



Orijinal Araştırma / Original Research

## BİR TÜNELDE PORTAL VE TÜNEL STABİLİTESİ İLİŞKİSİ (ANKARA-SİVAS YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU PROJESİ, T3 TÜNELİ)

*PORTAL AND TUNNEL STABILITY RELATION IN A TUNNEL (ANKARA SİVAS HIGH SPEED RAILWAY PROJECTS, T3 TUNNEL)*

Ebu Bekir Aygar<sup>a,\*</sup>, Candan Gökçeoğlu<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd Şti., Çankaya, Ankara, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 14 Nisan / April 2020

**Kabul Tarihi / Accepted** : 10 Mayıs / May 2020

### ÖZ

#### Anahtar Sözcükler:

Tünel,  
Yenilme,  
Portal,  
Nümerik analiz.

Son yıllarda hızlı bir gelişim gösteren ulaşım ağı projeleri kapsamında inşa edilen tünellerin en çok karşılaşılan sorunlarından biri portal şevlerinin duraylılığıdır. Portal şevlerinde meydana gelen yenilmeler zaman zaman tünelde de duraylılık problemlerine sebep olmakta ve sorunu büyütülmektedir. Bu çalışma kapsamında, buna tipik bir örnek olan Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren projesi kapsamında inşa edilen T3 Tünelinde meydana gelen yenilme incelenmektedir. Tünel kazısı devam ederken, çıkış portal kesimi şevlerinde çatlaklar meydana gelmiş ve aynı zaman da tünel gövdesinde de göçük meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında hem göçen kesimin güvenle tekrar kazılması için sayısal analizler ile önerilen yeni destek sistemleri değerlendirilmekte, hem de portal kesiminde şev duraylılığının sağlanması için gerekli analizlerin yapılması ve sonuçların performansı tartışılmaktadır. Buna ek olarak, çalışmada genel olarak tünel portal kazısı ile tünel içi tahkimat sistemlerinin etkileşimi tanımlanarak, bu tür tünel çalışmalarını için bir prosedür önerilmektedir.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Tunnel,  
Failure,  
Portal,  
Numerical analysis.

One of the most frequent problems of tunnels built within the scope of transportation network projects, which has been developing rapidly in the recent years, is the stability of portal slopes. The failures occurring in the portal slopes sometimes result in stability problems in the tunnel and increase the problem. Within the scope of this study, the failure in the T3 Tunnel built within the scope of the Ankara-Sivas High Speed Train project, which is a typical example, is investigated. While the tunnel excavation was continuing, cracks occurred in the slope of the exit portal section and at the same time, failure occurred in the tunnel body. In the purpose of this study, both numerical analyzes and new support systems are evaluated to safely re-excavated the failed section, and the analysis of the necessary slope stability and the performance of the results are discussed. In addition, in this study, the interaction of tunnel portal excavation and tunnel support systems in general is investigated and a procedure for such tunnel studies is proposed.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: cgokce@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4762-9933>

\*\* e.aygar@fugro.com • <https://orcid.org/0000-0002-5738-4602>

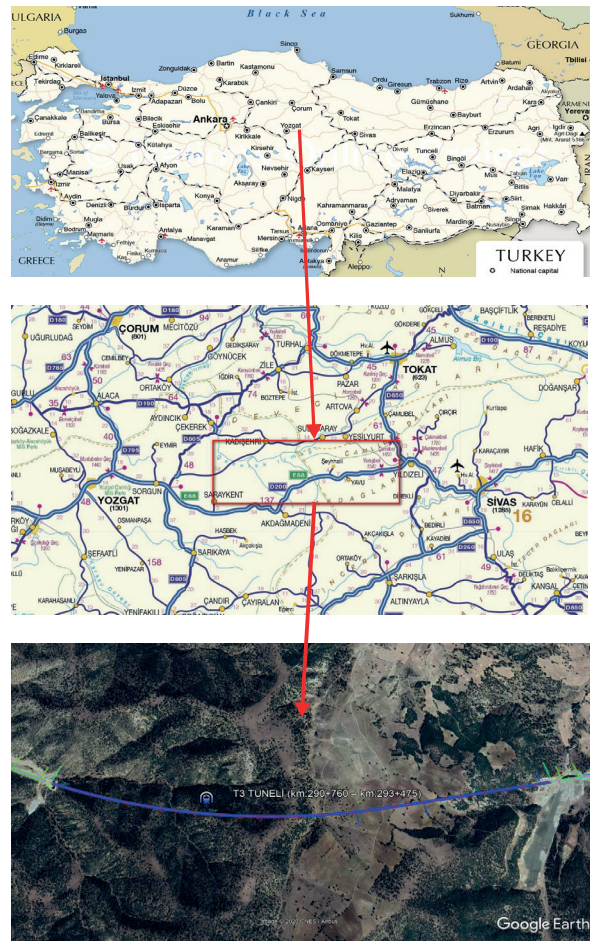
## GİRİŞ

Yüksek hızlı tren yollarındaki geometrik sınırlamalar sebebiyle ideal güzergah seçimi çoğu zaman mümkün olmamakta ve buna ek olarak jeolojik ortamdaki belirsizliklerin artmasıyla tünelcilik çalışmaları oldukça güçleşmekte ve yenilmelerle karşılaşılabilir. Tünelcilik açısından en önemli güçlüklerden biri ise portal ve tünel etkileşimi sonucu ortaya çıkan yenilmelerdir. Çünkü portalde oluşabilecek bir yenilme veya aşırı deformasyon tünel destek sistemlerini de ciddi biçimde etkileme potansiyeline sahiptir. Daha açık bir ifade ile, portal bölgesinde oluşacak bir yenilme tünel içindeki tüm çalışmaların durmasıyla sonuçlanabilecektir. Bu nedenle portal bölgesinde kazı ve destekleme tünelcilik açısından her zaman hayati öneme sahiptir. Nitekim, Khan vd. (2019) yaptıkları çalışmada, portal kesimindeki tünel kazı kademelerini modellemişler ve çalışmalarında bu bölgenin en az deformasyonla geçilmesini önermişlerdir. Ayoublou vd. (2019) ise, portal kesiminde jeoteknik ölçümlerin ve yer değiştirmelerin takibinin önemini vurgulamışlardır. Aygar ve Gokceoglu (2020) Bursa Yenişehir Hızlı Tren Projesi kapsamında T3 tüneline portal kesiminde yaşanan göçük ile bunun tünele olan etkisini nümerik analizlerle inceleyerek, portal duraylılığının önemini ve tünelle olan ilişkisini tanımlamışlardır. Taromi vd. (2018), 10 km uzunluğundaki Sabzkuh su iletim tüneline giriş portalinde konvansiyonel metotla 35 m tünel kazısı sonrasında jeolojik koşullar ve uygun olmayan kazı yöntemi sebebi ile oluşan yenilmeyi inceleyerek, çözüm önerilerini tartışmıştır. Komu vd. (2020) bir tüneline çıkış portaline yakın kesimdeki heyelanlı bölge ile tünel ilişkisini 3 boyutlu nümerik analizlerle incelemiş ve heyelanlı kesimde tünel içi deformasyonların oldukça yükseldiğini saptamışlardır. Bununla birlikte bazı araştırmacılar (Geniş, 2010; Kaya vd., 2016; Rao ve Singh, 2017; Kaya vd., 2017; Tuncay, 2018) tünel portal duraylılığı konusunda çeşitli araştırmalar yaparak, tünel portal duraylılığının, tünelcilik açısından önemini vurgulamışlardır. Ancak portal ile tünel içinde aynı anda gelişen yenilmenin mekanizmasına ilişkin yaygın araştırmalar bulunmamaktadır. Buna karşın, tünelcilik açısından son yıllarda hem portal duraylılığı ve buna bağlı olarak tünel destek sistemlerinin etkileşiminin mekanizmasının anlaşılmasının önemi gittikçe

artmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, inşaatı devam eden Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi kapsamında tamamlanmış olan T3 tüneline portal bölgesinde başlayan ve buna bağlı olarak tünel içerisinde yaşanan sorunlar incelenmekte, çözüm önerileri nümerik analizlerle değerlendirilmekte ve elde edilen bulgular tartışılmaktadır. Çözüm amaçlı yapılan tüm tasarımlar nümerik analizlerle desteklenmekte olup, analizlerden elde edilen sonuçların performansı da ayrıca sunulmaktadır. Neticede, tünelcilik açısından önemli bir sorun olan portal duraysızlığının tünel üzerindeki etkilerinin bu çalışmanın ana temasını oluşturmaktadır.

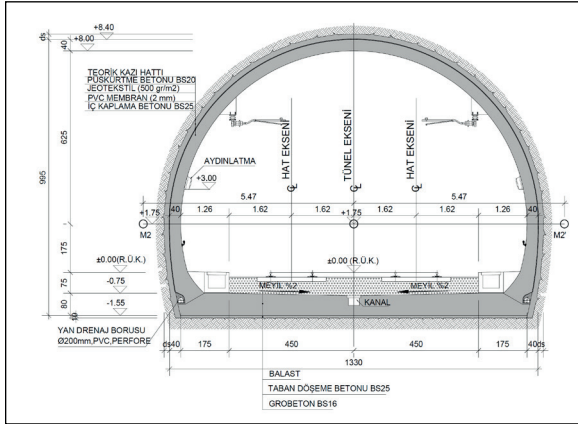
## 1. TÜNEL ÖZELLİKLERİ

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından Ankara-Sivas Hızlı Tren Demiryolu Projesi kapsamında inşaatı tamamlanmış olan T3 tüneline toplam uzunluğu 2715 m olup, Şekil 1'de konumu verilmektedir.



Şekil 1. Proje alanı yerbulduru haritası

T3 Tünelinin toplam genişliği 12,45 m ve yüksekliği ise 8 m olarak projelendirilmiştir (Şekil 2). Tünel kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve taban (invert) kademeleri şeklinde yapılmış olup, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine (NATM) (Rabcewicz, 1964a, b ve 1965) göre projelendirilmiş ve destek tipleri tanımlanmıştır.



Şekil 2. Tünel tip kesiti

## 2. PORTAL VE TÜNELDE MEYDANA GELEN SORUNLAR

İlk olarak tünel kazısı esnasında Km: 293+375-293+400 arasında tünel tavan kesiminden itibaren blok kayması şeklinde yenilme meydana gelmiş ve tünel aynası tamamen kapanmıştır (Şekil 3). Bununla birlikte, tünelin bu kesimi oldukça sığ olduğu için yenilme yüzeyde çöküntü de oluşturmuştur. Kazı aynasından başlayıp, tavadan devam eden yenilmeler sığ tünellerde yer yüzeyine kadar kolaylıkla ulaşabilmektedir (Yang ve Huang, 2011).



Şekil 3. Tünel içinde meydana gelen yenilmenin görünümü

Aynı dönem içerisinde, tüneldeki deformasyonların aşırı artmış ve portal şevlerinde çatlaklar ve püskürtme betonda yenilmelerin olduğu gözlenmiş olup, portal duraylılığını kaybetmeye başlamıştır (Şekil 4).

Şekil 5'de ise portal şevlerinde oluşan çatlakların plan üzerindeki dağılımı görülmektedir. Buna göre çatlakların ağırlıklı olarak portal alın şevi ile sol yan şevlerde geliştiği anlaşılmaktadır. Bu durum portaldeki yenilme ile tünel içindeki yenilmenin etkileşim içinde olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

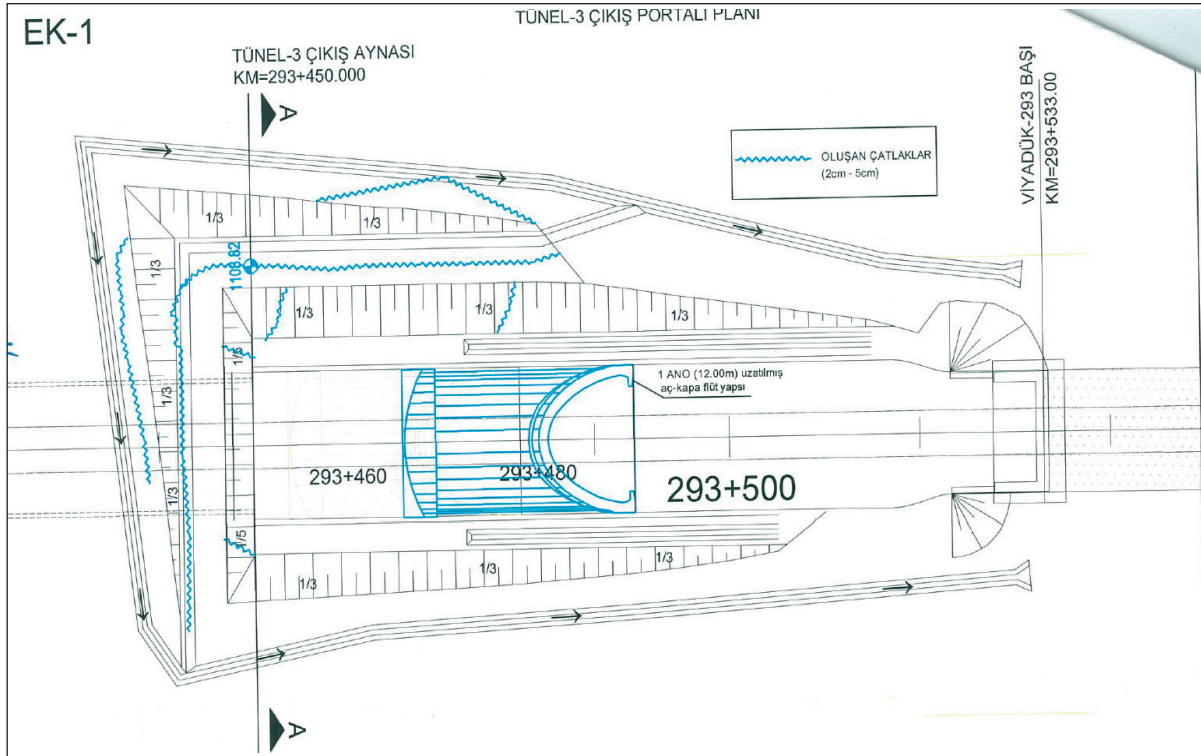


Şekil 4. T3 çıkış portalinde püskürtme betonda meydana gelen çatlaklara bazı örnekler

## 3. PORTAL ŞEVLERİNİN STABİLİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tünel kazı çalışmalarının güvenli biçimde sürdürülebilmesi için öncelikle portal şevleri ile göçük bölgesinde duraylılığın sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle portal şevlerinin duraylılığı değerlendirilmiştir. Tünelde portal alın şevi 1 Yatay:5 Düşey olarak yaklaşık 80 C°, yan şevler ise 1 Yatay:3 Düşey olarak yaklaşık 72 C° olarak projelendirilmiştir. Portal kazısı tamamen bozunmuş andezit içerisinde yapılmıştır. Yapılan bu projelendirmede, alın şevinde 9 m uzunluğunda 2x2 m paterninde yan şevlerde ise yine 2x2 m paterninde 6 m uzunluğunda bulonlar ile destekleme yapılmıştır. Ayrıca şev kazı yüzeylerine 15 cm püskürtme beton ile 2 kat Q221/221 tipinde hasır çelik uygulanmıştır. Belirlenen bu destek sistemleri ile portal şevlerinin kazısı tamamlanmış ve tünel kazısına devam edilmiştir.



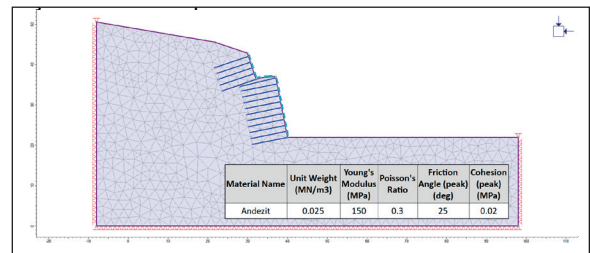


Şekil 5. T3 tüneli çıkış portalinde meydana gelen çatlakların plan üzerinde görünümü

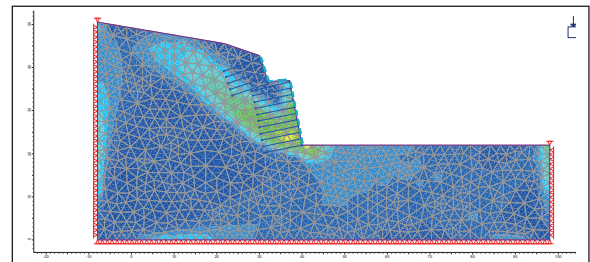
T3 tüneli çıkış portalinde meydana gelen çatlaklar (Şekil 4) güvenlik katsayısının  $FS=1$  olduğu durumu, diğer bir ifade ile tam denge şartını yansıtmaktadır. Güvenlik katsayısının 1,0 olduğu durumu için şev oluşturulan malzemenin parametreleri geriye dönük analizlerle belirlenmiştir. Eklemlili kaya kütleleri için önerilmiş geriye dönük analiz yöntemi (Sönmez vd., 1998) mevcut olmasına rağmen doğrudan bu çalışmada kullanılmamıştır. Çünkü şev oluşturulan tamamen bozunmuş andezitlerin doğrudan kaya kütlesi veya tamamen zemin gibi davranmayacağı, bu ikisinin arasında kalan bir malzeme olarak davranacağı açıktır. Bu nedenle şev oluşturulan malzemenin karakterizasyonu için en uygun yöntem olarak geriye dönük analiz yöntemi tercih edilmiştir. Geriye dönük analizler Phase2D v8.0 (RocScience, 2020) programı kullanılarak yapılmış ve tam yenilme anındaki parametreler tespit edilmiştir. Analizler SRF (Strength Reduction Factor) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde şev oluşturulan malzemenin makaslama dayanım parametreleri azaltılarak güvenlik katsayısı elde edilmektedir (Hammah vd., 2005). Phase2D programı makaslama dayanım azaltma (SSR, shear strength reduction) yöntemi ile güvenlik katsayısını hesaplamaktadır. Bu prensipler dikkate alınarak,

analizlerde kullanılmak üzere Şekil 6'da verilen model hazırlanmıştır.

Yenilme anındaki, diğer bir ifade ile SRF değerinin 1 olduğu koşula karşılık gelen kohezyon, içsel sürtünme açısı ve deformasyon modülü parametreleri tespit edilmiştir. Buna göre,  $c=20kPa$ ,  $\phi=25^\circ$  ve  $E=150 MPa$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).



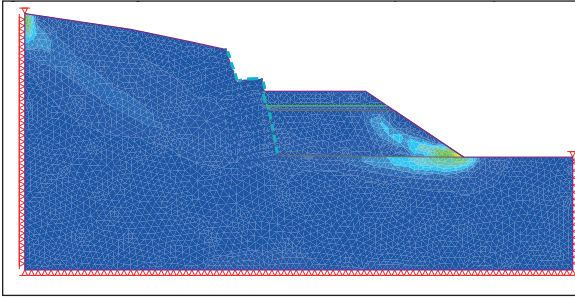
Şekil 6. Phase2D programı ile oluşturulan model



Şekil 7. Geriye dönük analiz sonucu (SRF= 1,0)



Geriye dönük analizlerle tayin edilen parametreler kullanılarak şevlerin uzun dönemde duraylılığını koruması için uygun tahkimat sistemi analizlerle tespit edilmiştir. Buna göre, öncelikle sol şev önüne kaya malzemesi ile ağırlık desteği yapılmasına karar verilmiştir. Devamında ise 12 m uzunluğunda kaya bulonları yerleştirilerek kısa dönem şev duraylılığı sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra portalin uzun dönem duraylılığını sağlamak için şevin olduğu kesime aç-kapa yapısı yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Dolayısıyla mevcut tasarım bu şekilde güncellenmiş ve aç-kapa yapısının üzeri 3 m dolgu ile doldurulması durumunda ise şevlerin güvenlik katsayısı 1,9 olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Neticede önerilen bu önlemler ile portal şevlerinin uzun süreli güvenlik şartları ancak sağlanabilmiştir.



Şekil 8. Uzun dönemde aç-kapa yapısının inşaa edildiği ve gerekli güvenlik şartlarının sağlandığı durum (SRF=1,9).

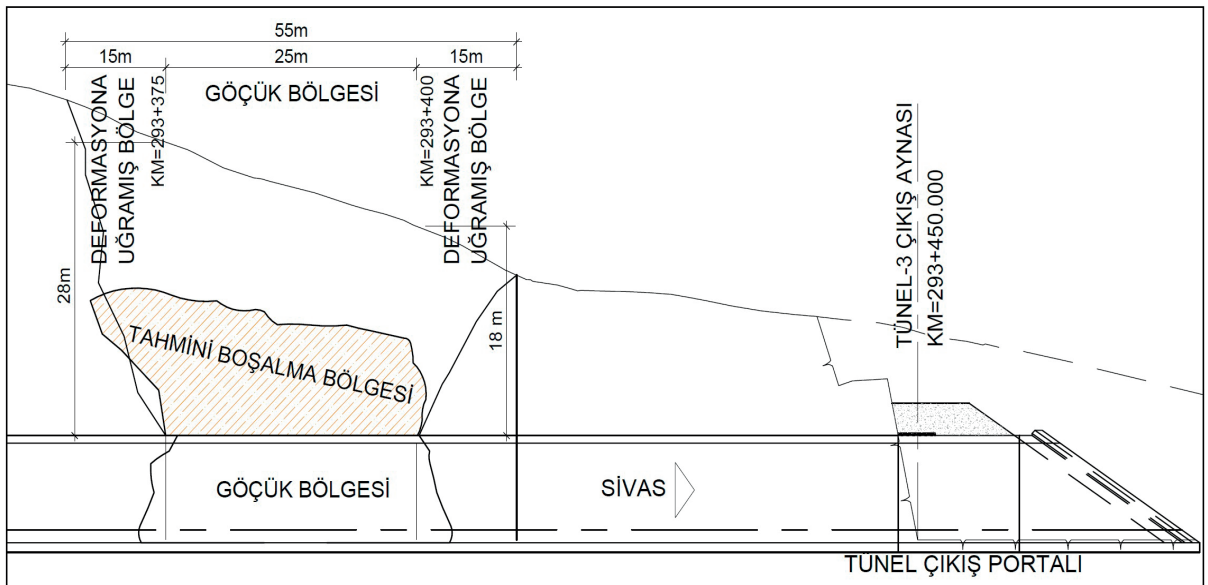
#### 4. TÜNEL İÇİNDE YENİLMİŞ KESİMİN DEĞERLENDİRİLMESİ

T3 tüneline kazı ve destekleme çalışmaları devam ederken tünel aynasında meydana gelen yenilmeye ait fotoğraf Şekil 3'de, kesit ise Şekil 9'da verilmektedir. Meydana gelen yenilme, bir malzeme akışı şeklinde olmayıp, ayrılmış andezit biriminin süresizler boyunca hareket ederek, tahkimatların dayanımını aşması ve tünel içerisinde blok düşmesi şeklinde olmuştur. Devamında kopan parçalar birbiri ardına süresizliklerden ayrılarak tünel aynasını tamamen kapatmıştır. Tahmini tünel içi yenilme bölgesi kesiti Şekil 9'da görülmektedir. Buna göre yenilmiş kesim yaklaşık 25 m'lik bir alanı kapsamakta olup, örtü yüksekliği 18 m ile 28 m arasında değişmektedir (Fugro Sial, 2015).

Yapılan değerlendirmeler dikkate alındığında, meydana gelen göçüğün güvenle geçilmesi için ilk etapta yüzeyden ve tünel aynasından enjeksiyon ile gevşemiş malzemenin iyileştirilmesi gerekmektedir, devamında ise kendinden delmeli boru sürenler ile tünel kazısı yapılmıştır.

Buna göre göçük kesimi için tünel kazı ve destekleme aşamaları dört ana aşamadan oluşmaktadır:

Yüzeyden enjeksiyon ile gevşemiş malzeme sağlamlaştırılmıştır. Yüzeyden enjeksiyon için 5x5 m patern seçilerek (Şekil 10), 1/1 su/çimento oranı

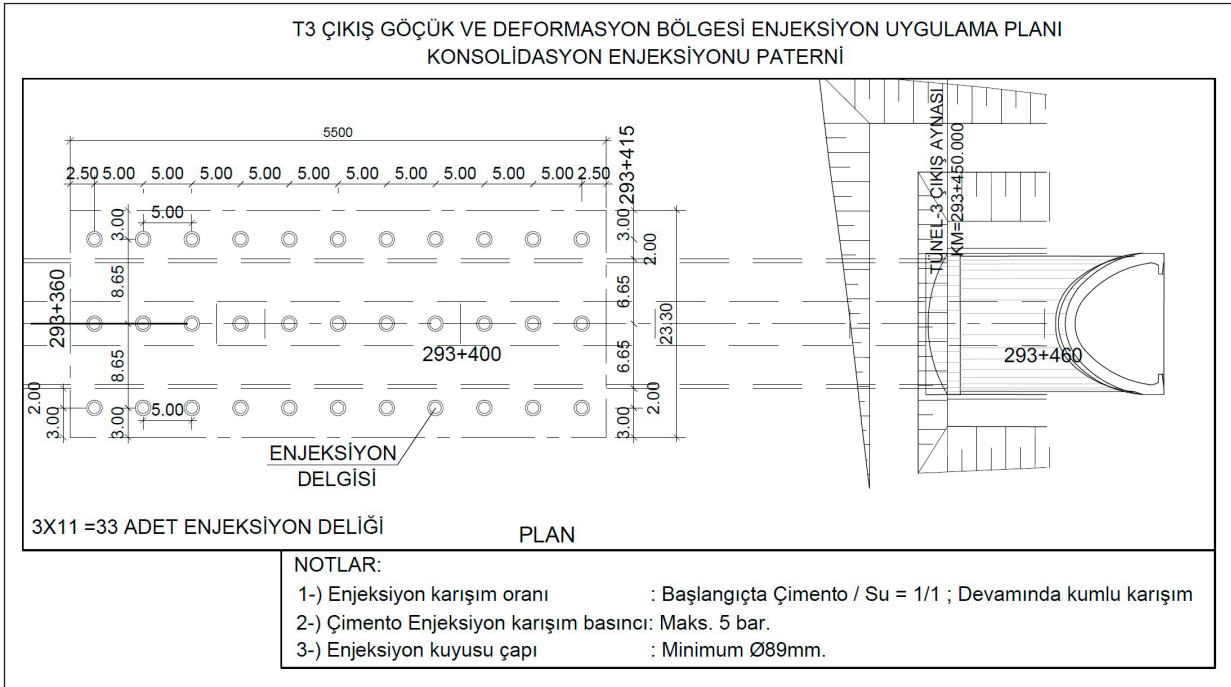


Şekil 9. Tünel içinde meydana gelen yenilmenin kesiti (Fugro Sial, 2015)

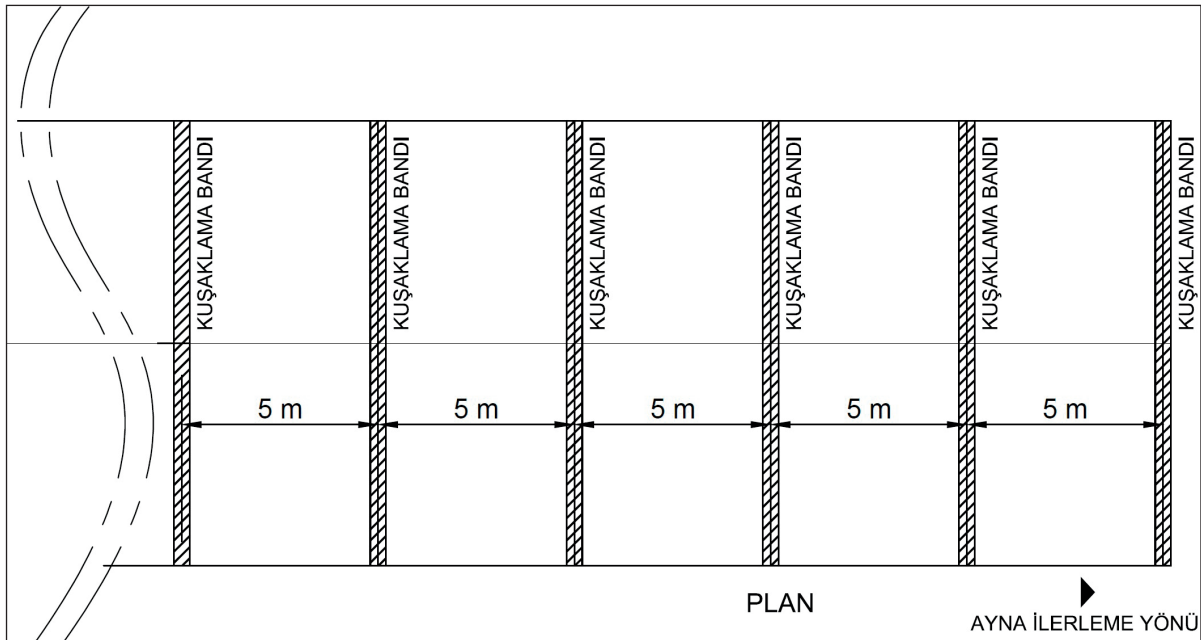
ile enjeksiyona başlanmış sonrasında ise 5/7 su/çimento oranı ile kumlu karışım yapılarak enjeksiyon tamamlanmıştır.

Yenilme sonucunda kesit içerisine giren kesimler için çelik iksa ve püskürtme beton ile ek destekleme yapılmış ve kaya bulonları ile sağlamlaştırılmıştır.

Tünelde meydana gelen ciddi deformasyonlar ve tahkimat sistemlerin-deki yenilmelerden dolayı, tünelin belirli kesimleri de kesit içerisine girmiştir. Yenilme bölgesinin kazısından önce bu kesimlerin, öncelikle duraylılığının sağlanması için 5 m'de bir ek desteklerin yapılması ve kesit boyunca kaya bulonları ile güçlendirilmesi yapılmış ve tünel duraylılığı sağlanmıştır (Şekil 11 ve 12).



Şekil 10. Yüzeyden uygulanan enjeksiyon planı

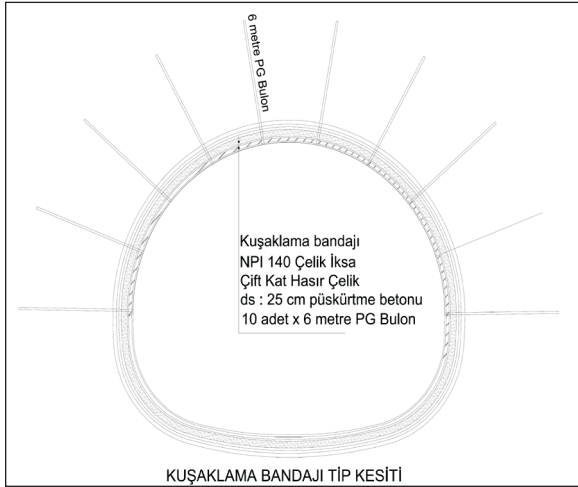


Şekil 11. Tünel ek destekleme uygulama planı

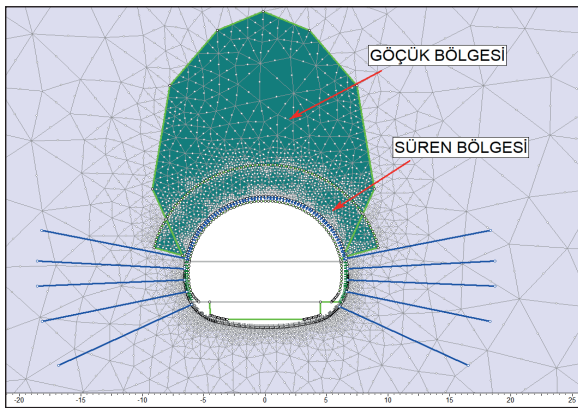
Tünel aynasından göçük bölgesine enjeksiyon yapılarak tünel ayna önündeki malzeme tamamen sağlamlaştırılmıştır. Son aşamada ise sağlamlaştırılan bölgenin kendinden delmeli boru sürenler kullanılarak tünel kazısına devam edilmiştir. Bu aşamada yenilme bölgesinin destek sistemlerinin belirlenmesi için Phase2D programı ile sayısal analizler yapılmıştır (RocScience, 2020).

#### 4.1. Modelleme Aşamaları ve Destek Sistemi

Sayısal analizler öngörülen tahkimat sisteminin incelenmesinde kullanılan en temel yöntemdir ve araştırmacılar (Koçkar ve Akgün, 2003; Akgün vd., 2014; Zou vd., 2019; Moussai vd., 2019) tünellerin tasarımında sayısal analizleri yaygın biçimde kullanmaktadır. Bu çalışmada da sayısal analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan model, malzeme parametreleri ve sınır koşulları Şekil 13-15'de verilmektedir. Sayısal modelleme ise 10 aşamada gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1).



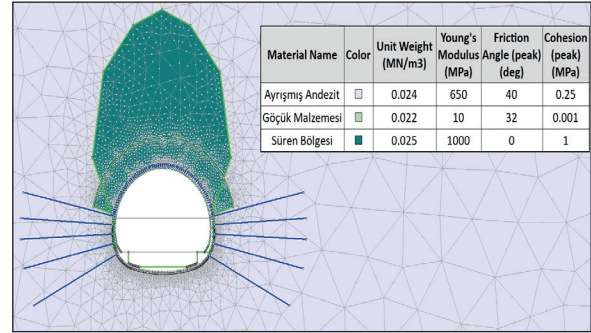
Şekil 12. Tünel ek destekleme uygulama kesiti



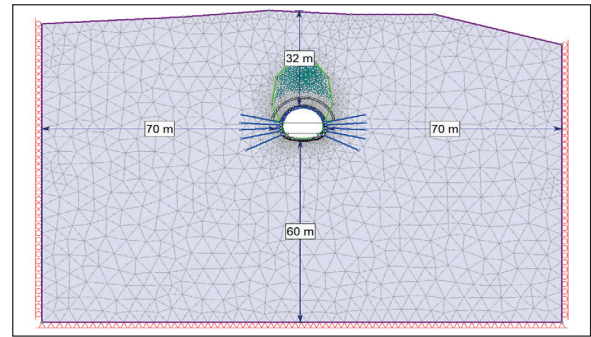
Şekil 13. Yenilme zonunun gösterildiği model

#### 4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yenilmiş kesimin güvenle geçilmesi için öngörülen destek sistemleri kullanılarak yapılan analizlerde, tünel tavanında 2,1 cm, tünel sol ve sağ omuzlarında 1,65 cm, tünel alt yarılarında 1,05 cm ve tünel tabanında ise 1,50 cm yer değiştirme hesaplanmıştır. Tünel çevresindeki dayanım faktörleri ise, 1'in üzerinde olup, tünelden uzaklaştıkça yükselmektedir (Şekil 16 ve 17).



Şekil 14. Modelde kullanılan malzeme parametreleri

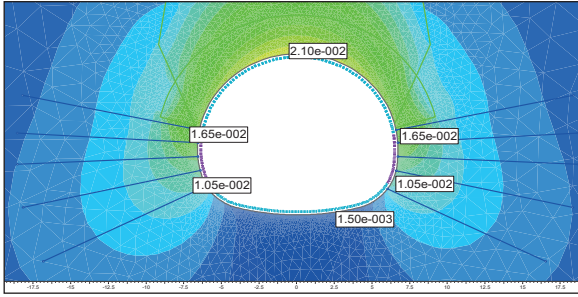


Şekil 15. Phase programı ile oluşturulan modele ait sınır koşulları

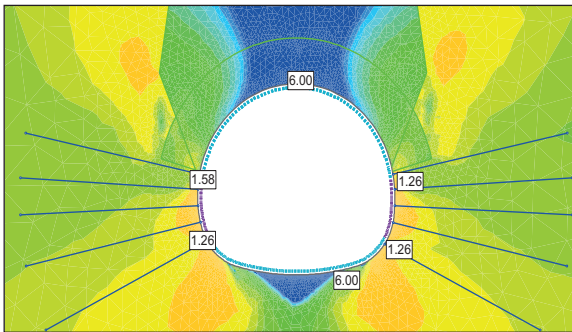
Çizelge 1. Modelleme aşamaları

Kademe	Modelleme aşamaları
1	İlk Gerilme
2	Yenilmiş malzemesinin tanımlaması
3	Tünel enjeksiyonu yapılması
4	Sürenlerin çakılması
5	Üst yarı kazısı Püskürtme beton ve kaya bulunu
6	Alt yarı kazısı Püskürtme beton ve kaya bulunu
7	Invert kazısı püskürtme beton ve kaya bulunu
8	Taban betonunun modele girilmesi
9	İç kaplamanın modele girilmesi
10	Deprem ivmesinin modele girilmesi



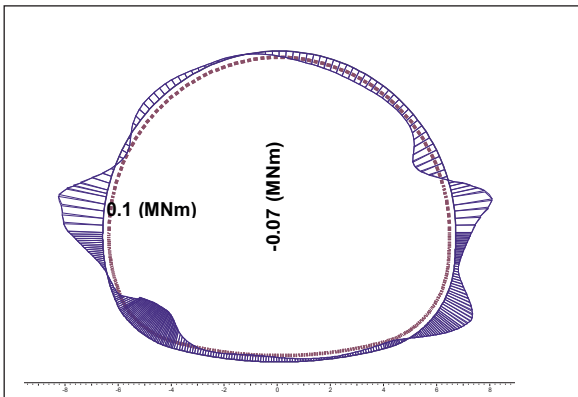


Şekil 16. Tünel çevresinde meydana gelen toplam yer değiştirmeler

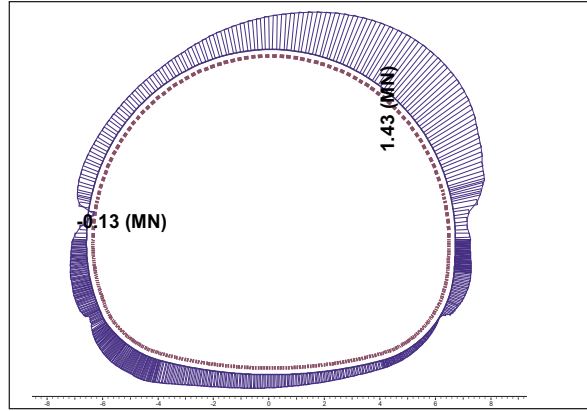


Şekil 17. Tünel çevresindeki dayanım faktörü

Depremler sırasında tünellerin çeşitli derecelerde hasara uğradığı bilinmektedir (Li, 2012; Roy ve Sarkar, 2017). Dolayısıyla, iç kaplama betonunun deprem performansının değerlendirilmesi amacıyla ek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen analiz sonuçları olarak uzun dönemde iç kaplama betonunda deprem anında oluşan kesit tesirleri Çizelge 2 ile Şekil 18 ve 19'da sunulmaktadır. Bu aşamada gerçekleştirilen analizlerde kullanılan modelden püskürtme beton, bulon, çelik iksa kaldırılmış olup, sadece iç kaplama tanımlanmıştır.



Şekil 18. Kaplamada meydana gelen momentler



Şekil 19. Kaplamada meydana gelen aksel kuvvetler

Kesit tahkiki analizlerinde ise beton sınıfı C25/30 ve ST420 tipi donatı seçilmiştir. Yapılan analizlerde iç kaplama betonu kalınlığı 40 cm olarak demir donatılar 16 mm çapında tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarında iç kaplama betonuna gelen moment ve aksel kuvvetler incelenmiş ve kesitin yeterli geldiği görülmüştür (Şekil 20).

Çizelge 2. Uzun dönemde kaplamaya gelen moment ve aksel kuvvet değerleri

	Eksel kuvvet (MN)	Moment (MNm)
Kesit tesirleri	-1.430	0.100

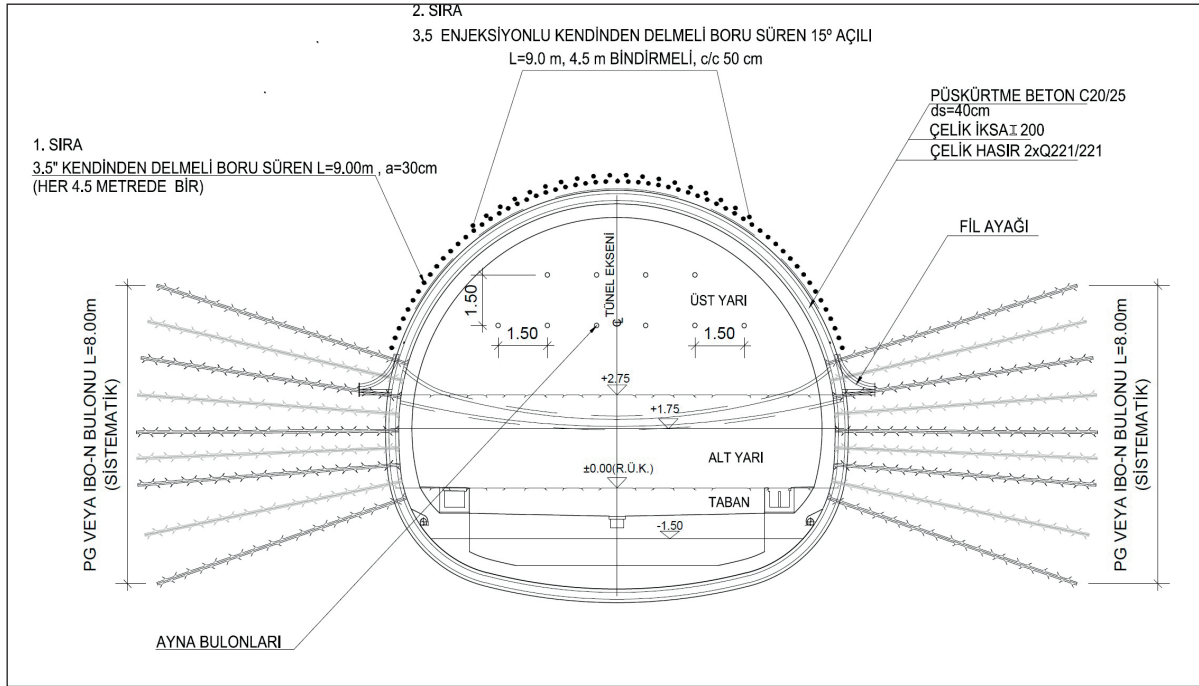
#### 4.3. Yenilme Bölgesi Destek Sistemleri

Enjeksiyon işleminin tamamlanmasından ve deformasyon bölgelerindeki ek destekleme sistemlerinin tamamlanmasını takiben üst yarı kazısına başlanmıştır. İlk aşamada tünel üst yarısı boyunca 30 cm ara ile 3,5" çapında, 9 m uzunluğundaki birinci kat kendinden delmeli boru sürenler yaklaşık 8 derece açı ile yerleştirilmiştir. Birinci kat sürenlerin hemen üzerinden ikinci kat sürenler 50 cm ara ve 15 derece açı ile yerleştirilmiştir (Şekil 21 ve 22). Sürenlerin son 6 m'si delikli olup, 4,5 m bindirmeli olarak uygulaması yapılmıştır.

Göçük bölgesi için uygulanan destek sistemi ayrıntıları aşağıda özetlenmiştir.

- Tünel kazısı (ilerleme boyu 0,75 m),
- Yüzeyin ve aynanın 10 cm püskürtme beton ile kaplanması,





Şekil 22. Tünel yenilme bölgesi destekleme sistemi kesiti

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Hızlı tren demiryolları ve otoyollar için gereken yüksek teknik standartlar ve geometrik sınırlamalar, sık tünellerin inşasını zorunlu olarak arttırmaktadır (Zhang vd., 2019). Bununla birlikte tünelcilik açısından en kritik kesimler portal bölgeleridir. Kazılar sırasında portal şevlerinde oluşabilecek aşırı deformasyonlar tünel içerisinde de etkili olacak ve tünelin göçmesine sebep olabilecektir. Bu nedenle duraylılık açısından tünel içi ile portal bölgesi kesinlikle ayrı düşünülmemeli ve mutlaka bu etkileşim dikkate alınarak birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, kazılar sırasında tünel ve portal yenilmesinin bir arada olduğu bir tünel olan ve Ankara – Sivas hızlı tren projesi kapsamında inşa edilen T3 tüneli bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar ve tartışmalar aşağıda sunulmaktadır:

T3 tüneline portal ve tünel içi yenilmesi eş zamanda oluşmuş ve bu yenilmeler birbirini tetiklemiştir. Tünel güvenliğinin sağlanabilmesi için öncelikle portal duraylılığının sağlanması gerekmektedir. Tamamen bozunmuş andezitlerden, dolayısıyla oldukça zayıf bir malzeme

içinde açılan portal şevleri ek desteklemelere rağmen duraylılığını kaybetmiş ve bu kesimde oluşan aşırı deformasyonlar tünelin 25 m'lik bir kesiminde göçüğe neden olmuştur. Yapılan araştırmada ek desteklemelere rağmen portal şevlerinin uzun dönemde duraylılığını koruyamayacağı sonucuna ulaşıldığı için bu bölgeye aç-kapa yapısı önerilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, portal şevlerinin duraylılığı ancak aç-kapa yapısı ve üstüne 3 m'lik dolgu ile sağlanabilmiştir. Devamında, tünel içinde yenilmiş kısmın yeniden kazılabilmesi için yüzeyden enjeksiyon prosedürü uygulanarak gevşemiş kesimin iyileştirilmesi gerekmiştir.

Tüm tahkimat ve kazı aşamaları sayısal analizlerle araştırılmış ve öngörülen tahkimat sisteminin başarı ile uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Önerilen kazı aşamaları ve tahkimat sistemleri kullanılarak tünel inşaatı başarı ile tamamlanmıştır. Ayrıca, tünelin yeniden kazılması aşamasında önerilen tasarım, yerindeki gözlem ve ölçümlerle kontrol edilmiş ve analiz sonuçlarının başarılı bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Analizler ile uygulama sonuçlarının uyumundaki en kritik husus, saha karakterizasyonunun doğru



yapılmasıdır. Diğer bir ifade ile, yenilmiş şevlerin geriye dönük analizlerinden elde edilen parametrelerin doğal malzemeyi yeterince temsil etmesi ve ayrıca göçük mekanizması ile yayılma alanının doğru tespit edilmesi, analizlerden beklenen performans için temel kriterlerdir. Analizlerle kontrol edilen tasarımın bu çalışma kapsamında başarı ile uygulanması yukarıda verilen kriterlerin yeterince sağlandığını göstermektedir. Neticede bu çalışmada portal ve tünel yenilmesinin bir arada olduğu durumlar için bir araştırma ve uygulama prosedürü önerilmiştir. Önerilen prosedürün performansı uygulama boyunca izlenmiş ve başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gelecekte yapılacak tünel çalışmalarında portalin zayıf zeminler içinde oluşturulması halinde, portal duraylılığının sağlanması için yeterli uzunlukta aç-kapa yapılarının öncelikle düşünülmesi ve planlanması tünel duraylılığı açısından hayati öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmadaki desteklerinden dolayı TCDD Genel Müdürlüğü ve Fugro Sial'e teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

Akgün, H., Muratlı, SW., Koçkar, M.K., 2014. Geotechnical Investigations and Preliminary Support Design for the Geçilmez Tunnel: A Case Study Along the Black Sea Coastal Highway, Giresun, Northern Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 277 – 299.

Aygar, E.B and Gokceoglu, C., 2020. Problems Encountered During a Railway Tunnel Excavation in Squeezing and Swelling Materials and Possible Engineering Measures: A Case Study from Turkey. *Sustainability*, 12, 1166.

Ayoublou, F., Taromi, M., Eftekhari, A., 2019. Tunnel Portal Instability in Landslide Area and Remedial Solution: A Case Study. *Acta Polytechnica*, 59(5), 435–447.

Fugro Sial Yerbilimleri, 2015. Ankara-Sivas Hızlı Tren Demiryolu Projesi Yerköy-Yozgat-Sivas Arası, T3 Tüneli (Km: 293+375 - 293+400) Arasında Meydana Gelen Göçük Değerlendirme Raporu.

Geniş, M., 2010. Assessment of the Dynamic Stability of the Portals of the Dorukhan Tunnel Using Numerical Analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47, 1231–1241.

Kaya, A., Akgün, A., Karaman, K., Bulut, F., 2016. Understanding the Mechanism of Slope Failure on a Nearby Highway Tunnel Route by Different Slope Stability Analysis Methods: A Case From NE Turkey. *Bull Eng Geol Environ*, 75, 945–958.

Kaya, A., Karaman, K., Bulut, F., 2017. Geotechnical Investigations and Remediation Design for Failure of Tunnel Portal Section: A Case Study in Northern Turkey. *Journal of Mountain Sciences*, 14 (6), 1140 – 1160.

Khan, R.M.A., Mad, Z., Jo, B., 2019. Tunnel Portal Construction Using Sequential Excavation Method: A Case Study. *Acta Polytechnica*, 59(5), 435–447.

Koçkar, M.K., Akgün, H., 2003. Methodology for Tunnel and Portal Support Design in Mixed Limestone, Schist and Phyllite Conditions: A Case Study in Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 173 – 196.

Komu, M.P., Guney, U., Kilickaya, T.E., Gokceoglu, C., 2020. Using 3D Numerical Analysis for the Assessment of Tunnel–Landslide Relationship: Bahce–Nurdag Tunnel (South of Turkey). *Geotech Geol Eng*, 38, 1237–1254.

Hammah, R.E., Yacoub, T.E., and Corkum, B.C., 2005. The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. *ARMA/USRMS, American Rock Mechanics Association*, 05-810.

Li, T., 2012. Damage to Mountain Tunnels Related to the Wenchuan Earthquake and Some Suggestions for Aseismic Tunnel Construction. *Bull Eng Geol Environ*, 71, 297–308.

Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K., Khosravi, M.H., 2019. A New Classification of Failure Mechanisms at Tunnels in Stratified Rock Masses Through Physical and Numerical Modelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 103017.

Rabcewicz, L.v., 1964a. The New Austrian Tunnelling Method, Part One. *Water Power*, pp. 453–457.

Rabcewicz, L.v., 1964b. The New Austrian Tunnelling Method, Part Two. *Water Power*, pp. 511–515.

- Rabcewicz, L.v., 1965. The New Austrian Tunnelling Method, Part Three. Water Power, pp. 19–24.
- Rao, K., Singh, T., 2017. Two-Dimensional Finite Element Based Parametric Analysis of South Portal Slope, Rohtang Tunnel, India. Procedia Engineering, 173, 1330 – 1333.
- RocScience, 2020. Phase2 8.0 Excavation & Support Design. <https://rocscience.com/documents/pdfs/uploads/8706.pdf>.
- Roy, N., Sarkar, R., 2017. A Review of Seismic Damage of Mountain Tunnels and Probable Failure Mechanisms. Geotech Geol Eng, 35, 1–28.
- Sönmez, H., Ulusay, R., Gokceoglu, C., 1998. A Practical Procedure for the Back Analysis of Slope Failures in Closely Jointed Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 35 (2), 219 – 233.
- Taromi M., Eftekhari A., Hamidi J. K., Eghbali A., 2018. Tunnel Designing and Construction Process in Difficult Ground Conditions Using Controlled Deformations (ADECO) Approach: A Case Study. International Journal of Mining and Geo-Engineering, IJMGE 52-2, 149–160.
- Tuncay, E., 2018. Assessments on Slope Instabilities Triggered by Engineering Excavations Near a Small Settlement (Turkey). Journal of Mountain Sciences, 15 (1), 114-129.
- Yang, X.L., Huang, F., 2011. Collapse Mechanism of Shallow Tunnel Based on Nonlinear Hoek–Brown Failure Criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 686 – 691.
- Zhang, Z., Li, H., Yang, H., Wang, B., 2019. Failure Modes and Face Instability of Shallow Tunnels Under Soft Grounds. International Journal of Damage Mechanics, 28 (4), 566–589.
- Zou, J., Chen, G., Qian, Z., 2019. Tunnel Face Stability in Cohesion-Frictional Soils Considering the Soil Arching Effect by Improved Failure Models. Computers and Geotechnics, 106, 1-17.