İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BEYKOZ BEKLEME TÜNELİNDE UYGULANAN TAHKİMAT SİSTEMLERİNİN KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDEN HAREKETLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mad. Müh. Tuğçe Nergis
(505021007)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Erkin NASUF (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Nuh BİLGİN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Ali KAHRİMAN (İ.Ü.)

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Öncelikle bu çalışma sırasında verdiği desteklerinden dolayı değerli tez danışmanım Prof. Dr. Erkin NASUF'a ve yakın ilgisi ile yardımını esirgemeyen İTÜ Maden Mühendisliği Araştırma Görevlisi C.Atilla ÖZTÜRK'e, Laboratuar çalışanlarına, İstanbul Beykoz'da yaptığım araştırmalarım sırasında verdiği imkanlar ve gösterdiği sabırdan dolayı firma yetkililerine ve bana çalışmam sırasında her türlü kolaylığı sağlayan Maden Mühendisi Murat TOKSÖZ'e teşekkür ederim. Son olarak değerli aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Haziran 2005 **Tuğçe NERGİS**

İÇİNDEKİLER **Sayfa No**

TABLO LİSTESİ ..... **iv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**

1. GENEL BİLGİLER **1**
1.1 Genel jeoloji haritası **1**
1.2 Tünel geometrisi ve tünel hakkında bilgiler **1**

2. KAYAÇ MALZEMESİ VE KAYA KÜTLESİ KAVRAMLARI **2**
2.1. Kayaç malzemesi sınıflama sistemleri **2**
2.1.1 Deere ve miller sınıflaması 4
2.1.2 Birleştirilmiş mühendislik sınıflaması 5

3. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ **6**
3.1 Kaya yükü sınıflama sistemi (Terzaghi sınıflaması) **8**
3.2 Açıklığın tahkimatsız kalma süresinin sınıflama sistemi (Lauffer sınıflaması **12**
3.3 Kayaç yapılanma oranı (RSR) sınıflama sistemi **13**
3.4 Kaya kalite göstergesi (RQD) sınıflama sistemi **13**
3.5 RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi **15**
3.6 Q sınıflama sistemi **24**
3.7 Tünel kazıları için yeni avusturya kaya sınıflama sistemi (Pacher ve Rabciewicz sınıflaması) **24**
3.7.1 Tünelin desteklenmesi **29**
3.7.2 Tünellerde sağlamlaştırma elemanları **29**
3.7.2.1 Tel kafes 30
3.7.2.2 Çelik iksa (kafes donatı) 31
3.7.2.3 Püskürtme beton (shotcrete) 32
3.7.2.4 Kaya bulonları 35
3.7.2.5 Sürenler 37

4. ARAZİ ÇALIŞMALARI **38**
4.1 Kayaç malzemesinin özellikleri **38**
4.2 Yerinde yapılan dayanım testleri **38**
4.3 Uygulanan tahkimat sistemleri **45**
4.4 İlerleme ve vardiya etüdleri **45**

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **47**

KAYNAKLAR **48**
EKLER **49**
ÖZGEÇMİŞ **73**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Deere ve miller sınıflaması 4
Tablo 3.1 Başlıca kaya kütle sınıflama sistemleri 7
Tablo 3.2 Kaya yükü sınıflama sistemi 9
Tablo 3.3 Modifiye edilmiş Terzaghi kaya yükü sınıflaması (Bieniawski, 1989'dan) 10
Tablo 3.4 RQD ile kayacın mühendislik kalitesi arasındaki ilişki 13
Tablo 3.5 Altı metre genişliğinde bir tünel için RQD parametresinin ve destek gereksinimlerinin karşılaştırılması (Deere ve Deere, 1988'den) 14
Tablo 3.6 RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi (Bieniawski, 1989) 18
Tablo 3.7 Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması için kılavuz (Bieniawski, 1989) 20
Tablo 3.8 Jeomekanik kaya sınıflaması (RMR) için kömür işletmelerinde süreksizlik yüzeyi koşullarını değerlendirme tablosu (Bieniawski, 1999) 21
Tablo 3.9 RMR sistemine göre tünel kazıları ve destekleri için kılavuz 22
Tablo 4.1 Beykoz bekleme tüneli schmidt çekici değerleri 40
Tablo 4.2 Beykoz bekleme tüneli tek eksenli basınç dayanımları 42
Tablo 4.3 Beykoz bekleme tüneli'nde yer alan kayaçların kuru ve yaş ağırlıkları 44

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kayaçlar için önerilen tek eksenli basınç dayanımı sınıflamalarının karşılaştırılması 3
Şekil 2.2 Normal gerilim-düşey birim deformasyon ilişkisi 4
Şekil 2.3 Birleşmiş mühendislik sınıflaması grafiği 5
Şekil 3.1 Terzaghi kaya yükü sınıflamasında kaya yükü kavramı ve gevşeme zonu ... 8
Şekil 3.2 Tünel genişliği-RQD ilişkisine göre destek sistemini belirleme abağı (Hoek ve Brown 1980'den) 14
Şekil 3.3 RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde kullanılan parametreler 16
Şekil 3.4 RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde bazı parametreler için puan belirleme abakları (Bieniawski, 1989'dan) 20
Şekil 3.5 RMR sınıflama sistemine göre yerlaltındaki boşlukların desteksiz kalabilme süresini tahmin abağı (Bienawski, 1989) 22
Şekil 3.6 Kaya kütlelerinin elastisite modülü için indirgeme faktörü grafiği (Nicholson ve Bieniawski, 1990) 23
Şekil 3. 7 R tipi çelik hasır 30
Şekil 3.8 Transmixer 32
Şekil 3.9 Atlas Copco kompresör 33
Şekil 3.10 Aliva marka püskürtme beton makinası ve Mai-Pump marka enjeksiyon seti 33
Şekil 3.11 Atlas Copco Boomer 282 Jumbo Delici 36
Şekil 3.12 Volvo El 70 Loader 37
Şekil 3.13 Bulon çakımı 37
Şekil 4.1 Schmidt çekici 39
Şekil 4.2 Schmidt çekici mekanizması 39
Şekil 4.3 Schmidt sertliği ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Deere ve Miller,1966) 41
Şekil 4.4 Nisan ayı tahkimat sistemeri dağılımı 46

BEYKOZ BEKLEME TÜNELİNDE UYGULANAN TAHKİMAT SİSTEMLERİNİN KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNDEN HAREKETLE İNCELENMESİ

ÖZET

Tünel çalışmalarında, ilk ve nihai tahkimat sistemlerinin tünel formasyonlarının mekanik ve fiziksel özelliklerine göre inşaa edilmesi son derece önemli bir konu teşkil etmektedir. Pek çok araştırmacı tarafından inceleme altına alınan bu konu maden ve inşaat mühendisliği disiplinleri için günümüzde de araştırılmaya devam etmektedir.

Tahkimat dizaynlarının gerçekleştirilmesi için genellikle kaya kütle sınıflama sistemlerinden faydalanılmıştır. Bu sistemler sayesinde pek çok tünel dizayn edilmiştir.

Kaya kütle sınıflama sistemlerden RMR ve Q sınıflama sistemleri tahkimat dizaynı yaparken kullanılan en önemli sistemlerdir. Bu sistemler kullanılarak her türlü tünel dizaynı yapılabilmektedir.

Değişen formasyonalara bağlı olarak bir tünel tasarımı yaparken mutlaka kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılmalıdır.

Beykoz Bekleme Tüneli'nde uygulanan bu sistemler sayesinde en etkin ilerleme gerçekleşmiştir. Uygulanan tahkimat sistemine göre ayrıca maliyet de değişkenlik göstermektedir. Bazen artış, bazen azalış göstermektedir.

Sonuçta Beykoz Bekleme Tüneli'nde uygulanan bu sınıflamalar kazı ve tahkimatın her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken çok önemli araçlardır.

DETERMINING THE SUPPORT REQUIREMENTS BASED ON ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEMS IN BEYKOZ BEKLEME TUNNEL

SUMMARY

Determining the support requirements for both initial and final support system related with the mechanical and physical properties of rock zones is an essential step for tunneling applications. These investigations have been the scope of some researchers for years and it is still an important research area both for mining and civil engineering disciplines.

In order to make good support system generally rock mass classification systems are used. With these systems lots of tunnels are designed.

RMR and Q systems are the most important support design systems in rock mass classification systems. By using these systems, most of the tunnels are designed.

Because of different formation types tunnels must be designed by using rock mass classification systems.

By using these systems the most effective progress has been achieved in Beykoz Bekleme Tunnel. Cost is also changing by the support systems. It sometimes decreases or increases.

Finally these systems which are used in Beykoz Bekleme Tunnel, are very important in all the steps of excavation and supporting.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Genel Jeoloji Haritası

İstanbul Beykoz ve Bekleme Tünelleri'nde bulunan jeolojik koşullar karmaşık ve değişkendir. Bu nedenle araştırmalarda, deneylerde, sonuçların sunulmasında ve yeraltı koşullarının değerlendirilmesinde istatistiki bir yaklaşım benimsenmemiştir. Bu amaçla sondajlarda, yerinde yapılan deneylerde ve laboratuvar deneylerinde sadece tünel seviyesi değil tünelin açılacağı tüm yamaç kütlesi incelenmiş; bu şekilde tünellerde karşılaşılabilecek değişken koşulların ortaya konulmasına ve bunlara karşılık gelen destek sınıflarının toplam tünel boyundaki yaklaşık yüzdelerinin tayinine imkan verecek bir yol izlenmiştir. Bu tünellerin projelendirme ve inşaatlarında güzergahtaki kayaçların litolojik çeşitliliği, muhtemel kıvrımlanma ve faylanma nedeni ile oluşturduğu karmaşık yapı dikkate alınmıştır. Karmaşıklığa bağlı olaak süreksizlik tip ve yönelimleri çok çeşitlilik göstermiş olup kıvrım ve fay zonları ile kayanın çok kırıklı olduğu kesimlere özellikle dikkat edilmiştir. Genel olarak tüm tünel güzergahı boyunca çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşları ile bunların ardışımlarından yapılı Kurtköy formasyonu etkili olmuştur.

İstanbul Beykoz ve Bekleme Tüneli'ne ait genel jeoloji haritası Ek A'da verilmektedir.

1.2 Tünel Geometrisi ve Tünel Hakkında Bilgiler

Tüneller 32 m^3/s'lik nihai akımlı basınç altında suyun taşınması için projelendirilmiştir. Bekleme tüneli 1383 metre uzunluğunda ve 4 metre iç çaplıdır. Girişte taban seviyesi 30,56 metre, çıkışta 106,5 metre kotunda olup eğim % 5,5 olarak planlanmıştır. Tünel üzerindeki örtü kalınlığı yaklaşık 17 ile 87 metre arasında değişmektedir. Tünelin sınırlı uzunluğu tek aynada çalışılarak inşa edilmesini mümkün kılmıştır.

2. KAYAÇ MALZEMESİ VE KAYA KÜTLESİ KAVRAMLARI

Kaya kütleleri, çeşitli jeolojik süreksizlikler (eklem, fay, tabakalanma şistozite vb) tarafından ayrılmış sağlam kaya bloklarının birlikteliğinden oluşurlar. Kaya kütlesindeki süreksizliklerin aralığı veya sıklığı, farklı süreksizlik setlerinin sayısı ve planlanan mühendislik kazısının boyutları, incelenen kayacın davranış türü hakkında karar verilmesinde önemli rol oynayan faktörlerdir.

Eğer süreksizlikler geniş aralıklı veya kayacın süreksizlikler arasında kalan bölümü zayıf veya bozunmaya, ya da alterasyona uğramışsa, kaya kütlesinin genel davranışı, sağlam kayacın (süreksizlik içermeyen kısım) davranışından büyük ölçüde etkilenir. Bu koşullarda kayaç malzemesi, kaya kütlesinin küçük ölçekteki bir örneğini oluşturabilir. Buna karşın, süreksizliklerin sayısının ve sıklığının artmasıyla, süreksizliklerle birlikte sağlam kesimi de içine alan tüm kaya kütlesinin davranışı etkin bir faktör olacaktır. Bu durumda kayaç kütlesinin özellikleri dikkate alınmalıdır.

Yukarıda değinilen iki farklı kaya tanımı esas alınarak kaya sınıflaması:

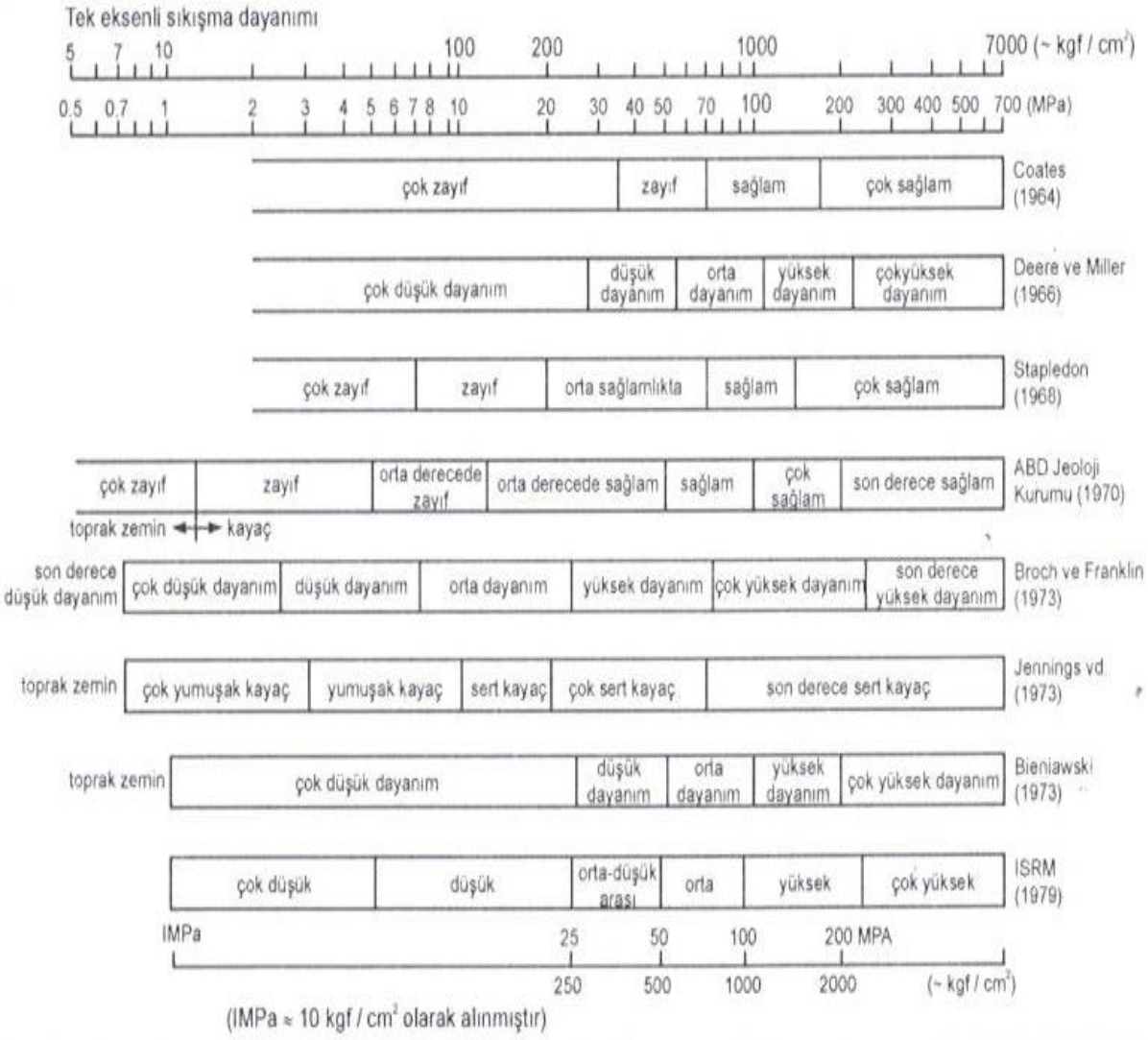
a) Kayaç malzemesi sınıflaması

b) Kaya kütle sınıflaması

olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir.

2.1. Kayaç Malzemesi Sınıflama Sistemleri

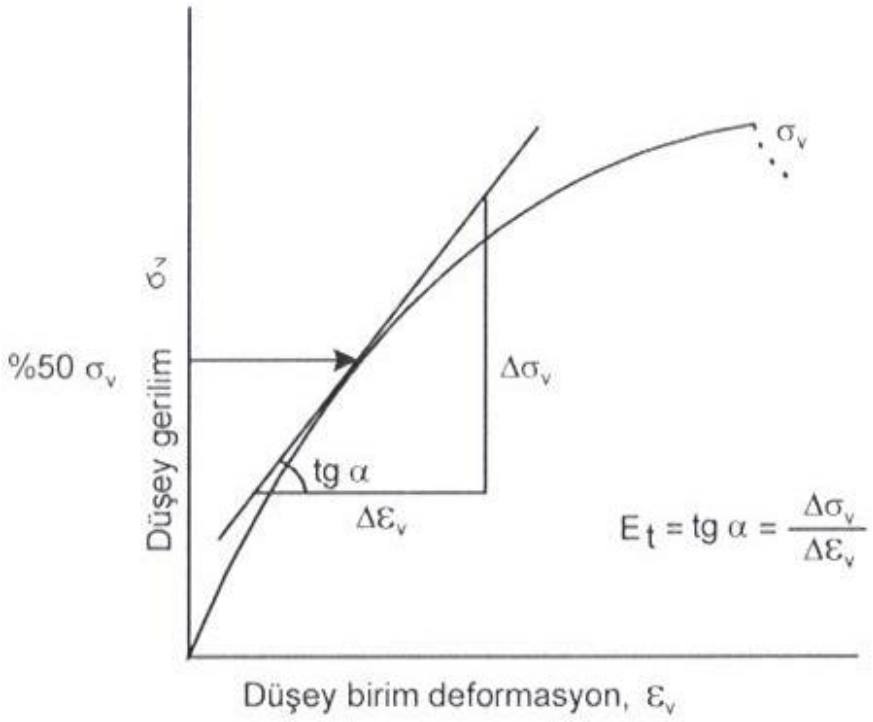
Genel olarak süreksizlik içermeyen kayaç malzemesinin sınıflandırılmasına ilişkin sistemler, kayaçların özellikle tek eksenli basınç dayanımı değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. Bu amaçla değişik araştırmacılar tarafından sadece tek eksenli basınç dayanımı esas alınarak önerilen bu sınıflama sistemleri Şekil 2.1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sistemlerin ortak özelliği, tek eksenli basınç dayanımı 1 MPa'dan düşük olan malzemelerin toprak zemin olarak kabul edilmesidir.



Şekil 2.1 Kayaçlar için önerilen tek eksenli basınç dayanımı sınıflamalarının karşılaştırılması

Kayaçların dayanım özelliklerinin esas alındığı sınıflandırılmalar arasında Deere ve Miller (1966) sınıflaması yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bı sınıflama sisteminde, kayacın tek eksenli basınç dayanımı σ_c ve modül oranı E_t/σ_c değerleri esas alınır ve sınıflandırma bu parametrelere bağlı olarak iki bölümden oluşur.

Modül oranında kullanılan E_t teğetsel elastisite modülü, "normal gerilim-düşey birim deformasyon" (σ_v-ε_v) eğrileri üzerinde, en yüksek dayanımın %50'sindeki teğetin eğimi olarak hesaplanır. E_t'nin hesaplanmasına ilişkin $\sigma_v - \varepsilon_v$ grafiği Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Normal gerilim-düşey birim deformasyon ilişkisi

2.1.1. Deere ve Miller Sınıflaması

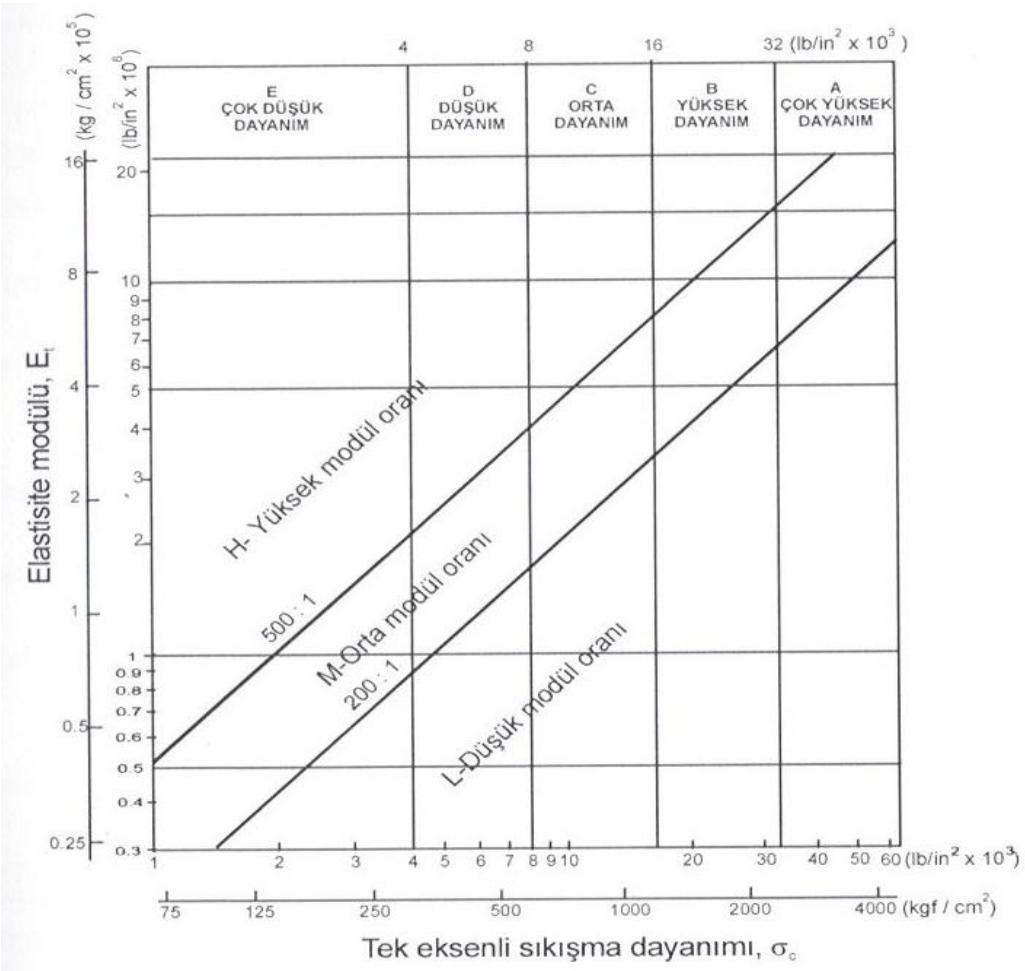
Deere ve Miller sınıflaması Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Deere ve Miller Sınıflaması

(A) Tek eksenli Basınç Dayanımına Göre		
Sınıf	Dayanım	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kgf/cm)
A	Çok yüksek	>2200
B	Yüksek	1100-2200
C	Orta	550-1100
D	Düşük	275-550
E	Çok düşük	<275
(B) Modül Oranına Göre		
Sınıf	Modül Oranı	Değer
H	Yüksek	>500
M	Orta	200-500
L	Düşük	<200

2.1.2 Birleştirilmiş Mühendislik Sınıflaması

Deere ve Miller (1966)'in iki bölümden oluşan sınıflaması birleştirilerek, "Birleştirilmiş Mühendislik Sınıflaması" adıyla bir grafik Şekil 2.3 şekline getirilmiştir. Laboratuvar testleriyle belirlenen E_t ve σ_c değerleri bu grafiğe yerleştirilerek, kayacın sınıfı belirlenir.



Şekil 2.3 Birleşmiş mühendislik sınıflaması grafiği

Kayaç malzemesine ait sınıflama sistemlerinin en önemli sınırlaması, mühendislik tasarımı için niceliksel olarak bir veri sağlayamamasıdır. Bu sistemler, sadece kayaçların mühendislik amaçlarıyla daha iyi tanımlanabilmesi, kayaç malzemesi özelliklerinin tartışılması ve mühendisler arasında teknik bir iletişim sağlanabilmesi amaçlarıyla kullanılmaktadırlar. Ayrıca bu sınıflamadan, mostra veren kayaçların dayanım değerlerine göre sınıflandırıldığı mühendislik jeolojisi haritalarının hazırlanmasında da yaralanılmaktadır.

3. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ

Zemin araştırmasından elde edilen bulgular, uluslararası ve pratik temellere dayalı kaya kütle sınıflama sistemleri sayesinde tüneller boyunca yeraltı koşulları sınıflandırılmaktadır. İşçilerin, tahkimatsız arında ne kadar süreyle çalışabilecekleri ve tünelin tahkimatsız olarak ne kadar ilerleyebileceği, ayrıca; mühendislerin, uygun stildeki tahkimatı seçmesinde, optimum delme-patlatmanın belirlenmesinde kayaç tiplerinin ve sınıflandırılmasının önemi büyüktür. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, mühendislik tasarımını tek başına gerçekleştirebilecek bir araç olarak değerlendirilmemelidir. Bu yöntemler, nihai tasarımın formüle edilebilmesi için, tasarım hedefleri ve sahanın jeolojisi de dikkate alınarak, gözleme dayanan, analitik ve nümerik çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılmalıdır. Doğru bir şekilde kullanıldıkları zaman bu sistemler, ön tasarımda yararlı birer araç olabilmektedirler.

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin kullanılmasındaki başlıca amaçlar,

1) Kaya kütlesinin davranışını etkileyen en önemli parametreleri tayin etmek,
2) Kaya kütlelerini kendi içlerinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kaya kütlesi sınıflarını belirlemek,
3) Her kaya kütlesi sınıfının karakteristiklerini anlamak amacıyla bir esas oluşturmak,
4) Bir sahadaki kaya koşullarıyla ilgili kazanılan deneyimi diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak,
5) Mühendislik tasarımı için sayısal veri ve bir kılavuz elde etmek,
6) Mühendisler arasında ortak bir temele dayalı bilimsel ve teknik anlamda iletişim sağlamak,

şeklinde sıralanabilir. Aşağıda belirtilen üç husus ise, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden sağlanan kazanımları belirtmektedir:

a) Sınıflama parametreleri olarak en az sayıda veri sağlayarak saha çalışmalarının kalitesini yükseltmek,
b) Tasarım amaçlarıyla sayısal veri sağlamak,
c) Daha sağlıklı bir mühendislik kararına varılmasına ve proje konusunda daha etkin bir iletişimi sağlamak.

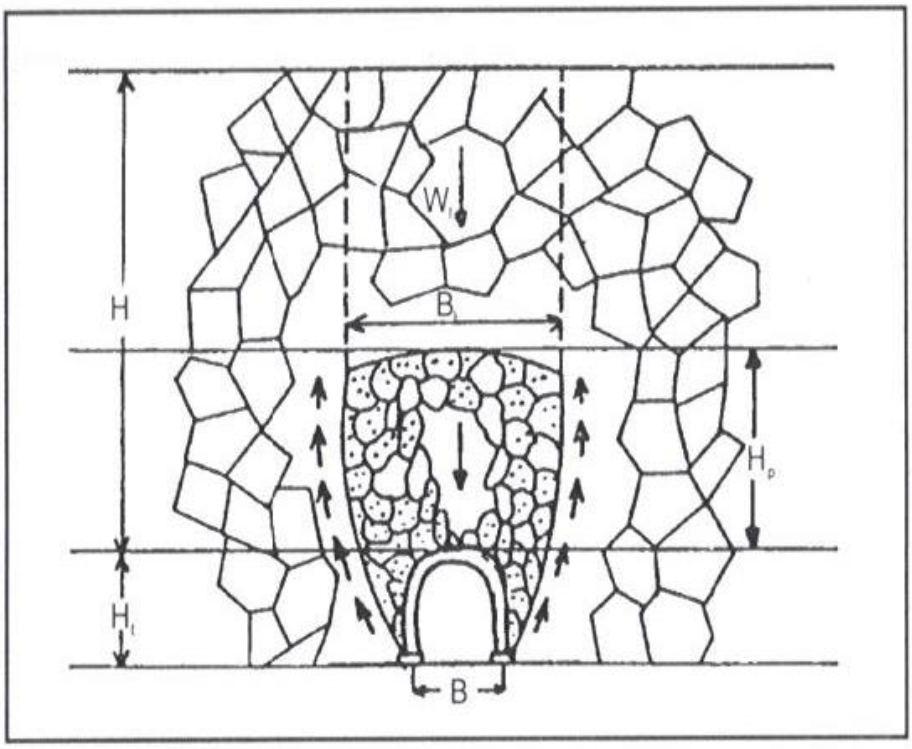
1946'dan bu yana çeşitli araştırmacılar tarafından, değişik kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiş veya önerilmiştir. Bu sistemler Tablo 3.1'de verilmektedir. Bu sistemlerin bir bölümü, kendilerinden önce önerilmiş olan sistemlerin, bazı faktörler dikkate alınarak, yeniden düzenlenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Burada, söz konusu sistemlerin tümü verilmemiş olup, ilk sınıflama sistemleri arasında en çok kullanılmış olanlar ile günümüzde kaya mühendisliği uygulamalarında en yaygın şekilde kullanılan veya kullanılması talep edilen sistemler ana hatları ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 3.1 Başlıca kaya kütle sınıflama sistemleri

Sınıflama sisteminin adı	Öneren ve tarihi	Geliştirildiği ülke	Uygulama alanları
1. Kaya yükü	Terzaghi (1946)	ABD	Çelik destekli tüneller
2. Desteksiz duraylı kalabilme süresi	Lauffer (1958)	Avustralya	Tünelcilik
3. NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Pacher vd. (1964)	Avusturya	Tünelcilik
4. RQD	Deere vd. (1967)	ABD	Karot loglaması, tünelcilik
5. RSR kavramı	Wickham vd. (1972)	ABD	Tünelcilik
6. RMR sistemi	Bieniawski (1973)	G. Afrika	Tüneller, madenler
	(en son modifikasyonu 1998-	ABD	(Şevler, temeller)
	A.B.D)		
RMR sisteminin müdifikasyonları:			
	Weaver (1975)	G. Afrika	Sökülebilirlik
	Laubscher (1977)	G. Afrika	Madencilik
	Olivier (1979)	G. Afrika	Bozunma
	Ghose ve Raju (1981)	Hindistan	Kömür madenciliği
	Moreno Tallon (1982)	İspanya	Tünelcilik
	Kendorski vd. (1983)	ABD	Sert kaya madenciliği
	Nakao vd. (1983)	Japonya	Tünelcilik
	Serafim ve Pereria (1983)	Portekiz	Temeller
	Gonzalez de Vallejo (1983)	İspanya	Tünelcilik
	Ünal (1983)	ABD	Kömür madenciliğinde tavan saplaması uygulamaları
	Romana (1985)	İspanya	Şev duraylılığı
	Newman ve Bieniawski (1985)	ABD	Kömür madenciliği
	Sandbak (1985)	ABD	Delinebilirlik
	Smith (1986)	ABD	Taranabilirlik
	Venkateswarlu (1986)	Hindistan	Kömür madenciliği
	Robertson (1988)	Kanada	Şev duraylılığı
	Ünal ve Özkan (1990)	Türkiye	Madencilik
7. Q Sistemi	Barton vd. (1974)	Norveç	Tüneller ve geniş yeraltı boşlukları (odaları)
Q sisteminin modifikasyonları			
	Kirsten (1982)	G. Afrika	Kazılabilirlik
	Kirsten (1983)	G. Afrika	Tünelcilik
	Grimstad ve Barton (1993)	Norveç	Tüneller ve geniş yeraltı boşlukları
8. Dayanım boyut	Franklin (1975)	Kanada	Tünelcilik
9. Temel jeoteknik tanımlama	ISRM (1981		Genel teknik iletişim amaçlı
10. Birleştirilmiş sınıflama sistemi			
	Williamson (1984)	ABD	Genel teknik iletişim amaçlı

3.1 Kaya Yükü Sınıflama Sistemi (Terzaghi Sınıflaması)

Terzaghi (1946) tarafından önerilen bu sistem, tünellerde çelik destek tasarımı için kaya yüklerinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş ilk rasyonel kaya sınıflama sistemidir. Bu sistem, son 50 yıl süreyle çelik desteklerin tünel kazılarında yaygın şekilde kullanılmış olması nedeniyle, önemli bir gelişme olarak kabul edilmiş ve uygulanmıştır. Bununla birlikte, püskürtme beton, kaya saplaması ve çelik hasır kullanımını beraberinde getiren çağdaş tünelcilik yöntemleri için uygun bir sistem değildir. Kaya yükü kavramının ilkesi Şekil 3.1'de gösterilmiş olup, sınıflandırmaya esas olan ölçütler Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Terzaghi kaya yükü sınıflamasında kaya yükü kavramı ve gevşeme zonu

Tablo 3.2 Kaya yükü sınıflama sistemi

Sınıf No.	Fiziksel Özellik	Açıklama	Kaya Yükü H_p (m)	Destek
1	Sağlam ve çatlaksız	Mağmatik kayaçlar, tabaka kalınlığı tünel boyutunun yanında önemsiz kalan sedimanter kayaçlar.	0	Eğer parçalanma ve patlama oluyorsa, sadece hafif kaplama gereklidir.
2	Sağlam tabakalı veya şistozite yüzeyli	Seyrek eklemli ve çatlaklı sedimanter kayaçlar, çok hafif metamorfizma geçirmiş şistler.	0.0.5 B	Ayrılmalara karşı koruyucu önlem olarak hafif destek.
3	Tabakasız, orta derecede eklemli	Mağmatik, metamorfik sedimanter kayaçlar: Orta derecede eklemli ve çatlaklı, çatlaklar arasında kuvars ve kalsit gibi bağlayıcılar iyi, kil kötü yönde etkir.	0-0.25 B	Yük,bir noktadan diğerine ani olarak değişebilir.
4	Parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonlarının yakınında ortalama 10 cm'den büyük aralıklı eklemli, çatlaklı ve parçalı kayaçlar.	0.24 B-0.35 $(B+H_t)$	Yan basınç yok.
5	Çok parçalı ve çatlaklı	Makaslama ve fay zonlarında 10 cm'den ufak aralıklı, çok parçalı, çatlaklı kayaçlar.	0.35-1.10 $(B+H_t)$	Yan basınç yok veya çok az.
6	Tamamen parçalanmış, ancak kimyasal yönden ayrışmamış	Tamamen parçalanmış, sıkışmamış, kohezyonu çok az, ince taneli hale gelmiş veya kimyasal ve fiziksel etkilerle belirli bir sürede bu hale gelebilen kayaç.	1.10 $(B+H_t)$	Önemli miktarda yan basınç. Tünelin tabanına doğru sızıntı etkisiyle yumuşama, sürekli destek gerektirir (dairesel destek).
7	Sıkışabilen kaya (orta derinlikte)	Killer ve kil minerallerini içeren kayaçlar.	(1.10-2.10) $(B+H_t)$	Çok fazla yan basınç, kaplama gerekir. Dairesel destek önerilir.
8	Sıkışabilen kaya (çok derinde)	Az şişen killer (kaolen mineralli)	(2.10-4.50) $(B+H_t)$	Çok fazla yan basınç, kaplama gerekir. Dairesel destek önerilir.
9	Şişen	Çok şişen killer (montmorillonit, bentonit vb.)	450 $(B+H_t)$-75m	Dairesel destek gereklidir. Daha kötü durumlarda esnek destek kullanılır.

Ancak Deere vd. ve Rose (Bieniawski, 1984'ten) daha sonra Terzaghi sınıflama sisteminde bazı değişiklikler yaparak ve RQD kavramını da sisteme dahil ederek bu sistemi Tablo 3.3'de modifiye etmişlerdir.

Tablo 3.3 Modifiye edilmiş Terzaghi kaya yükü sınıflaması (Bieniawski, 1989'dan)

Kaya kütlesi özelliği	RQD (%)	Kaya yükü, Hp (ft)	Açıklamalar
1. Sağlam ve çatlaksız	95-100	0	Terzaghi (1946)'daki gibi
2. Sağlam, tabakalı veya şistozite yüzeyleri içeren	90-99	0-0.5B	Terzaghi (1946)'daki gibi
3. Masif, orta derecede eklemli	85-95	0-0.25B	Terzaghi (1946)'daki gibi
4. Parçalı (bloklu) ve çatlaklı	75-85	0.25B-0.20 ($B+H_t$)	4, 5, 6 no.lu kaya türleri için kaya yükü değerlerinde yaklaşık %50 azaltma uygulanır. Çünkü yeraltısuyu tablasının kaya yükü üzerinde çok az etkisi vardır (tünel su tablası üzerinde ise)
5. Çok bloklu ve çatlaklı	30-75	(0.20-0.60) ($B+H_t$)	
6. Tamamen parçalanmış ancak kimyasal anlamda ayrışmamış	3-30	(0.6-1.10) ($B+H_t$)	
6.a. Kum ve çakıl	0-3	(1.10-1.40) ($B+H_t$)	
7. Sıkışabilen kaya (orta derinlikte)	U[a]	(1.10-2.10) ($B+H_t$)	Terzaghi (1946)'daki gibi
8. Sıkışabilen kaya (çok derinde)	U[a]	(2.10-4.50) ($B+H_t$)	Terzaghi (1946)'daki gibi
9. Şişen kaya	U[a]	250 ft'in (80m) üzerinde ($B+H_t$)'nin değerine bakılmaksızın	Terzaghi (1946)'daki gibi

U[a]: RQD uygulanmaz

Terzaghi, Alp dağlarındaki demiryolu tünellerinde kullanılan çelik desteklerle ilgili deneyimini ve gözlemlerini esas alarak önerdiği destek sisteminde çeşitli kaya türleri ve bunlar için değişik kaya yükleri tanımlamıştır. Terzaghi'nin önerdiği modele göre, tünel kazısı sırasında tünelin çevresinde ve üzerinde kaya kütlesi içindeki kenetlenmenin derecesi zayıflamaktadır. Şekil 3.1'de "abcd" alanının içinde kalan gevşemiş kaya kütlesi tünele doğru harekete başlar. Bu hareket "ac" ve "bd" ile gösterilen yan sınırlar boyunca sürtünme kuvvetleri tarafından karşılanacaktır.

Dolayısıyla tünelin tavanı ve yan kesimleri, H_p yüksekliğine eşdeğer bir bölgenin dengelenmesi için desteklemeyi gerekli kılar. Hareketlerin meydana geldiği kaya zonunun genişliği (B_1), kaya kütlesinin özelliklerine ve tünelin boyutlarına (H_t ve B) bağlıdır.

Terzaghi, kum kullanarak, tünelin üzerindeki gevşemiş kaya yayının şeklini araştırmak için model deneyler yapmıştır. Araştırmacı, gerek bu deneyleri, gerekse çelik destekli tünellerde kazandığı deneyimlerini esas alarak Tablo 3.2'deki kaya yükü değerlerini önermiştir. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de verilen kaya türlerinin

sınıflama sisteminde kullanımının anlaşılır olabilmesi açısından, bu kaya türlerinin ayrıntılı tanımlamaları aşağıda sunulmuştur.

Sağlam ve çatlaksız kaya kütleleri, süreksizlik veya kılcal kırıklar içermez. Bu nedenle yenilme, sağlam kayaç boyunca gelişir. Patlamadan dolayı kayaçta oluşan ayrılmalar, patlatmayı izleyen uzun saatler veya günler sonra tavandan düşebilir. Bu tür kayaçlar, kaya patlaması olarak adlandırılan ve kaya parçalarının veya dilimlerinin ani ve şiddetli şekilde tavandan tünel içine düştüğü ortamlarda da kendini gösterebilir.

Sağlam, tabakalı veya şistozite yüzeyleri içeren kaya kütleleri, tabaka düzlemleri arasındaki yüzeyler boyunca ayrılmaya karşı çok az direnç gösteren veya hiç göstermeyen tek tabakalı kayaçlardır. Tabaka, kendisini verev yönde kesen eklemler tarafından zayıflatılmış veya zayıflatılmamış olabilir. Bu tür kayaçlarda ayrılma türü davranış oldukça yaygındır.

Orta derecede eklemli kaya kütleleri, eklemleri ve kılcal çatlakları içerir. Ancak eklemler arasındaki bloklar birbirleriyle oldukça kenetlenmiş bir konumda olup, tünelin yan duvarları desteklenmeyi gerektirmez. Bu tür kayaçlarda hem kavlaklanma, hem de kaya patlaması ile karşılaşılabilir.

Parçalı ve çatlaklı kaya kütleleri, kimyasal olarak ayrışmamış, sağlam, birbirlerinden tamamen ayrılmamış ve iyi bir şekilde kenetlenmemiş kaya parçalarından oluşmaktadır. Bu tür kaya kütlelerinde oluşturulan düşey aynalarda destek gereklidir.

Parçalanmış kaya kütleleri, kimyasal olarak ayrışmamış sağlam kayaç parçalarını içermektedir. Parçacıkların çoğu veya tümü ince kum tanesi kadar küçükse ve herhangi bir yeniden çimentolanma söz konusu değilse, bu tür bir kayaç, yeraltısuyu tablasının altında su içeren bir kum malzemesinin özelliklerini taşır.

Sıkışabilen kaya kütleleri, farkedilebilir bir hacim artışı göstermeksizin, tünelin içine doğru yavaşça hareket ederler. Sıkışma için ön koşul; düşük şişme kapasiteli, fazla miktarda mikroskopik ve yarı mikroskopik mika minerallerinin veya kil minerallerinin varlığıdır.

Şişen kaya kütleleri, tünel boşluğuna doğru önemli miktarda genişleme deformasyonu gösterirler. Montmorillonit gibi şişme kapasitesi yüksek kil minerallerini içeren kayaçlarda şişme oldukça fazladır.

Bu sınıflama sistemi, sadece çelik destek kullanılan tüneller için geliştirilmiş olup, destek tarafından taşınacak yüklerin tahmininde kullanılmaktadır.

B: Tünelin taban genişliği

H_t: Tünelin yüksekliği

H_p: Kaya yükü (metre)

1. Tünel tavanının yeraltısuyu tablasının altında bulunduğu varsayılmıştır. Eğer tünel yeraltısuyu tablasının üzerinde ise, 4,5 ve 6 numaralı sınıflar için verilen kaya yükü değerleri %50 azaltılabilir.
2. Kilden türemiş kayaçlar (kiltaşı, silttaşı, şeyl, şist, fillit), sıkılaşma, çimentolanma ve metamorfizma derecesine bağlı olarak, 2 ile 9 numaralı sınıflar arasında değişim gösterebilirler.
3. Eğer kumtaşı veya kireçtaşı tabakaları ile ardalanmalı ise, tünelin iki yanındak, ve tavandaki aşağıdoğru harekete neden olan gerilimler tünel kazısını etkiler. Bunun yanısıra, kiltaşı ile kireçtaşı veya kiltaşı ile kumtaşı arasındaki sınırda kaymaya karşı daha düşük olan direnç, tünel tavanı üzerindeki kemerlenme yapan kayacın dayanımını önemli ölçüde azaltır. Bu koşullarda kayaçlarda tavan basıncı 5 numaralı sınıftaki kadar fazla olabilir.

Örneğin çok parçalı ve çatlaklı kaya kütlesinde, (birim hacim ağırlık = 2.68 ton/m^3) taban genişliği 6 metre, yüksekliği 3.6 metre olan bir tünel açılacaktır. Kaya kütlesi, Tablo 3.2'deki tanımlamalara göre 5. grupta yer alıp, kaya yükü 0.35-1.10 ($B+H_t$) arasında değişmektedir. Buna göre yukarıdaki değerler kaya yükü ifadesinde yerine konarak destek sistemine aktarılacak yükün 9-23.8 ton arasında değişeceği sonucuna varılır.

3.2 Açıklığın Tahkimatsız Kalma Süresi Sınıflama Sistemi (Lauffer Sınıflaması)

Kaya kütle kalitesinin fonksiyonu olan, tahkimatsız olarak kalma zamanının tanımlandığı bu sistemde, tahkimatsız kalma süresi; kazıdan sonra açılan boşluğun, tahkimatsız olarak kalma süresi olarak tanımlanmaktadır. Göçmeden durabilme zamanı, kazı yapıldıktan sonra açıklığın tahkimatsız olarak, tahkimatla tünel arasındaki açıklığın uzunluğu cinsinden ifade edilmektedir. Ayrıca bu süre; tünel akslarının oryantasyonu, şekli, kazı ve tahkimat sisteminin etkisi altındadır.

Lauffer'in sınıflaması artık orjinal haliyle kullanılmamaktadır. Çünkü bir çok kereler, diğer Avusturyalı mühendisler tarafından çeşitli değişikliklere uğramıştır.

3.3 Kayaç Yapılanma Oranı (RSR) Sınıflama Sistemi

"RSR" sistemi, kayaç kütlelerinin kalitesiyle ilili ağırlık ve sayısal oranları tanımlamaktadır. Bu sistemde, kazı boyutları ve gerekli çelik tahkimat sistem parametreleri de elde edilmektedir. Bu metod ayrıca uluslararası literatürde sıkça kullanılan "RMR" ve "Q" sistemlerinin ilk temelini oluşturan bir sistemdir.

3.4 Kaya Kalite Göstergesi (RQD) Sınıflama Sistemi

RQD kavramı, Deere vd. (1967) tarafından önerilmiş ve silindirik şeklini koruyan, doğal süreksizlikler tarafından bölünmüş sağlam kayaç karot parçaları arasında boyu 10 cm ve 10 cm'den büyük olanların toplam uzunluğunun ilerleme uzunluğuna oranı şeklinde (yüzde olarak) ifade edilmiştir. RQD ile kayacın mühendislik kalitesi arasındaki ilişki Deere (1968) tarafından Tablo 3.4'de tanımlanmıştır.

Tablo 3.4 RQD ile kayacın mühendislik kalitesi arasındaki ilişki

.

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25	Çok zayıf
25-50	Zayıf
50-75	Orta
75-90	İyi
90-100	Çok iyi (mükemmel)

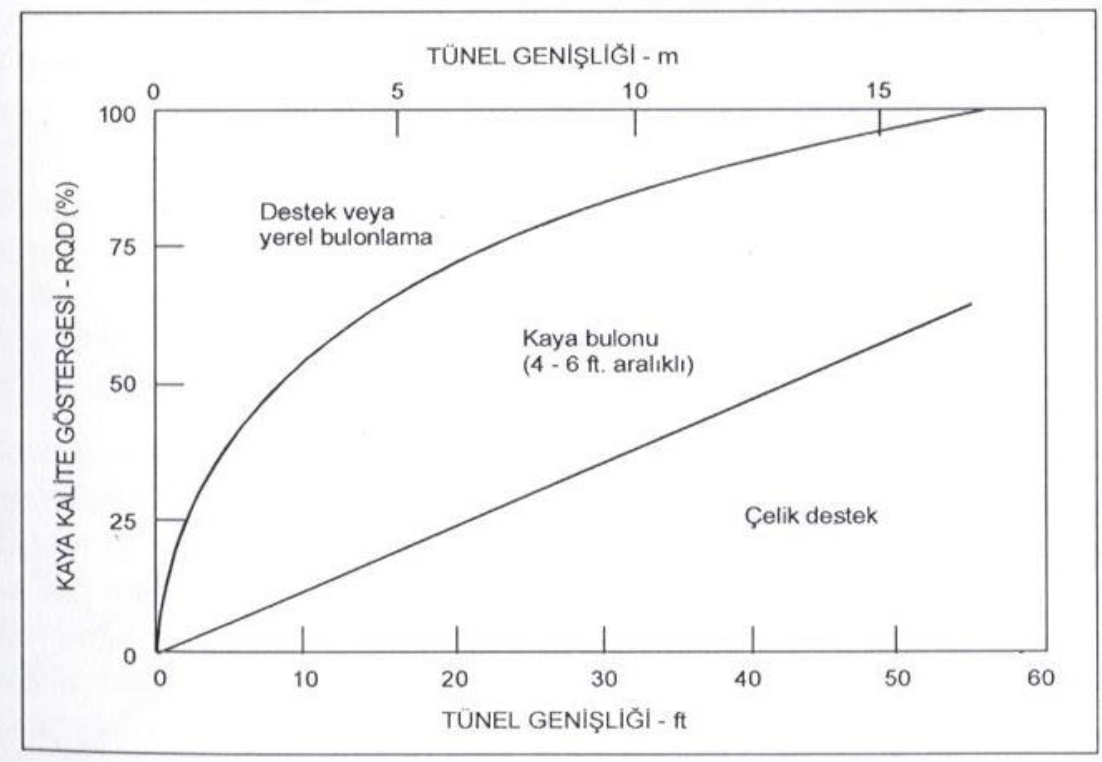
Peck vd. İle Cecil ve Merrit'in (Deere ve Deere, 1988) ayrı ayrı önerdikleri RQD'nin tünelcilikte de kullanılabileceğini, özellikle tüneller ve kuyularda ön destek seçimi için yardımcı bir indeks olabileceğini öne sürmüşlerdir.

Merrit 1972'de kişisel deneyimini ve genişliği 2 metre ile 20 metre arasında değişen tünelleri kapsayan 58 değişik tünel projesinin verisini kullanmış, ayrıca sonuçlarını kendisinden önce RQD kavramını tünelciliğe uygulayan Peck vd. ile Cecil'in önerileri ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmaya ve RQD'nin tünelcilikle ilgili kullanımına örnek olarak, 6 metre genişliğindeki bir tünel için gerekli destek

önerileri Tablo 3.5'de verilmiştir. Ayrıca, Merrit tarafından önerilen RQD ile tünel genişliği arasındaki ilişki esas alınarak destek türünün seçimi amacıyla kullanılan grafik Şekil 3.2'de gösterilmiştir

Tablo 3.5 Altı metre genişliğinde bir tünel için RQD parametresinin ve destek gereksinimlerinin karşılaştırılması (Deere ve Deere, 1988'den)

Araştırmacı	Yerel destek veya yerel kaya saplaması gerekmez	Kaya saplaması	Çelik destek
Pack vd. (1969)	RQD: 75-100	RQD: 50-75 (1.5-1.8 m aralıklı)	RQD: 50-75 bulonlara alternatif olarak 1.5-1.8 m aralıklı hafif çelik destek
		RQD: 25-50 0.9-1.50 m aralıklı)	RQD: 25-50 bulonlara alternatif olarak 0.9-1.5 m aralıklı hafif-orta çelik destek)
			RQD: 0-25 (0.6-0.9 m aralıklı) orta-ağır dairesel çelik destek)
Cecil (1970)	RQD: 82-100	RQD: 52-82 (alternatif olarak 40-60 mm püskürtme beton)	RQD: 0-52 (çelik destek veya takviyeli beton)
Merrit (1970)	RQD: 72-100	RQD: 23-72 (1.2-1.8 m aralıklı)	RQD: 0-23



Şekil 3.2 Tünel genişliği-RQD ilişkisine göre destek sistemini belirleme abağı (Hoek ve Brown 1980'den)

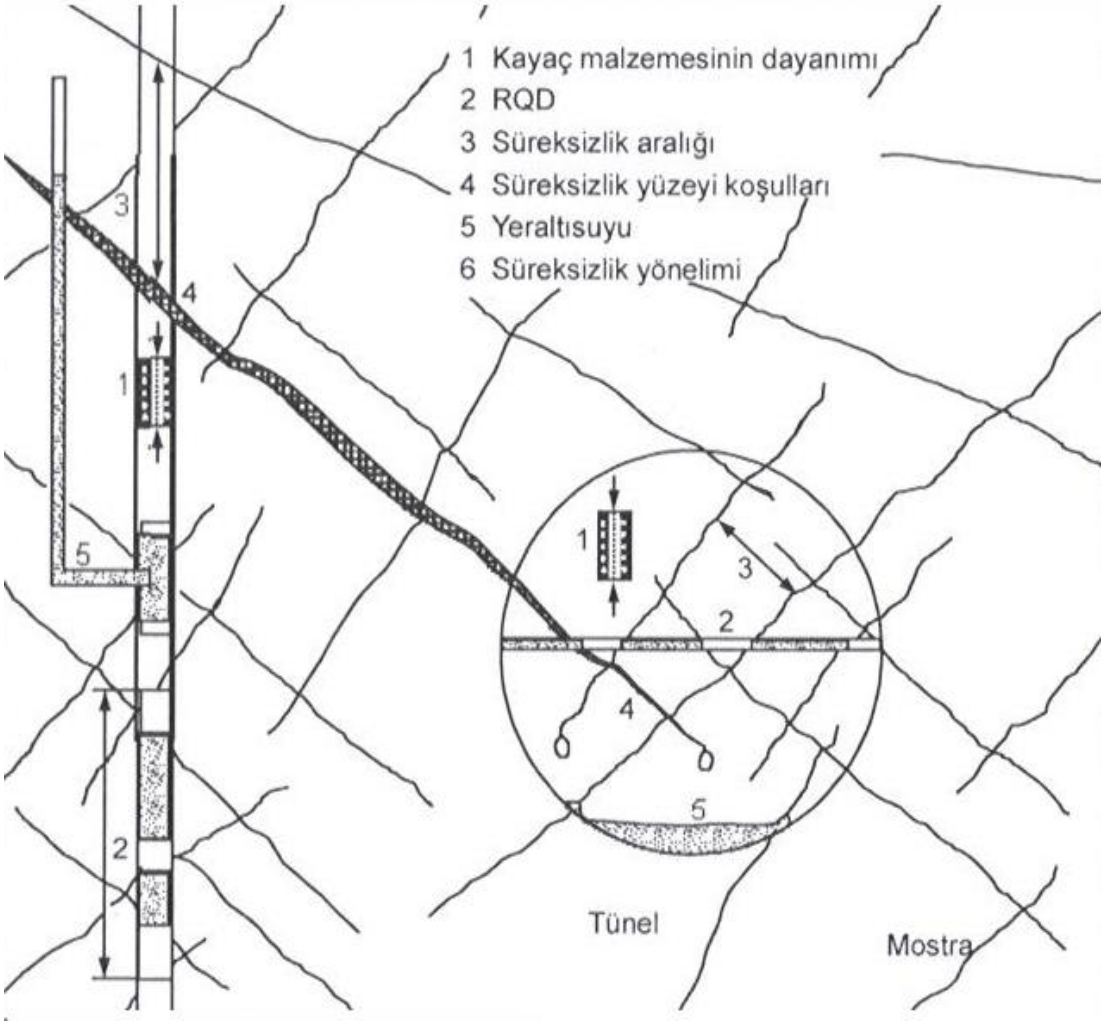
RQD, ölçülmesi pratik bir indeks olmasına karşın, bu parametrenin bir tünelcilik destek ölçütü olarak tek başına kullanılması kaya kütlelerinin yeterli ve uygun bir şekilde tanımlanmasını sağlayamamaktadır. Çünkü bu parametre; süreksizliklerin sıklığı, yönelimi, aralığı ve dolgunun özellikleri, ayrıca yüzeye yakın kayaçlarda bozunmanın derecesi gibi kaya kütlesinin önemli karakteristiklerini yansıtmamaktadır. Bu nedenle RQD, tek başına tüneller için destek belirleme ölçütü olarak kullanılabilecek bir parametre olmayıp, daha geliştirilmiş sınıflama sistemlerinde kullanılan parametrelerden sadece biri olarak günümüzde kullanılmaktadır. Bunun önemini; oldukça geniş aralıklarla dizilmiş süreksizliklerin yeraldığı, dolayısıyla RQD'nin yüksek olduğu, ancak kayacın çok zayıf olduğu bir kaya kütlesi dikkate alındığı takdirde, RQD'nin tek başına yanıltıcı veya yetersiz bir parametre olmasından anlamak mümkündür.

3.5 RMR Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi

RMR Sınıflama Sistemi Bieniawski tarafından 1972 -1973 arasında geliştirilmiştir (Bieniawski, 1973). Sistem, 1973'ten 1989'a kadar yeni verilerle desteklenerek bazı değişikliklere uğramış ve son şeklini 1989'da almıştır (Bieniawski, 1989). Tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili 351 değişik uygulamadan derlenen verilerin ve yapılan gözlemlerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, yöntemin bugünkü şeklini almasında en önemli araçlar olmuştur.

RMR sistemine göre kaya kütlelerinin sınıflandırılmasında Şekil 3.3'de belirtilen 6 parametre esas alınmaktadır.

1. Kayacın tek eksenli skışma dayanımı (σ_c)
2. RQD
3. Süreksizlik aralığı
4. Süreksizliklerin durumu (devamlılık, pürüzlülük, dolgu, bozunma, açıklık)
5. Yeraltısuyu koşulları
6. Süreksizliklerin yönelimi



Şekil 3.3 RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde kullanılan parametreler

Sistemin uygulanması için, kaya kütlesi belirli özellikleri açısından benzerlik taşıyan yapısal bölgelere ayrılır. Kaya türünün veya süreksizlikler arası mesafenin üniform olduğu yapısal bölgelerle yaygın olarak karşılaşılabilir. Pek çok durumda yapısal bölgelerin sınırları; fay ve dayk gibi ana süreksizliklerle çakışmaktadır. Yapısal bölgeler belirlendikten sonra, kazı aynaları boyunca veya sondajlı bir çalışma yapılıyorsa her ilerlemede sınıflandırmanın gerektirdiği parametreler tayin edilir.

Sistemin ilk önerildiği 1973 yılındaki kapsamında ilgili parametreler doğrudan tek bir tablodan belirlenmekteydi. Ancak farklı parametre değerleri için aynı puan aralıklarının geçerli olması, gerçekçi bir puanlamanın yapılması açısından eksiklikler taşımaktaydı. Bu eksiklikler, sistemin 1989 yılında modifiye edilen son versiyonunda giderilmiştir.

RMR Sınıflama Sistemi uygulanırken, Tablo 3.6'da her parametre için verilen ölçütler veya değerler esas alınır. Çünkü değişik parametrelerin sınıflamadaki önem dereceleri eşit değildir. Değeri belirlenen ilk 5 parametrenin puanı Tablo 3.6 A'dan saptanır. Bununla birlikte, Tablo 3.6 A'da tek eksenli dayanım, RQD ve süreksizlik aralığı parametrelerine ilişkin ara değerlere karşılık gelen puanlar Şekil 3.8'de verilen abaklar kullanılarak belirlenir. Şekil 3.4 D'de verilen abak ise, RQD veya süreksizlik aralığı değerlerinden herhangi birinin eksikliği halinde, bilinen bir parametreden diğer bilinmeyenin tayini amacıyla önerilmiştir. Bu sistemde süreksizlik aralığı parametresi üç süreksizlik takımı içeren kaya kütlelerine uygulanır. Bu nedenle sadece iki süreksizlik seti içeren kütlelerinde tutucu bir değerlendirme yapılmış olur. Tablo 3.7, süreksizliklerin durumuyla ilgili puanlamanın daha sağlıklı olarak belirlenmesi amacıyla kullanılır. Bununla birlikte, kömür madenlerinde çok ince tabakalı, kil dolgulu süreksizlik yüzeyleri içeren kayaçların da varlığı gözetilerek, ayrıca kömür madenleri için süreksizliklerin durumunun değerlendirilmesi amacıyla Tablo 3.6 ve 3.7'dan farklı değerlendirme ölçütleri Tablo 3.8'de önerilmiştir.

Bundan sonraki aşama, süreksizliklerin eğimlerinin ve eğim yönlerinin etkisinin Tablo 3.6'nın B bölümünden belirlenmesidir. Bu aşama, ilk bölümdeki değerlendirmeden ayrı olarak yapılır. Çünkü süreksizliklerin yöneliminin etkisi tünel, maden işletmesi, şev veya temel gibi mühendislik uygulamalarında kazıların yönelimine bağlıdır. Bu değerlendirmeyle ilgili RMR puan düzeltmesi, Tablo 3.6 C bölümü kullanılarak belirlenir. Ancak, bu değerlendirme kalitatif olduğu için eğim ve doğrultunun tünel için uygun olup olmadığına karar verilebilmesi amacıyla öncelikle Tablo 3.6 B'nin kullanılması gerekir. Yönelimle ilgili olarak belirlenen düzeltme değeri daha sonra ilk 5 parametrenin toplamından elde edilen RMR değerine eklenerek, kayacı temsil eden nihai RMR değeri belirlenir.

İnşaat mühendisliği ile ilgili projelerde süreksizliklerin yönelimi ile ilgili düzeltmenin yapılması genellikle yeterlidir. Buna karşın, RMR sınıflama sisteminin yaygın şekilde kullanıldığı madencilik uygulamalarında kazı işlemleri oldukça dinamik süreçleri kapsar ve birbirini değişik yönlerde kesen yeraltı açıklıklarını gerektirebilir. Bu durumda arazi gerilimleri, patlatma, vb. gibi faktörlerin dikkate alınması ve gerekiyorsa, bu faktörler için de düzeltmelerin yapılarak RMR değerlerinin düzeltilmesi gerekir. Düzeltmeyi gerektiren tüm faktörler ve bunlara

ilişkin düzeltme katsayıları, Şekil 3.5'deki RMR sisteminin kullanımını özetleyen akım şemasında verilmiştir. Yapılacak düzeltmeler için elde edilecek sonuç katsayısının 0.5'ten küçük olmaması gerekir.

Tablo 3.6 RMR kaya kütlesi sınıflama sistemi (Bieniawski, 1989)

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI

1*	Sağlam kayacın dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 100 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım		
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puan		15	12	7	4	2	1	0
2*	Kayaç kalite göstergesi, RQD		%90-%100	%75-%90	%50-%75	%25-%50	< %25		
	Puan		20	17	13	8	3		
3*	Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Puan		20	15	10	8	5		
4	Süreksizliklerin durumu		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 eklemler, sürekli eklemler	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm kalınlıkta veya açık eklemler > 5 mm devamlı süreksizlikler		
	Puan		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk		
		Oran: Eklemdeki su basıncı / Ana asal gerilme	Veya 0	0.0-0.1	Veya 0.1-0.2	Veya 0.2-0.5	Veya > 0.5		
		Genel koşullar	Veya Tamamen kuru	Nemli	Veya Islak	Veya Damlama	Veya Su akışı		
	Puan		15	10	7	4	0		

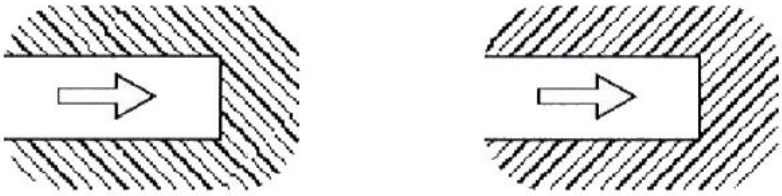
* İlgili abaklardan tayin edilir

(1 MPa = 10.197 kgf/cm²)

B. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM ve EĞİM YÖNÜNÜN ETKİSİ

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

Doğrultu tünel eksenine dik



Eğim yönünde ilerleme

Eğime karşı yönde ilerleme

C. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME

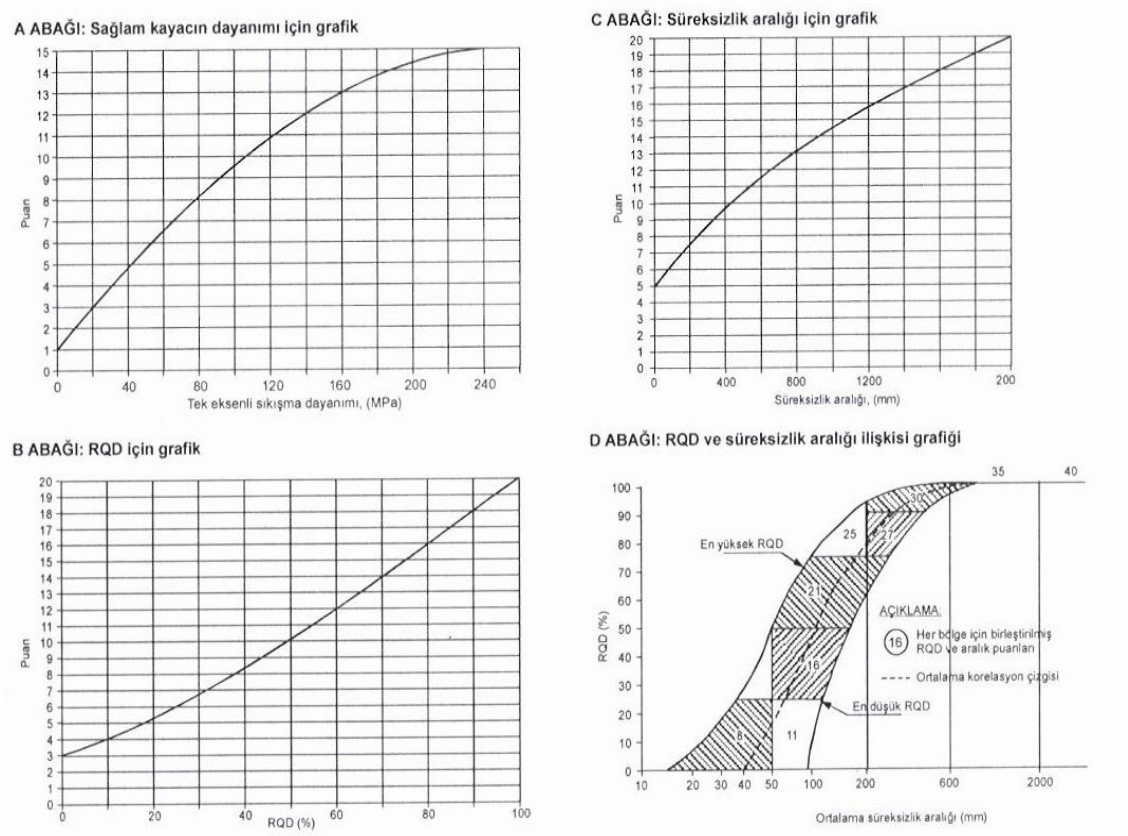
Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi		Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

D. 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

E. KAYA SINIFLARININ ANLAMI

Sınıf No.	I	II	III	IV	V
Ortalama desteksiz kalabilme süresi	15m açıklık için 20 yıl	10m açıklık için 1 yıl	5m açıklık için 1 hafta	2.5m açıklık için 10 saat	1m açıklık için 30 dakika
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı (derece)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15



Şekil 3.4 RMR kaya kütlesi sınıflama sisteminde bazı parametreler için puan belirleme abakları (Bieniawski, 1989'dan)

Tablo 3.7 Süreksizliklerin durumunun puanlandırılması için kılavuz (Bieniawski, 1989)

Parametre	Puanlar				
Süreksizliğin uzunluğu (devamlılık)	< 1 m (6)	1-3 m (4)	3-10 m (2)	10-20 (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 bozumuş (3)	Bozunmuş (1)	Çok bozunmuş (0)

Parametre puanları parantez içinde verilmiştir.

Sistemin çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır.

Tablo 3.8 Jeomekanik kaya sınıflaması (RMR) için kömür işletmelerinde süresizlik yüzeyi koşullarını değerlendirme tablosu (Bieniawski, 1999)

Süreksizlik yüzeyinin açıklığı	Kapalı	Kılcal	< 1 mm	1-5 mm	> 5 mm
Yüzey pürüzlülüğü	Çok pürüzlü	Pürüzlü	Düz	Kaygan	Kaygan
Yüzeyin bozunması	Taze, sağlam	Çok az bozunmuş	Fazla bozunmuş	Fazla bozunmuş	Tamamen bozunmuş
Dolgu	Yok	Yok	Çok az kil	Sıkı kil, fay malzemesi	Yumuşak kil, fay malzemesi
Süreklilik	Tüm tabakalanma yüzeyleri sürekli				
Puan	30	25	20	10	0

Gerekli düzeltmelerin yapılmasından sonra elde edilen RMR puanı aşağıda belirtilen başlıca amaçlara yönelik olarak kullanılabilir:

a. Tablo 3.6'nın D ve E bölümlerinden kaya kütlesi sınıfı, kaya kütlesi sınıflarının belirli boyutlardaki yeraltı açıklıkları için desteksiz durabilme süresi ve kohezyonu ile içsel sürtünme açısı değerleri kabaca belirlenebilir.

b. RMR değeri, Tablo 3.9'da verilen tünel destek sistemini belirleme kılavuzu kullanılarak destek sisteminin tayinine olanak sağlar. Tablo 3.9, klasik delme ve patlatma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen kazılarda uygulanır.

c. Herhangi bir yeraltı açıklığının belirlenmiş boyutu için RMR puanı kullanılarak o açıklığın desteksiz kalma süresi Şekil 3.5'deki grafikten belirlenir.

d. RMR değeri kullanılarak destek yükü aşağıdaki ifadelerden tahmin edilebilir (Ünal, 1983).

Buna göre;

$$P = \left(\frac{100 - RMR}{100}\right)\gamma B \qquad (3.1)$$

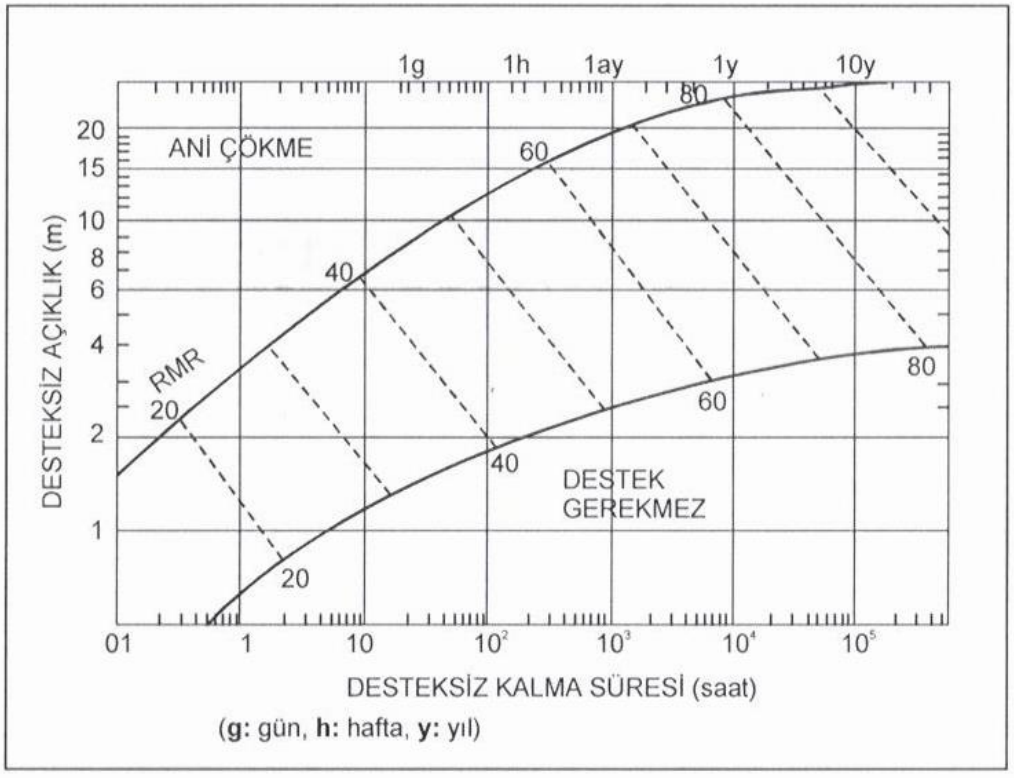
P: Destek yükü (kN)

B: Tünelin genişliği (m)

γ: Kayacın birim haim ağırlığı (kN/m^3)

Tablo 3.9 RMR sistemine göre tünel kazıları ve destekleri için kılavuz

KAYA KÜTLESİ SINIFI	BİRİNCİL DESTEK (TAHKİMAT) Kazı	Kaya sapmaları* (10 m genişlikteki tünel için uzunluk)	Şatkrit (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, komple destek. Aynaya 20 m mesafede	Kemerin her 2-3 m'sinde yer yer saplama, tel kafeslerle 2-2.5 m aralıklı.	Gerektiğinde tavan kemerinde 50 mm	Yok
III	Tavan kemeri ve tabandan ilerleme Tavandan 1.5-3 m ilerleme. Komple destek. Aynaya 10 m mesafeye kadar gerekli	3-4 m uzunlukta sistematik saplamalar, kemerde tel kafesli duvarlar ve kemerde 1.5-2 m aralıklı.	Tavan kemerinde 50-100 mm ve yan duvarlarda 30 mm	Yok
IV	Tavan kemeri ve Tabandan ilerleme. Tavandan 1.0-1.5 m ilerleme. Kazıya uygun şekilde aynaya 10 m mesafeye kadar, gerekli tahkimat.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 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 şatkrit uygulanmalı.	Tel kafesli duvarlarda ve kemerde 1-1.5 m aralıklı, 5 m uzunlukta sistematik saplama.	Tavan kemerinde 150-200 mm, yan duvarlarda 150 mm, aynada 50 mm.	Çelik iksalı, 0.75 m aralıklı orta-ağır traversler



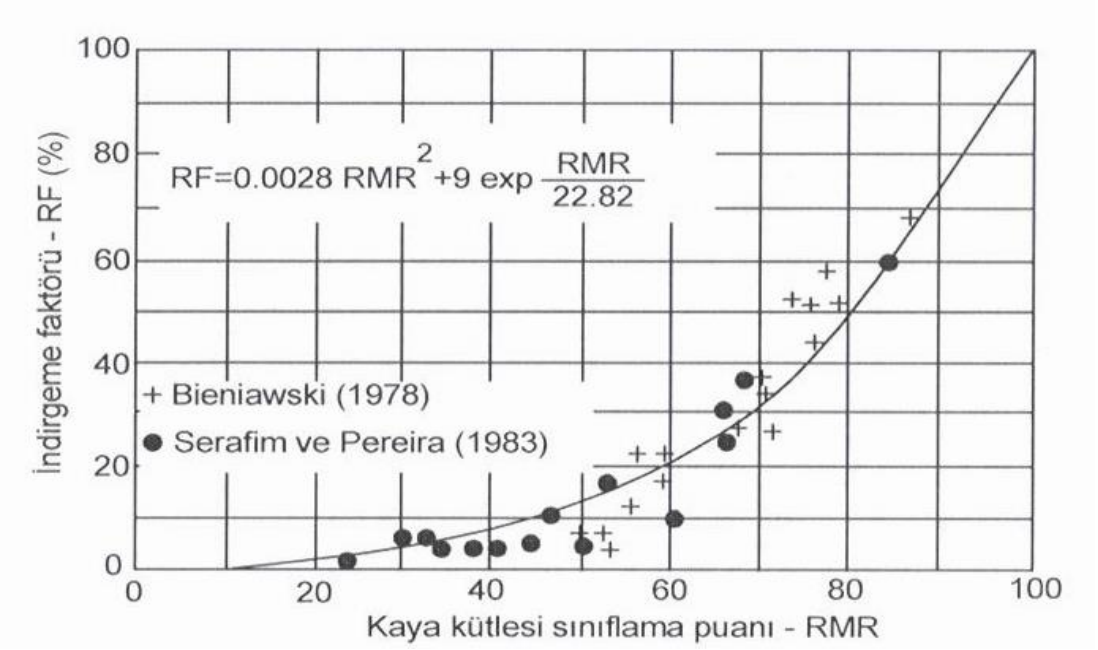
Şekil 3.5 RMR sınıflama sistemine göre yerlaltındaki boşlukların desteksiz kalabilme süresini tahmin abağı (Bienawski, 1989)

e. RMR Sınıflama Sistemi'nde kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modüllerinin kestiriminde aşağıdaki eşitlikten yararlanılabilir.

$$E_M = 2RMR-100 \quad (3.2)$$

$$E_M = 10^{(RMR-10/40)} \quad (3.3)$$

Bununla birlikte, yukarıdaki eşitlikler kullanılırken dikkatli olunması önerilir. Çünkü bazı durumlarda bu eşitlikler, sağlam kayacın laboratuvarda tayin edilen deformasyon modülünden daha yüksek değerler verebilmektedir. Bu nedenle kaya kütlelerinin deformasyon modüllerinin belirlenmesinde, sağlam kayacın tayin edilmiş deformasyon modülüne, Şekil 3.6'daki grafikten RMR puanına göre belirlenen bir azaltma faktörünün (RF) uygulanması daha gerçekçi sonuçlar verebilmektedir.



Şekil 3.6 Kaya kütlelerinin elastisite modülü için indirgeme faktörü grafiği (Nicholson ve Bieniawski, 1990)

Sistemler arası dönüştürme (RMR ve Q sistemlerinin ilişkisi); Q sınıflama sistemindeki Q indeksi ile RMR değeri arasında dönüşüm eşitliklerinin kullanılması ile yapılmaktadır. Böylece sistemlerden birisi kullanılarak belirlenen sınıflama puanı esas alınıp, diğer sistemin sınıflama puanını elde etmek mümkün olabilmektedir. Buna göre ilgili dönüştürme eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (3.4)$$

3.6 Q Sınıflama Sistemi

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen bu sistem, Barton vd. (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin destek sistemlerinin seçimine yönelik bölümü Grimstad ve Barton (1993) tarafından revize edilmiştir.

Bu sınıflama sistemine göre, Q değerinin hesaplanması için kullanılan 6 parametre Ek B'de yer alan Tablo B.1'de verilmiştir.

3.7 Tünel Kazıları İçin Yeni Avusturya Kaya Sınıflama Sistemi (Pacher ve Rabciewicz Sınıflaması)

Bu sistemde; kaya kütlesinin arazide ölçülen ve gözlenen özellikleri ile laboratuvar deneyleriyle tayin edilen dayanım parametreleri esas alınarak, kaya kütlesinin muhtemel davranışı ve destekle ilgili hususlar ana hatlarıyla belirlenir.

Profesör Rabcewicz'in 1963 yılında "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi" adını verdiği ve ana hatlarıyla 1957-1965 yıllarında geliştirilen bir tünel açma yöntemidir.

Bu yöntem ne bir kazı ne de bir sağlamlaştırma yöntemidir. Tünel inşaatının her aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir felsefedir. Tünelcilikte; yeni bir anlayışın ortaya çıkmasına yol açan "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi" özellikle çürük taş ve zeminlerde diğer yöntemlere göre büyük başarı göstermiştir Bu yöntem; kaya ortamına kendisini taşıtma ilkesine dayanmaktadır.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ekonomi ve emniyet göz önünde tutularak açım sırasında oluşan bu ikincil deformasyon ve gerilmelerin yeterli ölçüm ve gözlemlerle izlenerek kazı ve iksa çalışmalarının denetlenmesi ve yönlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem deformasyonların kontrolünü iki yoldan öngörmektedir. Birincisi; deformasyonlar kaya veya zeminin ilkel stabilitesini ve basınca dayanımını gerekenden fazla zayıflatmayacak şekilde minimumda tutulmalıdır. İkincisi ise; deformasyonlar kaya veya zemin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturacak kadar büyük olmalıdır. Böylece kazı ve destekleme masrafları en aza indirilebilir. Bu iki deformasyon kontrolü sürekli biçimde yapılarak optimal bir çözüm elde edilir. Ancak bu esnada emniyet her zaman göz önünde bulundurulmalıdır.

Yöntemin başarılı olabilmesi için şu ön şartlar sağlanmalıdır:

- Zemin veya kayanın geomekanik davanışları göz önüne alınmalıdır.
- Zamanında ve uygun destek sistemi kullanılarak zaralı gerilme ve deformasyon durumlarından kaçınılmalıdır.
- Özellikle tünel taban kaplamasının tamamlanmasıyla oluşan silindirik yapı bir tüpün statik özelliklerini oluşturmaktadır.
- İksa sistemi müsaade edilebilir deformayonlara göre seçilmeli ve boyutlandırılmalıdır.
- İksa sisteminin optimizasyonu için sürekli denetlemeler ve genel kontrol ölçümleri yapılmalıdır.
- Dikkatli ve tedbirli kazı çalışması yapılmalıdır.
- Gerilme dağılımı değişimleri, anizotropi ve değişik kaya tabakaları gibi geomekanik koşullara uyum sağlayabilecek en iyi tünel en kesiti seçilmelidir.
- Kazı yöntemi, karşılaşılan kaya veya zemin özelliklerine uyum sağlamalıdır. Tünel cidarının kendi kendii desteksiz tutabilme süresi ve bağlantılı olarak kazı ilerleme hızı işin işlemesi ve ekonomik iksa yönteminin seçilmesinde önemli etkenlerdir.

Profesör Rabcewicz 1964-1965 yıllarında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemini tanıtan üç makalesini Water Power dergisinde yayınlamıştır. Bu makalelerde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin çoğu kez sanıldığı gibi yanlızca bir iksa yöntemi olmayıp, yeraltındaki tüm etkilerin anlaşılmasından sonra en uygun organizasyon, kazı ve iksa işlemlerinin yapılarak zemin veya kaya ortamının kendi kendini taşıtmayı amaçlayan bir tünel inşa anlayışı olduğu vurgulanmaktadır. Yani kazı veya zemin yapısı iksa sisteminin bir parçasıdır. Bu tünel açama yönteminde ana ilke, en uygun kazı ve iksa yöntemlerinin seçilerek kazı sonrasında ilkel gerilmelerinin değişmesiyel oluşan ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya veya zemin yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kaya (zemin) yapısının ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendisini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturulmasını sağlamaktadır.

Yöntemin amacı, kazı sonrasında zemin veya kaya basıncına, mutlak rijit iksa sistemleri ile karşı koymak değildir. Bu nedenle, rijit tahkimat elemanları ve kalın kaplamaların kullanımını istemez. Bunlar ancak, yöntemin yeterli hız ve titizlikte uygulanmadığı ve dolayısıyla, kaya veya zeminin taşıma niteliklerinin tümüyle yitirildiği veya aşırı derinliklerdeki, ya da yüksek tektonik gerilmelerin etkili olduğu patent, plastik ortamlarda zorunlu olarak devreye girer.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ana ilkelerini aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür:

- Kayanın mukavemetini korumak ve harekete geçirmek; için ilk iksa (ön sağlamlaştırma) kayanın kendisini desteklemesine yardımcı olması için oluşturulur. Bu görevini tatmin edici bir şekilde yerine getirmesi için ilk iksanın, uygun bir yük deformasyon özelliğinin olması ve tam zamanında yerleştirilmesi gerekir.
- Tünelin esas taşıyıcı kısmı, kazıyı çevreleyen zemin veya ana kayadır. Bu nedenle iksa sistemini oluşturan püskürtme beton, ankraj, çelik hasır ve çelik bağlar ile zemin veya kaya birleşik bir yapı olarak tasarlanmalıdır.
- Bu gözlemler sadece tünelin davranışını, tüneldeki deformasyonların ve iksada biriken gerilmelerin aletlerle ölçülmesidir. Güvenliğini kontrol etmek için değil, aynı zamanda ikincil iksanın niteliğini saptamak için de kılavuz olur.
- Zemin veya kayanın ilk sağlamlığını koruyabilmesi için üç eksenli gerilme durumu zamanında oluşturulmalıdır. Zemin veya kayanın taşıma direncini düşürecek tek ve iki eksenli gerilme ortamını oluşturmaktan kaçınmalı ve zaralı gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir.
- Zemin veya kayanın kazı sonrasındaki deformasyon davranışının önceden tahmin edilebilmesi için kaya numuneleri üzerinde laboratuvarda ve arazide deneyler yapılmalıdır.Böylece deneysel çalışmalara özen gösterilmesi sonucu kaya kütlesi tanınmış olur. Buradan elde dilen karakteristikler, bunların uzun vadede değişebileceği ve yer altı suyunun etkisi hesaba katılmalıdır.
- İksa yapısının elastik olması önemlidir. İç ve dış kaplama ekonomik ve emniyetli olacak şekilde mümkün olduğunca ince kabuk şeklinde ve bükülebilir esneklikte olmalıdır. Böylelikle kaplama içinde eğilme momentlerinin oluşması ve bunların meydana getireceği çekme ve kesme kırıkları önlenebilecektir. Ayrıca dış

kaplamadan gelebilecek yüklerin kesmeye çalışması için, iç kaplama dış kaplamaya sürtünmesiz bir şekilde ve tam yüzeyine sıkıca oturtulmalıdır.

- İksa işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır. Bunu sağlamak için iksa işlemlerine ne çok erken, ne de çok geç başlanmalı ve iksa direncini oluşturan yapının ne çok rijit ne de çok zayıf olmasına özen gösterilmelidir.
- Tam kapanmamış bir çember, taşıyıcı halka durumunda olmadığı için, gevşemeleri arttıran ve boşluğu çevreleyen kaya veya zemini plastikleştirecek taşıma direncini düşüren bir etken olmaktadır. Ayrıca tabanda bırakılacak açıklıklar, taban kabarmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle iksa edilmemiş tünel boyu kaya veya zemin tipine göre fazla uzun olmamalıdır. Ayrıca üç boyutta bir tüp oluşturan bu yapının göçmemesi için taban kaplaması hızla tamamlanmalıdır. Mümkünse kazı tüm kesite yapılarak, en kısa sürede iksası yapılmalıdır.
- Dış kaplama ve çevresindeki yer altı formasyonunun deformasyonları iç kaplamanın yerleştirilmesinden önce durdurulmuş, yani ikincil gerilme durumu dengeli son şeklini almış olmalıdır. İç kaplamanın görevi güvenliği arttırmak ve mimari görünümü sağlamaktır. Ancak agresif yerlatı sularının bulunduğu durumlarda iç kaplama tüm yükleri alacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Bu durumda dış ve iç kaplama arası su geçirmeyecek biçimde izole edilmelidir. Ayrıca ankraj ve korozyona karşı korunmalıdır.
- İnşa ve kullanım süresince yönlendirme ve denetleme ölçümlerine devam edilmelidir. Tünel duvarlarındaki ve onu çevreleyen kaya veya zemin içindeki deformasyonların ve gerilmelerin ölçülmesi Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde büyük önem taşımaktadır. Ön varsayımlara göre yapılan projelendirme çoğunlukla yeni etmenlerin ortaya çıkmasıyla değiştirilmesi gerekir. Bu nedenle NATM'de bir projden değil, adım adım ve yer yer değişen bir projeler sisteminden söz edilmelidir. Bu da tecrübeli bir müteahhit organizasyonu ve mühendis grubu gerektirmektedir.
- Tek dezavantajı, malzeme sarfiyatının fazla oluşudur. Bu dezavantaja rağmen yöntem, derin ve şehir içi sığ metro tünelleri inşaatında sıkça kullanılmaktadır. İstanbul Metro Tünelleri de bunun en güzel örneklerinden birisidir.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin esaslarını ise aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür:

- Tünelde, esas olarak yükü taşıyan kısım, tüneli çevreleyen kayanın kendisidir.
- Kayanın orijinal sağlamlığını tünel açımından sonra da korumaktır.
- Gevşemelerin olabildiğince önüne geçilmelidir. Çünkü gevşemeler kayanın taşıma direncini arttırır.
- Kayayı deformasyondan korumak için, tek ve iki eksenli gerilme ortamı oluşturmaktan kaçınmak gerekir.
- Koruyucu zon kayacın taşıma direncini azaltmaksızın oluşturulmalıdır.
- Sağlamlaştırma işlemleri tam zamanında ve gerekli esneklikte yapılmalıdır.
- Kayacın kendini tutma süresi doğru olarak tahmin edilmelidir.
- Kayacın kazı sonrasındaki deformasyon davranışının önceden belirlenmesi için laboratuvarda ve arazide deneylerin yapılması ve deneme galerisinde konverjans ve deformasyonların ölçülmesi zorunludur.
- Sağlamlaştırma önlemi, boşluk yüzeyini bağlayacak biçimde olmalıdır. Bunu sağlayan en başarılı yöntem, kısa sürede pirizlenen püskürtme betondur.
- Sağlamlaştırma toplamları, ince kabuk şeklinde olmalıdır.
- Sağlamlaştırma elemanları olarak; tel kafes, kaya bulonu ve kafes donatı kullanılmalıdır.
- Sağlamlaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmaktadır.
- Tünel, statik bakımdan taşıyıcı zon ile sağlamlaştıma kabuğunun oluşturduğu bir halkadır.
- Sağlamlaştırma kabuğu, kapalı bir halka şeklinde olmalıdır.
- Halka en kısa zamanda oluşturulmalıdır.
- Boşluğun açılması; ilkel gerilme durumunu bozarak, yeni bir gerilim dağılımı oluşturur. Bu durumu en az değiştiren kazı ilkesi ise sekonder durumun bir defa oluşturulmasıdır.
- Tünel açma yönteminin uygulanış biçimi yapının güvenliği açısından önemlidir.

- Tünel en kesiti daire veya elips şeklinde olmalıdır. Çıkıntılı, çentikli ve köşeli olmamalıdır.
- Kalıcı sağlamlaştırma kabuğu ince olmalı ve ön sağlamlaştırma kabuğu ile sürtünmesiz fakat sıkı bağlı olmalıdır.
- Ön sağlamlaştırma işlemleri ile yapının stabilitesi sağlanmış olmalıdır.
- Yapının süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır.
- Çatlak suyu basıncının, sistemin taşıma direncini düşürmemesi için, suyun drene edilmesi gerekir.

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi; jeolojik etüdü, statik hesabı, kazısı, sağlamlaştırması ve yerinde yapılan ölçümleriyle bir bütündür. Bunlardan birinin yerine getirilmemesi veya yeterli olmaması önemli güçlüklere neden olabilmektedir.

3.7.1 Tünelin Desteklenmesi

Destekleme iki aşamada yapılmaktadır. Birinci aşamada çelik iksa, kaya bulonu, hasır çelik ve püskürtme beton kullanılmakta, ikinci aşamada betonarma bir iç kaplama yapılmak suretiyle tünelin emniyetli ve konforlu kullanımı sağlanmaktadır. Tünelin dış kaplamasının ana elemanı püskürtme beton, donatı olarak hasır çelik kullanılmıştır. Yüklerin taşınması daha ziyade püskürtme betonu üstlenmekle beraber, desteklemede iksa ve kaya bulonunun da önemi büyüktür.

3.7.2 Tünellerde Sağlamlaştırma Elemanları

Bir sağlamlaştırma yöntemi öncelikle iki şartı yerine getirmelidir.

- Taşıyıcılık şartı: Üzerine gelen yükleri tünelin kullanım şartlarının belirlediği deformasyon limitleri içinde emniyetle taşımalıdır.
- Ekonomiklik şartı: Malzeme ve işçilik masrafları minimum olmalıdır.

Tünel kazılırken kaya kütlesi mümkün olduğu kadar az rahatsız edilmelidir. Çünkü tünelde yükü taşıyan kısım yine kayanın kendisidir. NATM'nin temel ilkesi budur.

Uygulanacak olan sağlamlaştırma yöntemi, formasyondaki jeolojik süresizliklere bağlıdır. Kazıdan hemen sonra tünel ve çevresindeki kayada kendini tutabilme süresi içinde gevşemeler başlamaktadır. Bu gevşeme, zayıf kayaçlarda tünel açıklığı gevşeyen bloklarla dolana kadar devam eder. Sağlam kayaçlarda ise kemerleşme gelişine kadar devam eder. Bu nedenle sağlamlaştırma işlemi kendini tutabilme

süresinin bitiminden önce yapılmalıdır. Bu süre içerisinde yükler ve deformasyonlar artacağından, sağlamlaştırma elemanları, kaya yüzeyine mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilerek, destek üzerine gelen yüklerin minimumda tutulması sağlanır.

Tünellerde kazı sonrası sağlamlaştırma geçici ve kalıcı sağlamlaştırma olmak üzere iki kısımda gerçekleştirilmektedir. Geçici sağlamlaştırma işlemi; kafes donatı, çelik hasır, püskürtme beton, kaya bulonları ve sürenler gibi sağlamlaştırma elemanlarıyla gerçekleştirilmektedir. Kalıcı sağlamlaştırma ise nihai beton kaplama ve en son yapılacak olan enjeksiyonlarla gerçekleştirilmektedir.

Sağlamlaştırma, tünellerde duvar ve tavan emniyetini sağlama işlemidir. Gerek tünellerin açımı sırasında, gerekse bittikten sonra duraylılık ve güvenlilik geçici veya kalıcı sağlamlaştırma yöntemlerine göre uygulamalar yapılmasıyla sağlanır.

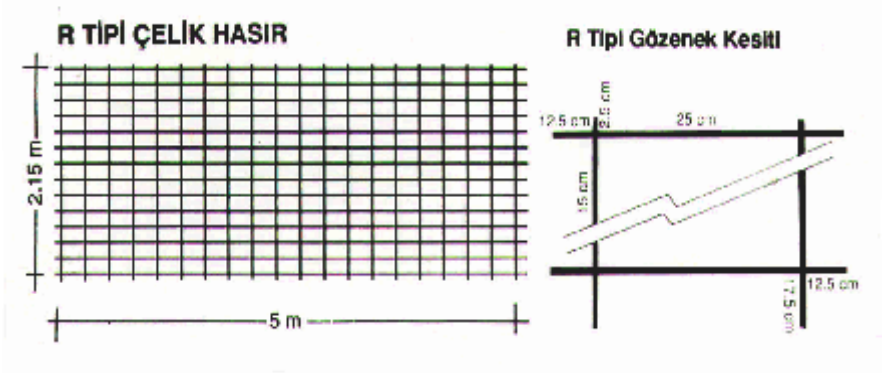
Tünellerde sağlamlaştırma sadece duraylılığı değil aynı zamanda biten tünelin güvenli kullanımını da sağlamaktadır.

Tünellerdeki sağlamlaştırma işlemi, tünelin inşa hızını ve maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir.

3.7.2.1 Tel Kafes

İstanbul Beykoz Bekleme Tünelin'de R188 tipi tel kafes kullanılmıştır. Ek sağlamlaştırma amacıyla kullanılan bu tel kafeslerin çubuk çaplarının boyu 6 mm., eni 5 mm. olup, kafes boyutu ise 5 m. x 2.15 m.'dir ve bu da 15 cm. x 25 cm. karelajlardan oluşmaktadır.

.



Şekil 3. 7 R tipi çelik hasır

Tel kafesi tanımlayan özellikler, karelerin ebadı, komple hasırın ebadı, tellerin kalitesi ve cinsidir. Genellikle kafesin esnek olması ve tünelin şekline kolaylıkla

uyum sağlaması istenmektedir. Bunların sağlamlaştırma işlemindeki görevi, sağlamlaştırma sırasında düşebilecek olan kaya parçalarının düşmesini önlemek ve desteklemeyi arttırmaktır. 4. tip formasyonda tek kat, 5. tip formasyonda ise çift kat hasır çelik yerleştirilmiştir. Tel kafesin montajında , iki uç birbirinin üstüne minimum 30 cm. binicek şekilde tesis edilmiştir. Tel kafes montajında mutlaka dikkat edilmesi gereken iki durum vardır. Bunlar;

- Tel kafesler zemine mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilmelidir.
- Tel kafes mutlaka çok stabil bir şekilde monte edilmelidir.

3.7.2.2 Çelik İksa (Kafes Donatı)

Çelik iksa, genellikle montaj hızı açısından birbirine bağlanan iki eşdeğer demir parçadan oluşmaktadır. İki parça tam tünel tavanının ortasında birleştirilir ve dikmeler tabanda topoğrafik ölçümlerle kotları belirlenen çukurları ayakları denk gelicek şekilde inşa edilmektedir. Çelik iksanın kazıdan sonra mümkün olan en kısa zarfında tesis edilmesi şarttır.

Çelik iksanın görevleri şunlardır:

- Kazıdan sonra olabilecek küçük kaya düşmelerini önleyerek çalışma emniyetini kontrol eder.
- Sürgü çubuğuna destek verir.
- Bulonların ön gerilme kuvvetlerini dağıtır.
- Püskürtme betonu prizini alana kadar, kayanın gevşemesine engel olur.
- Tünel kesitini korur.
- Örselenmiş ya da hareket halindeki zemin / kayanın ağırlığını arttırmak.
- Kısmi bir dengeleme basıncı gerçekleştirmek.
- Kırılma ve genleşme tehlikesini önlemek.
- İksa olarak donatıdan bükülmüş bir kafes kemer kullanılırsa hem püskürtme betonun tatbiki kolaylaşmakta, hem de püskürtme betona ek bir donatı elde edilmektedir.

3.7.2.3 Püskürtme Beton (Shotcrete)

Yüzeylere basınçlı hava ve sudan istifade edilerek püskürtme yapılarak betondan bir katman oluşturulmaktadır. Püskürtme betonun ıslak ve kuru karışım olmak üzere iki uygulaması vardır. Bu farklı uygulamalar su, çimento ve agreganın karışım yerine göredir. Islak karışımda su, çimento ve agrega püskürtme makinasına gelmeden önce karışmakta; kuru karışımda ise karışma işlemi püskürtme memesinin ucunda gerçekleşmektedir.

Kuru proses püskürtme betonun şu özellikleri mevcuttur:

1. Uygulamada yaş prosese göre daha esnek donanımlara sahiptir.
2. Karıştırma donanımları küçük ve ucuzdur.
3. Düşük su / çimento oranlarında çalışmak mümkündür.
4. Toplam maliyeti düşüktür.
5. Su miktarı ayarlanabilir.
6. Toz problemi vardır.
7. Su karıştırma üniform olarak dağılmayabilir.

Beykoz Bekleme tünelinde shotcrete kuru karışım olarak uygulanmaktadır. Önceden hazırlanan beton karışımının basınçlı hava ile cidara yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir tahkimat türüdür. Kuru proses yönteminde, agrega ve çimento karışımı kuru olarak beslenir. Kuru karışım yeryüzünde beton santralinde hazırlanmaktadır. Karışım 30 cm. bir boru sistemiyle yer altına indirilmekte, transmixer'larla yüklenmekte ve shotcrete makinasının bulunduğu bölgeye taşınmaktadır. Şekil 3.8'de transmixer gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Transmixer

Tranmixer'dan shotcrete makinasının beslenen malzemeye priz hızlandırıcı katkı malzemesi ilave edilmektedir. Püskürtme makinası olarak Aliva püskürtme beton makinası kullanılmaktadır. Shotcrete malzemesi makinasının çıkışında kauçuk hortum yardımıyla tatbik edilecek yüzeye taşınmaktadır. Hortumun 1 m. gerisinde su ilavesi vardır. Karışım hortum içinde dolaşımı ve yüzeye püskürtülmesi 6 atm basıncındaki hava ile sağlanmaktadır. Basınçlı hava, kompresörlerden sağlanmaktadır.



Şekil 3.9 Atlas Copco kompresör

Kayaç yapısının durumuna göre, püskürtme beton makinasının kullanılmadığı durumlarda Mai-Pump enjeksiyon seti kullanılmaktadır. Şekil 3.10 'te püskürtme beton makinası ve enjeksiyon seti yer almaktadır.



Şekil 3.10 Aliva marka püskürtme beton makinası ve Mai-Pump marka enjeksiyon seti

Uygulamalarda kullanılan karışım oranları şu şekildedir:

- Çimento % 15-20
- İri agrega % 30-40
- Kum % 40-50
- İlk donma hızlandırıcı % 3-5
- Su / çimento oranı % 30-50

Genelde püskürtme betonda aranılan özellikler ise şunlardır:

a) Püskürtme sırasında sıçrama en az olmalı,

b) Beton 4-8 saatte mukavemet kazanmalı,

c) Priz hızlandırıcı kullanılmasına karşılık 28 günlük direncine ulaşabilmeli,

d) Direnci, uzun sürede ve ortama göre değişmemeli,

e) Ucuz olmalıdır.

Püskürtme işlemi daima yüzeye 90 derece dik olarak uygulanmaktadır. Püskürtme memesinin yüzeye göre eğimi arttıkça sıçrama miktarı artmaktadır. Püskürtme işlemi ideal olarak 1-1.5 metre mesafeden yapılmalıdır.

Püskürtme beton, kazı yapıldıktan sonra ortaya çıkan çatlaklı kayanın hava ile temasını keserek durylılığı sağlar. Bu nedenle kazı yapıldıktan hemen sonra uygulanmalıdır. Püskürtme beton tatbiki yapılırken şu hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Yüzey her türlü serbest malzemeden temizlenmeli, eğer su geliri varsa uygun yöntemlerle drene edilmelidir.
- Tel kafes yüzeye 3-5 cm'ye kadar yaklaştırılmalı ve rijit bir şekilde monte edilmelidir.
- Malzemenin karışımı ve katkı maddesi kullanımında homojenlik sağlanmalıdır.
- Hava ve su miktarı çok iyi ayarlanmalıdır.

Genelde malzeme kaybına etki eden temel parametreler şunlardır:

1) Yataydan yapılan açı:

Duvara dik tutulan hortum düşey düzlem içinde tavana doğru gezdirilirse maksimum kayıp tavanda, minimum kayıp zemine paralel tutulan doğrultuda olur.

2) Hortumun yatay düzlem iinde gezdirilmesi:

Hortum yerden belli bir yükseklikte yatay bir düzlem üzerinde gezdirilirse malzeme kaybı hortum doğrultusunun tünel yüzeyi ile yaptığı açının küçülmesiyle artar. Yani hortum duvarla paralelliğe yaklaşırsa kayıplarda maksimuma yaklaşır.

3) Beton et kalınlığı

Et kalınlığı arttıkça malzeme kaybı azalır.

3.7.2.4 Kaya Bulonları

Kaya bulonları; kayayı çekme gerilmelerini taşıyabilecek şekilde sağlamlaştırmak, çekme gerilmelerini ana kayaya iletmek, süreksizliklerin sürtünme direncini arttırmak veya kayada üç eksenli gerilme durumunu oluşturmak için yer kabuğu içerisine bağlanan demir çubuklardır. Bulonlar aynı zamanda tünel kazısı esnasında duvar ve tavanda kopmak üzere olan kayaların kopmalarını önleyerek emniyeti arttırırlar.

Bunlar Beykoz Bekleme Tüneli'nde tek başına tahkimat elemanı olarak kullanılabildikleri gibi; iksa, çelik hasır ve shotcrete den oluşan tahkimatın tamamlayıcı elemanı olarak da kullanılırlar. Bulonlar aynı zamanda tünel kazısı esnasında duvar ve tavanda çözülmüş ve kopmak üzere olan kayaların yerlerinde kalmalarını sağlayan güvenliği arttırıcı elemanlardır.

Bulonların karakteristiklerini çeliğin cinsi, çapı, boyu, diş boyu, kullanılacak plakaların şekli, ebadı ve kalınlığı, somunun tipi ve ölçüleri ile bulonun kayaya tespit şekli belirlemektedir.

Beykoz Bekleme Tüneli'nde bir kaya bulonu belli çap ve uzunlukta yüksek mukavemetli tor çelik olup, ucu reçine enjeksiyonu ile ankre edilmiş, tüm boyunca reçine enjeksiyonla yapışmış, bir başlık kevhası, yarı küresel conta ve somun ile teçhiz edilmiş olup, belli bir yükle öngermeye tabi tutulur.

Bir ankraj demiri, belli çap ve uzunlukta yüksek mukavemetli tor çelikten imal edilen ve dışarıda kalan kısmı ya düz ya da eğrilmiş olup, tamamen ya reçine ile ya da çimento ile enjekte edilir. Kaya çivilerinin ne aksesuarları vardır ne de öngermeye tabi tutulur.

Kendi delerek giden ankraj demiri içi boş bir çivi olup beklenilen zemin koşullarında belli bir uzunlukta delme kapasitesine sahiptir. Kaya çivisi, sertleştirilmiş delici bir istavroz uca sahip olup sondaj işlemi sırasında suyun devri daim yapması mümkündür. Kendi açtığı delikten çıkarılmadan o pozisyonda tamamen enjekte edilebilecek şekle sahiptir.

Kaya bulonları ve çivileri karakteristik dayanımı 450 MPa'dan az olmayan sıcak çekilmiş tor çelikten imal edilmiş olup; kaya bulonları için başlık levhaları, yarı küresel contalar ve somunlar öngerme koşullarına uyacak şekildedir.

Beykoz Bekleme Tüneli'nde reçineli bulonlar kullanılmaktadır. Bu bulonlarda bağlayıcı eleman olarak enjeksiyon yerine hazır kartuşlar içinde bulunan reçine kullanılmaktadır.

Jumbo delici ile açılan bulon deliğine, kaya bulonları bulonun maksimum çapından 10-15 mm daha büyük çaplı deliklere yerleştirilecektir. Şekil 3.11 'de Jumbo delici gösterilmektedir.



Şekil 3.11 Atlas Copco Boomer 282 Jumbo Delici

Daha sonra bulon döndürülerek deliğe itilir ve delik içinde bulunan reçine kartuşlarının parçalanması sağlanır. Döndürme işlemi aynı zamanda reçinenin bulon etrafına homojen olarak dağılmasınıda sağlar.

Delikler, bulonun enjekte edilen uzunluğundan 100 mm'den daha uzun olmayacaktır. Deliğin toplam uzunluğunda bulonun etrafını tamamen dolduracak şekilde yeterli miktarda kartuş kullanılacaktır.

Bulonun kolon kısmı yavaş prizlenen reçine kartuşları ile doldurulurken, ankraj zonundaki uç kartuşları çabuk prizlenen reçineli tipten olacaktır. Öngerme işleminin, uç kartuşlarının prizlenmesinden sonra, ancak kolon enjeksiyon karışımının prizlenmesi başlamadan önce yapılması dikkatelice kontrol edilecektir. Kaya bulonlarında öngerme 10 tonla yapılacaktır.

Tünelde ayrıca Volvo EL 70 tipi Loader kırıcı'da kullanılmaktadır. Bu kırıcı vasıtası ile büyük çaptaki kayaçların kırılması sağlanmıştır. Şekil 3.12'de bu loader gösterilmektedir.



Şekil 3.12 Volvo El 70 Loader

3.7.2.5 Sürenler

Zayıf formasyonlarda ve özellikle sulu zeminlerde, kazıya başlamadan önce dökülmeleri önlemek için süren uygulaması yapılmaktadır. Süren delikleri kazıya girilmeden önce, iksası yerleştirilmiş olan have de ve yukarı doğru meyilli olarak açılmaktadır. Süren boyları yaklaşık olarak 5 metre'dir. Delikler jumbo ile delinmektedir. Daha sonra sürenler bu deliklere yerleştirilerek tekrar jumbo ile itilmektedir. Şekil 3.13'de bulon çakımı gösterilmektedir.



Şekil 3.13 Bulon çakımı

4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Beykoz Bekleme Tüneli'nde yapılan arazi çalışmalarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

4.1 Kayaç Malzemesinin Özellikleri

Tünel kazısı esnasında Magmatik ve Sedimanter tip kayaçlara rastlanmıştır. Özellikle Magmatik kökenli damar kayaçlarından Diyabaz, Magmatik kökenli volkanik kayaçlardan Andezit, Kırıntılı tortul kayaçlardan Konglomeratik Kumtaşı, Arkozik Kumtaşı, Kiltaşı ve Kuvars gözlenmiştir. Ekte verilen günlük ayna jeolojisi haritalarında da gözlenen bu kayaçlarla beraber zaman zaman fay zonları ile süreksizliklerle de kaşı kaşıya gelinmiştir. Kayaçlar genelde dayanımlı, az veya orta derecede ayrışmış, çatlaklı ezik zonlardan oluşmaktadır. Bu ayna raporlarına bağlı olarak elde edilen RQD ve Q değerlerine göre kaya destekleme sınıfları oluşturulmuştur.

4.2 Yerinde Yapılan Dayanım Testleri

Ayrıca Tünel de birtakım dayanım testleri uygulanmıştır. Schmidt Sertlik Çekici deneyi, Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme deneyi ve Tek Eksenli Basınç deneyi bu deneyler arasındadır.

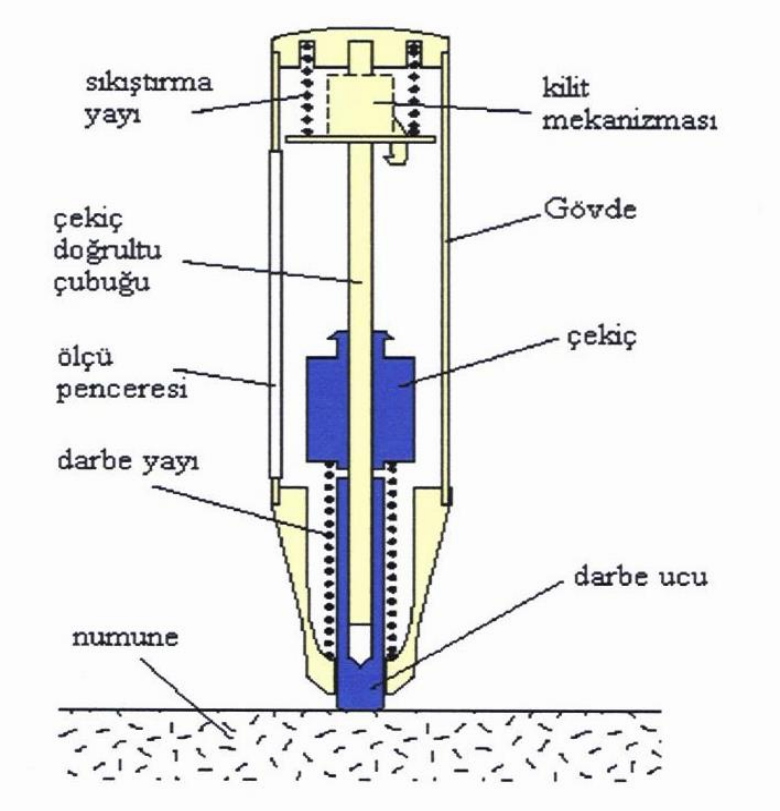
Schmidt Sertlik deneyinde Schmidt çekici kullanılarak, kayaçların Schmidt geri sıçrama sertliğinin tayini ve dolaylı olarak tek ekesenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılmaktadır.Tünelde Schmidt çekici süreksizlik yüzeyine dik konuma getirilir ve aynı yüzeyin 10 farklı noktasında elde edilen geri sıçrama sertlik değeri kaydedilir. Beykoz Bekleme Tüneli'nde kullanılan çekiç N tipi çekiptir. Ancak L tipi çekicin tablosu kullanılmıştır. Bu yüzden L tipi çekicin etki enerjisi N tipi çekiçten üç kata daha az olduğu için tablodan elde edilen tek eksenli basınç dayanımlarının üç katı alınmak suretiyle N tipi çekicin değerlerine ulaşılınabilmiştir.

Tünelde uygulanan süreksizliğin yüzeyden itibaren en az 6 cm'lik kısmında gözle görülebilecek kırık ve çatlak olmamalıdır. Schmidt çekici tünel içinde yatay konumda tutularak değerler bu şekilde tespit edilmektedir. Şekil 4.1'de Schmidt çekicinin tatbik ediliş şekli gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Schmidt çekici

Aşağıdaki Şekil 4.2'de ise Schmidt çekici mekanizması gösterilmektedir.



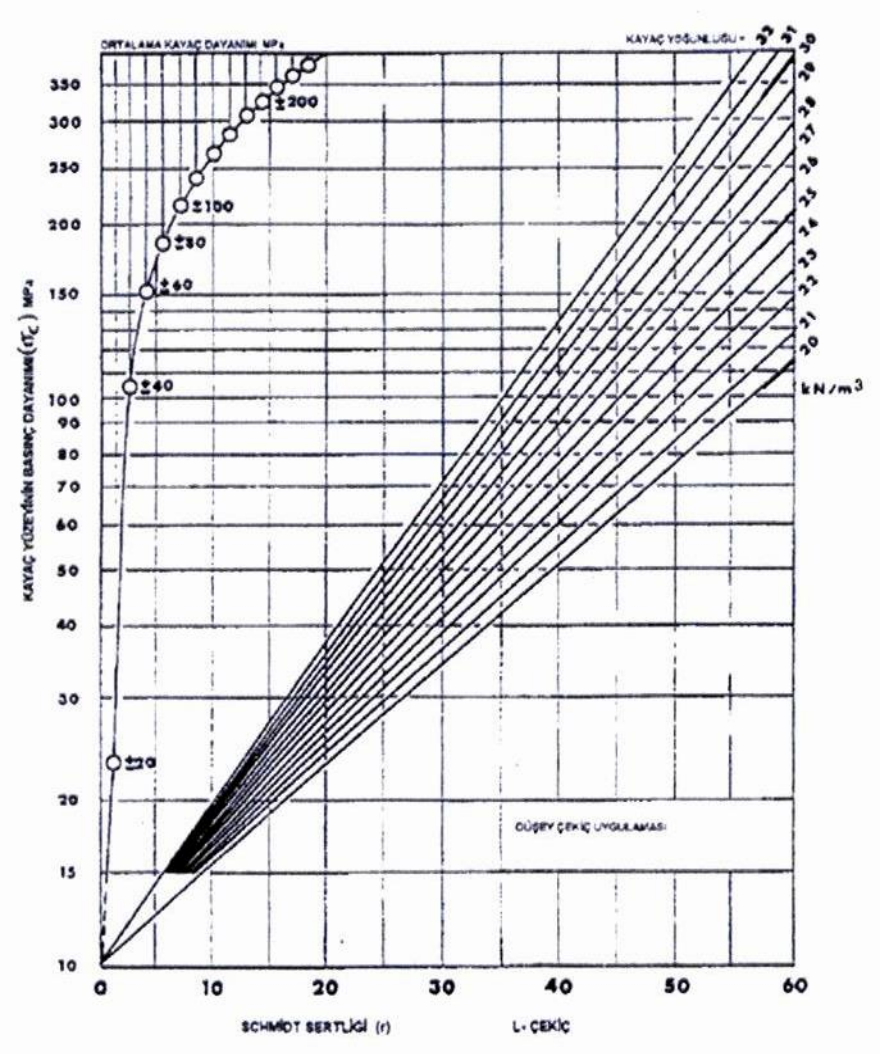
Şekil 4.2 Schmidt çekici mekanizması

Tablo 4.1'de verilen değerler Beykoz Bekleme Tüneli'ne ait Schmidt çekici ortalama sertlik değerleri, ağırlıklar, hacimleri ve Şekil 4.3'den hesaplanan tek eksenli basınç dayanım değerleri'dir.

Tablo 4.1 Beykoz bekleme tüneli schmidt çekici değerleri

Örnek No	Ağırlık (kN)	Hacim (m^3)	Yoğunluk (kN/m^3)	Ort. Geri Sıç.Sert.Değerleri	Örnek Nok.Konumu (m)	Tek eksenli basınç dayanım değerleri (Mpa)
1	36,65	13,38	2,74	32	85	105
2	42,66	15,59	2,74	30	160	108
3	25,23	8,97	2,81	30	365	105
4	32,72	12,06	2,71	28	915	126
5	45,19	16,07	2,81	40	920	120
6	14,01	5,13	2,73	42	930	120
7	41,79	15,52	2,69	38	145	96
8	34,31	12,49	2,75	36	240	108
9	26,01	9,55	2,72	34	245	96
10	23,42	8,72	2,69	32	135	102
11	40,19	14,51	2,77	32	755	126
12	23,82	8,55	2,79	34	785	120
13	33,73	12,35	2,73	32	725	120
14	29,02	10,80	2,69	42	165	96
15	20,75	7,53	2,76	34	185	102
16	32,58	12,01	2,71	30	475	114
17	31,80	11,79	2,70	28	115	96
18	30,00	10,72	2,80	32	140	102

Elde edilen bu değerler doğrultsunda Tablo 3.6 daki RMR sınıflama parametreleri ve puanları kullanılarak, kaya sınıfları ve puanları bulunarak hangi lokasyonda ne tip tahkimat uygulanacağı elde edilmiş olur. RMR değerinden sistemler arası dönüştürme yapılarak Q değeri'de burdan hesaplanır. Örneğin 11 Nolu örnekte Tek eksenli sıkışma dayanımı Şekil 4.3'deki abak kullanılarak yaklaşık 126 Mpa bulunmuştur. Bu değerden yola çıkılarak , ayna rapolarında elde edilen yeraltı suyu oranı, süreksizlik aralığı, RQD, süreksizliklerin durumuda dikkate alınarak RMR değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 4.3 Schmidt sertliği ve tek eksenli sıkışma dayanımı arasındaki ilişki (Deere ve Miller,1966)

Tek eksenli basınç dayanımı kayaç numunelerinin kırılmaya karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanmaktadır. Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarını tayin etmek amacıyla Boy/Çap (L/D) oranı 2-2.5 arasında olacak şekilde hazırlanmış, alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel, yan yüzeyleri pürüzsüz-düz ve herhangi bir kırık ve çatlak içermeyen karot örnekleri kullanılmıştır. Genelde NX (54,7 mm) çaplı karotlar tercih edilmektedir.

Tablo 4.2'de Beykoz Bekleme Tüneli'nde alınan kayaç örneklerinden karotlar numuneleri sayesinde tek eksenli basınç dayanımları yer almaktadır.

Tablo 4.2 Beykoz Bekleme Tüneli Tek Eksenli Basınç Dayanımları

Örnek No (m.)	Numune Çapı (mm)	Numune Boyu (mm)	Yenilme Yükü (kN)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
160	54,5	110,1	222,80	95,51
	54,5	110,2	213,90	91,73
	54,5	107,5	201,40	86,36
	54,5	105,0	210,00	90,04
	54,5	109,2	285,90	122,5
	54,5	106,3	254,10	108,8
	54,5	103,0	236,70	101,3
	54,5	108,0	229,30	98,13
	54,5	109,5	234,00	100,1
	54,5	111,0	345,60	148,2
780	54,5	110,5	300,00	128,8
	54,5	103,8	291,20	124,8
	54,5	107,0	295,60	126,6
	54,5	109,3	325,00	139,1
	54,5	110,8	296,20	126,7
	54,5	108,9	263,40	112,6
	54,5	105,1	287,50	122,9
	54,5	104,7	293,10	125,3
	54,5	110,6	318,40	136,1
	54,5	109,3	298,30	127,5
470	54,5	106,0	279,30	119,7
	54,5	105,0	268,10	114,9
	54,5	109,2	274,30	117,5
	54,5	108,5	261,70	112,1
	54,5	110,3	270,40	115,8
	54,5	110,1	179,60	76,9
	54,5	106,3	265,00	113,4
	54,5	109,4	260,90	111,6
	54,5	108,7	332,70	142,3
	54,5	104,8	255,60	109,3

Numune, sabit hızda ve sürekli olarak eksenel yükleme yapabilecek yeterli kapasitede hidrolik presin ortasındaki yükseltme plakasının üzerine merkezlenerek yerleştirilir. Hidrolik sistemdeki hidrolik vana kapalı konuma getirildikten sonra sistemi çalıştırma düğmesine basılır ve yükleme kontrol vanası kolu ileri itilerek numunenin üzerine konduğu alt tabla yükseltilmeye başlanır. Bu sırada ani yükleme yapılmamasına dikkat edilir.

Alttaki blok, numunenin üzerindeki silindirler ile presin üst bloğu arasında boşluk kalmayana değin yükseltilir. Numunede boşluk kalmadığı takdirde, yükseltme işlemi tamamlanır. Bu arada presin çevresindeki kafesin kapağı da kapatılır. Numune 5-10 dakika arasında yenilecek şekilde veya alternatif olarak saniyede 0,5-1 MPa'lık bir gerilim hızıyla presin yükleme hızı grafiğinden bir hız seçilir ve bu hız değeri, hız ayarlama düğmesi yardımıyla deney süresince sabit tutulmak üzere ayarlanır. Yük göstergesinin altındaki düğmeye basılarak gösterge üzerindeki renkli noktaların bulunduğu yükleme hızı kontrol plakasının dönmesi için devre açılır. Yükleme kontrol vanası yavaşça döndürülerek yükleme işlemine başlanır. Yük göstergesindeki ibrenin, seçilen hıza uygun şekilde dönen fiber yükleme kontrol plakası üzerindeki renkli noktalarla birlikte hareket edip etmediği sürekli izlenir. Numune yenildiği anda yenilme yükü göstergeden okunur ve hidrolik sistem durdurulur. Numune presten çıkarılır. Böylece elde edilen tek ekenli basınç dayanımları vasıtası ile RMR ve Q değerleri bulunabilmektedir.

Ağırlıkça ve Hacimce Su Emme deneyi, düzenli bir geometriye sahip kayaç örneklerinin, ağırlıklarına ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarının tayini amacıyla yapılmaktadır. Bu deneyde karot kayaç örneklerinin boyları (L) ve çapları (D) birbirine dik iki ayrın yönde kompasla ölçülür ve örneklerin hacimleri (V) hesaplanmaktadır.

Örnekler 24 saat saf su doldurulmuş beherde bekletilmektedir. 24 saat sonunda saf sudan çıkarılarak, suya doygun yüzeyleri kağıt havlu ile kurulandıktan sonra, ıslak ağırlıkları hassas terazide yapılan tartı işlemi ile belirlenip (W_s).

Örnekler, 105°C'ye ayarlanmış fırına yerleştirilerek 24 saat boyunca kurumaya bırakılmaktadır. Fırından çıkarılan örneklerin kuru ağırlıkları (W_d) hassas terazide belirlenmektedir. Yüzde ağırlıkça ve hacimce su emme oranları formüllerde yerine koyularak yapılmaktadır.

Tablo 4.3'de verilen değerler yüzde olarak hesaplama yapılmaktadır. Beykoz Bekleme Tüneli'ne ait kayaçların böylece dayanımları ve formasyonu hakkında bilgi edinilmiş olmaktadır.

Tablo 4.3 Beykoz Bekleme Tüneli'nde yer alan kayaçların kuru ve yaş ağırlıkları

Kuru Ağırlık(g)	Yaş Ağırlık (g)	Hacim (m^3)
27,15	27,21	13,38
36,57	36,66	15,59
42,61	42,68	8,97
25,19	25,29	12,06
32,68	32,79	16,07
45,12	45,30	5,13
13,95	14,03	15,52
41,63	41,92	12,49
34,16	34,39	9,55
25,99	26,07	8,72
23,37	23,60	14,51
39,93	40,22	8,55
23,78	23,85	12,35
33,71	33,77	10,8
28,82	29,93	7,53
20,73	20,78	12,01
32,54	32,6	11,79
31,75	31,92	10,72
29,94	30,05	10,60
29,90	30,03	10,73

4.3 Uygulanan Tahkimat Sistemleri

Beykoz Bekeleme Tüneli'nde beş tip formasyon bulunmaktadır. Bu formasyonlarda uygulanan tahkimat sistemlerini şu şekilde açıklamak mümkündür:

- Birinci tip formasyon sağlam olduğu için herhangi bir tahkimat destek elemanına gerek duyulmamıştır.
- İkinci tip formasyonda ise 3-4 adet şaşırtmalı kaya bulonun kullanılması yeterli olmaktadır.
- Üçüncü tip formasyonda en az 50 mm püskürtme beton ve şaşırtmalı kaya bulonu kullanılmıştır.
- Dördüncü tip formasyonda zemin gevrek bir yapıya döndüğü için 100 mm püskürtme beton, çelik hasır ve 6-7 adet şaşırtmalı kaya bulonu uygulanmıştır.
- En son olan beşinci tip formasyonda tüm tahkimat elemanları elemanları kullanılmıştır. Çelik hasır, 175 mm püskürtme beton, 10-11 adet şaşırtmalı kaya bulonu, kendinden delgili süren ve çelik kuşak tatbik edilmiştir.

Bu formasyonlara ait şekiller Ek C'de verilmektedir.

4.4 İlerleme ve Vardiya Etüdleri

Beykoz Bekleme Tüneli'nde günlük tutulan ilerleme ve vardiya etüdleri ile kazı işleminin ne kadar sürede gerçekleştiği ve vardiyalarda hangi işlerin ne kadar üre içinde gerçekleştiği hesaplanmaktadır. Böylece günlük ve aylık maliyet hesaplanabilmektedir. Ayrıca hangi tip tahkimatın uygulanacağı da bulunabilmektedir.Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Mayıs (2004) aylarına ait tutulan vardiya etüdleri Ek D'de örnek olarak verilmektedir. Tahkimat sistemleri ise Ek E'de verilmektedir.

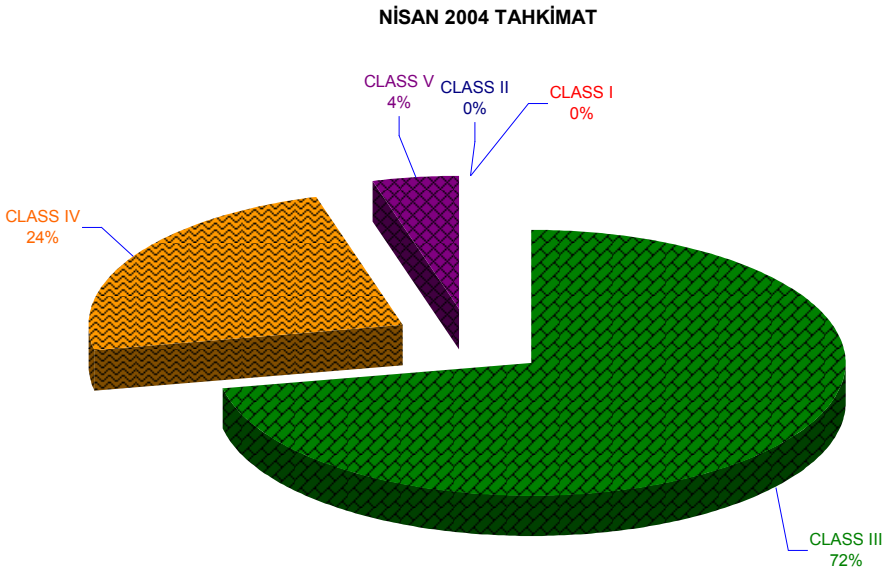
Örneğin 8 Mart'ta tutulan ilerleme ve vardiya etüdünde kırıcı kazı sırasında 40 dakika, yükleyici pasa nakli esnasında 8 saat 50 dakika, kompresör shotcrete atımı esnasında 2 saat, kamyon yine yükleyici gibi pasa nakli esnasında 8 saat 50 dakika, mikser shotcrete atımı esnasında gidiş geliş yaptığı için kompresörün iki katı kadar yani 4 saat, jumbo bulon, süren ve aynı delgisi esnasında 1 saat 59 dakika, fan 24 saat, aliva shotcrete atımı esnasında kompresör ile aynı yani 2 saat, hidrafor shotcrete atımı, jumbo bulon delgisi, bulon çakımı, aynı delgisi, jumbo süren delgisi, süren çakımı esnasında 5 saat 19 dakika ve mai-pump bulon çakımı esnasında toplam 1 saat 20 dakika çalışmışlardır.

Buna göre saat ve metreküp bazındaki değerler hesaplanmaktadır. Kırıcı, kamyon, yükleyici, kompresör ve mikserin kullandıkları mazot lt bazında (1.400.000 T.L.) ve jumbo, fan, aliva, hidrafor ve mai-pump'ın kullandıkları elektrik ise kW bazında (142.000 T.L.) birim fiyatlar ile çarpılarak toplam günlük maliyet 204.949.618 T.L.olarak hesaplanır.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre tip üç gidilen bu formasyonda, shotcrete 2.3 ton, bulon 9 adet, iksa 2 adet, dinamit 100 kg, kapsül 120 adet kullanılmıştır. Ay bazında günlük ilerleme ise 2.5 metre çıkmıştır.

En son olarak mazot, elektrik, iksa, shotcrete, bulon, kapsül, hava borusu, su borusu, fantüp giderleride birim fiyatlar ile çarpılmak suretiyle 1 metre için malzeme maliyeti 2.815.754.468 T.L., bu değeri günlük kübaja bölünerek 1 metreküp için malzeme maliyeti 49.312.688 T.L. olarak hesaplanır.

Sonuçta diğer tutulan günlük ilerleme ve vardiya etüdlerinde yine aynı hesaplamalar yapılmak suretiyle aylık maliyet hesaplanmış olur.



Şekil 4.4 Nisan ayı tahkimat sistemleri dağılımı

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Beykoz Bekleme Tüneli'nde uygulanan tahkimat sistemleri kaya kütle sınıflama sistemlerinde hareketle incelenmiştir. Tahkimat sistemlerinin tünel formasyonlarının mekanik ve fiziksel koşullarına göre inşaa edilmesi son derece önemli olduğu için yeraltı koşullarını sınıflamak için RMR ve Q sınıflama sistemlerinden faydalanılmıştır.

Kaya kalitesini birbirinden bağımsız değerlendiren bu iki kaya kütle sınıflama sistemi sayesinde schmidt çekici ve tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen sonuçlarda kullanılarak uygulanan ve literatürdeki tahkimat sistemleri karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak deneylerden elde edilen bulgularla uygulanan tahkimat sistemleri birbirleri ile örtüşmektedir. Bu iki yöntem sayesinde tünel formasyonları hakkında bilgi elde edinilmiş ve her formasyon tipi için uygun tahkimat sistemi belirlenmiştir.

Genel olarak maliyetler ise uygulanan tahkimat sistemine göre artış ve azalış göstermektedir. Beşinci tip formasyonda maliyet artarken, birinci tip formasyonda bu değer büyük bir azalış göstermektedir.

Jeolojinin karmaşıklığı ve değişkenliği nedeni ile bu iki tip kaya kütle sınıflama sistemi sayesinde kazı ve tahkimat optimum zamanda gerçekleşmektedir.

Sonuçta Beykoz Bekleme Tüneli'nde uygulanan bu sınıflamalar kazı ve tahkimatın her aşamasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Ulusay R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, Nitelik Reklamcılık Matbaacılık, Ankara .s. 128-159

[2] **Gökçeoğlu C., Binal A., Ulusay R.,** 2001. Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri, Ankara. s. 41-56

[3] **Gürgen S., Onargan T., Köse H.,** 1992. Tünel ve Kuyu Açma, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir.

[4] **Hustrulid W.A.,** 1990. Underground Mining Methods, USA. s. 1267-1270

[5] **Kırbaş T.,** 1995. Tünel Açma İşlemleri Karşılaşılan Sorunlar ve Uygulanan Çözüm Yolları, İstanbul. s. 32-40

[6] **Waltham A.C.,** 1994. Foundations of Engineering Geology, İngiltere.

[7] **Bieniawski Z.T.,** 1984. Rock Mechanics Design In Mining and Tunneling, USA.

[8] **Deere D.W.,** 1989. Rock Quality Designation After Twenty Years, Washington US Army Corps.of Engineers.

[9] **Barton N., Lien R., Lunde J.,** 1974. Engineering Classification of Rock Masses For The Design of Rock Support, USA.

[10] **Ketin İ.,** 1994. Genel Jeoloji Yerbilimlerine Giriş, İstanbul

Ek A:Beykoz Bekleme Tüneline ait genel jeoloji haritası

Ek B Q Sınıflama Sistemine ait parametreler

Tablo B.1 Q Sınıflama Sistemleri Abakları

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.

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 görümünde	20

Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için (3.0 x Jn) kullanılır.

(3) Portallar (girişler) için (2.0 x Jn) kullanılır.

3. EKLEM PÜRÜZLÜLÜK SAYISI	(J_r)
Süreksizlik yüzeyi ve 10 cm'lik bir makaslama hareketinden önce süreksizlik yüzeyi	
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
A. Süreksiz eklemler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Sürtünme izli, dalgalı	1.5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1.5
F. Düz, düzlemsel	1.0
G. Sürtünme izli, düzlemsel	0.5

Not: (5) İlgili eklem takımının ortalam aralığı 2 m'den daha büyük ise, J_r'ye 1.0 ilave edilebilir.

(6) En az dirence göre yönlenmesi koşuluyla, çizgiselliklere sahip düz sürtünme yüzeyli eklemler için J_r = 0.5 alınabilir.

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

4. EKLEM YÜZEYİ ARAŞTIRMA SAYISI	(J_a)	ϕ (yaklaşık) (derece)
(a) Süreksizlik dokanağı		
A. Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamayan, geçirimsiz dolgu (örneğin kuvars veya epidot)	0.75	
B. Ayrışmamış eklem yüzeyleri, yalnızca yüzeysel kirlenme	1.0	(25-35)
C. Az ayrışmış eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları vd.	2.0	(25-30)
D. Siltli veya kumlu-kil sıvamaları, küçük kil fraksiyonu (yumuşak değil)	3.0	(20-25)
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil minerali sıvamaları, örneğin; kaolen veya mika. Ayrıca klorit, talk, jips, grafit vs. ve az miktarda şişen killer	4.0	(8-16)
(b) 10 cm'lik bir kaymadan önceki süreksizlik dokanağı		
F. Kum taneleri, kil içermeyen parçalanmış kaya vd.	4.0	(25-30)
G. Aşırı konsolide olmuş, yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı 5 mm'den az)	6.0	(16-24)
H. Orta veya düşük derecede konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli ancak kalınlığı 5 mm'den az)	8.0	(12-16)
I. Şişen kil dolguları, örneğin; montmorillonit (sürekli, ancak kalınlığı 5 mm'den az) J_a değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve suyun etkisine bağlıdır.	8-12	(6-12)
(c) Makaslandığında süreksizlik dokanağı yok		
J. Parçalanmış kaya veya kil zonları veya bantları (kilin tanımlanması için G, H ve J maddelerine bakınız).	6-8 veya 8-12	(6-24)
K. Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, düşük kil fraksiyonu (yumuşamayan)	5.0	(-)
L. Kalın, sürekli kil zonları veya bantları (kilin tanımlanması için G, H ve J maddelerine bakınız)	10-13 veya 13-20	(6-24)

5. EKLEM SU AZALTMA FAKTÖRÜ	(J_w)	Yaklaşık su basıncı (kgf/cm^2)
A. Kuru kazılar ya da küçük sızma, örneğin yerel olarak < 5 lt/dk	1.0	< 1
B. Orta derecede su gelişi veya basınç, yer yer eklemlerdeki dolguların yıkanması	0.66	1-2.5
C. Dolgusuz, eklemli, dayanımlı kayada büyük miktarda su gelişi veya yüksek basınç	0.5	2.5-10
D. Büyük miktarda su gelişi veya yüksek basınç, eklem dolgularının aşırı derecede yıkanması	0.33	2.5-10
E. Patlatmada son derece aşırı su gelişi veya su basıncı, zamanla azalan	0.2-0.1	10
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece aşırı su gelişi veya su basıncı	0.1-0.05	> 10

Not: (7) C ve F faktörleri kaba tahminlerdir. Drenaj ölçümleri yapılırsa J_w arttırılır.
(8) Buz oluşumundan kaynaklanan özel problemler dikkate alınmamıştır.

6. GERİLİM AZALTMA FAKTÖRÜ			(SRF)
(a) Kazıyı kesen zayıf zonlar, tünel kazılırken kaya kütlesinin gevşemesine neden olabilirler:			
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıf zonlar, 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 dayanımlı kayaçta birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			7.5
E. Kil içermeyen dayanımlı kayaçta birden fazla makaslama zonu, (kazı derinliği < 50 m)			5.0
F. Kil içermeyen dayanımlı kayaçta tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)			2.5
G. Gevşek ve açık eklemler, fazla eklemli "küp şekeri" görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5.0
Not: (9) Kayma zonları yalnızca kazıyı etkiliyor, ancak kesmiyorsa, SRF için yukarıda verilen değerler % 25-50 dolaylarında azaltılmaktadır.			
(b) Dayanımlı kaya, kaya gerilimi sorunları:	σ_c/σ_t	σ_t/σ_1	(SRF)
H. Düşük gerilim, yüzeye yakın	> 200	> 13	2.5
I. Orta derecede gerilim	200-10	13-0.66	1.0
J. Yüksek gerilim, çok sıkı yapı (genellikle duraylı, yan duvar duraylılığı açısından uygun olmayabilir)	10-5	0.66-0.33	0.5-2
K. Hafif kaya patlaması (masif kaya)	5-25	0.33-0.16	5-10
L. Aşırı kaya patlaması (masif kaya)	< 2.5	> 0.16	10-20
Not: (10) Oldukça anizotrop bakir bir gerilim alanı için (ölçülebilirse): $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ olduğunda, σ_c ve σ_t; 0.8 σ_c ve 0.8 σ_t'ye düşürülür. $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ olduğunda σ_c ve σ_t 0.6 σ_c ve 0.6 σ_t'ye düşürülür. Burada: σ_c tek eksenli sıkışma dayanımı ve σ_t çekilme dayanımı ve σ_1 ile σ_3 de en büyük ve en küçük asal gerilimlerdir. (11) Yüzeyin altındaki taç kısmının (crown) derinliğinin açıklığın genişliğinden daha az olduğu yerlere ait bazı tamamlanmış proje kayıtları mevcuttur. Bu tip durumlarda SRF'nin 2.5'tan 5'e çıkarılması önerilir.			
(c) Yüksek kaya basıncının etkisi altında dayanımsız kayaçta plastik akma:			
M. Az sıkıştıran kaya basıncı			5-10
N. Aşırı sıkıştıran kaya basıncı			10-20
(d) Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme aktivitesi			
O. Düşük kaya basıncı			5-10
P. Aşırı kaya basıncı			10-15

EK AÇIKLAMALAR:

Kaya kütle kalitesi Q'nun hesaplanmasında yukarıdaki çizelgedeki 1-9 numaralı notlara ek olarak, aşağıda verilen rehber niteliğindeki hususlara da dikkat edilmelidir.

1. Sondaj karotu olmadığı zamanlarda, RQD birim hacimdeki eklemlerin sayısından hesaplanabilir ve her bir eklem takımı için metredeki eklem sayısı ilave edilir. Kil içermeyen kaya kütleleri için bu sayıyı RQD'ye çevirmek amacıyla aşağıdaki basit ilişki kullanılabilir:

$$RQD = 115 - 3.3\ J_v \text{ (yaklaşık)} \qquad (8.5)$$

burada,

J_v: Bir metreküpteki toplam eklem sayısı (RQD = J_v < 4.5 için)

2. Eklem takımlarının sayısını ifade eden J_n parametresi, genellikle çizgisellik (foliasyon), şistozite, dilinim veya tabakalanma vb.'den etkilenebilmektedir. Bu durumda, iyi bir gelişme göstermişlerse, bu paralel eklemler tam bir eklem takımı olarak sayılmalıdırlar. Bununla birlikte, sadece görünür birkaç eklem veya bu özellikleri nedeniyle karotta yer yer kırıklar mevcutsa, J_n'nin değerlendirilmesinde bunların "gelişigüzel eklemler" olarak sayılması daha uygundur.

3. Makaslama dayanımını temsil eden J_r ve J_a parametlereleri, belirli bir zondaki en zayıf önemli eklem takımıyla veya kil dolgulu süreksizlikle ilişkili olmalıdır. Bununla birlikte, en küçük (J_r/J_a) değerine sahip eklem takımının veya süreksizliğin duraylılığı için uygun bir konumda ise, daha az uygun konumdaki eklem takımı veya süreksizlik bazan daha az önem taşır ve bu durumda (J_r/J_a) değeri yüksek olan, Q'nun hesaplanmasında kullanılır. (J_r/J_a)'nın değeri gerçekte, yenilmenin başlamasına yol açan yüzeyle ilişkilidir.

4. Kaya kütlesi kil içeriyorsa, gevşeyen yükler için SRF faktörü değerlendirilmelidir. Bu tür durumlarda sağlam kayacın dayanımı çok az önem taşır. Bununla birlikte, eklemli olma özelliğinin en az olduğu ve kilin hiç bulunmadığı durumlarda, sağlam kayacın dayanımı en zayıf halkayı oluşturur ve duraylılık, kayacın "gerilim/dayanım" oranına bağlı olacaktır. Oldukça anizotrop bir gerilim alanı, duraylılık için uygun olmayıp, 10 ve 11 numaralı notlarda kabaca hesaba katılır.

5. Sağlam kayacın σ_c ve σ_t ile ifade edilen tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımları, mevcut arazi koşullarına uygun ise, kayacın doygun haldeki durumuna göre değerlendirilir. Nemli veya doygun koşullar altındaki kayaçların dayanımı için çok tutucu bir tahmin yapılır.

Yukarıda verilen ölçütlere göre tüm parametreler tayin edilir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak "Kaya Kütle Kalitesi, Q" hesaplanır.

$$\text{Kaya kütlesi} \quad Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \times \left(\frac{J_w}{SRF}\right) \tag{8.6}$$

Q kaya sınıflama sisteminde Q indeksine ek olarak "Eşdeğer boyut-D_e" tanımı da kullanılmakta olup (Şekil 8.12), yeraltı açıklığının boyutlarının tahmini için yararlı bir parametredir ve

$$D_e = \frac{\text{En, çap veya yükseklik (m)}}{\text{Kazı destek oranı (ESR)}} \tag{8.7}$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikle ESR, bir tür güvenlik katsayısı olup, yeraltı kazısının türüne göre aşağıdaki çizelgeden belirlenir.

KAZI TIPI	
A. Kısa süreli (geçici) maden kazıları	5-10
B. Uzun süreli maden kazıları, su tünelleri, büyük kazılar için açılan pilot tüneller, geniş yeraltı kazıları için yapılan yamalar ve aynalar	10-15
C. Geniş yeraltı odaları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, yaklaşım tünelleri, denge bacaları	
D. Enerji santralleri, büyük (ana) karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel ağızları ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme bölgeleri	
E. Yeraltı nükleer enerji santralları, demiryolu istasyonları, sapor ve kamu tesisleri, fabrikalar	

Yeraltı kazısının yer aldığı kategoriye göre ESR değeri belirlenir ve bilinen Q değeri kullanılarak Şekil 8.12.'den D_e tayin edilir. 8.7 no.lu D_e eşitliği yardımıyla yeraltı kazısının boyutu hesaplanır.

Ek C Beş Tip Formasyona ait Genel Jeoloji Haritaları

Ek D Örnek günlük ilerleme ve vardiya etüdler

Ek D.1 Örnek günlük ilerleme ve vardiya etüdleri

08.03.2004	07:00 & 01:00						01:00 & 07:00						TOPLAM
KAZI	17:20	18:00											0:40 sa
PASA	07:00	13:30	14:40	16:00	18:00	19:00							8:50 sa
ÇELİK HASIR	19:00	19:40											0:40 sa
ÇELİK KUŞAK													0:00 sa
TOPOĞRAF	16:00	17:20	19:40	21:10									2:50 sa
SHOTCRETE							02:20	04:20					2:00 sa
JUMBO BULON	23:00	23:40											0:40 sa
BULON ÇAK							01:00	02:20					1:20 sa
JUMBO SÜREN													0:00 sa
SÜREN ÇAKIMI													0:00 sa
AYNA DELGİSİ	23:40	00:59											1:19 sa
PATAR													0:00 sa
ATIM							04:20	06:20					2:00 sa
ARAŞTIRMA	21:10	23:00											1:50 sa
GROBETON													0:00 sa
BEKLEME							06:20	07:00					0:40 sa
ARIZA	13:30	14:40											1:10 sa
													23:59 sa
SHOTCRETE													0:00 sa
YÜKLEYİCİ													0:00 sa
KIRICI													0:00 sa
ELEKTRİK	13:30	14:40											1:10 sa
İ.ARAŞTIRMA													0:00 sa
JUMBO													0:00 sa
DİNAMİT													0:00 sa
KAMYON													0:00 sa
MAİ-PAMP													0:00 sa
BETON													0:00 sa
HAVA-ŞARTLARI													0:00 sa
HAVALANDIRMA							06:20	07:00					0:40 sa
DİGERLERİ													0:00 sa
													1:50 sa

KIRICI	0:40 saat	0:16	m/sa	0:00	m3/sa	3 lt	1.400.000	3.920.000
YÜKLEYİCİ	8:50 saat	3:32	m/sa	0:09	m3/sa	42 lt	1.400.000	59.419.360
KOMPRESÖR	2:00 saat	0:48	m/sa	0:02	m3/sa	12 lt	1.400.000	16.128.000
KAMYON	8:50 saat	3:32	m/sa	0:09	m3/sa	42 lt	1.400.000	59.419.360
MİKSER	4:00 saat	1:36	m/sa	0:04	m3/sa	8 lt	1.400.000	11.200.000
JUMBO	1:59 saat	0:47	m/sa	0:02	m3/sa	32 kw	142.000	4.506.133
FAN	24:00 saat	9:36	m/sa	0:25	m3/sa	336 kw	142.000	47.726.546
ALİVA	2:00 saat	0:48	m/sa	0:02	m3/sa	4 kw	142.000	636.160
HİDRAFOR	5:19 saat	2:07	m/sa	0:05	m3/sa	12 kw	142.000	1.691.125
MAİ-PAMP	1:20 saat	0:32	m/sa	0:01	m3/sa	2 kw	142.000	302.933

TOPLAM 204.949.618

CLASS 3	K.M	8+712,00 & 8+709,50	AYLIK İLERLEME = 2,5 m	TOPLAM = 1230,4 m

İLERLEME	KÜBAJ	İKSA	ÇELİK HASIR	SHOTCRETE	BULON	SÜREN	DİNAMİT	KAPSÜL	GROBETON	İ.ARAŞTIRMA	SHOTCRETE	İKSA	ÇELİK HASIR	SHOTCRETE	BULON	SÜREN	BETON				
m.	m3	ad.	ton	ton	ad.	ad.	kg.	ad.	m3	ad.	m3	ad.	ton	ton	ad.	ad.	m3				
2,50	57,1	0	0	2,3	9	0	100	120			8,0	2									

MAZOT	lt	1.400.000	107	150.086.720
ELEKTRİK	kw	142.000	386	54.862.898
İKSA	ton	650.000.000	2	1.300.000.000
ÇELİK HASIR	ton	600.000.000	0,00	0
SHOTCRETE	m3	52.000.000	8	416.000.000
SIGONİT	trb	2.550.000	13	32.640.000
BULON	ad.	10.045.400	9	90.408.600
YKS	trb	4.000.000	10	39.600.000
SÜREN	ad.	11.070.400	0	0
DİNAMİT	kg	3.000.000	100	300.000.000
KAPSÜL	ad.	2.000.000	120	240.000.000
GROBETON	m3	45.000.000	0	0
BETON	m3	45.000.000	0	0
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		

HAVA BORUSU	m	7.500.000	2,5	18.750.000
SU BORUSU	m	3.200.000	2,5	8.000.000
FANTÜP	m	12.000.000	2,5	30.000.000
E.KABLOSO	m	2.400.000	2,5	6.000.000
J.KABLOSO	m	5.000.000	2,5	12.500.000
FLORESANS	m	3.500.000	2,5	8.750.000
J.SARFLARI	ad.	456.250	129	58.856.250
A.SARFLARI	m3	2.900.000	8	23.200.000
M.SARFLARI	ad.	2.900.000	9	26.100.000
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		

1 m. İçin malzeme maliyeti	2.815.754.468
1 m3 İçin malzeme maliyeti	49.312.688

10.05.2004	07:00 & 01:00						01:00 & 07:00						TOPLAM
KAZI	09:00	11:20											2:20 sa
PASA	07:00	07:40	11:20	13:10	21:30	00:30	01:30	06:00					10:00 sa
ÇELİK HASIR													0:00 sa
ÇELİK KUŞAK													0:00 sa
TOPOĞRAF	13:10	14:00											0:50 sa
SHOTCRETE													0:00 sa
JUMBO BULON	14:00	17:40											3:40 sa
BULON ÇAK													0:00 sa
JUMBO SÜREN													0:00 sa
SÜREN ÇAKIMI													0:00 sa
AYNA DELGİSİ													0:00 sa
PATAR													0:00 sa
ATIM	17:40	18:30											0:50 sa
ARAŞTIRMA													0:00 sa
GROBETON													0:00 sa
BEKLEME	18:30	21:30	00:30	00:59			01:00	01:30					3:59 sa
ARIZA	07:40	09:00					06:00	07:00					2:20 sa
													23:59 sa

SHOTCRETE													0:00 sa
YÜKLEYİCİ	07:40	09:00											1:20 sa
KIRICI							06:00	07:00					1:00 sa
ELEKTRİK													0:00 sa
İ.ARAŞTIRMA													0:00 sa
JUMBO													0:00 sa
DİNAMİT													0:00 sa
KAMYON													0:00 sa
MAİ-PAMP													0:00 sa
BETON													0:00 sa
HAVA-ŞARTLARI													0:00 sa
HAVALANDIRMA	18:30	21:30											3:00 sa
DİGERLERİ	00:30	00:59					01:00	01:30					0:59 sa
													6:19 sa

KIRICI	2:20 saat	0:53	m/sa	0:02	m3/sa	9 lt	1.400.000	13.041.825
YÜKLEYİCİ	10:00 saat	3:48	m/sa	0:10	m3/sa	46 lt	1.400.000	63.942.205
KOMPRESÖR	0:00 saat	0:00	m/sa	0:00	m3/sa	0 lt	1.400.000	0
KAMYON	10:00 saat	3:48	m/sa	0:10	m3/sa	46 lt	1.400.000	63.942.205
MİKSER	0:00 saat	0:00	m/sa	0:00	m3/sa	0 lt	1.400.000	0
JUMBO	3:40 saat	1:23	m/sa	0:03	m3/sa	56 kw	142.000	7.918.885
FAN	24:00 saat	9:07	m/sa	0:23	m3/sa	319 kw	142.000	45.367.439
ALİVA	0:00 saat	0:00	m/sa	0:00	m3/sa	0 kw	142.000	0
HİDRAFOR	3:40 saat	1:23	m/sa	0:03	m3/sa	8 kw	142.000	1.108.644
MAİ-PAMP	0:00 saat	0:00	m/sa	0:00	m3/sa	0 kw	142.000	0

TOPLAM 195.321.203

CLASS 3	K.M	8+569,08 & 8+566,45	AYLIK İLERLEME = 2,6 m	TOPLAM = 1373,5 m

İLERLEME	KÜBAJ	İKSA	ÇELİK HASIR	SHOTCRETE	BULON	SÜREN	DİNAMİT	KAPSÜL	GROBETON	İ.ARAŞTIRMA	SHOTCRETE	İKSA	ÇELİK HASIR	SHOTCRETE	BULON	SÜREN	BETON				
m.	m3	ad.	ton	ton	ad.	ad.	kg.	ad.	m3	ad.	m3	ad.	ton	ton	ad.	ad.	m3				
2,63	60,1	0	0	2,4	0	0	80	55			0,0	1									

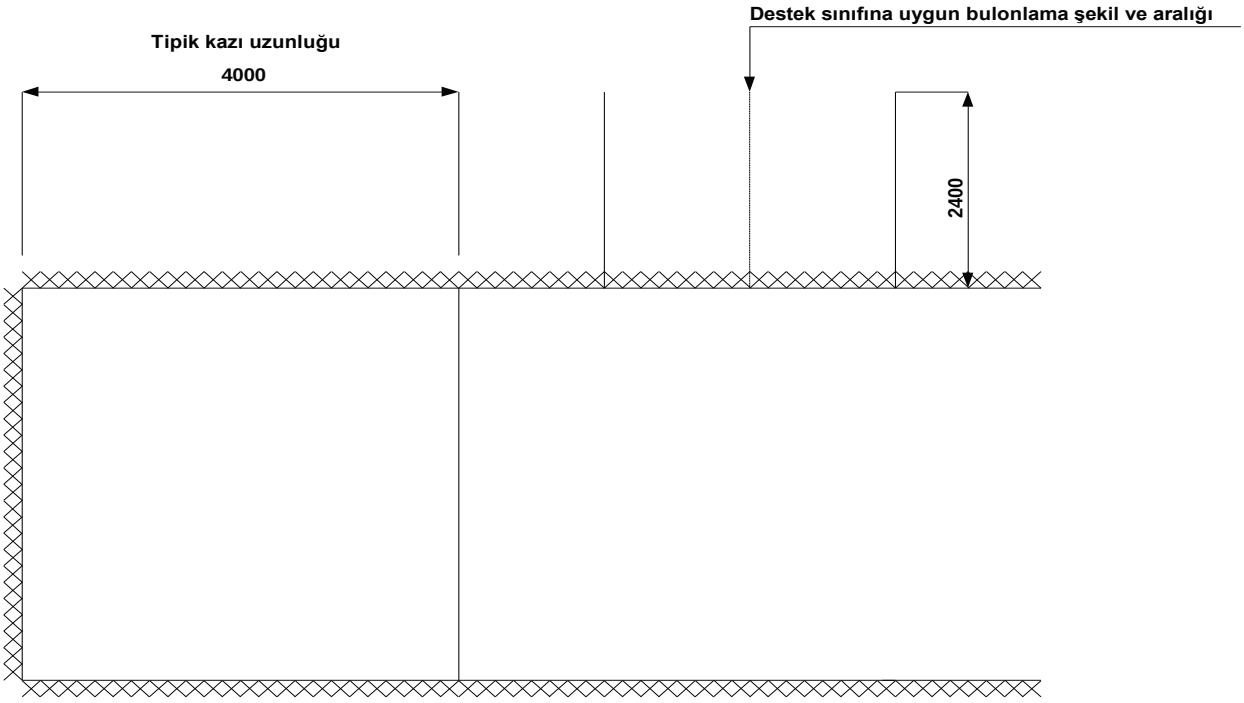
MAZOT	lt	1.400.000	101	140.926.236
ELEKTRİK	kw	142.000	383	54.394.967
İKSA	ton	650.000.000	1	650.000.000
ÇELİK HASIR	ton	600.000.000	0,00	0
SHOTCRETE	m3	52.000.000	0	0
SIGONİT	trb	2.550.000	0	0
BULON	ad.	10.045.400	0	0
YKS	trb	4.000.000	0	0
SÜREN	ad.	11.070.400	0	0
DİNAMİT	kg	3.000.000	80	240.000.000
KAPSÜL	ad.	2.000.000	55	110.000.000
GROBETON	m3	45.000.000	0	0
BETON	m3	45.000.000	0	0
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		

HAVA BORUSU	m	7.500.000	2,6	19.725.000
SU BORUSU	m	3.200.000	2,6	8.416.000
FANTÜP	m	12.000.000	2,6	31.560.000
E.KABLOSO	m	2.400.000	2,6	6.312.000
J.KABLOSO	m	5.000.000	2,6	13.150.000
FLORESANS	m	3.500.000	2,6	9.205.000
J.SARFLARI	ad.	456.250	55	25.093.750
A.SARFLARI	m3	2.900.000	0	0
M.SARFLARI	ad.	2.900.000	0	0
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		
0	0	0		

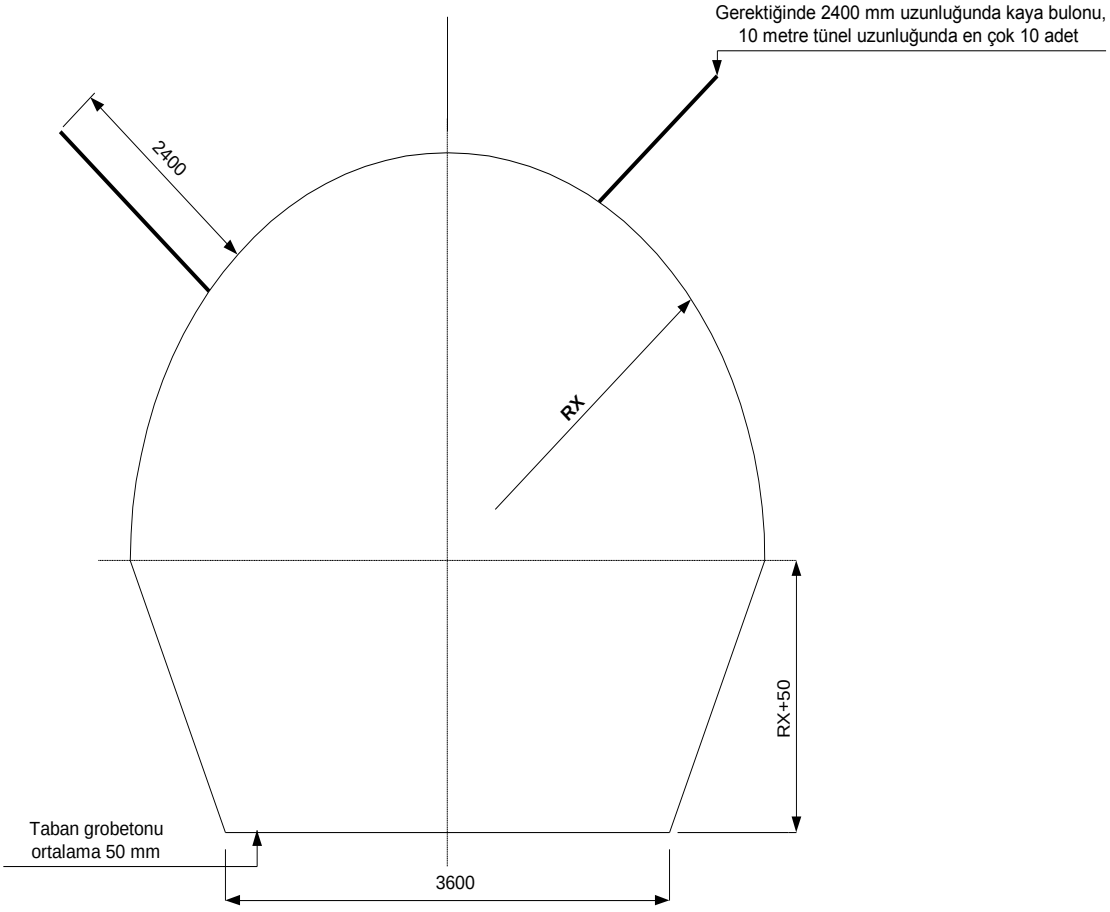
1 m. İçin malzeme maliyeti	1.308.782.953
1 m3 İçin malzeme maliyeti	21.787.920

Ek E Tahkimat Sistemleri

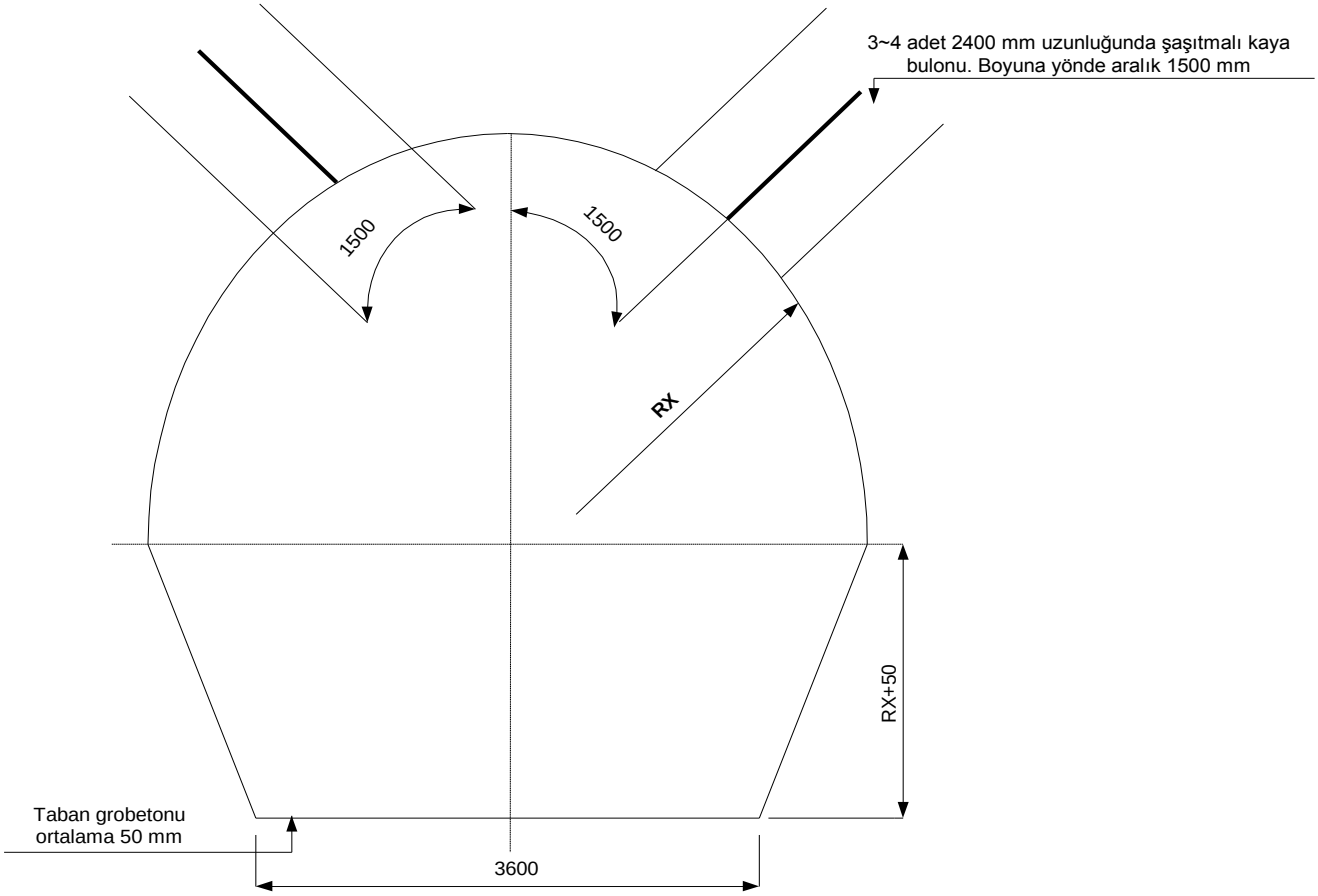
Ek E.1 Takimat sistemleri



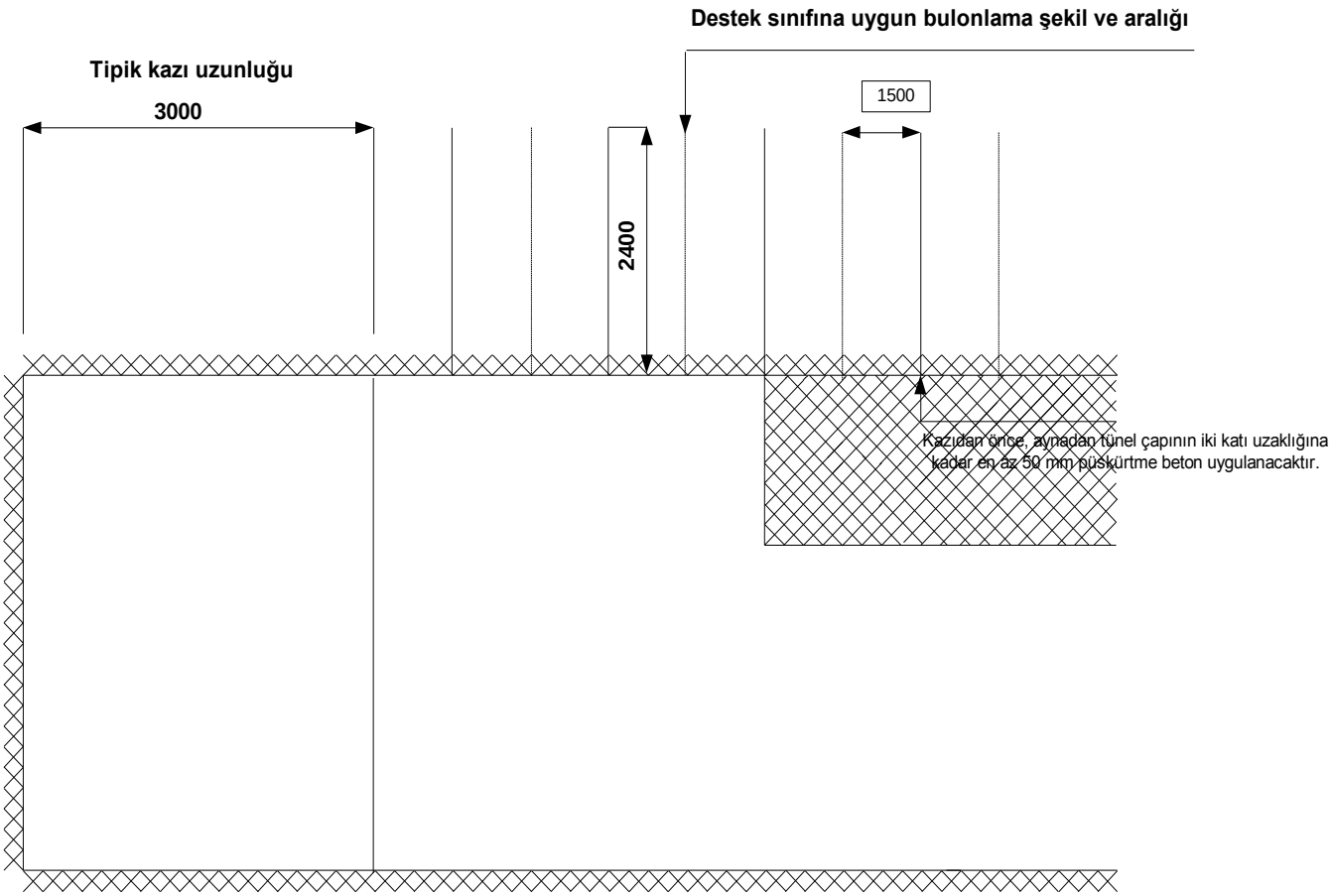
**ÖN DESTEK SINIFI I VE II
DESTEKLEME SIRASINI GÖSTEREN
BOYKESİT**



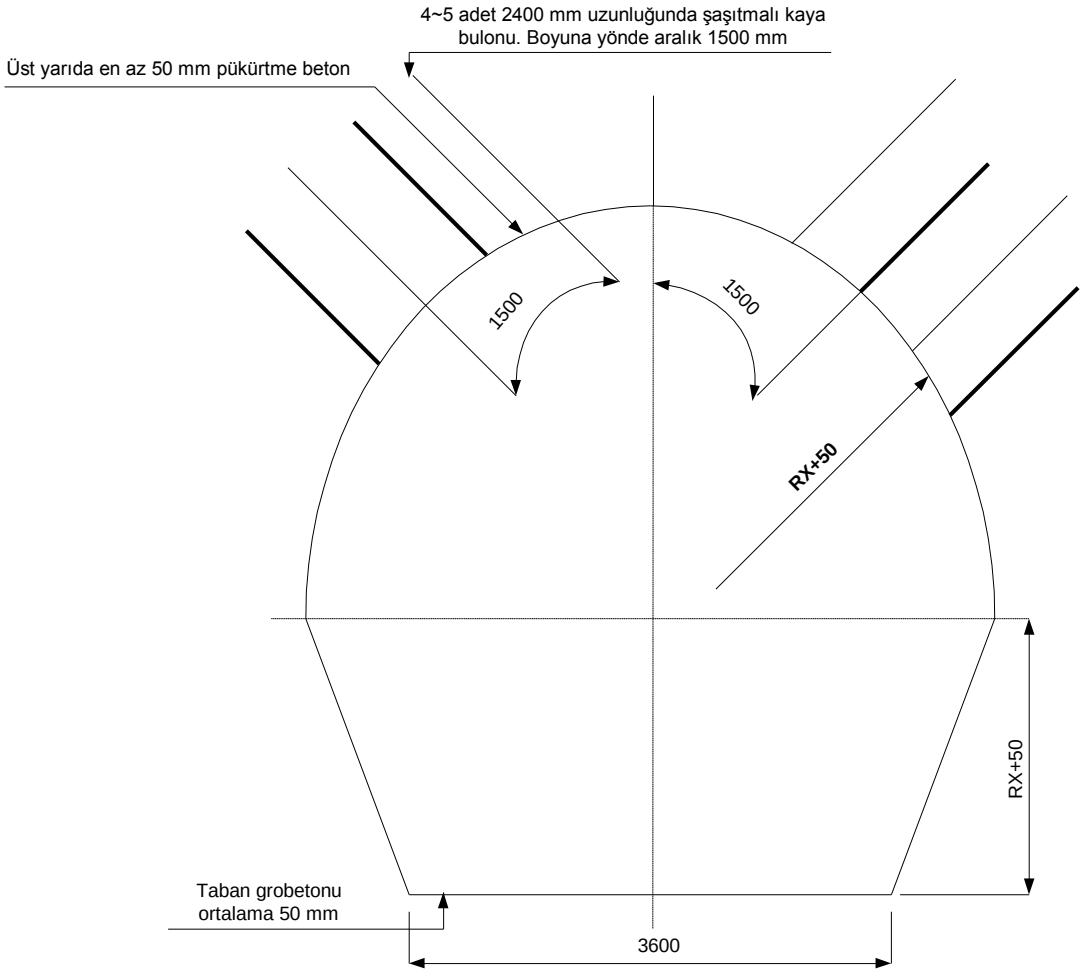
Q>1
ÖN DESTEK SINIFI I TÜNEL ENKESİTİ



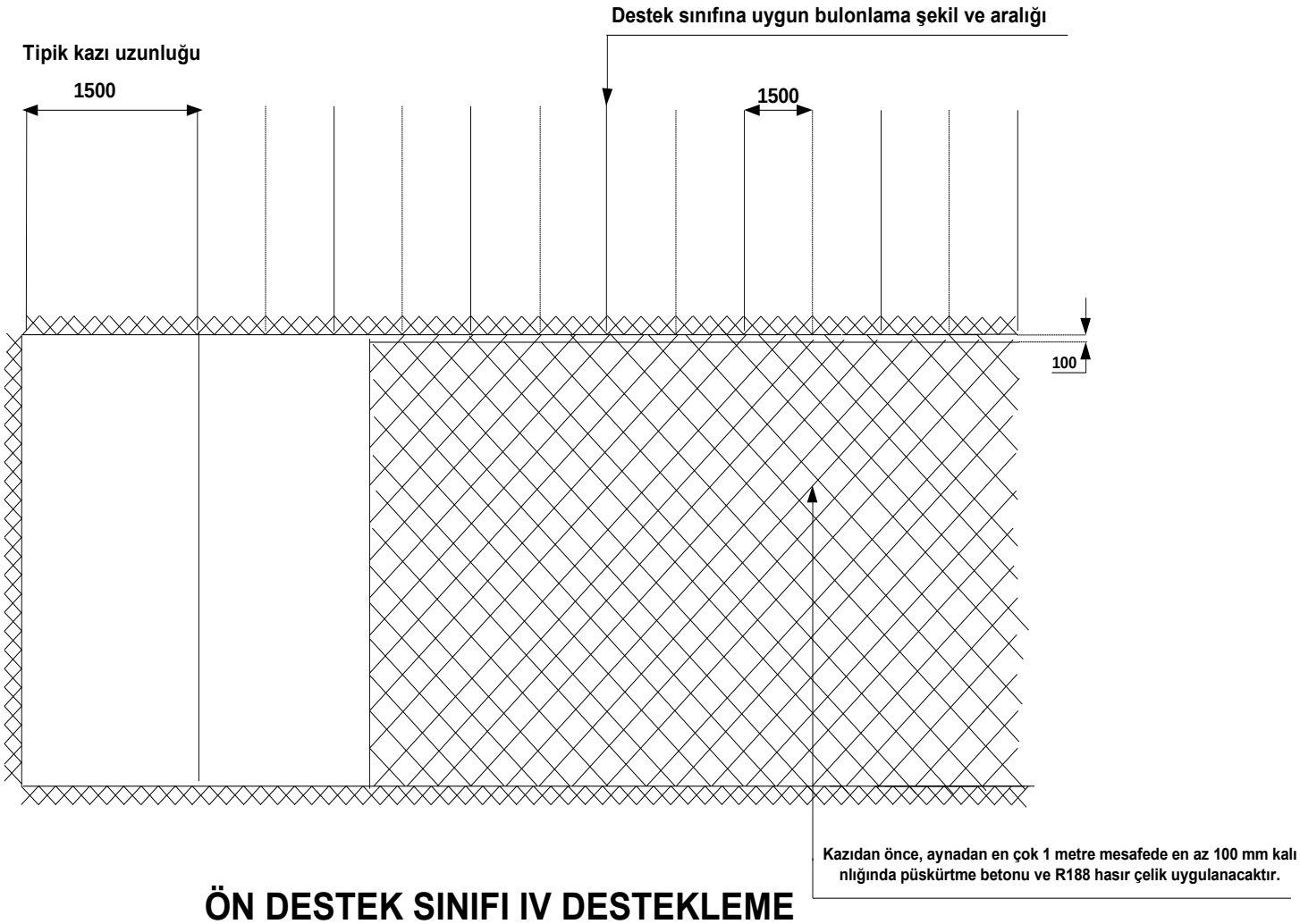
Q=0,4-1,0
ÖN DESTEK SINIFI II TÜNEL ENKESİTİ



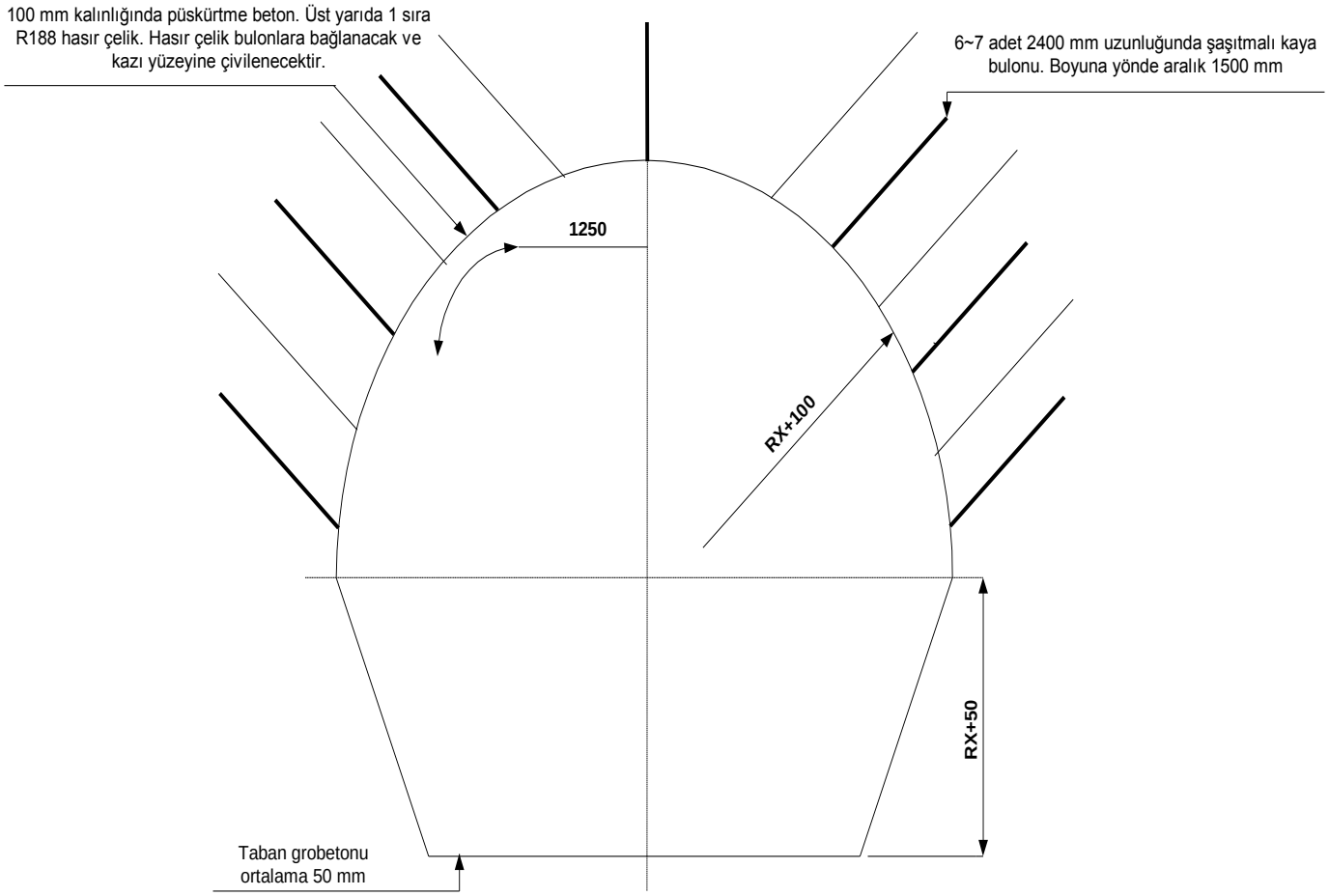
ÖN DESTEK SINIF III DESTEKLEME SIRASINI GÖSTEREN BOYKESİT



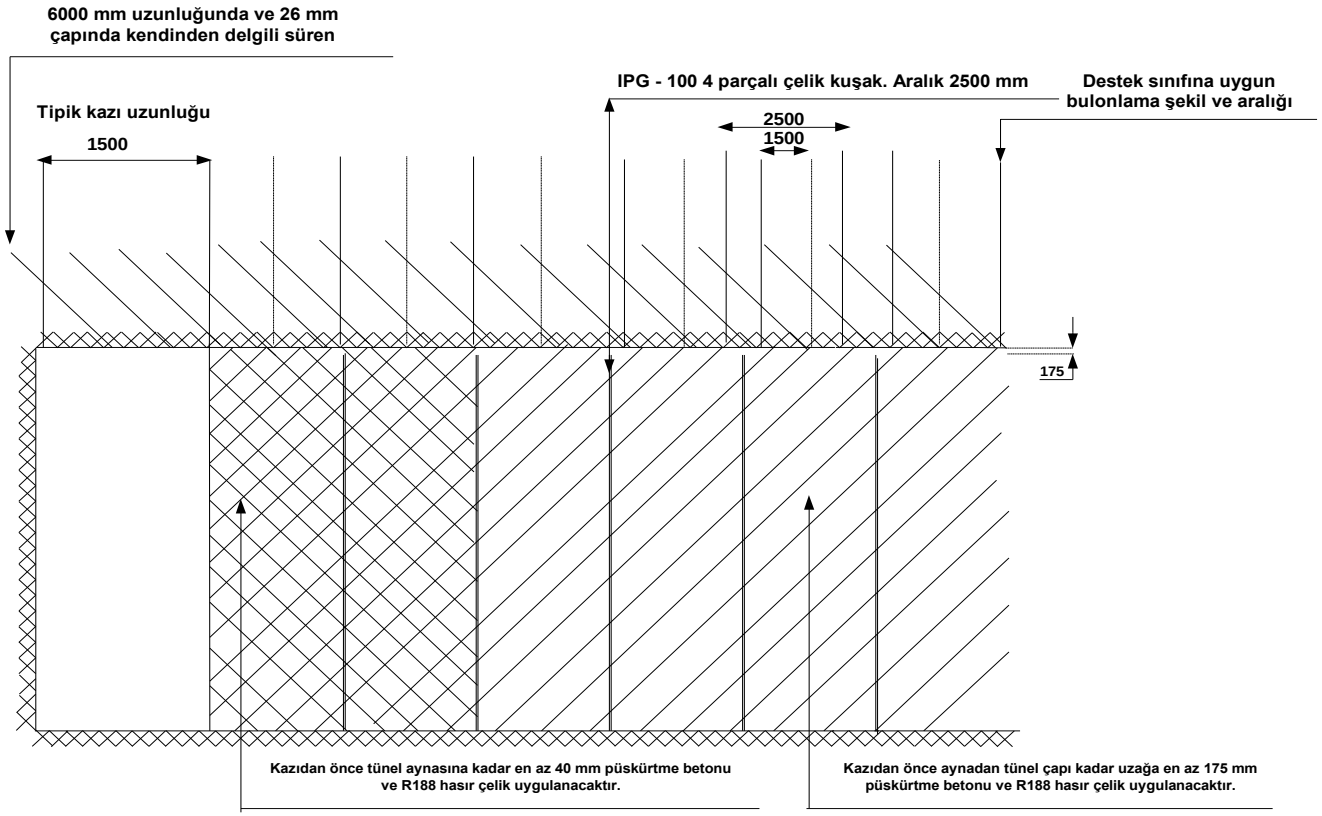
Q=0,1- 0,4
ÖN DESTEK SINIFI III TÜNEL ENKESİTİ



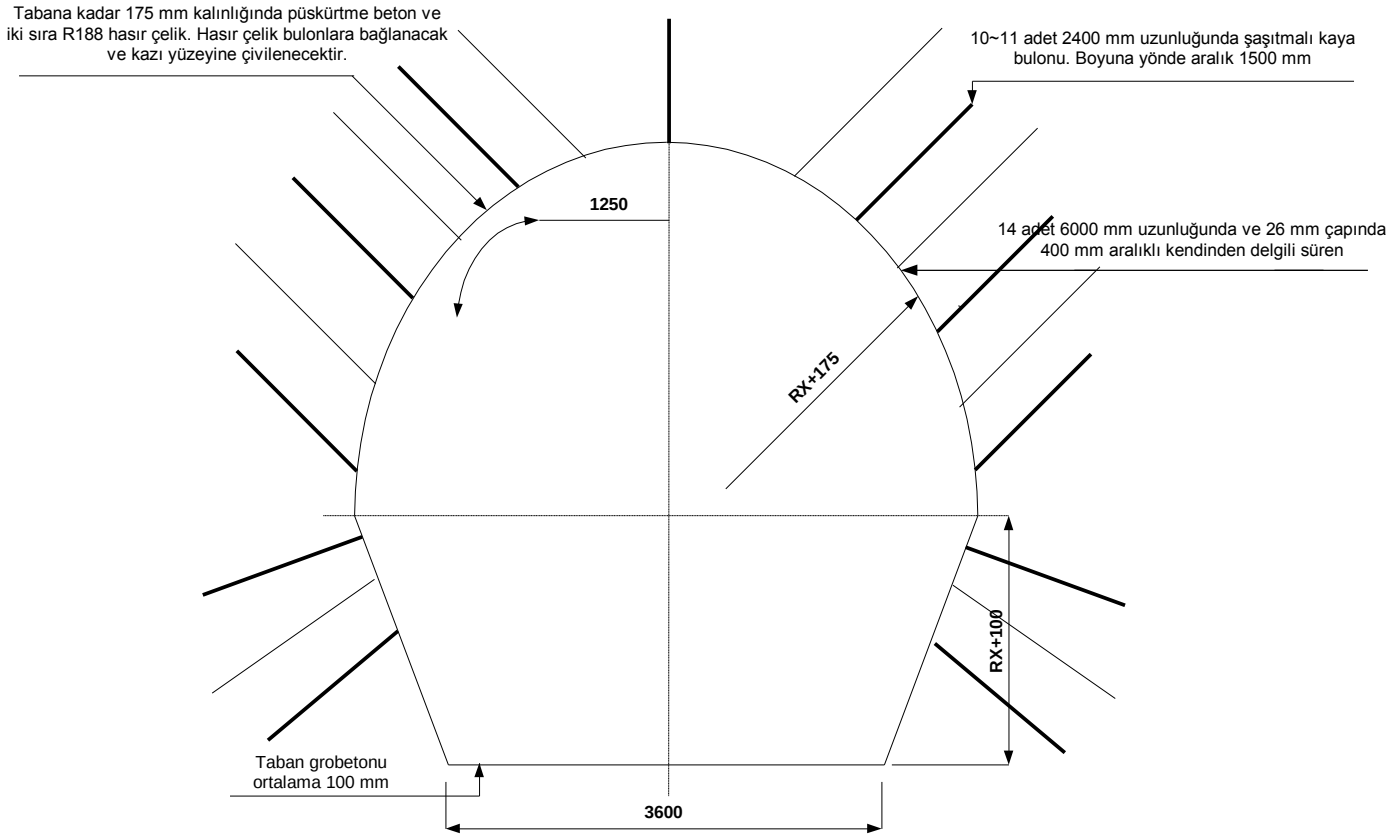
ÖN DESTEK SINIFI IV DESTEKLEME SIRASINI GÖSTEREN BOYKESİT



Q=0,04- 0,1
ÖN DESTEK SINIFI IV TÜNEL ENKESİTİ



ÖN DESTEK SINIFI V DESTEKLEME SIRASINI GÖSTEREN BOYKESİT



Q<0,04
ÖN DESTEK SINIFI V TÜNEL ENKESİTİ

ÖZGEÇMİŞ

26.06.1980 tarihinde İstanbul'da doğdu. 1998 yılında Şişli Özel Evrim Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2002 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Programında öğretime başladı. Halen bir firmada Uzman Mühendis olarak görev yapmaktadır.