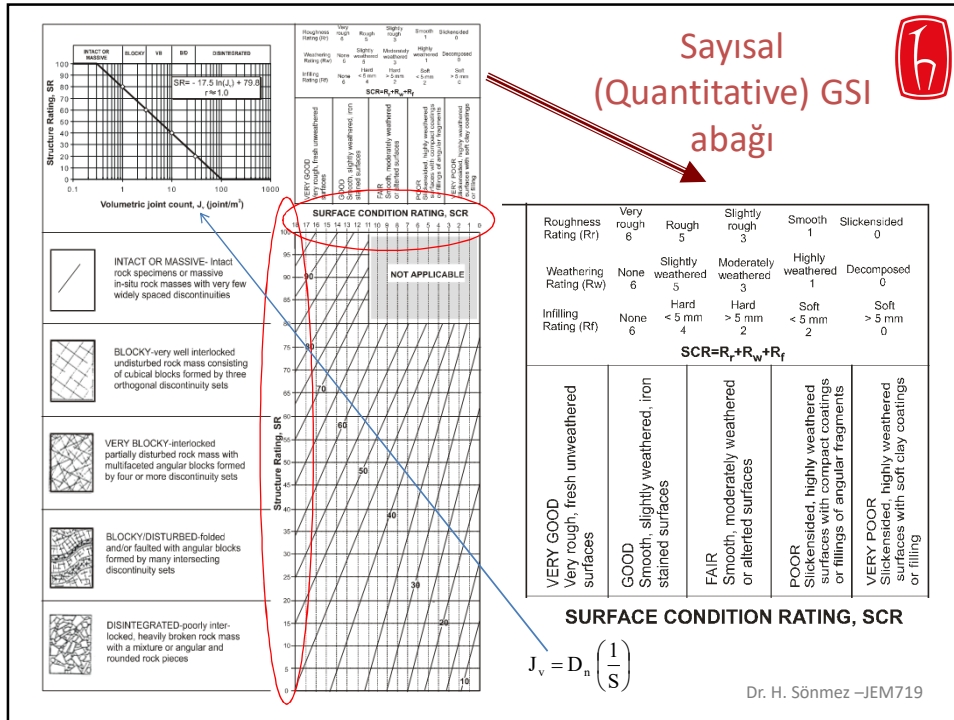
Dr. H. Sönmez –JEM719

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



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, $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$	For GSI>25, $s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$	$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$	$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{b_s}\right)$
a=0.5	a=0.5	$b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 28$	$b_m = 28 - 14D$
For GSI<25, s=0	$b_m = 3.14 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 28$	$b_s = 0.67 \ln\left(\frac{d_f}{d_f + 340(1-d_f)}\right) + 9$	$b_s = 9 - 3D$
a = $0.65 - \frac{GSI}{200}$	For GSI<25, s=0	For GSI>30, a=0.5	a = $\frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$
	a = $0.65 - \frac{GSI}{200}$	For GSI<30, a = $0.65 - \frac{GSI}{200}$	

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



Dr. H. Sönmez –JEM719

J_v nasıl belirlenir?

- Hacimsel Eklem Sayısı (J_v): 1m³'lük kaya kütle hacmindeki süreksizlik sayısını ifade eder (Palmström, 1982).

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

N₁: Ölçüm hattı boyunca 1. nolu süreksizlik takımına ait süreksizlik sayısı

L₁: 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:

$$J_v = 6/10 + 24/10 + 5/10 + 1/10 = 3.6/m^3$$

Ulusay ve Sönmez (2007'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

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 –JEM719

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

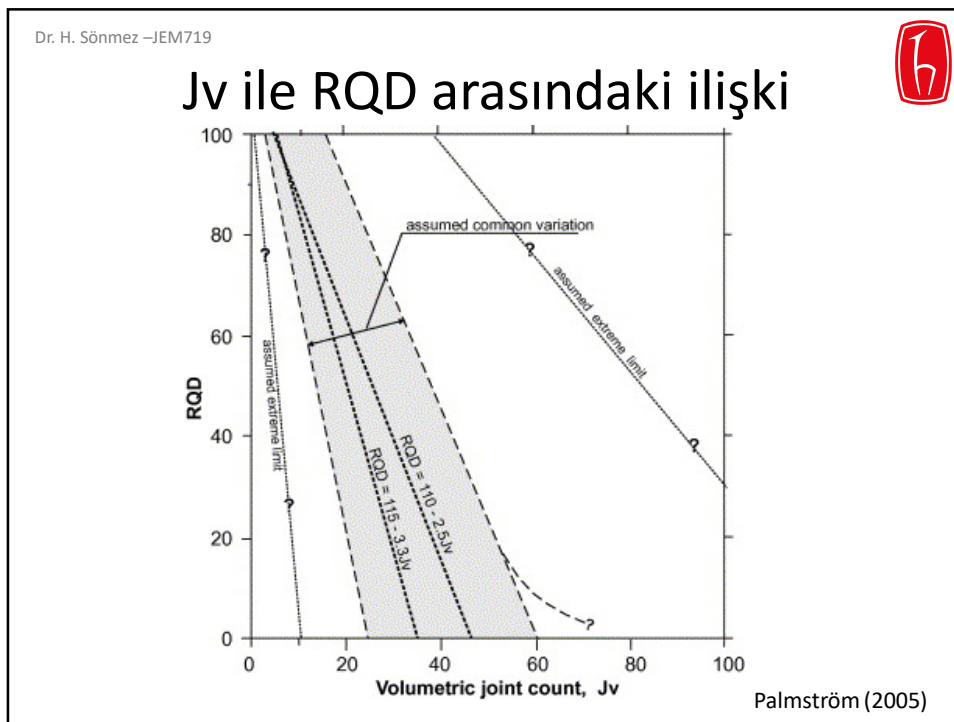
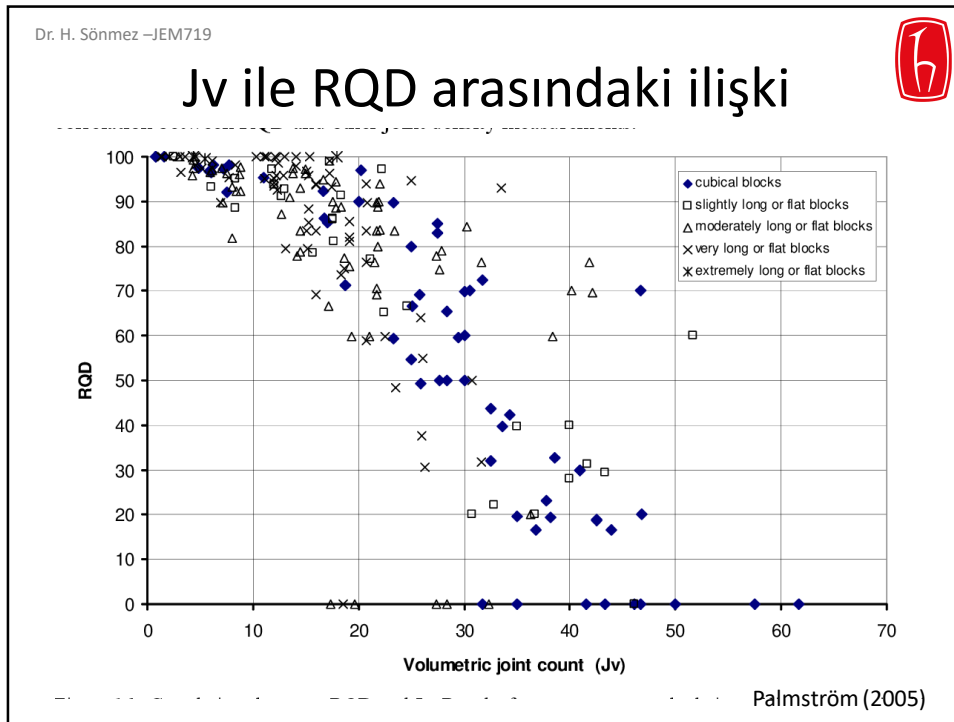
$$J_v = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_2}{L_2} + \dots + \frac{N_n}{L_n}$$

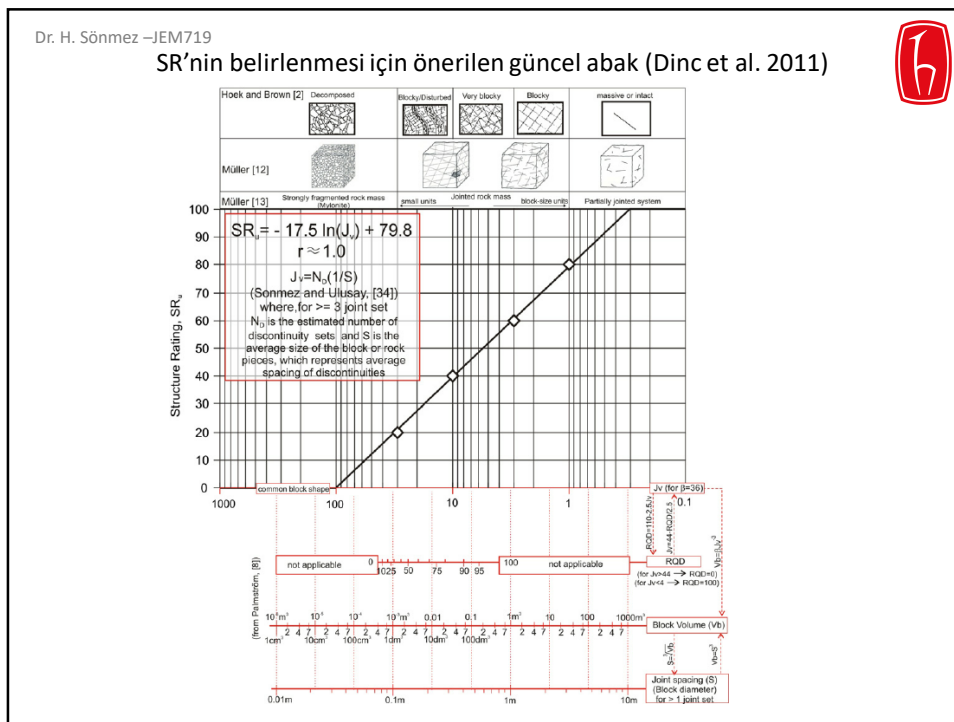
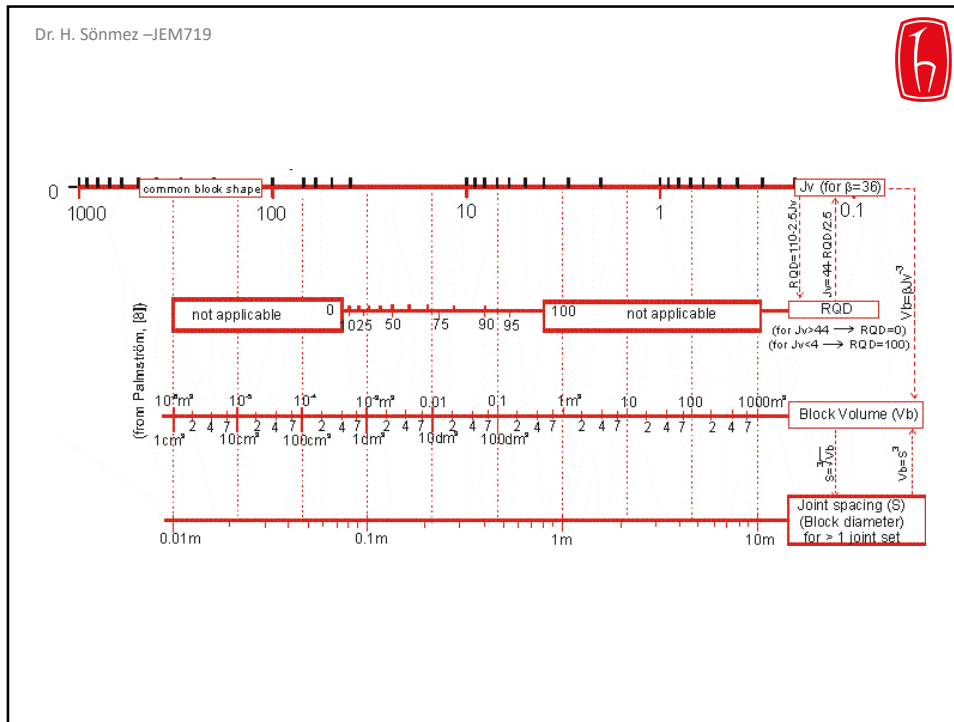
L: ölçüm hattı uzunluğu
N: süreksizlik seti

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)





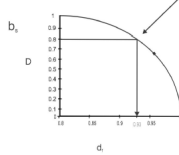
Dr. H. Sönmez –JEM719

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



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

Hoek vd. (2002)	Sönmez ve Ulusay (2002)
$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{0.0015 \cdot GSI} - e^{0.001})$	$a = \begin{cases} 0.5 & GSI >= 30 \\ 0.65 - (GSI - 200) & GSI < 30 \end{cases}$
$m_b = m \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_c}\right)$	$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{b_s}\right)$
$b_c = 28 - 14D$	$b_c = 3,14 \ln\left(\frac{d}{d_0 + 340(1-d)}\right) + 28$
$b_s = 9 - 3D$	$b_s = 0,67 \ln\left(\frac{d}{d_0 + 340(1-d)}\right) + 9$
D (özellik için 0, ölçeklenmiş için 1) ve d (özellik için 0,8, ölçeklenmiş için 1) Hoek vd. (2002) ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilmiş ölçekleme faktörleridir.	Şey için Küçük çaplı patlama D=0.7 (n=0.95 df) Orta çaplı patlama D=1 (n=0.8 df) Tünel için Çok yüksek kaliteli patlama D=0 (n=1 df) Çok küçük kaliteli patlama D=0.9 (n=0.95 df)



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

- Sıfır ile $\sigma_c/4$ arasında değişen 7 tane σ_c değeri seçin (artışları $\sigma_c/28$ olarak düzenleyin)

$$\sigma_{c_n} = \frac{\sigma_c}{2} (m_c \cdot \sqrt{m_c + 4s})$$

$$\sigma_c = \sigma_c + \sigma_c \left(\frac{m_c \sigma_c}{\sigma_c} + 2 \right)^a$$

$$\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_c} = \frac{m_c \sigma_c}{2(\sigma_c - \sigma_c)} + 1$$

$$\sigma = \sigma_c + \frac{(\sigma_c - \sigma_c)}{\left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_c} \right) + 1}$$

$$\tau = (\sigma - \sigma_c) \sqrt{\frac{\partial \sigma_c}{\partial \sigma_c}}$$

$$x = \log\left(\frac{\sigma - \sigma_c}{\sigma_c}\right)$$

n=1'den 7'ye kadar

 $\sigma_c = (n-1) \cdot \sigma_c / 28$

$$y = \log\left(\frac{\tau}{\sigma_c}\right)$$

- $y = \log A + Bx$

$$B = \frac{\sum xy - \sum x \sum y / n}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

A=10 (0.1%)

- Seçilmiş bir σ_c değeri için:

$$\phi = \arctan\left(AB \left(\frac{\sigma - \sigma_c}{\sigma_c}\right)^B\right)$$

$$\tau = A \sigma_c \left(\frac{\sigma - \sigma_c}{\sigma_c}\right)^B$$

$$c = \tau - \sigma \tan \phi$$

Dr. H. Sönmez –JEM719

m_i sabiti seçim abağı (Hoek, 2007'den)



Kaya türü	Sınıf	Grup	Doku			
			İn	Orta	İnce	Çok İnce
SEDİMANTER	Kırıntılı		Konglomeralar* (21±3) Breşler (19±5)	17±4	Silttaşları 7±2 Grovaklar (18 ±3)	Kilttaşları 4±2 Şeyler (6±2) Marmar (7±2)
		Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı (12±3)	Sparitlik kireçtaşları (10±2)	Mikritlik kireçtaşları (9±2)	Dolomitler (9±3)
		Evaporitler	Jips	Anhidrit		
		Organik		8±2	12±2	Tebeşir 7±2
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9±3	Hornfels (19±4) Metakumtaşı (19±3)	Kuvarsit 20±3	
	Az foliasyonlu		Migmatit (29±5)	Amfibolliler 26±6		
	Foliasyonlu**		Gnays 28±5	Şeyler 12±3	Filitler (7±3)	Sleyler 7±4
MAGMATİK	Plutonik	Açık renkli	Granit 32±2 Granodiyorit (29±3)	Diyorit 25±5		
		Koyu renkli	Gabro 27±3 Norit 20±5	Dolorit (16±5)		
	Hipabisal		Porfirler (20±5)		Diyabaz (15±5)	Periodit (25±5)
	Volkanik	Lav		Riyolit (25±5) Andezit 25±5	Dasit (25±3) Bazalt (25±5)	Obsidiyen (19±3)
Piroklastik		Aglomerata (19±3)	Breş (19±5)	Tuf (13±5)		

* Konglomeralar ve breşlerin m_i değerleri, bağlayıcı malzemenin özelliğine ve çimontalanma derecesine göre geniş bir aralığa sahip olup, kumtaşılarınkine benzer değerlerden ince taneli kayalarınkine değin değişen aralıklar sergileyebilirler.

** Bu değerler, tabakalanmaya veya foliasyona dik yönde test edilmiş kaya malzemesi örnekleri içindir.

Eğer zayıf dik düzlemi boyunca yenilme meydana gelirse, m_i değeri önemli ölçüde farklılık gösterir.

*** Parantez içindeki değerler tahminidir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde kullanılan dolaylı yaklaşımlar



- Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi için uygun karot örneği (boy/çap oranı = ~2 -2.5 ve çap → ~50 mm) gereklidir.
- Sık eklemlili kaya kütlelerinde ve ince tabakalı kayalardan standartlara uygun örnek hazırlanması hemen hemen imkansızdır.
- Özellikle bu tür kaya malzemelerinde tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesinde alternatif yaklaşımlar mevcuttur.

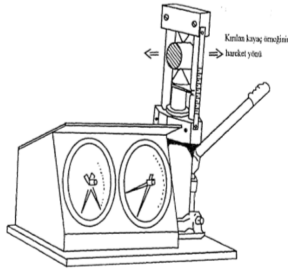
Bunlar:

- Nokta yükü dayanım indeksi deneyi
- Schmidt çekici deneyi
- Disk makaslama indeksi deneyi
- Gözlem ve tecrübeye dayalı tanımlama (kaba yaklaşım)



Dr. H. Sönmez –JEM719

Nokta yükü dayanım indeksi



$$I_s = F/D^2$$

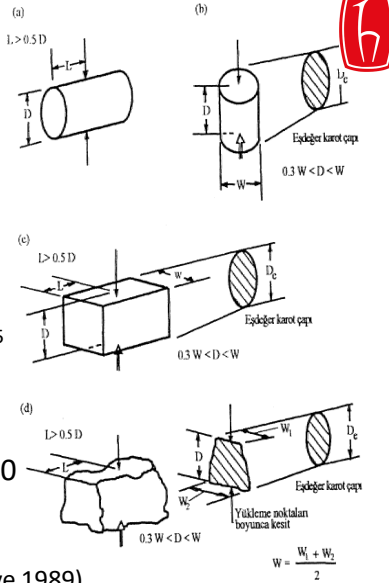
$$I_{s50} = F \times I_s$$

$$F = (D/50)^{0.45}$$

Nokta yükleme deney aleti (ELE 1990; Topal 2000'den),

Deney 10 - 60 sn'de tamamlanmalıdır. $\sigma_c = K \times I_{s50}$

$$K = 24 \text{ (Biewniawski, 1975 ve 1989)}$$



Nokta yükleme deneyi için gerekli (a) çapsal; (b) eksenel; (c) blok; ve (d.) düzensiz örnek boyutları (ISRM, 1985, Topal 200'den).

Dr. H. Sönmez –JEM719

Nokta yükü dayanım indeksi

- ✓ Bieniawski (1975) $K=24$ öneriyor ama, K çarpanı 3 ile 45 gibi çok geniş bir aralıkta değişiyor.
- ✓ K çarpanı kaya türünden bağımsız değil !

Rock type	Class	Group	Texture	Fracture	Strength			
SEDIMENTARY ROCKS	Clastic		Coarse	Medium	Fine	Very fine		
			Conglomerates* (11 ± 3)	Sandstones (17 ± 4)	Siltstones (7 ± 2)	Claystones (4 ± 2)		
			Breccias (19 ± 5)	Greenstones (18 ± 3)	Shales (8 ± 2)	Slates (7 ± 2)		
			Non-clastic		Crystalline Limestones (12 ± 3)	Spentic Limestones (18 ± 3)	Micritic Limestones (9 ± 3)	Dolomites (9 ± 3)
					Silicates	Opalms (8 ± 2)	Asbestos (12 ± 2)	Chalk (1 ± 2)
	Non-Foliated		Mafic (9 ± 3)	Intermediate (19 ± 4)	Quartzites (20 ± 3)			
			Slightly foliated (19 ± 3)	Migmatites (19 ± 3)	Mylonites (19 ± 3)			
			Foliated** (18 ± 3)	Gneiss (18 ± 3)	Schists (18 ± 3)	Phyllites (18 ± 3)	Slates (7 ± 4)	
	METAMORPHIC ROCKS	Plutonic		Light (19 ± 3)	Diorite (12 ± 3)	Granite (21 ± 5)	Granodiorite (19 ± 3)	
				Dark (21 ± 3)	Gabbro (27 ± 3)	Diorite (21 ± 3)	Monzonite (21 ± 3)	
Hypabyssal			Porphyry (19 ± 3)	Diorite (11 ± 3)	Andesite (21 ± 3)	Basalt (19 ± 3)		
			Volcanic	Lava (19 ± 3)	Pyroclastic (19 ± 3)	Agglomerates (19 ± 3)	Breccia (19 ± 3)	

* 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 near the fine grained volcanics.

** 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.

Sönmez ve Osman (2008)

$$K = 3.3 (m_i)^{0.665} \quad (r=0.75)$$

$$\sigma_c = K \times I_{50}$$

Kaya türlerini göre mi parametresi alabileceği değerler (Hoek, 2007)

Arayışmacı	Kayı	aç	türü	k-değeri
Bloch and Franklin (1972)			Kumtaş, dolomit	24
Bieniawski (1975)			Kumtaş ve magmatik kayalar	24
Wilson (1976)			Çok zayıf çamurlar	8
Carter and Swadlow (1977)			Kıngıtaş	26-28.5
			Kumtaş	24.5
Al-Jassar and Hawkins (1979)			Kıngıtaş/dolomit	8-27
			Kumtaş	22
Jen ni and Bal Inal (1979)			Kıngıtaş ve dolomit	12
			Bey (kili)	9
Çavuşcu (1980)			Küçük birim	25
Hansen et al. (1980)			Tortal kayalar	29
Rand et al. (1980)			Bağır	6-34
			Silice'li kumtaş	10-45
			Şeş	8
Beaumont (1982)			Dolomit	12-14
Forster (1983)			Kumtaş	15-18
Hagerman et al. (1984)	Kal	ka	Mermer	3
			Kızıl deniz tortulları	4-5
Abou (1985)			Kalkareli kumtaş	3-12
Noches (1986)			Kumtaş	5-1.1
			Silice	4-30 (genelde 20-25)
			Çamurlar	15-35
			Şeş	18-35 (genelde 30)
			Migmatik ve metamorf kayalar	24
			Kuvvetli kıngıtaş	27
			Taneli kıngıtaş	24-54
			Tebajir	8
			Kumtaş	10-22
Hawkins and Oliver (1988)			Kıngıtaş	26.5
			Kumtaş	24.8
			Silttaş	4.1
			Kumtaş	9.5-1.5
Rao et al. (1987)			Ayrıntılı tortul kayalar	6
Leung and Radhakrishnan (1990)			Kumtaş	19-31 (genelde 21-27)
Çargül and Şakr (1996)			Kıngıtaş ve dolomit	17-30
Bell (1992)			Kumtaş	12-19 (kuru), 7-12 (sık)
			Kıngıtaş	20-30 (kuru), 14-24 (sık)
			Tebajir	68 (kuru), 31 (sık)
Kahraman (1996)			Kıngıtaş, dolomit, serpenitli, marmer, kumtaş, dolomit	20-30
Anil et al. (1996)			Mermer	24
Wiesner and Gillate (1997)			Kumtaş ve bazalt	18.6
Hawkins (1988)			Tortal kayalar	10-24 (sık)
			Tortal ve migmatik kayalar	1.5-25 (kuru)
Bowden et al. (1980)			Tebajir	11 -21 (genelde 14-17)
			Marmer	19-22

Geological Engineering 34 (1) 2002

(Topal, 2000'den)

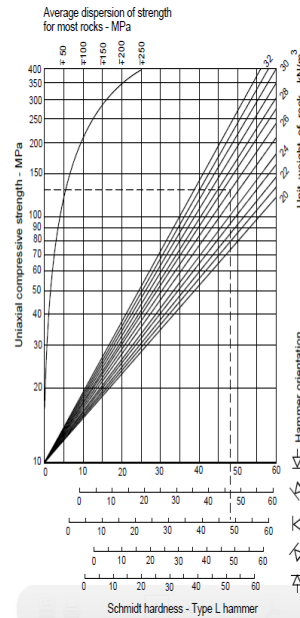
Dr. H. Sönmez –JEM719

Schmidt çekici deneyi



<https://www.geo-design.co.uk/capabilities-services/capabilities/rock-mechanics/>

Süreksizlik yüzey dayanımını verir. Yüzeyde bozunma/alterasyon yoksa (taze yüzeyse) bulunan değer $\rightarrow \sigma_c$ 'ye yaklaşıyor. Aksi halde daha düşüktür.



20 Schmidt sertliği ölçümü alınır, en küçük 10 adedi dikkate alınmaz diğerlerinin ortalaması alınır. Ortalama değer ve birim hacim ağırlık (γ) kullanılarak yandaki abaktan tek eksenli sıkışma dayanımı bulunur.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Disk makaslama indeksi (Block Punch Index, BPI) deneyi

$D \sim 50$ mm çaplı ve $t \sim 10$ mm kalınlığındaki diskin makaslanması (zimbalanması) şeklinde deney uygulanır.

BPI = F/2A
 F: yenilme yükü
 A: kama makaslama (yan yüzey) alanı

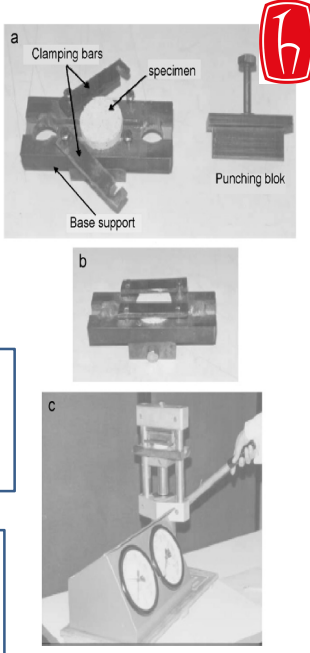
$\sigma_c = 6.1(BPI) - 3.3$ (Schrier, 1988)

$BPI_c = 3499D^{-1.3926} t^{-1.1265} F_{t,D}$ D: çap, t: kalınlık ve $F_{t,D}$: yenilme yükü

$\sigma_c = 5.5(BPI_c)$ Gokceoglu (1997), Ulusay and
 $\sigma_c = 5.1(BPI_c)$ Gokceoglu (1997), Sulukcu and
 $\sigma_c = 5.25(BPI_c)$ Ulusay (2001).
 Çarpan 2.9 ile 7.6 arasında değişiyor !

$K = 0.8 \times 2.266(m_i)^{0.3824}$ Sönmez ve Tunusluoglu (2008)

$\sigma_c = K \times BPI_c$ m_i : Hoek ve Brown kaya türüne bağlı sabiti



BPI deney ekipmanı (Sönmez ve Tunusluoglu, 2008'den)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Aklımızda bulunsun !..

“Many attempts have been made to handy calculation methods and simple formulation for everyday use to engineer may be provided with simple working tools. I see a danger in this: Complicated things do not become simpler through simplification at all cost. Things in geomechanics are complicated by their very nature”.

Müller (1970)

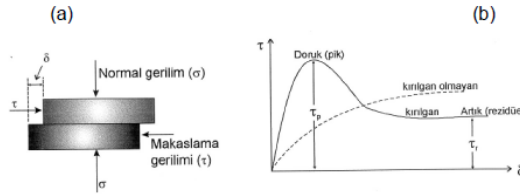
Hiçbir ampirik yaklaşım özellikle sınırlı tecrübeye sahip uygulayıcılar tarafından **TEK başına NiHAİ tasarım aracı olarak kullanılmamalıdır.**

Ampirik hesaplama araçları gerçekçi tasarım parametrelerinin seçimi için tecrübeyle harmanlanarak kullanılacak etkili pratik yaklaşımlardır.

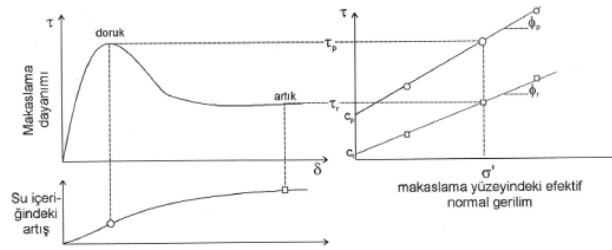
H. Sönmez

Dr. H. Sönmez –JEM719

Doruk ve Artık Makaslama Dayanımı



Şekil 3.16. (a) Makaslama uygulanan bir örnek ve (b) makaslama gerilmesi (τ) - makaslama yerdeğiştirmesi (δ) eğrisi



Şekil 3.18. Doruk (τ_p ; c_p , ϕ_p) ve artık (τ_r ; c_r , ϕ_r) makaslama koşulları için yenilme zarflarının elde edilmesi

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Doruk ve Artık Makaslama Dayanımı

Kil minerallerinin makaslama yerdeğiştirmesiyle birlikte makaslama düzlemine paralel olarak yeniden dizilmesi sonucunda artık dayanıma ulaşılır (Şekil 3.17). Artık makaslama dayanımı aşağıdaki faktörlerden etkilenir.

- Zeminin içerdiği kil miktarı (%)
- Kil boyutundaki malzemenin mineralojisi

Test No	Kil içeriği (%)	İnce kesit	Tanımlama
2	20		Makaslama zonunda ayrılma ve kil minerallerinde yönlendirme yok.
3	27		Makaslama zonunda ayrılma ve kil minerallerinde yönlendirme yok.
4	34		Makaslama zonunda ayrılma yok. İnce kesitte 1.5 mm kalınlığında ve makaslama yönüne paralel bir makaslama yüzeyi gözlemlenir.
5	40		Örnek, parlak makaslama yüzeyi ile ayrılmıştır. İnce kesitte azalığı yaklaşık 2.5 mm olan dalgalı bir makaslama yüzeyi gözlemlenir. Kil mineralleri bu zon içerisinde 0-45° açıya dizilmiştir.
6	48		Örnek, bir öncekinden daha parlak bir makaslama yüzeyine sahiptir. 0.5-2 mm kalınlığında ve kil minerallerinin yönlendiği bir zon oluşmuştur.

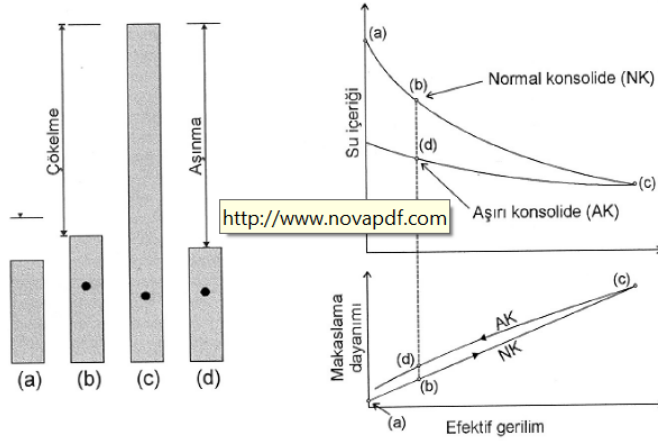
Şekil 3.17. Makaslama sırasında, kil içeriğine bağlı olarak, kil tanelerinin yönlendirilmesi (Lupini vd., 1981)

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719



Aşırı Konsolide ve Normal Konsolide Kil



Şekil 3.19. Normal ve aşırı konsolide killerde etkin (efektif) gerilmeye bağlı olarak su içeriği ve makaslama dayanımındaki değişimin karşılaştırılması (Skempton, 1985).

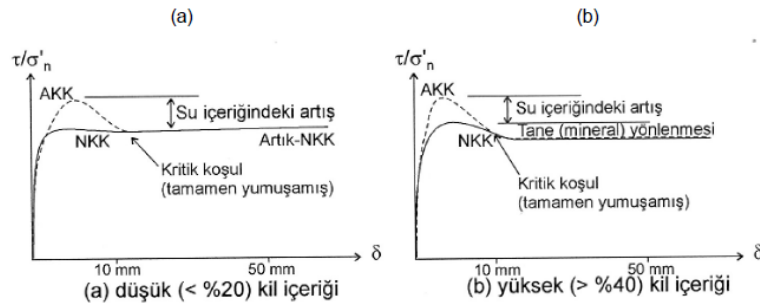
(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719



Aşırı Konsolide ve Normal Konsolide Killerin Makaslama Dayanımı

Aşırı konsolide killerde örtü yükündeki azalma su içeriğinde artışa neden olur. Ancak bu artış, konsolidasyon sürecinde zeminin kaybettiği su kadar değildir (Şekil 3.17a). Bu nedenle, aşırı konsolide killer daha sıkı bir yapıya sahiptir ($\tau_{AKK} > \tau_{NKK}$). Kil içeriği yüksek normal konsolide killerde doruk değerden sonra dayanımdaki azalmaya tanelerin yönleneşmesi neden olmaktadır. Aşırı konsolide killerde yenilme yüzeyinde su içeriğindeki artış, yüzeyi yumuşatmakta ve ani bir dayanım azalması yaratmaktadır (Şekil 3.20b).



Şekil 3.20. Normal (NKK) ve aşırı konsolide (AKK) killer için kil içeriğine bağlı olarak dayanım-deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması (Skempton, 1985).

(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

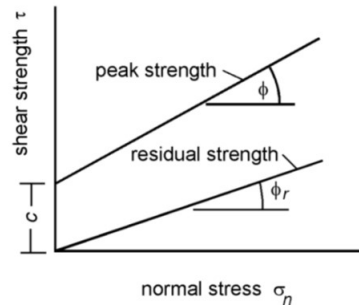
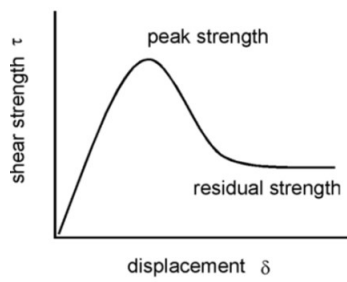
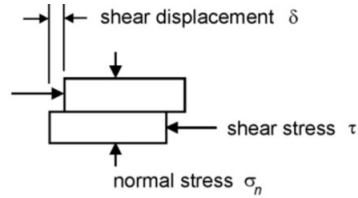
Dr. H. Sönmez –JEM719

Süreksizlik Yüzeylerinin Makaslama Dayanımı



Düz yüzeylerin makaslama dayanımı:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi$$

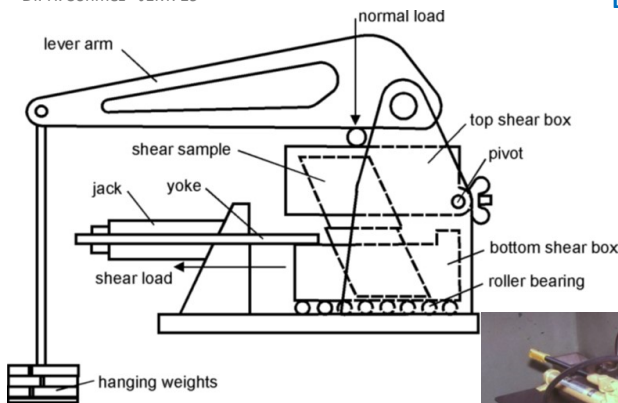


<http://www.rocsience.com>

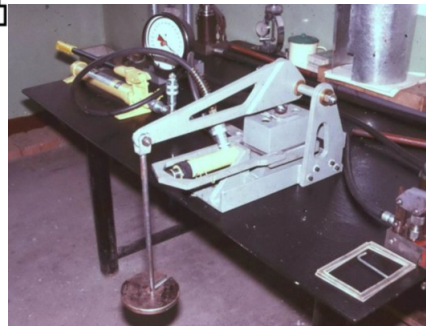
(Prof. Dr. R. Ulusay'ın JEO619 ders notlarından)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Laboratuvar deneyi



Hencher and Richards (1982, Hoek 2007'den)



Hencher and Richards (1982, Hoek 2007'den)

<http://www.rocsience.com>

Dr. H. Sönmez –JEM719

Pürüzlü yüzeylerin makaslama dayanımı:

Patton (1966) $\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$

normal stress σ_n

shear stress τ

shear strength

failure of intact rock

shearing on saw-tooth surfaces

$(\phi_b + i)$

normal stress σ_n

Patton'un dişli yüzeylere ait deneyi

Laboratuvar deneylerindeki sınırlamalar

- ✓ Örnek hazırlaması zor,
- ✓ Makaslama kutusunda örnek sabitlemesi zor
- ✓ Deney hassasiyeti düşük
- ✓ Ölçek etkisi

Yenilme zarfında süreksizlik pürüzlülüğü, yüzey dayanımı ve normal gerilmenin etkisi

?

Dr. H. Sönmez –JEM719

Süreksizlik Yüzeyinin Makaslama Dayanımına Yönelik Ampirik İlişkiler

Çok sayıda ilişki ve çalışma var !

Yaygın bilinen ve kullanılan ilişkiler

Barton (1973) $\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right)$

Barton and Choubey (1977) $\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right)$

Dr. H. Sönmez –JEM719

Barton'un ampirik yenilme ölçütü:

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i)$$

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\phi_b + JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right)$$

JCS: Eklem yüzeyinin dayanımı (Joint compressive strength)

JRC: Eklem pürüzlülük katsayısı (Joint roughness coefficient)

 ϕ_b = yapay olarak hazırlanmış düz yüzeyin içsel sürtünme açısı (makaslama deneyi)**Ölçütte doruk (peak) dayanım belirlenir****(Uzun dönem şev duraylılığı analizleri için problem !)**

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\phi_r + JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right) \quad \phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R)$$

r: ıslak ve bozunmuş yüzeydeki Schmidt geri verme sayısı

R: kuru ve taze yüzeydeki Schmidt geri verme sayısı

Dr. H. Sönmez –JEM719

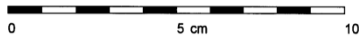
JRC'nin seçilmesi ve ölçek etkisi

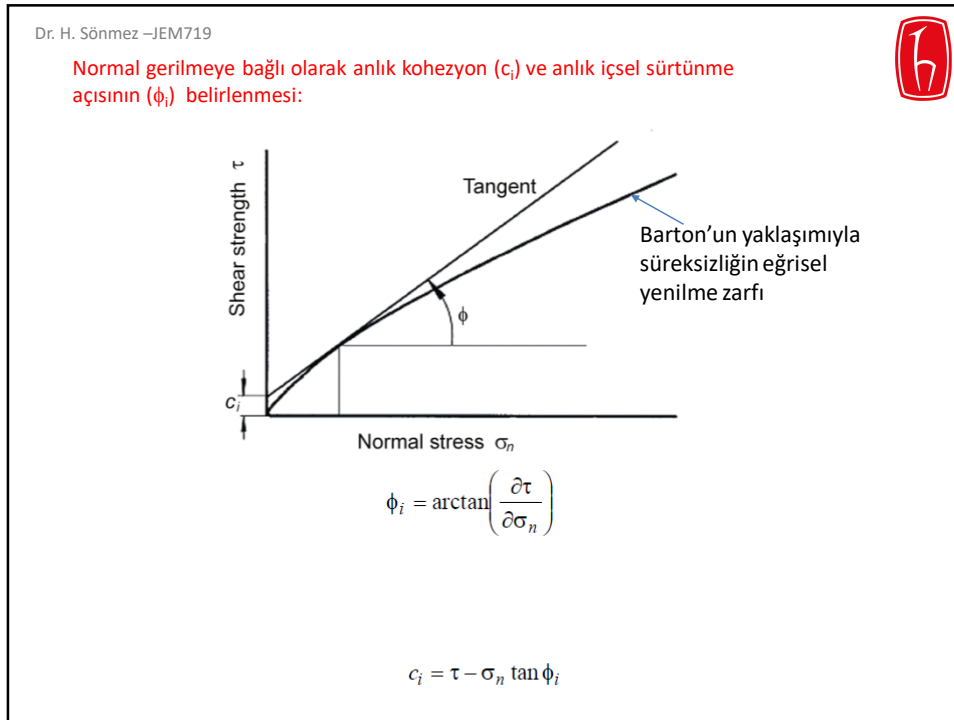
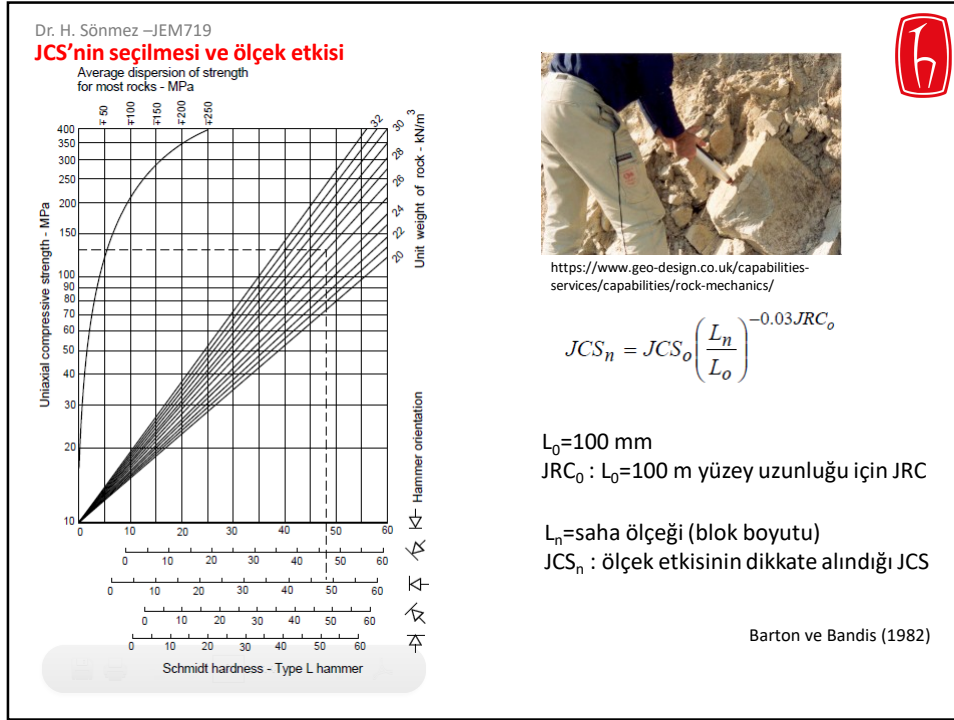
	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	JRC = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20

$$JRC_n = JRC_o \left(\frac{L_n}{L_o}\right)^{-0.02 JRC_o}$$

 $L_o = 100$ mmJRC_o : $L_o = 100$ m yüzey uzunluğu için JRC L_n =saha ölçeği (blok boyutu)JRC_n : ölçek etkisinin dikkate alındığı JRC

Barton ve Bandis (1983)





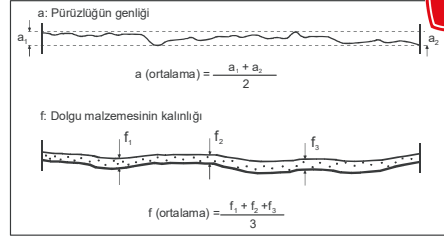
Dr. H. Sönmez –JEM719

Dolgu malzemesi ve özelliklerinin süreksizlik dayanımına etkisi

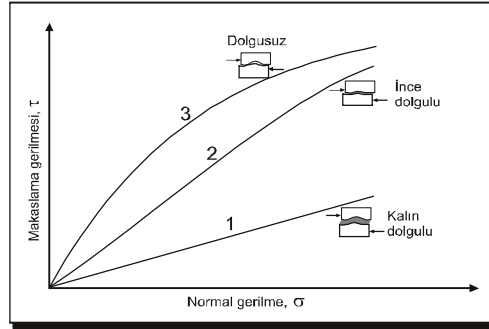
Dolgu malzemesi, süreksizliğin karşılıklı iki yüzeyinin arasını dolduran ve genellikle ana kaya malzemesinden daha zayıf olan malzemedir.

- ✓ Kalsit, kuvars ve pirit gibi yüksek dayanıma sahip mineraller (sert dolgu) hariç tutulursa, yumuşak dolgu içeren süreksizlikler dolgusuz veya pürüzlü yüzeylere oranla daha düşük makaslama dayanımına sahiptirler.
- ✓ Eğer dolgu malzemesinin kalınlığı (f) süreksizlik yüzeyinin pürüzlülüğünün genişliğinden (a) büyükse, süreksizlik yüzeyinin makaslama dayanımı dolgunun makaslama dayanımı tarafından denetlenir

Ulusay ve Sönmez (2007'den)



Şekil 2.21. (a) Dolgu malzemesinin kalınlığı ve pürüzlü süreksizlik yüzeyinin genişliği arasındaki ilişki (ISRM, 1981'den).



Şekil 2.22. Dolgu malzemesinin kalınlığının süreksizliğin makaslama dayanımına etkisi (Hoek ve Bray, 1981'den düzenlenmiştir).

Dr. H. Sönmez –JEM719

Toprak Dolgularının Dayanımı

- Toprak dolguların dayanımında etkili süreç
 - En iyi sıkışma → yüksek dayanım
 - Sıkışma (kompaksiyon) arttıkça dayanım artar
 - Optimum su içeriği ve yüksek sıkışma enerjisi → en iyi sıkışma (Proktor çekici deneyi)
 - Proktor çekici ile elde edilen değerlerinden (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık) hareketle sahadaki uygulamada başarısı yerindeki maksimum kuru yoğunlukla kontrol edilmeli yerindeki

1. Mümkün olması durumunda Yerinde dolgu zeminden örselenmemiş örnek alınarak makaslama deneyi yapılması
2. Dolgu zeminin yerindeki koşullara (kuru birim hacim ağırlık en belirleyici referans değerdir) sahip yeniden kalıplanmış (remoulded) örnek üzerinde makaslama deneyi yapılması
3. Henüz imalat yapılmamış ise proktor deneyi sonucuna göre dolguda kullanılacak malzemeyle uygulamaya yönelik optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunlunun sağlandığı yeniden kalıplanmış (remoulded) örnek üzerinde makaslama deneyi yapılması

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı

- Kaya dolgu barajlar
- Yol dolguları
- Tumba (pasa) dökümleri
- Vb.

Mühendislik uygulamalarında kaya dolgularının kullanıldığı en tipik ve önemli mühendislik projeleridir.



Temsil edici örnekleme ve laboratuvar deneylerinin uygulanabilirliği sınırlı !



Saha deneyleri zor ve pahalı (sonuçların temsil ediciliği ?)

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

- Kaya dökümlerinin dayanımlarının belirlenmesine yönelik yöntem veya yaklaşımın yer aldığı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Leps, 1970; Sönmez ve Ulusay, 1999; Barton, 2008)
- Sönmez ve Ulusay (1999) Hoek ve Brown yenilme ölçütünün tümüyle örselenmiş kaya kütlesi koşulunu dikkate alarak tumba duraysızlığının geriye dönük analizini yapmışlardır. Ancak bu yaklaşımın sadece bir vakaya uygulanmış olması genellemeye yönelik kapasitesini düşürmektedir.

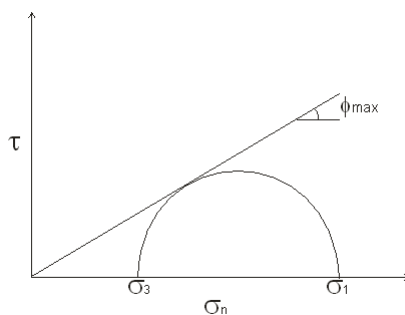
Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

Kaya Dolgularının Genel Dayanım Davranışı

Herhangi bir yanıl basınç (σ_3) düzeyinde silindirik şekilli örneğe uygulanan üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi ile yenilme anında belirlenen σ_1 çifti kullanılarak elde edilen mohr çemberine orijinden çizilen teğetle belirlenen en büyük teğet içsel sürtünme açısı (ϕ_{max} veya ϕ_{sec}) aşağıdaki kohezyonsuz ilişkilerle ifade edilir.



$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_{max})$$

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right) = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_{max}}{2}\right)$$

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

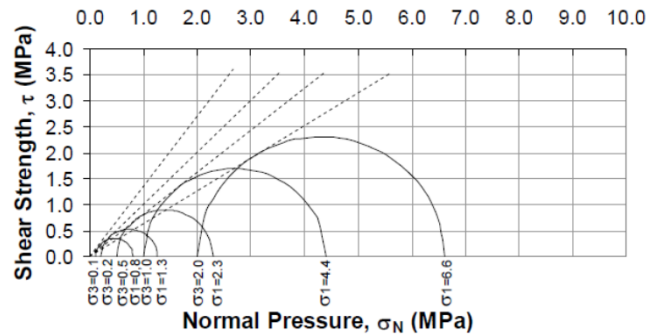
- Kaya dolgu barajlardaki gövde dolgusu ve kaya yığınlarının dayanım zarflarının belirlenmesine yönelik çalışmalarda **makaslama dayanımı davranışının eğrisel olarak şekillendiği** sıklıkla vurgulanmaktadır.
- Bu belirlemeye yönelik olarak 109 adet büyük çaplı örnek üzerinde yapılan üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarıyla Leps (1970) tarafından önerilen normal gerilme (σ_n) ve ϕ_{max} eğrisel ilişkisiyle bu araştırma literatürde konuya yönelik referans bir çalışma olarak yer almıştır.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

Daha güncel dönemde Linero vd. (2007) porfirik kaya malzemesi ve granodiorit kaya malzemesinden oluşan Andina kaya dolgusu dökümlerine ait örnekler üzerinde yaptıkları büyük çaplı üç eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarıyla:



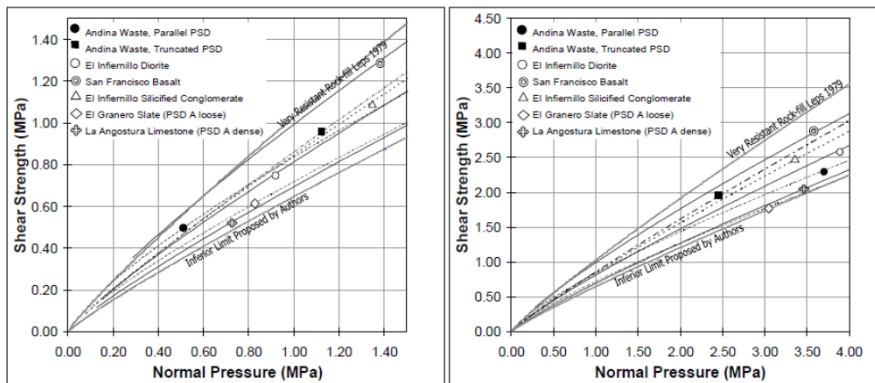
Farklı yanal basınç düzeylerine ait üç eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarının mohr çemberleri (Linero vd., 2007)

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

Linero vd. (2007)



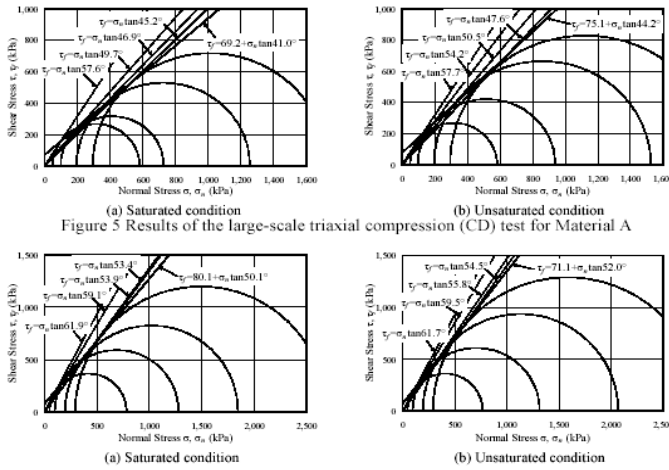
Andina kaya dolgu malzemesinin doğrusal olmayan yenilme zarfı davranışı ve diğer bazı çalışmalarda belirlenen yenilme zarflarıyla karşılaştırılması

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)



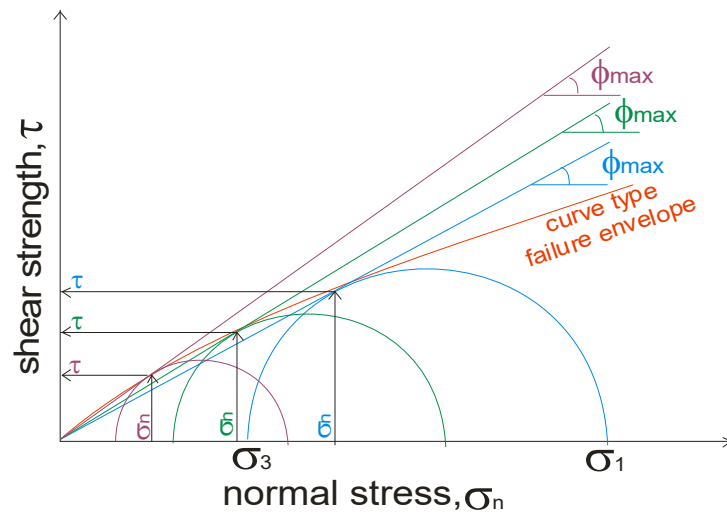
İki farklı kaya örneğine ait örnekler üzerinde uyguladıkları üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonuçlarıyla Yamguchi vd. (2009) tarafından da kaya dolguları için eğrisel yenilme zarfı bulgusu yine desteklenmektedir.



Kaya bloklarının yığılmasına bağlı olarak blok ile blok kontağı arasında düşük yanıl basınç (veya normal gerilme) altında çekilme dayanımı olmayacağı kabulüyle araştırmacılar yaygın bir şekilde bu eğrisel yenilme zarfını orijinden geçen $\tau=A(\sigma_n)^b$ şeklindeki eşitliklerle tanımlamaya çalışmışlardır.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)



Normal gerilme ve ϕ_{max} yaklaşımına bağlı olarak eğrisel yenilme zarfı davranışının şematik gösterimi

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

Barton (2008) kaya yığınlarının dayanımlarının belirlenmesine yönelik aşağıdaki belirlemeleri dikkat çekicidir.

- ✓ Kaya eklemeleri, kaya dolguları (dökümleri) kaya yüzeyleri ile kaya dolguları arasındaki sınırların dayanımlarının belirlenmesinde kaya bloklarının “noktasal teması” etkili olmaktadır.
- ✓ En önemli jeoteknik sonuç kaya dolgularının dayanımlarının artan gerilme düzeyine bağlı olarak eğrisel olmalarıdır.
- ✓ Bu nedenle, farklı yükseklikteki aynı açıya sahip kaya dolgu şevleri farklı güvenlik katsayısına sahiptirler.

Yukarıdaki belirlemelerden de anlaşılacağı üzere kaya dolguları olarak tanımlanabilecek tumba yığınlarının da dayanım zarflarının eğrisel davranışının kullanılmasının tasarıma yönelik hesaplamalarda daha gerçekçi olacağını göstermektedir.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

• Leps (1970)'in Eğrisel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı

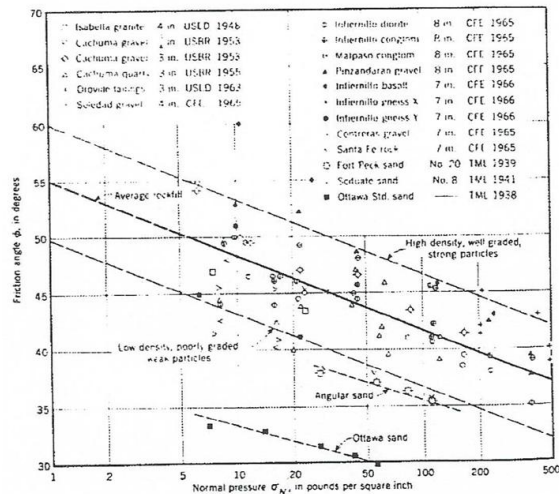
Leps (1970) oluşturduğu veri tabanındaki üç eksenli sıkışma dayanımı deney sonuçlarını kullanarak normal gerilmenin logaritması $\log(\sigma_n)$ ile en büyük içsel sürtünme açısı (ϕ_{max}) arasında verilerin dağılım aralığının bir zon içerisinde dizildiğini belirlemiştir

$$\phi_{max} = 50^\circ - 7 \log(\sigma_n) \quad (\text{alt sınır})$$

$$\phi_{max} = 55^\circ - 7 \log(\sigma_n) \quad (\text{ortalama})$$

$$\phi_{max} = 60^\circ - 7 \log(\sigma_n) \quad (\text{üst sınır})$$

$\sigma_n \rightarrow$ PSI (pounds per square inch)

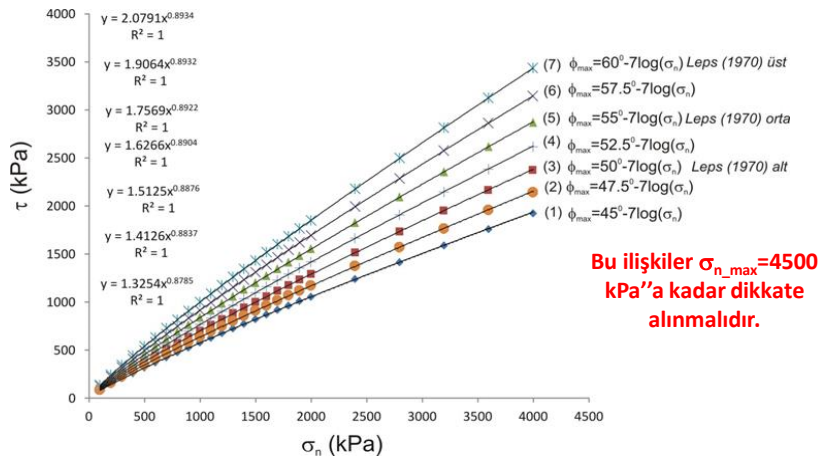


Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

• Leps (1970)'in Eğrisel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı



Leps (1970)'in f_{max} şeklinde önerdiği ilişkilerin bazı ilave ara eğrisel ilişkilerle birlikte σ_n - τ dayanım zarfındaki $\tau = A(\sigma_n)^B$ şeklindeki ifadeleri

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

• Leps (1970)'in Eğrisel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı

Leps (1970)'in önerdiği yaklaşımın kullanımına ilişkin yorumlamalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ✓ Kaya dolgularının makaslama dayanımı normal gerilmenin fonksiyonu olarak içsel sürtünme açısıyla tanımlanmaktadır.
- ✓ 10 psi (~60 kPa) değerinden daha düşük normal gerilme düzeylerinde, içsel sürtünme açısı 45° 'den 60° 'ye değişmekte olup, kaliteli temiz ve serbest dökülmüş kaya yığınları için 50° düzeylerinde beklenebilir.
- ✓ İyi sıkıştırma durumunda içsel sürtünme açısı 55° düzeylerinde beklenebilir.
- ✓ Düşük normal gerilme düzeylerinde (10 psi'den düşük düzeylerde) pratikte olmayacak yüksek içsel sürtünme açısı değerlerinden kaçınmak için 50 kPa'den düşük normal gerilme düzeyleri için 50 kPa için belirlenen içsel sürtünme açısı kullanılabilir.

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

• Barton (2008)'in Eğirsel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı

Yaklaşım Barton süreksizlik yüzeylerinin makaslama dayanımı için önerdiği ampirik yaklaşımı temel alıyor.

- ✓ Bu amaçla JCS'yle (eklem yüzey dayanımı) benzer bir biçimde kaya parçaları için "S" parametresini tanımlayarak eklem yüzeyleri için (1) no.lu eşitlikle tanımlanan ölçütü kaya dolgu dayanımlarına yönelik olarak (2) no.lu eşitlikle ifade etmiştir.

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log(JCS/\sigma_n) + \phi_r) \quad (\text{eklemler için}) \quad (1)$$

Burada σ_n normal gerilme düzeyi, JRC eklem pürüzlülük katsayısı, JCS eklem yüzeyi sıkışma dayanımı, ϕ_r eklem yüzeyinin artık sürtünme açısı.

$$\tau = \sigma_n \tan(R \log(S/\sigma_n) + \phi_r) \quad (\text{kaya dolguları için}) \quad (2)$$

Burada σ_n normal gerilme düzeyi, R kaya parçalarının eşdeğer pürüzlülüğü, S kaya parçalarının dayanımı, ϕ_r eklem yüzeyinin artık sürtünme açısı (patlatılmış temiz kaya parçaları için ϕ_b kullanılabilir).

Dr. H. Sönmez –JEM719



Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)

• Barton (2008)'in Eğirsel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı

R → Eşdeğer pürüzlülüğün belirlenmesi

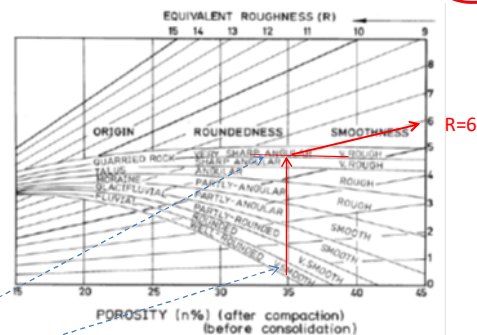
Örnek:

- 1) Quarried Rock (kazılmış kaya), Very Sharp Angular (çok keskin köşeli) ve Very Rough (çok pürüzlü) (QR-VSA-VR)
- 2) Porozite (n, %): %35

R=6

Barton (2008) "Kompakte edilmemiş yüksek poroziteye sahip madencilik kaya dökümleri → R= 5 ile 7 arasında"

(Barton and Kjarnesli, 1981; from Barton 2008)



EXAMPLES SHOWING DEGREE OF ROUNDEDNESS				
QUARRIED ROCK	TALUS	MORaine	GLACIFLUVIAL MATERIAL	FLUVIAL MATERIAL

Dr. H. Sönmez –JEM719

Kaya Dolgularının Dayanımı (devam ediyor)



- **Barton (2008)'in Eğrisel Makaslama Dayanımı Yaklaşımı**

S → belirlenmesi

Örneğin:

10 cm parça boyutu için

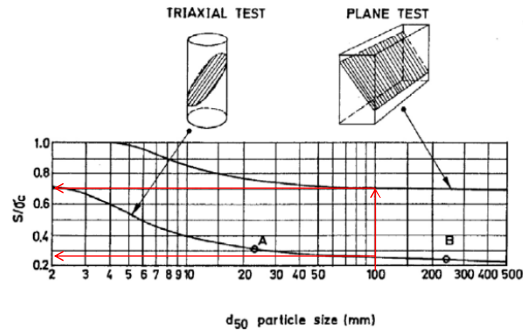
Üç eksenli test → $S/\sigma_c=0.25$

Düzlemsel test → $S/\sigma_c=0.7$

$\sigma_c=20$ MPa

S = 5 (üç eksenli test)

S = 14 (düzlemsel test)



Parça boyutu ve makaslama tipine göre S/σ_c ampirik ilişkisi (Barton, 2008).

Dr. H. Sönmez –JEM719

Makaslama Dayanımının Belirlendiği Deney Türleri



Şev duraylılığı analizlerinin en kritik girdi bileşeni makaslama dayanımıdır. Ancak makaslama dayanımı özellikle toprak ve benzeri malzemelerde drenaja ve konsolidasyona bağlı olarak farklılıklar sunabilir.

Önemli olan sahadaki koşulların laboratuvarında benzeştirildiği deneysel çalışmalarla elde edilen makaslama yenilme zarfının analizlere yansıtılmasıdır.

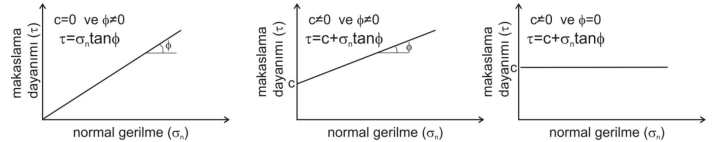
Örneğin 1 kaç ay gibi kısa süre açık kalacak bir şevin analizi ile uzun dönem yıllarca işletmede kalması gereken bir otoyolun yanındaki şevin duraylılık değerlendirmelerinde aynı makaslama zarfının kullanılamayacağı açıktır.

Dr. H. Sönmez –JEM719

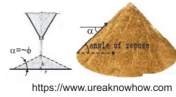


1. Toprak ve benzer jeolojik malzemelerde yapılan deney türleri:

- ✓ Deneysel çalışmalarda ASTM (Amerikan Standartları) veya BSI (İngiliz standartları) tarafından önerilen yöntemler takip edilmelidir.
- ✓ Temel olarak bu tür zeminlerin makaslama dayanımına geçmeden önce → özel zemin davranışlarına ilişkin makaslama dayanımı zarfları



- * Kuru kum (kil yok!)
- * Dik kazı (eğim) yapılamaz !



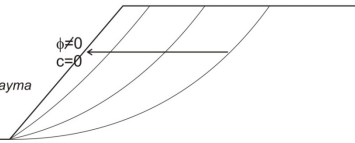
<https://www.ureaknowhow.com>

- * Killi-kum-silt (kil var!)
- * Dik kazı (eğim) dayanımına göre belirli bir yüksekliğe kadar mümkün !



- * saf suya doymuş kil (drenajsız)
- * Dik kazı (eğim) dayanımına göre belirli bir yüksekliğe kadar mümkün !

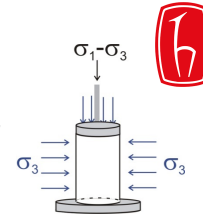
kohezif olmayan malzemede
yeilme yüzeyi gelişmez veya
şev yüzeyine oldukça yakın kayma
yüzeyleri boyunca akmalarda
şeklinde yeilme gözlenir.



Dr. H. Sönmez –JEM719

Üç eksenli sıkışma dayanımı

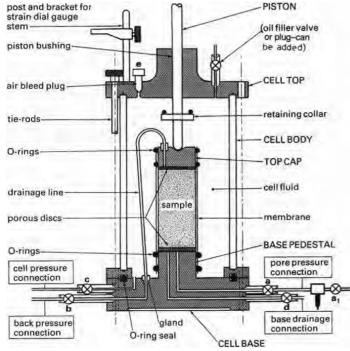
- ✓ Bu deneyde sadece doruk (peak) dayanım belirlenir, rezidüel (artık) dayanım belirlenemez.
- ✓ Deneyin üç türlü uygulanması söz konusudur.



- Drenajsız-konsolidasyonsuz deney (Undrained-Unconsolidated, UU): Bu deney sırasında örneğin drenajına müsaade edilmez ve örnek hücreye yerleştirilir yerleştirilmez deney uygulanır (konsolidasyona da müsaade edilmez). Bu nedenle bu deneye hızlı deney denir.
- Konsolidasyonlu-Drenajsız deney (Consolidated-Undrained, CU): Bu deneyin uygulanışında örneğin belirli bir çevre basıncı altında konsolide olması için beklenir ancak deney sırasında drenaja izin verilmez (üç eksenli deney donanımı uygun olması durumunda gözenek suyu basıncı da ölçülerek dolaylı bir şekilde drenajlı makaslama parametreleri de hesaplanabilir)
- Konsolidasyonlu-Drenajlı deney (Consolidated-Drained, CD): bu deneyde örneğin konsolidasyonuna ve drenajına müsaade edilir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

Üç eksenli deney düzeneği ve deneylere yönelik youtube'dan bir VIDEO linki



<https://www.whittlespublishing.com>

<http://www.utest.com.tr/en/23141/Triaxial-UU-CU-CD-Test-Systems>

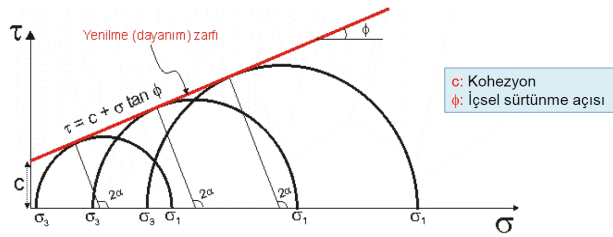
Youtube'da deneyin uygulamasına ilişkin güzel bir video linki



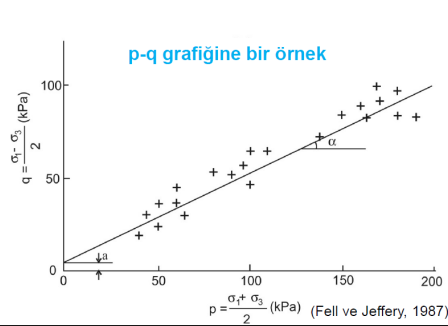
https://www.youtube.com/watch?v=mUijZald_K8 (UTEST Triaxial Test System UU-CU-CD)

Dr. H. Sönmez –JEM719

σ_1 ve σ_3 veri çiftlerinden doğrusal yenilme zarfının elde edilmesi



Çok sayıda Mohr çemberine teğet çiziminde olası hatayı ortadan kaldırmak için p-q grafiği yöntemi kullanılır.



p - q grafiğinden yararlanarak

Maksilama dayanımı parametreleri:

$$\phi = \sin^{-1}(\tan \alpha)$$

$$c = \frac{a}{\cos \phi}$$

Prof. Dr. E. Tuncay'ın kaya mekaniği ders notlarından düzenlenmiştir.

Dr. H. Sönmez –JEM719

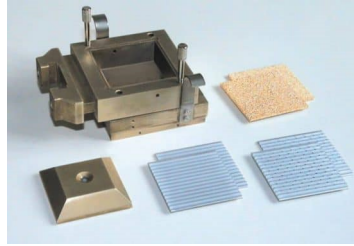
Deformasyon kontrollü doğrudan (direct) makaslama deneyi



CD deneyin uygulanması ve özellikle artık (rezidüel) parametrelerin elde edilebilmesi yönüyle avantajlı. Deneydeki mekanizma (bir yüzeyin makaslanması) şev duraysızlığının gelişimindeki kayma yüzeyi ile benzeşimi nedeniyle özellikle uzun dönem şev duraylılığı değerlendirmelerinin en önemli veri kaynağıdır.

Drejanın gelişimi makaslama hızı ve özellikle geçirimsizlik (kil içeriği ve türü) ile yakın ilişkili olup, bazı kil örnekleri için CD deneyin hafta mertebesindeki sürelerle gereksinim olabilir.

<https://theconstructor.org/geotechnical/shear-strength-soil-direct-shear-test/3112/>



Doğrudan makaslama deney videosu

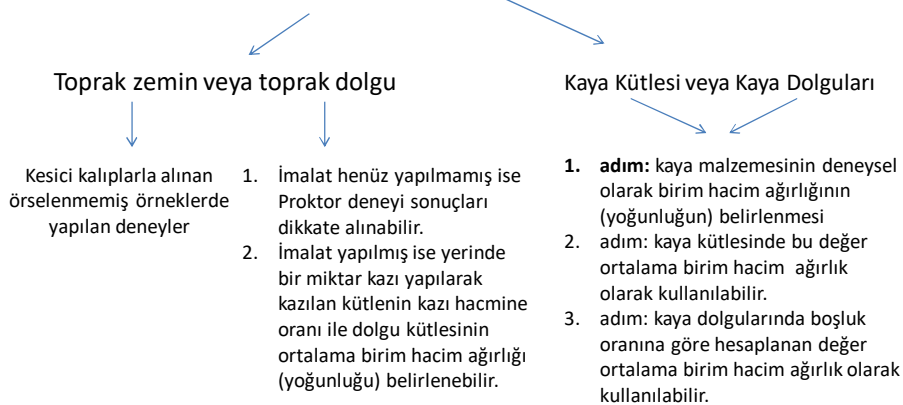
<https://www.youtube.com/watch?v=L1fWPypBP0g> (Carleton University - CIVE 3208 Lab 6: Direct Shear Test)

Dr. H. Sönmez –JEM719

Diğer Parametreler



Birim Hacim Ağırlık (veya yoğunluk)



Şev duraylılığı analizlerinde kesite aktarılan her farklı jeolojik birim için ortalama birim hacim ağırlık olarak kullanılır.

Dr. H. Sönmez –JEM719



DİĞER PARAMETRELER (devam ediyor)

Deformasyon Parametreleri (E ve ν)

Şevlerin sonlu elemanlar (FEM) gibi sayısal analizlerinde gereksinim duyulan parametrelerdir.

Toprak zeminler de deneysel çalışmaların yanı sıra aşağıda farklı toprak zemin türleri için tipik değerler görülmektedir.

Type of soil	Modulus of elasticity, E_s (MN/m ²)	Poisson's ratio, μ_s
Loose sand	10–25	0.20–0.40
Medium dense sand	15–30	0.25–0.40
Dense sand	35–55	0.30–0.45
Silty sand	10–20	0.20–0.40
Sand and gravel	70–170	0.15–0.35
Soft clay	4–20	
Medium clay	20–40	0.20–0.50
Stiff clay	40–100	

<https://structville.com/2017/06/solved-example-on-elastic-settlement-of-shallow-foundations.html>

Dr. H. Sönmez –JEM719



DİĞER PARAMETRELER (devam ediyor)

Deformasyon Parametreleri (E ve ν)

Kaya Kütlelerinde yerinde deneysel çalışmalarla belirlenebildiği gibi uygulama pratiğinde ampirik ilişkilere de belirlenebilmektedir. Bazı ampirik ilişkiler aşağıda sunulmuştur.

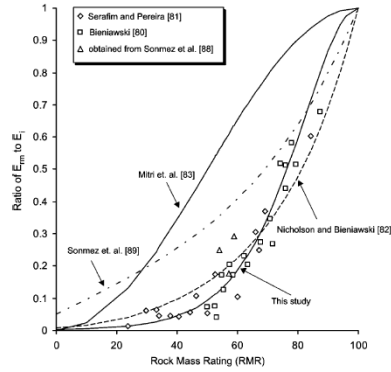
Table 1
Data and fitted equations for estimation of rock mass modulus plotted in Fig. 1

●	Field data	Serafim and Pereira [4]
◆	Field data	Bieniawski [5]
■	Field data	Stephens and Banks [6]
1	$E_{rm} = 2RMR - 100$	Bieniawski [5]
2	$E_{rm} = 10^{(RMR-10)/40}$	Serafim and Pereira [4]
3	$E_{rm} = E_i/100(0.0028RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22.82))$, $E_i = 50$ GPa	Nicholson and Bieniawski [12]
4	$E_{rm} = E_i(0.5(1 - \cos(\pi RMR/100)))$, $E_i = 50$ GPa	Mitri et al [9]
5	$E_{rm} = 0.1(RMR/10)^3$	Read et al. [7]
6	$E_{rm} = 10Q_c^{1/3}$ where $Q_c = Q\sigma_{ci}/100$, $\sigma_{ci} = 100$ MPa	Barton [8]
7	$E_{rm} = (1 - D/2)\sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{(RMR-10)/40}$, $D = 0$, $\sigma_{ci} = 100$ MPa	Hoek et al. [13]
8	$E_{rm} = E_i(s^*)^{0.4}$, $E_i = 50$ GPa, $s = \exp((GSI - 100)/9)$, $a = 1/2 + 1/6(\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3))$, $GSI = RMR$	Sonmez et al. [10]
9	$E_{rm} = E_i s^{1/4}$, $E_i = 50$ GPa, $s = \exp((GSI - 100)/9)$	Carvalho [11]
10	$E_{rm} = 7(\pm 3)\sqrt{Q}$, $Q = 10(RMR - 44)/21$	Diederichs and Kaiser [14]

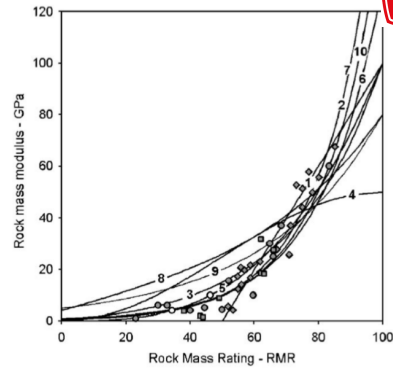
(E. Hoek, M.S. Diederichs, 2006'dan)

Dr. H. Sönmez –JEM719

(Sonmez vd., 2006)



(E. Hoek, M.S. Diederichs, 2006)



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

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad (\text{E. Hoek, M.S. Diederichs, 2006})$$

$$E_{rm}(\text{MPa}) = 100,000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right) \quad (\text{E. Hoek, M.S. Diederichs, 2006})$$