





## PIRINKAYALAR TÜNELİ (ERZURUM, TÜRKİYE) GİRİŞ VE ÇIKIŞ PORTALLARININ SAYISAL MODELLENMESİ: ÖRNEK VAKA ÇALIŞMASI

<sup>1,\*</sup>Alaattin SAKCALI , <sup>2</sup>Muhammed Said KAYA , <sup>3</sup>Muhammet ESER 

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Çimberton Hazır Beton ve Prefabrik Yapı Elemanları San. ve Tic. A.Ş., Malatya, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Kırtur Turizm İnş. Taah. Elek. San. ve Tic. Ltd. Şti, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>1</sup> [alaattinsakcali@atauni.edu.tr](mailto:alaattinsakcali@atauni.edu.tr), <sup>2</sup> [m.saidkaya31@gmail.com](mailto:m.saidkaya31@gmail.com), <sup>3</sup> [muheser@gmail.com](mailto:muheser@gmail.com)

(Geliş/Received: 12.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 31.10.2021)

**ÖZ:** Kaya kütlesi sınıflama sistemleri kaya kütlelerinin mekanik davranışını karakterize etmek için kullanılmasının yanı sıra tünel kazısında kullanılacak tahkimat tasarımı için de öneriler sunmaktadır. Geçmişten günümüze birçok tünel projesinde kaya kütlesi sınıflama sistemlerindeki önerilerle tahkimat tasarımı yapılmıştır. Tünel deformasyonlarının sürekli olarak izlenmesi ve tahkimat durumunun tespiti, uygulayıcılar için zor ve maliyetli olabilmektedir. Pirinkayalar tüneli Doğu Karadeniz'i Doğu Anadolu'ya bağlayan Artvin-Erzurum karayolu üzerindeki tünellerden biri olup tahkimat tasarımında NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ile önerilmiş tahkimat sistemi kullanılmıştır. Proje aşamasında planlanan tahkimat sistemi kazı sırasında bazı bölgelerde yine kaya kütlesi sınıflama sistemine bağlı olarak değiştirilmiştir. Tünellerde giriş ve çıkış portallarının kazısı ve tercih edilen tahkimat sisteminin analizi muhtemel sorunların önlenmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portalları sonlu farklar yöntemine dayalı olarak analiz gerçekleştiren FLAC3D programı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen bu örnek vaka çalışması ile, bir tünelde ampirik yöntemle tasarlanan tahkimat sisteminin durumu hakkında bilgi edinmek için yardımcı araç olarak kullanılan sayısal modelleme sonuçlarına değinilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, Kazı, Sayısal modelleme, Tahkimat tasarımı, Tünel

### Numerical Modelling of Entrance and Exit Portals in Pirinkayalar Tunnel (Erzurum, Turkey): A Case Study

**ABSTRACT:** Rock mass classification systems are used to characterize the mechanical behavior of the rock mass, as well as suggestions for the support design to be used in tunnel excavation. In many tunnel projects from past to present, the support has been designed with the suggestions in the rock mass classification systems. Continuous monitoring of tunnel deformations and determination of support condition can be difficult and costly for practitioners. Pirinkayalar tunnel is one of the tunnels on the Artvin-Erzurum highway that connects Eastern Black Sea to Eastern Anatolia and the support system proposed with NATM (New Austrian Tunneling Method) was used. The support system planned at the project stage was changed again depending on the rock mass classification system during the excavation. Analysis of the excavation and preferred support system in the entrance and exit portals of tunnels prevent possible problems. In this study, the entrance and exit portals of the Pirinkayalar tunnel are modeled in 3D using the FLAC3D based on the finite difference method. With this case study, numerical modeling results, which are used as an auxiliary tool to obtain information about the state of the empirically designed support system in a tunnel, are mentioned.

**Key Words:** Rock mass classification systems, Excavation, Numerical modelling, Support design, Tunnel



Sınıflama sistemleri ön tahkimat tasarımı için iyi bir araçtır. Fakat tercih edilen tahkimatlı kazı sonrası tünel çevresinde oluşacak deformasyonun belirlenmesi ve tahkimat durumu hakkında bilgi edinmek için modellemenin bir araç olarak kullanılması uygulayıcıya büyük fayda sağlayacaktır. Bunun yanı sıra tünel giriş ve çıkış portallarında tünel çevresindeki kaya kütlesi ve uygulanacak tahkimat sisteminin davranışı iyi analiz edilerek olası problemlerin önüne geçilebilecektir. Tünel kazısı ve tahkimat sistemlerinin davranışı sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi farklı analiz yöntemleri kullanılarak modellenebilir. Literatürde ön tahkimat tasarımında kaya kütlesi sınıflama sisteminin kullanıldığı ve tünel çevresindeki kaya kütlelerinin ve tercih edilen tahkimat sisteminin davranışının sayısal olarak modellendiği birçok çalışma vardır.

Kontogianni ve Stiros (2002) çalışmalarında Yunanistan'da açılan 5 farklı tünel projesini ele alarak farklı kaya kütlelerinde açılan tünel kazılarını sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak modellemişlerdir. Modellerden elde edilen deformasyon değerlerini tünellerden alınan ölçüm değerleriyle karşılaştırarak tünel kazısında deformasyon tahmini için modellemenin güvenli olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Sari ve Pasamehmetoglu (2004) çalışmalarında Bilecik-İstanbul karayolu üzerinde bulunan Kaletepe tüneli güzergâhındaki kaya kütlelerini Q ve RMR ile karakterize etmişler ve bu sistemlerle yapılan önerileri kullanarak ampirik ön destek tasarımı yapmışlardır. Önerilen bu destek sistemleri ile gerçekleştirilen tahkimatlı tünel kazısını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişler ve tünel çevresindeki yenilme derecesi ve deformasyon davranışlarını tahkimatsız tünel kazısı modelleri ile karşılaştırmışlardır. Basarir (2006) çalışmasında Ankara'nın kuzeydoğusundaki Sulakyurt barajı için açılacak derivasyon tüneline kazısında kullanılacak ön tahkimat sisteminin tasarımında Q sistemi ile sunulmuş öneriler tercih edilmiştir. Tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak açılacak tünel ve bu tünellerin tahkimatsız olarak açılması durumunda tünel çevresinde oluşacak gerilme, deformasyon dağılımı ve plastik zon yarıçapı değişimi sonlu elemanlar ile yapılan modeller üzerinden incelenmiştir. Çalışmada tünel kazıları için tahkimat tasarımında ampirik, analitik ve sayısal modelleme yöntemlerinin birleştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Gurocak ve diğ. (2007) çalışmalarında Malatya'nın kuzeyindeki Boztepe baraj sahasındaki bir derivasyon tüneline kazısında tercih edilecek tahkimat sisteminin tasarımında RMR ve Q sisteminin önerilerini göz önünde bulundurmışlardır. Tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği gerilme, deformasyon ve plastik zon yarıçapı gibi parametreler üzerindeki etkisini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile tahkimatlı ve tahkimatsız tünel kazısını modellemişlerdir. Tahkimat tasarımının güvenilirliği için ampirik, analitik ve sayısal modellemenin birlikte kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Genis ve diğ. (2007) çalışmalarında Yenicaga-Zonguldak karayolundaki Dorukhan tüneli güzergâhındaki kaya kütlesi sınıfına göre tercih edilecek tahkimat sistemini Q, RMR, R<sub>Mi</sub> ve NATM ile inceleyip kazı ve tahkimat sistemi önerileri sunmuşlardır. Önerilen destek sistemlerinin performanslarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sari ve diğ. (2008) çalışmalarında Bilecik-İstanbul karayolu üzerinde inşa edilen bir tüneli ele alarak ampirik yöntemle tasarlanan tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği deformasyon ve yenilme üzerindeki etkilerini sayısal modeller ile analiz etmişlerdir. Sayısal analiz sonuçlarının ampirik değerlerle desteklendiğinde mantıklı ve güvenilir olduğu sonucuna varmışlardır. Sopaci ve Akgun (2008) çalışmalarında Samsun-Ordu-Giresun hattı üzerinde yer alan ve Ordu çevre yolunda ikiz tünel olarak planlanan Boztepe tüneli güzergâhındaki kaya kütlelerini sondaj verileriyle karakterize etmiş ve Q sistemine göre tercih edilen tahkimat sistemini kullanarak modelleme yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı gerçekleştirdikleri tahkimatlı ve tahkimatsız kazı modelleri ile deformasyon dağılımlarına tahkimat sisteminin etkisini incelemişlerdir. Özsan ve diğ. (2009) Ankara metrosunun Mecidiye ve Gazino istasyonları arasındaki tünel kazısında Q, RMR ve NATM'a göre tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresindeki deformasyon dağılımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayalı modelleme çalışmaları yapmışlardır. Tahkimat tasarımında ampirik yöntemin sayısal modelleme ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Gurocak (2011) tarafından Malatya'nın doğusundaki Kapıkaya baraj sahasındaki bir derivasyon tüneli için RMR ve R<sub>Mi</sub> sınıflama sistemlerine bağlı olarak önerilen tahkimat sisteminin plastik zon değişimi üzerindeki etkisi sonlu elemanlar ile modellenerek analiz edilmiştir. Akgun ve diğ. (2014) tarafından Giresun'da Karadeniz kıyısı boyunca uzanan

karayolunun iyileştirilmesi amacıyla inşa edilen Giresun-Tirebolu arasındaki Geçilmez tüneline Q, RMR ve NATM ile gerekli tahkimat sisteminin önerildiği tünel bölümleri sonlu elamanlara dayalı olarak modellenmiştir. Tahkimatlı ve tahkimatsız kazı modelleri ile ampirik olarak tercih edilen tahkimat sisteminin deformasyon dağılımı ve yenilmeler üzerindeki etkisine bakılmıştır. Yalcin ve diğ. (2015) çalışmalarında Malatya-Elazığ arasındaki ikiz tünel olarak planlanan Kömürhan karayolu tüneline RMR ve RMI ile tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak gerçekleştirilen tünel kazısını modellemişlerdir. Tahkimatlı ve tahkimatsız olarak gerçekleştirdikleri tünel modelleri ile tercih edilen tahkimat sistemlerinin plastik zon üzerindeki etkisine bakmışlardır. Agan (2016) çalışmasında Suruç su tüneline çevresindeki kaya kütlelerinin sıkışma potansiyelini ampirik, analitik ve sayısal modelleme yöntemi ile incelemiştir. Kanik ve Gurocak (2018) Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerindeki ikiz tünel olarak açılan Maçka tüneline için Q, RMR ve RMI ile ampirik ön tahkimat tercihleri sunmuşlardır. Tercih edilen tahkimat sistemlerinin plastik zon ve maksimum deformasyon üzerindeki etkisini görmek için tünel kazılarını tahkimatlı ve tahkimatsız olarak modellemişlerdir. Optimum tahkimat sisteminin tasarımında ampirik ve sayısal modelleme yöntemlerinin birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Kaya ve Bulut (2019) çalışmalarında Artvin'in Hopa-Borçka ilçeleri arasında planlanan Cankurtaran karayolu tüneline kullanılacak tahkimat sistemini Q sınıflama sistemine göre tasarlamışlardır. Tercih edilen bu tahkimat sisteminin deformasyon ve plastik zon etkisine bakmak için tahkimatlı ve tahkimatsız tünel kazıları sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak 2 ve 3 boyutlu modellenmiştir. Kaya ve Sayin (2019) çalışmalarında Rize'nin güneyinde bulunan Rize çevre yolu ile Küçükçayır karayolunu birleştirmek amacıyla planlanan Salarha tüneline için Q sınıflama sistemine bağlı tahkimat sistemi tasarlamışlardır. Tercih edilen tahkimat sisteminin plastik zon ve maksimum deformasyon üzerindeki etkisini 2 ve 3 boyutlu modelleme çalışmaları ile incelemişlerdir. Sayısal modellemeyi ampirik yöntemle yapılan tahkimat tasarımının etkisini incelemek için bir yardımcı araç olarak kullanmışlardır.

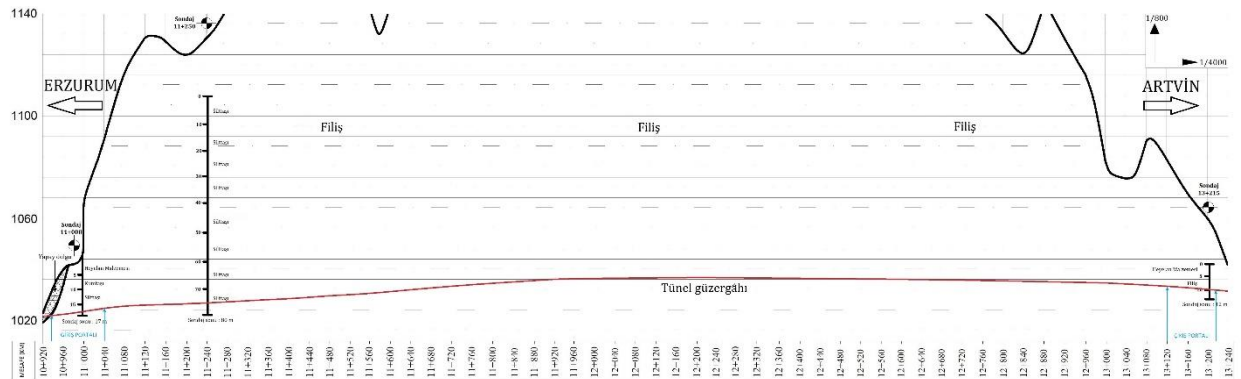
Bu çalışmada, Pirinkayalar tüneline giriş ve çıkış portalları ele alınmış ve bu bölümler sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelleme çalışmalarında uygulanan tünel kazısı ve tercih edilen tahkimat sistemi bire bir uygulanmıştır. Tahkimatlı tünel kazısı modelinde giriş ve çıkış portallarındaki tünel çevresindeki deformasyon dağılımlarının yanı sıra zonların blok durumu ve maksimum asal gerilme konturları da incelenmiştir. Giriş ve çıkış portallarındaki uzunlamasına deformasyon profillerinin (LDP) incelenmesi için ise bu bölümler tahkimatsız olarak modellenmiştir. Ayrıca, çalışma içerisinde çıkış portalında belirlenen bir noktada tünel kazısı yapılırken 22 gün boyunca alınan tavandaki deformasyon ölçümlerine yer verilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### Pirinkayalar Tüneli Jeolojik ve Geoteknik Özellikleri (Geological and Geotechnical Properties of Pirinkayalar Tunnel)

Tortum gölü kıyısı boyunca uzanan yolun kısaltılması ve daha rahat bir yolculuk için düşünülen Pirinkayalar tüneline kazısının Çağdet dağı altından geçmesi planlanmıştır. Pirinkayalar tüneline güzergâhının Erzurum tarafındaki giriş portalının yakınlarında sedimentler kökenli karbonatlı kireçtaşı ihtiva eden Olurdere formasyonu ile karşılaşmaktadır. Fakat tünel güzergâhının tamamı ana oluşumu sedimentler kökenli pelajik kireçtaşı olan Berdiga formasyonundan oluşmaktadır. Çağdet dağı'nın üst bölgelerinde ise heyelan malzemesi bulunmaktadır (Kopar ve Çakır, 2013; MTA GeoScience Map Viewer and Drawing Editor, 2019).

Zorlu topoğrafik koşullar nedeniyle sadece 3 farklı yerde sondaj yapılabilmiş ve alınan bu sondaj verileri kullanılarak tünel kazısı ve tahkimat sistemi ampirik olarak planlanmıştır. Erzurum tarafı olan tünel giriş portalı 10+940 ile 11+040 km arası tanımlanmış olup 11+000'dan alınan sondaj verilerinden RMR değeri 64; Q değeri 2,5; GSI değeri ise 52 olarak belirlenmiştir. Artvin tarafındaki tünel çıkış portalı (13+120 ile 13+225 km) için 13+215 km'de yapılan sondaj verileri değerlendirilmiş ve kaya kütlelerinin RMR değeri 57; Q değeri 1,458; GSI değeri 39 olarak belirlenmiştir (PTP, 2019). Tünel güzergâhının topoğrafik haritası ve sondaj yerleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tünel güzergâhının topoğrafik haritası ve sondaj yerleri

Figure 2. The topographic map of the tunnel route and drilling locations

### Giriş ve Çıkış Portallarının Kazısı ve Tahkimat Sistemleri (Excavation and Support Systems of Entrance and Exit Portals)

Modifiye at nalı kesitli olarak açılacak tünel üst ve alt yarı kazısı olmak üzere iki aşamada planlanmıştır. Giriş portalında kazı patlatmalı kazı olarak gerçekleştirilmekte iken çıkış portalındaki kazıda ise patlatmalı kazıya gerek duyulmamıştır. Giriş portalında üst yarıda açılan 90-100 delik ile patlatma gerçekleştirilirken alt yarıda 50 delik ile patlatmalı kazı yapılmıştır.

Tünel giriş portalının 10+940 ile 10+982 km arasında kaya sınıfı B3-Ö1 olarak tanımlanmış kazı ilerlemesi 0,5-1 m iken tahkimat sistemi olarak iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 0,5 m aralıkla 200 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 6 m'lik  $\phi 28$  SN bulon kullanılmıştır. 10+982 ile 11+028 km arasında ise kaya sınıfı B3-Ö2 olup 1-2 m'lik kazı ilerlemesinin ardından iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 1,5 m aralıklarla 140 ve 120 NPI'lık çelik iksa, püskürtme beton, 10-11 adet 4 m'lik  $\phi 28$  SN bulon tercih edilmiştir.

Çıkış portalının 13+225 ile 13+202 km arası kaya sınıfı B3-Ö1 iken 0,75 m kazının ardından iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 200 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 6 m IBO bulon kullanılmıştır. Çıkış portalının 13+202 ile 13+107 km arası kaya sınıfı B2-Ö olup 1 m'lik kazı ilerlemesi yapılmış ve iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 120 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 4 m  $\phi 28$  SN bulon kullanılmıştır (PTP, 2019).

### Kaya Kütleli ve Tahkimat Sistemlerinin Özellikleri (The Properties of the Rock Mass and Support Systems)

Eşitlik 1'de verilen genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme kriterinde kaya kütleli özellikleri  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  değeri ile tanımlanmış olup bu değerleri Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen Eşitlik 2-4 ile belirlemek mümkündür.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i e^{\left( \frac{GSI-100}{28-14D_f} \right)} \quad (2)$$

$$s = e^{\left( \frac{GSI-100}{9-3D_f} \right)} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

Eşitliklerde;  $\sigma'_1$  değeri en büyük,  $\sigma'_3$  ise en küçük etkin asal gerilmeleri,  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  değerleri Hoek-Brown kaya kütleli sabitlerini,  $\sigma_{ci}$  değeri kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımını,  $m_i$  ise kaya

malzemesinin Hoek-Brown sabitini vermektedir. Hesaplamalarda Hoek (2007) tarafından önerilen değerler göz önünde bulundurularak kireçtaşı için  $m_i$  değeri 10 tercih edilmiştir. GSI jeolojik dayanım endeksi,  $D_f$  örselenme faktörü olup çok iyi kalitede patlatmalı kazı için hesaplamada bu değer 0 olarak alınmıştır (Hoek, 2007).

Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün ( $E_m$ ) belirlenmesinde; Bieniawski (1978) tarafından önerilen Eşitlik 5, Grimstad ve Barton (1993) tarafından önerilen Eşitlik 6, Read ve diğ.. (1999) tarafından önerilen Eşitlik 7, Hoek ve diğ. (2002) tarafından önerilen Eşitlik 8 ve Heok (2007) tarafından önerilen Eşitlik 9 kullanılmış olup bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

$$RMR > 50 \text{ için; } E_m = 2RMR - 100 \quad (5)$$

$$Q > 1 \text{ için; } E_m = 25 \log Q \quad (6)$$

$$E_m = 0,1 \left( \frac{RMR}{10} \right)^3 \quad (7)$$

$$E_m = \left( 1 - \frac{D_f}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (8)$$

$$E_m = 100 \left( \frac{1 - D_f/2}{1 + e^{((75 + 25D_f - GSI)/11)}} \right) \quad (9)$$

Eşitliklerde; RMR, Q ve GSI ilgili sınıflandırma için değerleri,  $D_f$  örselenme faktörü,  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin dayanımını vermektedir. Modellerde kaya kütleleri 'model Hoek-Brown' ile tanımlanmış olup kayma (G) ve hacimsel esneme (K) modülü sırasıyla Eşitlik 10 ve 11 ile hesaplanmıştır (Itasca, 2005). Bu çalışmada kaya kütlelerinin Poisson oranı ( $\nu$ ) ortalama bir değer olarak 0,25 alınmıştır.

$$G = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

$$K = \frac{(1+\nu)G}{(3/2)(1-2\nu)} \quad (11)$$

Erzurum tarafındaki giriş portalındaki kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ortalama olarak 60 MPa, Artvin tarafındaki çıkış portalının tek eksenli basınç dayanımı ise ortalama 55 MPa olarak belirlenmiştir. Modellerde kullanılan kaya kütleleri özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Kaya kütlelerinin ortalama birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) ise 2.65 t/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

Giriş ve çıkış portallarında farklı tahkimat sistemleri tercih edilmiş olup tahkimat sistemlerinde kullanılan çelik iksa, çelik hasır, püskürtme beton ve kaya civatalarının özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019). Kullanılan çelik iksanın kayma (G) ve hacimsel esneme (K) modülü ise sırasıyla 80,77 MPa ve 175 MPa'dır.

**Çizelge 1.** Kaya kütlelerinin mekanik-elastik özellikleri

*Table 1. Mechanical-elastic properties of rock mass*

Portal	a	$m_b$	s	$\sigma_{ci}$ (MPa)	G (GPa)	K (GPa)
Giriş	0,50499	1,80092	0,00483	60	7,29	12,14
Çıkış	0,51217	1,13203	0,00114	55	4,06	6,76

**Çizelge 2.** Tahkimat sisteminde kullanılan elemanların özellikleri (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019)*Table 2. The properties of the elements used in the support system (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019)*

Tahkimat elemanları	Elastisite modülü (E, GPa)	Poisson oranı (ν)	Püskürtme beton kal. (t <sub>sh</sub> , m)	Bulon kes. alanı (A, m <sup>2</sup> )	Yenilme dayanımı (σ <sub>y</sub> , MPa)	Maks. çek. dayanımı (σ <sub>tu</sub> , MPa)
120 NPI iksa	210	0,3	-	-	-	-
φ221/221 çelik hasır	210	0,3	-	-	517	650
Püskürtme beton	22	0,25	0,15	-	-	-
φ28 SN bulon	210	0,3	-	6,15E-4	490	640
R32 N IBO bulon	210	0,3	-	3,96E-4	626	723

**Sayısal Modelleme (Numerical Modelling)**

Pirinkayalar tünelinin giriş portalında 10+940 ile 11+040 km arası ortalama 30 m, çıkış portalının 13+120 ile 13+225 km arası ortalama 35 m derinlikte kazılmıştır. Derinlikle artan dikey gerilme (σ<sub>v</sub>) değeri Eşitlik 12 kullanılarak belirlenmiştir (Brown ve Hoek, 1978).

$$\sigma_v = \gamma H \quad (12)$$

Eşitlikteki; H kazı derinliği (m), γ ise dikey gerilme değişimini temsil eden kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı (MN/m<sup>3</sup>)'dir. Derinlik artışı ile hidrostatik koşullara geçme eğilimi söz konusu iken sığ derinlikler için yatay gerilme (σ<sub>H</sub>) Sheorey ve diğ. (2001) tarafından önerilen Eşitlik 13 ile hesaplanabilir (Sari ve diğ., 2008).

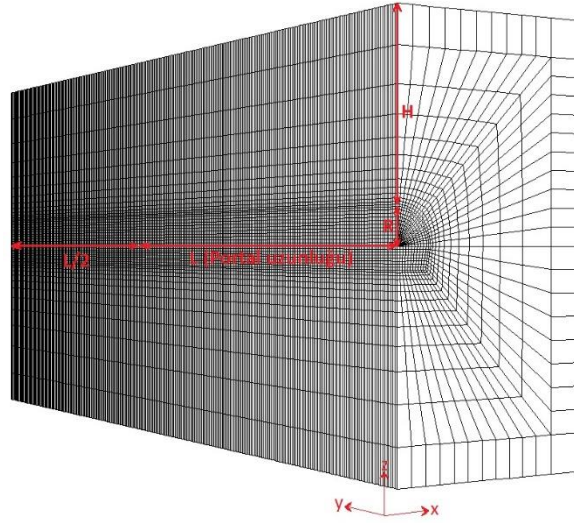
$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{\beta \cdot E_m \cdot G_H}{1-\nu} (H + 1000) \quad (13)$$

Eşitlikteki; ν Poisson oranını, β her derecede 8E-6/°C ile doğrusal bir değişim gösteren termal genleşme katsayısını, E<sub>m</sub> kaya kütlelerinin deformasyon modülünü (GPa), G<sub>H</sub> değişen derinlik için 0,024 °C/m değişim gösteren jeotermal katsayısını, H kazı derinliğini (m) vermektedir. İlk arazi gerilmesi (σ<sub>0</sub>) ise Eşitlik 14 ile belirlenebilir (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000; Ya ve diğ., 2018).

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \quad (14)$$

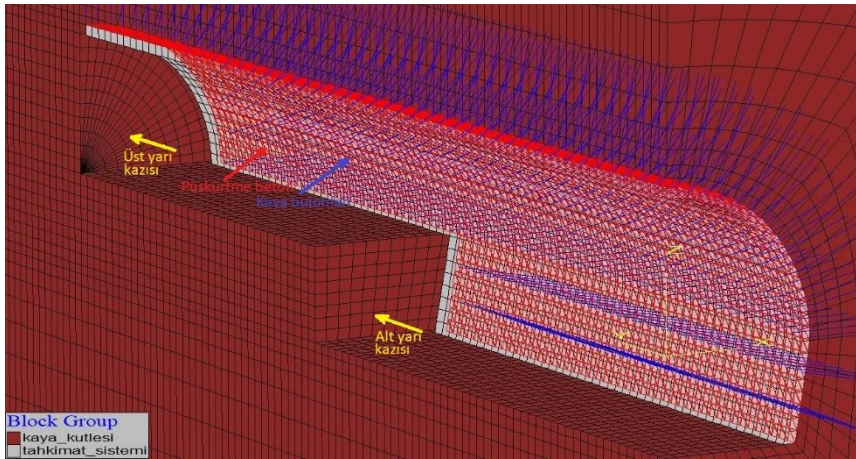
Giriş portalı için dikey (σ<sub>v</sub>), yatay (σ<sub>H</sub>) ve başlangıç gerilmesi (σ<sub>0</sub>) sırasıyla 0,795; 0,270 ve 0,532 MPa olarak belirlenmiştir. Çıkış portalı için ise bu değerler sırasıyla 0,928; 0,310 ve 0,619 MPa olarak hesaplanmıştır.

Simetrik durum söz konusu olduğu için yarı model oluşturulmuştur. Modelin sınırlarına yatay ve düşey gerilmeler uygulanmış, diğer yüzeyler dik yönde sınırlandırılmıştır. Model ağ boyutları tünelden dış yüzeye doğru artacak şekilde oluşturulmuştur. Giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen modellerin kazı öncesi zon ve grid noktası sayısı sırasıyla 245100 ve 256452'dir. Kazı öncesi model koşulları Şekil 3'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Kazı öncesi model koşulları  
*Figure 3. Model conditions before excavation*

Sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D ver. 3.0 ile Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portallarının kazısı bire bir modellenmiştir (Itasca, 2005). Giriş ve çıkış portallarındaki kazı adımı kadar üst yarı kazısı 'model null' ile gerçekleştirilip tahkimat sistemi kurulmuştur. Tünel alt yarı kazısı tünel yüksekliğinin yaklaşık 2 katı kadar mesafe sonrası (18 m) üst yarının gerisinden gerçekleştirilmiştir. Alt yarı kazısı da gerçek duruma benzer olarak modellenmiştir. Üst yarı ve alt yarının 1 kazı adımlık ilerlemesi sonrası denge durumuna gelinceye kadar çözümlene yapılmıştır. Daha sonra diğer bir kazı adımına geçilmiş ve benzer kazı ve tahkimat döngüsü ile portal uzunluğu kadar ilerlenmiştir. Modelleme sürecinde kazı ve tahkimat sisteminin kurulum aşamaları Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Model kazı ve tahkimat sistemi kurulum aşamaları  
*Figure 4. The stages of model excavation and support system installation*

## DEĞERLENDİRMELER (ASSESSMENTS)

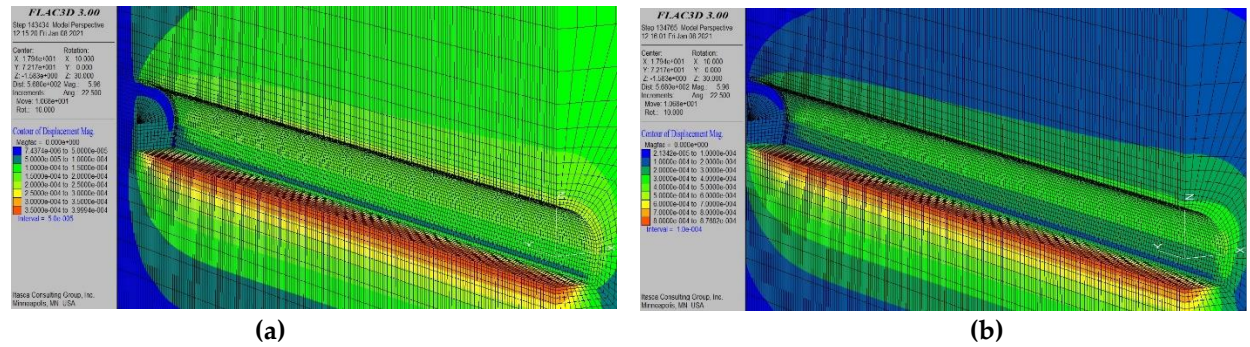
### Model Sonuçlarının İncelenmesi (Examining of Model Results)

Tünel projelerinde tahkimat sistemi tercihi yapılırken kaya kütlesi sınıflama sistemlerince önerilen ampirik tasarım sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle tünel giriş ve çıkış portallarında tercih edilen tahkimat sisteminin uygunluğu büyük önem taşımaktadır. Bu bölgelerde tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresindeki deformasyon dağılımı ve gerilmedeki değişiminin sayısal modelleme ile analizi pratik



oluşunun yanı sıra ekonomik olarak da fayda sağlayacaktır. Pirinkayalar tünel projesinin giriş ve çıkış portallarında tercih edilen tahkimat sistemlerinin tünel çevresindeki kaya kütlelerine etkilerinin incelenmesi amacıyla bu bölümler gerçek tünel koşullarına göre modellenmiştir.

Giriş ve çıkış portalı için gerçekleştirilen 3 boyutlu modelleme sonucu tünel aynası çevresinde oluşan deformasyon dağılımları Şekil 5'te verilmiştir. Giriş portalı için gerçekleştirilen modelin deformasyon dağılımlarına bakıldığında (Şekil 5 (a)), bu koşullardaki bir tünel kazısında tünel aynası çevresinde maksimum 0,40 mm'lik bir deformasyon beklendiği görülmektedir. Tavanda gerçekleşmesi beklenen maksimum deformasyonun tercih edilen tahkimat sistemi ile engellendiği ve tünel tabanına aktarıldığı görülmektedir. Giriş portalı için yapılan model sonuçları uygulanan tahkimat sisteminin doğru bir tercih olduğunu göstermektedir.



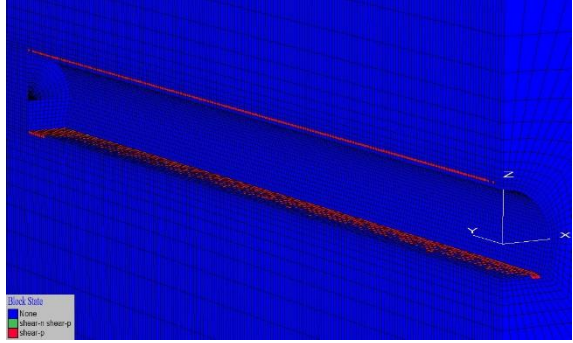
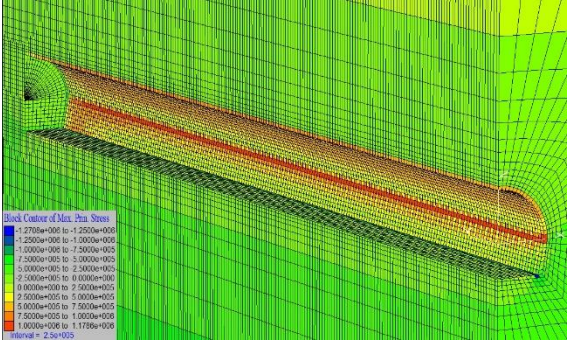
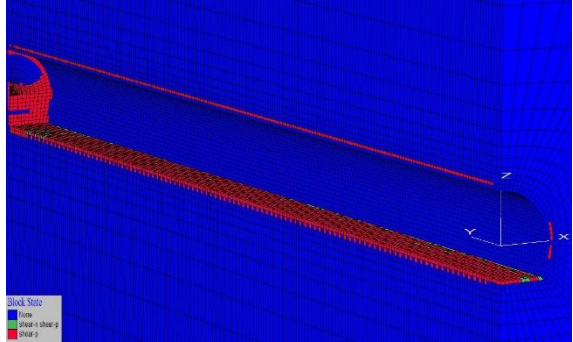
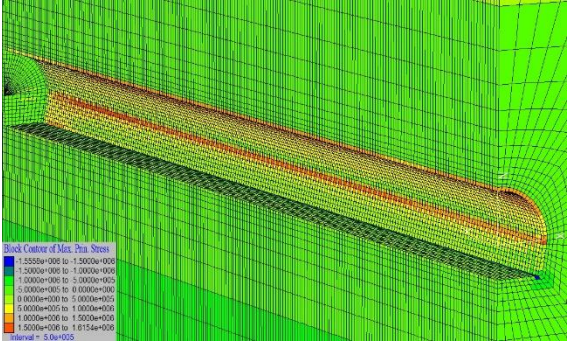
Şekil 5. Tünel aynası çevresinde deformasyon dağılımları; a) giriş portalı, b) çıkış portalı  
Figure 5. The deformation distributions around the tunnel face; a) at entrance portal, b) at exit portal

Şekil 5 (b)'den çıkış portalı için tünel aynası çevresinde oluşan deformasyon dağılımlarına bakıldığında maksimum deformasyon 0,88 mm ile tabanda meydana gelmiş olup tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde tahkimat uygulanan bölgelerdeki deformasyonları önlediği görülmektedir. Tahkimat sisteminin tabanda oluşan deformasyona ise kısmen bir etkisi söz konusu olmuştur.

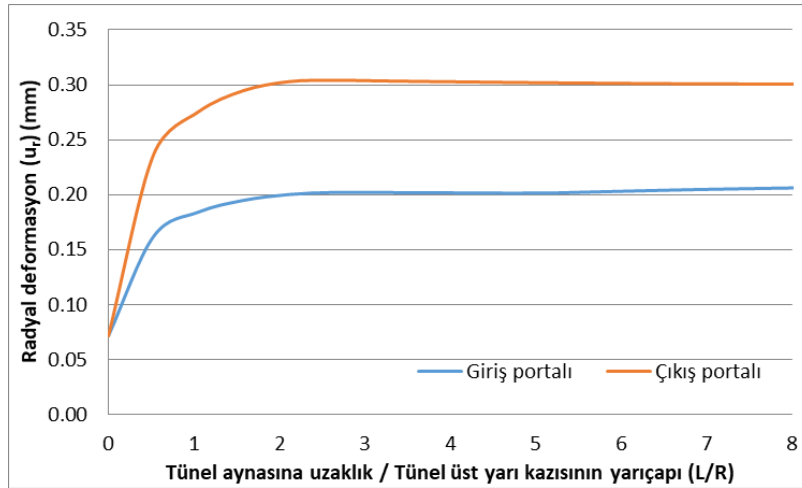
Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen modellerden zonlardaki plastik durum ve maksimum asal gerilme konturları Çizelge 3'te verilmiştir. Giriş portalının blok durumuna bakılacak olursa makaslama kuvvetlerinden dolayı yenilme gerçekleştiği ve artık yenilme durumunun söz konusu olmadığı (shear-p) görülmektedir. Yani bu bölge için tercih edilen tahkimat sistemi ile tünel duvarında bir yenilme gerçekleşmeyecektir. Çıkış portalı için gerçekleştirilen model blok durumu ise tünel aynası çevresinde kesme yenilmesi beklenmemesine rağmen tabanda kısmi bir kesme yenilmesi söz konusu olacağını göstermektedir. Giriş portalında tünel çevresindeki maksimum asal gerilme 1,18 MPa iken çıkış portalında tünel çevresinde maksimum asal gerilme 1,62 MPa olacaktır.

Çizelge 3. Pirinkayalar tüneli giriş ve çıkış portallarında zonlardaki plastik durum ve maksimum asal gerilme konturları

Table 3. The plastic state and maximum principal stress contours in zones in the entrance and exit portals of the Pirinkayalar tunnel

Portal	Tünel aynası çevresinde zonların blok durumu	Tünel aynası çevresindeki zonlarda maksimum asal gerilme konturları
Giriş		
Çıkış		

Tünel aynasının gerisine doğru oluşan deformasyonlar uzunlamasına deformasyon profili (LDP) ile takip edilebilir. Araştırmacılar LDP'nin oluşturulmasına yönelik eşitlik önerilerinde bulunmuşlardır (Corbetta ve diğ., 1991; Panet, 1995; Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000; Unlu ve Gercek, 2003; Vlachopoulos ve Diederichs, 2009; Basarir ve diğ., 2010; Sakcali ve Yavuz, 2019 (a)). LDP eğrisini önerilen eşitliklerle oluşturulabileceği gibi sayısal modelleme ile de oluşturmak mümkündür (Meguid ve diğ., 2003; Bi ve Zhou, 2015; Vlachopoulos ve Diederichs, 2014; Sakcali ve Yavuz 2019 (b); Sakcali, 2021). Giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen tahkimatsız kazı modellerinden elde edilen tavandaki LDP eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.

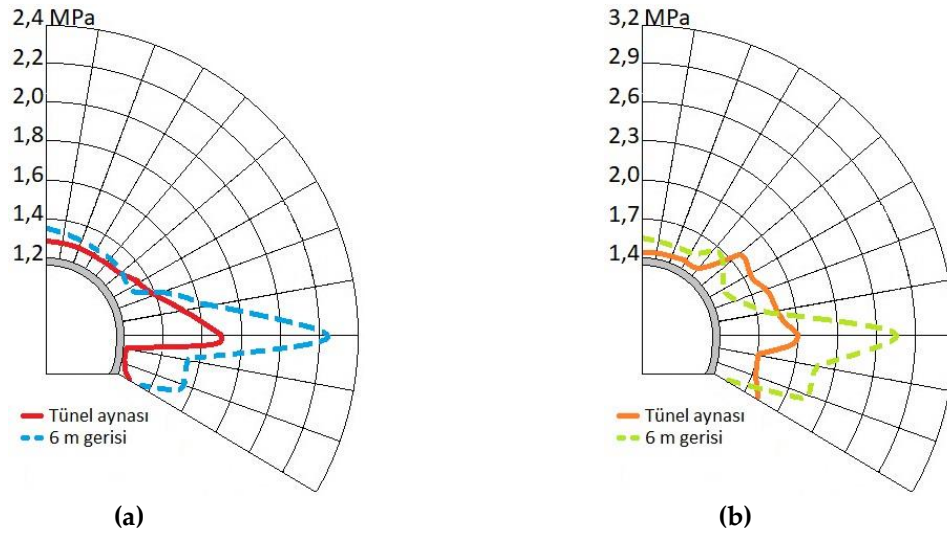


Şekil 6. Giriş ve çıkış portalları için uzunlamasına deformasyon profilleri (LDP)

Figure 6. Longitudinal deformation profiles (LDP) for entrance and exit portals

Tahkimat tünel aynası etrafında oluşan gerilmeleri de etkileyecektir. Tünel aynasında ve tünel aynası gerisine doğru üst yarı kazı yarıçapı kadar mesafede (6 m) tünel kesitindeki gerilme değişimlerine de bakılmıştır. Giriş ve çıkış portallarında aynada ve aynanın 6 m gerisinde tünel kesitindeki gerilme değişimleri Şekil 7’de sunulmuştur. Giriş ve çıkış portallarında tünel aynasının 6 m gerisinde genel olarak tünel aynasına göre bir gerilme artışı söz konusu iken tünel kesitinin bazı bölümlerinde tünel aynasında meydana gelen gerilme daha büyüktür.

Tünellerin modellenmesi ile tünel çevresinde meydana gelen gerilme, deformasyon ve plastik zon değişimi gibi parametrelerin yanı sıra ara yüzlerde veya yapı elamanlarında oluşacak etkileri de görmek mümkündür.



Şekil 7. Tünel aynası ve tünel aynasının 6 m gerisinde tünel kesitindeki gerilme değişimi; (a) giriş portalı, (b) çıkış portalı

Figure 7. The stress changes at cross sectional of tunnel at tunnel face and 6m behind the tunnel face; (a) at entrance portal, (b) at exit portal

#### Tünel deformasyon ölçümleri (The deformation measurements at tunnel)

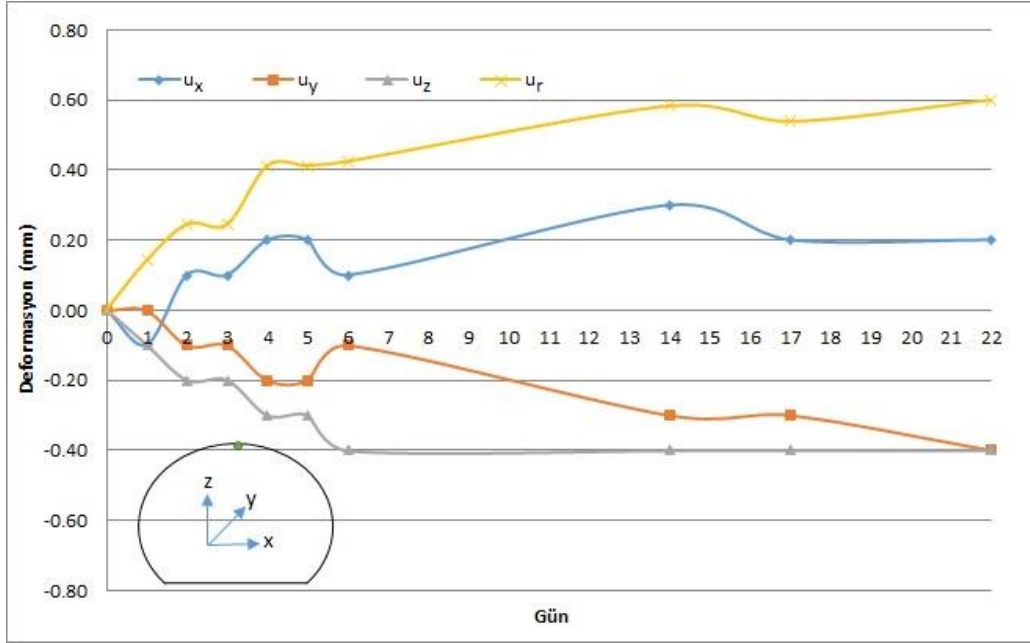
Pirinkayalar tüneline giriş ve çıkış portallarında kazı sırasında uygulayıcılar tarafından Geomax Zoom 50 model total station yaklaşık 10 m aralıklarla belirlenen yerlerden ortalama 28 gün boyunca ölçümler alınarak deformasyonlar belirlenmiştir. Ölçümler tünel kesitinin tavanı, tavan köşeleri ve yan duvarı olmak üzere 5 farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de ölçümler alınırken kullanılan cihazın bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. Ölçümler alınırken kullanılan cihazın bir görüntüsü

Figure 8. An image of the device used when taking measurements

Çıkış portalını temsil etmesi adına 13+185 km'de alınan deformasyon ölçümleri örnek olarak verilmiştir. Belirlenen yerde diğer ölçümlerde olduğu gibi 5 farklı noktada (tavan, tavan köşeleri ve yan duvarlar) ölçüm alınmış ve tavanda 22 gün boyunca meydana gelen deformasyon değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Tünel kesitinin x, y ve z yönlerindeki deformasyonlar sırasıyla  $u_x$ ,  $u_y$  ve  $u_z$  olup radyal deformasyon ( $u_r$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 9. 13+185 km'de tavanda 22 gün boyunca oluşan deformasyonlar

Figure 9. The deformations at tunnel roof in 13+185 km during 22 days

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Geçmişten günümüze tünel kazılarında tahkimat sistemi tercih edilirken kaya kütlesi sınıflama sistemlerince yapılmış ampirik öneriler sıklıkla kullanılmıştır. Artvin-Erzurum karayolu üzerinde yapımı planlanan Pirinkayalar tüneli ulaşım rahatlığı açısından önemli tünellerden biri olup proje aşamasında NATM önerileri göz önünde bulundurularak tahkimat tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada Pirinkayalar tünel projesinin giriş ve çıkış portalları sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D kullanılarak modellenmiştir. Bu bölümlerdeki kazı modelleri tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak ve tahkimatsız olarak yapılmıştır. Modeller üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmeler ile tünel çevresindeki kaya kütlelerinin davranışı hakkında genel bir bilgi edinilmiştir.

Tahkimatlı tünel kazısı modellerinde giriş ve çıkış portallarında oluşacak deformasyon değişimlerinin yanı sıra tünel aynası çevresindeki blok durumu ve maksimum asal gerilme değişimlerine de bakılmıştır. Ayrıca, modellerden elde edilen veriler kullanılarak tünel aynası ve tünel aynasının 6 m gerisindeki tünel kesitinde meydana gelen gerilme değişimleri incelenmiştir.

Tahkimatsız tünel kazısı modelleri kullanılarak elde edilen LDP eğrileri ile tünel çevresinde meydana gelebilecek muhtemel deformasyon tahmini gerçekleştirilmiştir. Uygulayıcı tarafından tünel kazısı sırasında sürekli olarak 10 m aralıklarla deformasyon ölçümleri alınmıştır. Çıkış portalını temsil etmesi adına 13+185 km'sinde alınan deformasyon ölçümlerine çalışma içerisinde yer verilmiştir.

Bu çalışma tünellerde ampirik yöntemle tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği etkilerini modelleme ile ele alan örnek bir vaka çalışması olarak hazırlanmıştır. Benzer tünel projelerinde modelleme yapılarak tünel ve tahkimat sisteminin davranışı hakkında bilgi edinmek uygulayıcıya büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Ayrıca, tünel projelerinde sayısal modelleme yönteminin kullanılmasının pratik olması ve hızlı cevap vermesi nedeniyle ekonomik açıdan da faydası olacaktır.

Çalışma gerçekleştirilirken tünel giriş ve çıkış portal kazısı yapılması nedeniyle bu bölümler ele alınmıştır. İleride yapılacak bir çalışma ile tünel güzergâhında tercih edilen diğer kazı ve tahkimat sistemlerinin modellenmesi ve alınan deformasyon ölçümleri ile bu bölümlerin değerlendirilmesi düşünülmektedir.

#### KATKI BEYANI (CONTRIBUTION STATEMENT)

**Alaattin SAKCALI** : Analiz, Metodoloji, Modelleme, Yazma-inceleme & düzenleme. **Muhammed Said KAYA**: Ölçümlerin temini, İnceleme. **Muhammet ESER** : Jeolojinin tanımlanması, Veri, İnceleme.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmada sağladığı imkân ve katkılarından dolayı Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü (Erzurum), Polatıyol Yapı ve Kırtur Turizm'e teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agan, C., 2016, "Prediction of squeezing potential of rock masses around the Suruc water tunnel", *Bull Eng Geol Environ*, 75 (2), pp. 451-468.
- Akgun, H., Muratli, S., Kockar, M. K., 2014, "Geotechnical investigations and preliminary support design for the Gecilmez tunnel: a case study along the Black Sea coastal highway, Giresun, northern Turkey", *Tunn Undergr Space Technol*, 40, pp. 277-299.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Rock Mech*, 6 (4), pp. 189-239.
- Basarir, H., 2006, "Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey", *Eng Geol*, 86, pp. 225-237.
- Basarir, H., Genis, M., Ozarslan, A., 2010, "The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass", *Int J Rock Mech Min Sci*, 47 (5), pp. 771-783.
- Bi, J., Zhou, X. P., 2015, "Numerical simulation of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel under dynamic unloading", *Int J Computational Methods*, 12 (3), 1550020, pp. 1-23.
- Bieniawski, Z. T., 1978, "Determining rock mass deformability: experience from case histories", *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, pp. 237-247.
- Bieniawski, Z. T., 1989, *Engineering rock mass classifications*, Wiley, 251.
- Brown, E.T., Hoek, E., 1978, "Trends in relationships between measured and in situ stresses and depth", *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15 (4), pp. 211-215.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000, "Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion", *Tunn Undergr Space Technol*, 15 (2), pp. 187-213.
- Corbetta, F., Bernaud, D., Nguyen-Minh, D., 1991, "Contribution a la methode convergerce confinement par le principe de la similitude", *Rev Fr Geotech*, 54, pp. 5-11 (in French).
- Deney Raporları, 2019, *Pirinkayalar tünel ve bağlantı inşaatı projesi deney raporları*.
- Genis, M., Basarir, H., Ozarslan, A., Bilir, E., Balaban, E., 2007, "Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey", *Eng Geol*, 92, pp. 14-26.
- Grimstad, E., Barton, N., 1993, "Updating the Q-system for NMT", *Proc Int Symp on Sprayed Concrete, Fagernes*, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, 20.
- Gurocak, Z., 2011, "Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapikaya dam site, Turkey", *Bull Eng Geol Environ*, 70, pp. 41-52.
- Gurocak, Z., Solanki, P., Zaman, M. M., 2007, "Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey", *Eng Geol*, 91, (2-4), pp. 194-208.

- Hoek, E., 2007, *Practical rock engineering*, ziyaret adresi: <https://www.rocsience.com/>, ziyaret tarihi: 12 Ocak 2017.
- Hoek, E., Brown, E. T., 1997, "Practical estimates of rock mass strength", *Int J Rock Mech Min Sci*, 34 (8), pp. 1165-1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002, "Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition". *Proc of NARMSTAC 2002*, Mining Innovation and Technology, University of Toronto Press, Toronto, pp. 267-273.
- Itasca., 2005, *Version 3.0 user manuals*, Itasca Consulting Group, Inc. Mill Place, Minnesota.
- Kanik, M., Güroçak, Z., 2018, "Importance of numerical analyses for determining support systems in tunneling: A comparative study from the Trabzon-Gumushane tunnel, Turkey", *J Afr Earth Sci*, 143, pp. 253-265.
- Kaya, A., Bulut, F., 2019, "Geotechnical studies and primary support design for a highway tunnel: a case study in Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 78, pp. 6311-6334.
- Kaya, A., Sayın, A., 2019, "Engineering geological appraisal and preliminary support design for the Salarha Tunnel, Northeast Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 78, pp. 1095-1112.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 2013, *NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kontogianni, V. A., Stiros, S. C., 2002, "Predictions and observations of convergence in shallow tunnels: case histories in Greece", *Eng Geol*, 63, pp. 333-345.
- Kopar, İ., Çakır, Ç., 2013, "Tortum Gölü-Tortum Boğaz vadisi ve yakın çevresinin (Uzundere-Erzurum ve Yusufeli-Artvin) serrano ve ruiz-flaño yöntemiyle jeoçeşitlilik derecesinin belirlenmesi", *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 27, pp. 46-66.
- Meguid, M. A., Rowe, R. K., Lo, K. Y., 2003, "Three-dimensional analysis of unlined tunnels in rock subjected to high horizontal stresses", *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 1208-1224.
- MTA GeoScience Map Viewer and Drawing Editor, 2019, *General Directorate of Mineral Research and Exploration*, ziyaret adresi: <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/>, ziyaret tarihi: 16 Kasım 2019.
- ÖNORM B 2203, 1994, *Untertagebauarbeiten Werkvertrags-norm*, Österreichischer Normen, Österreich.
- Özsan, A., Başarır, H., Yüceel, S., Cücen, Ö., 2009, "Engineering geological evaluation and preliminary support design for the metro extension tunnel, Ankara, Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 68, pp. 397-408.
- Palmström, A., 1995, *RMi-A rock mass characterization system for rock engineering purposes*, PhD. Thesis, University of Oslo, Norway, 400.
- Panet, M., 1995, *Calcul des tunnels par la methode convergence-confinement*, Press de l'ecole Natinale des Ponts et Chaussees.
- PTP, 2019, *Pirinkayalar tünel ve bağlantı inşaatı projesi*.
- Read, S. A. L., Richards, L. R., Perrin, N. D., 1999, "Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks", *Proc 9th Int Soci for Rock Mech Congr*, Paris, 2, pp. 655-660.
- Sakcali, A., 2021, "Zayıf kaya kütlelerinde açılan modifiye at nalı kesitli tünellerdeki deformasyon dağılımının sayısal modelleme ile belirlenmesi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21, pp. 934-944.
- Sakcali, A., Yavuz, H., 2019 (a), "Estimation of radial deformations around circular tunnels in weak rock masses through numerical modelling", *Int J Rock Mech Min Sci*, 123, 104092, pp. 1-14.
- Sakcali, A., Yavuz, H., 2019 (b), "Zayıf kaya kütlelerinde açılan dairesel kesitli bir tünelde radyal deformasyonların sayısal modelleme ile analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23 (1), pp. 66-73.
- Sari, Y. D., Pasamehmetoglu, A. G., 2004, "Proposed support design, Kaletpe tunnel, Turkey", *Eng Geol*, 3 (4), pp. 201-216.
- Sari, Y. D., Pasamehmetoglu, A. G., Cetiner, E., Donmez, S., 2008, "Numerical analysis of a tunnel support design in conjunction with empirical methods", *Int J Geomech*, 8 (1), pp. 74-81.

- Sheorey, P. R., Mohan, G. M., Sinha, A., 2001, "Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress", *Int J Rock Mech Min Sci*, 38 (8), pp. 1211-1216.
- Sopaci, E., Akgun, H., 2008, "Engineering geological investigations and the preliminary support design for the proposed Ordu peripheral highway tunnel, Ordu, Turkey", *Eng Geol*, 96, pp. 43-61.
- Unlu ,T., Gercek, H., 2003, "Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel", *Tunn Undergr Space Technol*, 18 (5), pp. 547-553.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., 2009, "Improved displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels", *Rock Mech Rock Eng*, 42 (2), pp. 131-146.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., 2014, "Appropriate uses and practical limitations of 2D numerical analysis of tunnels and tunnel support response", *Geotech Geol Eng*, 32, pp. 469-488.
- Ya, S., Yonghua, S., Minghua, Z., Shaofeng, L., Xiang, L., 2018, "A case study of the failure of Liziping tunnel", *Tunn Undergr Space Technol*, 80, pp. 301-312.
- Yalcin, E., Gurocak, Z., Ghabchi, R., Zaman, M., 2015, "Numerical analysis for a realistic support design: case study of the Komurhan tunnel in Eastern Turkey", *Int J Geomech*, 16 (3), 05015001e1-0501500, pp. 1-14.