

# Farklı Kaya Sınıfları İçin Yapılan Sayısal Modelleme Çalışmalarının Karşılaştırılması-Örnek Uygulama

Özgür Öngen<sup>1\*</sup>, Ahmet Güzel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İzmir Büyükşehir Belediyesi, Konak, İzmir, Türkiye, ozgur.ongen@hotmail.com

<sup>2</sup>Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye, ahmet.guzel@cbu.edu.tr

\*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Recieved: 7 Ağustos (August) 2015

Kabul / Accepted: 31 Ağustos (August) 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.16056>

## Özet

Günümüzde artan şehir nüfusu, ulaşımda toplu taşımayı mecbur kılmaktadır. Şehirlerdeki yapılaşmanın bozukluğu ve yolların yetersizliği karayolu ulaşımına göre; çevreye dost, güvenli, hızlı, ekonomik ve konforlu olan raylı taşıma sistemini ön plana çıkarmaktadır. Ancak, raylı taşıma sisteminde ulaşılacak noktalar arasındaki bağlantılarda tırmanma ve dönme sınırları gibi teknik zorluklar nedeniyle yerüstü yapılarının altından geçmek gerekir. Bu nedenle şehiriçi raylı sistem taşımacılığında tünelcilik zorunluluk olmaktadır. İzmir şehri ulaşımında bir çözüm olan 44 km uzunluğundaki İzmir Hafif Raylı Sisteminin Yeni Avusturya Tünel açma yöntemiyle açılan yaklaşık 5,5 km'lik Üçyol-Fahrettin Altay Metro güzergâhını kapsayan kısımda tünel zemin/kaya ilişkilerinin incelenmesi amacıyla; Avusturya tünel açma standartı olan ÖNORM kaya sınıflama sistemine göre yüzdesel dağılımlar çıkarılmış ve hakim kaya sınıfı için sayısal modelleme çalışması yapılmıştır. Yapılan sayısal değerlendirmeye göre tünel güzergâhının %25'inin B2, %50'sinin B3 olmak üzere %75'lik kısmının B kaya sınıfında olduğu belirlenmiştir. Bu durum gözönüne alınarak örnek modellemeler B2-B3 kaya sınıfı için İzmirspor-Hatay İstasyonu arasında kalan bölgede gerçekleştirilmiştir. İzmir Hafif Raylı Sistem Projesi 2. Aşama İkmal İnşaatı Yapım İşi kapsamında açılan tünellerde farklı kaya sınıflarında uygulanan destekleme sistemleri Phase<sup>2</sup> v7.0 programı ile modellenerek tünel kesitinde oluşacak toplam yer değiştirmelerin (deplasmanların) analizi yapılmış ve yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler** – Hafif raylı sistem, Kaya sınıflama sistemleri, Kazı ve destekleme, NATM, Phase<sup>2</sup> v7.0

## Comparison of Numerical Modeling Studies Made for Different Rock Classes- A Case Study

### Abstract

At the present time, public transport system has become a necessity because of increasing urban population. Unplanned urbanization and lack of road brings rail transport system which is more environmentally friendly, safe, fast, economic and comfortable than road transportation into the forefront. But, it should be passed under the aboveground structure due to technical difficulties such as climbing and turning limits in rail transport system. Therefore, tunnelling has become a necessity in rail transport system. İzmir Light Rail System in the 44 km-long has been a solution in transportation of İzmir. Üçyol - Fahrettin Altay route, which is approximately 5.5 kilometers and was excavated with New Australian Tunneling Method, is a part of the İzmir light rail system. Percentage distributions were calculated according to ÖNORM rock classification system in order to examine tunnel-soil/rock relations in this route. Also, numerical modeling study was done for the dominant rock classes. According to the

numerical evaluation, it was determined that a large portion (75 %) of the Uçyol - Fahrettin Altay tunnel route is a B Rock Class (25% B2 and 50% B3). Considering this situation, modelling studies for B2-B3 rock classes were carried out in the region between Izmirspor Station and Hatay Station. Support systems in these rock classes were modelled with Phase<sup>2</sup> v7.0. According to these modelling studies, analyses of total displacements which occur in tunnel section were made and interpreted by authors of this article.

**Keywords** – Light Rail System, Excavation and Support System, NATM, Phase<sup>2</sup> v7.0, Rock Classification System.

## 1 Giriş

Günümüzde bilindiği gibi şehir nüfusları; teknoloji ve sanayinin bir gereksinimi olarak aşırı derecede artmıştır. Nüfus artışı ve şehirlerin büyümesine bağlı olarak ortaya çıkan ulaşım sorunu da ancak toplu taşıma ile çözülebilmektedir. Özellikle büyükşehirlerde karayolu ulaşımaları için yol yapılacak alanların kısıtlı olması, yol yapımı sırasında çok yüksek kamulaştırma maliyetleri olması toplu taşıma için farklı uygulamaları gündeme getirmektedir. Bunların başında ekonomik ve konforlu olan raylı taşıma sistemi gelmektedir.

Raylı taşıma sistemi; aynı anda büyük hacimli, ağır kütlelerin ve/veya birçok kişinin uzun mesafelere taşınmasını sağlamanın yanı sıra çevreye dost, güvenli, hızlı ve ekonomiktir. Ancak ulaşılacak noktalar arasındaki bağlantı raylı sistemlerle inşa edilince; karayolu ulaşımına göre tırmanma ve dönme sınırları gibi teknik zorluklar ortaya çıkmaktadır. Raylı sistemde, yerüstü yapılarının altından geçmeden her noktaya ulaşmak olası değildir. Bu durumda şehir içi taşımacılığının inşaat işleri için, tünellilik olmasa olmazdır.

İzmir şehrinde de nüfusta meydana gelen artış, kentleşmenin hızla artması ve kentin körfez etrafında yoğunlaşması ulaşım problemlerini beraberinde getirmiştir. Bu problemlerin çözümüne yönelik olarak İzmir Büyükşehir Belediyesi "İzmir Hafif Raylı Sistemi" projesini oluşturmuştur. Bu projenin bir kısmını oluşturan İzmir Hafif Raylı Sistem Projesi 2. Aşama İkmal İnşaatı Yapım İş, Uçyol'dan Fahrettin Altay'a kadar olan kısmı kapsamaktadır (Şekil 2).

Makale kapsamında incelenen 2. Aşama (Uçyol - Fahrettin Altay) güzergâhı tümüyle yeraltı projesidir. Günümüzde en yaygın kullanılan tünel açma yöntemi olan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılmış olup toplam 5 istasyondan oluşmaktadır. Bu istasyonlar sırasıyla Izmirspor, Hatay, Göztepe, Poligon ve Fahrettin Altay istasyonlarıdır. Çalışma kap-

samında, bu güzergahın genel jeolojisi, yapısal jeolojisi ve mühendislik jeolojisi incelenmiş, hakim kaya sınıfları belirlenmiştir. İnceleme alanı olarak hakim kaya sınıflarından oluşan Izmirspor-Hatay İstasyonu arasında kalan bölge seçilmiş, bu bölgede tünel kesitlerinde oluşacak deformasyon analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

## 2 Yöntem

Araştırma yöntemi 3 başlık altında incelenmiştir. Bunlardan ilki, İzmir Hafif Raylı Sistem 2. Aşama Projesinde uygulanan NATM ve Önorm B2203 Standardı olup ikincisi çalışma bölgesinin tanıtılmasıdır. Ardından modelleme çalışmaları ve tünel analizleri yapılmış elde edilen veriler yorumlanarak çalışma sonlandırılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Uygulanan araştırma yöntemi akım şeması

### 2.1 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ve ÖNORM B2203 Standardı

Günümüzde yaygın olarak kullanılan tünel açma yöntemi NATM'nin, farklı geometrilere ve farklı jeolojik koşullara uyum sağlaması bu yöntemi diğer tünel açma yöntemlerinden ayırmaktadır. Bu özelliği sayesinde kesintiye uğramadan ve düşük maliyetlerle tünel inşaatları gerçekleştirilebilmektedir.

Yöntemin prensibi, tüneli içinde açıldığı kaya ortamına taşıtmaktır. NATM'de iki temel hedef vardır. Bunlardan ilki yapılacak geçici desteklemelerle deformasyon oluşumunu ortadan kaldırarak tünel etrafındaki

kayanın basıncını düşürmek, ikincisi ise söz konusu basıncı tünel etrafını kuşatan kayaya dağıtmaktır. Bu iki temel hedefe ulaşıldığında, yapılacak olan ana destekleme sistemine daha az yük binmiş olacaktır [1].

NATM'de tünel, yerinde gözlem ve ölçümlerle sürekli takip edilir. Böylelikle oluşacak deformasyonlar sürekli kayıt altında tutulmuş olacak ve herhangi bir emniyetsiz durumda anında müdahale şansı olacaktır.

NATM sabit kazı ve destekleme sisteminden bağımsızdır. Yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için; kayanın mekanik özelliklerinin, birincil gerilmelerin, su gelirin belirlenmiş olması gerekir. Tünel açılırken ikincil deformasyonların ve gerilmelerin gözlem ve ölçümü yapılarak tünel açma çalışmalarının denetlenmesi ve edinilen sonuçlara göre kazının yönlendirilmesi gerekmektedir [2].

NATM'de kazı ve destekleme aşamasına geçilmeden önce kaya kütlelerinin sınıflandırılması gerekmektedir. Bu amaçla tünellerin projelendirilmesi çalışmaları sırasında tünel güzergahında açılacak olan sondajlar ile elde edilecek yeraltı su seviyeleri miktarları, jeolojik harita ve kesitler ile geoteknik bilgilerden yararlanılmalıdır. Sondajlar sayesinde oluşturulan jeolojik haritalama sırasında elde edilen bilgiler (süreksizlik, süreksizlikler arasındaki dolgu durumu, su sızıntıları, ayrışma dereceleri, kayanın mukavemeti, aşırı sökülme vb. ) ışığında kazı yapılan kaya kütlesi tanımlanmalıdır.

Kaya davranışlarının matematiksel denklemler ile bulunabildiği, kaya kalitelerinin sayısal değer olarak verildiği kaya sınıflama sistemleri (Q, RMR, RQD vb.) jeolojik yapıların büyük değişiklik göstermediği durumlarda kullanılmaktadır. Büyük değişkenlik gösteren jeolojik yapılarda gerçekleştirilen kazı işlemlerinde esnek kazı-destekleme yöntemi olan NATM kullanılması durumunda kayanın davranışını temel alan kaya sınıflama sistemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır [3].

NATM için kaya sınıflamaları ve bu sınıflandırmalarda kullanılan destekleme elemanları Avusturya Standardı ÖNORM B2203'te tanımlanmıştır. ÖNORM B2203'e göre kayalar A, B ve C olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmıştır. Üç temel kaya sınıflaması için de farklı destekleme elemanları önerilmiştir. ÖNORM B2203'te tanımlanan üç temel kaya sınıflaması için kaya kütle özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** ÖNORM B2203 kaya sınıfları ve özellikleri [4]

Kaya Sınıfları	Kaya Kütle Özellikleri
A Kaya Sınıfı	Kaya kütleleri stabil ve elastiktir. Yerel destek uygulanmaz ise çoğunlukla önemsiz eklemelerden kaynaklı yer yer sığ göçükler olabilir. Elastik deformasyonlar hızla azalır.
B Kaya Sınıfı	Kaya kütleleri yapısal kenetlenme veya çekme mukavemetlerinin düşük olmasından dolayı hızlı gevşeme ve ayrışmaya müsaittir. Kazı boşluğunda oluşan ikincil gerilmeler kayanın mukavemetini biraz aşar. Bu durum iç kısımlara ulaşmamaktadır. Desteksiz kalma süresi azdır. Desteksiz kalma süresi uzarsa, çökmeler oluşacaktır.
C Kaya Sınıfı	Kaya kütleleri çatlama ve dökülmeye eğilimli olup şişme özelliği gösterir. ayrışmış veya bozmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler bu gruptadır. Kaya basıncının yeniden dağılım süreci ya da deplasman sınırlamaları sonucunda oluşan gerilmeler çoğunlukla kaya dayanımından daha büyüktür. Aşırı gerilmelere maruz kalan kayada yenilme mekanizmaları (burkulma, kabuk atma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket vb.) oluşur. Bu durum büyük deformasyonlara yol açacaktır. Bu deformasyonlara izin verilirse kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçer, önemli miktarda gevşeme basıncı oluşur, kaya dayanımı büyük miktarda azalır. Zeminin plastik ve viskoz davranışına bağlı olarak açılan boşlukta büyük deformasyonlar meydana gelir ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı söz konusudur.

ÖNORM B2203 standardında tanımlanan üç temel kaya sınıfı kendi içinde detay tanımlamalara ayrılmaktadır. (Tablo 2). Standartta her bir kaya sınıfı için kaya kütlelerinin davranışı, suyun etkisi, kazı, destekleme ve zamanlaması tanımlanmaktadır.

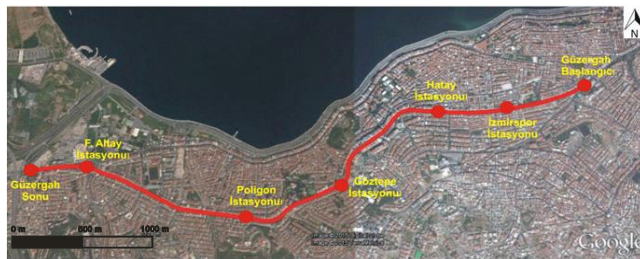
NATM için her bir kaya kütle sınıfına ait standart önerilmiş olmasına rağmen, kazı yöntemi ve destekleme sistemi seçimi açısından esnek bir yöntemdir. Ayrıca kazı işlemi öncesi, kazı esnası ve kazı sonrasında gerekli olduğu takdirde uygulanacak projede değişiklik yapılabilmektedir.

ÖNORM B 2203 (Ekim 1994 sonrası)	
A1	Sağlam
A2	Sonradan Az Sökülen
B1	Gevrek
B2	Çok Gevrek
B3	Taneli
C1	Dağ Atma
C2	Baskılı
C3	Çok Baskılı
C4	Akıcı
C5	Şişen

İncelemesi yapılan İzmir Hafif Raylı Sistem 2. Aşama Projesinde sayısal nitelikli kaya kütle sınıflamaları ve ÖNORM B2203 standardı kullanılmış, yerinde sürekli gözlem ve ölçümler ile olası aksaklıklara müdahale olanakları söz konusu olmuştur.

## 2.2 Çalışma Alanı

İzmir ilinde olan çalışma alanı; kuzeyinde İzmir Körfezi, batısında Narlıdere, güneyinde Gazimir, güneydoğusunda ise Buca ilçelerinin yer aldığı İzmir Hafif Raylı Sistem Yapım Projesinin Fahrettin Altay-Üçyol güzergahıdır. 2. Aşama İkmal İnşaatı projesi olarak adlandırılan bu güzergah İnönü Caddesi'nde yer almakta olup, Üçyol da bulunan kazı şaftından sonra sırasıyla Hatay, Göztepe ve Poligon mahallelerinden devam ederek Fahrettin Altay'da son bulmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. İzmir Hafif Raylı Sistem Projesi 2. Aşama İkmal İnşaatı Yapım İşİ Güzergahı Çalışma Alanı Uydu Görüntüsü

Tünel güzergahının geçtiği jeolojik ortam tortul ve volkanik kökenli kayalardan oluşmaktadır. Tortul kayalar Bornova Karmaşığı ve Altındağ Formasyonu olarak gruplandırılırken, volkanik kayalar Yamanlar Volkanitleri olarak değerlendirilmiştir [4].

## 2.2.1 Mühendislik Özellikleri

Kazı sırasında karşılaşılan jeolojik birimlerin mühendislik özelliklerinin kestirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiş olan sondajlardan alınmış karotlar üzerinde jeomekanik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri için öncelikle kayalar ayrışma derecelerine göre sınıflandırılmış ve deneylerde ayrışma durumları göz önüne alınmıştır. Formasyonlara ait ortalama tek eksenli basınç dayanımları Tablo 3'te verilmektedir.

Kaya birimlerinin sınıflandırılması için hem ampirik hem de tanımsal kaya kütle sınıflamaları göz önüne alınmıştır. Bu kaya sınıflama sistemleri (Q, GSI ve ÖNORM B2203) kullanılarak tünel tasarımları gerçekleştirilmiştir. Güzergahta yer alan kayaların ÖNORM B2203 standardına göre değerlendirilmesi Bölüm 2.2.2'de verilmektedir.

Güzergahı oluşturan Yamanlar Volkanitleri, Altındağ Formasyonu ve Bornova Karmaşığı'na ait RQD, Q ve RMR değerleri Tablo 4 'te verilmektedir.

Tablo 3. Güzergah kayalarına ait ortalama tek eksenli basınç dayanımları

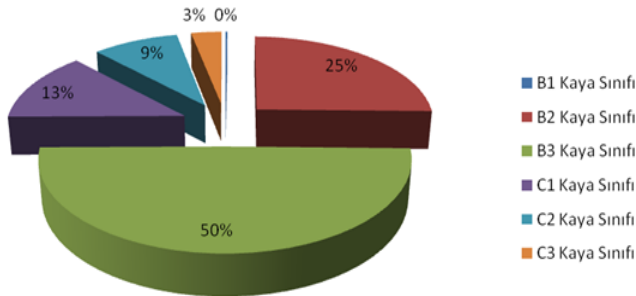
Formasyon		Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kg/cm <sup>2</sup> )
Altındağ Formasyonu	Kumtaşı	172
	Silttaşı	165
	Kiltası	326
	Çakıltası	185
	Killi Kireçtaşı	321
Bornova Karmaşığı	Fliş Şeyl	280
	Fliş Kumtaşı	470
	Grafit Şeyl	113
	Silisifiye Kireçtaşı	847
Yamanlar Volkanitleri	Az Ayrışmış Andezit	545
	Orta Ayrışmış Andezit	310
	Çok Ayrışmış Andezit	---
	Az Ayrışmış Aglomera	320
	Orta Ayrışmış Aglomera	115
	Çok Ayrışmış Aglomera	

**Tablo 4.** Güzergah kayaçlarının RQD, Q ve RMR değerleri [5]

Formasyon	Formasyonu Oluşturan Birimler	RQD %	Q	RMR
Yamanlar Volkanitleri	Andezit	25-72	0.30-2.76	35-62
	Aglomera	3-46	0.04-0.61	12-32
Altındağ Formasyonu	Kiltaşı, silttaşı, Kumtaşı, konglomera	12-47	0.12-0.70	22-35
Bornova Karmaşığı	Bornova filişi, kiltaşı, kumtaşı grafit şist	0-39	0.10-0.38	19-25

### 2.2.2 Tünel Güzergahında Yer Alan Kayaçların ÖNORM B2203 Standardına Göre Sınıflandırılması

Güzergah boyunca açılan sondajlar ve kazı sırasında yapılan incelemeler neticesinde kaya birimleri tanımlanmış ve sınıflandırılmıştır. Tünel güzergahında yer alan kayaçların ÖNORM B2203'e göre mesafelere bağlı olarak yüzdesel dağılımları çıkarılmıştır (Şekil 3).



**Şekil 3** Önorm B2203'e göre tünel güzergahında yer alan kaya sınıflarının yüzdesel dağılımları

Genel olarak tünel güzergahında yer alan kayaçlar Baskılı kaya kütleleri (B) ve Gevrek kaya kütleleri (C) sınıflarında olup, en yüksek dağılım %75 oranla B kaya sınıfındadır.

### 3 Sayısal Modelleme ve Tünel Analizleri

Kaya sınıflarının yüzdesel dağılımına göre tünel güzergahının %25'inin B2, %50'sinin B3 olmak üzere

büyük bir kısmının B kaya sınıfında olduğu gözönüne alınarak örnek modellemeler B2-B3 kaya sınıfını içine alan İzmirspor-Hatay İstasyonu arasında kalan bölgede gerçekleştirilmiştir. Analizler tünelin destekli ve desteksiz durumuna göre yapılmış farklı kaya sınıfı koşullarında destekleme sistemlerinin, tünel çevresinde oluşacak toplam yerdeğiştirmeye etkisi incelenmiştir.

Yapılan analizlerde, yeraltı açıklıkları veya yerüstü kazılarının tasarımı için, gerilme, deformasyon ve duraylılık çözümlerinde kullanılan iki boyutlu analiz programı olan Phase<sup>2</sup> v7.0 kullanılmıştır. Phase<sup>2</sup> sayısal modelleme programı; sonlu elemanlar ve sınır elemanlar yöntemlerinin karmasından oluşan ve her iki yöntemin birlikte kullanılmasını sağlayan hibrit bir programdır.

### 3.1 Uygulama Bölgesi ve Modelleme Parametreleri

İzmirspor-Hatay istasyonu arasında kalan bölge güzergahın 0+800-1+500 km aralığındadır. Bölgede açılmış olan 8 adet sondaj incelenerek, kazı sırasında geçilecek formasyonların fiziksel ve mekanik özellikleri önceden yaptırılmış olan laboratuvar testleri sonucunda tespit edilmiştir. Bu özellikler modellemeye esas parametreleri oluşturmak için kullanılmıştır. İncelenen bölgede açılan tünel T1 olarak adlandırılan ana hat tünelidir.

Bölgedeki formasyonlar Yamanlar Volkanitleri olarak adlandırılan andezit ve aglomeradan meydana gelmiştir. Yeraltı mühendislik yapılarının tasarımında önemli olan ayrışma dereceleri için ISRM Ayrışma Derecesi Sınıflaması kullanılarak volkanitlerin ayrışma dereceleri tanımlanmıştır [6]. Yamanlar volkanitlerini oluşturan birimler başlıca iki ayrışma derecesinde sınıflandırılmış, andezitler az ayrışmış, aglomeralar ise orta-çok ayrışmış sınıfta değerlendirilmiştir [4].

Sondaj logları değerlendirilerek RQD değerleri tespit edilmiştir. Buna göre az ayrışmış andezitlerin ortalama RQD değeri %58 ve orta-çok ayrışmış aglomeraların ortalama RQD değeri %45'tir. Bu kayaçlar Q sınıflama sistemine göre sınıflandırılmıştır. Q sınıflama sisteminin bağıntı (4.1) ile ampirik olarak hesaplanması için kaya kalite göstergesi (RQD), eklem takımı sayısı (Jn), eklem yüzeyi pürüzlülük sayısı (Jr), eklem ayrışma sayısı (Ja), eklem suyu azaltma faktörü (Jw) ve gerilme azaltma faktörü (SRF) değerleri kullanılmıştır [14]. Kullanılan parametreler ve Q sınıflama

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

**Tablo 5.** Yamanlar Volkanitleri Q kaya sınıflama sisteminde kullanılan parametreler ve sınıflandırma

Ayrışma Derecesi	Yamanlar Volkanitleri	
	Andezit	Aglomera
% RQD	58	45
J <sub>n</sub>	9	12
J <sub>r</sub>	2	2
J <sub>a</sub>	3	3
J <sub>w</sub>	1.00	0.66
SRF	2.5	2.5
<b>Q Değeri</b>	<b>1.72</b>	<b>0.33</b>
<b>Q Kaya Kütle Tanımı</b>	Zayıf kayaç	Çok zayıf kayaç

Q sınıflama sisteminin ÖNORM B2203’e göre karşılığının “az ayrılmış andezit” için B2, “orta-çok ayrılmış aglomera” için B3 kaya sınıfında olduğu görülmektedir. (Şekil 4).

BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B2203 Ekim 1994 öncesi	ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası
Orta	5,34	60	B1 Gevrek
Zayıf	2,97	58	B2 Çokgevrek
	0,77	47	
	0,41	40	
Çok zayıf	0,11	29	B3 Taneli

**Şekil 4.** Hesaplanan Q değerlerinin ÖNORM B2203 karşılıkları

Tablo 6 ‘da bölgede yer alan kayalara ait program girdi parametreleri verilmiştir. Bölgede yapılmış yer altı su seviyesi ölçümlerinin değerlendirilmesinde, ortalama 3.5 m olarak belirlenen seviye modellemeye uygulanmıştır.

**Tablo 6.** Yamanlar volkanitleri (andezit ve aglomera) kaya parametreleri

	$\gamma_n$ (MN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	GSI	m <sub>i</sub>	D
Az Ayrılmış Andezit	0.0252	54.10	5928	0.23	57	19	0.5
Orta-Çok Ayrılmış Aglomera	0.0211	13.48	3480	0.26	50	16	0.5

D.B.H.A : Doğal Birim Hacim Ağırlık (MN/m<sup>3</sup>),

$\sigma_{ci}$  : Tek Eksenli Basınç Dayanımı(MPa),

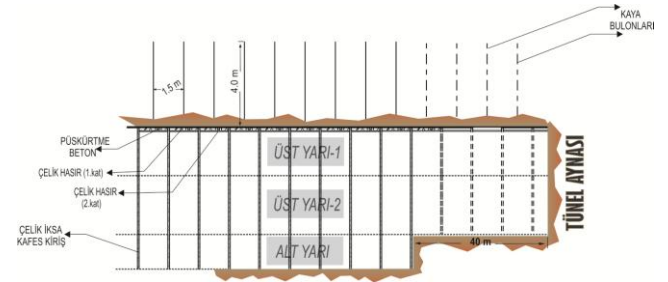
E<sub>i</sub>: Elastisite Modülü (MPa),

$\nu$ : Poisson oranı

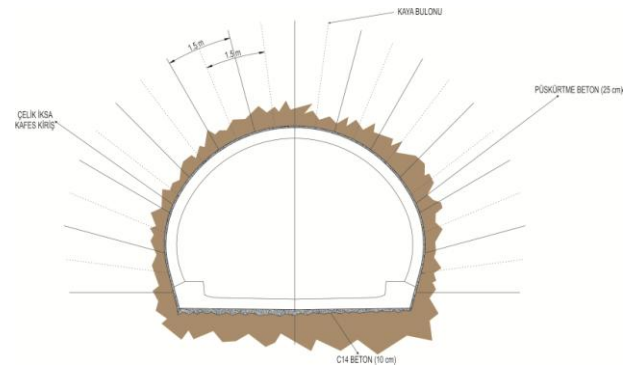
m<sub>i</sub> : Kaya Malzemesi Sabiti,

D :Örseleme Faktörü

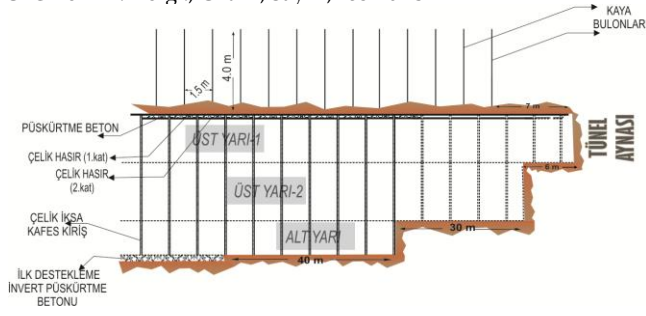
Destekleme sisteminde ise; Q221/221 tip çelik hasır, 26 mm çaplı SN ve PG tip kaya bulonu, 3 bar lattice girder iksa, C14 ve C20 sınıfı püskürtme beton kullanılmıştır. İki sınıflama sisteminde uygulanan kazı ve destekleme parametreleri Şekil 5, 6, 7, 8 ‘de verilmektedir. Ayrıca kaya sınıflarında ve destekleme sistemlerindeki farklılıkları Tablo 7 ‘de verilmektedir.



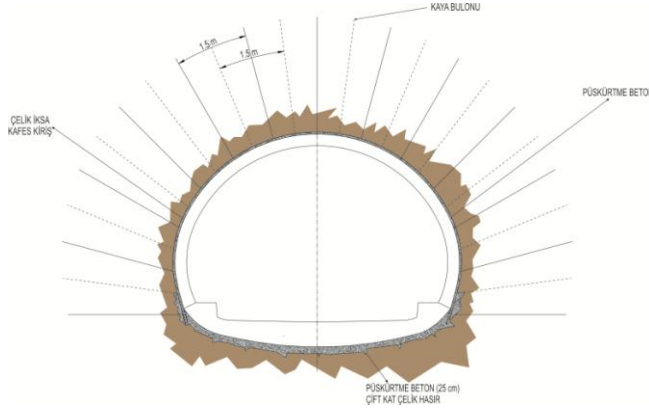
**Şekil 5.** B2 Kaya Sınıfı- T1 tünel kesiti kazı aşamaları



**Şekil 6.** B2 Kaya Sınıfı-T1 tünel kesiti kaya bulonu ve çelik iksa yerleşim geometrisi



Şekil 7. B3 Kaya Sınıfı- T1 tünel kesiti kazı aşamaları



Şekil 8. B3 Kaya Sınıfı-T1 tünel kesiti kaya bulonu ve çelik iksa yerleşim geometrisi

Tablo 7. B2 ve B3 kaya sınıflarında kazı ve destekleme sistemlerindeki farklılıklar

Kaya Sınıfı	Tünel tabanı	İlerleme adım uzunluğu (m)	İksa aralıkları (m)
B2	Düz (Püskürtme Beton "C14" 10cm)	1.5-3.0	1.8
B3	Kemer Şeklinde (Püskürtme beton 25cm + Çift kat çelik hasır)	1.25-3.0	1.5

Oluşturulan sayısal modellemelerde analizler Genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü esasına dayalı yapılmıştır.

### 3.2 Tünel Sayısal Model Analizleri

Modelleme yapılan bölge için farklı değişkenler olduğundan destekli ve desteksiz olma durumları göz önüne alınarak model tanımlamaları yapılmıştır. Bölge için oluşturulan model tanımları Tablo 8 'de verilmektedir. Her bir model için ayrı ayrı tünel çevresi (tavan, taban ve yan duvar olmak üzere 3 noktada) ve yüzeyde oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Destekli ve desteksiz durumlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

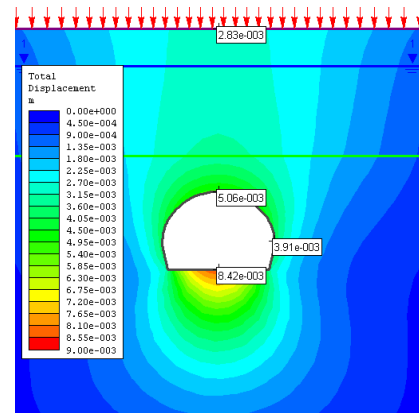
Ayrıca her iki kaya sınıfında destekli durum için elde edilen değerler karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Tablo 8. Tünel Analizleri İçin Model Tanımlamaları

Tünel Tipi	Kaya Sınıfı	Destek Durumu	Model No
T1	B2	Desteksiz	M1-1
		Destekli	M1-2
	B3	Desteksiz	M2-1
		Destekli	M2-2

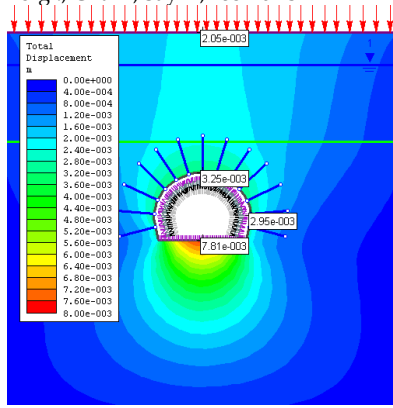
Tünel şehir içerisinde açılmış sığ tünel niteliğinde olup, güzergahı bir çok yapının altından geçmektedir. Analizlerin doğru olabilmesi için modellemenin gerçeği yansıtması gerekmektedir. Bina yükleri, araç yükleri vb. gibi olası yüklerin oturduğu yüzey üzerine etkisi literatürden araştırılarak çalışma alanındaki binaların kat yükseklikleri dikkate alınmış, zemin yüzeyine etki eden sürşarj yükü 1.2 ton/m<sup>2</sup> olarak kabul edilmiştir. Bu değer programda 0.012 MN/m<sup>2</sup> olarak tanımlanmıştır.

Öncelikle M1-1 modelinde tünel kazısı tamamlandıktan sonra oluşması beklenen deplasman değerleri tespit edilmiştir. Kazısı gerçekleştirilen ana hat tünelinde destekleme yapılmadığında maksimum toplam deplasmanın 8.42 mm ile tünel tabanında gerçekleştiği saptanmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. M1-1 tünel kazısında oluşan toplam deplasman dağılımları

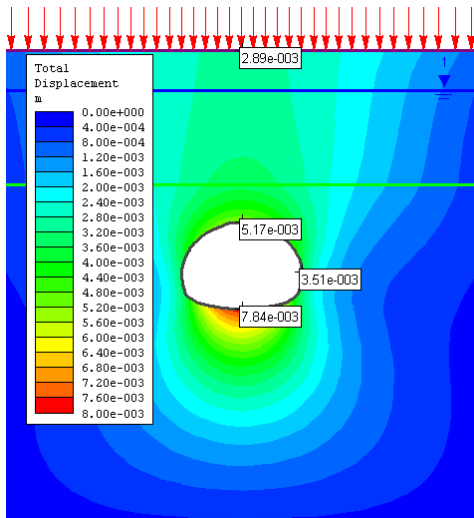
M1-2 modelinde, tünel kazısından sonra destekleme elemanları yerleştirilince meydana gelen maksimum toplam deplasmanın aynı şekilde tünel tabanında olacağı saptanmıştır. Maksimum toplam deplasman ise 7.81 mm ile tünel tabanında hesaplanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. M1-2 tünel kazısında oluşan toplam deplasman dağılımları

Attawell ve diğerleri (1986) yapmış olduğu çalışmalar neticesinde yeraltı tünelleri kazısı sırasında yüzeyde ve bina temellerinde herhangi bir yönde 10 mm'ye kadar olacak deformasyonların yapılaraya hasar veremeyeceğini belirtmiştir. Desteksiz durumda kazı sonrası oluşacak deplasman değerlerine bakıldığında, yeryüzünde oluşacak toplam deplasman değerinin 2.83 mm ile literatürde verilmiş olan 10 mm değerinin çok altında olduğu görülmektedir. Ayrıca destekli durumda kazı sonrası oluşacak deplasman değerlerine bakıldığında, beklenildiği gibi destekleme yapılmıca yüzeyde meydana gelecek deplasman değerinde düşüş olduğu görülmektedir. M1-2 modelinde yeryüzünde oluşacak toplam deplasman değerinin 2.05 mm ile güvenli sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.

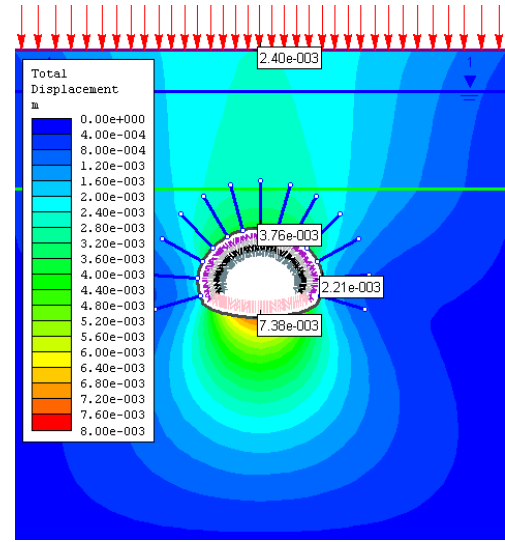
M2-1 modelinde gerçekleştirilmiş olan analizlere göre maksimum toplam deplasmanın diğer iki analizde olduğu gibi tünel tabanında gerçekleştiği saptanmıştır. Maksimum toplam deplasman ise 7.84 mm'dir (Şekil 11).



Şekil 11. M2-1 tünel kazısında oluşan toplam deplasman dağılımları

Desteksiz durumda kazı sonrası oluşacak deplasman değerlerine bakıldığında, diğer iki modele göre yeryüzünde oluşacak toplam deplasman değerlerinde artış olmasına rağmen 2.89 mm deplasman değerinin güvenli sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.

M2-2 Modelinde; M1-2 modeline göre kazı işlemi üç kademede gerçekleştirilmiştir. Maksimum toplam deplasman değeri diğer 3 modelden düşük olup 7.38 mm ile tünel tabanında hesaplanmıştır. Yeryüzünde oluşacak toplam deplasman değerinin limitlerin çok altında olduğu, dolayısıyla güvenli sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. M2-2 tünel kazısında oluşan toplam deplasman dağılımları

4 modele ait deplasman değerleri tek bir tablo altında birleştirilmiştir. Tablo 9'da gerçekleştirilmiş olan analizler neticesinde elde edilen deplasman değerleri verilmektedir.

Tablo 9. Analizi yapılan 4 model için elde edilen toplam deplasman değerleri

Deplasman Noktası	M1-1 (mm)	M1-2 (mm)	M2-1 (mm)	M2-2 (mm)
Yeryüzü	2.83	2.05	2.89	2.40
Tünel Tepe Noktası	5.06	3.25	5.17	3.76
Yan Duvar	3.91	2.95	3.51	2.21
Tünel Tabanı	8.42	7.81	7.84	7.38

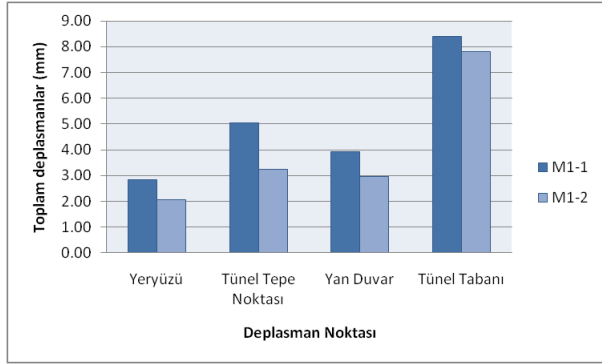
### 3.3 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Değerlendirmeler yapılırken B2 klastan oluşan M1-1



ve M1-2 modelleri, B3 klastan oluşun M2-1 ve M2-2 modelleri öncelikle kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Daha sonra destekleme yapılmış durum değerlendirmelerinin yapılması için M1-2 ile M2-2 modelleri kıyaslanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Aglomerada açılan ana hat tüneline B2 klas için destekli ve desteksiz durum analizleri neticesinde 4 farklı ölçüm noktası için belirlenen deplasman değerleri karşılaştırılmış olup, M1-1 ve M1-2 modelleri için toplam deplasman değerleri tek bir grafikte gösterilmiştir (Şekil 13).



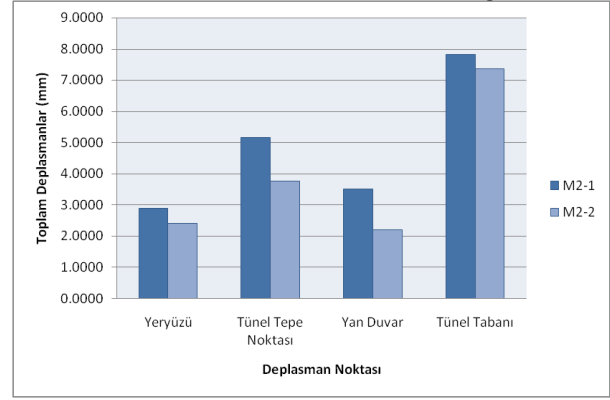
Şekil 13. M1-1 ve M1-2 modelleri için belirlenen toplam deplasman değerlerinin değişimi

M1-1 ve M1-2 modellerinde dört ölçüm noktasında da meydana gelen değerler karşılaştırıldığında;

✓ M1-1 modelinde maksimum deplasman miktarının 8.42 mm olarak tünel tabanında meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca tavanda 5.06 mm, yan duvarda 3.91 mm deplasman değerleri tespit edilmiştir. Tünel kazı sonrası desteklendiği takdirde tavanda oluşan deplasman değeri %36 oranında, yan duvarda %25 oranında azalma gözlenmiştir. Tünel tabanında meydana gelen azalma miktarı ise %7.25 olup, tabanda oluşan maksimum deformasyon değeri 7.81 mm'ye düşmüştür.

✓ Yeryüzünde meydana gelmesi öngörülen maksimum toplam deplasman değerleri karşılaştırıldığında destekleme sistemi uygulanması ile oluşacak deplasman değerinde %28 oranında azalma meydana gelecektir.

Modellemede M1-1 ve M1-2'de olduğu gibi öncelikle tünel kazısı sonrası, tünelde destekli ve destekli durumlarda meydana gelecek deplasman değerleri karşılaştırılmış olup, M2-1 ve M2-2 modelleri için toplam deplasman değerleri Şekil 14 'te sunulan grafikte değerlendirilmiştir.



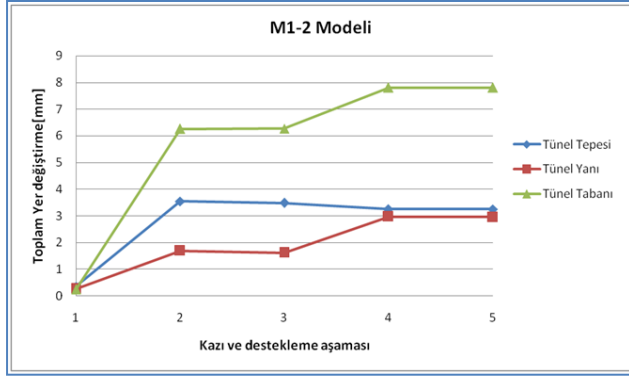
Şekil 14. M2-1 ve M2-2 modelleri için belirlenen toplam deplasman değerlerinin değişimi

M2-1 ve M2-2 modellerinde dört ölçüm noktasında meydana gelen değerler karşılaştırıldığında;

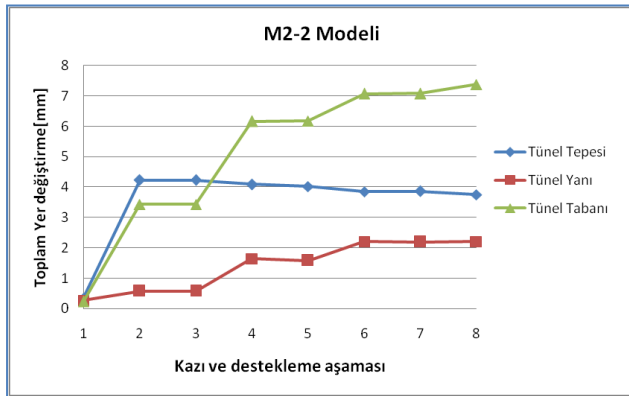
✓ M2-1 modelinde maksimum deplasman miktarının 7.84 mm olarak tünel tabanında meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca tavanda 5.17 mm, yan duvarda 3.51 mm deplasman değerleri tespit edilmiştir. Tünel kazı sonrası desteklendiği takdirde diğer bir ifadeyle M2-2 modelinde tavanda %27 ve yan duvarlarda oluşan deplasman değeri %37 oranında azalmıştır. Tünel tabanında meydana gelen azalma miktarı ise %6 olup, tabanda oluşan maksimum deformasyon değeri 7.38 mm'ye düşmüştür.

✓ Yeryüzünde meydana gelmesi öngörülen maksimum toplam deplasman değerleri karşılaştırıldığında destekleme sistemi uygulanması ile oluşacak deplasman değeri %17 oranında azalacaktır.

B2 ve B3 kaya sınıflarının kendi içinde destekli destekli durumlarının değerlendirilmesi yapılmış ve beklendiği gibi destekleme yapıldığında oluşacak deplasman değerlerinde azalma olmuştur. B2 ve B3 kazı ve destek sınıfları arasında; uygulanan kazı aşamaları ve taban kazısının geometrisi açısından fark bulunmaktadır. B2 ve B3 sınıflarında destekleme yapıldıktan sonra oluşan deplasmanlar arasındaki değişimin incelenmesi için söz konusu farklar göz önüne alınarak M1-2 ve M2-2 modelleri birbiri ile kıyaslanmıştır. M1-2 ile M2-2 modellerinin her ikisinde de kazı kademeli olarak gerçekleştirilmektedir. Fakat M1-2 iki kademede, M2-1 ise üç kademede kazılmaktadır. Bu sebeple her iki modelde oluşan yer değiştirmeler, kazı adımları göz önüne alınarak aşama aşama değerlendirilmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16 'da iki model için de aşamalara göre meydana gelen yer değiştirme değerleri verilmektedir.



Şekil 15. M1-2 modeli kazı aşamalarına göre tünel tepe noktası, yan duvar ve tünel tabanı için deplasman grafiği



Şekil 16. M2-2 modeli kazı aşamalarına göre tünel tepe noktası, yan duvar ve tünel tabanı için deplasman grafiği

Yapılan değerlendirmelere göre tünel tepe noktasından alınan deplasman değerinde kazı aşamasının artmasına bağlı olarak azalma olmadığı görülmektedir. Fakat tünel çevresinin genelinde kazı aşaması sayısının arttıkça oluşacak kazı boşluğunun azalmasına bağlı olarak meydana gelen deplasman değerlerinde azalma gözlenmektedir. Desteklemenin hızlı bir şekilde yapılması da deplasman değerlerini etkileyecektir.

M1-2 modelinde taban kazı geometrisi (invert kazısı) düz olacak şekilde yapılırken, M2-2 modelinde invert kazısı kemer şeklinde yapılmıştır. Bilindiği üzere yeraltı açıklıklarında geometri dairesele yaklaştıkça, oluşacak deformasyonlar da o kadar azalacaktır. Bu sebeple M2-2 modelinin tabanında meydana gelen yer değiştirme değerleri düz invert kazısı yapılmış olan M1-2 modelinden daha az olup, uygulanan invert desteklemesi tabanda meydana gelen deformasyonu %5.5 oranında azaltmıştır.

Sonuç olarak her iki modelde de oluşan deplasman

değerleri birbirine yakındır. İncelenen bölgede yapılan sınıflandırmada kayalar her ne kadar B2-B3 sınıfında çıkmış olsa da, yapılan modelleme çalışması özelinde, her iki sınıfta da tünel tabanında oluşan deplasman değeri dikkat çekmektedir. Bu durum ilerleme kazısı sırasında aynanın sürekli gözlem altında tutulmasını, ölçümlerin daha sık yapılmasını gerektirmektedir. Kazı sırasında beklenmeyen durumlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle sayısal modellemelerin daha sık yapılarak ilerleme sırasındaki güncel bilgilere göre sürekli revize edilmesi bize yol göstermekte hata yapma olasılığımızı düşürmektedir. Bölüm 2'de değinildiği gibi NATM'nin esnek olması her türlü zemin/kaya koşuluna anında uyum sağlaması kazı sırasında meydana gelecek beklenmedik olumsuzluklara anında müdahale etme olasılığı sunmaktadır.

#### 4 Sonuçlar

Tünel çalışmalarında, tünelin açılacağı formasyonun özelliklerinin değerlendirilmesi ve uygun tünel açma yönteminin belirlenmesi ekonomik ve teknik açıdan önem taşımaktadır. Bu açıdan kaya/zemin ortamında açılacak tünellerde projelendirmenin doğru bir şekilde yapılabilmesi için ortam özellikleri belirlendikten sonra modelleme çalışmaları yapılması gerekmektedir. Modelleme çalışmaları ile kazı sırasında oluşma ihtimali olan deformasyonlar belirlenebilmektedir. Özellikle günümüzde tercih edilen NATM'de yerinde gözlemler ile oluşması öngörülen aksilikler anında müdahaleler ile giderilebilmektedir.

Yapılan çalışmada NATM'nin kullanıldığı 2. Aşama İkmal İnşaatı Yapım İşi Üçyol-F.Altay güzergahında, açılan tüneller incelenmiştir. Tünel güzergahında gerçekleştirilmiş sondaj çalışmaları incelenmiş, bu sondajlardan alınan karot numuneleri üzerinde yaptırılmış laboratuvar çalışmaları ile, güzergah kayalarının fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapılmış deneyler ve arazi gözlemleri ile gerekli parametreler tespit edilmiştir. Güzergahta yer alan kayalar kaya kütle sınıflama sistemleri ile sınıflandırılmış, RQD ve Q sınıflama sistemlerine göre nitelendirilmiştir. Bölgede yer alan kayalar ÖNORM B2203'e göre sınıflandırılarak, yüzdesel dağılımları belirlenmiş, uygulanacak destekleme sistemleri çıkarılmıştır. Bu dağılımlar baz alınarak B kaya sınıfı modelleme için seçilmiştir. Seçilen bölge İzmirspor-Hatay İstasyonları arası olup, bu bölgede iki boyutlu modelleme yapılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde hedef tünelde meydana gelecek deplasmanların

incelenmesidir. Modelleme çalışmaları için iki boyutlu sayısal analiz programı olan Phase<sup>2</sup> V 7.0 programı kullanılmıştır.

Analiz sonuçları değerlendirilerek destekli ve destek-siz durumlar arasındaki tünel çevresinde yer alan 3 adet noktada ve yeryüzünde oluşacak yer değiştirme değerleri karşılaştırılmış, ayrıca B kaya sınıfında bulunan B2-B3 sınıfı destekleme sistemlerinin yarattığı farklar karşılaştırılmıştır. Her iki kaya sınıfı içinde destekli-desteksiz durumda değerlerdeki değişim yüzdesel olarak ifade edilmiştir. İnceleme yapılan güzergahta açılan tünellerde uygulanacak destekleme elemanlarına göre yeryüzünde meydana gelecek yer değiştirmelerin literatürde belirtilen izin verilebilir sınırlar dahilinde kaldığı görülmüştür. Aynı formasyon özellikleri için tünel yanı ve tabanında B3 sınıfında oluşan deplasman değerleri B2 sınıfına nazaran daha düşük çıkmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışmada Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)'nin farklı zemin/kaya ortamında kullanımına yönelik avantajları göz önüne alınarak, bu yöntemin kullanılacağı tünel inşalarında uygulama kısmına geçmeden evvel sayısal analiz yöntemleri kullanılarak modelleme çalışmalarının yapılması ile tünel çevresi ve yeryüzünde meydana gelecek etkilerin tespit edilmesinin önemli olduğuna değinilmiştir. Yapılacak modelleme çalışmaları bir ön değerlendirme niteliği taşımakta olup, meydana gelebilecek etkiler hızlı bir şekilde tespit edilerek kazı sırasında nelere dikkat edileceği belirlenmiş olacaktır. Kazı sırasında o anki koşullar gözetilerek yapılacak değerlendirmelerde kaya sınıfı değişiklik gösterebileceğinden, analizler ile tespit edilen yer değiştirme değerleri de değişecektir. Bu durumda NATM'nin esnekliğinden faydalanarak uygulanacak destekleme sistemlerinde değişiklik yapılabilir.

## 5 Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde gerekli desteği sağlayan başta İzmir Büyükşehir Belediyesi olmak üzere İzmir Hafif Raylı Sistem Projesinde emeği geçen herkese teşekkür eder.

## 6 Kaynaklar

[1] Rabcewicz L., The New Austrian Tunneling Method, Part one, Part Three, Water Power,-. 1965;

19-24.

[2] Köse, H.; Gürgeç, S.; Onargan, T.; Yenice, H.; Aksoy, C. O., Tünel ve Kuyu Açma, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 256, ISBN 975-441-234-0, İzmir, 2007; 309 pp.

[3] Kökçüoğlu H., Sonlu Elemanlar Metodu İle Tünel Modellemesi ve Bir Uygulama, İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2006.

[4] Yüzer, E.; Öztaş, T.; Erdoğan, M.; Vardar, M.; Türk, N.; Dumlu, O.; Mahmutoğlu, Y.; Koca, Y.; Eyüboğlu, R.; Koçak, C.; Özorul, A., İzmir Belediyesi İzmir Metro Sistemi (İZRAY) Fahrettin Altay - Basmane Güzergahının (1. Aşama) Mühendislik Jeolojisi, Rapor no: 9210-TR-03., İTÜ Yerbilimleri ve Yeraltı Kaynakları Uyg.-Araştırma Merkezi, İstanbul, 1993.

[5] İzray, İ.B.B. İzmir Hafif Raylı Sistemi, 2. Aşama (2. Kısım) Ön Jeoteknik Değerlendirme Raporu, 1997.

[6] ISRM (International Society for Rock Mechanics), Rock Characterization, Testing and Monitoring, International Society of Rock Mechanics Suggested Methods, Edited by E.T. Brown, Pergamon Press., Oxford, 1981; 211 pp.

[7] Arnoğlu, E., Tünel Dersi 6. Bölüm – Klasik kazı yöntemleri (Kazı şekilleri, iksa sistemleri ve kazı makinelerinin – kollar ve hidrolik kırıcılar – kapasiteleri), Yapı Merkezi Merkezi ARGE Bölümü, 2009.

[8] Karayolu Teknik Şartnamesi, (Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü Ve Tüneller, Üstyapı Ve Çeşitli İşler), T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2006.

[9] İzmir Hafif Raylı Sistemi Jeoteknik Bilgilendirme Çizelgesi, İzmir Büyükşehir Belediyesi, İzmir, 1993.

[10] Ulusay, R.; Sönmez, H., Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, Güncellenmiş ve Genişletilmiş 2. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2007; 292 pp.

[11] Koca Y. Site Investigation, Doktora dersi ders notları, 2012.

[12] Attawell, P.B.; Yeates J.; Selby A.R., Soil Movement Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures, New York, 1986.

[13] Bieniawski, Z.T., Engineering Rock Mass Classifications, Mc Graw Hill; John Willey and Sons, Newyork, 1989; 237 pp.

[14] Barton,N.; Lien, R.; Lunde; J., Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics. 1974; 6 (4), 189-239.

[15] Grimstad, E.; Barton, N., Updating the Q-system for NMT, Proceeding International Symposium on Sprayed Concrete, Oslo; Norwegian Concrete Association. 1993; 89, 30-36.

[16] Deere, D. U.; Peck, R.B.; Parker, H.; Monsees, J.E.; Schmidt, B., Design of Tunnel Support Systems, Highway Res. Rec. No: 339, Illinois, 1970; 26-33.

[17] İzmir Hafif Raylı Sistemi Projesi 2. Aşama İnşaatı Güzergah Jeolojisi Haritası ve Jeoteknik Profili, STFA Mühendislik Anonim Şirketi. 2006.

[18] İzmir Hafif Raylı Sistemi Projesi 2.Aşama İnşaatı Delme Tünel Tip 1 Zemin Tipi B2 Kazı ve Ankraj Detayları Uygulamaya Esas Proje, STFA Mühendislik Anonim Şirketi, 2004.

[19] İzmir Hafif Raylı Sistemi Projesi 2. Aşama İnşaatı

Delme Tünel Tip 1 Zemin Tipi B3 Kazı ve Ankraj Detayları Uygulamaya Esas Proje, STFA Mühendislik Anonim Şirketi, 2004.

[20] Rocscience, Phase2, Version 7, Two Dimensional Finite Element Program for Geotechnical Analysis., Rocscience Inc., Toronto, ON, Canada, 2008.

[21] Rocscience, RocData, Version 4.0, Program for Analysis of Rock and Soil Strenght Data, and the Determinaton of Strenght Envelopes and Other Physical Parameters, Rocscience Inc., Toronto, ON, Canada, 2004.