

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

Ebu Bekir Aygar¹, Candan Gökçeoğlu^{*2}

¹Fugro Sial Yerbilimleri Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti., Ankara ORCID: 0000-0002-5738-4602

²Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara ORCID: 0000-0003-4762-9933

Geliş Tarihi: 12.09.2020

Kabul Tarihi: 10.05.2021

Özet

Aktif tektonik zonlar içeren ülkemizde, fay zonlarında açılan tünellerden elde edilen tecrübeler tünelcilik açısından büyük öneme sahiptir. Yüksek hızlı tren projeleri kapsamında açılan tünellerde güzergahın kurp yarıçaplarının büyük olması sebebiyle, güzergah seçiminde ciddi sınırlamalar bulunmaktadır. Bu nedenle düşük dayanımlı zeminler ile fay zonlarından kaçınılması çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Fay zonu ve/veya zayıf zon geçişlerinde çoğu zaman özel destek sistemi tasarımı gerekmekte olup, tünel kazıları sırasında karşılaşılan sorunların çoğunluğu bu kesimlerde yaşanmaktadır. Sıklıkla karşılaşılan sorunlara ek olarak, zayıf zeminlerde kısa ve uzun dönem parametrelerine göre de destek sistemlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle tünel aynasında yapılan ayna bulonları ile sürenlerin kısa dönem parametrelerine göre değerlendirilmesi gerekirken iç kaplamının ise uzun dönem parametrelerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Tüm bu hususlar dikkate alınarak bu çalışmada, Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren projesi kapsamında açılan T21 tüneline karşılaşılan fay zonu geçişinde uygulanan destek sistemleri incelenmesi, FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) programı ile kısa ve uzun dönem parametrelerine göre analitik çözümler ile 3 boyutlu nümerik analizler yapılması ve sonuçların tünelcilik pratiği açısından tartışılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fay zonu, Kısa ve uzun dönem zemin parametreleri , Tünel, Üç boyutlu nümerik analiz

Assessment of tunnel stability based on short- and long-term parameters

Abstract

In Turkey, which includes active tectonic zones, the experiences gained from tunnels constructed in fault zones are of great importance in terms of tunneling. In the tunnels excavated within the scope of high speed train projects, there are serious limitations in the selection of the route due to the large curve radii of the route. For this reason, it is often not possible to avoid weak grounds and fault zones. Special support system design is often required in fault zone and / or weak zone transitions, and most of the problems encountered during tunnel excavations are experienced in these sections. In addition to the frequently encountered problems, support systems should also be evaluated according to short and long term parameters in clays. Especially the bolts made in the tunnel face and the pipes applied to tunnel crown should be considered according to the short term parameters, while the inner lining should be evaluated according to the long term parameters. Considering all these issues, in this study, the analysis of the support systems applied in the fault zone transition encountered in the T21 tunnel constructed within the scope of the Ankara-Istanbul High Speed Train project, the analysis of 3D numerical analyzes according to the short and long term parameters with the FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) program are performed, and the results are discussed in terms of the tunneling practice.

Keywords : Fault zone, Short and long term soil parameters, Three dimensional numerical analysis, Tunnel

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Candan Gökçeoğlu, cgokce@hacettepe.edu.tr

Künye Bilgisi: Aygar, EB, Gökçeoğlu, C.(2021). Tünel Stabilitesinin Kısa ve Uzun Dönem Parametreleri ile Değerlendirilmesi. Artibilim: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 14-30.

1. Giriş

Günümüzde hem karayolu taşımacılığı hem de demiryolu taşımacılığındaki talep artışına bağlı olarak tünel inşaatlarının sayısında da çok ciddi bir artış meydana gelmiştir. Özellikle yüksek hızlı tren projelerinde hızın 250 km/saat olması sebebiyle de güzergahta jeolojik ve jeoteknik şartlara bağlı değişiklik yapma neredeyse imkansızdır. Bu sebepten dolayı güzergah üzerinde yer alan tünellerde fay ve/veya zayıf zon geçişlerinden sakınmak mümkün olamamaktadır. Hızlı tren projeleri kapsamında inşa edilen tünellerin kesit alanlarının 140 m² ye kadar çıktığı dikkate alındığında çoğu zaman kazı kademeleri üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde yapılabilmektedir. Fay zonlarında açılan tünellerde zemin özelliklerine bağlı olarak, tavan ve tünel ayna stabilite problemleri ile karşılaşmaktadır.

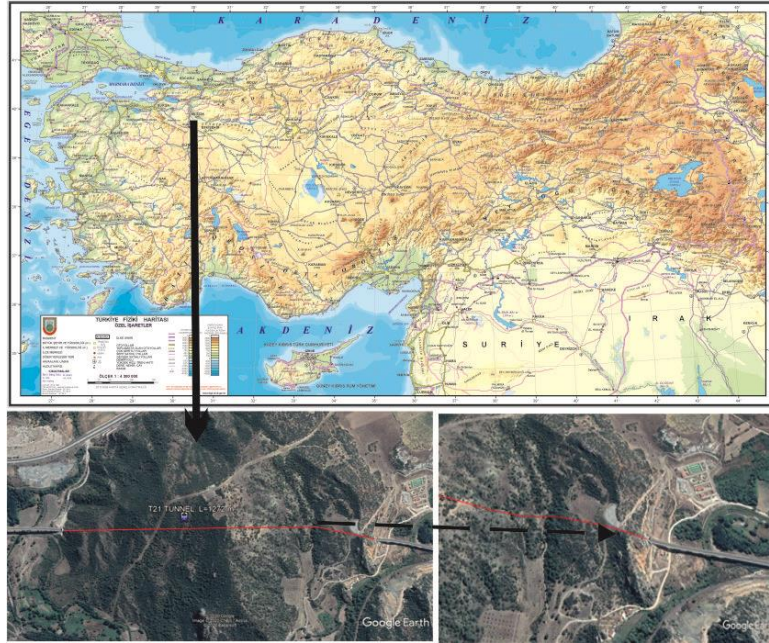
Zayıf zeminlerde ve fay zonlarında açılan tünellerin destek sistemlerinin tasarımında ise detaylı yaklaşımlara ve özel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Projelendirme sırasında ve inşaat süresi boyunca tünel ve destek sistemlerinin davranışları titizlikle izlenmeli ve ihtiyaç halinde revizyonlar yapılmalıdır. Sadece Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin belirlemiş olduğu standartlara göre değil, her kesit için birimlerin tanımlanması, zemin parametrelerinin belirlenmesi ve bu bilgiler kullanılarak analizlerin tekrarlanması ile başarılı çözümler elde edilecektir.

İstanbul-Ankara otoyolu üzerinde yer alan ve Kuzey Anadolu Fay Hattı içinde açılan Bolu Tünelleri Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemine göre projelendirilmiş ancak zayıf dayanımlı zeminlerde ve fay zonlarında karşılaşılan sorunlar nedeniyle tamamen rijit bir kaplama sistemine dönülerek tüneller tamamlanabilmiştir [1-2]. Ayrıca Aygar [3] zayıf zeminlerde ve fay zonlarında esnek bir dış kemer yerine rijit desteklerin olması gerektiğini belirterek Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin revize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. İstanbul-Ankara Yüksek Hızlı Tren projesi kapsamında açılmış olan T13 tüneli kazıları sırasında fay zonu geçişlerinde 1.0 m ye kadar deformasyonlar ölçülmüş ve bu kesimler için özel destek sistemleri tasarlanmıştır [4]. Sözü edilen bu çalışma kapsamında [4] uzun dönemde zeminin şişme özelliklerine bağlı olarak tahkimatların yenildiği de belirlenmiştir. Hoek [5, 6], Hoek ve Guevera [7] ve Schubert [8] çalışmalarında zayıf zeminlerde veya yüksek basınç altında açılan tünellerde yaşanan şişme ve sıkışma problemlerini tartışmışlardır. Benzer biçimde Hoek ve Marinos [9] Nathpa Jhakri Hydroelectric Power Plant Project kapsamında açılan 10 m çaplı tünelde karşılaşılan ciddi deformasyonları incelemişler ve çözüm önerilerini tartışmışlardır. Taromi vd. [10] 10.6 km uzunluğundaki bir su iletim tüneline yakın bölgede yaşanan yenilmeyi incelemişler ve çözüm önerilerini tartışmışlardır. Zayıf zeminler içinde açılan bir tünelde portal yenilmesinin tünelde yarattığı olumsuz etkiler Aygar ve Gökçeoğlu [11] tarafından incelenerek, tünel portal kazısı ile tünel içi tahkimat sistemlerinin etkileşimi tanımlanmış ve bu tür tünel çalışmaları için bir prosedür önerilmiştir.

Kısa literatür özetinden de görüleceği gibi, gerek tünelin boyut ve geometrisine gerekse ortamın jeolojik ve jeoteknik şartlarına bağlı olarak her tünel kazısı farklı problemlere sahiptir. Ortamlar açısından bakıldığında, yumuşak zeminler ve fay zonu geçişleri ayna ve tavan stabilitesi açısından son derece güç ve karmaşık problemleri içerir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, zayıf zeminler içinde açılan, açıklığı yaklaşık 13 m olan geniş çaplı bir demiryolu tüneline stabilitesinin hem kısa hem de uzun dönem zemin parametreleri dikkate alınarak analitik ve 3 boyutlu (3D) nümerik analizlerle incelenmesi, elde edilen sonuçlarının tartışılmasıdır.

2. T21 tünelinin genel özellikleri

T21 tüneli Ankara İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi kapsamında ve Km:204+258 - 205+530 aralığında inşa edilmiş olup, toplam uzunluğu 1272 metredir(Şekil 1). Tünel girişi yaklaşık 252 m kotundan başlayıp 421 m'ye kadar yükselmekte ve devamında tünel çıkışında ise 270 m'ye inmektedir. Tünel üzerindeki örtü kalınlığı 6 ile 150 m arasında değişmektedir. Bu çalışma kapsamında ise sadece Km: 205+250 - 205+290 arasında kalan yaklaşık 40 m'lik fay zone kesimi incelenmekte olup, bu kesimde örtü kalınlığı 10 - 25 m arasındadır. Bu faylı kesimde örtünün 2 ila 6 m arasında değişen kalınlıktaki kısmını yamaç molozu oluşturmaktadır [12]. Tünel güzergahının Google Earth görüntüsü ve planı Şekil 1'de görülmektedir. Tek tüp olarak projelendirilen T21 tünelinin yüksekliği 8.0 m olup, kazı çapı 13.5 m'dir.



Şekil 1. T21 Tüneli yerbulduru haritası ve Km:205+250 - 205+290 arası Google Earth görüntüleri

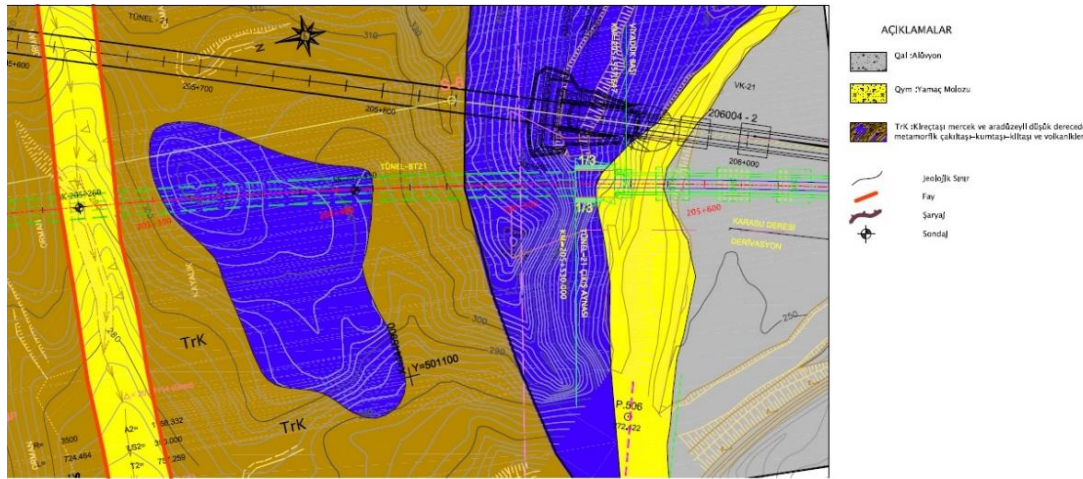
T21 tüneli Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ilkelerine göre [13-17] kazılmıştır. Tünelin Km: 205+250 - 205+290 kesiminin hem fay zone içinde yer alması hem de örtü kalınlığının oldukça az olması sebebiyle, tünelin diğer kesimlerinden farklı olarak, özel bir kazı ve destek sisteminin geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında ise geliştirilen bu sistemlerin 3D nümerik analizleri yapılarak sonuçları tartışılmaktadır.

3. Jeolojik-jeoteknik koşullar

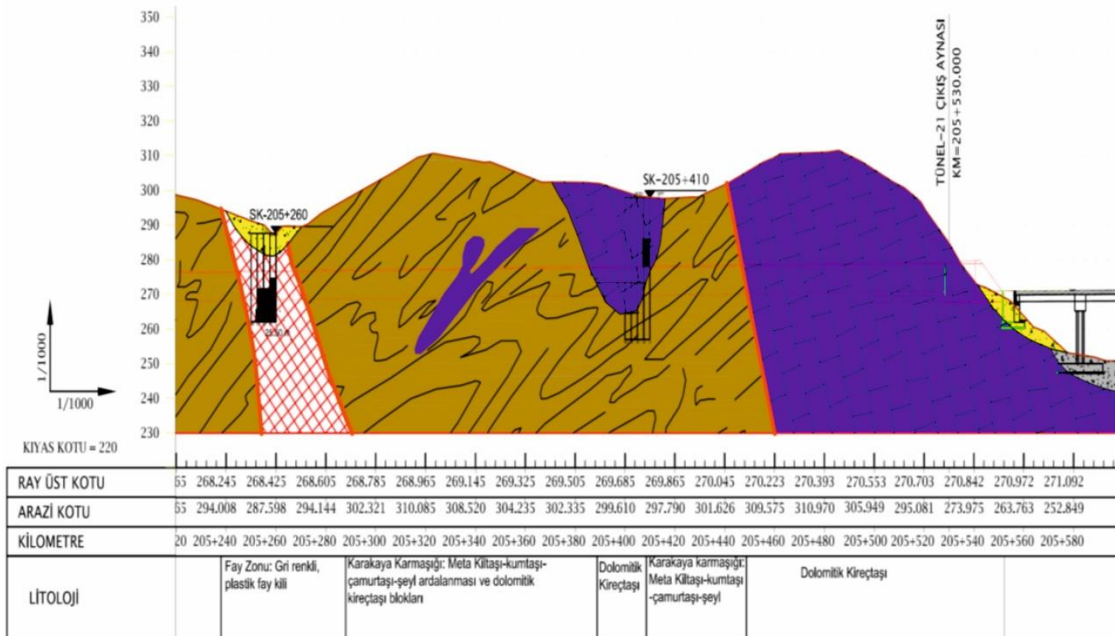
Giriş portalı ile Km: 205+140 aralığında metakiltası, kumtaşı, çamurtaşı, şeyl ardalanması ve dolomitik kireçtaşı blokları içeren Karakaya Karmaşığı bulunmaktadır (Şekil 2 ve 3). Km: 205+140 ile 205+180 arası düşük derecede metamorfizmaya uğramış kırıntılı çakiltası-kumtaşı-çamurtaşı yer yer

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

kumlu kireçtaşı ara seviyeli mercekler içerisinde, Km:205+180 - 205+240 arası ise metakiltaş, kumtaşı, çamurtaşı, şeyl ardalannası ve dolomitik kireçtaşı blokları içeren Karakaya Karmaşığı birimleri gözlenmiştir. Km:205+240 - 205+290 arasında gri renkli plastik fay kili içinde tünel kazısı yapılmıştır. Km:205+290'dan itibaren çıkışa kadar yine benzer şekilde Karakaya Karmaşığına ait birimlerle karşılaşmıştır. Bölge ardışık ve farklı fay sistemlerinin etkisinde olup bu etki tünel güzergahında da açık biçimde gözlenmiştir. Tünel aynalarında süreksizlik sayısındaki artışa bağlı olarak bozunmanın da arttığı tespit edilmiştir [12]. Fugro Sial [12] tarafından fay zonu kesiminde yaptırılan sondaja ait karot sandığı fotoğrafı Şekil 4'de verilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, örtü birimlerin yüzeyden itibaren ilk 6 metresi yamaç molozu olup, devamında fay zonuna ait kil birim kesilmiştir.

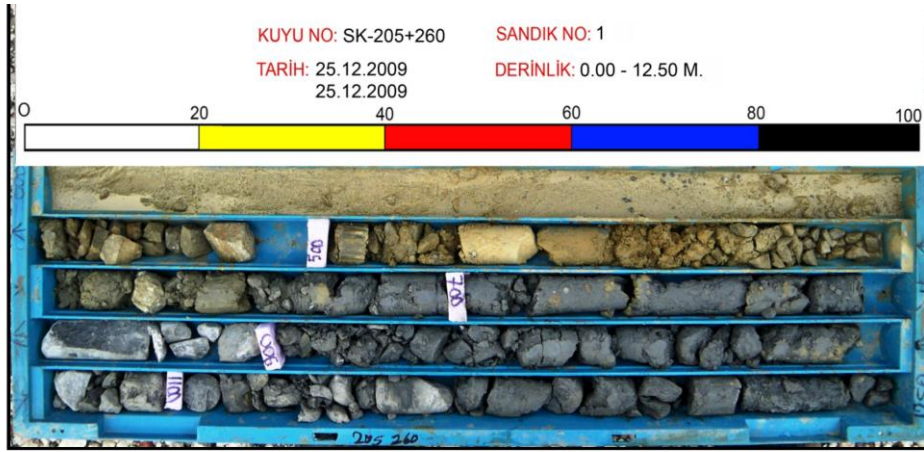


Şekil 2. Km:205+240 – çıkış portal jeolojisi haritası [12]



Şekil 3. Km:205+240 – çıkış portal arası jeolojik kesiti [12]

Tünellerin projelendirilmesi amacıyla yapılan jeolojik – jeoteknik çalışmalarda, üzerindeki örtü sebebiyle, tünel kotu civarındaki malzemelere ancak sondaj çalışmalarıyla ulaşılabilmektedir. Bununla birlikte, özellikle zayıf dayanımlı, az pekişmiş malzemelerden örselenmemiş standard örnek almak da çoğu zaman imkansız hale gelebilmektedir. Şekil 4’den de görüleceği gibi, tünel kotu ve yakın civarındaki zayıf zeminlerden de doğası itibariyle laboratuvar deneyleri için standard örnek alma imkanı olamamıştır. Bu nedenle tasarım çalışmaları sırasında aşağıda belirtildiği gibi, literatürde yaygın kullanılan ampirik yaklaşımlar kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Km: 205+240 - 205+290 arasında bulunan fay zonu tamamiyle yüksek plastisiteye sahip ve çok zayıf kil biriminden oluşmaktadır. Bu birimin drenajsız kohezyonu Stroud [18]’e göre 150 kPa olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') ise Terzaghi vd. [19]’da verilen eşitlik kullanılmış ve 25 derece olarak tespit edilmiştir. Fay zonunda yer alan kil birimi için Stroud [18] ve Terzaghi vd. [19] tarafından önerilen yaklaşımlar kullanılarak elde edilen ve analiz aşamasında kullanılan parametreler Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 4. Km:205+260 da açılan sondaja ait karot fotoğrafı (0-12.5m arası) [12]

Tablo 1. Fay zonunda yer alan kil birimi için jeoteknik tasarım parametreleri

| Parametre tipi | Doğal birim hacim ağırlığı | Makaslama Dayanımı | |
|----------------|------------------------------------|--------------------|---------------|
| | γ_n (kN/m ³) | c (kPa) | ϕ (°) |
| Drenajsız | 220 | 150 | 15 |
| Drenajlı | 22.0 | 20 | 25 |

4. Tünel destek sistemi analizleri

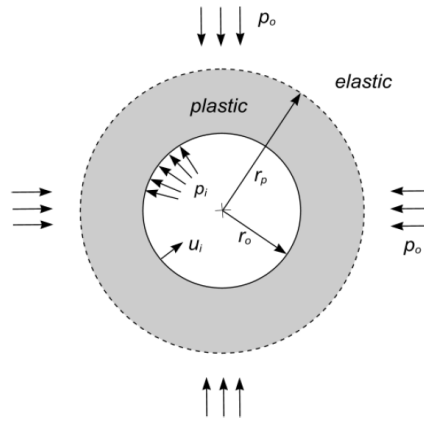
Bu çalışma kapsamında tünel destek sistemleri için analitik çözümler ve 3D nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Nümerik analiz yöntemleri tünel destek sistemleri için yoğun biçimde kullanılmaktadır [20-28]. T21 tünelinin fay zonu kesiminin analizinde ITASCA tarafından geliştirilen [29], büyük deformasyonlara izin veren ve dinamik bir program olan FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua 3D) programı kullanılmıştır. FLAC3D sonlu farklar yöntemi ile sonuç üretmektedir [29].

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

Ayrıca FLAC3D ile üç boyutlu analizler yapılabilmekte ve tünel aynası ile tavanında kullanılan ayna bulonu ve sürenler modelde tanımlanabilmektedir. Bununla birlikte üst yarı, alt yarı ve invert etkileşimleri de gözlenebilmektedir.

4.1. Tünel ön destek sistemlerinin değerlendirilmesi

Analitik çözümler (closed form solutions) nümerik analizlerden önce genel destek sistemlerinin belirlenmesi zemin ve kaya davranışının değerlendirilmesi açısından yapılmaktadır. Analizlerde zemin davranışı belirlenerek tünelde yapılacak destekleme sistemine karar verilmektedir [5, 6, 30]. Bu analizlerde ortamın hidrostatik gerilme koşullarına sahip olduğu diğer bir ifade ile ortam gerilmelerinin yatayda ve düşeyde eşit olduğu ve tünelin dairesel olduğu kabul edilir [5]. Hidrostatik gerilme altında p_0 ve iç destek basıncı p_i , tünel yarıçapı r_0 ve plastik zon yarıçapı r_p Şekil 5’de verilmekte olup, Tablo 2’de ise hesaplama aşamalarında kullanılan eşitlikler verilmektedir.

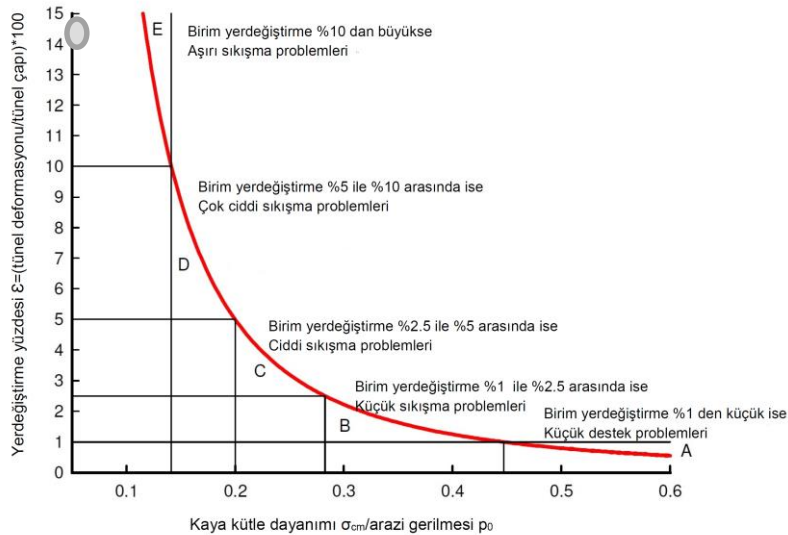


Şekil 5. Dairesel tünel çevresinde plastik ve elastik zon [6]

Burada arazi gerilmesi, $p_0=0.022*30=0.66$ MPa, σ_{cm} ise Tablo 2’de verilen Eşitlik 2 yardımı ile $\sigma_{cm}=0.06$ MPa olarak hesaplanmıştır. Kaya kütlesi dayanımının σ_{cm} , p_0 arazi basıncına oranı ise (σ_{cm}/P_0) 0.09, plastik zon yarıçapı ise, Eşitlik 9’dan $r_p=30$ m ve tünel çevresinde meydana gelen birim defrmasyon ise, ϵ ise, Eşitlik 8 yardımı ile % 25 olarak bulunmuştur. Ayrıca desteksiz durumda meydana gelen deformasyon $u_i=1.47$ m olup, desteksiz durumda tünel stabilitesinin kaybettiğini göstermektedir. Meydana gelen deformasyon kabul edilebilir seviyede olmayıp, hemen tahkimat yapılması gerekmektedir. Tünelin bu kesimi Şekil 6’dan da görüleceği gibi “E sınıfı” içinde yer almaktadır. Burada da verilen yorumlarda ayna stabilite sorunlarının oluşabileceği; tavana süren ve aynada bulon desteklemesinin zorunlu olduğu ve aşırı sıkışma problemleri ile karşılaşılacağı belirtilmiştir [9].

Tablo 2. Kapalı form eşitlikleri [5, 6, 30]

| | | | |
|--|---|--|--|
| Mohr Coulomb yenilme kriteri (1) | $\sigma'_1 = \sigma_{cm} + k\sigma'_3$ | Plastik zon yarıçapı r_p ($p_i=0$) (6) | $r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}}$ |
| Kaya kütlelerinin tek eksenli yenilme dayanımı σ_{cm} (2) | $\sigma_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{(1 - \sin \phi')}$ | Plastik yerdeğiştirme u_{ip} (7) | $u_{ip} = \left(\frac{r_0(1 + \vartheta)}{Em} \right) [2(1 - \vartheta)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2\vartheta)(p_0 - p_i)]$ |
| k (3) | $k = \frac{(1 + \sin \phi')}{(1 - \sin \phi')}$ | %Deformasyon, ε (8) | $\varepsilon\% = \left(\frac{u_i}{r_0} \right) \times 100 = [0.2 - 0.25 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{2.4} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-2}]$ |
| Kritik tahkimat basıncı p_{cr} (4) | $p_{cr} = \frac{2p_0 - \sigma_{cm}}{1 + k}$ | Plastik zon yarıçapı (9) | $\left(\frac{r_p}{r_0} \right) = (1.25 - 0.625 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{0.57} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-0.57})$ |
| Elastik yerdeğiştirme u_{ie} (5) | $u_{ie} = \frac{r_0(1 + \vartheta)(p_0 - p_i)}{Em}$ | | |
| r_p = Plastik zon yarıçapı u_i = Yerdeğiştirme r_0 = Tünel yarıçapı p_i = Tahkimat basıncı p_0 = arazi gerilmesi σ_{cm} = Kaya kütle dayanımı Em = Deformasyon modülü | | σ_1 = yenilme anındaki efektif eksenel gerilme σ'_3 = Efektif Yanal gerilme c' = Kohezyon ϕ' = İçsel sürtünme açısı ν = Poisson oranı | |



Şekil 6. Desteksiz tünellerde birim yerdeğiştirmeye bağlı olarak meydana gelen sıkışma problemleri derecesi [9]

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

4.2. Nümerik analizler

Üç boyutlu nümerik analizler iki aşamada yapılmış olup, ilk aşamada kısa dönem zemin parametrelerine göre ayna bulonları ve sürenler yerleştirilmiş ve bunların bulunmadığı duruma göre analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama da ise aynı koşullar için uzun dönem parametrelerine göre analizler yapılmıştır. Tablo 3’de püskürtme beton, iç kaplama betonu, ayna bulonu ve süren parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 3. Püskürtme beton, iç kaplama, ayna bulon ve süren parametreleri

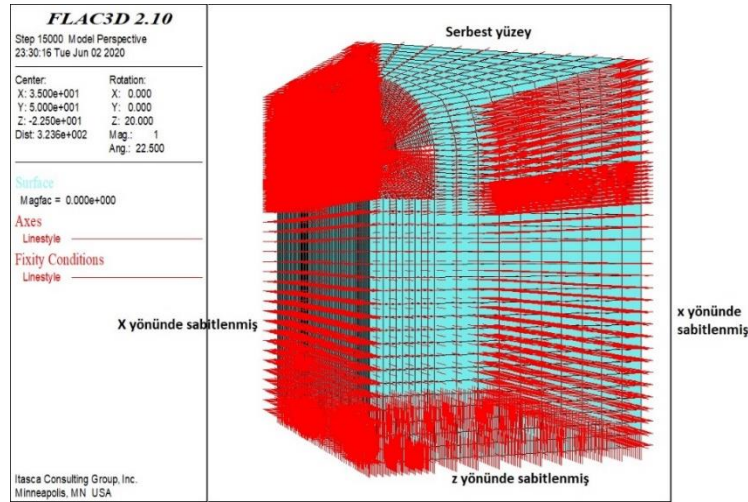
| Destek Elemanı | Parametre | Değer (Birim) |
|-------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Püskürtme betonu | E | 25 GPa |
| | ν | 0.25 |
| | γ | 2500 kg/m ³ |
| İç kaplama betonu | E | 30 GPa |
| | ν | 0.25 |
| | γ | 2500 kg/m ³ |
| Ayna bulonu | E | 45 GPa |
| | Kesit alanı | 1.57x10 ⁻³ m ² |
| | Çekme kapasitesi | 250 kN |
| | Enjeksiyon kohezyonu | 2x10 ⁵ N/m ² |
| Süren | Boru çapı | 0.089 m |
| | Boru kalınlığı | 0.004 m |
| | ν | 0.3 |
| | E | 200 GPa |

Sürenler kazık “pile element” olarak modele tanımlanmıştır. Sürenler için Oke vd. [31-35] tarafından detaylı çalışmalar yapılmış olup, sürenlerin FLAC3D için hazırlanan modele pile element olarak tanımlanmasının uygun olduğunu belirtmişlerdir. Tünel bulonları için tünel çevresindeki zemin parametrelerinin kohezyon ve deformasyon modül değerleri yükseltilecek şekilde modele tanımlanmıştır. 3 boyutlu analizlerde kazı üst yarı, alt yarı ve invert olarak aşamalandırılmıştır. İlerleme boyları üst yarıda 1.0 m, alt yarıda 2.0 m ve tabanda (invert) ise 4.0 m olarak planlanmıştır. Modelde sınır koşulları olarak Y yönünde 100 m, X yönünde 70 m ve Z yönünde ise -70 m olarak modellenmiştir. Örtü kalınlığı 30 m olarak modele girilmiş ve model 0,0,0 noktasına göre simetrik kabul edilmiştir. Model Y yönünde 0 ve 100 noktasında ve Z yönünde -70 noktasında sabitlenmiş, yüzey kesimi serbest bırakılmış X yönünde ise 0 ve 70 noktasında sabitlenmiştir (Şekil 7). Modelde üst yarı kazısı öncesi gerekli olan mesafeleri sağlamak için üst yarıda 60 m’ye kadar, alt yarı ise 40 m’ye kadar boşaltılmış ve destekleri yapılarak model hazırlanmıştır. Ayrıca ilk 24 m’lik kesiminde iç kaplamanın yapıldığı varsayılmış ve üst yarıda birer metrelik kademeler halinde kazılar yapılmıştır. Bu aşamada modelde 12 m uzunluğunda 3.5” çapında sürenler ve 9 m uzunluğunda ayna zemin çivisi (Şekil 8) ve 30 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanmıştır. Modelde fay zonu için elastisite modülü 50 MPa, Poisson oranı 0.3, hacim modülü (K) 41 MPa ve makaslama modülü (G) ise 19 MPa olarak tanımlanmıştır.

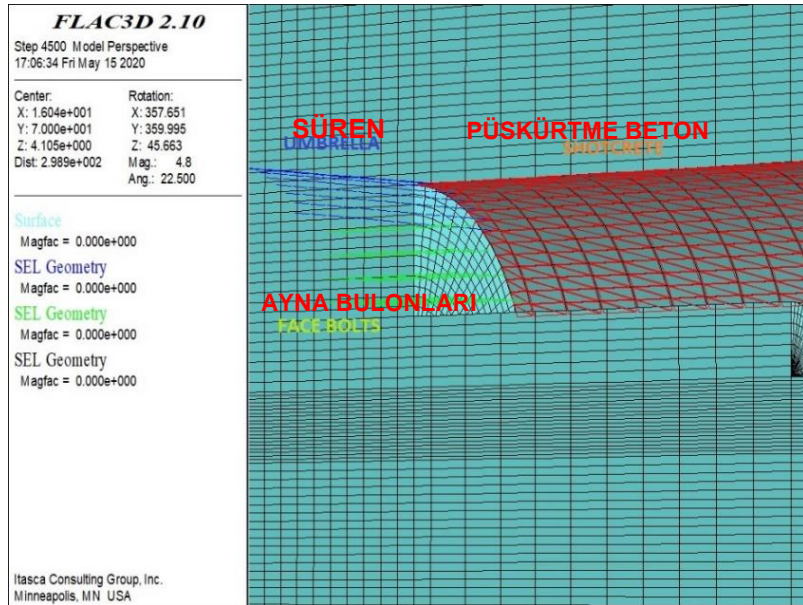
4.2.1. Kısa dönem analizler

Kısa dönem için yapılan analiz sonuçlarında ilk aşamada tünel tavanı ile tünel aynasında, ayna bulonu ve sürenler yerleştirilmeden deformasyonlar incelenmiştir. Bu aşamada tünel aynasında Y yönünde boşluğa doğru 5 cm’ye varan deformasyon oluşmaktadır (Şekil 9). Oluşan bu deformasyonlar tünel ayna stabilitesinde sorunların yaşanabileceğine işaret etmektedir. Şekil 10’de ise Z yönünde

meydana gelen düşey deformasyonlar verilmiş olup, buna göre tünel tavanında 8 cm düşey deformasyon gözlenmektedir.



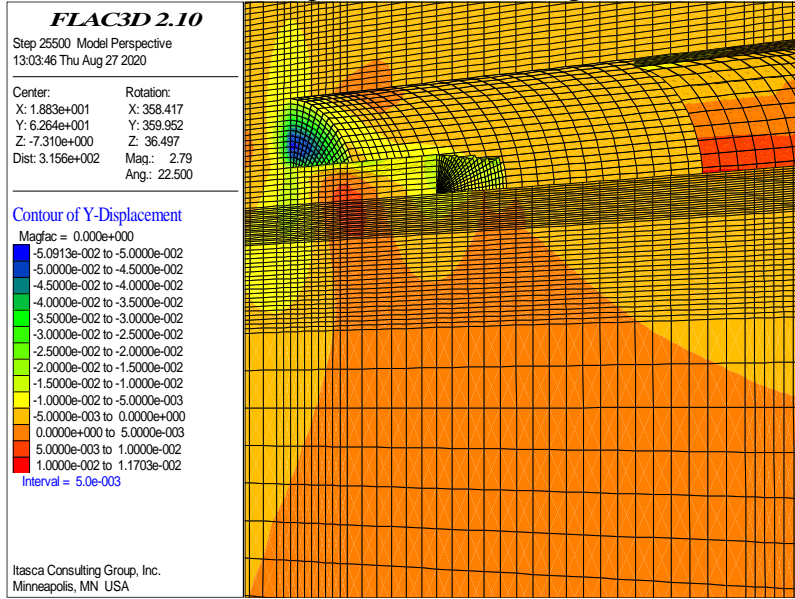
Şekil 7. FLAC3D model sınır koşulları



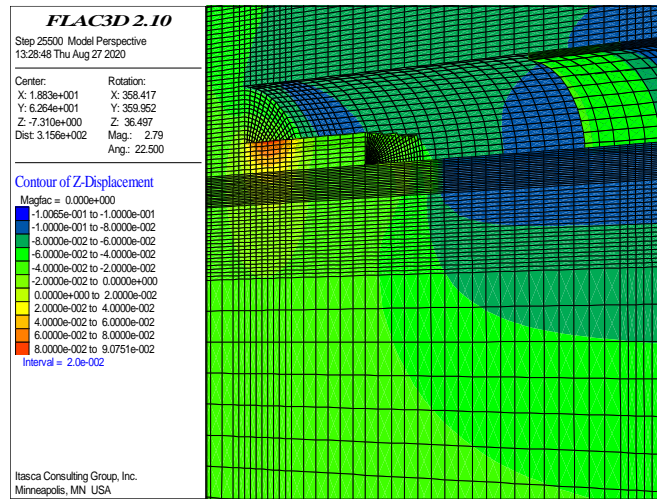
Şekil 8. Tünelde kullanılan destek elemanları

Tünelde süren ve ayna bulonlarının uygulamasından sonra ise, tünel aynasında meydana gelen yerdeğişmeler 4 cm'ye düşmüş olup, deformasyonların yoğunlaştığı kesimler azalmıştır (Şekil 11). Aynı şekilde tünel çevresinde meydana gelen toplam yerdeğişmeler ise 6 cm civarında kalmıştır (Şekil 12).

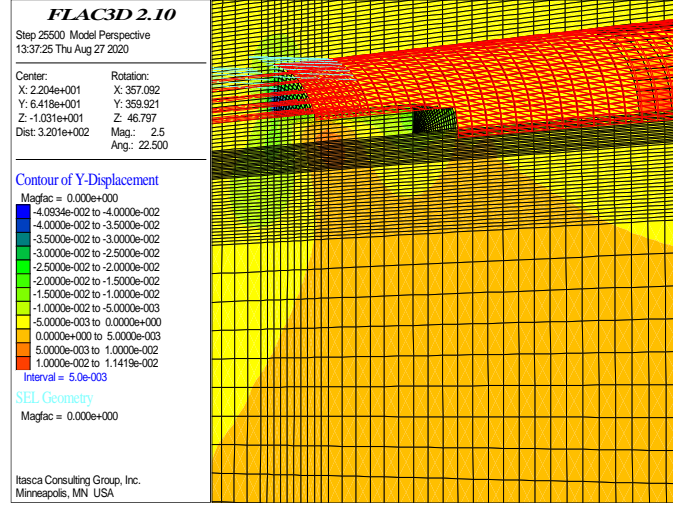
Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi



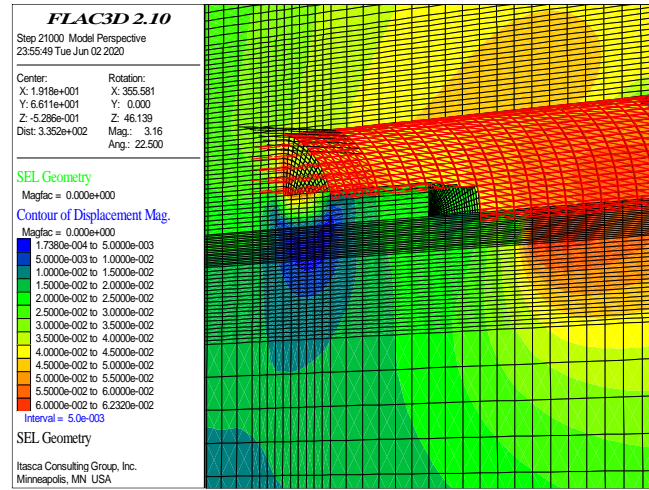
Şekil 9. Tünel aynasında Y yönünde meydana gelen yerdeğişimler-kısa dönem parametrelerine göre



Şekil 10. Tünelde meydana gelen düşey yerdeğişimler-kısa dönem parametreleri



Şekil 11. Y yönünde meydana gelen yerdeğişmeler

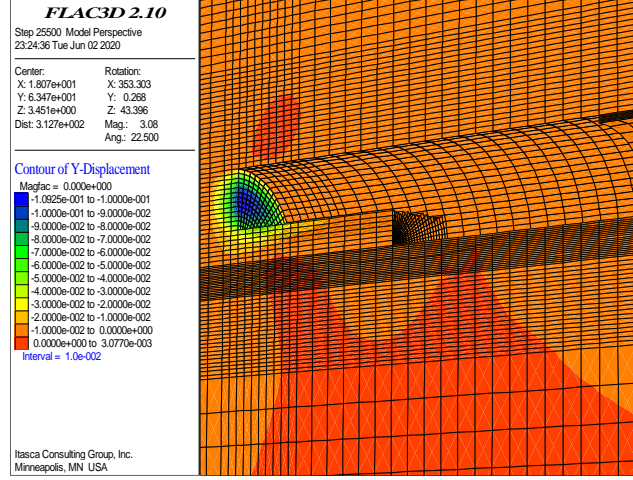


Şekil 12. Tünelde meydana gelen toplam yerdeğişmeler

4.2.2. Uzun dönem analizler

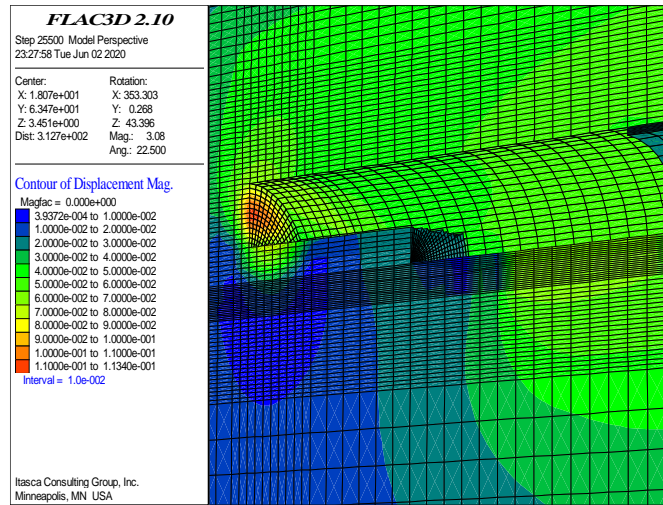
Uzun dönem analizlerinde ise ayna bulunu ile sürenlerin olmadığı durumlarda Y yönünde tünel boşluğuna doğru 11 cm'ye varan deformasyon oluşmakta (Şekil 13) ve stabilite sağlanamamaktadır. Şekil 14'de ise tünel çevresinde meydana gelen toplam yerdeğişmeler gösterilmektedir. Burada da 11 cm düzeyinde hareketin hem tünel aynasında hem de tünel çevresinde olduğu gözlenmiştir.

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

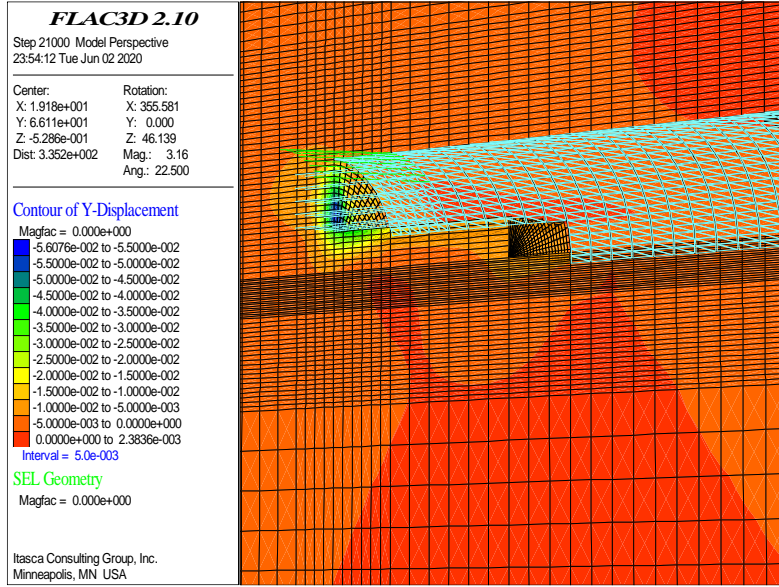


Şekil 13. Tünel aynasında Y yönünde meydana gelen yerdeğiştirmeler

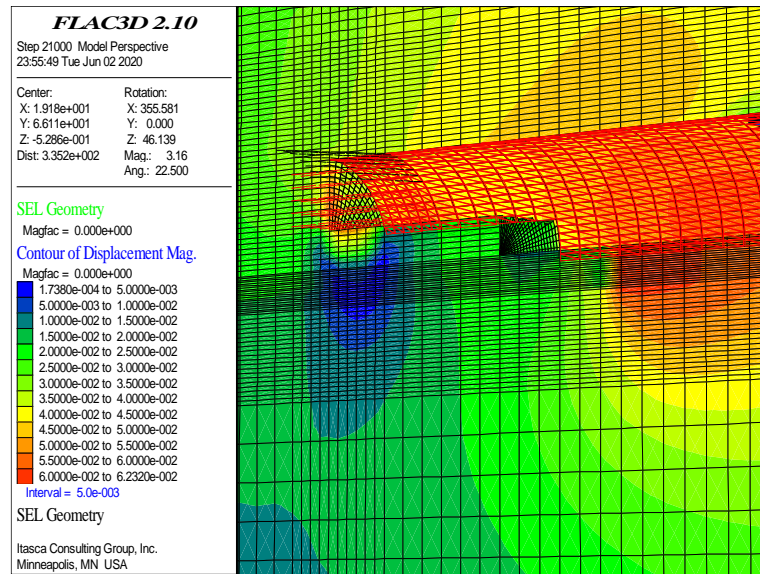
Tünelde süren ve ayna bulonlarının uygulamasından sonra ise, hem tünel aynasında (Şekil 15) hem de tünel çevresinde (Şekil 16) meydana gelen yerdeğiştirmeler 5 cm'ye kadar düşmüş olup, yoğunlaştığı kesim azalmıştır.



Şekil 14. Tünelde meydana gelen toplam yerdeğiştirmeler



Şekil 15. Y yönünde meydana gelen yerdeğiştirmeler



Şekil 16. Tünelde meydana gelen toplam yerdeğiştirmeler

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında belirli bir kesimi fay zonunu kesen T21 tünelinin bu kesimi için 3 boyutlu nümerik analizler gerçekleştirilerek ayna ve tavan stabilitesi incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar ve yorumlar aşağıda sunulmuştur.

a) Fay zonlarında tünelcilik açısından karşılaşılan en önemli sorunların başında sıkışma (squeezing) gelmektedir. Özellikle örtü kalınlığının fazla olduğu derin tünellerde bu sorun daha daha da kritik bir hal almaktadır.

b) Fay zonlarında yer alan düşük dayanımlı zeminlerde açılan tünellerdeki kazılarda plastik zon ve deformasyonlar çok hızlı gelişeceği için tünel destek elemanları hemen yerleştirilmelidir. Aksi takdirde hızlı gelişen deformasyonlar kontrol edilemez bir hale dönüşüp, yenilmeyle sonuçlanmaktadır.

c) Analiz sonuçları değerlendirildiğinde kısa dönemde deformasyonların uzun döneme göre yarısı civarında kaldığı görülmektedir. Bu durum kuşkusuz zeminlerde açılan tünellerde, zeminlerin uzun ve kısa dönem dayanım parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

d) Fay zonlarında bulunan sığ tünellerin analizlerinde, killerin sahip olduğu yüksek kohezyon sebebiyle, kısa dönem parametreleri kullanıldığında tünel aynasında ve tünel tavanında çok yüksek deformasyon değerleri elde edilmemektedir. Bu durum çoğu zaman uygulamada sorunlara sebebiyet vermekte ve beklenmedik yenilmeler oluşmaktadır. Bunun temel nedeni fay zonu içindeki zeminlerin sahip olduğu kaygan yüzeyler (slickensided) boyunca yeraltısuyunun da etkisiyle ani boşalmaların ve kaymaların meydana gelmesi olasılığıdır. Bu sebeple fay zonlarında sürenler ve ayna bulonları için yapılacak analizlerde uzun dönem parametreleri dikkate alınmalıdır.

e) Buna karşın, fay zonu içinde olmayan ancak düşük dayanımlı zeminler içerisinde açılan tünellerde zeminin kil ağırlıklı olduğu durumlarda ise ayna bulonu ve sürenler için analizler kısa dönem parametrelerine göre yapılması daha ekonomik sonuçlar üretecektir. Fay zonu içinde yer almayan dolayısıyla kaygan yüzeyler içermeyen kil birimlerde kohezyonun yüksek olması sebebiyle tünel aynasında kısa sürede yüksek deformasyon göstermeyecek ve kısa süreler için stabilizeyi sağlayacaktır.

f) Dış kaplamanın (püskürtme beton, çelik iksa, kaya bulonu) tasarımı kısa ve uzun dönem parametrelerine göre yapılıp yapılmayacağı ise değişkenlik göstermektedir. Dış kaplama yapılmasından hemen sonra deformasyonların sönümlenmesi beklenilmeden ara kaplama veya iç kaplama yapılacak ise dış kaplama tasarımı da kısa dönem parametrelerine göre yapılmalıdır. Eğer dış kaplama yapıldıktan sonra deformasyonların sönümlenmesi beklenilecek ise tahkimat tasarımı uzun dönem parametrelere göre yapılmalıdır. Tünelde son aşamada yapılacak iç kaplama ise her zaman uzun dönem parametrelerine dikkate alınarak analiz edilmeli ve tasarlanmalıdır.

g) Tünel çevresindeki plastik zon fay zonlarında çok hızlı genişleme eğilimindedir. Bu sebeple tünel zemin-destek karakteristik eğrilerinde tünel destek basıncının doğru tespit edilmesi çok kritik bir husustur.

h) Çalışma sonucunda, fay zonlarında ve örtü kalınlığının 20 m'den az olduğu sığ tünellerde iç kaplama betonu tasarımı uzun dönem parametrelerine göre analiz edilmeli ve donatılı olarak yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

i) Fay zonlarında üst yarı, alt yarı ve invert kesimi dairesel olarak olabildiğince erken kapatılmalıdır. Diğer bir ifade ile, üst yarı, alt yarı ve invert kazıları arasında mesafe operasyonel süreçlerin izin verdiği en kısa seviyede tutulmalıdır.

Ankara – İstanbul Hızlı Tren Demiryolu güzergahı üzerinde yer alan T21 tüneli başarı ile tamamlanmış olup, uzun süredir sorunsuz biçimde hizmet vermektedir. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında izlenen metodolojinin yeterli performans gösterdiği açıktır. Ancak, mümkün olan durumda kil birimler için örselenmemiş örnekler üzerinde yapılacak drenajlı ve drenajsız üç eksenli deneylerle ilgili kısa ve uzun dönem jeoteknik parametrelerin belirlenerek, bu çalışmada uygulandığı gibi, üç boyutlu analizlerin yapılmasının tünel tahkimat tasarımı açısından daha optimum çözümler sağlayabileceği de göz ardı edilmemelidir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmada kullanılan verilerden dolayı TCDD Genel Müdürlüğüne ve Fugro Sial Yerbilimleri'ne teşekkür ederler.

Yazarların katkısı

Yazarlar bu çalışmaya eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar çatışması beyanı

Bu çalışmayla ilgili olarak Yazarların herhangi bir Kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve yayın etiği beyanı

Yapılan çalışmada Yazarlar araştırma ve yayın etiğine uygun davranıldığını beyan ederler.

Kaynakça

[1] Aygar, E. (2000). A critical approach to the new austrian tunneling method in Bolu tunnels, Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Ankara, 276.

[2] Aygar, E. (2007). Investigation of the Bolu Tunnel stability by means of static and dynamic analyses' Hacettepe University, The Department of Mining Engineering, Ankara, 273.

[3] Aygar, E. (2020). Evaluation of new Austrain tunneling method applied to Bolu tunnel's weak rocks, Journal of Rock Mechanics and Geotechnial Engineering, 12 (3), 541-556

[4] Aygar, E.B., Gokceoglu, C., (2019). Ankara-İstanbul High Speed Railway Projects, The Problems Encountered at T13 Tunnel Fault Zone and Solution Suggestions, Proceedings of the 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 197–205

[5] Hoek, E., (2007). Practical rock engineering, 341, <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>

[6] Hoek, E., (2012). Rock Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses, <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>

[7] Hoek, E and Guevara, R. (2009). Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42 (2), 389 - 418.

Tünel stabilitesinin kısa ve uzun dönem parametreleri ile değerlendirilmesi

- [8] Schubert, W. 1996. Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels.” *Rock Mech. Rock Engng.* 29(3), 145-153.
- [9] Hoek, E. and Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.
- [10] 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*, 52(2), 149–160
- [11] Aygar, E.B., Gökçeoğlu, C. (2020). Bir tünelde portal ve tünel stabilitesi ilişkisi (Ankara – Sivas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi, T3 Tüneli). *Madencilik*, 2020, 59 (3), 157-168, <https://doi.org/10.30797/madencilik.792389>
- [12] Fugro Sial Yerbilimleri Ltd. Şti. (2010). 21 nolu tünel jeolojik-jeoteknik raporu ve tünel proje hesap raporu (Km:204+258.27-Km:205+530.00), EKD-VZR-BT21-JER-001-U0
- [13] Rabcewicz, L. (1964a). The New Austrian Tunnelling Method, Part One, *Water Power*, pp 453-457
- [14] Rabcewicz, L.(1964b). The New Austrian Tunnelling Method, Part Two, *Water Power*, pp 511-515
- [15] Rabcewicz, L. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part Three, *Water Power*, pp 19-24
- [16] Rabcewicz L, Golser J. (1976). Principles of dimensioning the supporting system for the “New Austrian Tunnelling Method”. *Water Power*, 88-93.
- [17] Müller L. (1978). Removing misconceptions on the new Austrian tunnelling method. *Tunnels & Tunnelling International* 1978;10(8):29–32.
- [18] Stroud M.A. (1975). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks, *Proceedings, European Symposium on Penetration Testing, Vol.2.2, Stockholm, Sweden*, pp.367-375.
- [19] Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] Panthi, K.K., Basnet, C.B. (2019). Evaluation of earthquake impact on magnitude of the minimum principal stress along a shotcrete lined pressure tunnel in Nepal. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 11, 920-934.
- [25] 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). *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 1237-1254.
- [26] Aygar, E.B., 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 (3), 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>
- [27] Aygar, E.B., Gokceoglu, C., (2020). Zayıf Zeminlerde Açılan Büyük Çaplı Bir Tünelin Destek Sistemi Tasarımı (Çukurçayır-2 Tüneli, Trabzon). *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 18, 97-118.
- [28] Aygar, E.B., Gokceoglu, C., (2020). Kohezyonsuz zeminde tünelticilik (T12 Tüneli, Bursa - Yenişehir Yüksek Hızlı Tren Demiryolu Projesi): Sorunlar ve Çözümler. *Yer Mühendisliği*, 14 (8), 26 – 34.
- [29] Itasca (2002). *FLAC3D User Manual, Getting Started*. (<https://www.itascacg.com/>)
- [30] Hoek, E., and Brown, E.T. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Instn Min. Metall.
- [31] Oke, J., Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. (2012). Improved input parameters and numerical analysis techniques for temporary support of underground excavations in weak rock. In: *RockEng*. Edmonton.
- [32] Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs MS. (2013a). The reduction of surface settlement by employing umbrella arch systems. In: *GeoMontreal 2013*. Montreal: Canadian Geotechnical Society.
- [33] Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs MS. (2013b). Modification of the supported longitudinal displacement profile for tunnel face convergence in weak rock. In: *47th US rock mechanics/geomechanics symposium*. San Francisco: American Rock Mechanics Association.
- [34] Oke J, Vlachopoulos N, Marinos V. (2014). The pre-support nomenclature and support selection methodology for temporary support systems within weak rock masses. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 97-130.
- [35] Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs MS. (2014). Semi-analytical model of an umbrella arch employed in hydrostatic tunnelling conditions. In: *48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Minneapolis: American Rock Mechanics Association.