

Reşat ULUSAY*, Ömer AYDAN**

* Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

** Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü, Shimizu, Japonya

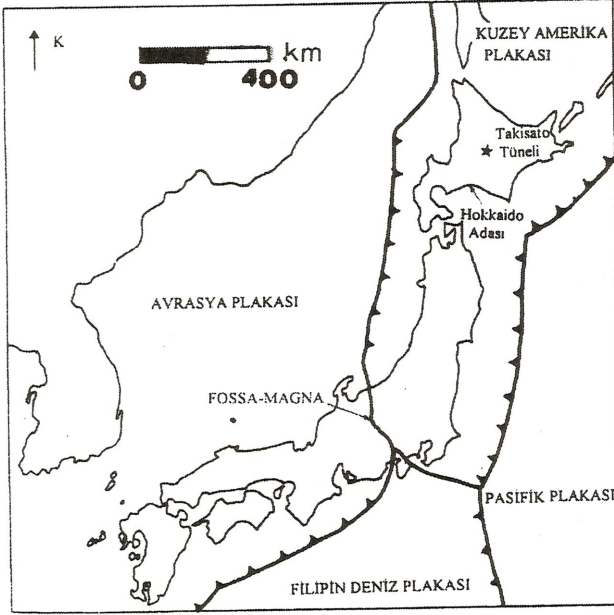
Tünel açma makinalarıyla yapılan kazı işlemlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi: Takisato Tüneli (Japonya) örneği

Kazı işlemlerinin hızlandırılması amacıyla TBM (Tunnel Boring Machine/Tünel Açma Makinası) kullanılarak gerçekleştirilen tünel kazıları son yıllarda yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yaygınlaşma, büyük ölçüde TBM ile her türlü kayada kazı yapılabilmesine olanak sağlayan kazı teknolojisindeki gelişmelere bağlanabilir. TBM'in kullanılmasıyla İngiltere ve Fransa arasındaki Channel tüneline aylık ilerleme hızı rekoru kırılmıştır. Bu başarılar ve ekonomik avantajlar, Japonya'da İkinci Tomei hızlı otoyolunun inşası sırasında kazılması gereken toplam 120 kilometrelik tünel ile İsviçre'de Gothard ve Lötschberg tünellerinin kazılması sırasında TBM'in kullanılmasını gündeme getirmiştir. Bu alanda, özellikle Japonya'da, TBM ile tünel kazısına ve tünel destek tasarımına yönelik araştırmalarda büyük bir artış görülmektedir. Bu yazıda Japonya'nın Hokkaido Adası'nda halen inşası sürmekte olan Takisato Tüneli'nde TBM ile yapılan kazı sırasında edinilen deneyim ve araştırmalar esas alınarak TBM kullanımının olumlu ve olumsuz yönleri sunulmuş ve tartışılmıştır. Bunun yanı sıra, Türkiye'de pek tanınmayan Japon Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi'ne de değinilerek, bu sistem ana hatları ile tanıtılmıştır.

Giriş

Son yıllarda tünel kazılarının TBM (Tunnel Boring Machine/Tünel Açma Makinası) kullanılarak gerçekleştirilmesi yaygınlaşmaya başlamış ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak hemen hemen her türlü kayada TBM'le tünel kazısı yapılması mümkün hale gelmiştir. Son zamanlarda tamamlanan ve İngiltere ile Fransa'yı denizaltından bağlayan Channel Tüneli'nin

Fransa'ya ait kısmında Mitsubishi TBM makinasıyla Dünya aylık ilerleme hızı rekoru kırılmış ve bu tünel beklenenden daha kısa bir sürede tamamlanmıştır. Ayrıca İsviçre'de 57 km uzunluğundaki Gothard Tüneli ile 42 km uzunluğundaki Lötschberg Tüneli'nin de kazı işlemlerinin TBM ile yapılması planlanmaktadır. Diğer yandan, Japonya'da Tokyo ve Kobe arasında İkinci Tomei hızlı otoyolu planlanmaktadır. Her biri 3 şeritli gidiş-geliş şeklinde planlanan bu hızlı yolun yaklaşık 240 kilometrelik kısmı tünelle geçilecek olup, tünel güzergahları boyunca jeolojik açıdan çok farklı birimlerle karşılaşılacaktır. Bunun yanı sıra, Avrasya ve Kuzey Amerika plakalarının dokanağı olarak bilinen Fossa-Magna kırık ve fay zonunun (Şekil 1) içinde de 15 m genişliğinde ve 12 m yüksekliğinde tüneller açılacaktır. Bu amaçla ilk olarak bu zonun içinde Üçüncü Shimizu adı verilen bir tünelin kazısına başlanmıştır. Bu tünelin kazısıyla ilgili olarak öncelikle hem güzergah boyunca jeolojik koşulların incelenmesi, hem de tünelin öncül destek sisteminin belirlenmesi amacıyla, ana tünelin planlanan kesitinden daha küçük bir kesite sahip bir deneme tüneli TBM ile açılmaktadır (Şekil 2). TBM kullanılarak yapılacak bu ilk kazıdan sonra tünelin kesiti, diğer kazı yöntemleri kullanılarak genişletilecektir. Bu büyük proje ile ilgili olarak Japonya genelinde değişik inşaat firmaları ile araştırma kurumlarında büyük kesitli tünellerin TBM kullanılarak açılması ve destek sistemlerinin yerleştirilmesi konularında çok yoğun araştırmalar başlatılmıştır. Bu yazıya konu olan Takisato Tüneli'nde, Japonya'da çapı en büyük olan bir tünel açma makinası ile ilerleme yapılmaktadır. Söz konusu tünel ve kazıda kullanılan TBM, Japonya ve Türkiye arasında Japon Milli Eğitim Bakanlığı'nın desteğinde başlatılan ve yazarlardan Ömer Aydan'ın yürütücülüğünde sürdürülen yeraltı açıklıklarının uzun süreli duraylılığı konusundaki bir araştırma projesi kapsamında yazarlar tarafından incelenmiştir. Yazıda, öncelikle tünel, kazı ortamı ve tünelin öncül destek tasarımında kullanılan Japon Kaya Kütleli Sınıflama Sistemi ile kaya kalitesi hakkında özetle bilgi verilmiş, daha sonra da yapılan gözlem ve incele-



Şekil 1. Takisato Tüneli'nin lokasyonu ve Japonya ve yakın civarındaki plakaların konumları

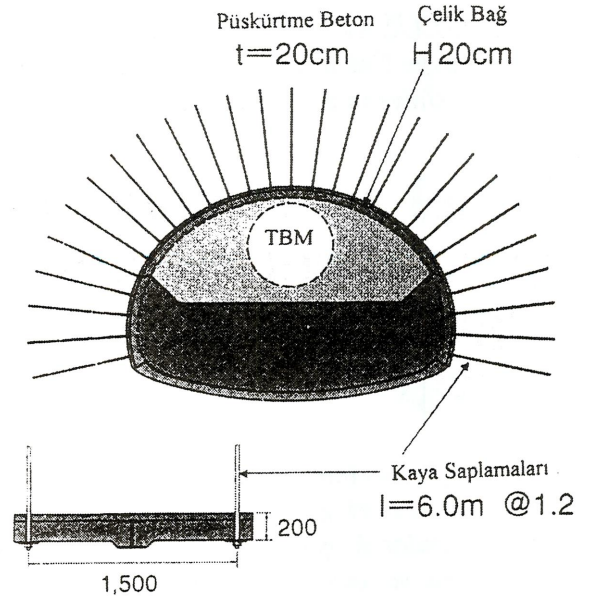
meler, kazı sırasında elde edilen deneyimler ve mevcut veriler esas alınarak TBM kullanımı açısından tünel kazısının olumlu ve olumsuz yönleri tartışılmıştır.

Tünelin özellikleri ve güzergahın jeolojisi

Takisato Tüneli, Japonya'nın ikinci büyük adası olan Hokkaido adasının orta kesiminde, Furano ve Ashibetsu kentlerinin arasında yeralan bir lokasyonda inşa edilmektedir (Şekil 1). Hokkaido Elektrik Şirketi tarafından inşa edilen 2800 m uzunluğundaki tünel, Takisato hidroelektrik barajının su iletim tüneli olarak kullanılacaktır (Şekil 3 ve 4). Bu proje kapsamında yılda 161248 MWh elektrik üretimi yapılması hedeflenmiştir. Tünelin su alma ağzından itibaren 2650 m'lik kısmının TBM kullanılarak, geriye kalan 150 m'lik bölümünün ise Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'ne (NATM) göre açılması planlanmıştır. Yaklaşık 2100 metrelik bölümü tamamlanmış olan tünele ilişkin başlıca teknik bilgiler aşağıda verilmiştir.

Çap (kazı sırasında)	8.3 m
Çap (kaplamadan sonra)	6.9 m
Kesit alanı	54.1 m ²
Hafriyat	143 000 m ³
Kullanılan beton	41 000 m ³
Kullanılan çelik	1.176 t

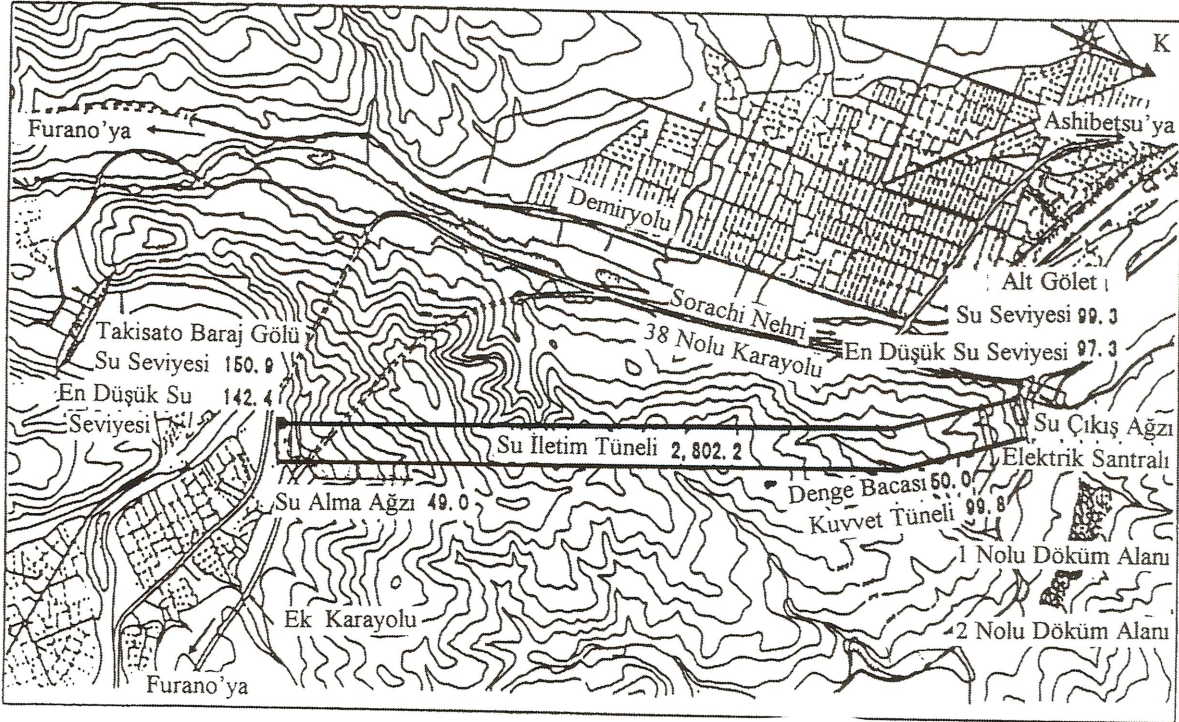
Örtü kalınlığının en fazla 250 m'ye ulaştığı tünel güzergahı boyunca Kretase yaşlı Ezo Formasyonu bulunmakta ve bu formasyonda şeyller egemen litolojik birimi oluşturmaktadır.



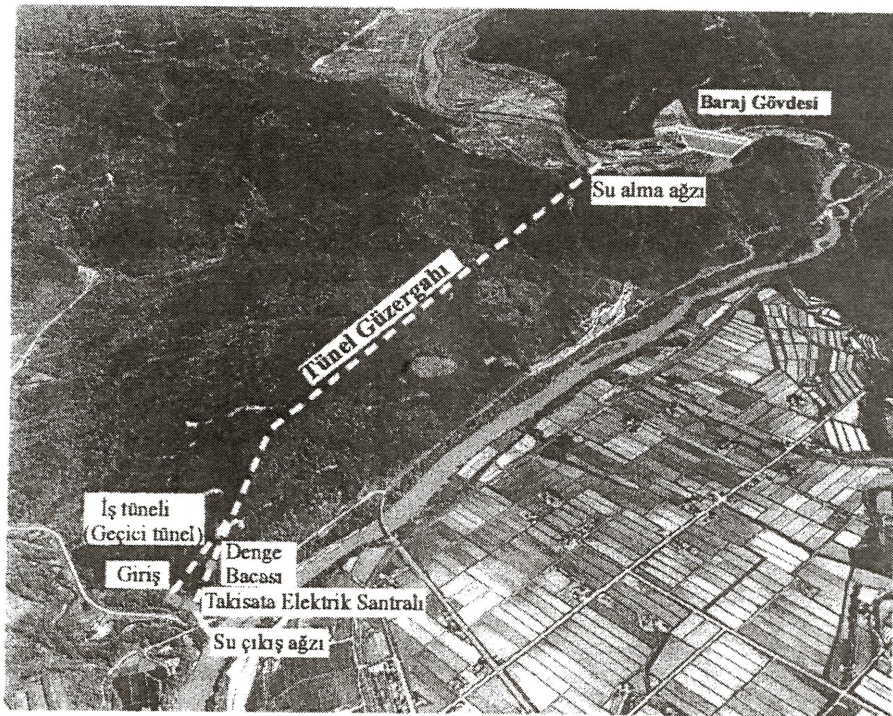
Şekil 2. Üçüncü Snimizu Tüneli'nde (Japonya) TBM uygulaması ve tünelin en kesiti.

Bu şeyllerin yanısıra, su alma ağzı tarafında aynı yaştaki şeyl ardalanmalı kumtaşları da tünel güzergahını kesmektedir (Şekil 5). Tünelin santral ve denge bacası bölümünde ise Neojen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı ardalanması ile çamurtaşından oluşan Ochun Formasyonu yer almaktadır. Bununla birlikte, Şekil 5'de verilen tünel güzergahı kesitinden görüleceği gibi, bu kesimde sadece çamurtaşları tünel kotunda ortaya çıkmaktadır (Taisei Co., 1997). Kretase ve Neojen yaşlı birimlerin dokanağında başlangıçta bir faydan kuşulanılmasına karşın (Şekil 5), tünel kazısı sırasında çevre kayacının beklenenden çok daha az zedelenmiş olması nedeniyle bu fayın varlığına kesin olarak işaret edebilecek bulgulara rastlanılmamıştır. Bununla birlikte, yapılan jeofizik ölçümlerle Şekil 5'teki kesitte gösterilen lokasyonlarda küçük atımlı fay ve/veya makaslama zonu türünde zayıflık zonları saptanmıştır. Ayrıca bu sedimanter istif içinde yer yer dasitik volkanik sokulumların varlığı da gözlenmiştir. Tünel güzergahı boyunca tabakalanma düzlemleri genelde güneydoğuya doğru 30°-35° eğimli olup, tabaka doğrultuları hemen hemen tünel eksenine dik yöndedir. Tabakalar Pasifik Plakası'nın etkisi nedeniyle kıvrımlanmıştır.

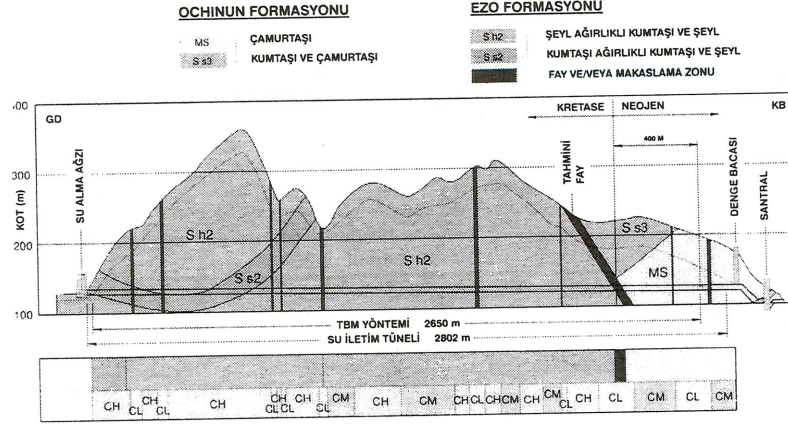
Güzergah boyunca yeralan kaya birimlerin tek eksenli sıkışma dayanımlarının değişim aralıkları (Çizelge 1) esas alındığında, santrale yakın kesimdeki çamurtaşları ile kumtaşlarının dayanımlarının oldukça düşük olması dikkat çekicidir. Buna karşın tünelin önemli bir bölümü, Deere ve Miller (1966)'ın önerdiği kaya malzemesi (intact rock) sınıflamasına göre dayanımlı kayalar içinde açılmaktadır.



Şekil 3. Takisato su iletim tüneline ve ana elemanlarının konumunu gösteren plan.



Şekil 4. Takisato Tüneli güzergahının üstten görünümü.



Şekil 5. Takisato Tüneli güzergahının jeoloji kesiti ve Denken Kaya Sınıflamasına göre güzergah boyunca kaya kütlesi sınıflarının dağılımı (Taisei Co, 1997a).

Kaya sınıflaması ve kaya kütlesinin özellikleri

Japonya’da yeraltı yapılarının inşası ile ilgili olarak bugüne değin değişik kaya sınıflamaları önerilmiştir (Ichikawa vd., 1990). Bunların arasında yaygın olarak kullanılan sınıflamalar ve kullanım alanları ve/veya kullanıcı kuruluşlar aşağıda belirtilmiştir:

1. Denken Kaya Sınıflaması (Tanaka, 1996; elektrik firmaları),
2. Dorokodan Kaya Sınıflaması (JRA, 1966; karayolları),
3. Kyu-Kokutestu Kaya Sınıflaması (Ikeda, 1969; demiryolları),
4. Kensetsusho Kaya Sınıflaması (RMC-JSCE, 1987; Bayındırlık Bakanlığı).

Çizelge 1. Tünel güzergahında yeralan kaya birimlerin tek eksenli sıkışma dayanımları (Taisei Co., 1997b).

Yaş	Litolojik birim	Tek eksenli sıkışma dayanımı değişim aralığı (MPa)
Kretase	Şeyl	35-73
	Kumtaşı	45-100
	Dasit	100-115
Neojen	Çamurtaşı	1-20
	Kumtaşı	10-20

Takisato Tüneli’nin tasarımında Denken Kaya Sınıflamasının esas alınması ve ayrıca bu sınıflamanın ülkemizde pek fazla bilinmiyor olması dikkate alınarak, bu sınıflama sistemi genel hatlarıyla aşağıda tanıtılmıştır.

Denken Kaya Sınıflaması, elektrik firmalarının Merkez Araştırma Enstitüsü tarafından önce baraj temellerinin sınıflandırılması için geliştirilmiş, daha sonra yeraltı santralleri için oluşturulan yeraltı açıklıkları ile bunlara ilişkin tünellere de uygulanmaya başlanmıştır (Tanaka, 1966). Bütün elektrik firmalarının yaptığı inşaatlarda bu sınıflama sistemi kullanılmaktadır. Denken Sınıflama Sistemi’nde kayayı oluşturan ana minerallerin bozunma derecesi, süreksizliklerin durumu ve jeolog çekicinin kayaya vurulduğunda kayada gözlenen özelliklere ilişkin tanımlamalar esas alınmaktadır (Çizelge 2). Bu sınıflamanın çok görsel olması nedeniyle son yıllarda kayadan geçen elastik dalganın hızı, RQD, eklem sıklığı ve sağlam kayacın tek eksenli sıkışma dayanımı gibi parametreler de sınıflamaya dahil edilmiştir. Söz konusu parametreler değişik araştırmacılar tarafından ilişkilendirilerek sınıflama sistemi Kikuchi ve Saito (1975) tarafından modifiye edilmiştir (Çizelge 3). Dolayısıyla kayaç, öncelikle Çizelge 2’de verilen görsel ölçütlerle göre tanımlanmakta, daha sonra da kaya kütlesi parametreleri (Çizelge 3) dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Denken Sınıflaması’ndaki kaya kütlesi sınıflarının RMR (Bieniawski, 1989) ve Q (Barton vd., 1974) kaya kütlesi sınıflamalarıyla karşılaştırılması ise Çizelge 4’de verilmiştir (Tanimoto vd., 1989; Aydan, 1985). Bu sınıflama Sistemi, Japonya’da geliştirilen sınıflama sistemlerinin de temelini oluşturmuştur.

Çizelge 2. Denken Kaya Sınıflaması'nda kaya sınıfları ve gözlemsel tanımlama ölçütleri (Tanaka, 1966).

Kaya sınıfı	Gözlemsel tanımlama ölçütleri
A	Kayaç taze ve kayacı oluşturan ana minerallerde bozunma gözlenmiyor. Süreksizlik yüzeyleri kapalı ve yüzeyler boyunca hiçbir bozunma izi yok. Jeolog çekiciyle kayaca vurulduğunda kayaç cınlama sesi verir.
B	Kayacı oluşturan ana minerallerde kısmi olarak çok az bir bozunma gözleniyor. Süreksizlik yüzeyleri kapalı ve sıkı, yüzeyler boyunca hiçbir bozunma izi yok. Jeolog çekiciyle kayaca vurulduğunda, kayaç cınlama sesi verir.
CH	Kuvars dışında kayayı oluşturan ana minerallerde az bir bozunma gözlenmekle birlikte, kayaç oldukça sert ve sağlam. Süreksizlik yüzeyleri boyunca demir içeren minerallerden dolayı renk değişimi olup, süreksizlik yüzeylerinin kohezyonunda biraz azalma var. Jeolog çekiciyle kayaca çok kuvvetli olarak vurulduğunda kaya bloğunda süreksizlik yüzeylerine paralel ince çatlama ve dökülmeler oluşur ve kırılma yüzeyinde sıvama şeklinde bozunma kili gözlenir. Jeolog çekiciyle vurulduğunda, kayaç çok az da olsa tok bir ses verir.
CM	Kuvars dışında kayacı oluşturan ana minerallerde bozunma gözlenmekte ve kayacın dayanımında azalma ve zayıflama söz konusu. Süreksizlik yüzeylerinin kohezyonunda azalma olup, jeolog çekiciyle normal olarak vurulduğunda kaya bloğunda süreksizlik yüzeyine paralel çatlama ve dökülmeler oluşuyor ve kırılma yüzeyinde belirli kalınlıkta bozunma kili gözlenir. Jeolog çekiciyle vurulduğunda, kayaç az veya çok tok bir ses verir.
CL	Kuvars dışında kayacı oluşturan ana minerallerde bozunma ilerlemiş olup, kayacın dayanımında önemli derecede zayıflama gözleniyor. Süreksizlik yüzeylerinin kohezyonu oldukça azalmış olup, jeolog çekiciyle hafif bir darbe ile kayaca vurulduğunda kaya bloğu parçalanıp kırılır ve kırılma yüzeyinde bozunma kili gözlenir. Jeolog çekiciyle vurulduğunda, kayaç tok bir ses verir.
D	Kuvars dışında kayacı oluşturan ana minerallerde bozunma tamamen ilerlemiş olup, kayacın dayanımında oldukça zayıflama gözleniyor. Süreksizlik yüzeyleri kohezyonunu yitirmiş olup, jeolog çekiciyle kayaca hafif bir darbe ile vurulduğunda kaya bloğu tamamen parçalanıp dağılır. Jeolog çekiciyle vurulduğunda, kayaç çok tok bir sese çıkarır.

Çizelge 3. Denken Kaya Sınıflaması'nda tanımlanan kaya sınıflarının yaygın olarak kullanılan kaya parametreleri ile olan ilişkisi (Kikuchi and Saito, 1975).

Kaya Sınıfı	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	RQD (%)	P Dalga Hızı V_p (km/s)	Eklem Aralığı (cm)	Eklem Takım Sayısı	Eklem Yüzeylerinin Açıklığı	Schmidt Çekici Darbe Sayısı R
A	>180	100	> 5	> 300	Eklem yok	Çok sıkı	> 50
B	80-180	90-100	4-5	50-300	1	Sıkı	40-50
CH	40-80	50-90	2.8-4	30-50	2	Orta sıklıkta	30-45
CM	20-40	20-50	1.8-3	5-40	3	Açık	20-40
CL	1-20	0-20	0.8-2.2	1-20	4	Çok açık	10-30
D	< 1	0	< 0.8	< 10	> 4 (Parçalanmış)	Çok gevşek	< 10

Özelliklerine özetle yukarıda değinilen Denken Sınıflama-sı esas alınarak tünel güzergahı boyunca karşılaşılan kaya küt-leleri sınıflandırılmış ve kaya sınıflarının güzergahtaki dağılı-mı Şekil 5'te, seçilen destek sistemleri ve uygulama ölçütleri ise Şekil 6'da verilmiştir. Her iki şekilden de görüleceği gibi, tünelin güzergahı boyunca orta kaya grubuyla temsil edilen ka-ya kütlelerinin egemen olduğu, ancak denge bacası ve santrale doğru kaya kütlesi kalitesinin önemli ölçüde azaldığı anlaşı-lmaktadır. Şekil 6'dan, kullanılan kaya saplamasının azlığı ve püstürtme betonun fazla kullanılmamış olması dikkat çekmek-tedir. Bunun nedenlerine TBM kullanımının olumlu ve olum-suz yönlerinin tartışıldığı diğer bölümlerde değinilmiştir.

Kullanılan TBM'in özellikleri

Takisato Tüneli'nin kazısında kullanılan TBM (Şekil 7) Atlas Copco Robbins firmasınca özel olarak üretilmiştir. TBM'in kazı çapı 8.3 m, toplam kazı ömrü 15 km, itme kuv-veti 1260 tonf ve kafa dönme momenti 400 tonf m'dir. Kesici kafanın dönme hızı 5.25/2.63 rpm olup, su soğutmalıdır. Her biri 1560 tonf kapasiteli 4 tane kavrama ayağına (gripper) sa-hip olan kazı makinasının boyu 16.3 m'dir. Kavrama ayakları, kazı sırasında tünelin yan duvarlarına temas ettirilerek maki-naya destek sağlamakta, ayrıca yardımcı bir donanımla duvar-lara bastırılarak deformasyon ölçümlerinin de yapılmasında kullanılmaktadır. Bu makine, tünelin ilerleme yönündeki kıs-

Çizelge 4. Denken Sınıflama Sistemi'ndeki kaya sınıflarının RMR ve Q sistemleriyle karşılaştırılması (Bieniawski, 1989; Tanimoto, 1989; Aydın, 1985).

Denken Sınıflaması	RMR	Q	Tanım
A	I	>160	Çok iyi kaya
B	II	10-160	İyi kaya
CH	III	2-10	Orta kaya
CM	IV	0.2-2	Zayıf kaya
CL	V	0.04-0.2	Çok zayıf kaya
D	VI	0.008-0.04	Aşırı zayıf kaya

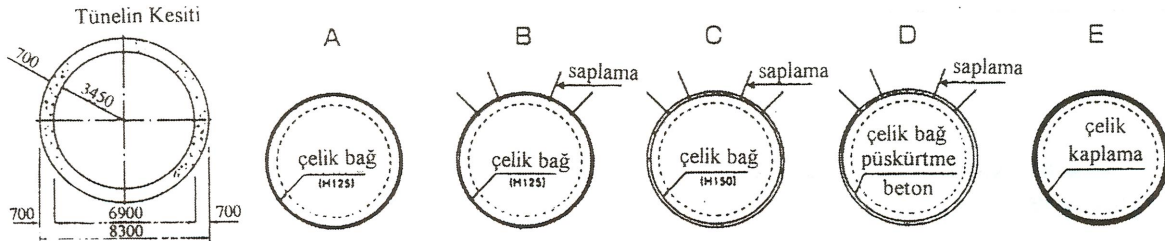
mın jeolojik özelliklerinin de incelenebilmesi amacıyla sondaj ekipmanı ve ayrıca yeraltı açıklığının tavan kısmının tahkima-tı için en fazla 2 m uzunluğundaki kaya saplamalarını yerleşti-rebilen saplama yerleştirme makinesi ile de donatılmıştır.

Gözlemler, ölçümler ve deney sistemleri

Takisato Tüneli'nin kazısı sırasında tünel ortamının jeolo-jik özelliklerinin, çevre kayaların davranışının ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bir dizi gözlem, ölçüm ve deneyler yapılmıştır (Şekil 8). Bu çerçevede,

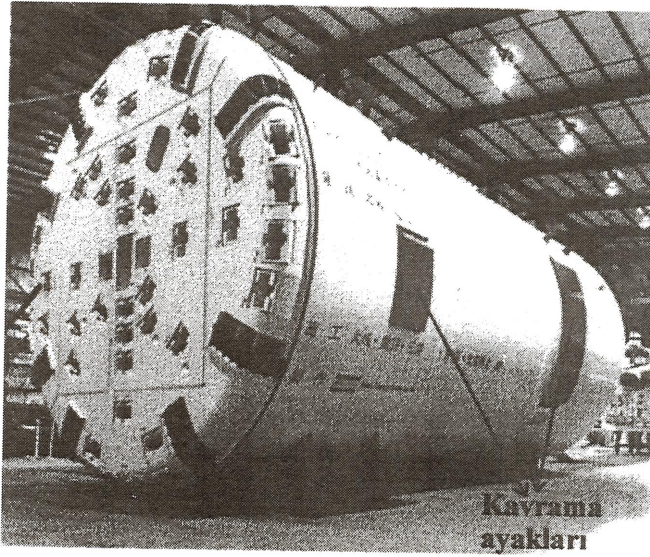
Tünel içi gözlemleri ve deneyleri olarak:

(a) Nokta yükleme deneyleri,



Destek Sınıfı	A	B	C	D	E
Kaya Sınıfı	CH	CH-CM	CM	CM-CL	CL
Uygulama Ölçütü	Taze az eklemli kaya kütlesi, Elastik dalga hızı $V_p=4-4.5$ km/s Şeyl ve Kumtaşı	Eklemli kaya kütlesi, Elastik dalga hızı $V_p=3-4.5$ km/s Şeyl ve Kumtaşı	Çok eklemli kaya kütlesi, kaya düşmesi Elastik dalga hızı $V_p=2.8-3$ km/s Şeyl, Çamurtaşı, Kumtaşı	Destek sistemine etkileyen kaya yükü ve tünelin deformasyonu çok fazla Elastik dalga hızı $V_p=2.0-4.0$ km/s Çamurtaşı ve Kumtaşı	Sağlam kayacın dayanımı düşük, TBM için özel itme önlemi gerekli. Elastik dalga hızı $V_p=2.0-2.8$ km/s Fay ve kırıklı zon
Destek Sistemi	Çelik bağ (H-125) aralık 1.5 m	Çelik bağ (H-125) aralık 1.5 m, Kaya saplaması çap:24mm, boy:2m	Çelik bağ (H-150) aralık 1.5 m, Kaya saplaması çap:24mm, boy:2m	Çelik bağ (H-150) aralık 1.5 m, Püskürtme beton kalınlık:15cm Kaya saplaması çap:24mm, boy:2m	Çelik kaplama kalınlık:20cm
Tünel Uzunluğu	730m	427m	597m	575m	321m

Şekil 6. Takisato Tüneli'nde uygulanan Denken Kaya Sınıflaması'na göre belirlenmiş destek türleri ve kaya kütlesi sınıflamasında esas alınan ölçütler.

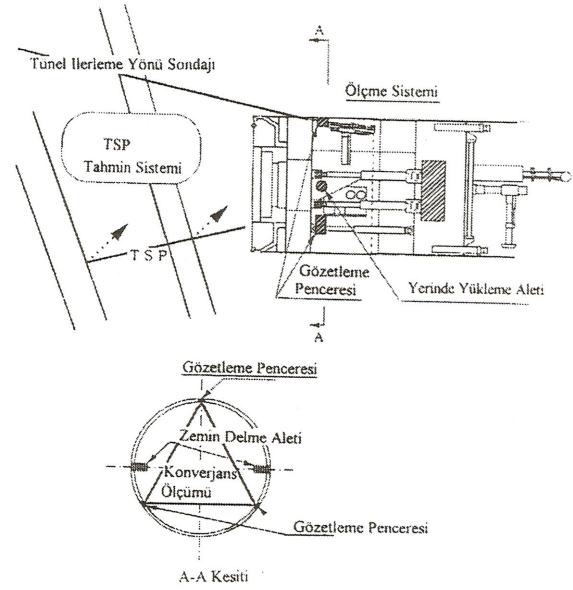


Şekil 7. Takisato Tüneli'nin açılmasında kullanılan tünel açma makinasının (TBM) görünümü.

- (b) Schmidt çekici uygulaması,
 - (c) Kazı malzemesinin davranışının gözlenmesi.
- Ölçüm olarak,
- (a) Tavan oturmalarının izlenmesi,
 - (b) Konverjans ölçümü,
 - (c) Tahkimat yükü ölçümü,
 - (d) Kayaçlarda deformasyon ölçümü
- yapılmış, ayrıca TBM'le ilgili olarak,
- (a) İtme kuvveti,
 - (b) İlerleme hızı,
 - (c) Kazı kafasının dönme momenti

gibi kazı ekipmanının performansına yönelik ölçümler de gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm ve deneylere örnek olarak, tünelin 750 ve 850'nci metreleri arasında bazı parametrelerin değişimi kaya kütlesi sınıflaması ile birlikte Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekilden, TBM'in ilerleme hızı, itme kuvveti ve kazı kafasının dönme momenti ile çevre kayacının mekanik özellikleri arasında bir ilişkinin varlığı belirgin şekilde görülmektedir. Bunların yanı sıra, farklı özelliğe sahip zonların (örneğin fay zonu) yerlerini ve konumlarını saptamak amacıyla elastik dalgaların yansıma özelliğinden yararlanılan ve TSP (Tunnel Seismic Prediction) adı verilen bir yöntem de kullanılmıştır. Bu yöntemin ana ilkesi ve uygulamaya ait bir örnek Şekil 10'da gösterilmiştir. Kazı sırasında yapılan gözlemler, deneyler ve TSP tekniğinin uygulanmasıyla elde edilen veriler değerlendirilerek gerekli görülen lokasyonlarda tünel aynasından sondaj yapılmakta ve sondaj verilerini de kapsayacak şekilde tünelin ilerleme durumu ve duraylılığı incelenmektedir.

Kazılan kaya kütlesinin jeomekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla 80 mm çapında ve 44 MPa'ya kadar basınç uy-

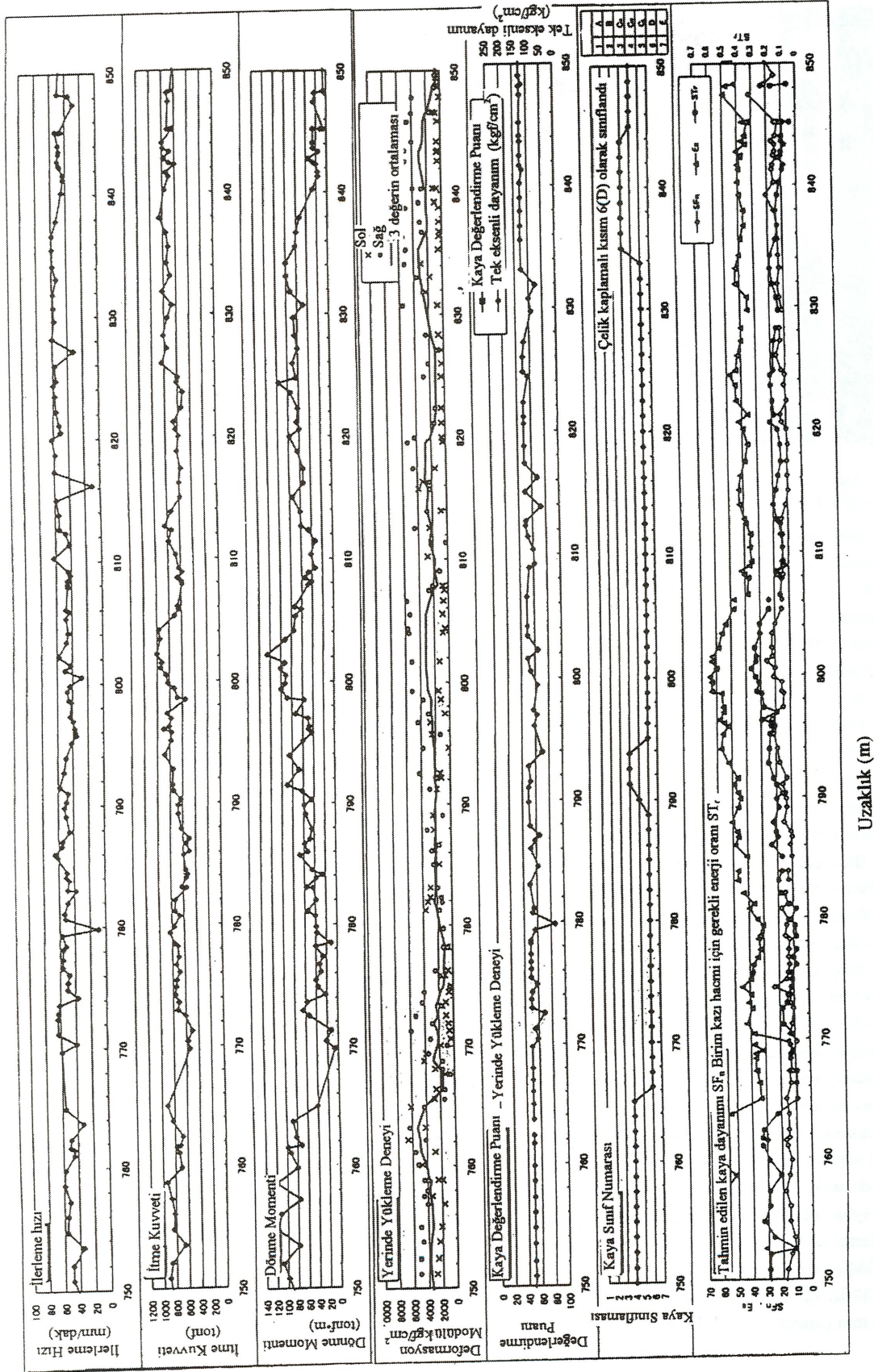


Şekil 8. Takisato Tüneli'nde gerçekleştirilen gözlem, ölçüm ve deneyleri gösteren basitleştirilmiş şematik kesitler.

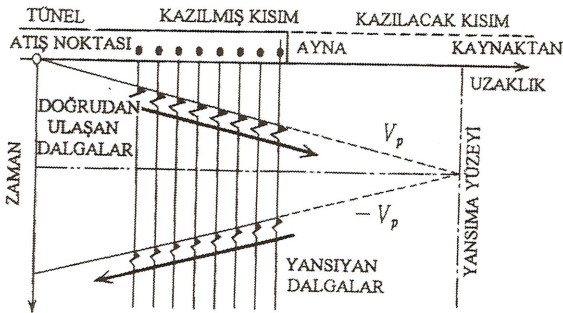
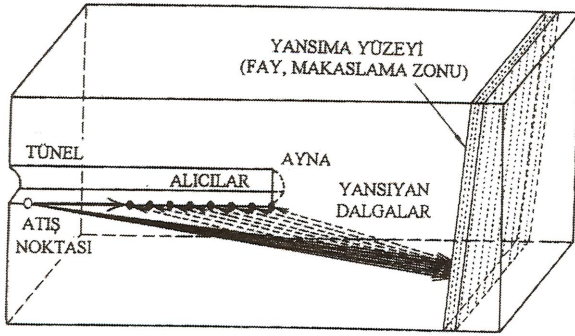
gulayabilen bir pistonla tünelin yan duvarlarında yerinde yükleme deneyi yapılmaktadır. Bu düzenek kullanılarak çevre kayacının deformasyon modülü ve dayanımı ölçülmüştür (Şekil 9). Matsui vd. (1989), elde etmiş oldukları deneysel bulgulara dayanarak, bu tür deneylerden tayin edilen deformasyon modülünün 2.5 katının kayacın deformasyon modülüne, ölçülen dayanımın % 10'unun ise kaya kütlesinin dayanımına eşdeğer olduğunu belirtmektedirler.

Çevre kayacının deformasyonunu ve tünel destek elemanlarına etkileyen yükü belirlemek amacıyla tünel içi konverjans ve yük ölçümleri yapılmıştır. Bu tür ölçümler, TBM'in kendi uzunluğu nedeniyle, tünel aynasından yaklaşık tünel çapının 1.5 katı kadarlık bir ilerleme yapıldıktan sonra gerçekleştirilebilmektedir. Çelik bağ veya çelik kaplamaya gelen yükler ise, birim deformasyon ölçerler kullanılarak belirlenmektedir. Tüneli çevreleyen kayacın oluşmuş göreceli deformasyonu ölçmek amacıyla deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Takisato Tüneli'nde göreceli deformasyonun zamana bağlı değişimini gösteren bir grafik örnek olarak Şekil 11'de verilmiştir. Tünel aynasına yakın noktalara yerleştirilen deformasyon ölçerlerin boy-ları TBM'le çalışmanın yarattığı yer darlığı nedeniyle bu aşamada kısa tutulmuştur. Bununla birlikte, tünel açıklığını çevreleyen kayacın kazıya koşut olarak gelişen deformasyon davranışının kısa da olsu, bu tür deformasyon ölçerlerle izlenebilmesi mümkün olabilmektedir.

TBM'in kazı sırasında harcadığı enerji, kesici kafayı döndürmek için gerekli moment, ilerleme hızı ve kavrama ayaklarının yük-yer değiştirme ilişkileri kullanılarak çevre kayacının



Şekil 9. Takisato Tüneli'nde TBM'in performansının değerlendirilmesine ve kaya külesinin jeomekanik özelliklerinin tayinine yönelik olarak yapılan bazı yerinde deneylerin sonuçlarının 750. ve 850. metreler arasındaki değişimi.



Şekil 10. TSP Sistemi'nin uygulamasıyla ilgili basitleştirilmiş kesit.

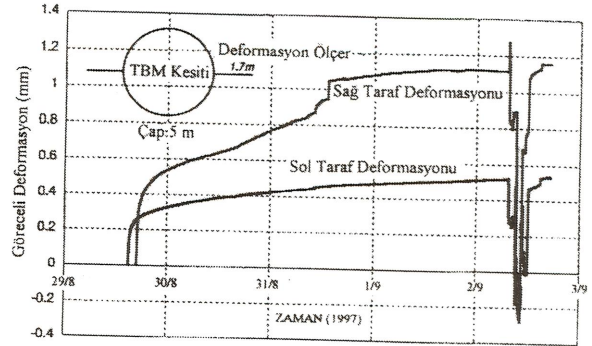
jeomekanik özellikleri ile olan ilişkileri incelenmiştir. Bu amaçla sözü edilen TBM verileri otomatik bir sistem kullanılarak kaydedilmiş ve elde edilen veriler arasında görgül ilişkiler geliştirilmiştir (Şekil 9). Bu veriler arasında kavrama ayaklarının yük-yer değiştirme ilişkisi oldukça önemlidir. TBM için itme gücünü elde etmek amacıyla kavrama ayaklarının kayaya uyguladığı yük ile pistonun uzama miktarı bir çeşit yerinde deney olarak düşünülebilir. Kavrama ayaklarının her birinin yüklem alanının yaklaşık 2-4 m² olduğu dikkate alınırsa, yük-yer değiştirme ilişkisinden eklemli kaya kütlelerinin deformasyon modülünün ve tüneldeki deformasyonun hesaplanması, ayrıca açıklığın duraylılığının değerlendirilmesi açısından oldukça yararlı verilerin elde edilmesi de mümkün olabilmektedir (Şekil 9).

TBM kullanımının olumlu ve olumsuz yönleri

TBM'in olumlu yönleri

Tünelde duraylılık sorunları olmadığı sürece, TBM'in kullanılması halinde kazı, pasa yükleme ve taşıma işlemi birlikte yapılabilirdiği için, kazı hızı oldukça yüksektir. Dolayısıyla çalışan işçi sayısı oldukça az olmakta ve işçiliğin pahalı olduğu ülkelerde oldukça ekonomik bir kazı işlemi gerçekleştirilmektedir.

TBM kullanımıyla tünel içinde oluşması mümkün toz miktarı önemli derecede azalmakta ve dolayısıyla işçi sağlığı açısı-



Şekil 11. Takisato Tüneli'nde gerçekleştirilen deformasyon ölçümlerine ait tipik bir "göreceli deformasyon-zaman" grafiği.

sından olumlu bir çalışma ortamı elde etmek mümkün olmaktadır. Patlatmadan kaynaklanan sarsıntı sorunu TBM kullanımı söz konusu olmayacağından, TBM şehirleşmenin yaygın olduğu kaya ortamlarında kolaylıkla kullanılabilmekte ve çevre sorunu yaratmamaktadır. Patlatma yapılarak çalışıldığında yeraltı açıklığının çevresinde oluşan gevşeme zonu (zedelenmiş kaya kütleleri zonu), TBM'in kullanılması halinde oldukça sınırlı kalmakta ve dolayısıyla tünel destek elemanlarına etkiyen yükler de azalmaktadır. Bu tür bir gelişme, kaya kütlelerinin zamana bağlı olarak deformasyonunun da en az düzeyde kalmasıyla sonuçlanmaktadır.

TBM'in olumsuz yönleri

TBM kullanılarak kazı yapılmasının yaratabileceği sakınca ve sınırlamaların önemli bir bölümü genellikle zayıf kaya kütlelerinde, fay zonlarında ve sık aralıklı süreksizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinde açılan tünellerde görülmektedir. Bu tür ortamlarda kayacın zayıflığına bağlı olarak TBM'in kavrama ayakları için yeraltı açıklığının yan duvarlarında yeterli taşıma kapasitesinin olmaması nedeniyle, TBM'in kazı yapabilmesi ve ilerleyebilmesi için yeterli itme kuvveti de sağlanamamaktadır. Bu nedenle bazı ek önlemlerin alınması gerekmektedir ve bu da maliyeti artırmaktadır. Diğer yandan, eğer örtüyü oluşturan birimlerin kalınlığından kaynaklanan gerilmeler zayıf kayanın dayanımını aşacak değere ulaşıyorsa, yenilen çevre kayacı makinayı sıkıştırarak makinada ağır hasarlara neden olabilmektedir. Takisato Tüneli'nde yukarıda belirtilen sorunlardan, sadece kavrama ayakları için yeterli taşıma kapasitesinin sağlanamaması türündeki bir sorunla Neojen yaşlı çamurtaşlarının kazısı sırasında karşılaşmıştır. Çevre kayacının bu türde sıkıştırması, Japonya'da Nabetachiyama demiryolu tüneline TBM'i tünel aynasından 200 m kadar gerilere ötelemiş ve TBM büyük hasar görmüştür. 1996'da İsviçre'de bir bölümü ezilmiş serpantin içinde açılan Veraina Tüneli'nde de çevre kayacının, küçük ölçekte de olsa, TBM'i sıkıştırdığı yazarlardan Ö. Aydan tarafından gözlenmiştir.

Fay zonlarında göçme davranışı meydana geldiğinde, kısa sürede müdahale etme şansının hemen hemen olmaması nedeniyle, tünelin ilerlemesi sırasında TBM kalkanının üzerinde biriken göçük malzemesinin alınması genellikle insan gücüyle yapılmaktadır. Bu durum tünelin ilerleme hızını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu tür olumsuzluklar yer yer Takisato Tüneli'nde de gözlenmiştir. Nitekim İsviçre'de yapımı planlanan Gothard Tüneli'nde 2000 m derinlikteki ve su tablasının altında yer alan ezilmiş dolomit zonunda bu nedenle TBM'in kullanılmamasına karar verilmiştir (Kovari, 1996).

Eklemlili kaya kütleleri içinde açılan tünellerde süreksizlik sistemlerinin keşilmesi sonucunda ortaya çıkan kaya bloklarının tavadan gravite etkisiyle düşmesi, yan duvarlardan kayması veya devrilme duraysızlıklarına karşı hemen önlem alınmamakta ve dolayısıyla bu tür kesimler TBM kalkanının ilerlemesi sonucu duraysız hale geçmekte ve iş güvenliğini azaltmaktadır. Takisato Tüneli'nde bu tür risklerin önlenmesi amacıyla kaya saplamalarının ilerleme yapıldıktan kısa bir süre sonra yerleştirilebilmesi için TBM özel olarak tasarlanmıştır. Ancak, TBM'in yerleştirme alanı yönünden getirdiği sınırlama nedeniyle, kaya saplamalarının uzunlukları en fazla 2 m olabilmekte ve bu durum büyük ölçekteki kaya bloklarının yaratacağı duraysızlıkların önlenmesini engellemektedir.

TBM'in yan taraflarında bulunan kavrama ayaklarının uyguladığı basınç nedeniyle açıklığın yan duvarlarında ayakların altındaki kaya, yükleme ve boşaltmaya uğramakta, dolayısıyla kaya kütlesi gevşeyerek duraysız hale gelmektedir. Bu durum, ayrıca tünel tavanında düşme olasılığı olan kaya bloklarının gevşeyip düşmesine de neden olmaktadır. Bu tür olumsuzluklar, çok büyük ölçekte olmamakla birlikte, Takisato Tüneli'nin kazısı sırasında da gözlenmiştir.

Sonuç ve öneriler

Bu çalışmanın ilk bölümünde, Japonya'nın Hokkaido adasında inşası süren Takisato hidro-elektrik baraj projesinde su iletim tüneli olarak açılan Takisato Tünelinin teknik karakteristiklerine ve güzergah boyunca karşılaşılan kaya kütlelerinin özelliklerine değinilmiş, Japonya'da yeraltı açıklıklarının öncül tasarımında yaygın olarak kullanılan Denken Kaya Sınıflaması tanıtılmıştır. Ayrıca bu tüneldeki uygulama örnek alınarak, son yıllarda tünel açımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olan TBM'le ilgili olarak yapılan inceleme, gözlem ve deney sonuçları da sunulmuştur. İkinci bölümde TBM kullanılarak kazı yapılmasının olumlu ve olumsuz yönleri, Takisato Tüneli ile birlikte Japonya ve İsviçre'deki diğer bazı örneklerden elde edilen veri ve deneyimlerin ışığı altında özetle tartışılmıştır. Sonuç olarak; TBM ile yapılacak bir kazının diğer kazı yöntemleri ile karşılaştırıldığında oldukça hızlı ve ekonomik olacağı, ancak zayıf ve ileri derecede eklemlili kaya kütleleri ile fay zonlarında gelişebilecek blok düşmesi ve/veya

kayması şeklindeki duraysızlık sorunlarının beklendiği tünellerde ise bunun tersine bir durumla karşılaşılabilmesi anlaşılmaktadır. Dolayısıyla TBM'in kullanılabilmesi için duraylılık konusuna oldukça önem verilmesi gerekmekte olup, bu amaçla tünel kazısına başlanmadan önce seçilen güzergah boyunca zayıf zonların varlığının araştırılması ve özellikle blok gelişimi açısından en önemli faktörlerin başında gelen süreksizliklerin yönelimleri ile bunların fiziksel ve mekanik özellikleri ayrıntılı etütlerle belirlenmelidir. Yapılacak etüt kapsamında, son yıllarda üzerinde yeni teknolojilerin de geliştirildiği yönlendirilmiş karot alma çalışmalarına ağırlık verilmesi önem taşımaktadır.

Katkı Belirtme

Bu çalışmada sunulan bilgiler ve değerlendirmeler, Japonya ve Türkiye arasında Japon Milli Eğitim Bakanlığı (MONBUSHO)'nın desteklediği *Environmental Study on Underground City-Derinkuyu, Turkey* (Proje No: 09044154; Proje Lideri: Ömer Aydan) adlı projenin kapsamında ve yeraltı açıklıklarının kazı teknolojisi ile ilgili olarak yapılan arazi incelemelerinden elde edilmiştir. Yazarlar, Takisato Tüneli'ne ziyaretleri sırasında Taisei İnşaat Firması ile Hokkaido Elektrik Firması'na esirgemedikleri bilgi ve veriler ile gösterdikleri misafirperverliğe, ayrıca bu ziyaretin düzenlenmesini üstlenen Japon İnşaat Mühendisleri Odası (JSCE), Kaya Mekaniği Komitesinin Arazi Deneyleri ve Ölçümleri Alt Komitesi Başkanı Prof. Dr. H. Tano ve Komite Genel Sekreteri S. Tanaka'ya içten teşekkürlerini sunarlar.

Değinilen Belgeler

- Aydan, Ö., 1985. Japon Kaya Sınıflamaları. Nagoya University (yayınlanmamış notlar).
- Barton, N., Lien, R., and Lunden, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 183-236.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. McGraw Hill, New York, 237 p.
- Deere, D.U., and Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico, 308 p.
- Ichikawa, Y., Aydan, Ö., Kyoya, T., Osaka, H., and Kawamoto, T., 1990. An expert system for tunnel design. *Microcomputers in Civil Engineering*, 5, 3-18.
- Ikeda, K., 1969. Classification of rock strength. Research Report of Japan Railway Research Institute, No: 695.
- JRA: Japan Roadway Authority (Doro-Kodan), 1966. Rock mass classification for roadway tunnels.

- Kikuchi, K. and Saito, K., 1975. A proposed method for the classifications of rock grades in connection with bearing resistance of foundation rock. Proceedings of the 9th Japan Rock Mechanics Symposium, 66-70.
- Kovari, K., 1996. Ö. Aydan ETH'de misafir profesör olarak bulunduğu dönemde yapılan kişisel görüşme.
- Matsui, K., Ichinose, M., and Shimada, H., 1989. Estimation of mechanical properties of weak rocks by rod penetration tests. Journal of Japan Society of Engineering Geologists, 30(4), 28-34.
- Otsuka, M. and Takano, A., 1980. Displacement due to tunnel excavation and geological characteristics in swelling mudstone. Tsuchi to Kiso, 28(7), 29-36.
- RMC-JSCE: Rock Mechanics Committee of Japanese Society of Civil Engineers, 1987. Geological Investigation of dams, Tokyo, JSCE.
- Taisei Construction Company, 1997a. Takisato Biggest Machine Pamphlet, 5p.
- Taisei Construction Company, 1997b. Construction of penstocks of Takisato Hydroelectric Power Plant by a large scale tunnel boring machine (unpublished report).
- Tanaka, M., 1966. Introduction to engineering geology for civil engineers. Sankaido.
- Tanimoto, C., Yoshikawa, T. and Hojo, A., 1989. Rapid excavation of head race tunnel and loosening of rock mass in Shin-Aimoto Power Station Project. Journal of Materials Science of Japan, 38 (426), 33-39.