



## Şehir İçerisinde Açılan Tünellerde Portal Şev Stabilitesi ile Tünel Kazı İlişkisine Bir Örnek (T7 Tüneli, Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi (Kayaş-Elmadağ Kesimi))

Ebu Bekir AYGAR<sup>ID</sup>

*Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti. Ankara, Türkiye*

eaygar@gmail.com

*(Alınış/Received: 28.01.2022, Kabul/Accepted: 08.03.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)*

**Öz:** Tünellerde portal kesimleri her zaman kritik mühendislik yapıları içerisinde olmuştur. Portal ve tünellerin etkileşimi hem portal tasarımını hem de tünel tasarımını etkilemektedir. Portal şevlerinde olası bir yenilmenin etkisi doğrudan tünelleri etkileyeceğinden tüneldeki ilerlemeleri de olumsuz etkilemekte ve zaman zaman durdurmaktadır. Uzun tünellerde kazı ve destek işlemlerinin yıllarca süreceği göz önüne alındığında portal şevlerinin duraylılığı büyük önem kazanmaktadır. Kaya birimlerinde açılan tünellerde süreksizliklere bağlı olarak gelişecek yenilmeler ile zayıf zeminlerde portal şevlerinde toptan göçme olarak meydana gelen yenilmelerin tahkiki, uzun döneme göre yapılmalıdır. Ayrıca yüzeyde ve portal çevresinde yerleşim alanlarının olduğu durumda ise daha kritik bir durum meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi (Kayaş-Elmadağ kesimi) T7 tüneli özelinde stabilite problemleri incelenmiştir. Tünel kazısı sırasında meydana gelen deformasyonların etkisi ile tünel stabilitesini yitirmiş ve tünel kazısı durdurulmuştur. Tünel destekleri yenilerek portal stabilitesini de olumsuz etkilemiştir. Ayrıca tünel giriş portal kesiminde yerleşimlerin olması bu durumun önemini daha da artırmıştır. Bu amaçla portal ve tünel destekleri için nümerik analizler yapılarak mevcut durumun stabilitesi değerlendirilmiş sonrasında ise yeni destek sistemleri ile portal kesimi için metodoloji önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Portal stabilitesi, Hızlı tren projesi, Tünel destek sistemi

### **An Example of the Relationship Between Portal Slope Stability and Tunnel Excavation in the Urban Area-(T7 Tunnel, Ankara-Sivas High Speed Train Project (Kayaş-Elmadağ Section))**

**Abstract:** Portal sections in tunnels have always been within critical engineering structures. The interaction of the portal and tunnels affects both the portal design and the tunnel design. Since the effect of a possible failure in the portal slopes directly affects the tunnels, it also negatively affects the progress in the tunnel and stops it sometimes. Considering that the excavation and support work in long tunnels may take years, the stability of the portal slopes gains great importance. The failures that will develop due to discontinuities in the tunnels excavated in the rock units and the failures that occur as a wholesale collapse in the portal slopes in weak soils should be evaluated according to the long term. In addition, a more critical situation occurs when there are residential areas around the portal. Within the scope of this study, this situation is investigated specifically for the T7 tunnel constructed within the scope of Ankara-Sivas High Speed Train Project, Kayaş-Elmadağ section. With the effect of the deformations that occurred during the tunnel excavation, the tunnel lost its stability and the tunnel excavation was stopped. The tunnel supports were renewed, negatively affecting the stability of the portal. In addition, the fact that there is a settlement in the tunnel entrance portal section has increased the importance of this situation. For this purpose, numerical analyzes were performed for the portal and tunnel supports, and the stability of the current situation was evaluated, and then a methodology was proposed for the portal section with new support systems.

**Keywords:** Portal stability, High speed train project, Tunnel support system.

Atıf için/Cite as: E. B. Aygar , “Şehir içerisinde açılan tünellerde portal şev stabilitesi ile tünel kazı ilişkisine bir örnek (T7 tüneli, Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi (Kayaş-Elmadağ kesimi)),” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 1-13, July. 2022. doi: 10.47072/demiryolu.1064319

## 1. Giriş

Ülkemizde son dönemlerde gelişen alt yapı hizmetlerine bağlı olarak yüksek hızlı demiryolu projelerinde açılan tünel sayısı giderek artmaktadır. Açılan tüneller Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) prensipleri ile projelendirilmiştir (Rabcewicz, [1], [2], [3]). Tek tüp çift hat olarak projelendirilen tünellerde kazı yöntemi kesitin büyük olması sebebi ile üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde yapılmaktadır. Tünellerin tamamlanmış halinde yüksekliği 8 m genişliği ise 12.50 m olmaktadır. Yapımı inşa halinde olan Ankara-İstanbul, Ankara-Sivas, Ankara-İzmir ve Bursa Yenişehir hatlarında tünel kazı çalışmaları devam etmektedir. Tünel kazıları sırasında karşılaşılan jeolojik-jeoteknik koşullara göre yer yer sorunlar ile karşılaşmakta olup destek sistemleri revize edilmektedir.

Tünel kazıları boyunca portal imalatı sırasında karşılaşılan sorunlar hem portal şevlerinde ciddi duraysızlık sorunlarına yol açmış hem de tünel kazısını olumsuz etkileyerek gecikmelere sebebiyet vermiştir. Şehir içinde açılan tünellerde portal kesiminde binaların bulunması portal şevlerini daha da kritik bir duruma getirmiştir. Zira portal şevlerinde karşılaşılan duraysızlık problemleri yüzeydeki binaları olumsuz etkileyecektir. Bu sebeple portal kazılarının sorunsuz bir şekilde yapılması şehir içi tünelciliği açısından çok daha önemlidir.

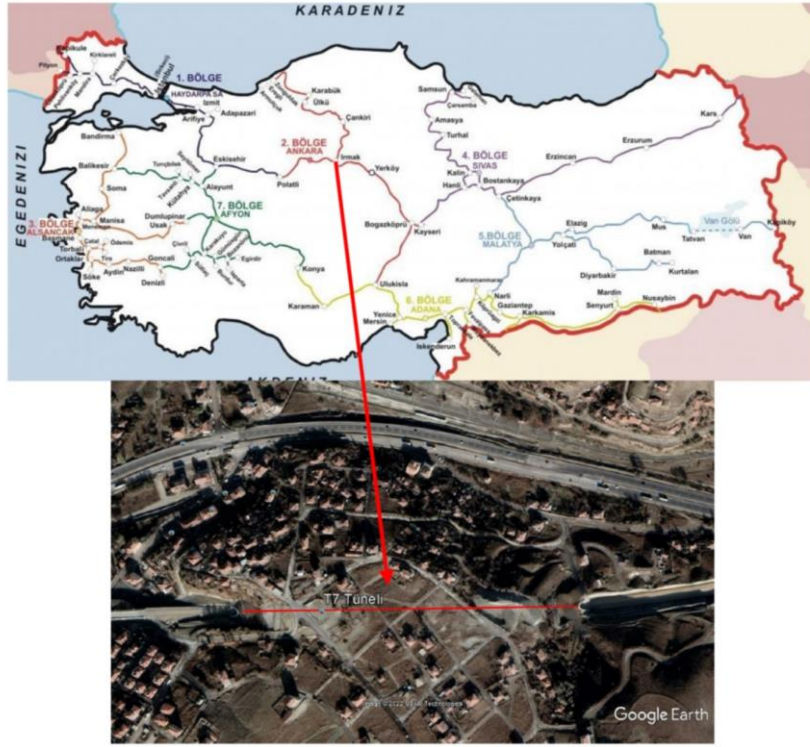
Portal şevlerinde karşılaşılan sorunlar incelendiğinde genelde uzun dönemde portal şevlerinin stabilitesini yitirmesi sonucu meydana gelen yenilmeler ile tünel kazısı sırasında meydana gelen deformasyonların sonucu portal şevlerini olumsuz etkilemesidir ( [4], [5], [6], [7], [8], [9]).Zira kısa dönemde portal şevleri stabilitesi sağlansa da tünel uzunluğuna bağlı olarak değişen inşaat süreleri dikkate alındığında uzun dönemde yenilmelerin meydana gelmesi kaçınılmazdır.

Şevlerin projelendirmesi için belirlenen güvenlik faktörleri kısa dönemde 1.3, uzun dönemde 1.5 ve depremlili durumda ise 1.1 olarak belirlenmiştir ([10]). Ancak portal gibi kritik öneme sahip yapılarda bu kriterlere uyulsa da tünel kazısı sırasında oluşabilecek deformasyonlar ve yenilmeler, uzun dönemde aşırı yağış miktarları portalları olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle portal yapılarında güvenlik faktörünün daha da güvenli tarafta kalınarak çözümlenmesi gerekmektedir. Zira açık kazılarda yapılan şevlerde oluşabilecek yenilmeler çoğu zaman telafi edilirken, portal kesiminde oluşabilecek bu tür yenilmeler ciddi sorunlara yol açmaktadır. Portal alın şevindeki yenilmeler ve kaymalar çoğu zaman tünelin tamamen kapanmasına kadar gitmektedir. Alın şevinde yapılacak şev düzenlemeleri ise, alın şevinin altında tünel yer alması sebebi ile de çok kritik olmakta ve tünele zarar verecek konuma gelmektedir.

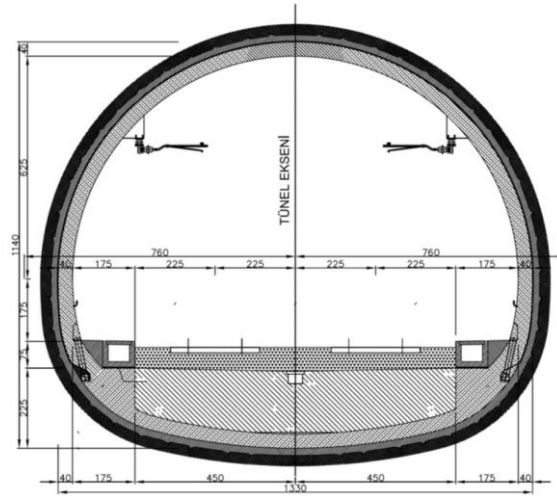
Bu çalışmada, Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi kapsamında Kayaş-Elmadağ kesiminde açılan T7 tüneline portal ve tünelde yaşanan sorunlar verilerek çözüm önerileri üzerinde durulmaktadır.

## 2. T7 Tünelinin Genel Özellikleri

T7 tüneli Ankara Sivas Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamında, Km:26+706.00 ile Km:27+145.00 arasında olup, toplam uzunluğu 439 m'dir (Şekil 1). Tünel örtü yüksekliği en fazla 39 m olup sığ tünel özellikleri göstermektedir. Tünel güzergâhının Google Earth görüntüsü ve planı Şekil 1'de verilmektedir. Tek tüp olarak projelendirilen T7 tünelinin yüksekliği 8.0 m olup, tünel çapı ise 12.5 m'dir (Şekil 2). T7 tüneli Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine göre projelendirilmiştir ( [1], [2], [3]; [11], [12]).



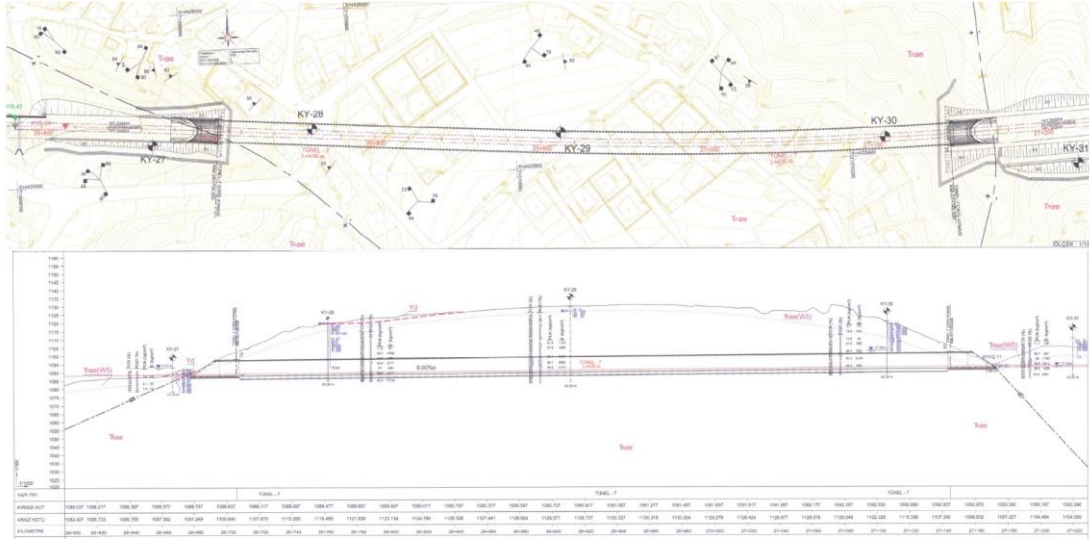
Şekil 1. T7 Tüneli lokasyon haritası ve Google Earth görüntüsü



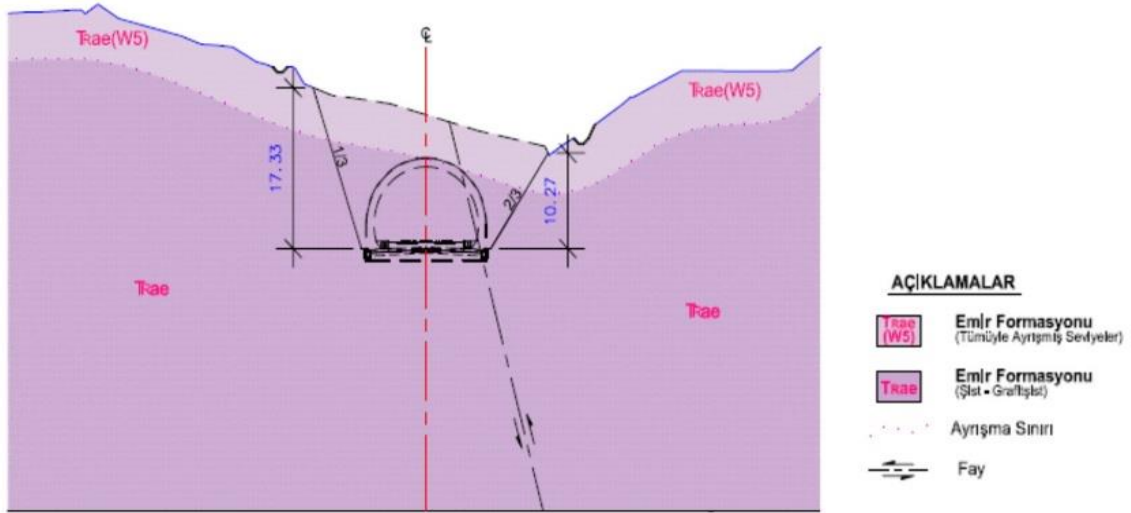
Şekil 2. T7 Tüneli tip kesiti

### 3. Jeolojik-Jeoteknik Koşullar ve Karşılaşılan Sorunlar

Tünel-7, az sert, yer yer orta sert, zayıf – çok zayıf, çok ayrılmış ve yer yer orta derecede ayrılmış grafitik ve şist birimleri içerisinde açılmıştır. Tünel portal kesimlerinde soruna neden olan yaklaşık 10.00 metre kalınlığa varan üst seviyeleri çok – tümüyle ayrılmış şist birimi içerisindedir ( [13] ) Tünel tamamen zayıf ve çok zayıf kaya kütlesi içerisinde açılmıştır. Tünel jeolojik planı ve profili Şekil 3’de, Şekil 4’de ise km:26+706 ya aita jeolojik kesit verilmiştir Hesaplanan NGI (Norwegian Geotechnical Institute) kaya kütle sınıflama sistemine ( [14], [15], [16] ) göre Q değeri 0.018 ile 0.220 arasında hesaplanmış olup ( [13] ) tünel çok zayıf ve çok fazla zayıf kaya kütlesi içerisinde yer almaktadır. Bieniawski [17], [18], [19] jeomekanik kaya kütle sınıflama sistemine göre ise RMR değerleri 17 ile 29 arasında değişmektedir. RMR<sub>89</sub> değerlerine göre tünel zayıf ve çok zayıf kaya kütlesi içerisinde yer almaktadır ( [13] )



Şekil 3. Tünel 7 jeolojik plan ve profili [13]

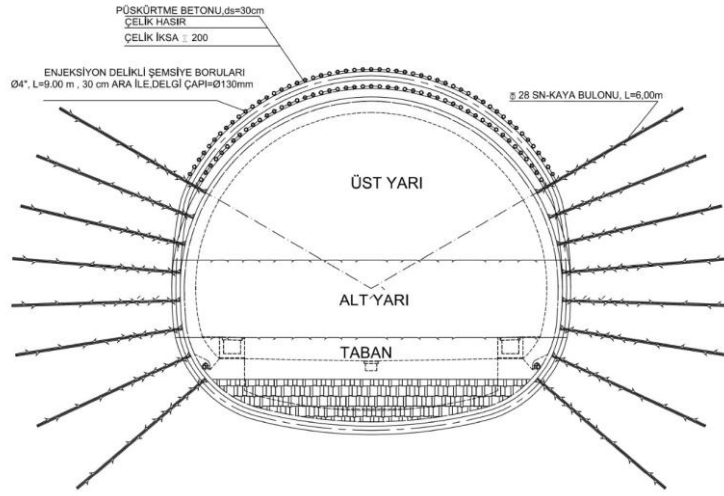


Şekil 4. Tünel giriş kesimi jeolojik kesiti, km:26+706[13]

Tünel kazılarına giriş portalından itibaren Km:26+718'e kadar Tip2Ö destek sistemi (Şekil 5) uygulanmış ve sonrasında tünelde karşılaşılan sorunlar neticesinde tünel kazısı durdurulmuştur. Tünel desteklerinde yer yer yenilmeler ve püskürtme beton kaplamasında çatlaklar meydana gelmiştir. Ayrıca tünel aynasında aşırı sökümler ve kaymalar meydana gelmiştir. Tünelde meydana gelen yenilmeler ile portal kesimi Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tünel çıkış portalı ise giriş portalına benzer şekilde Km:27+078'e kadar Tip2Ö destek sistemi ile geçilmiştir. Ancak yapılan kazı sırasında hem tünel de hem de yüzeyde stabilite sorunları ile karşılaşmış sonrasında tünel kazısı durdurulmuştur. Bu aşamadan sonra tünelde acilen taban beton kemerlerine başlanılmıştır. Tünel güzergâhı üzerinde yer alan binalar için yapılan optik ölçümler sonucunda duyarlılığını kaybeden evler kamulaştırılmıştır. Buna ek olarak çıkış portalında aç-kapa yapısının yapılarak portal stabilitesinin sağlanmasına karar verilmiştir. Şekil 7'de tünel kesiminde meydana gelen yenilmeler ile yüzeyden çatlakların olduğu bölge gösterilmektedir.





Şekil 5. Tip2Ö destek detayları [13]



Şekil 6. T7 Tüneli giriş portal kesimi ve tünel aynası



Şekil 7. T7 Tüneli Çıkış Portal kesimi tünel aynası ve yüzey çatlaklarının olduğu bölüm

Açıklanan sorunlar neticesinde hem tünel giriş portal kesiminde hem de çıkış portal kesiminde tünel kazıları için destek revizyonlarına ihtiyaç duyulmuştur. Özellikle tünel çıkış kesiminden itibaren yapılan destek sistemlerinde kademeli iksalarda (Şekil 5) 3, 4 ve 5 nolu genişleme iksalarının oturarak 1 ve 2 nolu iksalar ile hemen hemen aynı kotlara geldiği arazide belirlenmiştir. Tünel stabilitesini etkileyen faktörler,

- Tünel güzergâhı üzerinde yerleşim birimi altından geçilmesi,
- Örtü yüksekliğinin en fazla 30 m olması,
- Mevcut kazılar yapılırken yüzeydeki binaların hasar görmesi şeklinde özetlenebilir.

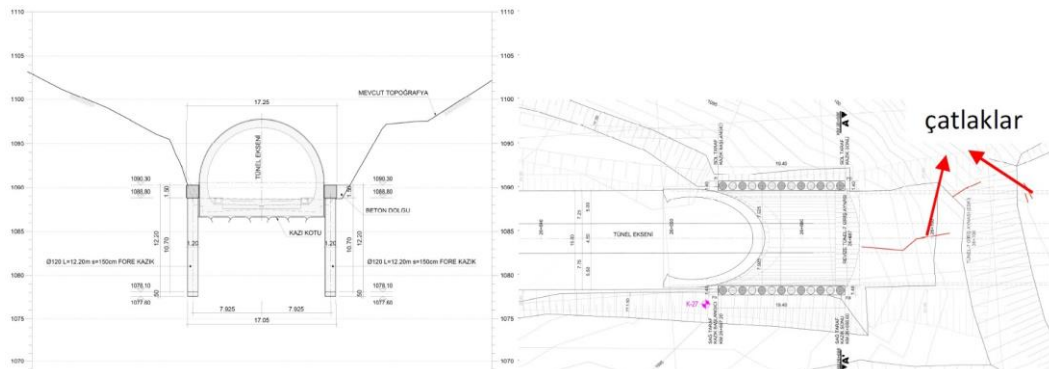
#### 4. Giriş Portal Kesimi Duraysızlık Problemleri

Tünel giriş portal kesimi vadi içerisinde projelendirilmiştir (Şekil 1). Portal kesimini çevreleyen bölgede yerleşim yerleri mevcuttur. Bu bölgede portal kazıları öncesi alın şevi boyunca zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Portal yan şevleri 2Y:3D (33<sup>0</sup>) alın şevi ise 1Y:2D (45<sup>0</sup>) olacak şekilde projelendirilerek tünel kazısına başlanılmıştır. Tünel kazısına başlanması ile beraber hem tünel içerisinde deformasyonlar meydana gelmiş (Şekil 8) hem de portal şevlerinde çatlaklar oluşmuştur. Bu noktadan sonra tünel kazısına ara verilerek yüzeyde bulunan evlerin zarar görmemesi için tünel kazısı durdurulmuş ve portal kesiminde aç kapa yapısının yapılmasına geçilmiştir.



Şekil 8. Giriş portal şevi genel görünümü ve oluşan çatlaklar

Tünel kazısının durdurulması sonrasında aç-kapa yapısı projelendirilmiştir. Aç kapa yapısı taban bölümü için mevcut kazı kotundan itibaren 2.1 m daha kazı yapılmasını gerektirmiştir [20]). Bu amaçla yan şevlerin stabilitesini sağlamak amacıyla portal şevlerinin dibine olası kaymaları önlemek amacıyla kazık yapılarak portal şevlerinin stabilitesi sağlanmıştır (Şekil 9). Bu aşamadan sonra aç-kapa yapısı yapılmış ve üzeri dolgu malzemesi ile doldurularak portal stabilitesi tamamen sağlanmıştır (Şekil 10).



Şekil 9. Portal kesimi kazık ve aç kapa yapısı kesiti ve planı [20]



Şekil 10. Portal kesimi aç-kapa yapısının tamamlanmış hali

### 5. Jeolojik-Jeoteknik Değerlendirmeler

T7 tüneli tamamen şist-grafitik şist birimi içerisinde yer almaktadır. Tünel güzergâhı üzerinde 3 adet sondaj açılmış olup (SK27, SK28 ve SK29) (Şekil 3) açılan bu sondajlarda birim koyu gri renkli, ufalanabilir-az sert-yer yer orta sert, zayıf-çok zayıf-yer yer orta zayıf dayanımlı, orta-çok-yer yer tümüyle ayrılmış olarak tanımlanmaktadır [13]. Yapılan sondajlarda RQD değerler genelde çok düşük yer yer 0 olmaktadır. Sondajlardan elde edilen örneklerden sadece nokta yükleme deneyi ile yapılan SPT'lerden (Standart Penetrasyon Testi) elde edilen örneklerden de zemin deneyleri yapılmıştır [13]. Bu kesim için jeoteknik tasarım parametreleri Hoek ve Brown [21] yenilme kriteri ile tespit edilmiş olup bu amaçla kullanılan değerler, GSI (Jeolojik dayanım indeksi), UCS (Kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı) ve  $M_i$  (Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti)'dir. Birimin GSI (Jeolojik Mukavemet İndeksi) değeri, filiş tipi formasyon özellikleri için Marinos e Hoek [21]'in önerdiği abak dikkate alınarak (Şekil 10) belirlenmiştir. Şekil 11'de sunulan abak üzerinde F bölgesinde kaldığı görülen birimin GSI değeri 20 - 30 arasında kalmaktadır. Bu nedenle güvenli tarafta kalınarak tünelin bu kesimi için GSI değeri yaklaşık 25 olarak seçilmiştir (Şekil 10). Yapılan laboratuvar sonuçları ve yüzeysel değerlendirmelere göre birime ait tek eksenli sıkışma dayanım yaklaşık 3 Mpa olarak atanmıştır. Malzeme sabiti  $m_i$  7 olarak öngörülmüştür. Elastisite modülü ise karşılaşılan birimin özellikleri dikkate alınarak atanan  $m_r$  değeri ile belirlenmiştir ve 2025 Mpa olarak atanmıştır. Ayrıca kullanılacak kazı tekniğinin mekanik kazı olduğu varsayılarak örselenme faktörü (D) 0 olarak alınmıştır. Kaya kütle parametreleri ise Hoek ve Brown yenilme kriterine göre Roclab [23] programı ile (Şekil 12) belirlenmiştir. T7 tüneline karşılaşılan olan şist birimine ait tasarım parametreleri i Tablo 1'de sunulmuştur.

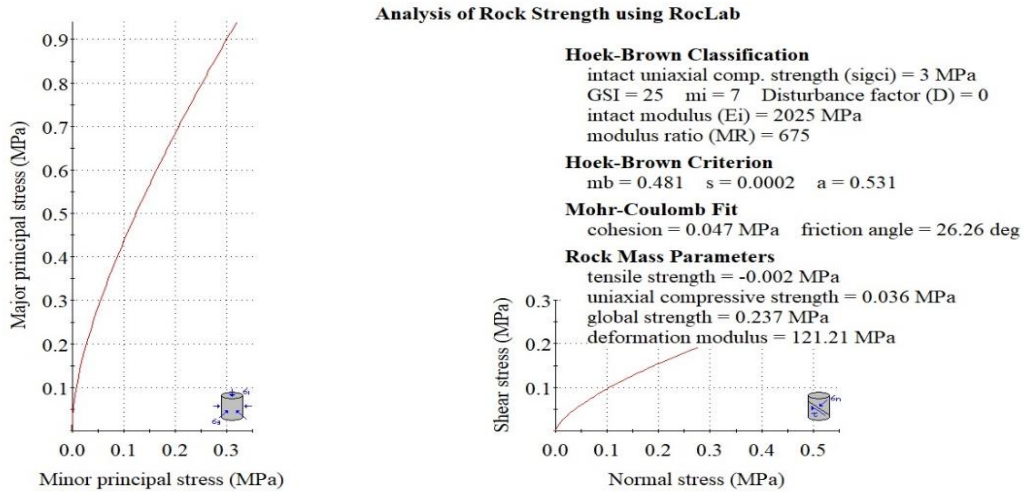
Tablo 1. T7 tüneli için önerilen jeoteknik parametreler

Tek eksenli dayanım	Jeolojik dayanım indeksi	Malzeme sabiti	Elastisite modülü	Birim hacim ağırlık	Kohezyon	İçsel sürtünme açısı	Deformasyon modülü
UCS (MPa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E_m$ (MPa)
3	25	7	2000	23	47	26	121



GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos, P and Hoek, E, 2000) From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		
COMPOSITION AND STRUCTURE		VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - Rough, slightly weathered surfaces	FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	<b>A. Thick bedded, very blocky sandstone</b> The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70	60	A		
	<b>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</b>		50	B	C	D
	<b>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</b>		40			
	<b>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</b>					
	<b>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</b>					
	<b>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</b>		30		F	
	<b>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</b>				G	H
	<b>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</b>					10

Şekil 11. Heterojen kaya kütle için GSI tanımlaması [21]



Şekil 12. Jeoteknik parametreler [23]

## 6. Sayısal Analizler

Tünelde yapılacak olan destek sistemlerinin belirlenmesi amacıyla Phase2d v8.0[24] programı ile sayısal analizler yapılmıştır. Phase2D programı Toronto Üniversitesince geliştirilen ve kaya kütleleri ile bu kütlelerin destekli davranışlarını modelleyen iki boyutlu bir sonlu elemanlar programıdır. Programda yeraltı kazısı aşamalı olarak modellenilebilmekte, bulon, çelik iksa, hasır çelik ve püskürtme betonu ile destekleme yapılabilmektedir. Ayrıca kazı aşamaları arasında yük dağılımı (load split) ve kaya gevşemeleri de (material softening) modele uygulanabilmektedir [24]. Destek sistemlerinin belirlenmesinde pratiğe ve tecrübelerle dayalı kararlar esas olup, nümerik analizler pratik kararlara bir kılavuz olarak değerlendirilmiştir.



### 6.1. Kaya kütlesinin modellenmesi

Bilindiği gibi, yeraltı kazılarında, zeminin uygun bir biçimde modellenmesi, belirsizliklerin yoğunluğu ve kompleks oluşu nedeniyle oldukça güçtür. Bu nedenle bütün koşulları içeren detaylı bir modelleme yapmak ne mümkündür ne de böyle bir model oluşturmaya çalışmak yararlıdır. Aşağıdaki koşullarla modeli sadeleştirmek mümkün olabilir:

- Üç boyutlu koşulların iki boyuta indirgenmesi,
- Kesitin eksenden simetrik kabul edilmesi,
- Zeminin basit tariflerle sadeleştirilmesi,
- Tünel ilerleme ve kazı şartlarının sade ve anlaşılır bir şekilde tanımlanması,
- Zeminin homojen ve izotropik kabul edilmesi.

Nümerik analizler elastik-plastik çözüme göre yapılmıştır. T7 tünelinin maksimum örtü tabakası yüksekliği 30 m civarındadır.  $\sigma_h/\sigma_v$  oranını hesaplamak için Jacky [25] tarafından verilen  $k=1-\sin\phi$  denklemi kullanılacaktır.  $\phi$  değeri (içsel sürtünme açısı)  $26^\circ$  olarak alınmıştır.

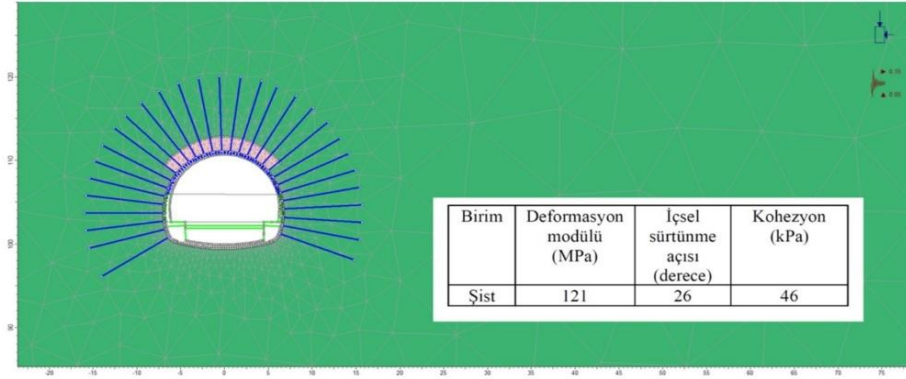
$$k=1-\sin\phi=1-\sin26^\circ=0.56 \quad (1)$$

Modelleme aşamaları yapılırken, tünel kazısı yapıldığı anda tünele gelen yükün tünel üzerindeki tüm örtü yüksekliğinden gelecek yükün olmadığı bilinmelidir. Zira böyle bir düşünce ile yapılacak olan destek sistemi tasarımı ciddi bir şekilde çok büyük kaplama kalınlıkları ile beraber bulon miktarının artmasına neden olacaktır. Böyle bir durum ise ekonomik ve mühendislik açısından uygun olmayacaktır. Zira bilindiği gibi Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi'nin(NATM) temel felsefesi, tünel etrafındaki zeminin yük taşıyan bir eleman gibi düşünülmesidir. Zemin reaksiyon eğrisine göre en optimum destek sistemine tünel etrafında belli bir deformasyona müsaade edilmesi ile ulaşılmaktadır. Bu amaçla yapım aşamasında da tünelde gerekli olan jeoteknik ölçümler yapılarak değerlendirilmelidir ve destek sistemlerinde belirli revizyonlar yapılabilmektedir. Analizlerde, kazı yapıldıktan sonra gevşeme değeri olarak %65 kaya yükü öngörülmüş, destek yerleştirilmesi ile beraber %35'lik bir kaya yükü modelde desteklere verilmiştir [26]. Tünel destek sistemleri için Phase2d programında hazırlanan modelleme aşamaları Tablo 2'de sunulmaktadır.

**Tablo 2.** Tünel destek sistemlerinin belirlenmesi için yapılan modelleme aşamaları

Kademeler	Açıklama
1	Arazi Gerilmelerin Oluşturulması
2	Sürenlerin yerleştirilmesi
3	Üst yarı malzeme gevşemesi
4	Üst yarı Püskürtme beton (yaş) ve kaya bulonu uygulaması
5	Alt yarı kazısı (Üst yarı püskürtme beton sert, Alt yarı püskürtme beton yaş)
6	Alt yarı püskürtme betonu sert
7	Invert kazısı
8	Invert püskürtme beton yerleştirilmesi
9	Invert püskürtme beton sert
10	Sismik yüklemenin uygulanması
11	İç kaplamanın yerleştirilmesi ve sismik yüklemenin tekrar uygulanması

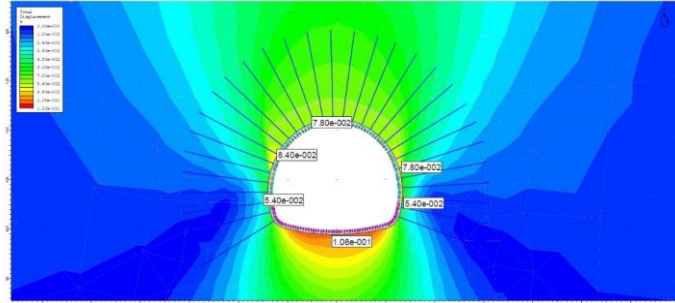
Sismik ivme değeri olarak yatay 0.15 g ve düşey ivme değeri de 0.05 g olarak seçilmiş [10] ve son kademede uygulanmıştır. Phase2d programı ile oluşturulan model Şekil 13'de verilmektedir.



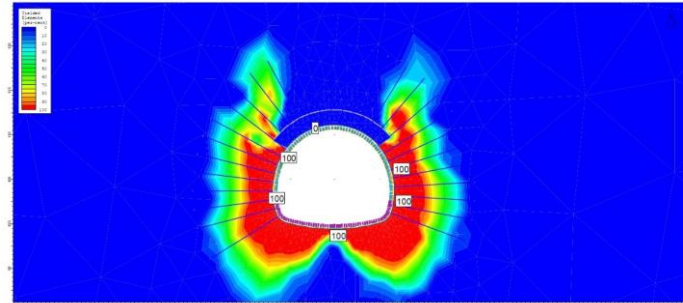
Şekil 13. Modelde kullanılan zemin parametreleri

### 6.2 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

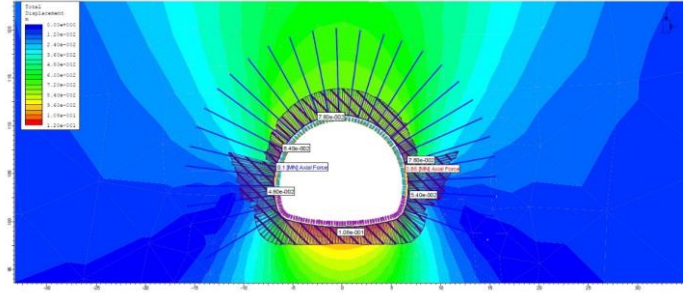
Analiz sonuçları Şekil 14 ile 16 arasında gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar tünel tavanında 7.9 cm, tünel yan omuzlarında 8.4 cm ve 7.78 cm, tünel alt yarı kesiminde 7.5 cm ve taban kesiminde ise 10.8 cm düzeyinde olup tünel tamamen stabil haldedir (Şekil 14). Tünel çevresindeki yenilmeler ise ilk 3-4 m'lik bölümde meydana gelmektedir (Şekil 15). Tünel çevresinde oluşan dayanım faktörleri ise 1 in üzerindedir (Şekil 16). Elde edilen sonuçlara göre tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar sınır değerler içerisinde kalmış olup tünel stabilitesi sağlanmaktadır. Ayrıca püskürtme betona gelen kesit tesirleri ise Tablo 3'de sunulmaktadır. Burada kesit etkileşim diyagramı çizildiğinde kesitin yeterli geldiği belirlenmiştir (Şekil 16). Kesit tesirleri 1.5 güvenlik faktörü ile çarpılarak kesit etkileşim grafiği çizdirilmiştir (Şekil 18).



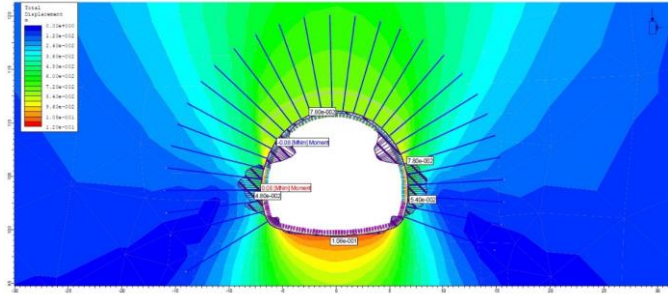
Şekil 14. Tünel çevresinde meydana gelen deformasyonlar



Şekil 15. İyileştirme sonrası yenilme bölgeleri



Şekil 16. Dış kaplamaya gelen aksel kuvvetler



Şekil 17. Dış kaplamaya gelen momentler

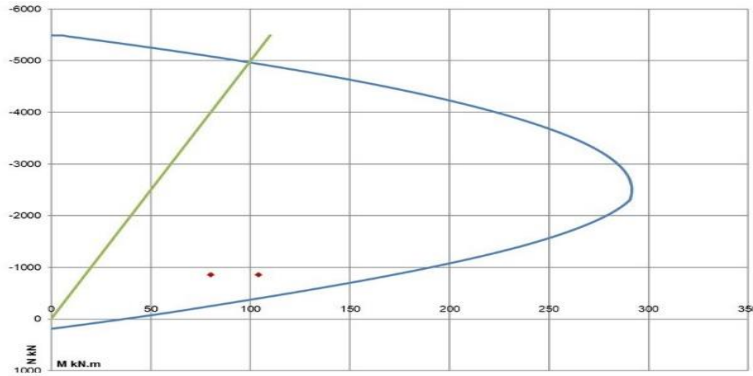
Kesit tahkiki analizlerinde ise aşağıda verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Beton Sınıfı :C20/25,

Beton tasarım basınç dayanımı,  $f_{cd}=13\text{MPa}$ ,

Çelik tasarım dayanımı,  $f_{yd}=434.80\text{ Mpa}$

Kesit tahkiklerinde püskürtme beton kalınlığı 40 cm olarak alınmıştır. Püskürtme betonda kullanılan donatı Q221/221 tipinde hasır çelik seçilmiştir. Şekil 18'de verilen kesit tahkiki sonuçlarına göre hasır çelik, iksa ve püskürtme betondan oluşan destek sisteminin tünele gelen yükleri taşıyacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 18. Kesit etkileşim diyagramı

## 7. Sonuçlar

T7 tüneli portal ve tünel etkileşimi açısından çok önemli bir örnektir. Portal kazıları ve tünel kazıları sırasında meydana gelen deformasyonlar birbirini olumsuz etkilemiş ve tünel kazılarına ara verilmek zorunda kalınmıştır. Portal şevlerinin aç kapa yapısı ile desteklenmesi ile portal stabilitesi sağlanmıştır. Bu durumda yüzeydeki binalarda korunmuş ve ciddi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Tünel kazısı ise aç kapa yapısından sonra başlamış ve şemsiye (umbrella) yöntemi ile kazı ve destek işlemleri yapılmıştır. Portal ve tünel kazısı ilişkisi tünelticilik açısından



çok önemlidir. Portal şevleri ile tünel kazısı etkileşim içerisindedir. Portal şevlerinde meydana gelebilecek yenilmeler tünel stabilitesini de etkilemektedir. Portal şevlerinde olası göçükler tünele ulaşımı da etkileyeceğinden en kritik kesim olarak portal bölgesi düşünülmelidir. Bu sebeple stabilite analizleri en üst düzeyde sağlanmalıdır. Çünkü uzun tünellerde tünel kazısı tünel uzunluğuna bağlı olarak yıllarca sürmektedir.

Zayıf zeminlerde açılan tünellerde portal tasarımında;

- Portal şevlerinin kazılması
- Destek sistemlerinin yapılması
- Tünel kazı öncesi aç-kapa yapısının yapılarak tünel ve portal etkileşimin en az düzeye indirilmesi
- Tünel kazısına başlanması, olarak özetlenebilir.

Zayıf zeminlerde açılan kritik kesimlerde tünel kazısına başlanmadan aç-kapa yapısının dolgusunun yapılması önerilmektedir. Aksi takdirde uzun dönem açıkta kalan portal şevlerinin stabilitesinde sorunlar yaşanması olasıdır. Bu durum tünele olan ulaşımı da etkileyecek ve tünel kazısına ara verilmek zorunda kalınacaktır. Ayrıca portal-tünel etkileşiminin detaylı olarak belirlenebilmesi için üç boyutlu nümerik analizlerin de yapılması önerilmektedir. Böylelikle tünel ve portal etkileşimi kazı öncesi daha ayrıntılı olarak değerlendirilme şansı olacaktır.

## Kaynakça

- [1] L.v Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part One," *Water Power*, pp 453–457, 1964.
- [2] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Two," *Water Power*, pp 511–515, 1964.
- [3] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Three," *Water Power*, pp 19–24, 1965.
- [4] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Ankara-istanbul yüksek hızlı tren projesi, t13 tüneli fay zonunda karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri ankara-istanbul high speed railway project, the problems encountered at t13 tunnel fault zone and solution suggestions," *IMCET 2019 / Antalya / Turkey / April 16 . 19, Proceedings 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, 2019.
- [5] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a case study from turkey." *Sustainability*, 2020, 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>, 2020.
- [6] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Evaluation of collapse mechanism and portal interaction of a high-speed railway tunnel (t29 tunnel, turkey)," *Eurock 2021*, Torino. 2021.
- [7] E.Poşluk, S. Dalgıç, İ. Kuşku, E.A. Poşluk, "Heyelan ıslahında gereken dayanma kuvvetinin limit denge yöntemi ile belirlenmesi," *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, C.27, S.2. 77-88, Y.2014, 2017.
- [8] E.B. Aygar, C. Gokceoglu, "Effects of portal failure on tunnel support systems in a highway tunnel". *Geotech Geol Eng* 39, 5707–5726.<https://doi.org/10.1007/s10706-021-01859-z>. 2021
- [9] A. Can, Y. Baskose and C. Gokceoglu, "Stability assessments of a triple-tunnel portal with numerical analysis (south of Turkey)". *Geotechnical Research*, <https://doi.org/10.1680/jgere.21.00028>. 2022
- [10] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolları Teknik Şartnamesi*, 2013.
- [11] L.v. Rabcewicz, J. Golser, "Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method," *Water Power*, Marc, 88-93. 1973.
- [12] L. Müller, "Removing misconceptions on the new austrian tunnelling method," *Tunnels & Tunnelling International*;10(8):29–32. 1978.
- [13] Yüksel Proje, *Kayaş-yerköy demiryolu kesim-1 (km:12+263-74+100) tünel jeoteknik raporu (t1, t2, t3, t4, t5, t6 ve t7)*, 2011.
- [14] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support," *Rock Mech.* 6(4), 189-239. 1974.
- [15] N. R. Barton, F. Løset, R. Lien, J. Lunde, "Application of the q-system in design decisions," *In Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon.1981.
- [16] N.Barton, "Application of q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses," *In Workshop on Norwegian Method of Tunnelling* (pp. 66–84). New Delhi, India,1993
- [17] Z.T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.

- [18] Z.T. Bieniawski, "Rock mass classification in rock engineering," *In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1*, 97-106. Cape Town: Balkema. 1976.
- [19] Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
- [20] Fugro Sial, "Ankara-sivas demiryolu projesi kayaş-kırıkkale arası kesim-1 (kayaş-elmadağ) (km:12+263-45+440) Tünel 7 Giriş Portalı Destek Sistemi Hesap Raporu", 2019
- [21] P. Marinos, E. Hoek, "Gsi: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation," *In: Poceedings of the GeiEng2000, International conference on geotechnical and geological engineering*, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, pp 1422-1446
- [22] E. Hoek, P. Marinos, "Predicting tunnel squeezing," *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.
- [23] Roclab, 2011, *Version 1.032*, [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)
- [24] RocScience, 2020. *Phase2 8.0 User Guide*, [Accessed: 17-Nov-2021]. [https://www.rocscience.com/downloads/phase2/Phase2\\_TutorialManual](https://www.rocscience.com/downloads/phase2/Phase2_TutorialManual),
- [25] J. Jacky, "The coefficient of earth pressure at rest." *J. Soc. Hung. Archit. Eng.* 78, 355–388. 1944.
- [26] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, *Technical manual for design and construction of road tunnels -civil elements*, Publication No:FHWA-NHI-10-34, 2009

### Özgeçmiş



#### Ebu Bekir AYGAR

Ebu Bekir Aygar, 1973 Ankara doğumlu olup, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde 1996 Lisans, 2000 Yüksek Lisans ve 2007 de Doktora eğitimini tamamlamıştır. Fugro Sial Müş. ve Müh. Ltd. şirketinde 2009 yılından itibaren Tünel Tasarım Bölüm Müdürü olarak görev yapmaktadır. Uzmanlık alanı olarak Tünelcilik, NATM, Kaya Mekaniği, Nümerik Analizler olarak sıralanabilir. Yazarın ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları mevcuttur. Yazar Türkiye’de ve yurtdışında farklı yüksek hızlı demiryolu ve karayolu tünel projelerinde proje müdürü olarak çalışmıştır. E-Posta: eaygar@gmail.com

#### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.