

17. KAYA KÜTLESİ SINIFLAMA SİSTEMLERİ

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, ampirik tasarım yaklaşımlarının temel esasıdır ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bugün, açılmakta olan tünellerin bir çoğunda sınıflama sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bunlardan en tanınmış ve kullanılanı bundan 40 sene önce ortaya atılan Terzaghi (1946) sınıflamasıdır. Bu sınıflama geçmişte de yüzlerce tünelin tamamlanmasında başarı ile kullanılmıştır.

Terzaghi sınıflaması daha sonra Deere ve diğ. (1970) tarafından geliştirilmiştir. Ayrıca yapılan bir çok yeni sınıflama sistemleri çeşitli projelerde uygulanmıştır. Terzaghi sınıflamasında önerdiği çelik tahkimata karşılık, yeni sistemler, günümüzde kullanılan kaya saplaması ve püskürtme beton gibi tahkimat elemanları önerilerini getirmiştir. Yeni sınıflama sistemleri, yalnız tünellerde değil, büyük yeraltı boşlukları, şevler ve temellerin tasarımı gibi değişik mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Günümüzdeki önemli sınıflama sistemleri ve uygulama alanları aşağıdaki Çizelge 17.1 de verilmiştir.

Çizelge 17.1. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri ve uygulama alanları

Sınıflama sistemi	Öneren	Ülke	Uygulama yeri
1.Kaya yükü	Terzaghi, 1946	ABD	Tünel, çelik iksa
2.Tahkimatsız durma süresi	Lauffer, 1958	Avusturya	Tünel
3.Yeni Avusturya Tunel Yöntemi (NATM)	Pacher ve diğ. 1964	Avusturya	Tünel
4.Kaya kalite katsayısıRQD	Deere and Miller, 1966	ABD	Karot tanımı, tünel
5.Kaya Yapısı Değeri, RSR	Wickham ve dğ., 1972	ABD	Tünel
6 Rock Mass Rating, RMR	Bieniawski, 1973	G. Afrika, ABD	Tünel, maden, kömür
7.Q-Sistemi	Barton ve diğ., 1974	Norveç	Tünel, maden, yeraltı boşluk
8.Temel geoteknik tanıml.	ISRM, 1981	Uluslararası	Genel
9. Birleşik sınıflama	Williamson, 1984	USA	Genel

17.1 Sınıflama sisteminde kullanılan değişkenler

Sınıflama sistemlerinin bir çoğunda aőaęıda belirtilen değişkenler kullanılmaktadır:

1. Tek eksenli basma dayanımı
2. Kaya kalite katsayısı RQD
3. Süreksizliklerin:
 - a- Aralığı
 - b- Durumu (pürüzlülük, devamlılık, açıklık, dolgu maddesi v.b. gibi)
 - c- Konumu (doğrultu ve eğimi)
4. Yeraltı suyu durumu
5. Çevre etkileri
 - a- Gerilmeler
 - b- Kazı türü
 - c- Ana süreksizlik düzlemlerinin etkisi

17.2. Kaya Kütlesi Oranı (RMR-Rock Mass Rating)

Jeomekanik kaya kütle sınıflaması olarak da bilinen sistem, ilk defa Bienawski (1973) tarafından geliştirilmiş ve 1974, 1979 ve son olarak da 1989'da değişikliklere uğramıştır. Sistemin uygulanmasında, proje alanındaki kaya kütlesi yapısal alt birimlere ayrılır ve birimle ayrı değerlendirilir. Çizelge 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 ve 17.6 da sınıflamada kullanılan değişkenlerin sınır değerleri ve tanımlamaları verilmiştir. Kaya kütlesinde hesaplanan RMR puanı ve kazı açıklığına göre tünel desteksiz ayakta kalma süresi ilişkisi Şekil 17.1'de verilmiştir. Düz tavanlı yeraltı açıklıklarında destek basıncını hesaplamak için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir (Unal, 1983)

$$P_v = [(100-RMR)/100].g.B \quad (17.1)$$

(B-tünel genişliği, γ -kayacın birim hacim ağırlığı)

Çizelge 17.2. Sınıflama değişkenleri ve puanlamaları

1	Kayaç dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Düşük aralık		
		Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Puan	20	17	13	8	3			
3	Süreksizlik aralığı (m)	>2	0.6-2.0	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06			
	Puan	20	15	10	8	5			
4	Süreksizlik durumu	Çok kaba yüzey Sürekli değil Ayrılmaz Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Ayrıma <1mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzey Ayrıma <1mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünmeli yüzeyler, fay dolgulu <5mm, 1-5mm açıklıklı ve sürekli eklem	Yumuşak fay dolgusu >5mm kalınlıkta veya açık eklem >5mm devamlı süreksizlik			
		Puan	30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu durumu	Tünelde ilk 10m den gelen su	Yok	10 l/dk	<25 l/dk	25-125 l/dk	>125 l/dk		
		Eklemde su basıncı	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		En büyük asal gerilme							
		Genel durum	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su gelişi		
Puan	15	10	7	4	0				

Çizelge 4. Tünellerde Süreksizlik durumunun etkisi

Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Eğim 0°-20° arasında (doğrultudan bağımsız)
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı ilerleme		Eğim 45°-90°	Eğim 45°-90°	
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°			
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta
0	-2	-5	-10	-10	-12	-5

Çizelge 5. Süreksizlik durumuna göre düzeltme

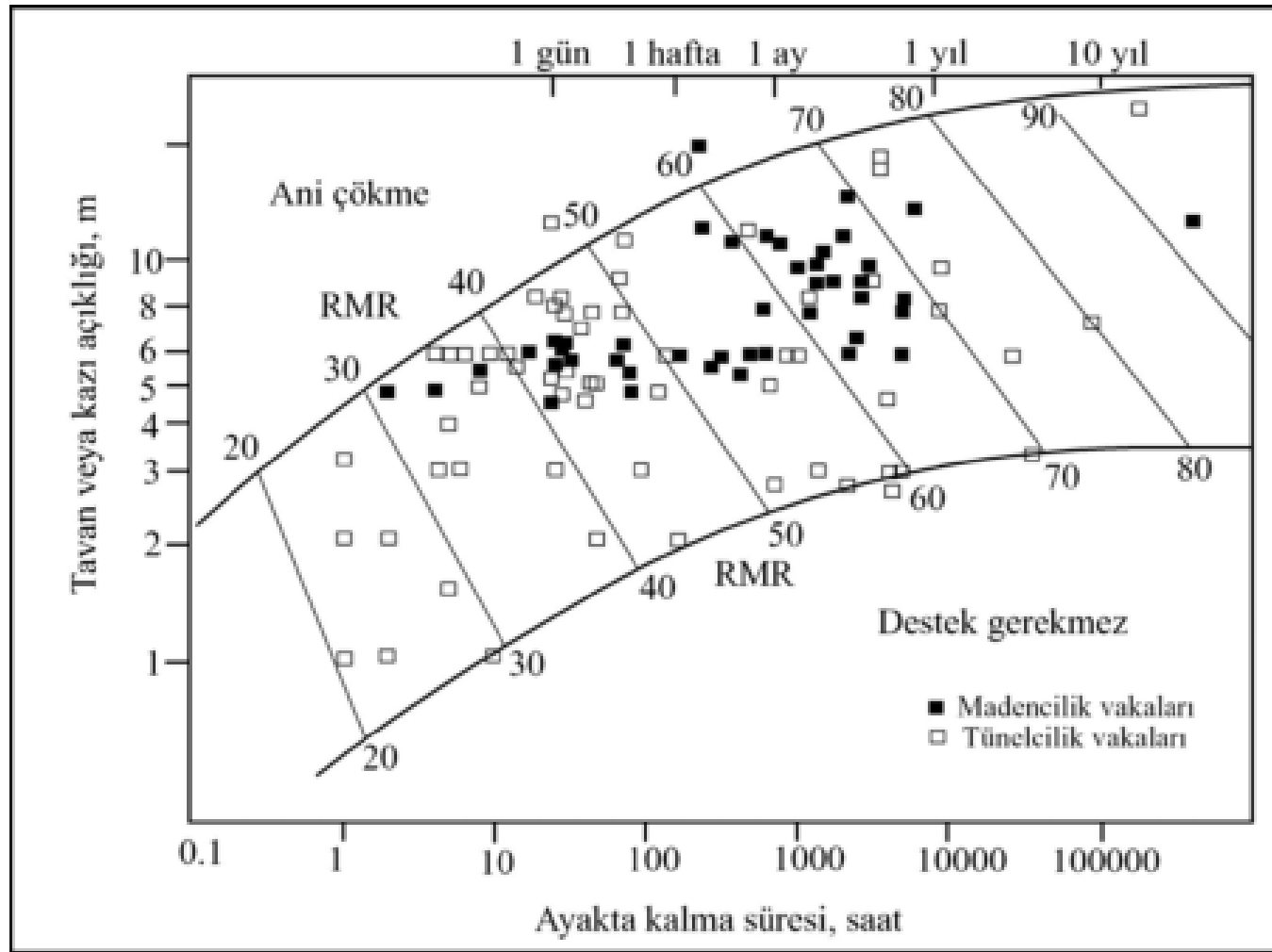
Doğrultu, eğim		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tünel	0	-2	-5	-10	-12
	Temel	0	-2	-7	-15	-25
	Şev	0	-5	-25	-50	-60

Çizelge 6. Kaya sınıf ve puanları

Sınıf	I	II	III	IV	V
Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Puan	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20

Çizelge 7. Kaya kütle sınırlarının anlamları

Sınıf	I	II	III	IV	V
İksasızgöçmeden durma süresi	15 m açıklık için 10 yıl	8 m açıklık için 6 ay	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 saat	0.1 m açıklık için 30 dk
Kaya kütlesi kohezyonu	>400 kPa	300-400 kPa	250-300 kPa	100-200 kPa	<100 kPa
Kaya kütlesi,φ	<45	35-45	25-35	15-25	<15



Şekil 2.RMR puanına göre tavan açıklığı ve desteksiz ayakta kalma süresi

3. Q (NGI) Kaya Kütle Sınıflaması

Q sistemi Norveç Jeoteknik Enstitüsü'nde Barton vd (1974) tarafından geliştirilmiştir. İskandinavya'da yaklaşık 200 ayrı tünel çalışmaları sonucunda oluşturulan sistem niceliksel olup, iksa tasarımına yöneliktir. 1993 ve 2002 yılında değişikliklere uğramıştır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad \text{bağıntısı ile hesaplanmaktadır.} \quad (3)$$

RQD : Kaya kalite göstergesi

J_n : Eklem takımı sayısı

J_r : Eklem pürüzlülük durumu

J_a : Eklem ayrışma durumu

J_w : Eklemde su azaltma faktörü

SRF : Gerilme indirgeme faktörü olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 9. RQD değer aralıkları ve puanları

I.Kaya tanımı	RQD,%	Notlar
A: Çok düşük	0-25	1. $0 < RQD < 10$ olursa hesaplamada pratik olarak 10 alınır
B: Düşük	25-50	
C: Orta	50-75	
D: İyi	75-90	
E: Çok iyi	90-100	

Çizelge 10. Eklem takımı sayısı puanları ve tanımları

2. Eklem takımı sayısı	J_n	Notlar
A: Masif hiç veya birkaç eklem	0.5-1.0	Kesişmede ($3 \times J_n$) Portalda ($2 \times J_n$) alınır.
B: Bir eklem takımı	2	
C: Bir eklem takımı, düzensiz eklemler	3	
D: İki eklem takımı	4	
E: İki eklem takımı, düzensiz eklemler	6	
F: Üç eklem takımı	9	
G: Üç eklem takımı, düzensiz eklemler	12	
H: Dört veya fazla eklem takımı, düzensiz çok eklemler	15	
J: Tamamen ufalanmış kaya, zemin gibi	20	

Çizelge 11. Eklem pürüzlülüğü sayısı puanları ve tanımları

3. Eklem pürüzlülüğü	J_r	Notlar
(a) Eklem yüzeyleri temasta veya (b) Temasın 10 cm'den az bir makaslama ile sağlanması		Ortalama eklem aralığı 3m'den fazla ise değerlere 1 eklenmelidir Makaslama izleri olan düzlemsel cilalı eklemlerde J_r değeri 1.5 alınabilir
A: Süreksiz eklemler	4	
B: Dalgalı-pürüzlü	3	
C: Dalgalı-düz	2	
D: Dalgalı-cilalı	1.5	
E: Düzlemsel-pürüzlü	1.5	
F Düzlemsel-düz	1.0	
G: Düzlemsel-cilalı	0.5	
(c) Makaslama duvarla temas yok		
H: Kaya duvarı temasını önleyecek kalınlıkta kil mineralli zon	1.0	
I: Kaya duvarı temasını önleyecek kalınlıkta kumlu, çakıllı veya ezilme zonu	1.0	

Not : Dalgalı, düzlemsel tanımları eklem en az 2m'lik uzunluğu boyunca olan genel yapısını; pürüzlü, düz, cilalı kavramları yüzeyi daha küçük ölçekte tanımlar.

Çizelge 12. Eklem ayrışma sayısı puanları ve tanımları

4. Eklem ayrışma sayısı	J_a	Yaklaşık ϕ (°)
<i>(a) Kaya yüzeyi ile temasta (mineral dolgu yok, sadece sıvama)</i>		
A: Temas yüzeyi sert dolgu halinde	0.75	-
B: Eklem cidarı ayrılmamış, yüzeysel lekeler var	1.0	25-35
C: Eklem cidarları az ayrılmış, yumuşamayan tipte kumlu parçacıklar, kilsiz ayrılmış kaya, vb	2.0	25-30
D: Siltli ve kumlu, killi sıvama, az miktarda yumuşamayan tipte killi malzeme	3.0	20-25
E: Yumuşayabilen, düşük sürtünmeli kil mineralli sıvama, kaolinit, talk, grafit vb az miktarda şişen kil (sıvama süresiz, kalınlığı 1-2 mm' den az olunca)	4.0	8-10
<i>(b) Temas 10 cm bir makaslama ile sağlanması (ince mineral dolgu)</i>		
F: Kumlu parçalar, kilsiz ayrılmış kaya vb	4.0	25-30
G: Yüksek derecede aşırı konsolide yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	6.0	16-24
H: Orta veya az derecede aşırı konsolide kil, yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	8.0	12-16
J: Şişen killi dolgu, montmorillonit vb (5 mm'den ince, sürekli), Ja, şişen malzeme yüzdesine göre ve temas şartlarına göre değişir	8.0-12.0	6-12
<i>(c) Makaslama duvarla temas yok</i>		
K: Ayrılmış veya ezilmiş	6.0	-
L: Bölgeler, bantlar veya ufalanmış kaya ve kil	8.0	-
M: G,H ve J maddelerine bakınız	8.0-12.0	6-24
N: Siltli veya kumlu kil, az miktarda ince taneli malzeme, bölgesel veya bant şeklinde	5.0	-
O: Kalın, sürekli kil bölgeleri veya bantları (kil için)	10.0-13.0	6-24
P: G,H ve J maddelerine bakınız	13.0-20.0	6-24

Çizelge 13. Eklem suyu indirgeme faktörü puanları ve tanımları

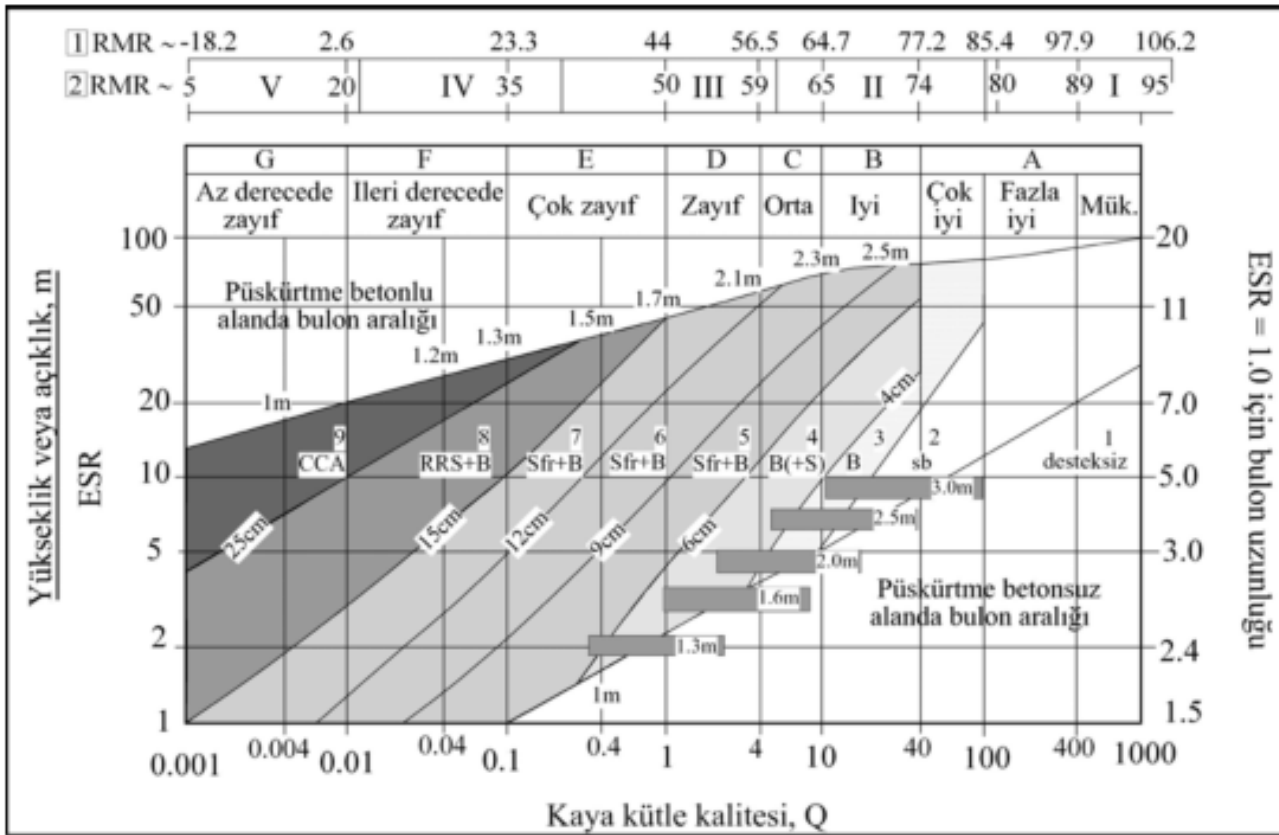
5. Eklem suyu indirgeme faktörü	J_w	Su basıncı, MPa
A: Kuru kazı veya çok az su gelimi, (örn. 5.0 l/dk)	1.0	<0.1
B: Orta derecede su gelimi, eklem dolgularında yıkanma	0.66	0.1-0.25
C: Sağlam kayada fazla su gelimi ve basıncı, dolgunsuz eklemler	0.5	0.25-1.0
D: Fazla su gelimi ve basıncı, dolgularda belirgin yıkanma	0.33	0.25-1.0
E: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalacak şekilde	0.2-0.1	>1.0
F: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalma yok	0.1-0.05	>1.0

Not : C ve F maddeleri genel yaklaşımlar olup, drenaj önlemleri varsa J_w artırılmalıdır.

Çizelge 14. Gerilme azaltma faktörü puanları ve tanımları

6. Gerilme azatma faktörü	SRF		
<i>(a) Tünel kazısı sırasında kaya kütlelerinde gevşeme oluşturabilecek ve kazıyı kesen zayıflık zonları</i>			
A: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi zon oluşumları, çok zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	10		
B: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği <50m)	5		
C: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği >50m)	2.5		
D: Sağlam kayada birçok makaslama zonu, zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	7.5		
E: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	5.0		
F: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	2.5		
G: Gevşek, açık eklemler, yoğun eklemler (herhangi bir derinlikte)	5.0		
<i>(b) Sağlam kaya, kayada gerilme problemleri</i>		σ_1/σ_3	σ_1/σ_c
H: Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	2.5	>200	<0.01
J: Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli	1.0	200-10	0.01-0.3
K: Yüksek oranda gerilme, çok yakın yapı. Tünel duvarlarının stabilitesinde problemler olabilir	0.5-2.0	10-5	0.3-0.4
L: Masif kayada 1 saat içinde orta derecede dilimlenme	5-50	5-3	0.5-0.65
M: Masif kayada birkaç dakika içinde kaya patlaması ve dilimlenme	50-200	3-2	0.65-1.0
N: Sağlam kayada yamulma şeklinde kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	200-400	<2	>1.0
<i>(c) Sıkışan kaya: Yüksek gerilme altında yumuşayan kayanın plastik deformasyonu</i>			
O: Orta derecede sıkıştıran kaya basıncı	5-10		1-5
P: Yüksek derecede sıkıştıran kaya basıncı	10-20		>5
<i>(d) Şişen kaya: Su içeriğine bağlı olarak kimyasal şişme</i>			
R: Düşük kaya basıncında şişme	5-10		
S: Yüksek kaya basıncında şişme	10-15		

Not : Etken makaslama zonları kazıyla kesişmezse SRF değerleri %25-50 azaltılır. $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ ise, $0.75\sigma_c$, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0.5\sigma_c$ kadar değer azaltılır. Tünelde tavan derinliği genişlikten az ise SRF 2.5'den 5'e artırılmalıdır. Kazı etkisinden kurtularak genelleştirme yapılabilmesi için SRF = 5, 2.5, 1.0 ve 0.5 değerlerinin artan derinlikle paralel kullanılması önerilir (örn. 0-5, 5-25, 25-250, >250 m)



Şekil 3. Tüneller ve yeraltı açıklıkları için kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerini tespit için Q-destek grafiği (Grimstad,1993 modifiye hali)