

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA-İSTANBUL HIZLI TREN PROJESİ 26’NOLU TÜNELİN TBM KAZI
PERFORMANSININ Q_{TBM} METODU İLE TAHMİNİ

EVREN POŞLUK

|

Ağustos 2012

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA-İSTANBUL HIZLI TREN PROJESİ 26 NOLU TÜNELİN TBM KAZI
PERFORMANSININ Q_{TBM} METODU İLE TAHMİNİ

EVREN POŞLUK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ

Ağustos 2012

Evren POŞLUK tarafından **Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ** danışmanlığında hazırlanan “**Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26 Nolu Tünelin TBM Kazı Performansının Q_{TBM} Metodu İle Tahmini**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Osman GÜNAYDIN (Niğde Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ (Niğde Üniversitesi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail DİNÇER (Nevşehir Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

EVREN POŞLUK

ÖZET

ANKARA-İSTANBUL HIZLI TREN PROJESİ 26 NOLU TÜNELİN TBM KAZI PERFORMANSININ Q_{TBM} METODU İLE TAHMİNİ

POŞLUK, Evren

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ

Ağustos 2012, 85 sayfa

Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi, oldukça engebeli bir topografyadan geçmektedir. Hızlı demiryolu projelerinde sınırlı eğim ve kurp toleransları nedeni ile güzergah çalışmalarında tünel çözümlerine başvurulmaktadır. Bilecik ile Bozüyük istasyonları arasında kalan 26'nolu tünel, grafit şistler içerisinde NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ile Eylül - Ekim 2009 tarihinde giriş portalından açılmaya başlanmıştır. Bu kısımda 298 metre toplam ilerleme yapılmış olup ortalama ilerleme 2,0 metre/gün'dür. Tünelin açıldığı kesimde yerel kaya koşullarının benzer davranışlar göstermesi nedeniyle bu ilerleme hızının değişmeyeceği öngörülmüştür. Aynı hızla ve aynı yöntemle açılması planlanan 6100 metre uzunluğundaki 26'nolu tünelin tamamlanması için gereken süre, 1525 gün olarak hesaplanmıştır. Bu süreye tünelin kemer betonunun imalatı dahil edilmemiş olup, eklendiğinde bu sürenin 200 gün kadar daha artacağı belirlenmiştir. Böylece projenin öngörülen sürede bitmeyeceğinin anlaşılması yanında, tünel güzergahının jeolojik-jeoteknik özellikleri nedeniyle mevcut tünelin NATM ile açılması durumunda, tünel imalat maliyetinin de öngörülenden daha fazla olacağı anlaşılmıştır. Tünelin imalat süresinin ve maliyetinin planlanandan fazla olması nedeniyle, tünel kazı sisteminin tam dairesel kesitli tünel açma makinesi (TBM) ile açılmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir.

Bu çalışmada, Tünel inşasını yapacak olan S627 ürün kodlu TBM'in 26'nolu tünel profilini oluşturan yerel kaya koşullarından faydalanılarak TBM kazı performansının

önceden tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Q_{TBM} yöntemi kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ilerleme hızının 8,35 m/saat, anlık ilerleme hızının ise 0,75 m/saat olacağı hesaplanmıştır. Böylelikle ideal koşullarda tünel imalatının 1 yıl içerisinde tamamlanması öngörülmüştür.

Anahtar sözcükler: Yüksek Hızlı Tren, Tünel, İlerleme Hızı, TBM Performansı, Q_{TBM}

SUMMARY

PERFORMANCE ESTIMATION OF TBM EXCAVATION FOR TUNNEL NO 26 BY USING Q_{TBM} METHOD IN ANKARA-ISTANBUL HIGH SPEED RAILWAY PROJECT

POŞLUK, EVREN

Nigde University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Mustafa KORKANÇ

August 2012, 85 pages

Ankara-İstanbul High-Speed Train Project passes through a rough topography. For high-speed railroad projects, because of the limited slope and curve tolerances the tunnels are preferred in the route studies. The excavation of Tunnel 26 located in graphitic schists between Bilecik and Bozüyük stations was started from entrance portal with NATM (New Austrian Tunnelling Method) in September- October 2009. The total progress is 298 meters in this part and average tunnelling progress rate is 2,0 m/day. Depending on the same local rock conditions along the tunnel route, it is provided that this progress rate won't be changed. The required time to complete the 6100 m-long Tunnel 26 was calculated as 1525 days. The manufacturing of the tunnel arch concrete wasn't added to this time. It is determined that after adding this time will be increased 200 days. Since therefore it is understood that the project won't be completed in the foreseen time and because of the geologic-geotechnic properties of the tunnel route in case of excavating with NATM the tunnel manufacturing cost will be more than foreseen. Hence it is decided to excavate tunnel excavation system with the tunnel boring machine (TBM).

The aim of this study is to estimate the TBM excavation performance by utilizing the local rock conditions forming the tunnel profile 26 of TBM having product id S-627. For this purpose, Q_{TBM} method has been used. As a result of the calculation, the progress rate is 8,35 m/hour and instant progress rate is 0,75 m/hour. Thus in the optimum conditions it is predicted that the tunnel manufacturing will be completed in a year.

Keywords: High-Speed Train, Tunnel, Progress Rate, TBM Performance, Q_{TBM}

ÖN SÖZ

Bu çalışma, Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinde bulunan 6100 metre uzunluğundaki 26'nolu tünelin inşasını yapacak olan S627 ürün kodlu TBM'in tünel profilini oluşturan yerel kaya koşullarından faydalanılarak TBM kazı performansının önceden tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Q_{TBM} yöntemi kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ilerleme hızının 8,35 m/saat, anlık ilerleme hızının ise 0,75 m/saat olacağı hesaplanmıştır. Böylelikle ideal koşullarda tünel imalatının 1 yıl içerisinde tamamlanması öngörülmüştür.

Çalışmalarım sırasında bana yol gösteren değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mustafa KORKANÇ'a, meslektaşlarım ve arkadaşlarım Jeo. Yük. Müh. Altay ERTİN ile Jeo. Müh. Eren ARICA'ya katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarımda arşivlerini kullanma izni veren, benim de üyesi bulunduğum TCDD 2. Demiryolu Yapım Grup Müdürlüğü personeline desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bilimsel çalışmalarım sırasında beni yüreklendiren, tüm çalışmalarımı bitmek bilmeyen bir heyecanla paylaşan, aynı meslekte olmaktan gurur duyduğum eşim Jeo. Müh. Elif APAYDIN POŞLUK'a teşekkür ederim.

Son olarak bana her zaman destek olan, evlatları olmaktan onur duyduğum anne ve babama, hep yanımda olan kardeşime desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	v
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı.....	5
1.2 Ankara – İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinin Tanıtımı	6
1.3 Haritalama Çalışmaları ve Veri Derleme Çalışmaları	7
1.4 İnceleme Alanının Tanıtılması.....	7
1.4.1 Coğrafi konum ve morfoloji	8
1.4.2 İklim ve bitki örtüsü.....	9
1.4.3 Ulaşım.....	10
1.4.4 Ekonomi.....	10
1.5 Önceki Çalışmalar.....	10
1.5.1 Araştırma alanı ile ilgili çalışmalar.....	11
1.5.2 Araştırma konusu ile ilgili çalışmalar	12
BÖLÜM II	14
METARYAL VE METOT	14
2.1 Metot.....	14
2.1.1. Klasik kazı yöntemi	14
2.1.2. Mekanize kazı yöntemi.....	15
2.1.3. Kazı yöntemi seçimi	15
2.2. Tünel Makineleri.....	16

2.2.1. Kısmi kesitli tünel açma makineleri	17
2.2.1.1. Kollu tünel açma makineleri.....	17
2.2.1.2. Kalkanlı tünel makineleri.....	19
2.2.2. Tam kesitli tünel açma makineleri (TBM)	20
2.2.2.1 Tünel açma makinelerinin temel ilkeleri	20
2.2.2.2 Tünel açma makine tipleri	20
2.2.2.2.1 Kalkansız tünel açma makineleri (Gripper).....	21
2.2.2.2.2 Tek kalkanlı tünel açma makineleri.....	22
2.2.2.2.3 Çift kalkanlı tünel açma makineleri.....	23
2.2.2.2.3 Çevre basıncı dengeleme makineleri (EPB)	25
2.2.2.2.4 Çamur Kalkanlı.....	26
2.3 26'nolu Tünelde Kullanılan TBM (S-627) Özellikleri	27
BÖLÜM III.....	32
BULGULAR.....	32
3.1 Bölgesel Jeoloji.....	32
3.2 Çalışma Alanının Jeolojisi	34
3.3 Yapısal Jeoloji.....	35
3.4 Depremsellik.....	36
3.5 Hidrojeoloji.....	37
BÖLÜM IV	38
MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ	38
4.1 Giriş	38
4.1.1 Mühendislik jeolojisi haritalaması çalışmaları.....	38
4.1.2 Sondaj çalışmaları	38
4.1.3 Laboratuvar deneyleri.....	40
4.2 Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri	40
4.3. Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri	44

4.3.1 Q sınıflandırma sistemi.....	46
4.4. Tünel Açma Makinesi (TBM) Performans Analizi	53
4.4.1 Q_{TBM} Yöntemi.....	55
4.4.1.1 Yönlendirilmiş kaya kalite indisi (RQD_o)	56
4.4.1.2 Q sistem değişkenleri (J_n , J_r , J_a , J_w ve SRF).....	57
4.4.1.3 SIGMA (Kaya kütle dayanımı)	57
4.4.1.4 Her bir kesiciye gelen itme kuvveti (F)	57
4.4.1.5 Kesici ömrü (CLI).....	58
4.4.1.6 Kuvars yüzdesi (q)	59
4.4.1.7 Biaksial gerilme (σ_θ).....	59
BÖLÜM V	61
TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PERFORMANS TAHMİNİ.....	61
5.1 26'nolu Tünel Q_{TBM} ve Performans Hesapları	61
5.1.1 Kısım 1 (Km: 216+560 ile 218+710 Arası)	61
5.1.2 Kısım 2 (KM:218+710 ile 218+760 Arası).....	64
5.1.3 Kısım 3 (Km:218+760 ile 219+310 Arası)	65
5.1.4 Kısım 4 (Km:219+310 ile 220+300 Arası)	67
5.1.5 Kısım 5 (Km: 220+300 ile 220+795 Arası)	69
5.1.6 Kısım 6 (Km: 220+795 ile 221+545 Arası)	70
5.1.7 Kısım 7 (Km: 221+545 ile 221+765 Arası)	72
5.2 Tünel Performans Analizi.....	74
BÖLÜM 6.....	76
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR	78
EKLER.....	86
ÖZ GEÇMİŞ	101
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yeni Avusturya tünel inşa metodunun tarihsel gelişimi.....	3
Çizelge 1.2 Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi ikinci etap mühendislik yapıları ..	7
Çizelge 2.1. S-627 tünel açma makinesi genel özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. Tünel güzergahında açılan araştırma sondajlarına ait özet bilgiler	39
Çizelge 4.2. Yapılan deneyler ve deney yapılan örnek sayıları.....	40
Çizelge 4.3. Kayaçların ayrışma derecesi.....	41
Çizelge 4.4. Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli basınç direnci ve arazi tanımlamalarına göre sınıflandırılması	42
Çizelge 4.5. 26 nolu tünelinin bölümlere ayrılmış güzergah kesimleri	43
Çizelge 4.6. Günümüze kadar önerilen başlıca kaya sınıflama sistemleri.....	44
Çizelge 4.7. Değişik koşullara göre RQD değerleri	47
Çizelge 4.8. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem takımı tayin değerleri.....	48
Çizelge 4.9. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem pürüzlülük sayısı değerleri .	49
Çizelge 4.10. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem alterasyon sayısı değerleri	50
Çizelge 4.11. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem suyu azaltma faktörü değerleri.....	50
Çizelge 4.12. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan gerilme azaltma faktörü değerleri	51
Çizelge 4.13. Farklı yeraltı kazısı türleri için orijinal ve güncellenmiş ESR değerleri. .	52
Çizelge 4.14. Kaya kütle sınıflamalarına göre TBM performans modelleri	54
Çizelge 5.1. Kısım1 için Qo değerleri	62
Çizelge 5.2. Kısım 2 için Qo değerleri	64
Çizelge 5.3. Kısım 3 için Qo değerleri	66
Çizelge 5.4. Kısım 4 için Qo değerler	67
Çizelge 5.5. Kısım 5 için Qo değerler	69
Çizelge 5.6. Kısım 6 için Qo değerler	71
Çizelge 5.7. Kısım 7 için Qo değer tablosu	72
Çizelge 5.8. Farklı kesimlere göre TBM performansı zaman hesaplamaları	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Eski Avusturya tünel açma yöntemi kazı aşamaları	2
Şekil 1.2. Maus (1846) tarafından tasarlanan tünel makinesi	3
Şekil 1.3. İlk tünel açma makinesi	4
Şekil 1.4. Çalışma alanının yer bulduru haritası	9
Şekil 2.1. Tünel uzunluğuna göre mekanize kazı ve delme–patlatma yöntemi ile tünel açılmasının karşılaştırılması	16
Şekil 2.2. Tünel Makineleri ve çeşitleri	17
Şekil 2.3. Kollu tünel açma makinesi ve parçaları	18
Şekil 2.4. Tünel açma makinesi temel unsurları	20
Şekil 2.5. Segment ve yerleşim şekli	22
Şekil 2.6. Tek kalkanlı tünel açma makinesi ve parçaları	23
Şekil 2.7. Çift kalkanlı tünel açma makinesi ve parçaları	24
Şekil 2.8. EPB tip Tünel Açma Makinesi kesit görünümü.	26
Şekil 2.9. Çamur tip tünel açma makinesi ve parçaları	27
Şekil 3.1. Türkiye suture zonları ve çalışma alanı.....	32
Şekil 3.2. Çalışma alanının bölgesel jeolojik yapı içindeki konumu.....	33
Şekil 3.3. Bilecik ili depremselliği.....	36
Şekil 4.1. Q ve eşdeğer boyut arasındaki ilişki.....	53
Şekil 4.2. Aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü başlangıç değerini (m) Q değerinin fonksiyonu olarak gösteren tablo	56
Şekil 4.3. Kesici ömrü tahmin abağı.....	58
Şekil 5.1. TBM için göreceli hızlar.....	74

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Lötschberg tüneli güney rampasındaki ahşap destek.....	2
Fotoğraf 1.2. a) İlk modern tünel açma makinesi, b) İlk modern gripper tünel açma makinesi	5
Fotoğraf 2.1. Klasik kazı yöntemlerinin uygulamada görünümü a) hidrolik kırıcı, b) patlatma deliklerinin doldurulma aşaması.	14
Fotoğraf 2.2. Kollu tünel açma makine tipleri.....	18
Fotoğraf 2.3. Kalkan ve Roadheder’ın görünümü	19
Fotoğraf 2.4. Portal (kısmi) kesitli tünel açma makinesi.....	19
Fotoğraf 2.5. Kalkansız tünel açma makinesi.....	22
Fotoğraf 2.6. Herrenknecht marka S-627 model tünel açma makinesi.....	27
Fotoğraf 4.1. Grafit şistlerden bir görünüm	42
Fotoğraf 4.2. Klorit şist grafit şist sınırı.....	43

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

B	Tünel profili ile tünel eksenini arasındaki açı
γ	Birim hacim ağırlık
σ	Basınç direnci
σ_{θ}	Biaksial gerilme
m_1	Aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü başlangıç değeri
D_e	Eşdeğer boyut
q	Kuvars yüzdesi
I_{50}	Nokta yük indeksi

Kısaltmalar

	Açıklama
AR	Günlük ilerleme
CLI	Kesici ömrü
F	Herbir kesiciye gelen itme kuvveti
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
ISRM	Uluslararası kaya mekaniği derneği
Ja	Eklem ayrışma sayısı
Jn	Eklem takımı sayısı
Jr	Eklem pürüzlülük sayısı
Jv	m ³ 'teki toplam eklem sayısı
Jw	Eklem suyu indirgeme sayısı
Km	Kilometre
kNm	Kilonivtonmetre
kW	Kilovat
M	Metre
m	Aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü
mm	milimetre
MPa	Mega paskal
n	porozite
PR	Anlık ilerleme

Q	Kaya kütle kalitesi
RMI	Kaya kütlesi indeksi
RMR	Kaya kütlesi sınıflaması
RQD	Kaya kalite indisi
RQD ₀	Yönlendirilmiş kaya kalite indisi
SIGMA	Kaya kütle dayanımı
SRF	Gerilme indirgeme faktörüdür
T	Süre
TBM	Tünel açma makinesi
UCS	Tek eksenli basınç direnci

BÖLÜM I

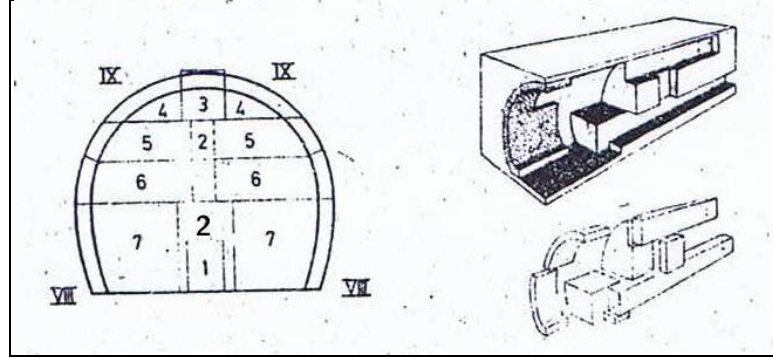
GİRİŞ

Tüneller, ekseninin eğim açısı 30° den küçük olan, iki ucu açık ve boyuna göre çapı çok küçük olan yeraltı kaya yapılarıdır (Köse vd., 2007).

Bu gün kullandığımız “Tünel” kelimesi İngiltere'nin Galler Bölgesinde konuşulan Gal dilinden gelmektedir. Galler bölgesinde sıvı maddelerin taşınmada kullanılan, ince uzun, iki ucu kapatılmış, tahtadan kaplara “Tonne” adı verilmekteydi. Daha sonraları ise mahzen ve bodrum gibi yerleşim yerlerine bu ad verilmiş ve 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra yaygınlaşarak tünel kelimesi bugünkü anlamıyla kullanılmaya başlanmıştır (Köse vd., 2007). Tüneller amaçlarına göre ulaşım ve akışkan nakli için yapılabilir.

Yeryüzünde ilk tünelin M.Ö. 4000’li yıllarında, Babil şehri civarlarında Fırat Nehri altında açıldığı ve uzunluğunun 1 km olduğu bilinmektedir. Tüneller, kazı yüzeyi altında odun yakılarak ısıtılan kayaca, su, sirke veya su sirke karışımı atılarak parçalanma ve dağılmaları sağlanarak açılmaya çalışılmıştır. 1679 da barutun keşfinden sonra ise, kayaları parçalayarak tünel açma yöntemi gelişmiştir. 19. yüzyıla kadar tüneller çoğunlukla savaştan kaçma, korunma veya Osmanlı’da “lağımçı” birliklerinin yaptığı şekli ile düşmana zarar verme amacı ile kullanılırken, 1765-1774 yıllarında Strazburg-Nevtor’da inşa edilen trafik amaçlı da kullanılmaya başlanmıştır (Şeker, 2008).

19. yüzyılda tünelcilik gelişmeye başlamış ve imalatla farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler uygulandıkları ülkenin adı ile anılmaya başlanmıştır. Alman (1803), Belçika (1828), İngiliz (1830), Eski Avusturya (1839) (Şekil 1.1.), Amerika (1854) ve İtalyan (1865) tünel açma yöntemlerinin hepsinde geçici destek (iksa) olarak ahşap, kalıcı destek olarak ise tuğla kullanmışlardır (Vardar, 1985) (Fotoğraf 1.1.).



Şekil 1.1. Eski Avusturya tünel açma yöntemi kazı aşamaları (Kovari, 2003).



Fotoğraf 1.1. Lötchberg tüneli güney rampasındaki ahşap destek (Whittaker ve Frith, 1990)

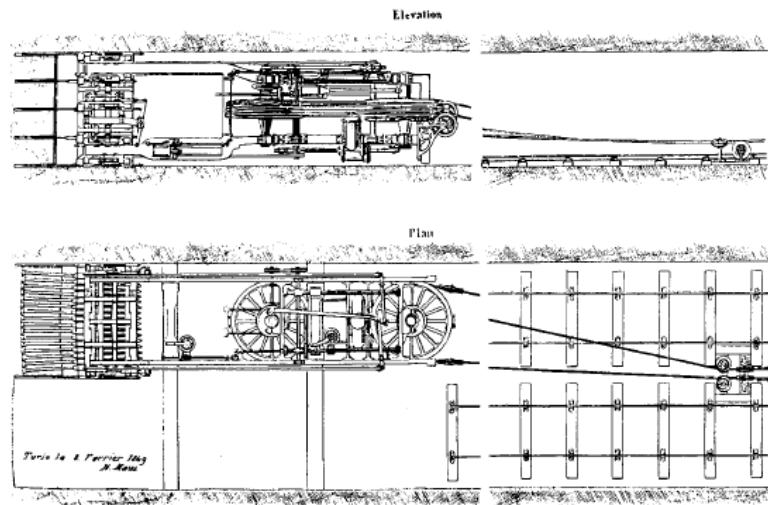
19. yüzyılın sonlarında fiziksel özellikleri çok daha iyi olan çelik iksaların ahşap iksaların yerini alması tünelcilikte yeni bir dönem açmıştır (Whittaker ve Frith 1990). Daha geniş açıklıklar tam kesitte açılmaya başlanmış bunun sonucunda kazı yapmak veya pasanın dışarı atılması için daha büyük makineler tünellere girmeye başlamıştır.

Betonun keşfinin ardından gelişen süreçte püskürtme betonun kullanılmaya başlanması 1930'lu yılları bulmaktadır. L. V. Rabcewicz tarafından Avrupa'daki tünellerde iksa olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1963 yılında Avusturyalı bilim adamı L.V. Rabcewicz ve arkadaşları tarafından Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemini dünyaya duyurulmuştur. Daha sonra Avusturyalı bilim adamları Rabcewicz, Müller, Brunner ve Pacher tarafında geliştirilmiştir (Çizelge 1.1.).

Çizelge 1.1. Yeni Avusturya tünel inşa metodunun tarihsel gelişimi (Whittaker ve Frith 1990)

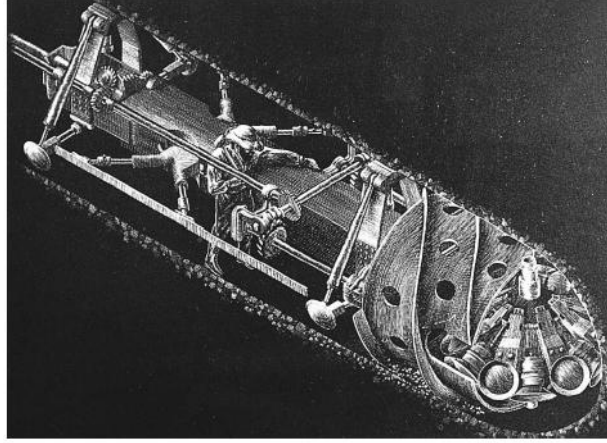
Yıl	Açıklama
1848-1920	Erken priz alan harçların geliştirilmesi, püskürtme beton pompalarının patentinin alınması, İnşaat ve maden uygulamalarında kullanımına başlanması
1948	Kontrollü kaya deformasyonu kavramının geliştirilmesi, şematik kaya Bulonu içeren kaplama sistemi Rabcewicz tarafından açıklandı
1954	Püskürtme betonunun kaplama elemanı olarak ilk olarak Avusturya'daki HES projesinde Brunner tarafından kullanıldı.
1958	Brunner sıkışan zeminlerdeki tünel inşası için püskürtme beton yöntemi olarak sistemin patentini aldı.
1960	Müller tünellerde fazla kaya yüklerinin önlenmesi için yük ve deformasyon ölçümlerinin tasarımın bir parçası olması gerektiğinin farkına vardı. Sistemik ölçümün tasarımın parçası olduğu bir yöntem geliştirdi
1962	Rabcewicz ilk olarak “Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi” terimini Salzburg’da bir toplantıda kullandı.
1964	Rabcewicz’in Water Power dergisinde yayımlanan makalelerinden sonra dünya “Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemini” kabul etti. Tasarımında Mueller ve Rabcewicz’in yol göstermesiyle yöntemin uygulaması Schvvalkheim Tünelinde yapıldı
1964-...	Yöntem tünelcilikte yaygınlaşarak dünya genelinde birçok tünel inşaatında kullanılmaktadır

Sanayi devriminden sonra ise kazı için makine kullanım fikri geliştirilmeye başlanmış, bu amaçla 1846 yılında Belçikalı mühendis Honri Joseph Mous tarafından Tünel Makinesi geliştirilmiş ve Mount Cenis tüneline kullanılmıştır (Maidl, 2008) (Şekil 1.2.).



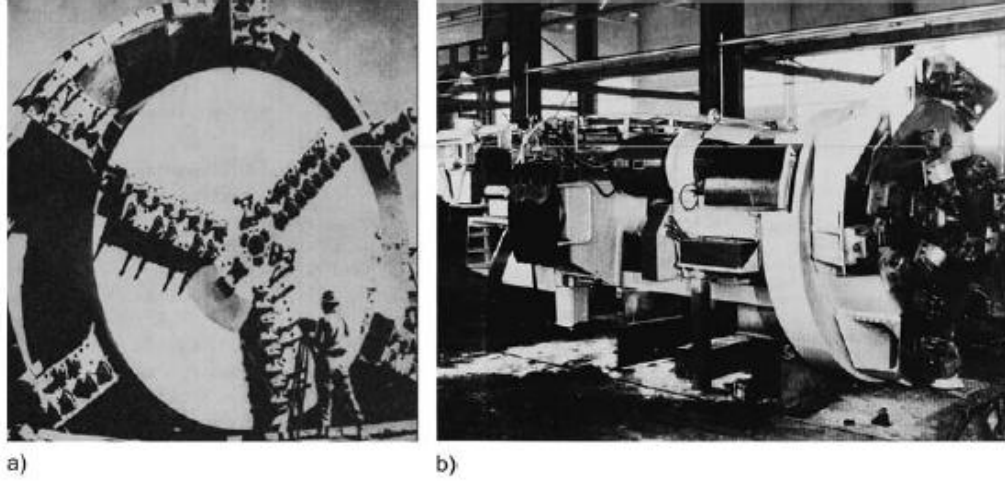
Şekil 1.2. Maus (1846) tarafından tasarlanan tünel makinesi (Maidl, 2008).

Günümüzdeki anlamıyla ilk tünel açma makinesi (TBM) atası sayılabilecek makine ise Charles Wilson tarafından 1853 yılında geliştirilmiştir. Bu makine Hoosac Tüneli inşasında kullanılmıştır (şekil 1.3.) (Maidl, 2008).



şekil 1.3. İlk tünel açma makinesi (Maidl, 2008)

Charles Wilson'ın geliştirdiği makinenin ardından geçen süreçte farklı tasarımcılar tarafından farklı tünel açma makineleri tasarlanarak kullanılmıştır. Bunlara rnek olarak 1866 yılında Cook ve Hunter tarafından geliştirilen tam dairesel tünel açma makinesi, 1882 yılında Beaument'ın geliştirdiği Tünel Açma Makinesi ve 1931 yılında Kranz Schmidt ve arkadaşları tarafından geliştirilen makineler söylenebilir. Ancak modern anlamda ilk tünel açma makineleri 1950'li yıllara kadar geliştirilememiştir. İlk makine 1953 yılında Robins tarafından üretilmiştir ve Oahe barajında kullanılmıştır. İlk modern anlamda Gripper ise yine Robins tarafından üretilmiş ve Humder River (Toronto/Kanada)'da kullanılmıştır (Fotoğraf 1.2.) (Maidl, 2008). Tünel makinelerinin uzun mesafeli kazılarda diğer yöntemlere göre daha ekonomik ve hızlı sonuçlar vermesi, tünel açma makinelerinin daha hızlı gelişmesini sağlamıştır.



Fotoğraf 1.2. a) İlk modern tünel açma makinesi, b) İlk modern gripper tünel açma makinesi (Maidl, 2008)

Ülkemizdeki tünelcilik ise, özellikle su getirmek için açılmış uzun tüneller ve galeriler ile başlamıştır. Anadolu’da ve İstanbul civarlarında su getirmek amacı ile tarihi dönemlerden bu zamana kadar yapılmış galeri ve tüneller vardır. Silifkenin Kuzeydoğusunda milattan önce 300’l yıllarda yapıldığı söylenen 0.80 x 1.50 – 2.00 m çapında ve 45 km uzunluğundaki Aksıfat galerisinden bugün de köylerde su iletmede faydalanılmaktadır (Erguvanlı, 1984).

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada ülkemizin önemli projelerinden biri olan “Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi”nde bulunan 5374 metrelik 26’nolu tünel ile sözü edilen tünelin devamında bulunan jetgrout yöntemi ile tünel profili güçlendirilen 726 metrelik kısmı içeren 6100 metre uzunluğundaki tüneli konu almaktadır. Tamamlandığında toplam uzunluğu 6100 metre olacak olan tünel aynı zamanda ülkemizin en uzun ulaşıım tüneli olma zelliğininide taşıyacaktır. 26’nolu tünel kazısına klasik kazı yöntemi (NATM) kullanılarak Ekim 2009 tarihinde başlanmıştır. Ancak tünel imalatı sırasında yaşanan sorunlar neticesinde tam kesit tünel açma makinesi ile devam edilmesi dşnlmeye başlanmıştır.

Tünel imalatının yapıldığı 298 metrelik kısmında ortalama günlük ilerleme hızı yaklaşık 2,0 metre olarak kayıt edilmiştir. Tünel çeperlerini oluşturan kaya koşıullarının sık

değişkenlik gösteren jeolojik-jeoteknik özellikleri nedeniyle bu ilerleme hızının sabit kalacağı anlaşılmıştır. Kazının çıkış portalı bölgesinde de yapılacağı düşünüldüğünde günlük ilerleme hızı ortalama olarak 4 metre olarak öngörülmüştür. Dolayısıyla 6100 metrelik kısmın açılması için gerekli olan süre 1525 gün olarak hesaplanmıştır. Bu süreye tünel kemer betonu dahil değildir. Bu süreye kemer beton imalatıda eklendiğinde süre 200 gün kadar daha artacaktır. Ayrıca tünel içerisinde mevcut projeye göre yapılan imalatlar sonrası deformasyonların arttığı gözlenmiş ve tünel imalatı için ön görülen destek sistemlerinde revizyona gidilmiş ve maliyet daha da artmıştır. Tüm bu nedenler ışığında tünel kazı sisteminin tam dairesel kesitli tünel açma makinesi (TBM) ile açılması uygun görülmüştür (Poşluk vd., 2011a).

Bu çalışmada inşasına 7 Temmuz 2011 tarihinde TBM ile kaldığı yerden başlayan 26'nolu tünelinin jeolojik-jeoteknik yapısı ve tünel açma makinasının özellikleri karşılaştırılarak TBM performansı irdelenmiştir. TBM performansı yeni gelişen ve temel amacı günlük ve anlık ilerleme hızını hesaplamak olan Q_{TBM} sistemi ile analiz edilmiştir. Q_{TBM} sistemi Barton (1999) tarafından ortaya konulmuştur.

1.2 Ankara – İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinin Tanıtımı

Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinin amacı; ülkemizin en büyük iki kenti olan Ankara ile İstanbul arasındaki seyahat süresinin azaltılması, hızlı, konforlu ve güvenli bir ulaşım imkanı yaratılarak ulaşımındaki demiryolu payının artırılmasıdır. Ankara-İstanbul arasındaki mevcut hat toplam 576 km'dir. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinin tamamlanması sonucunda, iki büyük kent arasında çift hatlı, elektrikli, sinyalizasyonlu ve 250 km/s hıza uygun yeni bir demiryolu inşa edilecek ve Ankara-İstanbul arası 533 km ye inecektir. Ankara-İstanbul arasında yaklaşık 7 saat olan seyahat süresi 3 saate düşecektir. Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinin 2. etabı olan, Köseköy-İnönü arası toplam 150 km uzunluğunda olup, Kesim-1; 95 km (Köseköy-Vezirhan) ve Kesim-2; 55 km (Vezirhan-İnönü) şeklinde projelendirilmiştir (Çizelge 1.2.).

Çizelge 1.2 Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesi ikinci etap mühendislik yapıları (Yüksel Proje, 2009)

Özellik	Kesim 1	Kesim 2	Toplam
Uzunluk	95 km	55 km	150 km
Viyadük	18 ad. (6.120 m)	13 ad. (6.582 m)	31 ad. (12.702 m)
Açma Tünel	13 ad. (25.700 m)	19 ad. (27.210 m)	32 ad. (52.910 m)
Aç-Kapa Tünel	-	1 ad. (1.090 m)	1 ad. (1.090 m)

1.3 Haritalama Çalışmaları ve Veri Derleme Çalışmaları

Çalışma sırasında, öncelikle proje alanı ve çevresinde daha önce yapılmış olan jeolojik etüt ve araştırmalardan yararlanılmıştır. Bölgenin ve çalışma alanının jeolojik durumu hakkında ön bilgi elde edildikten sonra tünel güzergahının 1/1.000 ölçekli jeoloji haritası yapılmıştır. Bu çalışma sırasında mühendislik jeolojisi hesaplarında da kullanılmak üzere; çatlaklar, şistozite düzlemleri, faylar ve konumları, paleoheyelanlar belirlenerek bu haritaya işlenmiştir.

Önceki çalışmlara ek olarak yeni belirlenen tünel güzergahında güzergah jeolojisinin ortaya konulması için, TCDD tarafından açtırılan 6 adet jeoteknik etüt sondajlarından da yararlanılarak tünel boy kesiti çıkarılmıştır. Q_{TBM} hesaplamalarında kullanılmak üzere sözü edilen sondajlardan elde edilen karotlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan ve güzergah jeoloji haritasından yararlanılarak tünel farklı kısımlara bölünmüştür.

1.4 İnceleme Alanının Tanıtılması

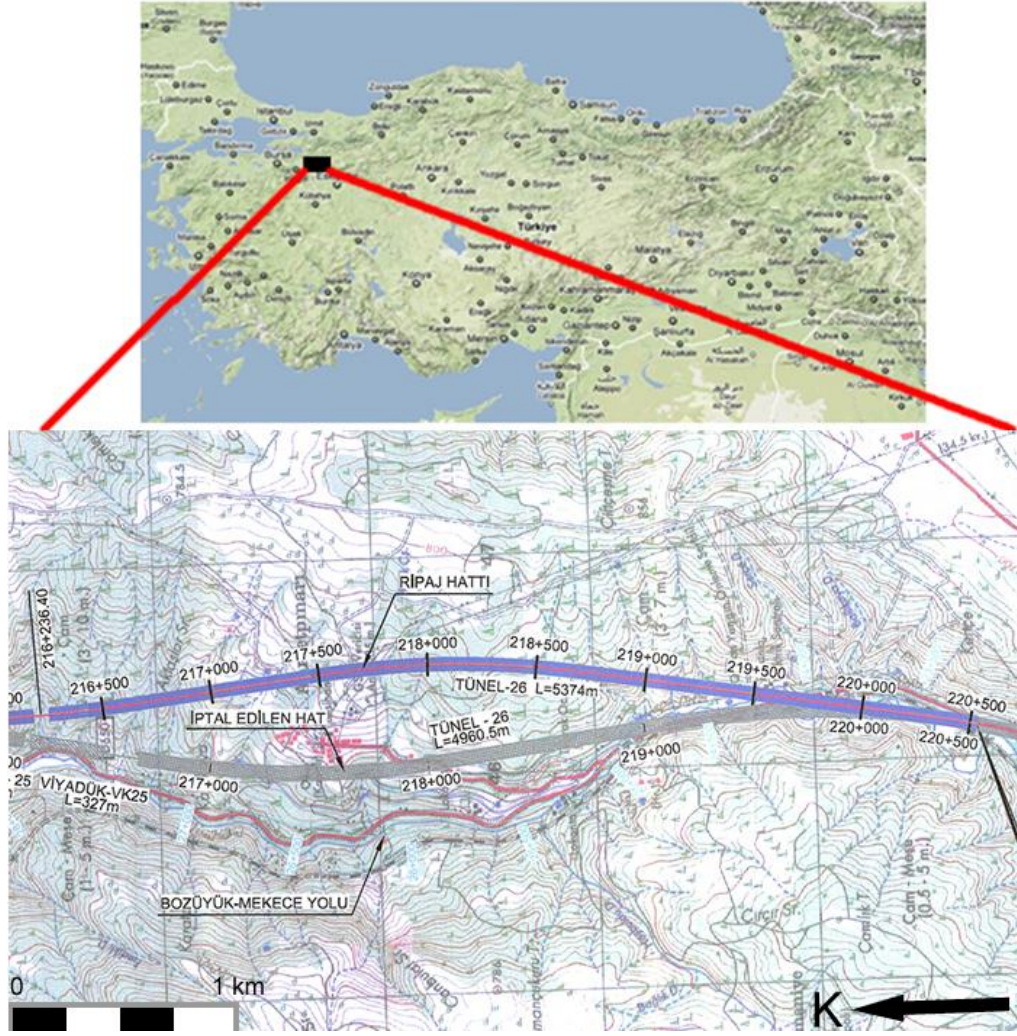
Bu bölümde yüksek hızlı demir yolu projesinin yer aldığı Bilecik ili ile Bozüyük ilçesi arasında bulunan alanın konumu, morfolojisi, iklim ve bitki örtüsü açıklanacaktır. Ayrıca inceleme alanının bulunduğu coğrafyanın ulaşım bilgileri ve ekonomisi de tanıtılmıştır.

1.4.1 Coğrafi konum ve morfoloji

Çalışmanın yapıldığı 26'nolu tünel Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi KM: 216+260 ile KM: 221+750 arasında bulunmaktadır (Şekil 1.4.). Güzergah 1/25.000'lik topoğrafik haritalarda Adapazarı H24-d4 paftasında yer almaktadır. Bilecik iline 10 km. mesafede bulunan çalışma alanı yakınlarında Küplü, Başköy, Kızıldamlar, Ahmetpınar, Kurtköy ve Demirköy köyleri bulunmaktadır.

Çalışma alanındaki en önemli dere, bölgenin morfolojisinde oluşturan Karasu deresidir. Karasu deresinin dışında çalışma alanında irili ufaklı dereler vardır. Bu dereler; Karaman, Çapar, Yayla, Han Deren, Fındıklı, Hoşbuldu ve Şimşek dereleridir.

Çalışma alanı oldukça engebeli bir topoğrafya sergilemektedir. Bu bölge içerisinde yüksekliği yaklaşık 860 metreye kadar ulaşan çok sayıda yükseltiler bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri; Karaağaç (569 m), Dedekaya (598 m), Gökçeören (717 m), Palalıdedeyatırı Mevkii (766 m), Sançukuru (786 m) ve Çiftçeşme Tepeleridir (856 m) dir.



Şekil 1.4. Çalışma alanının yer bulduru haritası

1.4.2 İklim ve bitki örtüsü

Çalışma alanındaki hakim iklim Koçman (1993) tarafından yapılmış olan iklim tipi ve iklim bölgeleri sınıflandırmasına göre; yarı kurak İç Anadolu iklimi ile yarı nemli Marmara iklimi arasında bir geçiş bölgesinde yer almaktadır. Bölgede en yüksek sıcaklık Temmuz ayında gözlenmektedir ($41,5^{\circ}$), en soğuk ay ise Şubat'tır ($-14,5^{\circ}$). Bölge Türkiye ortalamasının üzerinde yağış almaktadır. En çok yağış aldığı aylar Aralık ve Ocak aylarıdır, en kurak ay ise Ağustos ayıdır (www.dmi.gov.tr).

Çalışma alanının, Güney Marmara'nın nemli iklimi ile İç Anadolu'nun kurak iklimi arasında bir geçiş sahasında yer alması, bitki örtüsünü de oldukça çeşitlendirmiştir. Bozüyük'ün doğu sınırını oluşturan Söğüt ve İnönü'ye doğru olan kesimlerinde

Antropojen Step toplulukları mevcut iken, kuzeybatısında Karasu boğazından itibaren ve batısında Aksu vadisinden itibaren meşe, gürgen ve karaçam topluluklarının bulunduğu ormanlar yer kaplamaktadır (Altaş, 2009).

1.4.3 Ulaşım

Bölgede ulaşım, Bozüyük-Mekece-Adapazarı karayolundan (D650) sağlanmaktadır. Bu yol İstanbul-Kütahya- Antalya karayolu (D650) olarak da bilinmektedir. Ayrıca bu yola Bozüyük-İnegöl-Bursa (D200) karayolu bağlantısı da bulunmaktadır. Çalışma hattının batısından Ankara-İstanbul konvansiyonel demiryolu hattı da geçmektedir.

1.4.4 Ekonomi

Bölge ekonomisi tarım ve sanayiye dayanmaktadır. Yetiştirilen başlıca tarım ürünleri; tahıl, şeker pancarı, ayçiçeği, mısır, patates ve şerbetçiotudur. Orman bakımından zengin olmasına karşın ormancılık fazla gelişmemiştir. Hayvancılık da bölge ekonomisinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

Bölgede sanayi çok gelişmiş olup başlıca sanayi kuruluşları; şofben ve radyatör fabrikaları, kağıt ve seramik fabrikaları, sıhhi tesisat malzemesi üreten fabrikalar, bisküvi fabrikası, tekstil fabrikaları, seramik fabrikaları, doğal taş fabrikaları ile kil tesisleridir. Bölgede bulunan kil, kaolin ve feldspat yatakları özel kuruluşlar tarafından işletilmekte ve seramik sektörü bölgesel sanayi açısından öne çıkmaktadır.

1.5 Önceki Çalışmalar

Çalışma alanında önceden yapılmış jeolojik çalışmalar ile TBM performans tahmini konusunda yapılmış çalışmaların daha iyi anlatılabilmesi amacıyla önceki çalışmalar kısmı genel jeoloji çalışmaları ve TBM performans çalışmaları olarak iki alt başlık halinde toparlanmıştır.

1.5.1 Araştırma alanı ile ilgili çalışmalar

Bölgedeki ilk jeoloji çalışmaları MTA Enstitüsü tarafından yaptırılan 1:500.000 (Erentöz, 1975) ve 1:100.000 (Gözler vd., 1997) ölçekli jeoloji haritalarıdır. Ayaroğlu'nun (1979), Bozüyük metamorfitlerinin petrokimyasal özellikleri isimli çalışmasında, Bozüyük-Söğüt (Bilecik) yöresinde Paleozoyik oluşukları Bozüyük metamorfitleri olarak adlandırılmıştır. Çalışmanın amacına uygun olarak, bölgenin temelini oluşturan bu birimin metamorfizma derecesi ve köken kayaçları belirlenmiştir.

Gözler vd. (1985), “Eskişehir Ve Civarının Jeolojisi Sıcak Su Kaynakları” adlı çalışmalarında Eskişehir ili çevresi ve kuzey bölümünde bulunan birimleri ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Bölgedeki gözlenen birimleri stratigrafik olarak tanımlamışlardır.

Küçükayman vd. (1987), tarafından yapılan çalışmada Bozüyük-Tavşanlı-Kütahya arasının jeoloji haritaları yapılmış ve yapısal özellikler tanımlanmıştır. Bu alandaki temeli oluşturan birimlerin iki ayrı metamorfik kuşağı oluşturduğunu, kuzeydeki metamorfiklerin düşük dereceli, güneydekilerin ise yüksek basınç metamorfizması geçirdiği ortaya konulmuştur. İnegöl-Bozüyük tektonik hattının olası bir suture zone olabileceği ve ayrıca granitik kayaçların kuzeydeki metamorfikler ile ilişkisinin intrüzif olmayıp, tektonik olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, bölgesel yükselimin Miyosen'in hemen öncesinde başlamış olduğu görüşü savunulmuştur.

Koçyiğit vd. (1991), yaptıkları çalışmada İnegöl-Bozüyük-Bilecik arasında kalan bölgeyi jeolojik ve tektonik unsurlar bakımından incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma ile bölgedeki birimler için daha önceki çalışmada önerilen stratigrafik adlamalar stratigrafi adlama kurallarına göre yeniden düzenlenmiştir.

Gözler vd. (1997), Bozüyük'ün doğusunu içine alan çalışmalarında, Orta Sakarya ve güneyinin jeoloji haritaları yeniden çalışmışlardır. Bunun yanında, bölgenin jeolojik sorunları ortaya konularak çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Bu anlamda bölgede yer alan metamorfiklerin metamorfizma koşulları ve kökenleri, granitik kayaçların oluşum şartları ve yaşları, Neojen'deki detay çalışmalarla bölgedeki neotektonik rejimle ilgili önemli olaylar araştırılmıştır.

Tokay ve Altunel (2005), yaptıkları çalışmada, batıda İnegöl ile doğuda Tuz Gölü arasında yer alan Eskişehir fay zonunun İnönü-Dodurga segmentini incelemişlerdir. Bu çalışma ile segmentin aktif olduğu sonucuna varmışlardır.

1.5.2 Araştırma konusu ile ilgili çalışmalar

Barton (2000), toplam uzunluğu 1000 kilometreyi bulan ve TBM ile açılan 145 tünelin analizi sonucu TBM performansı ile kendisi tarafından önerilen Q kaya kütle sınıflamasını ilişkilendirerek günlük ve anlık TBM ilerlemesinin tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur.

Sapigni vd. (2002), tarafından yapılan “Kaya kütlesi sınıflamaları kullanılarak TBM performansı tahmini” isimli çalışmalarında kuzey İtalya’da metamorfik kayalar içerisinde açılan 14 km uzunluğundaki tünelde, farklı kaya kütle sınıflamaları kullanılarak TBM performans modellemeleri irdelenmiştir.

Bieniawski vd. (2007), tarafından yapılan çalışmada RMR kaya kütle sınıflaması ile TBM performansı ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla RMR kaya kütle sınıflama sistemi ile oran ilerleme hız tainini amaçlayan bir formül önermişlerdir.

Yağız (2007), Sert Kaya TBM’lerinde performans öngörmek için kaya kütlesi özellikleri kullanılması isimli çalışmasında Amerika’da bulunan 7500 metre uzunluğundaki sağlam kayada TBM ile açılan tünel verileri kullanılmıştır. Bu veriler TBM’de ölçülen penetrasyon oranı ve kaya özellikleri (tek eksenli basınç direnci, Brezilyan çekme dayanımı, kırılgenlik / tokluk, zayıflık düzlemleri arasındaki mesafe ve kaya kütlesi içinde süreksizliklerin yönelimi) dir. Bu veriler kullanılarak, hem TBM performansına kaya kütle özelliklerinin etkisini değerlendirilmiş hem de TBM performans tahmini için yeni bir ampirik eşitlik önerilmiştir.

Gong ve Zhao (2009), tarafından yapılan çalışmada Singapurda bulunan TBM tünelleri için kayaların parçalabilirliği ile TBM performansı ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

Bunun için kayanın tek eksenli basınç direnci ve hacimsel eklem sayısı kullanılmış, sonuçlar sayısal simülasyonlar ile denetirmeye çalışmışlardır.

Hassanpour vd. (2009), yaptıkları çalışmada jeolojik ve jeoteknik bilgi ve TBM parametreleri, kullanılarak CSM, NTNU ve QTBM yöntemleri ile tahmin modelleri kullanılarak tahmin edilen makine performansı ile gerçekleşen ilerlemeler karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kaya kütle özellikleri, TBM performans parametreleri ile korelasyonu sonucunda ampirik yöntemler geliştirmişlerdir.

Hamidi vd. (2010), tarafından İran'ın batısında bulunan Zagros tüneline inceleyerek yaptıkları “RMR sistemini kullanarak sert kaya TBM performansı tahmini” isimli çalışmalarında RMR sistemi ile daha önceden yapılan TBM performans analizi çalışmalarını irdelemişlerdir. Daha sonra elde ettikleri verilerle (RMR) sistemi kullanılarak TBM performans için uygun bir ampirik öngörü modeli oluşturmuşlardır.

Caner (2010), “Sıkışan zeminlerde tam cepheli tunel açma makinelerinin performans analizi ve Uluabat kuvvet tuneli örneği” isimli çalışmasında grafit şistler içerisinde açılan tünelde yaşanan sorunlar ve bu sorunlar ile TBM performansı ilişkisini irdelemiştir.

BÖLÜM II

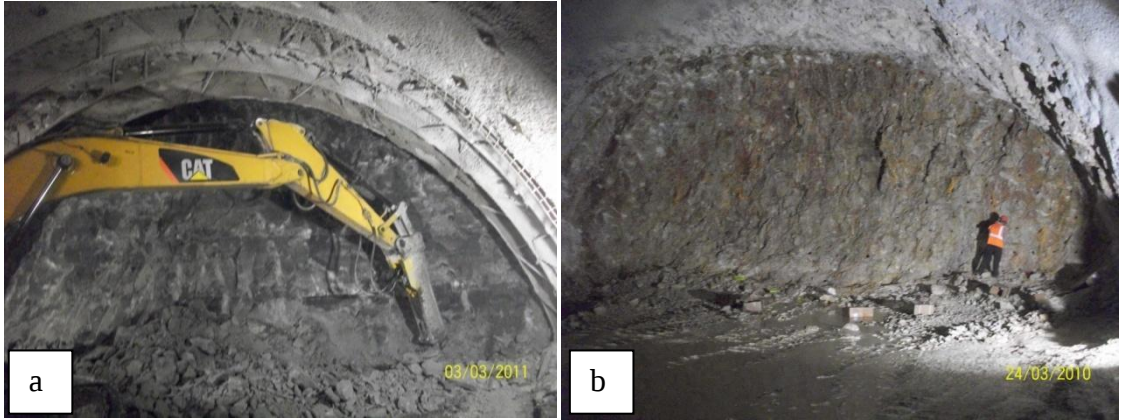
METARYAL VE METOT

2.1 Metot

Tünel ve galeri imalatında kazı en önemli aşamalardan biridir. Kazının yapılış şekli, kullanılan malzeme kazıyı etkilemekte bu da süre kazancı ya da kaybı olarak geri dönmektedir. Tünelcilik ve yeraltı madenciliğinde edinilen tecrübelerle geliştirilen yöntemler, kazı ve ardından yapılacak desteklemeler üzerine kurulmuştur. Günümüzde kazı işlemleri klasik kazı ve mekanize kazı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır.

2.1.1. Klasik kazı yöntemi

Klasik kazı yöntemleri, ilk tünelcilik uygulamalarından beri kullanılan yöntemlerdir. Bu kazı yönteminde insan gücü, hidrolik kırıcılar, delme-patlatma vb. yöntemleriyle kazılmak istenilen kazı ortamının (kayaç ortamının) parçalanarak kazılması işlemi olarak tanımlanabilir. Bu işlem sırasında kazılan kayaç ortamına bağlı olarak kas gücü, hidrolik kırıcılar, delgi yapan araçlar, yükleme yapan araçlar, çeşitli patlayıcılar kullanılmaktadır (Fotoğraf 2.1.).



Fotoğraf 2.1. Klasik kazı yöntemlerinin uygulamada görünümü a) hidrolik kırıcı, b) patlatma deliklerinin doldurulma aşaması.

2.1.2. Mekanize kazı yöntemi

Mekanize kazı, sanayi devriminin ardından gelişen bir yöntemdir. Klasik yöntemin aksine daha az kas gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Mekanize kazı yöntemi, kazıyı kolaylaştırmayı ve kazı süresini kısaltmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde kazılmak istenen kayaç ortamı makineler aracılığı ile kazılmaktadır.

2.1.3. Kazı yöntemi seçimi

Tünel imalatında kazı yöntemi seçimi beraberinde avantajlar ve dezavantajlar getirir. Temelde kazı yöntemi seçilirken tünelin uzunluğu, ekonomik koşullar, jeolojik koşullar ve çevre etkileri dikkatle göz önüne alınmalıdır.

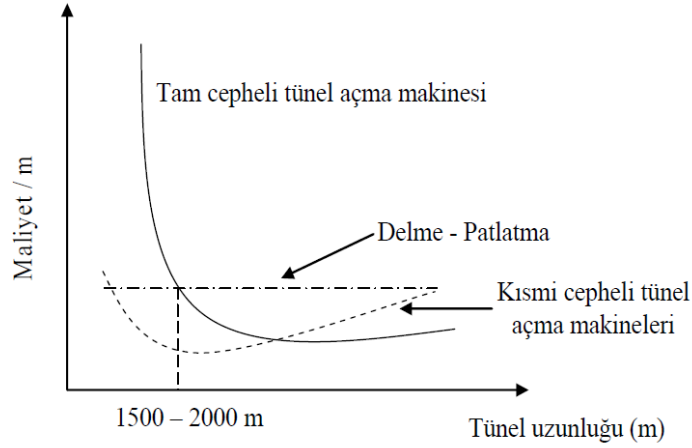
Mekanize kazı yöntemlerinin delme-patlatma yöntemlerine göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir (Bilgin, 1989);

- Yeryüzü tasmanlar daha azdır,
- İşçi sayısı daha azdır,
- Kazı profili sabittir ve profil düzeninin oluşturulması kolaydır,
- Pasa boyutu sabit ve kolaydır,
- Havalandırma ihtiyacı daha azdır,
- Devamlı kazı yapılabilir.

Bu avantajlarının yanında mekanize kazı yöntemlerinin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

- İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Montaj ve demontaj sürelerinin uzun olması,
- Kalifiye eleman ihtiyacı,
- Makine temin süresidir.

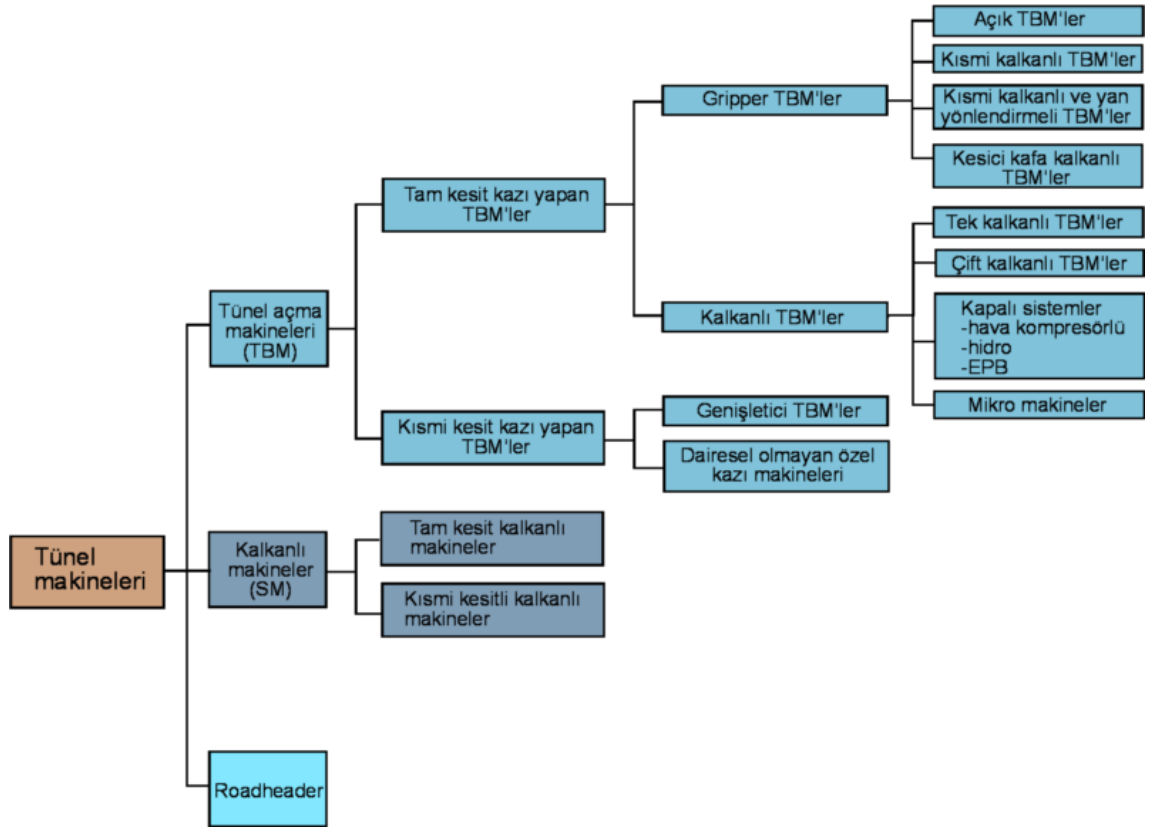
Bütün bu avantaj ve dezavantajlar göz önüne alındığında, uzun tünellerde tam cepheli ya da kısmi cepheli tünel açma makinelerinin kullanılması, maliyet açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir (Pakes, 1991) (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Tünel uzunluğuna göre mekanize kazı ve delme–patlatma yöntemi ile tünel açılmasının karşılaştırılması (Pakes, 1991).

2.2. Tünel Makineleri

Charles Wilson tarafından 1853 yılında geliştirilen tünel açma makinesinden sonra çok büyük yol kat edemeyen tünel açma makineleri, 1950’li yılların başında ilgi görmeye başlamıştır. James Robbins’in kalem uçlu keskiyer yerine döner diskli keskiyerin kullanılması fikriyle birlikte 1956 yılında Toronto’daki bir uygulamada 38 m’lik ilerleme sağlanmıştır. Bu uygulama ile TBM’lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabileceği gerçeğini ortaya koymuştur (Maidl vd., 2008). İlerleyen yıllarda tünel açma makinelerine ilgi giderek arttırmıştır. Bunun sonucu olarak mekanize kazıda kullanılan makinelerin çeşitleri ihtiyaca göre geliştirilmeye başlanmıştır. Şekil 2.2.’de bu makineler ve çeşitleri Alman Tünel Komitesi sınıflamasına göre gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Tünel Makineleri ve çeşitleri (Maidl vd., 2008)

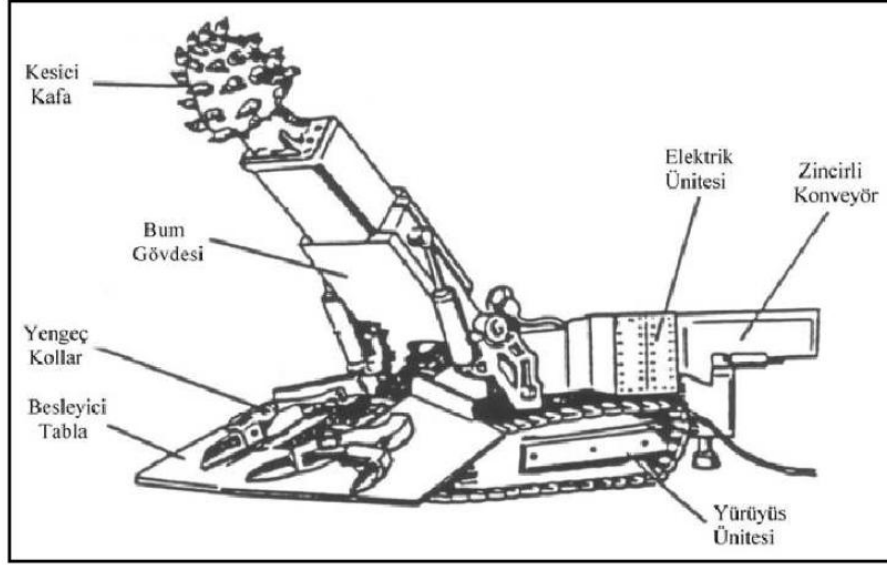
2.2.1. Kısmi kesitli tünel açma makineleri

Bu tip tünel makineleri kazı yüzeyinin tamamında aynı anda kazı yapılmadığından dolayı bu ismi almaktadırlar. Bu makineler genellikle yumuşak ve orta-sert olan kayaların kazısında kullanılır. Madencilikte üretim amaçlı, tünelcilik sektöründe ise kazı amaçlı kullanılmaktadır.

2.2.1.1. Kollu tünel açma makineleri

Bu makineler Macaristan'da 1950'de ilk olarak kömür ocaklarında kullanılmalarının ardından büyük teknolojik gelişmelere uğramışlardır. Masif formasyonlarda üst kullanım sınırı 500 kg/cm^2 iken bugün bu sınır 900 kg/cm^2 'ye kadar çıkmıştır, kırıklı ve çatlaklı formasyonlarda ise $1500\text{-}1600 \text{ kg/cm}^2$ 'ye kadar basınç dayanımına sahip kayalar ekonomik olarak kazılabilmektedir (Bilgin, 1989).

Bir kollu makine 5 ana bölümden oluşur, bum ünitesi, yürüyüş ünitesi, malzeme yükleme ünitesi, malzeme aktarma ünitesi, hidrolik ve elektrik ünitesi (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Kollu tünel açma makinesi ve parçaları (Bilgin, 1989)

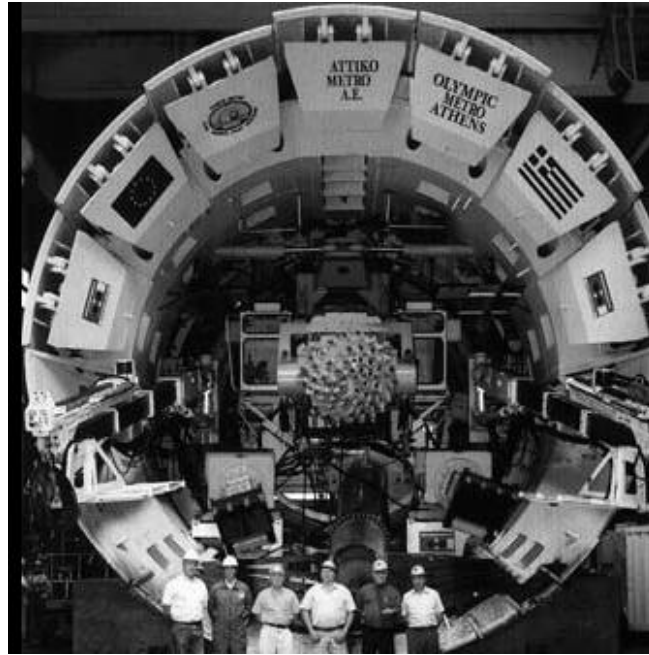
Kollu tünel açma makineleri ağırlıklarına ve kesici kafa tiplerine göre sınıflandırılmaktadır. Kesici kafanın, kazı yüzeyine dik veya paralel hareket etmesi kazı verimini önemli ölçüde etkiler. Tambur şeklindeki kazıcı kafalar (kazı yüzeyine dik hareket), spiral (arma paralel hareket) şekilde tasarımılandırmış kesici kafalara nazaran sert formasyonlarda daha verimli kazı yapabilmektedir (Bilgin, 1989). Fotoğraf 2.2.'de kollu kazı makine tipleri gösterilmektedir.



Fotoğraf 2.2. Kollu tünel açma makine tipleri

2.2.1.2. Kalkanlı tünel makineleri

Kalkanlar makine etrafında kazı alanını korumak amacıyla kullanılan elik borulardır. Zayıf kayalarda ve zeminlerde kullanılmaktadırlar (Kolymbos, 2005). Kalkanın içerisinde kazı yapan kesiciler bulunur ve kazı yapıldıkça kalkan kazı yapılan yere doğru itilir. Tam dairesel kesitte kazı yapılan türleri olduğu gibi kısmi kesitte kazı yapan türleri de vardır.



Fotoğraf 2.3. Kalkan ve Roadheader'ın görünümü (Kolymbos, 2005)



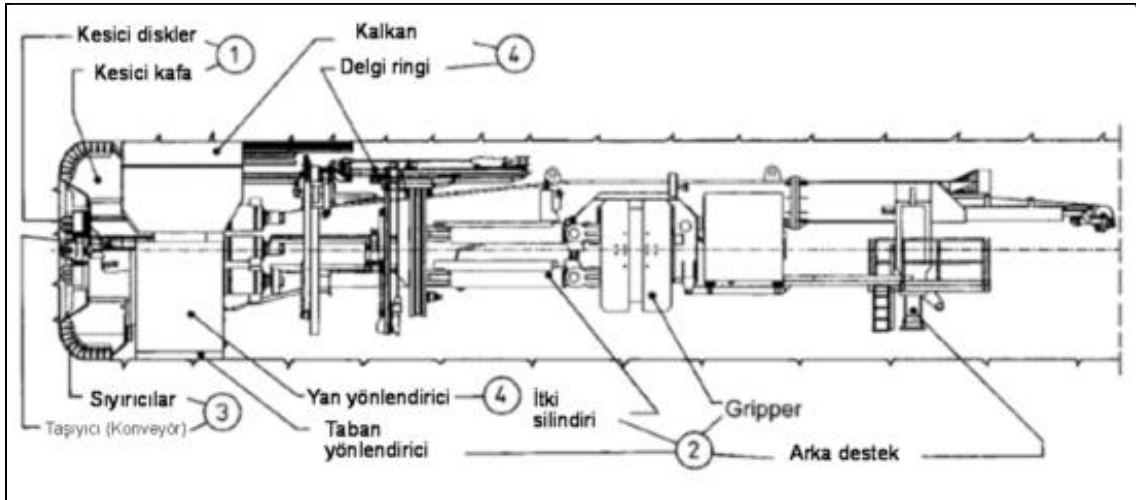
Fotoğraf 2.4. Portal (kısmi) kesitli tünel açma makinesi (Lunardi, 2008)

2.2.2. Tam kesitli tünel açma makineleri (TBM)

Bu tür makineler kazı alanının tamamında kazı yapmaktadırlar. Geçtiğimiz 50 yılda İhtiyaç doğrultusunda hızla gelişmekte olan TBM'ler bu gün 10 cm çapından 19 metre çapına kadar her boyda üretilmekte, sert kayaatan zemine kadar hemen hemen her türlü ortamda ilerlemektedir.

2.2.2.1 Tünel açma makinelerinin temel ilkeleri

Tünel açma makineleri temel unsurları kesici kafa, itme silindirleri, yönlendirme silindirleri, kesici kafayı döndüren motorlar, beton tahkimat elemanlarını yerleştiren erektrlerden oluşur. Tünel açma makinelerinin destek donanımlarına back-up sistemleri adı verilir, bu kısımda hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan cıvataları için delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyör ve vagonlar bulunmaktadır (Caner, 2010) (şekil 2.4.).



şekil 2.4. Tünel açma makinesi temel unsurları (Maidl vd., 2008) (1-Delme sistemi, 2-İtme sistemi, 3-Pasa taşıma sistemi, 4- Destek sistemi).

2.2.2.2 Tünel açma makine tipleri

Tam cephe tünel açma makineleri aynayı tamamen kesikleri ile kavrır ve kazı yapar. Kazma işleminin gerçekleşmesi için iki önemli kuvvet vardır. Kesici kafanın aynaya doğru itilmesi ve bu itilme sırasında kafanın dönmeye başlaması kazı olayını

gerçekleştirir. Aynadan kazılan malzeme kesici kafa üzerinde bulunan kanatçıklar tarafından kesici kafa arkasındaki hazneye aktarılır. Hazne içerisinde bulunan konveyör bant çıkan pasanın nakliyatını yapmaktadır.

Tünel açma makinelerinde kesilecek formasyona göre kesici kafa dizaynları ve kullanılan keskiler değişmektedir. Genel olarak yumuşak formasyonlarda ripper dişler, kale keskiler kullanılır. Kompleks zeminlerde ise kesici kafa hem ripperler hem de disk keskilerden oluşur. Disk keskiler olası sert damarlı kayaları kesmek için kesici kafa üzerine yerleştirilmiştir. Sert zeminlerde ise kesici kafada sadece disk keskiler bulunmaktadır.

Tünel açma makinelerinin özellikle çalıştığı ortam koşullarına ve kazı yüzeyinin açık kapalı olma durumuna göre sınıflandırılırlar (Şekil 2.2.).

2.2.2.2.1 Kalkansız tünel açma makineleri (Gripper)

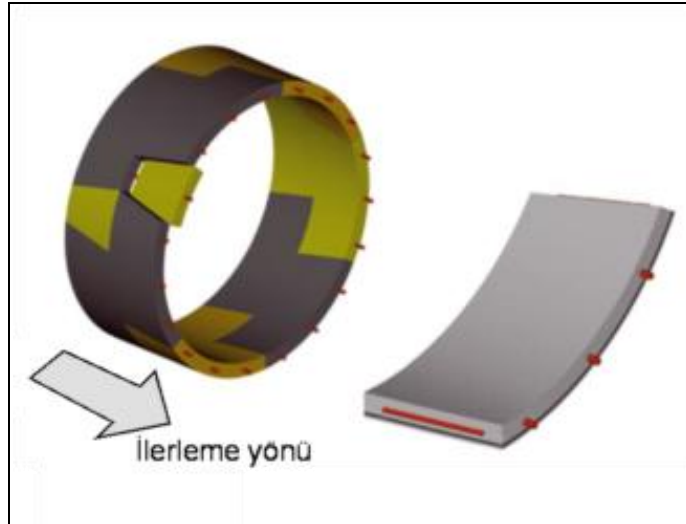
Sert ve kendini tutabilen zeminlerde açık (kalkansız) tünel açma makineleri tercih edilmektedir. Bu tip tünel açma makineleri ile kazı devam ederken tahkimat arka kısımda yapılmaktadır. İlerleme yapılırken itme gücü; hidrolik tırnakların yandaki sağlam zemine basınç yapıp iyice sıkıştırılmasından sonra en önde bulunan ve kazıyı yapan kısmın ileri doğru hidrolik pistonlar vasıtası ile itilmesiyle sağlanmaktadır. Her kazı aşaması hidrolik pistonların uzunluğu kadar yapılabilmektedir. Kazı işlemi bittikten sonra yan kısımlarda bulunan ve tırnak görevi gören pistonlar boşaltılmakta daha sonra arka kısım, ön kısma doğru çekilir ve tırnaklar tekrar sabitlenmektedir. Bu işlemlerden sonra bir sonraki kazı işlemi başlatılmaktadır. Tahkimat sistemi ise önde kazı devam ederken arka kısımda yapılır (Fotoğraf 2.5.). Burada önemli olan kayanın kendini tutabilecek ve itme silindirlerinin yapmış olduğu basınca dayanabilecek ölçüde olması gerekmektedir.



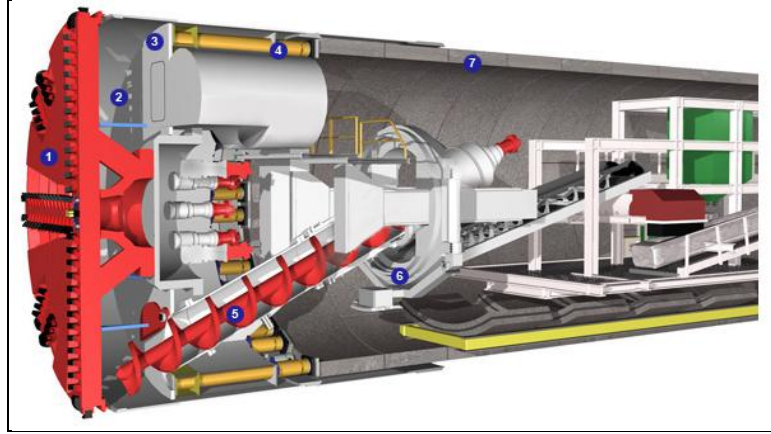
Fotoğraf 2.5. Kalkansız tünel açma makinesi

2.2.2.2 Tek kalkanlı tünel açma makineleri

Tek kalkanlı tünel açma makinelerinde tam daire Şeklinde elik kalkan bulunmaktadır. Yumuşak zeminlerde, kompleks zeminlerde ve kaya içerisinde açılacak tünellerde kullanılabilirler. Tahkimat olarak beton prekast segmentler kullanılmaktadır (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Segment ve yerleşim şekli (Lunardi, 2008)



Şekil 2.6. Tek kalkanlı tünel açma makinesi ve parçaları (Caner, 2010) (1-kesici kafa, 2-kazı bölmesi, 3-basınç bölümü, 4-itme silindirleri, 5-burgu konveyör, 6-erektör, 7-prekast beton segmentleridir).

Tek kalkanlı tünel açma makineleri kazı adımları (Caner, 2010);

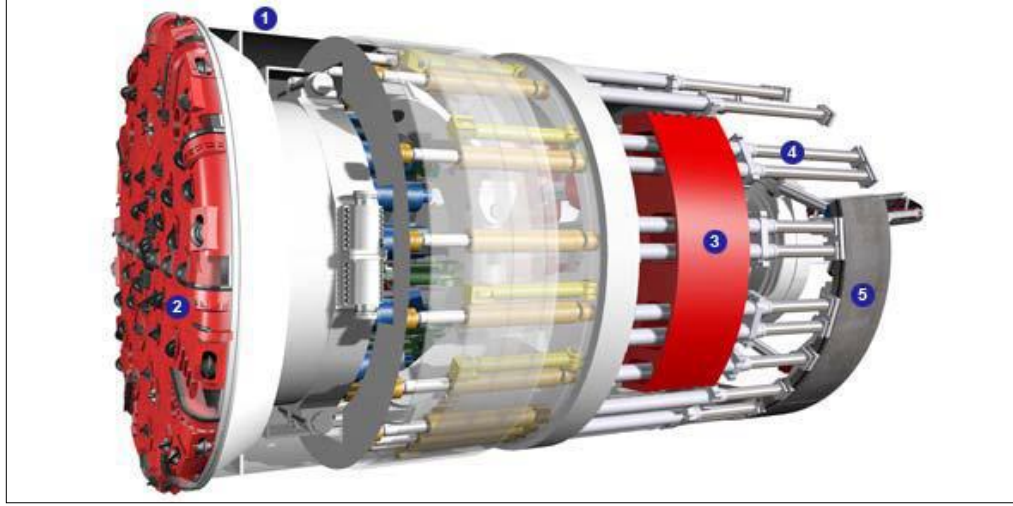
1. İtme silindirleri segmentlere dayanarak kafayı ileri doğru iter. Bu durumda kafa hem aynaya doğru ilerlemekte hem de dönmektedir. Bu şekilde kazı yapılmaktadır. Kazıdan çıkan pası burgu konveyör ile aktarılıp atılmaktadır.
2. Bir adımlık kazı tamamlanmış, silindirler tamamen açılmış ve kafa dönüş işlemi durdurulmuştur.
3. İtme silindirleri kısım kısım kapatılır ve prekast segmentler yerleştirilir.
4. Segmentlerin arka kısmına su-çimento-kum enjekte edilip tahkimat tamamlanır.
5. Silindirler son yerleştirilen segmentlere dayanır ve TBM kazıya hazır hale getirilir.

2.2.2.2.3 Çift kalkanlı tünel açma makineleri

Bu tür tünel açma makineleri teknolojik olarak en donanımlı makine türlerindendir. Bu tipteki tünel açma makineleri pek çok jeolojik koşullara kolaylıkla adapte edilebilmektedir. Çift kalkanlı tünel açma makineleri özellikle fay zonlarının bulunduğu sert kaya koşulları altında inşa edilen uzun tünellerin kazılmasında kullanılmaktadır (Caner, 2010).

Çift kalkanlı makinelerde hem tek kalkanlı olarak hem de teleskopik olarak ana kalkanın içine uzanabilen kuyruk tarafındaki ikinci kalkan bir kavrayıcı (gripper) düzeneği ile kullanmak mümkündür. Bu tür yapının avantajı sabit kuyruk şildinde

kaplama işi ile kavrayıcıları iterek yapılacak açma işlerinin aynı anda gerçekleştirilmesine imkan sağlayan iyi arazi şartlarında çalıştığı zaman ortaya çıkmaktadır. Bu makineler sert ve kompleks zeminlerde kullanılabilmektedir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Çift kalkanlı tünel açma makinesi ve parçaları (Caner, 2010) (1- kalkan, 2- kesici kafa, 3-tırnak (gripper), 4-itki pistonları, 5-prekast segment)

Çift kalkanlı tünel açma makinelerinin gelişmesi 1980’li yıllarda olmuştur. Ön kalkan kepçe tasarımı geliştirilmiş, keski ve kepçeler kırıklı arazide çalışırken görebilecekleri hasara karşı korunmuşlardır. 7-14 MPa basınç direncine sahip yumuşak tüflerde geniş aralıklı disk kesiciler kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Çift şiltli TBM’ler tek kalkanlı gibi kullanılabilmektedir. Bu durumda;

1. Aşama: Kavrayıcılar kapalı durumundadır. Çift kalkanlı TBM’in tek kalkanlı gibi kullanımında kavrayıcı ve ana itme silindirleri kullanılmaz. İkincil itme silindirleri beton segmentlere dayanarak kesici kafayı aynaya doğru iter ve kafa dönmeye başlar.
2. Aşama: Kazı bitmiş itme silindirleri tamamen açılmış ve kesici kafa durdurulmuştur.
3. Aşama: İkincil itme silindirleri kapatılır ve erektör yardımı ile segmentler yerleştirilmektedir.
4. Aşama: İkincil silindirler segmentlere dayanmış ve TBM kazı için hazır konuma gelmiştir.

Klasik çift kalkanlı çalışma düzeninde ise;

1. Aşama: Kavrayıcılar açılmış ve TBM sabitlenmiştir. Ana itme silindirleri kesici kafayı aynaya doğru iter ve kesici kafa dönmeye başlar.
2. Aşama: TBM kazı yaparken erektör segmentleri yerleştirilir.
3. Aşama: Ana itme silindirleri tam olarak açılmış ve kazı bitmiştir. Kavrayıcılar kapatılır ve ikincil itme silindirleri segmentlere dayanarak kavrayıcı şildini kapatırlar. Bu çalışma düzeninin en büyük avantajı kazı yapılırken aynı anda segmentlerin yerleştirilebilmesidir. Bu şekilde zamandan tasarruf edilir ve daha verimli çalışmak mümkün olur (Caner, 2010).

2.2.2.2.3 Çevre basıncı dengeleme makineleri (EPB)

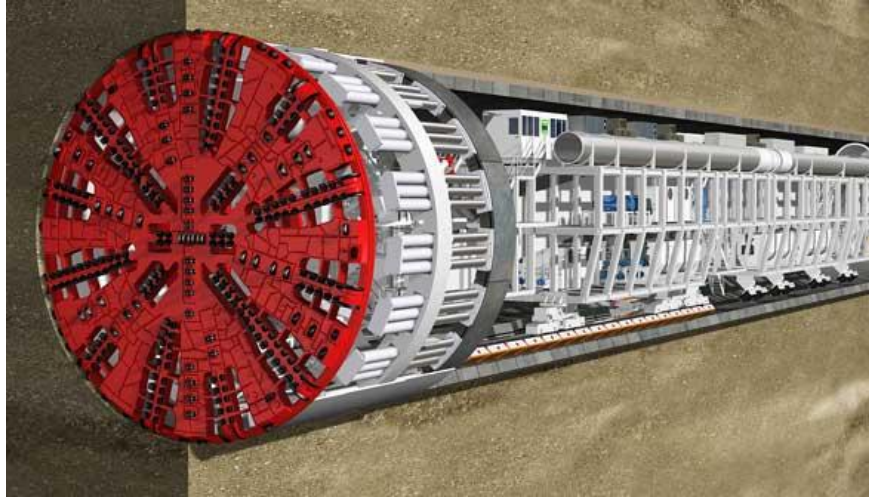
Çevre basınçlarını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya’da 1960-70’li yıllarda görülmeye başlamıştır. Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılmaktadır. Temel çalışma prensibi su gelirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, “bizzat arazi içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkan verilmesi” diye tanımlanmaktadır (Çınar ve Feridunoğlu, 2010).

EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin ortamlarında kullanılmak üzere tasarlanmaktadır.

Bir EPB makinesinde kazılan malzeme bir burgu konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılmaktadır. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekmektedir (Einstein ve Bobet, 1997).

EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir. EPB makinesinde öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itirme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı zemin kazı haznesine dolmaya başlamaktadır. Kazı haznesi tamamen

dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme burgu konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır. Burada burgu konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Burgu konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına taşınmaktadır (Şekil 2.8.) (Yavaş, 2008).



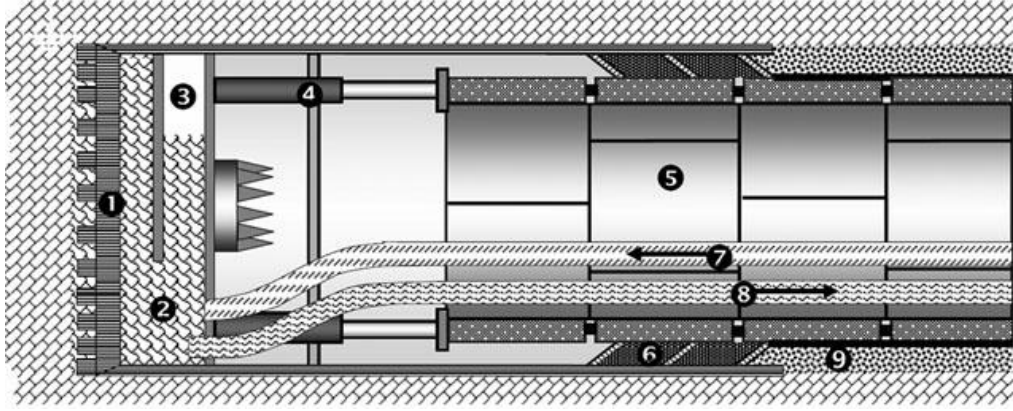
Şekil 2.8. EPB tip tünel açma makinesi kesit görünümü (www.herrenknecht.com).

2.2.2.2.4 Çamur Kalkanlı

Bu tip makineler, arazinin çok akıcı olduğu veya tünel güzergâhı boyunca akıcı formasyonlara da rastlanabileceği durumlar için yapılmışlardır. Makine, değişken devirli tam cephe kesme kafasına sahip, astarlara dayanarak itmek suretiyle kuvvet oluştururlar. Genel olarak kalem kesikiler kullanılmakla birlikte, bazen disk kesikilerle birlikte kullanılabilmektedir. Makine kalem kesikli tam cephe şilt tipinden "daima basınç altındaki kafa ile çalışıyor" olma özelliğiyle anılmaktadır (Doğruoğlu, 2009).

Akıcı çamur (genellikle bentonit) ayna ile kesme kafası arasındaki boşluğa pompalanmaktadır. Bu sıvı aynadan sıyrılarak kazılıp çıkarılan malzeme ile karışmakta ve bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanmaktadır.

Yeryüzünde süzülüp temizlenen sıvı, yeniden devreye sokularak kullanılmaktadır (Doğruoğlu, 2009) (Şekil 2.9.).



Şekil 2.9. Çamur tip tünel açma makinesi ve parçaları (1-kesici kafa, 2-slurry çamuru, 3-hava boşluğu (kabarcığı), 4-itki ünitesi, 5-segmentler, 6-fırça (kuyrukta sızdırmazlık), 7-slurry çamuru besleme ünitesi, 8-slurry tahliye, 9-enjeksiyon) (<http://www.p3planningengineer.com/productivity/tunneling/tunneling.htm>)

2.3 26'nolu Tünelde Kullanılan TBM (S-627) Özellikleri

26'nolu tünelde, Herrenknecht marka S-627 model numarasına sahip tam dairesel kazı yapan tünel açma makinesi kullanılmaktadır. Makine sağlam kaya makinesi olup, tek kalkanlıdır. Kesici kafa dizaynı miks (sağlam ve yumuşak kayada kazı yapmaya uygun) özelliktedir (Fotoğraf 2.6.). Herrenknecht marka S-627 model TBM'in özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.



Fotoğraf 2.6. Herrenknecht marka S-627 model tünel açma makinesi

Çizelge 2.1. S-627 tünel açma makinesi genel özellikleri.

SEGMENT KAPLAMA	
Tipi	Mühürlü universal halka segment
Dış Çapı	13.400 mm
İç Çapı	12.500 mm
Segment Uzunluğu	2,000 mm
Segment Kalınlığı	450 mm
Toplam Segment Sayısı	7 + 1
KALKAN	
Kalkan tipi	Tek kalkanlı
Ön Kalkan	
Ön kalkan çapı	13.700 mm
Delgi noktaları	7 x üst kısmı eğimli
Delgi portları	2 x yatay
Orta Kalkan	
Orta kalkan çapı	13.680 mm
Kuyruk Kısım	
Tipi	Fix, kaynaklı
Çap	13.660 mm
Kalınlık	Yaklaşık 60 mm
Çimento şerbeti enjeksiyonu	Çimento şerbeti ve piriz hızlandırıcı için 8 hat
Sızdırmazlık sistemi	1 sıra tel fırça conta
Dış plakalar	Kuyruk kısmının gerisinde 1 adet, 270
BURGU KONVEYÖR	
Tipi	Hidrolik
Hızı	0 - 24 rpm
Burgu konveyör çapı	1.400 mm

Çizelge 2.1. S-627 tünel açma makinesi genel özellikleri (devamı)

KESİCİ KAFA	
Tipi	Miks yüzeyli kesici kafa (5 parçalı dizayn)
Çap	13.750 mm
Merkez aralığı	90 mm
Yüzeyden mesafe	100 mm
kesici disk	76 ad.
Merkezdeki disklerde maksimum tork	250 kN
Maksimum merkezdeki itme kuvveti	10000 kN
Yumuşak zemin aparatları sayısı	122 ad.
Kova sayısı	16 ad.
Kesici Kafa Mafsal	
Birleşim tipi	eksenel rulman
Silindir miktarı	9 No.
Tipi	Tek jak
İTME SİLİNDİRLERİ	
Miktarı	15x2
Boyutu	320 x 260 mm
Hareket	2,800 mm
İtme kuvveti	84.464 kN-96.509 kN
İlerleme hızı	60 mm/min
Geri çekim hızı	1,600 mm/min
SEGMENT BESLEYİCİ HAT	
Adet	1
Kapasite	7 segment+1 kilit segment
Segment taşıma	Vakumlu tutma düzeneği
MALZEME TAHLİYE	
Kapasite	1.950 ton/saat
BANT KONVEYÖR	
Sürücü	Elektrik
Bant genişliği	1,200 mm
Hız	0 - 2.5 m/s
KURULU GÜÇ	
Toplam kurulu güç	7.457 kW

2.2 Metot

Tez kapsamında yapılacak çalışmalar için gerekli olan verilerin en önemli kaynağını sondaj verileri oluşturmıştır. Sondajlardan alınan örneklerin değerlendirilmesi ile ortamın jeolojik özellikleri, tünel güzergahının jeomekanik özellikleri, arazi ve laboratuvar çalışmaları ile ortaya konulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda, tünelde karşılaşılabilecek birimlerin yapısal özellikleri ve bileşimleri tanımlanmıştır.

Hızlı tren güzergah çalışması sırasında Yüksel Proje Uluslar Arası A.Ş. (2004) tarafından bölgede jeoteknik etüt amaçlı sondaj çalışmaları yapılmış ardından 26'nolu tünel güzergahı değiştirilmiş, SİAL Yerbilimleri LTD. ŞTİ. (2009) tarafından 6 adet yeni sondaja ait sondaj derinliği, YAS derinliği ve etkileri, litoloji kalınlığı gibi bilgilerin işlendiği sondaj logları (Ek A) ve bu sondajlardan alınan karot numunelerinden birimlerin jeomekanik özelliklerine yönelik deney sonuçlarını içermektedir (Ek B-1, Ek B-2).

2.2.1 Büro çalışmaları

Büro çalışmaları kapsamında ilk aşamada tez çalışmaları için gerekli olan literatür taraması yapılarak, TBM performans analizi üzerine yapılmış olan araştırmalar ile tünel güzergahının bulunduğu bölgenin jeolojisine yönelik çalışmalar derlenmiştir. İkinci aşamada arazi ve laboratuvar çalışmaları sonrasında elde edilen veriler değerlendirilerek tünel güzergahının geçtiği yerel kaya koşulları anlaşılmasına çalışılmıştır. Elde edilen veriler ile Q_{TBM} yöntemi kullanılarak TBM performansı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

2.2.2 Arazi çalışmaları

Arazi çalışmaları sırasında inceleme alanının 1/1.000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası hazırlanarak 1/1.000 ölçekli enine kesiti çıkarılmıştır (Ek C-1, Ek C-2). Rotary yönetmi ile 23 ila 195 metre arasında değişen sondaj kuyuları açılmıştır. Ayrıca sondaj esnasında alınan karot numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

2.2.3 Laboratuvar alışmaları

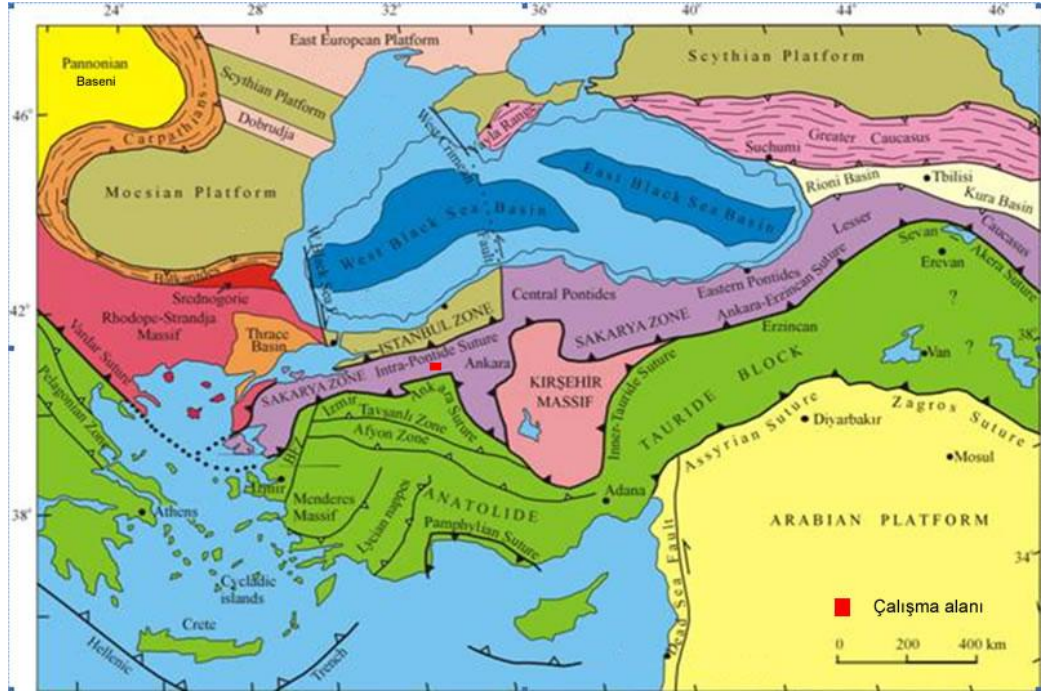
Laboratuvar çalışmalarını; inceleme alanında yapılan sondajlardan ve yüzeyden alınan rselenmiş (SPT) ve/veya örselenmemiş örnekler üzerinde laboratuvarda yapılan zemin mekaniği deneyleri aşamasında yapılan çalışmalar oluşturmuştur. Örselenmiş ve/veya örselenmemiş numunelerden uygun olanlarından sınıflama, fiziksel ve mekanik özelliklerin laboratuvarda, Atterberg limitleri (likit limit, plastik limit ve plastisite inidisi), elek analizi, serbest basınç deneyi ile üç eksenli basınç deneyleri yapılmış olup, elde edilen sonuçlar, Ek B-1’de sunulmuştur.

Alınan korunmuş karot numuneleri üzerinde kaya mekaniği deneyleri yapılarak kaya kütlesinin jeomekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla tek eksenli basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı, nokta yükleme deneyi, elastisite modülü ve poisson oranı, deneyleri yapılmıştır.

BÖLÜM III

BULGULAR

Ülkemizin kuzeybatı bölümünde yer alan çalışma alanı, tektonostratigrafik yapı-özellikleri açısından kuzeyden güneye doğru “İstanbul Zonu”, “İntra Pontide Suturu” ve güneyinde, “İzmir - Ankara Suturu” birliklerini içerir. İnceleme alanı “Sakarya Zonu” içinde bulunmaktadır (Şekil 3.1.).



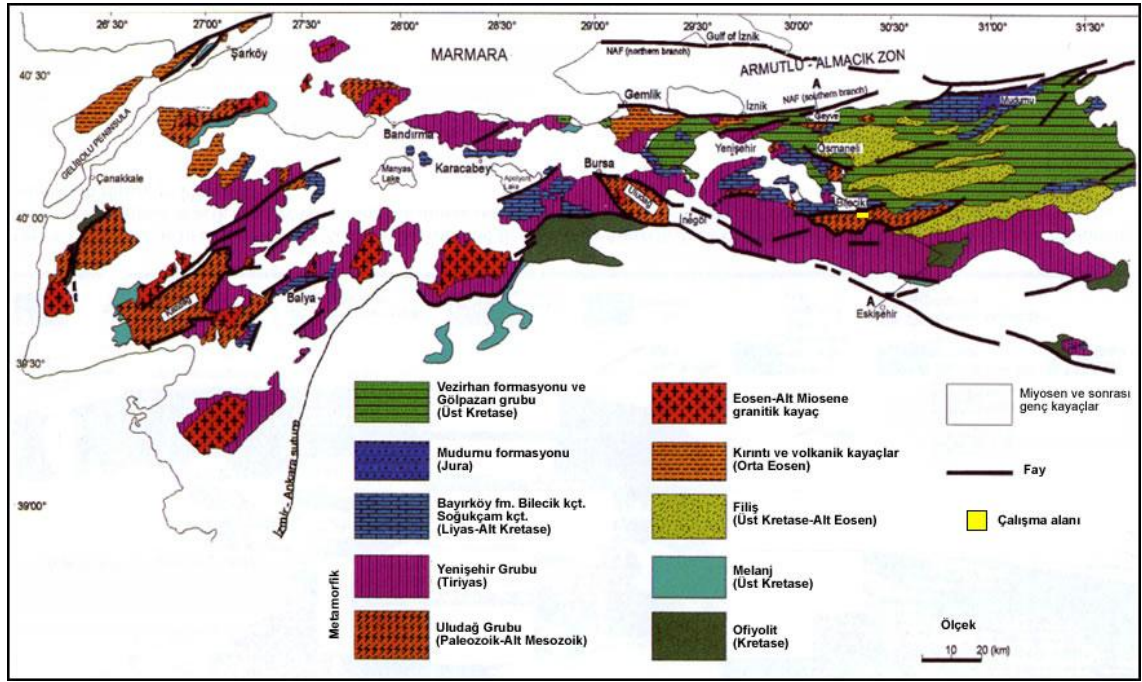
Şekil 3.1. Türkiye suture zonları ve çalışma alanı (Okay ve Tüysüz, 1999).

Bu alana daha yakından bakıldığında, kuzeyde “KAF” güneyde “Eskişehir fay zone” arasında kalan “Sakarya kıtası”nın temel kaya birimleri ile üzerinde uyumsuz Mesozoyik-Senozoyik yaşlı örtü birimlerin geldiği görülmektedir.

3.1 Bölgesel Jeoloji

Farklı stratigrafik özellik ve metamorfizma etkisi ile farklı grup adları altında incelenen Karakaya Karmaşığı’nın oluşturduğu temel üzerinde Jura ile başlayan sedimanter istiflenme ve üzerine uyumsuz gelen komşu diğer Kratese yaşlı istiflerden çok farklı-

ayrı olan ve Bolu güneyinde Göynük-Mudurnu-Nallıhan arasında izlenen bölgesel jeoloji söz konusudur (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Çalışma alanının bölgesel jeolojik yapı içindeki konumu (Yılmaz vd., 1997).

Bölgenin temelini genel anlamda “Karakaya Karmaşığı” olarak tanımlanmış metamorfik birimler oluşturmaktadır. Çalışma alanının yakın kuzey kesimlerinde yüzeyleyen bu oluşuklar birbirleri ile uyumsuz ve çoğunlukla tektonik dokanıklı olarak, altta “Uludağ Grubu” (Paleozoyik-Triyas) ve üstünde ise “Yenişehir Grubu” (Triyas) metamorfik istiflenmeleridir (Yılmaz vd., 1997).

Bu temel birimler üzerine (olasılıkla açılı uyumsuz çünkü tabanı tektonik olduğundan görülemez), inceleme alanının yakın kuzey doğu kesiminde karbonat platform çökelleri şeklindeki Mudurnu formasyonu (Jura) gelir. Bu oluşuklar üzerine uyumlu ancak genelde metamorfik temel üzerine açılı uyumsuzluk ile gelen Jura(?)-Alt Kretase yaşlı karbonat platformu çökellerinin (bölgenin genelinde Bayırköy formasyonu, Bilecik kireçtaşı ve Soğucak formasyonu olarak tanımlanmış) yakın çevrede yaygın izlendikleri bilinir (Yılmaz vd., 1997).

İstiflenmenin üste doğru açık denizel-türbiditik kırıntılılara (genelde fliş karakterli, kumtaşı ve kırıntılı kireçtaşı-marn-karbonatlı çamurtaşları) geçtiği ve oldukça geniş alanlarda görülen Üst Kretase oluşuklar (Vezirhan formasyonu ve Gölpazarı Grup adları ile tanımlanmış) ile devam ettiği görülür. Diğer bir ifadeyle pelajik karbonat oluşumları üste doğru türbiditik kırıntılı-karbonat ardalanması şeklinde gelişerek üste doğru siyah renkli laminalı çamurtaşları ve kırmızı tabakalar şeklindeki karbonatlar ile son bulur (Yılmaz vd., 1997).

Bu oluşuklar üzerine uyumlu olarak karbonatlı birimler ile ardışıklı farklı kırıntılı fasiyeslerden kurulu sığlaşan denizel-kıyı ortamsal koşullarda depolanmış Üst Kretase-Paleosen(?) yaşlı istiflenme gelmektedir ve bunun da üstüne uyumlu olarak kırmızı rengi ile çok karakteristik karasal çökeller (örgülü akarsu) şeklindeki Paleosen yaşlı (Kızılçay formasyonu) ve Eosen yaşlı genelde gölsel kireçtaşları (Geçitli formasyonu) istiflenmeler gelişmiştir (Yılmaz vd., 1997).

Volkanik etkinliğin özellikle Üst Kretase-Paleosen(?) sonunda ve Eosen geçişinde çok etkin olduğu (tabakalı bazik volkanik ve tüfitler) sürecin bazen etkinlik kazanarak Pliosen'e kadar istifleri kesen andezit, bazalt ve istifler içinde ara düzeyler şeklindeki aglomera tüf-tüfit ve obsidiyen varlığından anlaşılmaktadır (Yılmaz vd., 1997).

3.2 Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışmanın yapıldığı tünel güzergahı boyunca, Paleozoyik yaşlı Pazarcık Karmaşığı (Koçyiğit vd., 1991) gözlenmektedir. Birim, Bilecik ile Bozüyük arasında yüzeylemekte ve bindirmeli yapı sunan çok değişik kaya türleri ile temsil edilmektedir. Birim, üstte Triyas yaşlı Karakaya Grubu ile aşınımlı ve yer yer faylı, Bayırköy Formasyonu ile aşınımlı dokanak ilişkisi sunmaktadır. Birim genelde, yeşilşist fasiyesi koşullarında metomorfizma geçirmiş ve yapısal olarak üst üste gelmiş değişik kalınlıktaki kayalardan oluşmaktadır. Yaygın olarak yüzeyleyen şistler içinde kumtaşları, mermerler, migmatit-gneys, granodiyorit mega bloklar olarak yer almaktadır. Birim, Bozüyük granitoidinin kuvars ve aplitik daykları tarafından kesilmektedir.

KM:216+260 ile KM:220+300 arasında rastlanan temel birim grafit şisttir. Grafit şistler, siyah - koyu gri - yeşilimsi koyu gri renkli, belirgin şistoziteli, parçalı, orta - çok

ayrışmış, zayıf - orta dayanımlıdır. Şistozite düzlemleri boyunca kolaylıkla ayrılabilen grafit şistler içerisinde birkaç 10.00 metre çapında mermer bloklarına ve 2.00 metre kalınlığına varan kuvars damarlarının yanında mega bloklar halinde mika şistlere de rastlanmaktadır.

KM:220+300 ile KM: 221+750 arasında ise klorit şiste rastlanmaktadır. Klorit şistler, açık yeşil-grimsi yeşil renktedir. Şistozite düzlemleri grafit şistlere nazaran daha az belirgindir. Çoğunlukla sert-orta sert dayanımlı, az-orta derece ayrışmış bir yapı gösterirler. Az çatlaklı, çatlaklar kuvars dolguludur. Tünel güzergahının jeoloji haritası ve boyuna kesiti Ek-A ve Ek-B' de sunulmuştur.

3.3 Yapısal Jeoloji

Mekece-Bozüyük arasında yer alan bölgesel ölçekli uyumsuzluklar, Skitiyen- Ladiniyen yaşlı Karakaya Grubu ile temeli oluşturan Permiyen öncesi Pazarcık Karmaşığının metamorfikleri arasında, Erken-Orta Liyas yaşlı Bayırköy Formasyonu'nun tabanında ve tavanında (açısal uyumsuzluk) görülür (Koçyiğit vd., 1991). Bunların dışında platform karbonatlarından oluşan Kalloviyen-Hotiriviyen yaşlı Bilecik Formasyonu ile Apsiyen-Erken Maastiştien yaşlı pelajik özellikli Soğukçam Kireçtaşı arasında kısa süreli bir zaman boşluğu gözlenir (Koçyiğit vd., 1991). Bölgedeki diğer önemli bir uyumsuzluk Orta-Geç Miyosen yaşlı Porsuk Formasyonu'nun tabanında görülür. Bozüyük civarında Porsuk Formasyonu Bozüyük granitoidini uyumsuzlukla üzerler. Ayrıca yatay konumdaki Erken Pleyistosen yaşlı eski alüvyon ile kıvrımlanmış Porsuk Formasyonu ve Akpınar Kireçtaşı arasında bir açısal uyumsuzluk mevcuttur. Gerek Armutlu Yarımadası'nda gerekse Sakarya Zonu'nda yüzeyleyen ve temeli oluşturan metamorfik kayalarda, birincil tabakalanmaya paralel olarak gelişmiş veya kesen yapraklanma ve dilinim gözlenmektedir. Bölgede yüzeyleyen Pliyosen öncesi birimler yoğun olarak kıvrımlanmıştır. Yeğince kıvrılmanmış olan en yaşlı birimlerden ilki Pazarcık Karmaşığıdır. Kıvrımlar mikroskopik boyuttan birkaç kilometre uzunluğa, açık kıvrımlardan mezoskopik ölçekli kapalı-dik, kutu, açılı, yatık kıvrımlar şeklinde gözlenir. Bayırköy Formasyonu, Bilecik Kireçtaşı da kıvrımlanma gösteren birimlerdendir. Kıvrımların yoğun biçimde gelişmiş olduğu en genç birim Orta-Geç Miyosen yaşlı Porsuk Formasyonu ile Akpınar Kireçtaşıdır. Bu kıvrımlar genel olarak açık-kapalı ve simetrik-asimetrik senklinal ve antiklinallerden oluşur. Güzergah

3.5 Hidrojeoloji

Kapukaya mevki'nden başlayan 26'nolu tünel Ahmetpınarı Köyü'nün altından geçip Balaban tepesinin güneyinde son bulmaktadır. Tünel güzergahı çoğunlukla Karasu deresine paralel gitmektedir. Karasu deresi, Çırgır, Serçe ve Ballıkaya dereleri gibi civardaki irili ufaklı dereler vastası ile mevsimlik sular taşınmaktadır.

Grafit ve klorit şistler içerisinde açılacak olan tünelde, sondaj verilerinden yola çıkılarak (Çizelge 3.1.) örtü kalınlığının yüksek olduğu yerlerde su geliri beklenmemektedir. Bununla birlikte fay zonlarında ve örtü kalınlığının düşük olduğu çıkış portalına doğru olan kesimlerde su sızıntıları beklenmektedir. Yine çıkış portalına doğru tünel güzergahı dere yatağının altından geçmektedir. Klorit şist ağırlıklı bu kesimde süreksizlikler boyunca tünel içerisine su geliri muhtemeldir. Yağışlı dönemde fay zonlarında ve km:219+500'den çıkış portalına kadar olan kesimde tünel içerisine su geliri artabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. Eski ve yeni sondaj kuyularında ölçülen yeraltısuyu seviyeleri

NO	SONDAJ NO	KİLOMETRE	Y	X	KOT (m)	DERİNLİK (m)	YASS (m)
1	216+840	216+840	4435458	502313	551,17	70,00	
2	217+340	217+340	4434964	502389	648,83	165,00	
3	217+660	217+660	4434647	502434	690,67	195,00	
4	218+660	218+660	4433650	502531	703,85	190,00	
5	EKS-51	219+329	4432996	5022477	584,32	65,00	1,40
6	219+760	219+760	4432559	502291	590,00	52,00	
7	220+240	220+240	4432083	502229	599,90	51,00	
8	EKS-50	220+579	4431749	502168	604,31	56,00	1,25
9	EKS-49A	221+584	4430800	501854	623,47	60,00	9,30
10	221+660	221+660	4430735	501823	603,77	28,00	
11	EKS-49	221+721	4430669	501811	616,96	60,00	2,55

BÖLÜM IV

MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

4.1 Giriş

Bu bölümde 26 nolu tünel için yapılan jeolojik - jeoteknik çalışmalar sunulduktan sonra güzergahtaki kayaçların mühendislik jeolojisine yönelik yapılan tanımlamalara yer verilmiştir. Öncelikle kaya ortamının fiziksel ve mekanik parametrelerinin belirlenmesi için bölgede yapılan sondajlara, yerinde ve laboratuvarında yapılan deney sonuçlarına değinilmiştir. Elde edilen veriler ve kazı yöntemleri göz önünde tutularak 26 nolu tünel güzergahı ve yakın dolayına ait kaya sınıflamaları yapılmış ve kazı yüzeyleri kinematik açıdan irdelenmiştir.

İnceleme alanı için 1/1000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası yapılmıştır. Fizibilite ve kesin proje aşamasında araştırma sondajlarının sayısı arttırılmış, sondajlar sırasında yerinde deneyler ve sondajlardan alınan örneklerle ait laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

4.1.1 Mühendislik jeolojisi haritalaması çalışmaları

Tünel güzergahı ve dolayının mühendislik jeolojisi haritası hazırlanırken öncelikle litolojik ayırtlama yapılarak jeolojik birimler sıralandırılmış ve 1/1000 ölçekli topografik haritaya işlenmiştir. Kaya mostralarında süreksizliklerin yönelimleri tespit edilmiş ve süreksizlik özellikleri, ISRM (1981) tarafından önerilen süreksizlik tanımlamaları temel alınarak tespit edilmiştir.

4.1.2 Sondaj çalışmaları

26 nolu tünel için ilk olarak proje aşamasında Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. (2004) tarafından 6 adet araştırma sondajı yapılmıştır. Tünel güzergahında yaşanan heyelanın ardından heyelan etüdü için yine aynı firma tarafından 5 adet daha araştırma sondajı yapılmıştır. Tünel güzergahı, yapılan heyelan sondajlarının ardından değiştirilmiş olup, yapılan 11 adet araştırma sondajının sadece 4 tanesi tünel güzergahı içerisinde kalmıştır.

Ripaj hattında tünel güzergahının jeolojik-jeoteknik özelliklerini belirlemek amacı ile 6 adet daha araştırma sondajı yapılmış, yapılan bu sondajlarla tünel güzergahı ve etrafında yapılan sondaj sayısı 17'ye yükselmiştir.

Sondajlar sırasında sürekli karot alınmış, yeraltı su seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca basınçlı su testleri yapılarak ortamın permeabilitesi hesaplanmıştır. Yapılan sondajların numaraları, kilometreleri, koordinatları, kotları ve derinlikleri Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Tünel güzergahında açılan araştırma sondajlarına ait özet bilgiler

NO	SONDAJ NO	KM	Y (N)	X (E)	KOTU (m)	DERİNLİK (m)	TARİH
1	216+840	216+840	4.435.458	502.313	551,17	70,00	31.03.2010
2	217+340	217+340	4.434.964	502.389	648,83	165,00	03.04.2010
3	217+660	217+660	4.434.647	502.434	690,67	195,00	24.04.2010
4	218+660	218+660	4.433.650	502.431	703,85	190,00	20.05.2010
5	EKS-51	219+329	4.432.996	502.247	584.316	65,00	28.10.2003
6	219+760	219+760	4.432.559	502.291	590,00	52,00	25.03.2010
7	220+240	220+240	4.432.083	502.229	599,9	51,00	26.03.2010
8	EKS-50	220+579	4.431.749	502.168	604.311	56,00	20.10.2003
9	EKS-49A	221+584	4.430.800	501.854	623.471	60,00	29.10.2003
10	2.211.660	221+660	4.430.735	501.823	603,77	28,00	08.04.2009
11	EKS-49	221+721	4.430.669	501.811	616.958	60,00	14.10.2003
12	221+765	221+765	4.430.633	501.780	616.112	26,00	12.04.2009
13	SK-4	221+950	4.430.529	501.745	616,40	28,00	14.12.2009
14	SK-5	222+025	4.430.181	501.652	617,50	26,00	16.12.2009
15	SK-3	222+180	4.430.278	501.570	619,95	25,00	12.12.2009
16	SK-2	222+313	4.430.316	501.495	619,75	23,00	09.12.2009
17	EKS-48	222+351	4.430.143	501.465	619,71	25,00	12.10.2003

4.1.3 Laboratuvar deneyleri

26 nolu tünel güzergahında fiziksel ve mekanik parametrelerin değerlendirilmesi için açılan 17 sondajdan alınan karotlar üzerinde gerekli kaya mekaniği deneyleri yapılmış ve yapılan bu deneyler aşağıda özetlenmiştir (Çizelge 4.2.)

Alınan korunmuş karot numuneleri üzerinde 77 adet tek eksenli basınç dayanımı, 4 üç eksenli basınç dayanımı, 4 adet nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Yine 77 numune üzerinde elastisite modülü ve poisson oranı, 9 numunede su içeriği, 3 numunede su emme ve 86 numunede ise birim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Yapılan deneyler ve deney yapılan örnek sayıları

Deney Adı	Sayısı
Nokta yük deneyi	4
Tek eksenli basınç deneyi	77
Kayada tek eksenli basınç deneyi ile elastisite modülü ve poisson oranı tayini	77
Üç eksenli basma dayanımı	4

4.2 Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri

Bu bölümde kaya kütlelerinin mühendislik davranışlarını belirleyen süreksizlik düzlemlerinin çatlak aralıkları, açıklıkları, dolgu malzemesinin nitelikleri, pürüzlülüğü ve konumları oluşum koşulları açısından irdelenerek tünel güzergahı için kaya kütle sınıflamasına veri tabanı oluşturulmaya çalışılmıştır.

İnceleme alanında 1/1000 ölçekli ayrıntılı mühendislik jeolojisi haritası yapılmış ve EK-C’de sunulmuştur. Buna göre inceleme alanında yüzeyleyen jeolojik birimler grafit şist, klorit şist ve alüvyondur.

Araştırma sahasında bulunan şistlerde iki adet eklem takımı ve bunları dik doğrultuda kesen üçüncü bir eklem takım sistemi gelişmiştir. Bu eklem takımları ayrışma ve

alterasyon zonlarına göre pirit, kil, kuvars ve kalsit dolguludur. Şistlerde bulunan eklem yüzeylerinde yer yer yoğun ayrışma gelişmiştir.

Süreksizlik yüzeylerinin dayanıma etkisi açısından taşıdığı önem dikkate alınarak kayaçların ayrışma derecesi tanımlanmıştır. Bu tanımlama ISRM (1981) tarafından önerilen ve arazi çalışmaları sırasında pratik olarak kullanılabilecek ayrışma sınıflamasına göre yapılmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Kayaçların ayrışma derecesi (ISRM, 1981).

Tanım	Tanımlama ölçütü	Ayrışma Derecesi
Ayrışmamış (Taze)	Kayanın ayrıştığına ilişkin gözle ayırdedilebilir bir belirti olmamakla birlikte, ana süreksizlik yüzeylerinde önemsiz bir renk değişimi gözlenebilir.	W1
Az ayrışmış	Kaya malzemesinde ve süreksizlik yüzeylerinde renk değişimi gözlenir. Bozunma nedeniyle tüm kayacın rengi değişmiş ve kaya taze halinden daha zayıf olabilir.	W2
Orta derecede ayrışmış	Kayanın yarısından az bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Kaya; taze ya da renk değişimine uğramış olup, sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W3
Yüksek derecede ayrışmış	Kayanın yarısından fazla bir kısmı toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Kaya; taze ya da renk değişimine uğramış olup, sürekli bir kütle veya çekirdek taşı halindedir.	W4
Tamamen ayrışmış	Kayanın tümü toprak zemine dönüşerek ayrışmış ve/veya parçalanmıştır. Ancak orijinal kaya kütlelerinin yapısı halen korunmaktadır.	W 5
Artık Zemin	Kayanın tümü toprak zemine dönüşmüştür. Kaya kütlelerinin yapısı ve dokusu kaybolmuştur. Hacim olarak büyük bir değişiklik olmakla birlikte, zemin taşınmamıştır.	W 5

Kayaçların dayanımının tahmin edilmesi amacıyla ISRM (1981) tarafından önerilmiş ve arazi çalışmaları sırasında pratik olarak kullanılabilecek basit deneylerden yararlanılmıştır. Bu deneyler süreksizlik yüzeylerinde veya bu yüzeyleri temsil eden kaya malzemesi üzerinde yapılabilmektedir (Çizelge 4.4.).

Çizelge 4.4. Süreksizlik yüzeylerinin tek eksenli basınç direnci ve arazi tanımlamalarına göre sınıflandırılması (ISRM, 1981).

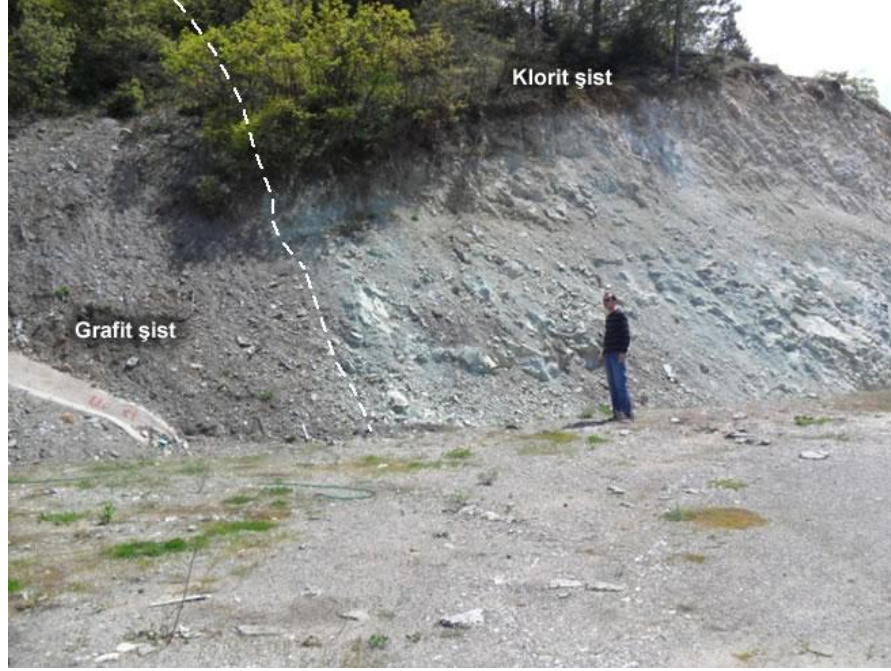
Dayanım Derecesi	Tanım	Saha tanımlaması	Tek eksenli basınç direnci (MPa)
R0	Aşırı derecede zayıf kaya	Kayanın yüzeyinde tırnak ile çentik oluşturulabilir	0,25-1,0
R1	Çok zayıf kaya	Jeolog çekiciyle sert bir darbeye ufalanan kaya, çakı ile doğranabilir.	1,0 - 5,0
R2	Zayıf kaya	Kaya, çakı ile güçlkle doğranır. Jeolog çekici ile yapılacak sert bir darbe kayacın yüzeyinde iz bırakır.	5,0-25
R3	Orta derecede sağlam kaya	Kaya, çakı ile doğranamaz. Kaya örneği, jeolog çekici ile yapılacak tek ve sert bir darbeye kırılabilir.	25-50
R4	Sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile birden fazla darbenin uygulanması gerekir.	50-100
R5	Çok sağlam kaya	Kaya örneğinin kırılabilmesi için jeolog çekici ile çok sayıda darbe gerekir.	100-250
R6	Aşırı derecede sağlam kaya	Kaya örneği jeolog çekici ile sadece yontulabilir.	>250

KM:216+260 ile KM:220+300 arasında açılan sondaj verileri ile arazi çalışmalarına ait bilgiler ışığında gözlenen birim grafit şisttir. Grafit şistler, siyah - koyu gri - yeşilimsi koyu gri renkli, belirgin şistoziteli, parçalı, orta - çok ayrılmış, zayıf - orta dayanımlıdır (Fotoğraf 4.1.).



Fotoğraf 4.1. Grafit şistlerden bir görünüm (26'nolu tünel giriş portalı önü, Bakış yönü: K-G)

KM:220+300 ile KM: 221+750 arasında ise klorit şiste rastlanmaktadır. Klorit şistler, açık yeşil-grimsi yeşil renktedir. Şistozite düzlemleri grafit şistlere nazaran daha az belirgindir. Çoğunlukla sert-orta sert dayanımlı, az-orta derece ayrılmış bir yapı gösterirler. Az çatlaklı, çatlaklar kuvars dolguludur (Fotoğraf 4.2.).



Fotoğraf 4.2. Klorit şist grafit şist sınırı (Bilecik-Bozüyük karayolu, Demirköy girişi, Bakış yönü: K-G)

Tünel güzergahı, örtü kalınlığının değişimine bağlı olarak örtü yüksekliğinin 50 metreden az ve yüksek olduğu bölgelere göre 7 kısma ayrılarak incelenmiştir (Ek- C-1, Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. 26 nolu tünelinin bölümlere ayrılmış güzergah kesimleri

Kısım	Başlangıç	Bitiş	Litoloji	Örtü Kalınlığı
1	216+560	218+710	Grafit şist	> 50 m.
2	218+710	218+760	Fay zonu	> 50 m.
3	218+760	219+310	Grafit şist	> 50 m.
4	219+310	220+300	Grafit şist	< 50 m.
5	220+300	220+795	Klorit şist	< 50 m.
6	220+795	221+545	Klorit şist	> 50 m.
7	221+545	221+765	Klorit şist	< 50 m.

4.3. Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri

Kaya kütlelerinin sınıflandırılması kaya kütlelerinin davranışlarını ve karakterini belirlemek açısından önemlidir. Bu amaçla ilk ciddi çalışma 1946 yılında Terzaghi tarafından yapılmıştır. Günümüze kadar geçen süreçte farklı araştırmacılar tarafından farklı sınıflama sistemleri önerilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Günümüze kadar önerilen başlıca kaya sınıflama sistemleri

Sınıflama Sistemi	Biçim ve Tip	Ana Uygulama Alanı	Referans
Terzaghi kaya yükleme sınıflama sistemi	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Terzaghi, 1946
Laufferin desteksiz durma zamanı sınıflama sistemi	Tanımlayıcı biçim	Tünel tasarımında	Lauffer, 1958
Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)	Tanımlayıcı ve davranışsal biçim	Yetersiz (aşırı gerilmiş) zeminlerin tasarımında ve kazıda	Rabcewich, Müller, Pacher, 1958-1964
Kayanın Mekanik Özellikleri için Kaya Sınıflaması	Tanımlayıcı biçim, genel tip	Kaya mekaniği verileri	Patching ve Coates, 1968
Kaya ve Zeminlerin ortak Sınıflaması	Tanımlayıcı biçim	Bağlanım için parçacıklar ve bloklara davalı	Deere vd., 1969
Kaya kalite göstergesi (RQD)	Sayısal biçim Yaygın tip	Sondaj loglarına dayalı: diğer sınıflama sistemlerinde kullanılır	Deere vd., 1967
Boyut- dayanım sınıflaması	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Kaya dayanımına ve blok çapma dayalı, çoğunlukla madencilikte	Franklin, 1975
Kaya yapısı derecesi (RSR)	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünellerdeki çelik tahkimatların tasarımında	Wickham vd., 1972
Kaya kütle sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Tünel, maden ve tesislerin tasarımında	Bieniawski, 1973
Q-sınıflama sistemi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yer altı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Barton vd., 1974b
Basit jeoteknik sınıflama (BGD)	Tanımlayıcı biçim	Yaygın uygulamalar	ISRM, 1981
Jeolojik dayanım indeksi	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Yeraltı kazılarındaki tahkimatların tasarımında	Hoek, 1994
Kaya kütle indeksi sistemi (RMI)	Sayısal biçim Fonksiyonel tip	Genel karakterizasyon. tahkimatın tasarımı. TMB uygulamaları	Palmström, 1995

Kaya kütle sınıflama sistemlerinde özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve tecrübe gerektirmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2002). Günümüzde en çok kullanılan sistemler RMR (Bieniawski, 1989) Q (Barton, 2002), GSI (Hoek vd., 2002) ve RMI (Palmström, 1995) olarak sayılabilir.

RMR Sınıflama Sistemi, ilk kez 1972-1973 yılları arasında Bieniawski (1989) tarafından geliştirilmiştir. Bieniawski'nin o dönemde Güney Afrika Bilimsel ve Sanayi Araştırma Merkezi (CSIR)'nde çalışıyor olması nedeniyle, adı daha sonra "Kaya Kütlesi Puanlama Sistemi (Rock Mass Rating System-RMR)" olarak değiştirilen bu sistem uygulamacılar tarafından uzun yıllar boyunca "CSIR Jeomekanik Sınıflama Sistemi" olarak anılmıştır. Sistemin geliştiricisinin uyarılarına rağmen, ancak 1980'lerin sonuna doğru RMR adının kullanımı yaygınlaşmıştır. Başlangıçta bu sistem Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılmış tünellerde yaptığı gözlemler ve bu gözlemlerden kazandığı deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. Sistem 1989'a kadar geçen 15 yıllık süre içinde yapılan gözlemler ve yeni veriler esas alınarak birkaç kez değişikliğe uğramıştır.

1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yeraltı açıklıkları, maden işletmeleri ile ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler çerçevesinde sistem son şeklini almıştır (Bieniawski, 1989). Bu sınıflamada 5 temel parametre kullanılır. Bunlar; kayanın tek eksenli basınç mukavemeti, RQD değerleri, yeraltı suyunun miktarı ve konumu, eklem sıklığı, eklem durumları, eklem yönelimidir. Buradan temel parametreler elde edilir. Daha sonra değerlendirmeler tünel, yamaç veya bir temel durumuyla ilgili olup olmamasına bağlı olarak, eklemlerin doğrultu ve eğim yönlerine göre düzeltilir (Ulusay ve Sönmez, 2002).

Sistemin zaman içerisinde sık sık değişikliğe uğraması, uygulamacıların bu değişiklikleri izleyebilmelerini ve bunlara kısa sürede uyum sağlamalarını güçleştirmiştir. Bu nedenle, daha sonraki dönemlerde bile zaman zaman sistemin eski versiyonlarının kullanıldığı görülmektedir (Ulusay ve Sönmez, 2002).

Q sistemi, Barton (1974) tarafından geliştirilmiştir. Sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, sistemin tahkimat sistemleri seçimine yönelik bölümü, Grimstad ve Barton (1993) tarafından yeniden düzenlenmiştir. Burada RQD; boyu 100'mm den daha uzun

karot örneklerinin toplamının karot manevra uzunluğuna oranının yüzdesi, J_n , eklem takımı sayısı, J_r , eklem setleri ve dolgulu süreksizliklerin pürüzlülük sayısı, J_a eklem setleri veya dolgulu süreksizlikler için kil dolgusu veya ayrışma derecesi için sayı, J_w , süreksizliklerdeki dolguların yıkanmasına neden olabilecek su geliri ve su basıncına ilişkin sayı, SRF (gerilme azaltma faktörü) ise sert kayalarda sıkışan ve şişen kayalar için dayanım gerilme oranı ve faylanma için kullanılan puandır (Barton, 2002).

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) kavramı; Hoek ve Brown (1980, 1988) tarafından önerilen yenilme ölçütünde girdi parametreleri olan malzeme sabitlerinin belirlenmesinde RMR yerine kullanılması için önerilmiştir (Hoek, 1995). Özellikle eklemlili kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde kullanılacak kütle sabitlerinin doğrudan deneylerle belirlenmesi zor olduğu için RMR'ın çok zayıf kaya kütleleri için kullanımı bulunmamaktaydı. GSI'nin belirlenmesi, kaya kütlelerinin yapısı ve süreksizlik yüzeylerinin kalitesine bağlı oluşturulan abak kullanımı ile yapılmaktadır (Hoek, 1999).

Kaya kütle indeksi (RMI); kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımının yaklaşık olarak tahmin edilmesinde kullanılan hacimsel parametrelerden oluşan bir indekstir. Bu indeks Palmström (1996) tarafından geliştirilmiştir. Kaya kütlelerinin dayanımının ve deformasyon modülünün tahmini ve Hoek-Brown dayanım parametrelerinin hesaplanmasında eklemlili kaya kütlelerinden masif kaya kütlelerine kadar uygulanabilmektedir.

4.3.1 Q sınıflandırma sistemi

Q veya NGI (Norveç Jeoteknik Enstitüsü) sistemi olarak adlandırılan sınıflama sistemi 1972-1973 yılları arasında Barton ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Kaya tünelcilik kalitesi olarak da adlandırılır. Kayanın 6 farklı parametresi aracılığı ile hesaplanmaktadır. Hesaplama eşitlik (4.1) bağıntısı ile tanımlanmıştır (Barton vd., 1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4.1)$$

Bu denklemde:

RQD: Kaya kalite indisi

Jn: Eklem takrını sayısı

Jr: Eklem pürüzlülük sayısı

Ja: Eklem alterasyon sayısı

Jw: Eklem suyu indirgeme sayısı

SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür.

Bu parametreler çiftli olarak literatürde şöyle ifade edilirler:

$\frac{RQD}{Jn}$: Kaya kütlesinin yapısı ve nispi blok boyutu,

$\frac{Jr}{Ja}$: Süreksizlik yüzeyleri arası makaslama direnci,

$\frac{Jw}{SRF}$: Aktif gerilme koşulları.

Hesaplanan Q değeri yardımı ile kaya sınıflandırmasına ek olarak yeraltı mühendislik yapılarında kullanılacak destekleme tipleri konusunda öneriler yapılabilmektedir. Bu sistem önceden yapılmış olan 1000 den fazla tünele ait veriler ışığında değerlendirilerek geliştirilmiştir. Olası Q değerlerinin aralığı (0.001-1000) çok sıkışabilir ortamdan, eklemsiz sağlam kayaya kadar olan kaya niteliği tanımlarını kapsamaktadır.

Q değerinin hesaplanması için kullanılan 6 parametreden biri olan RQD (Kaya kalite göstergesi) değeri Deere (1964) tarafından önerilmiştir. Sondaj ile bir ilerleme aralığında doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10 cm ve daha büyük olan ve silindirik şeklini koruyan kaya türü karot parçalarının toplam uzunluğunun ilerleme aralığının uzunluğuna oranını yüzde olarak ifade eden kantitatif bir indekstir (Ulusay ve Sönmez, 2002). Değişik koşullara göre RQD'nin alacağı değerler Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Değişik koşullara göre RQD değerleri (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

RQD (%)	Kaya Kalite Göstergesi Tanımı
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.

Karot alınamadığı zaman RQD birim hacimdeki eklem sayısı aracılığıyla belirlenebilir. Bunun için her eklem takımının 1 m^3 teki sayısı belirlenir. Kil içermeyen kayalarda bu sayı RQD'ye bağıntı 4.2 yardımı ile çevrilir:

$$RQD = 115 - 3,3 Jv \frac{Jw}{SRF} \quad (4.2)$$

Jv : m^3 'teki toplam eklem sayısı.

Eklem takımlarının sayısını belirleyen J_n parametresi genellikle yapraklanma, şiştozite ve tabakalanma tarafından etkilenmektedir. Bunların belirgin şekilde ve birbirine paralel olarak gelişenleri bir eklem takımı olarak kabul edilmelidir. Fakat karotlarda bu özelliklerden dolayı yer yer çatlaklar veya az sayıda eklemler varsa, bunlar gelişigüzel eklemler olarak değerlendirilmelidir.

Q sınıflandırma sisteminde kullanılan parametrelerin değişik koşullara göre alacakları değerler aşağıda çizelgeler halinde sunulmuştur (Çizelge 4.8-4.12).

Çizelge 4.8. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem takımı tayin değerleri(Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

Eklem Takımı Sayısı (J_n)	Puan
A. Masif, eklem çok az veya hiç yok	0,5-1
B. Bir eklem takımı	2
C. Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3
D. İki eklem takımı	4
E. İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6
F. Üç eklem takımı	9
G. Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12
H. Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker görünümünde	15
I. Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20

Not: (2) Arakesitler (kesişen tüneller) için ($3.0 \times J_n$) kullanılır.

(3) Tünel girişleri için ($2.0 \times J_n$) kullanılır.

Çizelge 4.9. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem pürüzlülük sayısı değerleri(Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

Eklem Pürüzlülük Sayısı (J_r)	Puan
a-Süreksizlik – kaya dokanağı	
b-10 cm’lik bir makaslamadan önceki süreksizlik – kaya dokanağı	
A. Süreksiz Eklemler	4
B. Pürüzlü veya düzensiz, dalgalı	3
C. Düz, dalgalı	2
D. Kaygan, dalgalı	1,5
E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5
F. Düz, düzlemsel	1
G. Kaygan, düzlemsel	0,5
Not: (4) Bu sıralamada tanımlamalar, küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.	
c- Makaslanmış kesimde süreksizlik – kaya dokanağı yok	
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıktaki, çakıllı ya da parçalanmış zon	1

Not (5): İlgili eklem takımının ortalama aralığı 3 m’den büyük ise J_r ’ye 1,0 eklenebilir.

Not (6): Çizgiselliklerin en düşük dayanımı verecek şekilde yönlenmesi koşuluyla, çizgisellik içeren düzlemsel ve kaygan süreksizlik yüzeyleri için $J_r=0,5$ alınabilir.

Not (7): J_r ve J_a sınıflaması, yönelim ve makaslama dayanımı ($\tau=\sigma_n \tan(J_r/J_a)$) açısından duraylılık için hiç uygun olmayan eklem takımına veya süreksizliklere uygulanır.

Çizelge 4.10. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem alterasyon sayısı değerleri (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

Eklem Alterasyon Sayısı (J_a)	Puan	ϕ (°)
(a) Kaya - süreksizlik dokanağı (mineral dolgusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yüzeyler sıkı, sert, yumaşamayan geçirimsiz dolgu (örn. kuvars veya epidot)	0,75	-
B. Eklem yüzeyinde değişim yok, sadece yüzey sıvaması var	1	25-35
C. Çok az değişime (bozunmaya) uğramış süreksizlik yüzeyleri. Yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vb.	2	25-30
D. Siltli veya kumlu kil kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25
E. Yumuşamayan veya düşük sürtünmeye sahip kil kaplama (örn. kaolinit veya mika). Ayrıca klonit, talk, jips, grafit vd. ile az miktarda şişen killer	4	25-30
(b) 10 cm'lik makaslamaadan önceki süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunmamış kaya vd.	4	25-30
G. Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	6	16-24
H. Orta ve düşük derecede aşırı konsolidasyona maruz kalmış, yumuşamayan kil minerali dolguları (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm)	8	12-16
J. Şişen kil mineralleri - örneğin montmorillenit (sürekli, ancak kalınlığı <5 mm) J_a 'nın değeri şişen kil tane boyutundaki malzemenin miktarına ve su girişine bağlı	8-12	6-12
(c) Makaslama durumunda süreksizlik yüzeylerinin teması yok (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Ayırılmış veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşullunun tanımı için G, H ve J'ye bakınız)	6, 8 veya 8-12	6-24
N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5	-
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşullunun tanımlanması için G, H ve J'ye bakınız)	10, 13 veya 13-20	6-24

Çizelge 4.11. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan eklem suyu azaltma faktörü değerleri (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

Eklem Suyu Azaltma Faktörü (J_w)	Su basıncı (MPa)	Puan
A. Kısmi kazı veya düşük su geliri (örn. genel olarak <5 l/dk.)	< 0,1	1
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0,1 – 0,25	0,66
C. Dolgusuz eklemler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	0,25 – 1,0	0,5
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	0,25 – 1,0	0,33
E. Çok ileri derecede su geliri veya patlatma sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	>1,0	0,2-0,1
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derecede su geliri veya su basıncı	>1,0	0,1-0,05

Not: (8) C, D, E ve F'deki faktörler kaba tahminlerdir. Eğer drenaja yönelik önlemler alınırsa, J_w artar.

(9) Buz oluşumundan kaynaklanabilecek özel sorunlar dikkate alınmamıştır.

Çizelge 4.12. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan gerilme azaltma faktörü değerleri (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000)

Gerilme Azaltma Faktörü (SRF)	σ_{ci}/σ_1	σ_0/σ_{ci}	Puan
(a) Tünel açılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilecek kazıyı kesen zayıf zonlar			
A. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren zayıflık zonları, çok gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			10
B. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği ≤ 50 m)			5
C. Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya içeren tek bir zayıf zon (kazı derinliği > 50 m)			2,5
D. Kil içermeyen dayanıklı kayada birden fazla makaslama zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)			7,5
E. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği ≤ 50 m)			5
F. Kil içermeyen dayanıklı kayada tek bir makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m)			2,5
G. Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemlili “küp şeker” görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5
(b) Dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları			
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın açık eklemler	>200	$<0,01$	2,5
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	$200 - 10$	$0,01 - 0,3$	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	$10 - 5$	$0,3 - 0,4$	$0,5 - 2$
L. Masif kayada 1 saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	$5 - 3$	$0,5 - 0,65$	$5 - 50$
M. Masif kayada birkaç dakika sonra dilimlenme ve kaya patlaması	$3 - 2$	$0,65 - 1$	$50 - 200$
N. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	<2	>1	$200 - 400$
Not (11): Oldukça anizotrop bakir gerilme alanı (ölçülebilirse) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c $0,75 \sigma_c'$ 'ye, $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ ise $0,5 \sigma_c'$ 'ye düşürülür. Burada σ_c ; tek eksenli basınç dayanımı, σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, σ_0 en büyük teğetsel gerilmedir (elastik kuramdan tahmin edilen).			
Not (12): Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarla ilgili birkaç vaka kaydı mevcuttur. Bu gibi durumlar için SRF'nin 2,5'tan 5'e artırılması önerilir (H maddesine bakınız).			
(c) Sıkışan kaya: Yüksek kaya basıncının etkisiyle düşük dayanımlı kayada plastik akma			
O. Az sıkıştıran kaya basıncı		$1 - 5$	$5 - 10$
P. Aşırı sıkıştırıcı kaya basıncı		>5	$10 - 20$
Not (13): Sıkışan kaya vakaları $H > Q^{1/3}$ derinlik koşulunda meydana gelebilir (Singh, 1993). Kaya kütlelerinin sıkışma dayanımı $q = 0,7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa) eşitliğinden tahmin edilebilir. Burada γ kayanın birim hacim ağırlığıdır. (kN/m^3) (Singh, 1993)			
(d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği			
R. Düşük şişme basıncı			$5 - 10$
S. Çok yüksek şişme basıncı			$10 - 15$

Q değeri ile ilgili olarak yaratı açıklıklarının duyarlılığı ve destek gereksinimleri açısından Barton vd. (1974) Eşdeğer boyut, D_e adını verdikleri bir parametreyi de tanımlamışlardır. Bu parametre aşağıda verilen ifadeden hesaplanmaktadır.

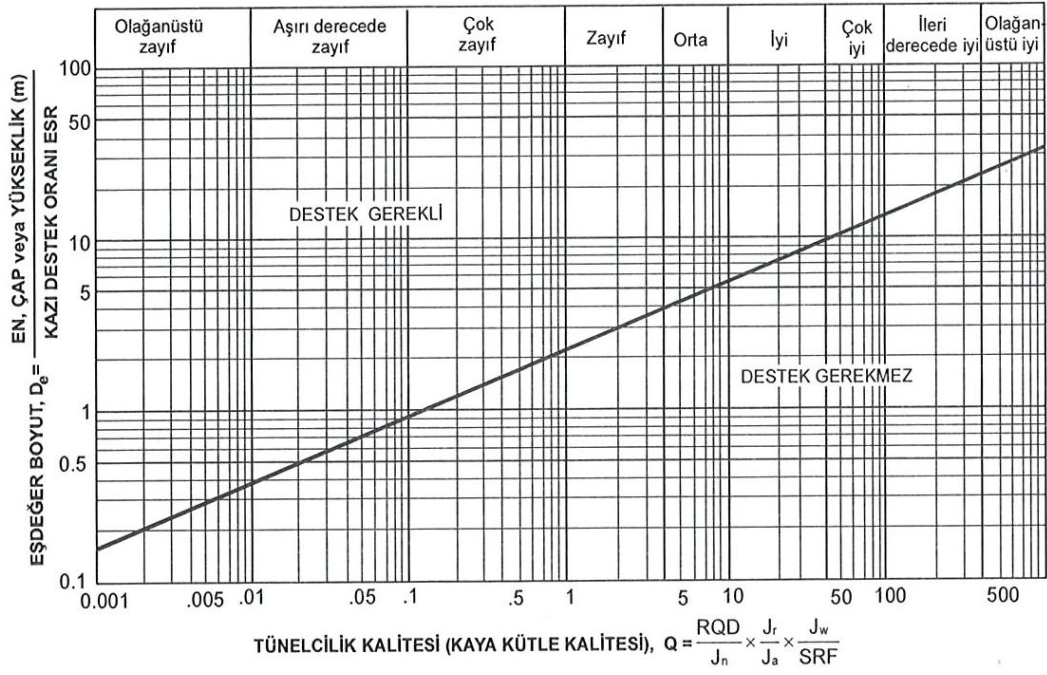
$$D_e = \frac{\text{Kazının genişliği, çapı veya yüksekliği (m)}}{\text{Kazı destek ortamı (ESR)}} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlikteki ESR değeri yeraltı açıklığının duraylı kılınabilmesi için yerleştirilen destek sistemi üzerinde etkisi olan bir tür güvenlik katsayısıdır. Yeraltı kazısının türüne ve amacına göre ESR değerleri ilk kez Barton vd. (1974) tarafından önerilmiş, ancak daha sonra Barton ve Grimstad (1994) bazı değişiklikler yaparak ESR değerlerini güncelleştirmişlerdir. ESR için günümüzde bu son değişiklikler dikkate alınmaktadır. Orijinal ve güncellenmiş ESR değerleri Çizelge 4.13'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.13. Farklı yeraltı kazısı türleri için orijinal (Barton vd., 1974) ve güncellenmiş (Barton ve Grimstad, 1994) ESR değerleri.

KAZI TİPİ	Orijinal ESR	Güncellenmiş ESR
A. Kısa süreli (geçici) maden kazıları vd.	3-5	2-5
B. Uzun süreli (kalıcı) maden kazılan, su tünelleri, büyük kazılar için açılan pilot tüneller, geniş yeraltı kazılan	1.6	1.6-2.0
C. Geniş yeraltı depolama odaları, su arıtma tesisleri, küçük karayolu ve demiryolu tünelleri, yaklaşım tünelleri	1.3	1.2-1.3
D. Enerji santralleri, büyük (ana) karayolu ve demiryolu tünelleri, sivil savunma sığınakları, tünel girişleri ve yeraltında birbirini kesen açıklıkların kesişme bölgeleri	1	0.9-1.1
E. Yeraltı nükleer enerji santralleri, demiryolu istasyonları, spor ve kamu tesisleri, fabrikalar, gaz nakil tünelleri	0.8	0.5-0.8

Q sisteminin parametreleri için Çizelge 4.8'den belirlenen değerler kullanılarak eşitlik 4.1'ten hesaplanan Q değerleri 0.001 ile 1000 arasında değişmektedir. Q sistemi, bu değerlere bağlı olarak, olağanüstü iyi kategorisinden olağanüstü zayıf kaya kategorisine doğru değişen dokuz farklı kaya kütlesi sınıfına sahiptir. Q sistemiyle ilgili kaya kütlesi sınıfları Q ile D_e arasındaki ilişki Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Q ve eşdeğer boyut arasındaki ilişki (Barton vd., 1974)

4.4. Tünel Açma Makinesi (TBM) Performans Analizi

Tünel projelerinde, inşaat yöntemi ve TBM tipi seçiminde planlama gerektiğinden belli bir kaya kütleğinde TBM performansının tahmini uzun süredir araştırma konusu olmuştur (Gong ve Zhao, 2009). Bunun en büyük nedeni makine verimliliği ile ilgili tahminin doğruya yaklaşmasının maliyet risklerini azaltacağıdır (Yağız, 2008).

TBM'in 1950'li yıllarda ilk başarılı kullanımından sonra geçtiğimiz 30 yıllık süreçte çok sayıda TBM performans modeli önerilmiştir. Bu modeller ampirik ve yarı deneysel modellere dayanmaktadır (Yağız ve Gökçeoğlu, 2010). TBM performans analizi yöntemlerinin temel amacı günlük (AR) ve anlık ilerleme (PR) hızlarının hesaplanmasıdır (Poşluk vd., 2011a).

Öncelikle penetrasyon testleri ya da tam ölçekli laboratuvar kesme testleri kullanılarak geliştirilen teorik modeller kesiciye dayalı kesme kuvvetleri, kesme geometrisi vb. kesin bir tahmin sağlamaktadır (Hamidi vd., 2010). Laboratuvar testleri kayacın parçalanma ve kayaların kuvvet penetrasyon ilişkisini açıklamak için yeterli olsa da bu testlerin temel eksikliği TBM kesici disklerinin gerçekte karşılaştıkları kaya kütleğini temsil

etmemeleridir. Ayrıca bu tür test ekipmanları dünyadaki tüm araştırma merkezlerinde bulunmayabilmektedir. Bu gibi durumlarda TBM performansı ampirik formüllerle tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Ampirik modeller, taze kayanın tek eksenli basınç dayanımı kullanılarak geliştirilmiştir. Bu dayanım parametrelerinin yerine, kırılma tokluğu, schmit çekici, taber aşınma vb. parametreleri de kullanılabilir. Bununla birlikte son geliştirilen ampirik modellerle birlikte makine performansını tahmin etmek için makine parametreleri ile birlikte birkaç kaya ve kaya kütlesi parametresi de dikkate alınmaktadır (Hamidi vd., 2010).

Ampirik olarak geliştirilen bu tahmini modeller, çeşitli zemin şartlarında TBM performansını tarihsel veriler değerlendirilerek oluşturulmuştur. Ampirik modellerin bir diğeri de kaya kütle sınıflama sistemleri ile TBM performansını ilişkilendirmeye çalışan gruptur (Hamidi vd., 2010). Bu amaçla günümüzde RMR, Q, ve GSI, RMI sınıflama sistemlerinden faydalanılmaktadır. En çok kullanılan sistemler ise RMR_{TBM} ve Q_{TBM} sistemleridir. Çizelge 4.14’de günümüze kadar geçen sürede geliştirilen TBM performansını belirlemeye yönelik yapılan kaya kütle sınıflama sistemleri sunulmuştur.

Çizelge 4.14. Kaya kütle sınıflamalarına göre TBM performans modelleri (Hamidi vd., 2010)

Korelasyonlar (TBM performans tahmini)	Referanslar
$PR = -0.0059RSR + 1,59$	(Cassinelli vd., 1982)
$PR = \sigma_0^{-0.437} - 0.047RSR + 3.15$	(Innaurato vd., 1991)
$PR = 5Q_{TBM}^{-1/5}$	
$Q_{TBM} = \left[\frac{RQDo}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \right]$	(Barton, 2000)
$SP = 250 \sigma_{cm}^{-0.66}, \sigma_{cm} = \sigma_c \cdot \exp\left(\frac{RMR - 100}{18}\right)$	(Ribacchi ve Lembo-Fazio, 2005)
$ARA = 0.422 RME_{07} - 11,61$	(Bieniawski vd., 2007)
$FPI = 0.222BRMR + 2.755$	(Hassanpour vd., 2009)
$FPI = 9.273e^{0.008GSI}$	(Hassanpour vd., 2009)
$FPI = 11.718Q^{0.098}$	(Hassanpour vd., 2009)

PR=Anlık ilerleme; σ_c Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, SP=Spesifik ilerleme, σ_{cm} = Kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı, ARA = Ortalama ilerleme hızı, FPI = Alan penetrasyon indeksi, J_n , J_r , J_a , J_w ve SRF = Q sistem değişkenleri SIGMA = Kaya kütle dayanımı, F = Her bir kesiciye gelen itme kuvveti, CLI = Kesici ömrü, q = Kuvars yüzdesi, σ_θ = Biaksial gerilme

4.4.1 Q_{TBM} Yöntemi

1972-1973 yılları arasında Barton ve arkadaşları tarafından önerilen Q sisteminin TBM performansı için geliştirilen versiyonudur. Q_{TBM} sistemi Barton (2000) tarafından toplam uzunluğu 1000 kilometreyi bulan ve TBM ile açılan 145 tünelin analizi sonucu ortaya konulmuştur (Poşluk vd., 2011a). Bu sistemin temel amacı kaya kütle sınıflama sistemi olarak kullanılan Q sisteminden yararlanarak TBM için anlık (PR-penetration rate) ve günlük (AR-advanced rate) ilerleme hızını hesaplamaktır (Poşluk vd., 2011a).

Anlık (PR) ve günlük (AR) ilerleme hızı hesaplamaları için Barton (2000) tarafından önerilen formüller:

$$PR \text{ (Anlık İlerleme)} = PR = 5Q_{TBM}^{-1/5} \quad \text{m/saat} \quad (4.4)$$

$$AR \text{ (Günlük İlerleme)} = PR \times T^m \quad \text{m/saat} \quad (4.5)$$

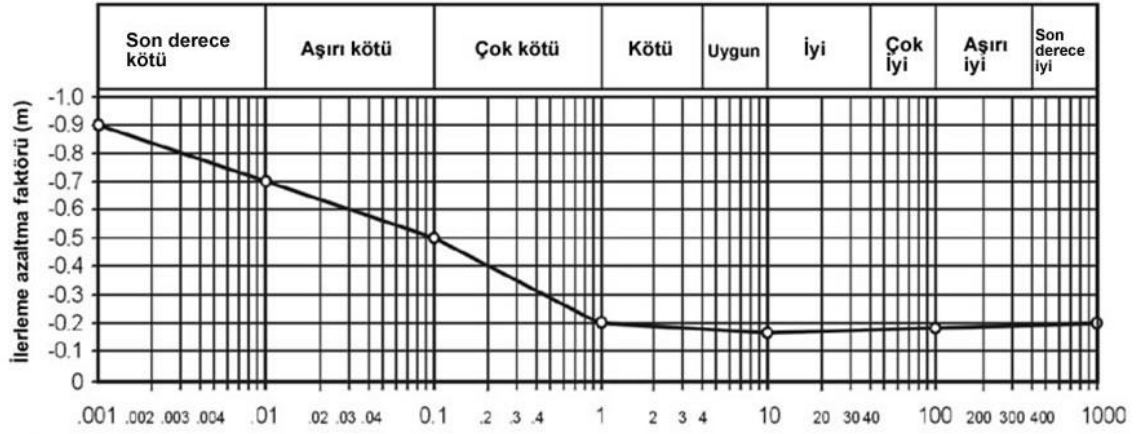
Bu eşitlikte T süre olup,

$$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (4.6)$$

Eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte “L” tünelin bahsedilen kesimdeki uzunluğunu ifade etmektedir. “m” ise aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü olup aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$m = m_1 \times \left(\frac{D}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0,15} \times \left(\frac{q}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{n}{2} \right)^{0,05} \quad (4.7)$$

Burada, “ m_1 ” aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü başlangıç değeri olup, Şekil 4.2.’den yararlanılarak bulunur, “D” TBM kazı çapıdır, “n” ise kayacın porozite değerini göstermektedir (Barton, 2000).



Şekil 4.2. Aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü başlangıç değerini (m) Q değerinin fonksiyonu olarak gösteren tablo (Barton, 2000)

Günlük ve anlık ilerleme hızı hesaplamaları için önerilen formüllerde kullanılan Q_{TBM} değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır;

$$Q_{TBM} = \left[\frac{RQD_0}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10/209}} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \right] \quad (5.8)$$

Burada;

RQD_0 = Yönlendirilmiş RQD

J_n , J_r , J_a , J_w ve SRF = Q sistem değişkenleri

$SIGMA$ = Kaya kütle dayanımı

F = Herbir kesiciye gelen itme kuvveti

CLI = Kesici ömrü

q = Kuvars yüzdesi

σ_θ = Biaksial gerilme değerlerini göstermektedir.

4.4.1.1 Yönlendirilmiş kaya kalite indisi (RQD_0)

Kaya kalite indisi (RMR) Deere (1964) tarafından önerilmiş olup, sondaj ile bir ilerleme aralığında doğal süreksizliklerle ayrılmış, boyu 10 cm ve daha büyük olan ve silindirik şeklini koruyan kaya türü karot parçalarının toplam uzunluğunun ilerleme aralığının uzunluğuna oranını yüzde olarak ifade eden kantitatif bir indekstir (Ulusay ve Sönmez, 2002).

Q_{TBM} hesabında kullanılan RQD_o ise düşey sondajlardan elde edilen RQD değerinin sondajın tünel eksenini yönünde açılması durumundaki tahmini esasına dayanan bir parametredir (Poşluk vd., 2011a).

4.4.1.2 Q sistem değişkenleri (J_n , J_r , J_a , J_w ve SRF)

Barton vd. (1974), tarafından önerilen Q hesaplamalarında kullanılan ve 1993 yılında Grimstad ve Barton (1993) tarafından modifiye edilen parametrelerdir. J_n : Eklem takrim sayısı, (J_r) Eklem pürüzlülük sayısı, J_a : Eklem alterasyon sayısı, J_w : Eklem suyu indirgeme sayısı, SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür. Bu parametreler ve Q hesabında kullanılan değerler Bölüm 4.3 de anlatılmıştır.

4.4.1.3 SIGMA (Kaya kütle dayanımı)

Sing (1993) tarafından önerilen kavram, kaya kütle dayanımını belirtmek için kullanılmaktadır. Başka bir deyişle kaya dayanımını, tek eksenli basınç dayanımı (σ_c), nokta yükü (I_{50}) ve tünel profili ile tünel eksenini arasındaki açıyı (β) dikkate alınarak açıklanmaya çalışan parametredir (Maidl, 2008).

$$SIGMA = SIGMA_{cm} = 5\gamma Q_c^{1/3} \dots\dots\dots Q_c = Q_0 x \frac{\sigma_c}{100} \beta > 60^\circ \quad (4.9)$$

$$SIGMA = SIGMA_{tm} = 5\gamma Q_t^{1/3} \dots\dots\dots Q_t = Q_0 x \frac{I_{50}}{100} \beta > 30^\circ \quad (4.10)$$

4.4.1.4 Her bir kesiciye gelen itme kuvveti (F)

Barton (2000)'a göre TBM performansına etki eden bir diğer parametrede kullanılan TBM'de bulunan kesici disklerin her birinin kazı yüzeyine uyguladığı kuvvettir. Bu kuvvet kazı performansını doğrudan etkilemektedir. TBM'i üreten firma tarafından makine özellikleri olarak verilmektedir.

4.4.1.5 Kesici ömrü (CLI)

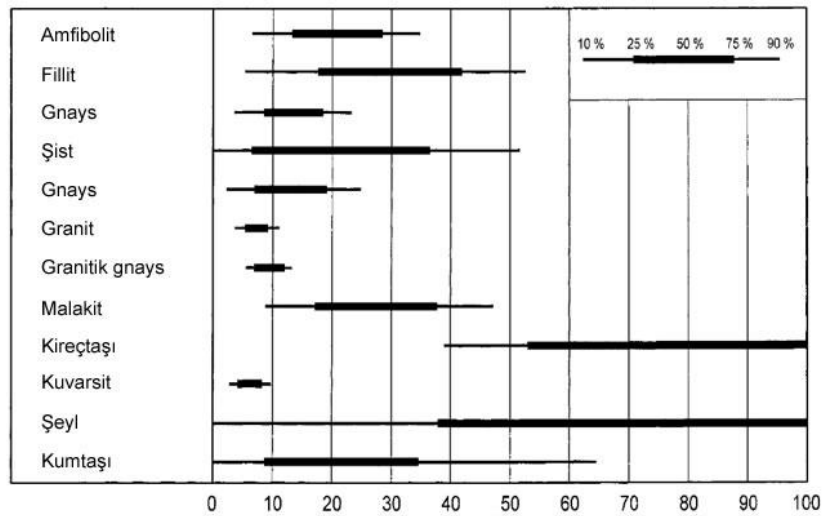
TBM ilerledikçe kesici kafada bulunan kesici diskler aşınmakta ve periyodik olarak değiştirilmektedir (Şekil 4.3.). Bu durum genellikle seçilen kesicilere ve masif kayanın fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Örneğin kayacın tek eksenli basınç dayanımı, porozitesi, kuvars yüzdesi, tabakalanması, foliasyonu hatta kayacın kökeni önem teşkil etmektedir.

Bu sebeple kesici disklerin değiştirilmesi, vardiya değişimi, makine bakımı, vs. gibi farklı nedenlerden dolayı doğan duraklamalara “utilization” (U) denmektedir ve klasik TBM kazılarında günlük ilerlemenin bir fonksiyonudur ve aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$AR=U \times PR \quad (4.11)$$

Fakat Nelson (1993) PR (penetration rate) ve U (Utilization)’nı ayrı ayrı kaya kütle sınıflaması ile ilişkilendirmiştir.

Bu çalışmanın hazırlanması aşamalarında Q_{TBM} sisteminde Nelson (1993)’un önerisi benimsenmiş ve U için daha ayrıntılı bir çalışma yapılarak kesici ömrü bir fonksiyon olarak Q_{TBM} formülasyonunun içerisine dahil edilmiştir. Bu nedenle Barton (2000) Q_{TBM} hesaplamalarında kesici ömrü tahmini için Movinkel ve Johannessen (1986)’nın ayrıntılı çalışmalar sonucunda belli başlı kaya türleri için önerdikleri abaktan yararlanmıştır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Kesici ömrü tahmin abağı (Movinkel ve Johannessen, 1986).

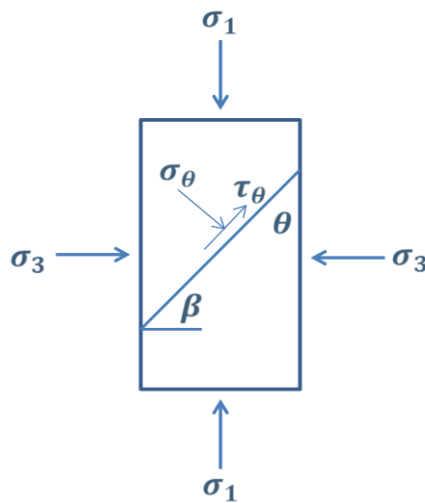
4.4.1.6 Kuvars yüzdesi (q)

Kuvars, feldespatlardan sonra yeryüzünün kıtasal kabuğunda en çok rastlanan ikinci mineralidir. Mohs sertlik skalasına göre sertlik derecesi 7'dir. Oldukça sert olan bu mineralin kıtasal kabukta da fazla miktarda bulunması kesici tasarımında ve kesici ömrünü etkilemeleri açısından önemli bir etmendir.

Bu sebeple Q_{TBM} hesaplamalarında bir parametre olarak konulması oldukça doğaldır. Kuvars yüzdesinin en doğru tahmini petrografik analizler ile olsa da hemen her projede bu analizler yapılamamaktadır. Bu nedenle tünel güzergahı üzerinde çeşitli araştırmacılar tarafından daha önceden yapılmış çalışmalar irdelenmeli ve/veya yine kabul görmüş araştırmacıların kayaç türlerinde kuvars yüzdesinin tayininne yönelik yapmış oldukları genellemeler dikkate alınabilir.

4.4.1.7 Biaksial gerilme (σ_θ)

Farklı şiddetteki iki asal normal gerilmenin ($\sigma_1 > \sigma_3$) etkisinde kalan cisimde 'biaksial gerilme' durumu oluşur (Yüzer ve Vardar, 1986). Bu gerilme durumunda Mohr diyagramında bir çember ile göstermek mümkündür. Bu dairenin denklemi tek eksenli gerilme durumuna benzer şekildedir (Yüzer ve Vardar, 1986) (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. İki eksenli gerilme durumu.

En büyük asal normal gerilme (σ_1) ile β açısı yapan herhangi bir yüzey üzerine etkiyen normal σ_N ve teğetsel τ_N gerilmelerin şiddetleri, bu bilinen σ_1 ve σ_3 gerilmelerine göre aranacak olursak;

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\beta \quad (4.12)$$

bulunur (Yüzer ve Vardar, 1986).

BÖLÜM V

TÜNEL AÇMA MAKİNESİ PERFORMANS TAHMİNİ

Bu bölümde Barton (2000) tarafından önerilen Q_{TBM} yönteminden yararlanılarak 26'nolu tünel kazısında kullanılan tünel açma makinesinin (S-627) kazı performansı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Hesaplamalar sırasında tünel güzergahı jeolojik özelliklerine göre farklı kısımlara bölünmüş, her bir kısım için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Daha sonra bu hesaplamalar birleştirilerek anlık ilerleme ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır.

5.1 26'nolu Tünel Q_{TBM} ve Performans Hesapları

Q_{TBM} hesaplamaları için tünel güzergahı, litoloji, jeolojik özellikler ve örtü kalınlığına göre 7 kısma ayrılmıştır. Burada temel alınan değer Q_o (yönlendirilmiş Q) değeridir. Bunun için tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den yüksek ve 50 m.'den düşük olan yerler değerlendirilmiştir. Tünel için belirlenen kısımlar Çizelge 4.5'de verilmiştir.

5.1.1 Kısım 1 (Km: 216+560 ile 218+710 Arası)

Benzer jeolojik özellikler gösteren kısmın toplam uzunluğu 2150 metredir. Bu kısım boyunca tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den fazladır. Bu kısımda TBM performansını belirlemek için öncelikle Q_o değeri hesaplanacak olup, daha sonra Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Q_o hesaplamaları için kullanılan değerler, Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kısımlı için Qo değerleri

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	30
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	2,5

$$Q_o = \frac{30}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{2,5} = 0,880 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,71 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 27 \text{ MPa}$ 'dır (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,880 \times \frac{27}{100} = 0,238$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,71 \times (0,238)^{1/3} = 8,39$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir)

$$\text{CLI} = 10 (\%) \text{ (öngörülen)}$$

$$q=25 (\%)$$

σ_0 hesaplanması için σ_1 , σ_3 , ve β nın hesaplanması gerekmektedir.

$$\sigma_1 = \frac{\text{Örtü kalınlığı} \times \gamma}{100} \quad 5.1$$

eşitliğinden hesaplanır.

$$\sigma_1 = \frac{225 \times 2,71}{100} = 28,23 \text{ MPa}$$

σ_3 ise bu kısımda yapılan 3 eksenli basınç deneyinden elde edilen Mohr zarfindan yararlanılarak bulunmaktadır.

$$\sigma_1 = 4,75 + 3,85\sigma_3$$

$$\sigma_3 = 6,10 \text{ MPa}$$

β açısı ise labaratuvar sonuçlarından elde edilen yenilme açısı $(\phi)/2 + 45$ formülünden bulunmaktadır.

$$\beta = 45 + 36/2 = 63^\circ \text{ dir.}$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{28,23 + 6,10}{2} \right) - \left(\frac{28,23 - 6,10}{2} \right) \cos 2 \times 63 = 10,66 \text{ MPa}$$

$$Q_{TBM} = \left[0,880 \times \frac{8,39}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{10,66}{5} \right] = 0,2113 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

$$PR = 5 \times 0,2113^{1/3}$$

$$PR = 6,82 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 2150 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,22 \times \left(\frac{13,77}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10} \right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2} \right)^{0,05}$$

$$m = -0,320$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{2140}{6,82} \right)^{\frac{1}{1 + (-0,320)}}$$

$$T = 4699,11 \text{ saat olarak hesaplanır.}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden

$$AR = 6,82 \times 4699,11^{-0,320} = 0,455 \text{ m/saat olarak bulunmuştur.}$$

5.1.2 Kısım 2 (KM:218+710 ile 218+760 Arası)

50 m. uzunluğundaki 2. kısım fay zonuna denk gelmektedir. Bu kısımdaki tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den fazladır. Bu zonda öncelikle Q_o değeri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Q_o hesaplamaları için kullanılan değerler Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Kısım 2 için Q_o değerleri

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	10
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	0,5
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	10
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,50
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	10

$$Q_o = \frac{10}{9} \times \frac{0,5}{10} \times \frac{0,50}{10} = 0,003 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,20 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 10 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,003 \times \frac{10}{100} = 0,003$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,20 \times (0,0003)^{1/3} = 0,72$$

F= 25 ton (Bu değ r TBM  retici firması tarafından verilen disk başına d   en itki kuvvetidir)

CLI = 10 (%) ( ng r len)

q=10 (%)

  =1 MPa (Bu değ r formül 4.12 den hesaplanmıştır)

$$Q_{TBM} = \left[0,003 \times \frac{0,72}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{10}{20} \times \frac{1}{5} \right] = 0,00003 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

$$PR = 5 \times 0,00003^{1/3}$$

$$PR = 68,05 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 50 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 e itli inden hesaplanır,

$$m = 0,80 \times \left(\frac{13,77}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10} \right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{15}{2} \right)^{0,05}$$

$$m = -1,122$$

Hesaplanan “m” değ ri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{50}{68,05} \right)^{\frac{1}{1+(-1,122)}}$$

$$T = 12,46 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 e itli inden hesaplanır ve

$$AR = 68,05 \times 12,46^{-1,122} = 4,013 \text{ m/saat'dir.}$$

5.1.3 Kısım 3 (Km:218+760 ile 219+310 Arası)

550 m. uzunluğundaki 3. kısım da tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den fazladır. Bu zonda öncelikle Q_o değ ri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değ ri bulunacaktır. Q_{TBM} değ ri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değ rleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Bu kısımaya yönelik Q_o hesaplamaları için kullanılan değ rler  izelge 5.3.’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Kısım 3 için Qo değerleri

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	30
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	2,5

$$Q_o = \frac{30}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{2,5} = 0,880 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,62 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 28 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,880 \frac{28}{100} = 0,246$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,62 \times (0,246)^{1/3} = 8,21$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir)

$$\text{CLI} = 10 (\%) \text{ (öngörülen)}$$

$$q=25 (\%)$$

$$\sigma_\theta = 7,30 \text{ MPa (Bu değer formül 4.12 den hesaplanmıştır)}$$

$$Q_{\text{TBM}} = \left[0,880 \times \frac{8,21}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{7,30}{5} \right] = 0,1416 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

$$\text{PR} = 5 \times 0,1416^{1/3}$$

$$\text{PR} = 7,39 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 550 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,22 \times \left(\frac{13,77}{5}\right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10}\right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20}\right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2}\right)^{0,05}$$

$$m = -0,320$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{550}{7,39}\right)^{\frac{1}{1+(-0,320)}}$$

$$T = 566,20 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden hesaplanır ve

$$AR = 7,39 \times 566,20^{-0,320} = 0,971 \text{ m/saattir.}$$

5.1.4 Kısım 4 (Km:219+310 ile 220+300 Arası)

990 m. uzunluğundaki kısım da tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den azdır. Bu kısım içinde öncelikle Q_o değeri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Q_o hesaplamaları için kullanılacak değerler Çizelge 5.4.’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Kısım 4 için Q_o değerler

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	36
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	5

$$Q_o = \frac{36}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{5} = 0,528$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,54 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 28 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,528 \frac{28}{100} = 0,148$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,54 \times (0,148)^{1/3} = 6,72$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir)

$$\text{CLI} = 10 (\%) \text{ (öngörülen)}$$

$$q=25 (\%)$$

$$\sigma_0 = 3,00 \text{ MPa} \text{ (Bu değer formül 4.12 den hesaplanmıştır)}$$

$$Q_{\text{TBM}} = \left[0,528 \times \frac{6,72}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{3}{5} \right] = 0,0286$$

$$\text{PR} = 5 \times 0,0286^{1/3}$$

$$\text{PR} = 10,18 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 990 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,28 \times \left(\frac{13,77}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10} \right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2} \right)^{0,05}$$

$$m = -0,407$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{990}{10,08} \right)^{\frac{1}{1+(-0,407)}}$$

$$T = 2263,04 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden hesaplanır ve

$$\text{AR} = 10,08 \times 2263,04^{-0,4070} = 0,437 \text{ m/saat'tir.}$$

5.1.5 Kısım 5 (Km: 220+300 ile 220+795 Arası)

Tünelin bu kısmında KM: 220+300 den itibaren grafit şistten klorit şiste geçilmiştir. 495 m. uzunluğundaki bu kısımda da tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den fazladır. Bu kısım içinde öncelikle Q_o değeri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Q_o hesaplamaları için kullanılan değerler Çizelge 5.5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Kısım 5 için Q_o değerler

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	61
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	5

$$Q_o = \frac{61}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{5} = 0,895$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,76 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 26 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,895 \frac{26}{100} = 0,233$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,76 \times (0,233)^{1/3} = 8,49$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir.)

CLI = 10 (öngörülen)

q=25 (%)

σ_θ =3,05 MPa (Bu değer formül 4.12 den hesaplanmıştır)

$$Q_{TBM} = \left[0,895 \times \frac{8,49}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{3,05}{5} \right] = 0,0622$$

$$PR = 5 \times 0,0622^{1/3}$$

$$PR = 8,71 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 495 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,21 \times \left(\frac{13,77}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10} \right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2} \right)^{0,05}$$

$$m = -0,306$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{495}{8,71} \right)^{\frac{1}{1+(-0,306)}}$$

$$T = 336,04 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden hesaplanır ve

$$AR = 8,71 \times 336,04^{-0,306} = 1,473 \text{ m/saat'tir.}$$

5.1.6 Kısım 6 (Km: 220+795 ile 221+545 Arası)

750 m. uzunluğundaki bu kısım da tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den azdır. Bu kısımda da öncelikle Q_o değeri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Q_o hesaplamaları için kullanılan değerler Çizelge 5.6.'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. Kısım 6 için Qo değerler

No	Parametre	Puan
1	RQD _o : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	67
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	2,5

$$Q_o = \frac{67}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{2,5} = 1,965$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,77 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 20 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 1,965 \frac{20}{100} = 0,393$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,77 \times (0,393)^{1/3} = 10,15$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir).

$$CLI = 10 \text{ (öngörülen)}$$

$$q=25 \text{ (\%)}$$

$$\sigma_0 = 6,09 \text{ MPa (Bu değer formül 4.12 den hesaplanmıştır)}$$

$$Q_{TBM} = \left[1,965 \times \frac{10,15}{25^{10}/20^9} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{6,09}{5} \right] = 0,3260$$

$$PR = 5 \times 0,3260^{1/3}$$

$$PR = 6,26 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 750 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,19 \times \left(\frac{13,77}{5}\right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10}\right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20}\right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2}\right)^{0,05}$$

$$m = -0,276$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{750}{6,26}\right)^{\frac{1}{1+(-0,276)}}$$

$$T = 746,63 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden hesaplanır ve

$$AR = 6,26 \times 746,63^{-0,276} = 1,005 \text{ m/saat'tir.}$$

5.1.7 Kısım 7 (Km: 221+545 ile 221+765 Arası)

220 m. uzunluğundaki bu kısım da tünel üzeri örtü kalınlığı 50 m. den fazladır. Bu kısımda öncelikle Q_0 değeri hesaplanacak ardından Q_{TBM} değeri bulunacaktır. Q_{TBM} değeri bulunduktan sonra ise anlık ve günlük ilerleme değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Bu kısma ait Q_0 hesaplamaları için kullanılan değerler Çizelge 5.7.’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Kısım 7 için Q_0 değer tablosu

No	Parametre	Puan
1	RQD ₀ : Kaya kalite göstergesi (yönlendirilmiş)	36
2	Jn: Eklem takımı sayısı	9
3	Jr: Eklem pürüzlülük sayısı	1
4	Ja: Eklem alterasyon sayısı	1
5	Jw: Eklem su azaltma faktörü	0,66
6	SRF: Gerilme azaltma faktörü	5

$$Q_0 = \frac{36}{9} \times \frac{1}{1} \times \frac{0,66}{5} = 0,528$$

SIGMA değerinin hesabı için formül de (4.9) kullanılan parametreler:

$\gamma = 2,88 \text{ gr/cm}^3$ (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$\sigma_c = 30 \text{ MPa}$ 'dır. (Sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerin ortalama değeridir).

$$Q_c = 0,528 \frac{30}{100} = 0,158$$

$$\text{SIGMA} = 5 \times 2,88 \times (0,158)^{1/3} = 7,79$$

F= 25 ton (Bu değer TBM üretici firması tarafından verilen disk başına düşen itki kuvvetidir).

$$\text{CLI} = 10 \text{ (öngörülen)}$$

$$q=25 \text{ (\%)}$$

$$\sigma_0 = 2,72 \text{ MPa (Bu değer formül 4.12 den hesaplanmıştır)}$$

$$Q_{\text{TBM}} = \left[0,528 \times \frac{7,79}{25^{10/209}} \times \frac{20}{10} \times \frac{25}{20} \times \frac{2,72}{5} \right] = 0,0300$$

$$\text{PR} = 5 \times 0,0300^{1/3}$$

$$\text{PR} = 10,08 \text{ m/saat}$$

Yaklaşık 750 metre ilerlenecek olan bu kesimde gerekli zaman ise 4.6 eşitliğinden hesaplanır,

$$m = -0,28 \times \left(\frac{13,77}{5} \right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{10} \right)^{0,15} \times \left(\frac{25}{20} \right)^{0,10} \times \left(\frac{5}{2} \right)^{0,05}$$

$$m = -0,407$$

Hesaplanan “m” değeri eşitlikte yerine konularak toplam zaman

$$T = \left(\frac{220}{10,08} \right)^{\frac{1}{1+(-0,407)}}$$

$$T = 181,86 \text{ saat}$$

Günlük ilerleme hızı ise 4.5 eşitliğinden hesaplanır ve

$$\text{AR} = 10,08 \times 181,86^{-0,407} = 1,210 \text{ m/saat'tir.}$$

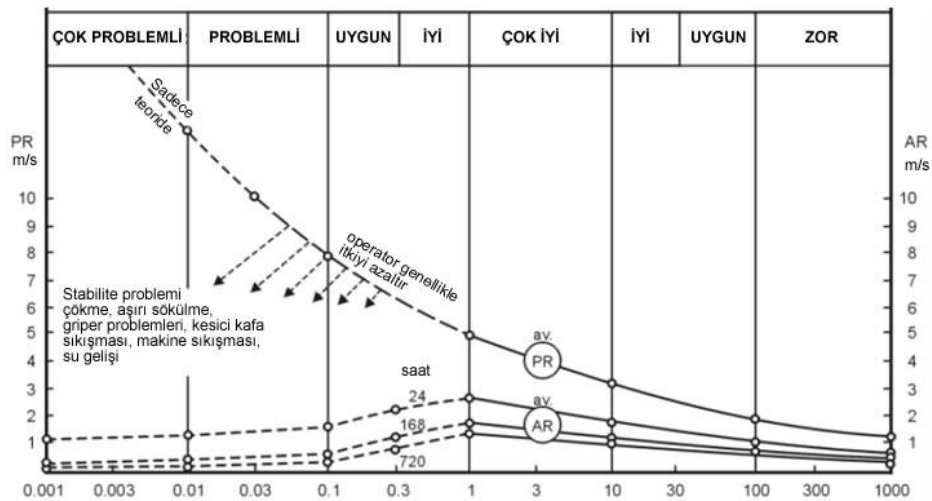
5.2 Tünel Performans Analizi

26'nolu tünelde ilerleyecek olan TBM (S-627) performansını belirlemek amacı ile yapılan Q_{TBM} hesaplamaları sonucunda jeolojik kısımlara göre belirlenen hızlar, özet olarak aşağıda sunulmuştur (Çizelge 5.8.).

Çizelge 5.8. Farklı kesimlere göre TBM performansı zaman hesaplamaları

Kısım	L (m)	T (saat)	Tahmini Zaman (yıl)
1	2140	4699,11	0,538
2	50	12,46	0,001
3	550	566,20	0,065
4	990	2263,04	0,259
5	495	336,04	0,038
6	750	746,63	0,085
7	220	181,86	0,021
$\Sigma L(m)=5195$		$\Sigma T(saatt)=8805,34$	1,01

26 nolu tünelin 7 kısma ayrılarak hesaplanan performans değerlerinin topluca sunulduğu Çizelge 5.8'daki anlık ve günlük ilerleme değerleri Barton (2000)'e göre Şekil 5.1 aracılığı ile değerlendirildiğinde grafit ve klorit şistlerde tahmin edilen ilerleme hızlarının uygun kısma denk geldiği görülmektedir.



Şekil 5.1. TBM için göreceli hızlar (Barton, 2000)

Ancak TBM güzergahı boyunca fay zonuna (Kısım 2) gelindiğinde hızların oldukça yüksek mertebelerde seyrettiği gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak ise fay zonunda düşük Q_0 değeri ve buna bağlı olarak aşınmadan dolayı ilerleme azaltma faktörü başlangıç değerinin (m_1) yüksek olmasıdır. Bu sebeple hızların makul seviyelere çekilebilmesi için Q değerinin artırılması gerekmektedir. Fay zonlarında Q değerinin artırılabilmesi için önceden tespiti ve bu tespit sonrası ortamın çimento enjeksiyonu ile iyileştirilmesi gerekmektedir.

Özellikle grafit şistler içerisinde karşılaşılan küçük ölçekli faylar ve/veya fay zonları arazi çalışmaları sırasında tespit edilememesi nedeni ile tünel imalatı sırasında sorunlar oluşmasına neden olmaktadır. Örneğin Caner (2010), tarafından yapılan çalışmada Uluabat tünellerinde grafit şistler içerisinde açılan tünellerde sıkışmaların olduğu bu sıkışmaların tünel imalatında süre kaybını beraberinde getirdiğini dile getirmiştir. Poşluk vd. (2011b) tarafından yapılan çalışmada, grafit şistler içerisinde açılan tünelde destekleme elemanlarında öngörülmeyen deformasyonların olduğu, aşırı sökülmelerin yaşandığını belirtmişlerdir. Bu noktadan hareketle 26'nolu tünelin imalatı sırasında istenmeyen sorunlar ile karşılaşılması muhtemeldir. Dolayısıyla tünel imalatı için öngörülen sürenin üzerinde bir zamanda tünel imalatının tamamlanmasının muhtemel olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6100 metre uzunluğundaki 26'nolu tünelin imalatına NATM yöntemi kullanılarak başlanmıştır. Tünel kazı ve desteklemesi 298 metre ilerledikten sonra, tünel destekleme elemanlarında oluşan sorunlar nedeniyle bu yöntemle yapılan tünel kazısının ekonomik olmayacağı ve öngörülen süre içerisinde tamamlanamayacağı anlaşılmıştır. Bu nedenlerle bu tünelin tam dairesel kazı yapan tünel açma makinesi (TBM) ile açılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışmada tünelin imal edilen tünel açma makinesi ile ne kadar sürede tamamlanacağı çeşitli ampirik yaklaşımlarla hesaplanarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

TBM performans hesapları farklı yaklaşımlar ile hesaplanabilmektedir. Uygulamada ekonomikliği açısından daha fazla yer bulmaya başlayan kaya kütle sınıflama sistemleri ile TBM performans hesaplarından olan Q_{TBM} (1999) yöntemi bu çalışmada tercih edilmiştir.

26'nolu tünelde kullanılan TBM'in performansının belirlenebilmesi için öncelikle tünel profilini oluşturan yerel kaya koşullarına ve tünel üzeri örtü kalınlıklarına göre tünel 7 farklı kısma bölünmüştür. Tünel güzergahında yapılan sondajlar ve bu sondajlardan elde edilen karot numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney verileri de kullanılarak Q_{TBM} yöntemi ile TBM için anlık ve günlük ilerleme hızları bulunmuştur.

Q_{TBM} hesaplamaları sırasında 6100 metre olan 26'nolu Tünelde daha önce NATM yöntemi ile açılan 298 metrelik kısım ve tünel çıkış tarafında bulunan jetgrout yöntemi ile tünel profili güçlendirilen kısım hesaba katılmamıştır. Q_{TBM} yöntemi ile toplam 5195 metre uzunluğundaki tünel kısmındaki TBM performansı değerlendirilmiştir.

Yapılan hesaplamalar neticesinde TBM için günlük ilerleme 0,75 metre/saat olarak hesaplanmıştır. Bu hesaptan yola çıkılarak tünelin 5195 metrelik kısmı için 1,01 yıl sonra tamamlanacağı sonucuna varılmıştır.

TBM çapının büyüklüğü düşünüldüğünde, bu çapta açılan TBM tünellerinde karşılaşılan olumsuzluklar değerlendirildiğinde ideal koşullarda hesaplanan performans hesabının gerçekleşme durumunun imalat bitiminde tekrar değerlendirilmesi gerektiği sonucunu doğmaktadır. Ayrıca her ne kadar Q_{TBM} yöntemi kaya ktle sınıflamasını referans alsada özellikle graft şistlerde açılan tünellerde geçmiş tecrübeler (Uluabat Tüneli, Ayaş tüneli, 34'nolu tünel) beklenmedik olaylarla (sıkışma, kazı zorluğu, kuvars mercekleri, mega bloklar, deprem, vb.) karşılaşıldığını göstermiştir. Q_{TBM} yöntemi ile performans hesabının da en zayıf noktasının bu konular olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle tünel imalatı tamamlandığında tahmin edilen ve gerçekleşen performans değerleri kıyaslanırken beklenmedik olaylar hesaplardan çıkartılmalıdır.

26'nolu tünelin bitiminde karşılaşılan alüvyon tünel profili jetgrout yöntemi ile güçlendirilmiştir. Bu tür alanlarda TBM performans hesabı literatürde yer bulmamaktadır. Jetgrout ile güçlendirilen tünel bölgelerin de TBM performans yöntemleri çalışılmalı ve gerçekleşen değerler ile kıyaslamalı olarak değerlendirilmesinde uygulama açısından dünya literatüründeki eksikliklere katkı koymasından oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

- Altaş, N. T., “Bozüyük Kent Coğrafyası”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Erzurum, 2009.
- Altınlı, İ. E., “Orta Sakarya jeolojisi”, *Cumhuriyetin 50. yılı Yerbilimleri kongresi*, MTA Enst. Ankara, s. 159–191, 1973.
- Ayaroğlu, H., “Bozüyük metamorfitlerinin (Bilecik) petro kimyasal özellikleri”, *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni* 22, 101-107, 1979.
- Barton, N., “TBM performance estimation in rock using Q_{TBM} ”, *Tunnels & Tunnelling International* 31(9), s.30-34, 1999.
- Barton, N., “TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock”, *Balkema*, Rotterdam, 2000.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, L., “Analysis of rock mass quality and support practice in tunnelling and a guide to estimating support requirements”, *Internal Report No. 106*, *Norwegian Geotechnical Institute*, Oslo, 1974a.
- Barton, N., R., Lien, R. and Lunde, L., “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports”, *Rock Mecnanics* 6 (4), 189-239, 1974b.
- Barton, N., “Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39 (2), 185-216, 2002.
- Barton, N. and Grimstad, E., “The Q-system following twenty years of application in NATM support selection”, *Felsbau* 12 (6), 428-36, 1994.
- Bieniawski, Z. T., “Engineering classification of jointed rock masses”, *Trans. S. African Instn. Civ. Engrs.* 15(12), 335 –344, 1973..

Bieniawski, Z. T., “Engineering rock mass classifications”, *John Wiley and Sons*, USA., 1989.

Bieniawski, Z.T., Celada, B. and Galera, J.M., “Predicting TBM excavability – part I”, *Tunnels Tunnell. Int.*, 32–35, 2007.

Bilgin, N., “İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği”, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 1989.

Bingöl, E., “1/250.000 ölçekli Türkiye metamorfizma haritası ve bazı metamorfik kuşakların jeotektonik evrimi üzerinde tartışmalar”, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi* 83, 178-185. 1975.

Brinkmann, R., “Kuzeybatı Anadolu'daki genç Paleozoik ve eski Mesozoik”, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi* 76, 115-120, 1971.

Caner, E., “Sıkışan zeminlerde tam cepheli tünel açma makinelerinin performans analizi ve uluabat kuvvet tüneli örneği”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2010.

Cassinelli, F., Cina, S., Innaurato, N., Mancini, R. and Sampaolo, A., “Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnelboring operation in hard rock”, *Tunnelling* 82, *London. Inst. Min. Metall.*, 73–81, 1982.

Çınar, M. ve Feridunoğlu, C., Tünel açma makineleri (TBM) http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/41dd99a69df0404_ek.pdf, 20 Nisan 2012.

Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D. and Cording E. J. “Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock”, *8th U.S. symp. rock mech.*, 237-302, 1967.

Deere, D. U., Peck, R. B., Monsees, J. E. and Schmidt, B., “Design of tunnel liners and support system”. *Office of high speed ground transportation, U.S. Department of transportation*, 1969.

Deere, D. U., “Technical description of rock cores for engineering purposes” **Rock Mechanics and Rock Engineering** 1,17-22, 1964.

Doğruoğlu, T., “TBM metodu ile açılan ikiz tünellerde meydana gelebilecek deformasyonların sonlu elemanlar metodu ve numerik hesaplarla tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, **YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2009.

Einstein, H. H. and Bobet A., “Mechanized tunneling in squeezing rock - From basic thoughts to continuous tunneling in Golser”, **Tunnels for People; Proceedings of 23rd assembly of the ITA**, 619-632., Balkema, 1997.

Erentöz, C., “1/500.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritası”, **Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları**, Ankara, 1975.

Erguvanlı, K., “Mühendislik Jeolojisi Ders Konuları ve Uygulamaları”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları**, İstanbul, 1984.

Franklin, J. A., “Safety and economy of tunneling”, **Proc. Tenth Canadian Rock Mech. Symp., Kingston**, 27-53, 1975.

Gong, Q. M., and Zhao, J., “Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction”, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science** 46 (1), 8–18, 2009.

Gözler, M. Z., Cevher, F., Ergül, E. ve Asutay, H.J., “Orta Sakarya ve güneyinin jeolojisi”, **Maden Tetkik Arama Enstitüsü** 9973, 88, 1997.

Gözler, M. Z., Cevher, F., ve Küçükayman, A., “Eskişehir civarının jeolojisi ve sıcak su kaynakları”, **MTA Dergisi** 103/104, 40-54, 1985.

Grimstad, E. and Barton, N., “Updating the Q-System for NMT”, **Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support**, Oslo, 1993.

Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B. and Rostami, J., “Performance prediction of hard rock TBM using rock mass rating (RMR) system”, *Tunnelling and Underground Space Technology* 25, 333–345. 2010.

Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A. and Tavakoli, H.R., “TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel”, *Rock Mech. Rock Eng.* 43, 427-445, 2009.

Herrenknecht AG., Epbshield TBM, <http://www.herrenknecht.com>, 17 Nisan 2012.

Hoek E., “Strength of rock masses”, *News Journal of ISRM* 2, 4-16, 1994.

Hoek, E., “Putting numbers to geology-an engineer’s viewport” *Quarterly Journal of Engineering Geology* 32, 1-19, 1999.

Hoek, E. and Brown, E.T., “Empirical strength criterion for rock masses”. *ASCE Journal Of The Geotechnical Engineering Division* 106 (GT9), 1013-1035, 1980.

Hoek, E. and Brown, E.T., “The Hoek-Brown failure criterion”, *Proceedings 15th Canadian Rock Mechanics Symposium: Rock Engineering For Underground Excavations. University of Toronto*, 31-38, 1988.

Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., “Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation”, *Bullettin of Engineering Geology and Environment* 57, 151-160, 2002.

<http://www.deprem.gov.tr>, 20 Nisan 2012.

<http://www.dmi.gov.tr>, 20 Nisan 2012.

<http://www.p3planningengineer.com/productivity/tunneling/tunneling.htm>, 20 Nisan 2012.

Innaurato, N., Mancini, R., Rondena, E. and Zaninetti, A., “Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy” ***Proceedings of the Seventh International Congress ISRM***, 1009–1014, 1991.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on classification of rocks and rock masses. ***Int. J. Rock Mech. Min. Abstr.*** 18, 85–110, 1981..

Koçman A, “Türkiye İklimi”, ***Ege Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları*** 72, İzmir. 1993.

Koçyiğit, A., Kaymakçı, N., Rojay, B., Özcan, E., Dirik, K. ve Özçelik, Y., İnegöl-“Bilecik-Bozüyük arasında kalan alanın jeoloji etüdü”, ***TPAO Raporu*** 3049, 1991.

Kolymbos, D., “Tunelling and Tunnel Mechanics”, ***Sipringer-Verlag***, Berlin, 2005.

Kovari, K., “History of Sprayed Concrete Lining Method-part I: Milestones Up To 1960s”, ***Tunnelling and Underground Technology*** 18 ,57-69, 2003.

Köse, H., Gürgen, S., Onargan T., Yenice, H. ve Aksoy, O. C., “Tünel Ve Kuyu Açma”, ***Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayını*** 145, İzmir 2007.

Küçükayman, A., Genç, Ş., Gök, L., Kar, H. ve Ateş, M., “Bozüyük-Tavşanlı-Kütahya arasının jeolojisi”, ***Maden Tetkik Arama Enstitüsü*** 83, 56, 99, 1987.

Lauffer, H., “Gebirgsklassifizierung für den stollenbau”, ***Geologie und Bauwesen*** 24, 46-51, 1958.

Lunardi, P., “Design and Contruction of Tunnels: Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)” ***Sipringer-Verlog***, Berlin, 2008.

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. and Herrenknecht, M., “Hardrock Tunnel Boring Machines”, ***Gmbh & Co.KG***, Berlin, 2008.

Movinkel T., and Johannessen O., “Geologic parameters for hard rock tunnel boring”, *Tunnels & Tunnelling* April 1986, 45-48. 1986.

Nelson, P. P., “TBM performance analysis with reference to rock properties. In Hudson et al. (eds)”, *Comprehensive rock engineering* 10(4), 261-291, 1993.

Okay, A. and Tüysüz, O., “Tethyan sutures of northern Turkey. In The Mediterranean Basins: Tertiary extension within the Alpine orogen (In B. Durand, L. Jolivet, F. Horváth and M. Séranne eds)”, *Geological Society of London* 156, 475–515, 1999.

Özkan, S., “Bozüyük Ovasının Hidrojeolojik İncelemesi ve Yeraltısuyu Bilanço Hesabı”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2006.

Pakes, G., “Selection of Methods”, *World Tunnelling* 4, 9. 1991.

Palmström, A.,. “RMI - a rock mass characterization system for rock engineering purposes” Ph.D. thesis *Univ. of Oslo*, 400, 1995.

Palmström, A., “On classification systems, Proceedings of Workshop on Reliability of Classification Systems a Part of the International Conference”, *GeoEng-2000*, Melbourne, 2000.

Patching, T. H. and Coates, D. F., “A recommended rock classification for rock mechanic purposes”, *CIM Bulletin*, 1195-1197, 1968.

Poşluk, E., Ertin, A., Korkanç, M., Pilatin, R.Y. ve Arıca, E., “Ankara-İstanbul hızlı tren projesi 2. etap 26 nolu tünelin TBM kazı performansının Q_{TBM} metodu ile tahmini” *KAYAMEK’ 2011- X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Ankara*, 20-30, 2011a.

Poşluk, E., Oğul, K., Topal, İ., Korkanç, M. ve Aygar, E.B., “Tünellerde zayıf kaya davranışı, Ankara – İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 34 nolu tünel örneği”, *KAYAMEK’ 2011- X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Ankara*, 31-37. 2011b.

Rabcewicz, L., “The New Austrian Tunneling Method”, **Water Power** 19-24, 453-457. 1964.

Ribacchi, R. and Lembo-Fazio, A., “Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo Tunnel)”. **Rock Mech. Rock Eng.** 38 (2), 105–127, 2005.

Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. and Cardone G., “TBM performance estimation using rock mass classifications”, **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences** 39, 771–788, 2002.

SİAL Yerbilimleri LTD. ŞTİ., “Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi 26’nolu Tünel Raporu” (*Yayınlanmamış*), 2010.

Singh, B., “Norwegian Method of Tunnelling”, **Workshop. Lecture at CSMRS**, New Delhi, India, 1993.

Şeker, Ö., “Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Prensiplerine Göre Tünel Kaplama Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2008.

Terzaghi, K., “Rock defects and loads on tunnel supports” **Rock tunneling with steel supports** 1, 17-99, 1946.

Tokay, F., ve Altunel, E., “Neotectonic activity of Eskişehir fault zone in vicinity of İnönü–Dodurga area”, **Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey** 130, 1–15, 2005.

Ulusay, R. ve Sönmez, H., “Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri”, **Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları**, Ankara, 2002.

Vardar, M., “Sürtünmeli Çelik Bağların Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde (NATM) kullanılabilme Olanakları”, **Kaya Mekaniği Bülteni** 3, 35-44, 1985.

Whittaker, B. N. and Frith, R. C, “Tünnelling, Design, Stability and Construction”, ***Institution of Mining and Metalurgy***, 1990.

Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. H.,” Support determination based on geologic predictions” ***In Proc. North American rapid excav. tunneling conf. Chicago***, 43-64, 1972.

Williamson, D. A., “Uniform rock classification for geotechnical engineering purposes”, ***Transportation Research Record 783, National Academy of Sciences, Washington D.C***, 9-14, 1980.

Yagız, S., “Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition”, ***Tunnelling and Underground Space Technology*** 23, 326–339, 2008.

Yagız, S. and Gokceoglu, C., “Application of fuzzy inference and non-linear regression methods for predicting rock brittleness”, ***Expert Systems with Applications*** 37, 2265–2272, 2010.

Yavaş, F., “Tünel Açma Makinesi Kullanılarak Kazılan Otogar – Kirazlı Tünelinde Karşılaşılan Jeoteknik Sorunlar”, Yüksek Lisans Tezi, ***İ. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 2008.

Yılmaz,Y., Tüysüz, O., Yiğitbas, E., Genç, S.C., ve Sengör, A.M.C., “Geology and tectonic evolution of the Pontides, in: Robinson, A.G. (ed) Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region”, ***American Association of Petroleum Geologists*** 68, 138-226, 1997.

Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., “Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi uygulama projesi”, ***(Yayınlanmamış)***, 2004.

Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., “Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi ripajları uygulama projesi”, ***(Yayınlanmamış)***, 2009.

Yüzer, E. ve Vardar, M., “Kaya Mekaniği”, ***İTÜ Vakfı Yayınları***, İstanbul, 1986.

EKLER

EK A- TÜNEL GÜZERGAHI BOYUNCA YAPILAN SONDAJ LOGLARI



SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ

SONDAJ NO : SK 216-840

SONDÖR : A. GUNGÖR

LOGU YAPAN : Süleyman B. Parlak

Su Kaybı (m)	Korot yüzdesi (%)	R Q D (%)	Kot (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrılma (W)						Dayanım (R)						Sırtaklık Aralığı	Lügün Testi	Numune Çısal	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)
							1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6					15	30	45	N	
			-33	-33																							
			-34	-34																							
			-35	-35																							
			-36	-36																							
			-37	-37																							
			-38	-38																							
			-39	-39																							
			-40	-40																							
			-41	-41																							
			-42	-42																							
			-43	-43																							
			-44	-44																							
			-45	-45																							
			-46	-46																							
			-47	-47																							
			-48	-48																							
			-49	-49																							
			-50	-50																							
			-51	-51																							
			-52	-52																							
			-53	-53																							
			-54	-54																							
			-55	-55																							

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

**SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ**

SONDAJ NO : SK 216+840

SONDÖR : A. GÜNGÖR

LOGU YAPAN : Süleyman B. Parlak

Su Kaybı (m)	Korot yüzdesi (%)	R Q D (%)	Kot (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrılma (W)	Dayanım (R)	Süreklilik Azalışı	Lugeon Testi	Numune Cinsi	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)
													15	30	45	N	
				-56													
				-57													
				-58													
				-59													
				-60													
				-61													
				-62													
				-63													
				-64													
				-65													
				-66													
				-67													
				-68													
				-69													
				-70		SONDAJ SONU											
				-71													
				-72													
				-73													
				-74													
				-75													
				-76													
				-77													

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

**SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ**

SONDAJ NO : SK 217+340

SONDÖR : S. TEKE

LOGU YAPAN : Süleyman B. Parlak

Su Kayıt (m)	Korot yüzdesi (%)	R Q D (%)	Kot (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrıştırma (W)						Dayanım (R)						Sürüşölizlilik Aralığı						Lugeon Testi	Numune Cinsal	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
							1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5				6	7	15	30		45	N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
				-144																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

**SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ**

SONDAJ NO : SK 218+660

SONDÖR : G. TEKE

LOGU YAPAN : Süleyman B. Paftak

Su Kaybı (m)	Karot yüzdesi (%)				R Q D (%)				Kaf (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrılma (W)					Dayanım (R)					Sıvılaşma Aralığı	Lugan Testi	Numune Cinsi	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)						
	20	40	60	80	25	50	75	1					2	3	4	5	1	2	3	4	5	6					7	15	30	45		N					
									-690	167	 135,00-190,00m; Gri-koyu gri yer yer siyah renkli, kalın kuvars damarlı, yer yer kalkopirit içeren GRAFİT ŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan ve kil dolguludur.																										
									-691	168																											
									-692	169																											
									-693	170																											
									-694	171																											
									-695	172																											
									-696	173																											
									-697	174																											
									-698	175																											
									-699	176																											
									-700	177																											
									-701	178																											
									-702	179																											
									-703	180																											
									-704	181																											
									-705	182																											
									-706	183																											
									-707	184																											
									-708	185																											
									-709	186																											
									-710	187																											
									-711	188																											

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.



SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ

SONDAJ NO : SK 219+760

SONDÖR : F. PEHLİVAN

LOGU YAPAN : Süleyman B. Parlak

Su Kaybı (m)	Karat yüzdesi (%)	R Q D (%)	Kot (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrışma (W)						Dayanım (R)						Süreklilik Aralığı						Lugeon Testi	Numune Cinsi	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
							1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5				6	7	15	30		45	N																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
			-581	33																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

**SİAL YERBİLİMLERİ ETÜT VE MÜŞAVİRLİK LTD.ŞTİ**

SONDAJ NO : SK 220+240

SONDÖR : A. GÜNGÖR

LOGU YAPAN : Süleyman B. Parlak

Su Kaybı (m)	Karet yüzdesi (%)	R Q D (%)	Kot (m)	Derinlik (m)	Jeolojik Profil	JEOTEKNİK TANIMLAMA	Ayrılma (W)						Dayanım (R)						Sürekli Aralık							Lümen Testi	Numune Cinsi	Manevra Boyu	SPT Darbe Sayısı				Su Seviyesi (m)
							1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6				7	15	30	45	
			-592	33		31,00-47,60m; Gri-koyu gri yer yer siyah renkli, kalın kuvars damarlı, GRAFIT ŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan ve kil dolgulu.																											
			-593	34																													
			-594	35		32,10-38,50m; J set: 20-30°, (S3-S4), P, Sm																											
			-595	36		32,10-44,00m; J set: 60°, (S4-S5), P-S, Q(5mm)-42,50m'den sonra K(5mm)																											
			-596	37																													
			-597	38																													
			-598	39		38,50-43,50m; J set: 40°, (S4), U, Sm																											
			-599	40																													
			-600	41																													
			-601	42																													
			-602	43		42,50-44,00m; J set: FeO boyamalı																											
			-603	44		44,00-44,30m; Yeşil Şist 44,00-44,30m; J set: 60°, (S2), P, Sm 44,30-44,70m; Kuvars, içersinde Grafitist seviyeleri																											
			-604	45		44,30-44,70m; J set: 40°, (S3), P, Ro. I 44,30-44,70m; J set: V, (S2), U, Ro. I 44,70- 47,60m; J set: 40-50°, (S4), P, Sm																											
			-605	46																													
			-606	47																													
			-607	48		47,60-48,80m; Açık yeşilimsi gri renkli, yer yer mikalı, KLORİT ŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan ve kil dolgulu. 48,40-48,90m; J: V, S, kapalı																											
			-608	49		48,80-50,60m; Gri-koyu gri yer yer siyah renkli, kalın kuvars damarlı, GRAFIT ŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan ve kil dolgulu.																											
			-609	50																													
			-610	51		50,60-51,10m; Açık yeşilimsi gri renkli, yer yer mikalı, KLORİT ŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan ve kil dolgulu. 51,10m; J: 50°, P, Sm (dokanak)																											
			-611	52		51,10-52,00m; Kahverenkli, MIKAŞİST. Şistozite yüzeyleri kaygan. 51,10-51,60m; J set: 65°, (S3), S, Ro 51,70m; J: 10°, S, Ro 51,90m; J: 50°, P, Sm 51,30-51,50m; J: V, U, Ro																											
			-612	53		SONDAJ SONU																											
			-613	54																													
			-615	55																													

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

NOT : SONDAJLAR JEMAS, TANIMLAMALAR SİAL TARAFINDAN YAPILMIŞTIR.

**EK B- TÜNEL GÜZERGAHI BOYUNCA YAPILAN SONDAJLARA AİT
DENEYSEL VERİLER**

Çizelge Ek B-1. Zemin mekaniği deneyleri özet tablosu (SİAL, 2010)

Sondaj No	Numune No	Derinlik		Su içeriği W _n (%)	Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı (USCS)
		Başlangıç (m)	Bitiş (m)		#4 kalan (%)	#200 geçen (%)	LL	PL	PI	
EKS-51	EKS-51 SPT-1	10,50	10,95	13	12	17	-	NP		SM
EKS-51	EKS-51 SPT-2	12,00	12,07	12	2	22	-	NP		SM
EKS-51	EKS-51 SPT-3	15,00	15,45	6	65	8	-	NP		GW-GM
EKS-51	EKS-51 SPT-4	16,50	16,56	4	67	21	-	NP		GM
EKS-50	EKS-50 SPT-1	1-50	1,95	11	50	12	-	NP		GM
EKS-50	EKS-50 SPT-2	3,00	3,45	10	42	15	-	NP		GM-SM
EKS-50	EKS-50 SPT-3	4,50	4,95	21	30	29	33	21	12	SC
EKS-50	EKS-50 SPT-4	6,00	6,45	15	53	14	-	NP	-	GM
221-660	221-660 SPT-1	1,50	1,95	29	4	75	44	23	20	CL
221-660	221-660 UD-1	3,00	3,50	26	0	76	42	23	19	CL
221-660	221-660 SPT-2	3,50	3,95	26	1	56	44	23	21	CL
221-660	221-660 SPT-3	4,50	4,95	17	10	60	32	21	11	CL
221-660	221-660 SPT-4	6,00	6,45	5	57	15	23	21	2	GM
221-660	221-660 SPT-5	7,50	7,95	9	43	16	24	21	3	GM
221-660	221-660 SPT-6	9,00	9,45	12	47	15	25	21	4	GM
221-660	221-660 SPT-7	10,50	10,95	15	13	46	27	21	5	SC-SM
221-660	221-660 SPT-9	13,50	13,95	13	14	32	26	21	5	SC-SM
EKS-49	EKS-49 SPT-2	3,00	3,45	13	26	12	-	NP	-	SM
EKS-49	EKS-49 SPT-3	4,50	4,95	5	56	5	-	NP	-	GW-GM
EKS-49	EKS-49 SPT-5	7,50	7,95	15	26	16	-	NP	-	SM
EKS-49	EKS-49 SPT-7	10,50	10,95	11	46	13	-	NP	-	GM
EKS-49	EKS-49 SPT-5	12,00	12,24	16	16	33	-	NP	-	SM

Çizelge Ek-B-2. Kaya mekaniği deneyleri özet tablosu (SİAL, 2010).

Sondaj No	Numune No	Litoloji	Derinlik		Su içeriği W _n (%)	Doğal birim hacim ağırlık γ _n (kN/m ³)	Su emme % e	Boşluk oranı e (%)	Porozite n (%)	Yoğunluk γ (kN/m ³)	Tek ek. basınç direnci σ (MPa)	Elastisite modülü E (GPa)	Poisson oranı ν	Üç ek. basınç direnci C (kPa)	Nokta yük direnci I ₅₀ (MPa)
			Başlangıç (m)	Bitiş(m)											
SK-216+840	216+840 K-1	Grafit Şist	31,35	31,48	-	24,09	-	-	-	-	19,07	2,26	0,25	-	-
SK-216+840	216+840 K-3	Grafit Şist	45,02	45,19	-	27,35	-	-	-	-	26,06	3,12	0,22	-	-
SK-216+840	216+840 K-4	Grafit Şist	54,35	54,46	-	26,00	-	-	-	-	24,47	2,89	0,25	-	-
SK-216+840	216+840 K-5	Grafit Şist	56,77	56,38	-	27,46	-	-	-	-	28,81	3,56	0,24	-	-
SK-216+840	216+840 K-6	Grafit Şist	58,22	58,33	-	24,96	-	-	-	-	21,66	2,64	0,26	-	-
SK-216+840	216+840 K-7	Grafit Şist	61	61,10	-	25,58	-	-	-	-	26,25	2,88	0,24	-	-
SK-216+840	216+840 K-8	Grafit Şist	64,81	64,93	-	24,27	-	-	-	-	20,61	2,66	0,28	-	-
SK-216+840	216+840 K-9	Grafit Şist	65,23	65,34	-	25,21	-	-	-	-	29,40	3,56	0,22	-	-
SK-216+840	216+840 K-10	Grafit Şist	68,19	68,37	-	24,55	-	-	-	-	20,18	2,28	0,27	-	-
SK-217+340	217+340 K-1	Grafit Şist	115,25	115,35	-	25,73	-	-	-	-	24,09	2,69	0,24	-	-
SK-217+340	217+340 K-2	Grafit Şist	136,3	136,48	-	27,10	-	-	-	-	28,57	3,50	0,24	-	-
SK-217+340	217+340 K-3	Grafit Şist	138,82	139	-	26,51	-	-	-	-	25,56	3,12	0,25	-	-
SK-217+340	217+340 K-5	Grafit Şist	151,15	151,25	-	27,52	-	-	-	-	30,35	3,55	0,23	-	-
SK-217+340	217+340 K-6	Grafit Şist	152,58	152,7	-	25,55	-	-	-	-	24,56	2,93	0,25	-	-
SK-217+340	217+340 K-7	Grafit Şist	155,76	155,86	-	25,49	-	-	-	-	26,38	2,83	0,24	-	-
SK-217+340	217+340 K-8	Grafit Şist	158,2	158,32	-	24,64	-	-	-	-	21,83	2,52	0,26	-	-
SK-217+340	217+340 K-9	Grafit Şist	160,4	160,5	-	26,13	-	-	-	-	26,76	3,14	0,22	-	-
SK-217+660	217+660 K-4	Grafit Şist	165,77	165,97	-	28,04	-	-	-	-	16,36	2,78	0,24	-	-
SK-217+660	217+660 K-5	Grafit Şist	167,17	167,26	-	26,32	-	-	-	-	14,52	2,51	0,22	-	-
SK-217+660	217+660 K-6	Grafit Şist	168,51	168,65	-	26,22	-	-	-	-	30,02	3,33	0,23	-	-
SK-217+660	217+660 K-8	Grafit Şist	170,8	170,92	-	25,87	-	-	-	-	22,60	2,67	0,26	-	-

Çizelge Ek-B-2. Kaya mekaniği deneyleri özet tablosu (SİAL, 2010) (Devamı).

Sondaj No	Numune No	Litoloji	Derinlik		Su içeriği Wn (%)	Doğal birim hacim ağırlık γ_n (kN/m ³)	Su emme % e	Boşluk oranı (%)	Porozite n (%)	Yoğunluk γ (kN/m ³)	Tek ek. basınç direnci σ (MPa)	Elastisite modülü E (GPa)	Poisson oranı v	Üç ek. basınç direnci C (kPa)	Nokta yük direnci I ₅₀ (MPa)
			Başlangıç (m)	Bitiş(m)											
SK-217+660	217+660 K-9	Grafit Şist	174,08	174,2	-	27,15	-	-	-	-	25,58	2,75	0,24	-	-
SK-217+660	217+660 K-10	Grafit Şist	174,48	174,57	-	26,06	-	-	-	-	25,84	2,8	0,25	-	-
SK-217+660	217+660 K-11	Grafit Şist	174,73	174,83	-	25,73	-	-	-	-	25,74	2,88	0,22	-	-
SK-217+660	217+660 K-12	Grafit Şist	176,62	176,72	-	25,91	-	-	-	-	24,24	2,6	0,23	-	-
SK-217+660	217+660 K-13	Grafit Şist	182,64	182,8	-	27,44	-	-	-	-	28,17	3,49	0,2	-	-
SK-217+660	217+660 K-14	Grafit Şist	182,8	182,97	-	28,46	-	-	-	-	29,33	3,62	0,27	-	-
SK-217+660	217+660 K-15	Grafit Şist	186,08	186,34	-	27,10	-	-	-	-	26,92	4,04	0,26	-	-
SK-217+660	217+660 K-16	Grafit Şist	188,8	188,91	-	27,23	-	-	-	-	31,92	3,7	0,23	-	-
SK-217+660	217+660 K-17	Grafit Şist	190,18	190,27	-	26,85	-	-	-	-	28,79	3,03	0,26	-	-
SK-217+660	217+660 K-20	Grafit Şist	193	193,11	-	25,93	-	-	-	-	22,43	2,79	0,3	-	-
SK-217+660	217+660 K-21	Grafit Şist	193,32	193,43	-	26,61	-	-	-	-	26,01	2,77	0,27	-	-
SK-218+660	218+660 K-1	Grafit Şist	135	135,15	-	28,07	-	-	-	-	29,73	3,65	0,24	-	-
SK-218+660	218+660 K-2	Grafit Şist	141	141,2	-	26,59	-	-	-	-	25,47	3,71	0,27	-	-
SK-218+660	218+660 K-3	Grafit Şist	144	144,25	-	27,41	-	-	-	-	28,46	3,75	0,24	-	-
SK-218+660	218+660 K-4	Grafit Şist	151,2	151,34	-	27,94	-	-	-	-	31,19	3,81	0,24	-	-
SK-218+660	218+660 K-5	Grafit Şist	155	155,18	-	27,60	-	-	-	-	32,73	4,01	0,23	-	-
SK-218+660	218+660 K-6	Grafit Şist	166,5	166,68	-	27,75	-	-	-	-	33,84	3,78	0,19	-	-
SK-218+660	218+660 K-7	Grafit Şist	168,4	168,55	-	27,56	-	-	-	-	30,92	3,48	0,23	-	-
SK-218+660	218+660 K-8	Grafit Şist	172	172,18	-	27,07	-	-	-	-	29,69	3,77	0,22	-	-
SK-218+660	218+660 K-10	Grafit Şist	175,5	175,7	-	27,76	-	-	-	-	31,61	3,96	0,2	-	-

Çizelge Ek-B-2. Kaya mekaniği deneyleri özet tablosu (SİAL, 2010) (Devamı).

Sondaj No	Numune No	Litoloji	Derinlik		Su içeriği W _n (%)	Doğal birim hacim ağırlık γ _n (kN/m ³)	Su emme %	Boşluk oranı e (%)	Porozite n (%)	Yoğunluk γ (kN/m ³)	Tek ek. basınç direnci σ (MPa)	Elastisite modülü E (GPa)	Poisson oranı ν	Üç ek. basınç direnci C (kPa)	Nokta yük direnci I ₅₀ (MPa)
			Başlangıç (m)	Bitiş (m)											
SK-218+660	218+660 K-11	Grafit Şist	178	178,15	-	27,39	-	-	-	-	35,39	4,76	0,19	-	-
SK-218+660	218+660 K-12	Grafit Şist	180,6	180,78	-	26,51	-	-	-	-	29,11	3,76	0,24	-	-
SK-218+660	218+660 K-13	Grafit Şist	186,2	186,42	-	27,48	-	-	-	-	31,09	4,09	0,25	-	-
EKS-51	1-2-3	Grafit Şist	27,3	51,1	0,3	28,20	0,75	-	-	-	-	-	-	12,1	36
EKS-51	6	Grafit Şist	51,95	52,15	0,1	26,60	0,52	-	-	-	42,9	81,1	0,3	-	-
SK-219+760	219+760 K-1	Grafit Şist	12,33	12,53	-	27,95	-	-	-	-	32,5	3,44	0,23	-	-
SK-219+760	219+760 K-2	Grafit Şist	17,38	17,5	-	23,00	-	-	-	-	20,77	2,86	0,27	-	-
SK-219+760	219+760 K-3	Grafit Şist	25,77	25,91	-	21,8	-	-	-	-	12,82	1,5	0,28	-	-
SK-219+760	219+760 K-4	Grafit Şist	27,1	27,26	-	27,53	-	-	-	-	24,37	3,05	0,25	-	-
SK-219+760	219+760 K-5	Grafit Şist	31,1	31,23	-	27,94	-	-	-	-	31,71	4,2	0,21	-	-
SK-219+760	219+760 K-6	Grafit Şist	33,2	33,32	-	26,71	-	-	-	-	21,4	2,51	0,28	-	-
SK-219+760	219+760 K-7	Grafit Şist	35,84	35,97	-	28,12	-	-	-	-	36,34	4,54	0,18	-	-
SK-219+760	219+760 K-9	Grafit Şist	42,88	42,99	-	25,70	-	-	-	-	20,11	2,29	0,25	-	-
SK-219+760	219+760 K-10	Grafit Şist	44,2	44,35	-	26,48	-	-	-	-	22,43	2,78	0,24	-	-
SK-219+760	219+760 K-11	Grafit Şist	47,83	48	-	27,98	-	-	-	-	31,21	3,66	0,2	-	-
SK-220+240	220+240 K-1	Grafit Şist	21	21,1	-	25,99	-	-	-	-	26,72	2,79	0,24	-	-
SK-220+240	220+240 K-2	Grafit Şist	27	27,22	-	25,03	-	-	-	-	24,5	3,43	0,26	-	-
SK-220+240	220+240 K-3	Grafit Şist	31,3	31,4	-	25,22	-	-	-	-	25,28	2,8	0,27	-	-
SK-220+240	220+240 K-4	Grafit Şist	32,1	32,25	-	27,02	-	-	-	-	34,98	4,04	0,23	-	-
SK-220+240	220+240 K-6	Grafit Şist	36	36,1	-	27,32	-	-	-	-	33,22	3,58	0,25	-	-
SK-220+240	220+240 K-7	Grafit Şist	38	38,22	-	27,10	-	-	-	-	32,81	4,03	0,25	-	-

Çizelge Ek-B-2. Kaya mekaniği deneyleri özet tablosu (SİAL, 2010) (Devamı).

Sondaj No	Numune No	Litoloji	Derinlik		Su içeriği W _n (%)	Doğal birim hacim ağırlık γ _n (kN/m ³)	Su emme %	Boşluk oranı e (%)	Porozite n (%)	Yoğunluk γ (kN/m ³)	Tek ek. basınç direnci σ (MPa)	Elastisite modülü E (GPa)	Poisson oranı ν	Üç ek. basınç direnci C (kPa)	Nokta yük direnci I ₅₀ (MPa)
			Başlangıç (m)	Bitiş(m)											
SK-220+240	220+240 K-8	Grafit Şist	40,1	40,28	-	27,05	-	-	-	-	31,2	3,66	0,24	-	-
SK-220+240	220+240 K-9	Grafit Şist	42,3	42,55	-	24,36	-	-	-	-	24,4	3,02	0,27	-	-
SK-220+240	220+240 K-10	Grafit Şist	45,1	45,44	-	26,60	-	-	-	-	30,25	3,96	0,25	-	-
SK-220+240	220+240 K-11	Grafit Şist	48	48,15	-	26,60	-	-	-	-	25,35	3,03	0,27	-	-
SK-220+240	220+240 K-12	Grafit Şist	49,6	49,83	-	25,38	-	-	-	-	28,95	4,4	0,25	-	-
EKS-50	58	Klorit Şist	26,6	26,9	2,75	23,60	-	-	-	-	12,8	28,4	0,3	-	-
EKS-50	62	Klorit Şist	35,8	36,2	3,52	25,10	-	-	-	-	3,57	-	-	-	-
EKS-50	60	Klorit Şist	39	39,4	-	25,30	-	5,4	5,12	2,62	-	-	-	-	2,1
EKS-50	57	Klorit Şist	43,65	44,05	1,91	25,30	-	-	-	-	7,4	1,7	0,3	-	-
EKS-50	51-52	Klorit Şist	44,8	45,5	1,57	26,90	-	-	-	-	-	-	-	4,33	27
EKS-49A	1	Klorit Şist	6,75	6,91	10,71	22,40	-	-	-	-	0,4	-	-	-	-
EKS-49A	2	Klorit Şist	12,5	12,7	-	27,40	-	7,42	6,91	2,52	-	-	-	4,33	-
EKS-49A	3	Klorit Şist	15,32	15,5	-	25,20	-	3,47	3,35	2,6	-	-	-	4	-
EKS-49A	4	Klorit Şist	19,77	19,9	0,59	24,40	1,95	-	-	-	38,58	-	-	-	-
EKS-49A	05.06.2007	Klorit Şist	23,37	30,17	1,36	25,90	-	-	-	-	-	-	0,35	-	-
EKS-49A	8	Klorit Şist	34,25	34,45	-	26,00	-	-	-	-	57,8	67,4	0,25	-	-
EKS-49A	9	Klorit Şist	37	37,23	-	27,30	-	1,55	1,53	2,76	-	-	-	10	-
SK-221+660	221+660 K-1	Klorit Şist	16	16,25	-	26,90	-	-	-	-	41,2	11,06	0,17	-	-
SK-221+660	221+660 K-2	Klorit Şist	22	22,25	-	27,20	-	-	-	-	40	9,11	0,18	-	-
EKS-49	01.02.2003	Klorit Şist	17,35	21	0,35	27,10	-	3,16	3,07	2,72	-	-	0,16	-	-
EKS-49	4	Klorit Şist	23,4	23,6	0,22	28,10	-	2,65	2,58	2,82	4,98	-	-	-	-

EK C- TÜNEL GÜZERGAHININ PLAN VE PROFİLİ

ÖZ GEÇMİŞ

Evren Poşluk 17.05.1981 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk öğrenimini Adıyaman’ın Kahta ilçesinde orta ve lise öğretimini ise Kocaeli’de tamamladı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2008-2011 yılları arasında Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesinde tünel jeoteknik mühendisi olarak çalıştı. 2011 yılında TCDD bünyesine katılarak tünel kontrol mühendisi olarak görev yapmaya başladı. 2010 Öğretim yılında Niğde Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Kaya mekaniği ve tüneller konusunda çalışmalarını sürdürmektedir.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet bölgesel tam metin bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Poşluk, E., Ertin, A., Korkanç, M., Pilatin, R.Y. ve Arıca, E., “Ankara-İstanbul hızlı tren projesi 2. etap 26 nolu tünelin TBM kazı performansının Q_{TBM} metodu ile tahmini” ***KAYAMEK’ 2011- X. Bölgesel Kaya Mekanikçi Sempozyumu Ankara***, 20-30, 2011a.