

Zayıf ve Sıkışan Kaya Kütlesinde Açılan Bir Tünel için Rijit Destek Sistemi Çözümü (T34-GT2 Tüneli, Ankara-İstanbul YHT Projesi)

*Rigid Support System Solution for a Tunnel in Weak and Squeezing Rock Mass
(T34-GT2 Tunnel, Ankara-Istanbul YHT Project)*

Evren POŞLUK^{1*} , Servet KARAHAN¹ , Candan GÖKÇEOĞLU²

¹ TCDD Genel Müdürlüğü, Ankara.

² Kapadokya Üniversitesi, Nevşehir

Geliş (Received): 26/03/2025 / Düzeltme (Revised): 01/05/2025 / Kabul (Accepted): 23 05/2025

ÖZ

Bu çalışmaya konu olan T34-GT2 Tüneli, 4,5 m genişliğinde 5 m yüksekliğinde olup, Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi kapsamında T34 Tünelinde (km: 229+360-231+578) yolcu güvenliğini sağlamak amacıyla inşaa edilmiştir. Tünel 25 m uzunluğunda ve tamamı Karbonifer-Permian yaşlı meta-kırıntılı birimler içindedir. Tünel yaklaşık 65° eğimli normal fay tarafından kesilmektedir. Bu fay boyunca bir zon olarak zayıf ve sıkışan kaya özelliğinde meta-kırıntılılar bulunmaktadır. Bu tür kaya ortamları, tünel destek sistemi tasarımı açısından kritik öneme sahiptir. Benzer kaya koşullarında açılan tünellerde ayna ve tavan stabilite sorunlarının yanında ciddi deformasyonların olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu çalışmada tünelticilik açısından özel problemler içeren T34-GT2 Tünelinde bulunan fay zonuna odaklanılmış en uygun destek sisteminin analizlerle ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaçla tünelin sıkışma potansiyeli belirlenmiş, hızlı kazı, güçlü destek, düşük deformasyon prensiplerine dayanan rijit destek sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan destek sistemi sayısal analiz yöntemleri kullanarak detaylandırılmış ve elde edilen sonuçlar tünel kazı ve destek aşamalarında dikkate alınmıştır. Ardından analiz sonuçları tünelde gerçekleşen deformasyonlarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, sayısal analizler ile tünelde gerçekleşen deformasyonların birbirine yakın olduğu ve önerilen rijit destek sisteminin benzer kaya koşullarında uygulanabilir bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal analiz, Sıkışma, Tünel güvenliği, Zayıf kaya

ABSTRACT

The T34-GT2 Tunnel, the subject of this study, is 4.5 m wide and 5 m high and was constructed within the scope of the Ankara-Istanbul High Speed Train Project to ensure passenger safety in the T34 Tunnel (km: 229+360-231+578). The tunnel is 25 m long and is entirely located within the Carboniferous-Permian metaclastic units. The tunnel is intersected by a normal fault with an inclination of approximately 65°. There are metaclastics with weak and squeezing rock characteristics along the fault zone. It is known that there are serious deformations in addition to face and roof stability problems in tunnels excavated under similar rock conditions. Therefore, this study focuses on the fault zone in the T34-GT2 Tunnel, which has special problems in terms of tunneling, and aims to reveal the most suitable support system with analyses. For the purpose of the study, the squeezing potential of the tunnel was determined and a rigid support system based on the principles of fast excavation, strong support, and low

deformation was designed. The designed support system was detailed using numerical analysis methods and the obtained results were considered during the tunnel excavation and support stages. Then, the analysis results were compared with the deformations in the tunnel. As a result, it was determined that the deformations in the tunnel were close to each other with the numerical analysis and the proposed rigid support system was an applicable approach in similar rock conditions.

Keywords: Numerical analysis, Squeezing, Tunnel safety, Weak rock

GİRİŞ

Demiryolu güzergahları planlanırken hız arttıkça izin verilen eğimler azalmakta, kurp yarı çapları artmaktadır. Bu nedenle hızlı ve yüksek hızlı demiryollarında güzergâh çalışmalarında sıklıkla tünel çözümlerine başvurulmaktadır. Tünellerde ise işletme sırasında yaşanması muhtemel soğuk olaylar (deray, çarpışma, uzun durma) ve sıcak olaylar (yangın) için çeşitli tahliye ve müdahale planlarının olması gerekir (UIC779-9, 2003; TSI, 2008). Bu müdahaleleri sağlayabilmek amacıyla 1000 m'den uzun ana hat tünelleri için güvenlik tünelleri önerilmektedir (Poşluk ve Korkanç, 2017 ve 2018; Poşluk, 2022). Güvenlik tünelleri ana hat tünellerine paralel ya da yaklaşım tüneli şeklinde yapılabilmektedir. Yaklaşım tüneli olarak tasarlanan tüneller ana tünele en kısa mesafede ulaşabilmek için vadi ve yamaçlara planlanmakta bu nedenle de düşük örtü kalınlığı, zayıf kaya koşulları ve fay zonların gibi tünelcilik açısından sorun barındıran bölgelerden geçebilmektedir. Bu zayıflık zonlarının etkisiyle de tünellerde sıkışmanın da olduğu sorunlarla karşılaşmaktadır.

Tünel desteklemeleriyle ilgili yapılan çalışmalar orta dayanımlı, sağlam ve çok sağlam kayalarda belirgin bir fark olmadığını göstermiştir (Aygar ve Gökçeoğlu, 2020 ve 2021; Gökçeoğlu vd., 2022; Aygar vd., 2024; Poşluk 2024). Bu tür kaya kütlelerinde tünel aynasının ve çevresinin stabilitesini sağlamak göreceli olarak kolaydır (Aygar vd., 2024). Bu tür kayalardaki temel fark inşa yöntemidir (Aygar vd., 2024). Ancak zayıf kayada uygulanacak olan

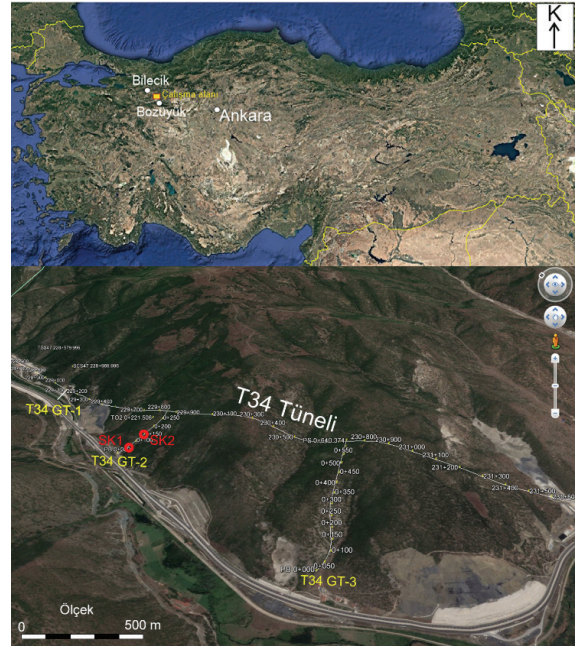
kazı ve destek yönteminin doğru belirlenmesi gerek tünel stabilitesi gerekse çalışan personelin güvenliği açısından son derece önemlidir. Doğru ve zamanında uygulanmayan desteklemeler tünel aynasında ve destekleme sisteminde yenilme gibi sorunlara neden olabilir. Stabilitate sorunları sonucunda da fay ya da zayıflık zonu boyunca ilerlemenin ardından zaman alıcı ve pahalı bir yenileme süreci gerekebilir (İncecik ve Poşluk, 2018). Neticede tünel kazı ve desteklemesinin doğru projelendirilmesi ve uygulanması gerekir. Tünel kazı ve desteklemesinde ucuz ve esnek bir yaklaşım sunması nedeniyle Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) tercih edilmektedir (Rabcewicz, 1964a, 1964b ve 1965; Rabcewicz ve Golser, 1973). Ancak zayıf kaya koşullarında açılan tünellerde esnek bir dış kemer ilkesinin çoğu zaman gerçekçi olmadığı da bilinmektedir (Aygar, 2020). Ayrıca, Aksoy vd., (2012 ve 2016), Cheng (2017), Cao vd., (2018), Aygar (2020), Aygar vd., (2024) ve Poşluk (2024) tarafından yapılan çalışmalarda zayıf kaya ve fay zonlarında açılan tünellerde kayanın sıkışma özelliklerinin tünel desteklerine olan etkisi incelenmiş ve bu tür kaya koşullarında rijit bir destek sisteminin gerekli olduğunu ortaya koymuşlardır. Aksoy vd. (2012 ve 2016) zayıf kaya ortamlarında açılan tüneller için deforme olmayan destek sistemi önererek yüksek hızlı tren tüneline başarı ile uygulamışlardır. Ayrıca Hoek (2001 ve 2012) ile Hoek ve Guevera (2009) tarafından çok zayıf ortamlarında inşaa edilen tünellerde karşılaşılan sorunlar incelenmiş ve uygun destek sistemlerini tanımlamışlardır.

Bu örneklerden de görüleceği gibi zayıf ve sıkışan kaya kütlelerinde açılan tüneller, tünel mühendisliği açısından özel vaka örnekleri olup gerek ülke gerekse uluslararası literatür açısından oldukça ilgi çekicidir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında Ankara-İstanbul yüksek hızlı tren projesinde ve zayıf meta-kırıntılılar içinde inşaa edilen T34-GT2 Tüneli için destek sisteminin tasarlanması, analiz edilmesi, sonuçların kıyaslanması ve tartışılması amaçlanmıştır.

T34-GT2 TÜNELİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

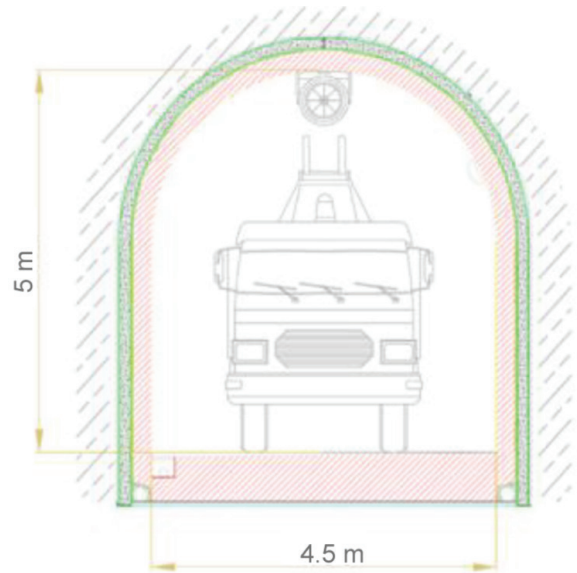
Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 530 km uzunluğunda olup, 36 adet tünel bulunmaktadır. Tüneller çift hatlı tek tüp olarak tasarlanmıştır. Bu ana tünellerin acil durum müdahalelerini sağlamak üzere 1000 m'den uzun ana hat tünelleri için daha küçük boyutlu güvenlik tünelleri projelendirilmiştir. Yolcu güvenliğinin sağlanması amacıyla oluşturulan T34-GT2 Tüneli 250 m uzunluğunda olup, T34 Tüneli (km: 229+360-231+578) için projelendirilen 3 tünelden biridir. Tünel, Bozüyük ve Bilecik istasyonları arasında, Bozüyük'ün 1 km kuzeybatısında yer almaktadır (Şekil 1).

T34-G2 Tüneli, imalatı tamamlanan ve işletmeye açılan T34 Tüneli ile proje Km:229+480'de buluşmaktadır. T34-GT2 tüneli giriş taban kotu 705 m'de başlamakta, tünel düz bir hat izleyerek T34 tüneline aynı kotta kesmektedir. Tünelin maksimum örtü kalınlığı 125 m'dir. Tünel nihai genişliği 4.5 m yüksekliği ise 5 m'dir (Şekil 2). Tünel kazı geometrisi, desteklemeye göre değişken olmakla birlikte 6.3 m genişlik 6.4 m yüksekliğe kadar ulaşmaktadır.



Şekil 1. T34 Tüneli ve T34GT-2 Güvenlik tünelinin konumunu gösteren uydu görüntüsü.

Figure 1. Satellite image showing the location of the T34 Tunnel and T34GT-2 Security tunnels.



Şekil 2. Güvenlik tüneli tip kesiti (Poşluk 2022).

Figure 2. Security tunnel type section (Poşluk 2022).

T34-GT2 Tünel Güzergahının Jeolojik ve Jeoteknik Özellikleri

T34-GT2 Tünel güzergahının jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle saha araştırmaları yapılmış ardından T34-GT2 Tünel hattında derinlikleri 40 ve 92 m olan iki adet karotlu sondaj gerçekleştirilmiştir (Yedigöze, 2015). Saha gözlemleri ve sondajlardan elde edilen numuneler incelendiğinde tünelin Karbonifer-Permien yaşlı Söğüt Metamorfitleri (Şentürk ve Karaköse, 1981) birimlerinden olan meta-kırıntılılar içinde kaldığı anlaşılmıştır (Şekil 3a). Meta-kırıntılılar gri ve siyah renklerde, çoğunlukla zayıf yer yer orta sert, çok ayrılmış ve çok çatlaklı kırıklıdır (Şekil 3b). Tünel km: 0+220'de yaklaşık 65° kuzey batıya eğimli bir normal fay tarafından kesilmektedir. Bu fayın oluşturduğu zayıflık zonunun kalınlığı yaklaşık 25 m'dir.

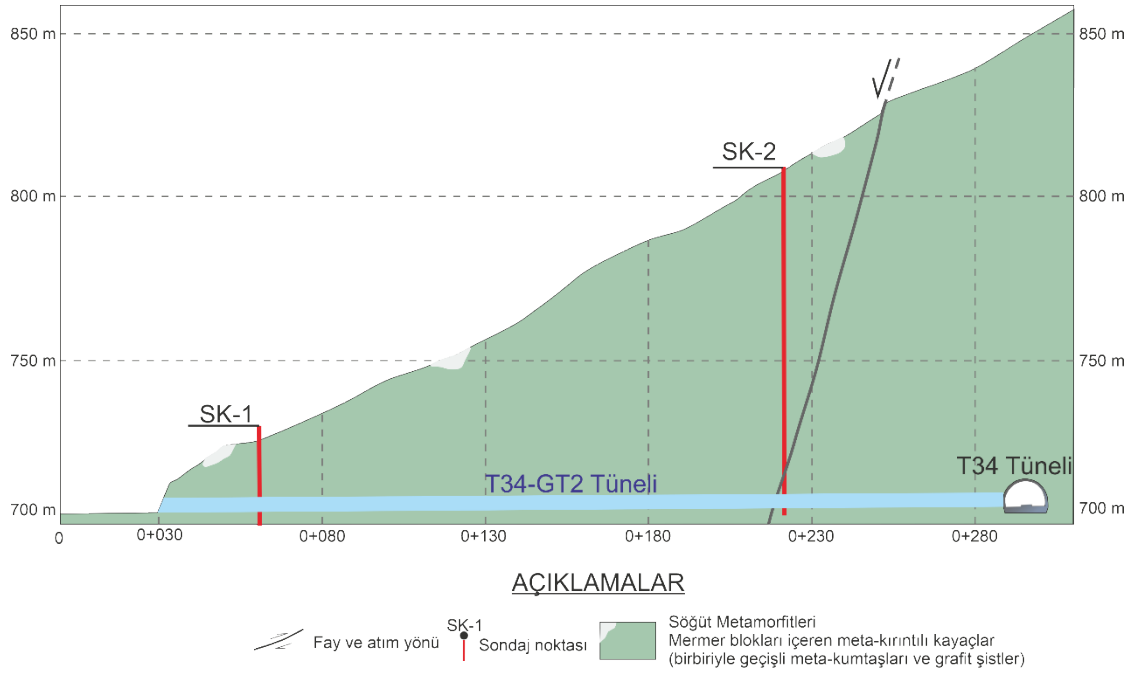
Bu bölgede birim çok bozunmuş ve çok parçalı-kırıklı yapıdadır. Meta-kırıntılılar yer yer kuvars mercikleri içermektedir (Şekil 3c). Bununla birlikte birim içinde çapı birkaç 10 m'ye ulaşan mermer blokları bulunmaktadır (Apaydın Poşluk ve Koral, 2013). Tünelin tamamında su varlığı gözlemlenmemiştir. Yapılan saha gözlemleri ve sondajlarla oluşturulan tünel jeolojik kesiti Şekil 4'de verilmiştir.

Yapılan araştırma sondajlarından elde edilen örneklerden tek eksenli sıkışma, doğal nem içeriği, birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Jeolojik haritalama, süreksizlik ölçümleri (Çizelge 1), sondajlar ve deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ile RMR (Bieniawski, 1973, 1976 ve 1989) ve Q (Barton vd., 1974 ve 1980; Grimstad ve Barton, 1993) kaya kütle sınıflama sistemleri uygulanmış ve kaya kütle sınıfları tespit edilmiştir (Çizelge 2).



Şekil 3. T34-GT2 tünel girişinde bulunan meta-kırıntılılar (a), meta-kırıntılıların mostradaki görünümü (b) ve Sk-1 sondaj kuyusuna ait karot sandık fotoğrafı (c).

Figure 3. Metaclastics found at the T34-GT2 tunnel entrance (a), appearance of metaclastics in outcrop (b) and core box photograph of the Sk-1 drilling well (c).



Şekil 4. T34-GT2 Tüneli jeolojik kesiti.

Figure 4. Geological cross-section of T34-GT2 Tunnel.

Çizelge 1. Tünel güzergahında bulunan kaya kütlelerinin süreksizlik özellikleri.

Table 1. Discontinuity properties of rock masses located on the tunnel route.

Süreksizlik Özellikleri							
	Meta-Kırıntılılar			Fay zonlu Meta Kırıntılılar			
Süreksizlik takımları	67/48	47/27	148/38	67/48	55/33	225/65	170/40
Süreksizlik türü	Eklem	Eklem	Yapraklanma düzlemi	Eklem	Eklem	Eklem	Yapraklanma düzlemi
Süreksizlik ara uzaklığı (cm)	18,6	12,8	13,1	9,7	9,2	12,8	12,3
Süreksizlik açıklığı (mm)	3,1	5,3	2,7	5,7	6,6	6,2	3
Süreksizlik devamlılığı (m)	>6	5,1	>20	>6	>6	>6	>20
Süreksizlik pürüzlülüğü (ISRM, 1981)	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, cilalı düz	Düzlemsel, cilalı düz	Düzlemsel, cilalı düz	Düzlemsel, cilalı düz
Dolgu malzemesinin özelliği	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu	Kalın kil dolgulu
Süreksizlik bozunma derecesi (ISRM, 1981)	Orta derecede bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Çok bozunmuş	Çok bozunmuş	Çok bozunmuş	Çok bozunmuş
Süreksizlik yüzeylerindeki durumu (ISRM, 1981)	Nemli	Nemli	Kuru	Nemli	Nemli	Nemli	Kuru

Çizelge 2. T34-GT2 Tüneli fay zone kesimindeki kaya sınıfları ve kaya kütle parametreleri.

Table 2. Rock classes and rock mass parameters of the fault zone section of the T34-GT2 Tunnel.

Kayaç Adı	Kaya Sınıfı	RMR ₈₉	Q	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Elastisite Modülü (MPa)
Meta-Kırıntılı	Kırıntılı Kaya	27	0.3	10	27.3	820	35	4200
Meta-Kırıntılı (Fay zone)	Çok Zayıf Kaya	19	0.022	0.7	27.7	52	28	800

Sıkışma Hesapları

Sıkışma, eşik makaslama değeri aşılmıca gerçekleşen, çoğunlukla asimetrik kesit daralmalarıyla tespit edilen ve zayıf şistler içerisinde açılan tünellerde karşılaşılan temel sorunlardan biridir (Aygır vd., 2024; Poşluk, 2024). Doğru bir tünel tasarımı için sıkışma derecesine ilişkin güvenilir tahmin şarttır (Panthi ve Nilsen, 2007). Bu çalışmada sıkışmayı ve sıkışma derecesini belirlemek için Jethwa vd., (1984), Singh vd., (1992), (Hoek ve Marinos (2000 ve 2010) yöntemleri kullanılmıştır.

Sıkışma potansiyelinin belirlendiği için yeterlilik faktörü olarak bilinen N_c katsayısı (Denklem 1) Jethwa vd., (1984) göre belirlenmiştir (Tablo 3).

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (1)$$

Burada σ_{cm} : Kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa), h : örtü kalınlığı (m), γ : birim hacim ağırlık (kN/m³)

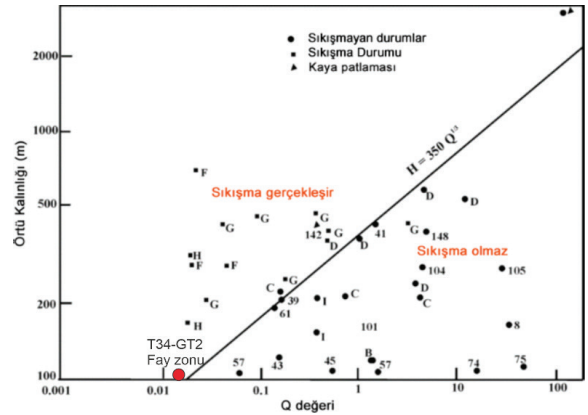
Çizelge 3. Sıkışma derecesi (Jethwa ve diğ. 1984).

Table 3. Degree of compaction (Jethwa et al. 1984).

Sıkışma derecesi	Aralık
Çok	< 0.4
Orta derecede	0.4-0.8
Hafif	0.8-2
Sıkışmayan	> 2

Singh vd., (1992), kaya kütle kalitesi (Q) ve örtü derinliği (H (m)) temelinde kaya kütlelerinin sıkışma davranışını tahmin etmek için bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım, sıkışma koşulunu sıkışma olmayan koşullarında ayırt etmek için bir sınır çizgisi önermektedir (Denklem 2, Şekil 5).

$$H = 350 Q^{1/3} \quad (2)$$

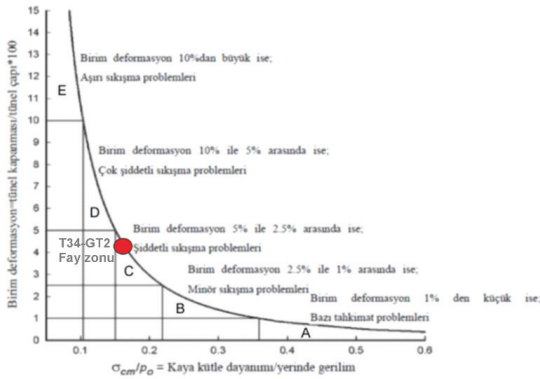


Şekil 5. Sıkışan kaya durumunun tahmini (Singh ve diğ., 1992).

Figure 5. Estimation of compacted rock conditions (Singh et al., 1992).

Hoek ve Marinos (2000), kaya kütlelerinin sıkışma derecesini, tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), yerinde gerilmeler (p_0) ve iç destek basıncı (p_i) dikkate alarak önermiştir. p_0 değeri 0 olarak kabul edilirse, birim deformasyon değeri (Denklem 2) olur. Çalışmada, sıkışma koşulları sıkışmayandan aşırı sıkışma problemlerine kadar değişen 5 farklı katagoriye ayrılmıştır (Şekil 6).

$$\varepsilon = 0.2(\sigma_{cm}/p_0) - 2 \quad (3)$$



Şekil 6. Sıkışma hesabı abağı (Hoek ve Marinos, 2000).

Figure 6. Squeezing calculation chart (Hoek and Marinos, 2000).

T34-G2 Tünelinde 112 m örtü kalınlığı olan fay bölgesindeki zayıf meta-kırıntılılar içerisinde açılan kısımda Jethwa vd., (1984), Singh vd., (1992) ile Hoek ve Marinos (2000, 2010), yöntemlerine göre yüksek miktarda sıkışmalar hesaplanmıştır (Çizelge 4). Bu durum tünel aynasında ve çevresinde stabilite sorunlarının oluşacağını göstermektedir.

Çizelge 4. T34-GT2 Tüneli Fay bölgesi için sıkışma durumu hesapları.

Table 4. Squeezing state calculations for the T34-GT2 Tunnel Fault Zone.

	Jethwa ve diğ. (1984),		Singh ve diğ. (1992)	Hoek ve Marinos (2000, 2010),	
Örtü Kalınlığı (H)	Nc	Sıkışma derecesi	Sıkışma Durumu	ε	Sıkışma derecesi
112	0.053	Yüksek Sıkışma	Sıkışma	3,92	Şiddetli sıkışma

T34-GT2 TÜNELİ FAY ZONU BÖLGESİ İÇİN DESTEK SİSTEMİNİN BELİRLENMESİ

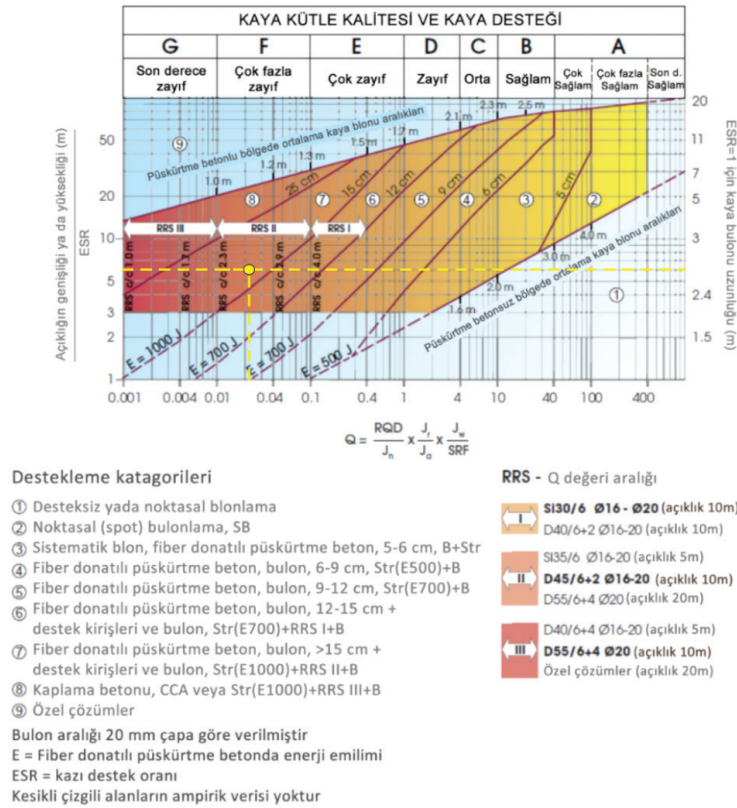
Tünel tasarımı için güvenilir jeomekanik parametrelerinin sağlanması tünel tasarım mühendisleri için en zor görevlerden biridir (Poşluk, 2024). Tünel destek sistemlerinin belirlenmesinde 3 temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar ampirik, analitik ve sayısal analiz yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Gözleme ve önceki çalışmalara dayanan ampirik yaklaşımlara, Kaya Yüklü Sınıflama Sistemi (Terzaghi, 1946), Kaya kütle sınıflama sistemi RMR (Bieniawski, 1973, 1976 ve 1989) ve Kaya Kütle Kalitesi Sistemi Q (Barton vd., 1974 ve 1980; Grimstad ve Barton, 1993) örnek olarak verilebilir.

Analitik yöntemler, belli kabullere dayanan tasarım yaklaşımlarıdır. Tünellerde önerilen destek sisteminin gerekli yük kapasitesini tahmin etmek için kaya destek etkileşiminin üç boyutlu problemlerini simüle etmek amacıyla kullanılabilen iki boyutlu basitleştirilmiş bir yaklaşımdır (Panet ve Sulem, 2022). Yöntemin temel prensibi destek ve zemin arasındaki denge durumunu hesaplamak için Zemin Reaksiyon Eğrisi (GRC), Boyuna Yer Değiştirme Profili (LDP), ve Destek Sınırlama Eğrisi (SCC) çizdirmek, böylelikle tünel tasarımını oluşturmaktır.

Sayısal analiz yöntemleri ise seçilen tünel destek sistemlerinin performansının incelenmesi için kullanılan başlıca yöntemdir (Koçkar ve Akgün, 2003; Akgün vd., 2014; Zou vd., 2019; Poşluk, 2024). Tünel projelendirmesinde fiziksel modeller kullanmanın ekonomik ve fiziksel güçlükleri ile gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan ileri düzeyli bilgisayar yazılımları, yeraltı kazısının yapılacağı ortamı gerçeğe yakın bir şekilde modelleyerek, kazı sırasında ortaya çıkabilecek kaya davranışları ile olası sorunları öngörme ve bunlara çözüm üretebilme yeteneğine sahiptir (Satıcı ve Topal, 2015). Sayısal analiz yöntemleri açık ve kapalı kaynak kodlu olarak Sonlu Elemanlar (FEM),

Ayrık Elemanlar (DEM), Sınır Eleman Yöntemi, (BEM), Sonlu Farklar (FDM), Hibrit (FEM/BEM) gibi yaklaşımları içermektedir. Bu yaklaşımlar arasında FEM anizotrop ve nonlineer ortamlar için en yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir (Das vd., 2017).

T34-GT2 Tüneli fay zonunda bulunan zayıf meta-kırıntılılar için destek sistemi belirleme çalışmaları öncelikle NGI (2015) tarafından önerilen destek sistemi abağı ile değerlendirilmiştir (Şekil 7). Bu abağa göre tünel desteklemesi 7 numaralı destek bölgesinde olup, 1,2 m aralıkla 2.6 m uzunluğunda 20 mm çapında kaya bulonu ve 20 cm kalınlığında püskürtme beton önerilmektedir.



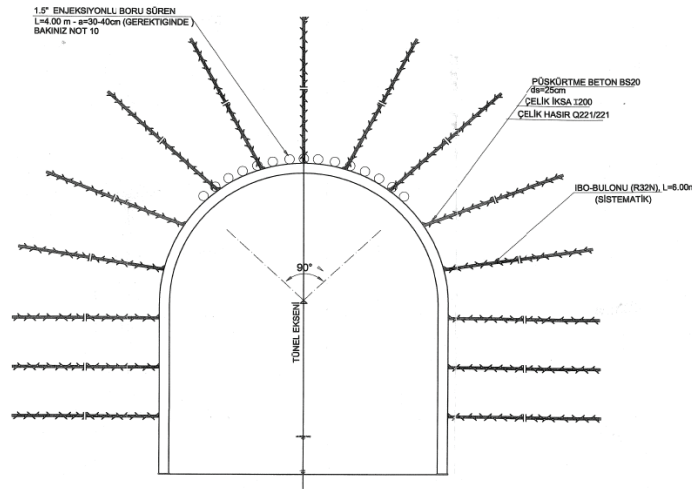
Şekil 7. Q değerlerine dayalı tünel destek grafiği (NGI, 2015; Sarı kesikli çizgiler T34-GT2 Tüneli verilerini göstermektedir).

Figure 7. Tunnel support graph based on Q values (NGI, 2015; Yellow dashed lines show T34-GT2 Tunnel data).

Bununla birlikte fay zonundaki meta-kırıntılı kayalar NATM tünel kaya sınıfı olarak C2 (GeoConsult, 1993; ÖNORM, 1994; KGM, 2013) sınıflandırılabilir. Buna göre, C2 kaya sınıfı baskılı kaya kütlesi olarak adlandırılmakta olup, bu tür kayalarda yüksek ve hızlı deformasyonlar meydana gelmektedir (KGM, 2013). Ek olarak Dalgıç (2002), Aksoy vd., (2012 ve 2016), Cheng (2017), Aygar (2020), Aygar vd., (2024), Poşluk (2024), Mhanna ve Hussein (2024) ve Karahan vd., (2025) tarafından yapılan çalışmalar T34-GT2 Tünelindeki fay zonundaki benzer kaya koşullarında deformasyona izin veren ince bir kabuk şeklinde destek sistemi oluşturulduğunda sıkışmaların durdurulamadığını göstermektedir. Bu nedenle T34-GT2 Tüneli için at nalı tünel kesiti için sadece düşük deformasyonlara müsaade eden rijit bir destek sistemi seçilmiştir (Şekil 8). Rijit destek sisteminde amaç sıkışan kayada mümkün olduğunca yükü destek sistemine taşıtarak zamana bağlı gelişen deformasyonları azaltmak ve nihayetinde durdurmaktır.

Sayısal Analiz

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen nümerik analizler elastik-plastik çözüme göre yapılmış ve analiz sonuçları yorumlanarak nihai destek sistemi belirlenmiştir. Phase 2D v 8.0 (RocScience, 2020) programında malzeme yumuşaması (material softening) kullanılmıştır. Analizlerde, kazı yapıldıktan sonra gevşeme değeri olarak %60 kaya yükü öngörülmüş, destek yerleştirilmesi ile beraber %40'lık bir kaya yükü dağılımı da tahkimatlara eklenmiştir (Aygır ve Gökçeoğlu, 2020). Son aşamada ise 30 cm kalınlığında iç kaplama dikkate alınmış ve deprem ivme değeri uygulanmıştır. Sismik yük olarak, çalışılan bölge için Türkiye deprem bölgeleri haritasında (AFAD, 2025) DD2 (50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlama periyodunun 475 yıl olduğu) kullanılmış, yatay ivme değeri 0.293g, düşey ivme değeri ise 0.073g olarak seçilmiş ve sayısal analizlerde kullanılmıştır. Çalışmada dikkate alınan modelleme aşamaları Çizelge 5'de, nümerik analizde kullanılan model ise Şekil 9'de verilmektedir.



Şekil 8. T34-GT2 fay bölgesi için önerilen destek sistemi (Yedigöze, 2015).

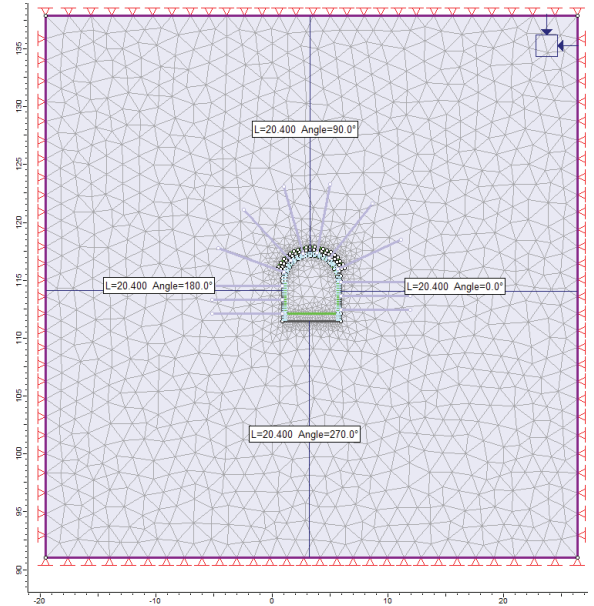
Figure 8. Proposed support system for the T34-GT2 fault zone (Yedigöze, 2015).

Tünelin fay zonu kısmındaki sayısal analizlerinde, modelde sabit gerilmeler uygulanmıştır. Burada düşey gerilme $\sigma_v = h \cdot \gamma$ (Fenner, 1938) eşitliği ile 3.10 MPa olarak belirlenmiştir. Yatay gerilmeler ise bu kesimin fay zonu olması sebebiyle ve Aygar ve Gökçeoğlu, (2021), Gökçeoğlu vd., (2022) çalışmalarında başarılı sonuçlar verdiği belirtildiği için düşey gerilmeye eşit alınmıştır ($\sigma_v = \sigma_h$). Buna göre ortamdaki düşey ve yatay gerilmeler 3.10 MPa olarak hesaplanmış ve modellemeye sabit öngörülmüştür. Sınır koşullarının tüneli etkilemesini önlemek için; model analiz edilirken tünel çapından 4 kat daha büyük bir model oluşturulmuştur. Modelde, 3 düğümlü üçgen model ağı ve düzlem gerinim analiz tipi kullanılmıştır. Ayrıca, modelde, sabit saha gerilme koşullarıyla saha gerilmesi başlangıç elemanı yüklemesi olarak seçilmiştir. Modeldeki sınır koşulları sabit X ve Y yönlerini seçilmiştir. Ayrıca analizlerde Mohr-Coulomb yenilme kriteri seçilerek analizler tamamlanmıştır.

Çizelge 5. Modelleme aşamaları.

Table 5. Modelling stages.

Model Aşamaları	Uygulama
1	Arazi Gerilmelerinin Oluşturulması
2	Sürenlerin yerleştirilmesi
3	Tünel kazısı-Malzeme gevşemesi %65
4	Püskürtme beton (yaş) ve kaya bulonu (%35) uygulaması %35
5	Taban betonunun yerleştirilmesi
6	İç kaplamanın yerleştirilmesi
7	Sismik yüklemenin uygulanması



Şekil 9. Phase 2B programı ile oluşturulan analiz modelinin sınır koşulları (ölçekler m'dir).

Figure 9. Boundary conditions of the analysis model created with the Phase 2D program (scale is m).

Analiz sonuçlarına göre tünelde kazı ve desteklerin tamamlanmasında sonra meydana gelen deformasyonlar Şekil 10'da verilmektedir. Analizlerde toplam yer değiştirmeler tünel tavanında 2 mm yan duvarlarda 34 mm ve tünel tabanında 32 mm şeklinde gerçekleştiği görülmektedir.

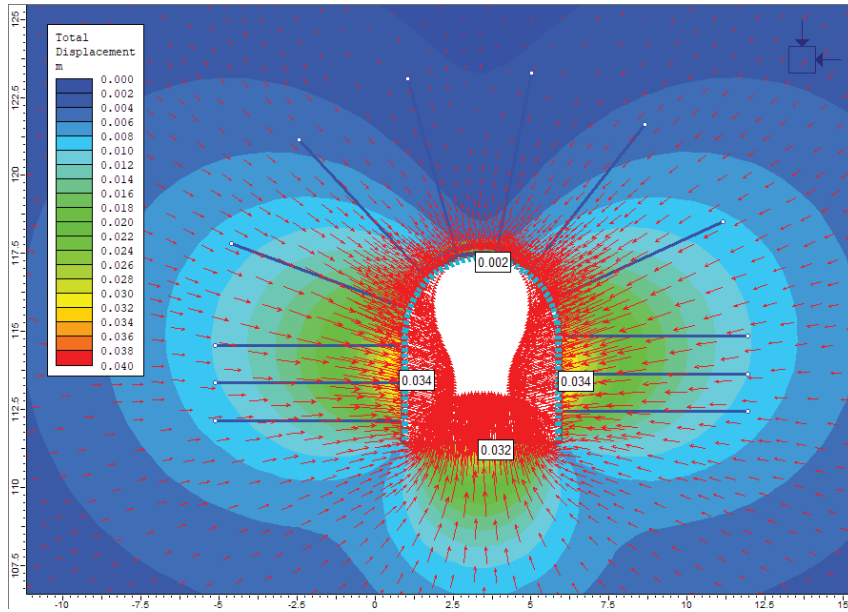
Uygulanan Destek Sistemi ve Performansının Değerlendirilmesi

T34-G2 Tünelindeki fay zonu kesiminde yapılan tünel açma çalışmalarında tünel aynasının zayıf özellikler gösteren meta-kırıntılılardan oluştuğu görülmektedir (Şekil 11a). Tünelde yapılan imalatlar sırasında 3 noktada deformasyon ölçüm noktaları kazı ve desteğin hemen sonrasında olacak şekilde yerleştirilmiş ve 24 saat sonrasında ölçümler alınmaya

başlanmıştır. Ölçümlerde optotrigonometrik yöntem kullanılmış ve toplam yer değiştirmeler $di = \sqrt{dxi^2 + dyi^2 + dzi^2}$ eşitliğinden hesaplanarak grafikler çizdirilmiştir (Şekil 11 c). Ölçüm sonuçlarına göre deformasyonlar sayısal analizlerle benzer şekilde tünel yan duvarlarında 26.2 mm civarında gerçekleşmiştir. Tünel ekseninde deformasyonlar 6 mm civarında gerçekleşmiştir. Sayısal analizlerle tünel içi ölçüm sonuçları arasında gözlemlenen küçük farklılıkların tünel imalatları sırasında yaşanan ilk deformasyonların ölçülememesinden ve ölçüm hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte saha verileriyle sayısal analizlerin birbirlerine yakın sonuçlar olduğu görülmektedir. T34 GT-2 Tüneli 2019 yılı Haziran ayında sorunsuz bir şekilde tamamlanmıştır (Şekil 11b).

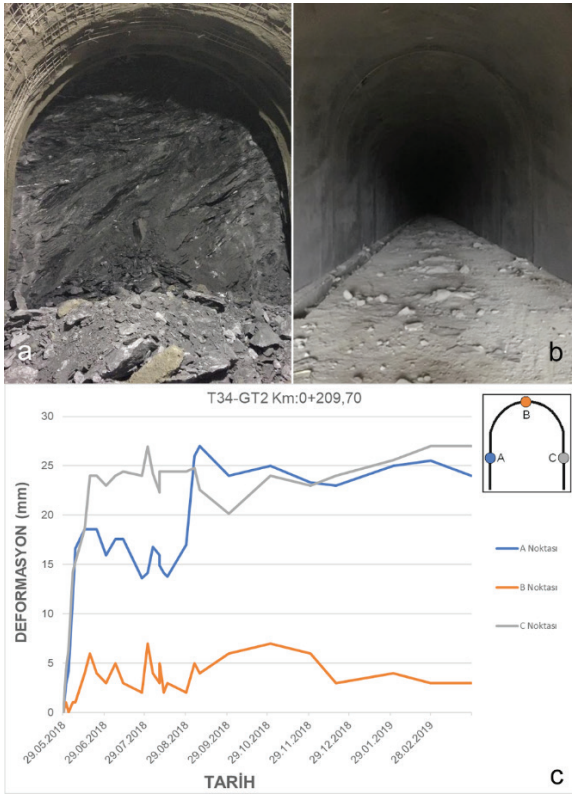
SONUÇ VE ÖNERİLER

Tünel desteklemeleriyle ilgili yapılan çalışmalarda zayıf ve sıkışan kaya koşullarına uygun desteklemenin belirlenmesi, tünel mühendisliği açısından halen kolay olmayan bir süreçtir. Özellikle fay zonlarında yapılan tünel kazıları özel vaka örnekleri olup, kazı ve destekleme performanslarının değerlendirilmesi bilimsel ve teknik açıdan oldukça ilgi çekicidir. Bu çalışmanın konusu olan T34-GT2 Tüneli de bu tür vakalar için tipik örneklerden biridir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında sunulan sonuç ve değerlendirmeler tünelcilik açısından önemli veriler ve değerlendirmeler içermektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 10. Analiz sonuçlarına göre toplam yer değiştirme miktarları.

Figure 10. Total displacement amounts according to analysis results.



Şekil 11. Tünel km: 0+209’da gözlemlenen kazı aynası (a) Tünelin tamamlanmış hali (b) Tünel içi deformasyon ölçüm grafiği (c).

Figure 11. Tunnel face observed at km: 0+209 (a), Completed tunnel (b), Inner tunnel deformation measurement graph (c).

1. T34-GT2 Tünelinde bulunan sıkışan zayıf kaya kütlelerinde yapılan analiz ve değerlendirmelerle oluşturulan rijit destek sistemi için yapılan sayısal analizler ile tünelde gerçekleşen deformasyon verileri birbirine yakın olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte tünel ekseninde beklenenden fazla deformasyonların varlığı aşırı kazıdan ya da ölçüm hassasiyetinden kaynaklanmış olma ihtimali yüksektir. Dolayısıyla zayıf ve sıkışan kaya kütlelerinde tünel desteklemesi yapılırken boşluklar bırakılmamalıdır.

2. Fay zonlarında bulunan zayıf kayalar içinde açılan tünellerde, tünel desteklemesinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan abaklar önceki çalışmalara dayanan ampirik yaklaşımlardır. Her tünelin kendine has özellikler içerdiği unutulmamalıdır. Dolayısıyla Sıkışan kaya kütlelerinde tünel desteklemesinin belirlenmesi için kaya kütlelerinin sıkışma davranışı mutlaka doğru tarifiyenmelidir.
3. Fay zonlarında bulunan zayıf ve sıkışan kaya kütlelerinde inşa edilen tünellerde, tünel ayna ve tavan stabilitesi birinci derece önemli faktördür. Bu kesimlerde tünel tavanı ve tünel aynası desteklenerek deformasyonlar en az düzeyde tutulmalıdır.
4. Sıkışan kaya kütlelerinde yapılan tünel çalışmalarında deformasyonların başladıktan sonra durdurmanın yüksek maliyetli ve zaman alıcı işlemler gerektirdiği görülmüştür. Bu nedenle tünel kazı ve destek işlemleri yapılırken mümkün olduğunca tünel tek seferde açılıp güçlü destekleme kullanılarak kesinlikle gevşemeye veya deformasyona mümkün olduğunca izin verilmeden destekler tamamlanmalıdır.
- 5- T34-GT2 Tünelinde zayıf ve sıkışan kaya kütleleri içerisinde hızlı kazı, güçlü destek, düşük deformasyon ilkesiyle uygulanan rijit destek sistemiyle tünelde başarılı sonuçlar alınmış ve tünel tamamlanmıştır. Dolayısıyla rijit destek sistemi yaklaşımının T34-GT2 Tüneline benzer kaya koşullarında uygulanabilir bir yaklaşım olduğunu sonucuna varılmıştır.

KATKI BELİRTME

Yazarlar bu çalışmanın hazırlanması sırasında verdikleri destekten dolayı TCDD

Genel Müdürlüğü'ne ve Yedigöze İnşaat yetkililerine teşekkür ederler. Yazarlar ayrıca, makale üzerindeki büyük çabaları için hakemlere ve editöre teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- AFAD. (2025). Türkiye deprem tehlike haritaları [Earthquake hazard maps of Turkey]. Retrieved from <http://tdth.afad.gov.tr>
- Akgün, H., Muratlı, S. W., & 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.
- Aksoy, C. O., Ogul, K., Topal, I., Ozer, S. C., Ozacar, V., & Posluk, E. (2012). Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 61–70.
- Aksoy, C. O., Uyar, G. G., Posluk, E., Ogul, K., Topal, I., & Kucuk, K. (2016). Non-deformable support system application at tunnel-34 of Ankara-Istanbul high-speed railway project. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58(5), 869–886.
- Apaydin Posluk, E., & Koral, H. (2013). Bozüyük (Bilecik)-Okulbali (Eskişehir) arasının Neojen stratigrafisi ve yapısal özellikleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 26(2), 83–103.
- Aygar, E. B. (2020). Evaluation of the new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(3), 541–556.
- 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, Article 1166.
- Aygar, E. B., & Gokceoglu, C. (2021). A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (T9 Tunnel, Ankara–Sivas High-Speed Railway Project, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80, Article 37.
- Aygar, E. B., Karahan, S., & Gokceoglu, C. (2024). Tunneling problems in weak rock conditions under shallow overburden and comparison between full-face excavation and sequence excavation methods. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(4), 668–688.
- Barton, N. R., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–239.
- Barton, N., Løset, F., Lien, R., & Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions. In Bergman, M. (Ed.), *Subsurface Space* (Vol. 2, pp. 553–561). New York: Pergamon.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335–344.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Bieniawski, Z. T. (Ed.), *Exploration for Rock Engineering: Proceedings of the Symposium* (Vol. 1, pp. 97–106). Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley.
- Cao, C., Shi, C., Lei, M., Yang, W., & Liu, J. (2018). Squeezing failure of tunnels: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 188–203.
- Cheng, X. (2017). Discussion on the large deformation law of Muzhailing tunnel in Lanhai Expressway. *World Construction*, 6(2), 22–25.
- Dalgic, S. (2002). Tunneling in squeezing rock: The Bolu tunnel Anatolian Motorway, Turkey. *Engineering Geology*, 67(1–2), 73–96.
- Das, R., Singh, P. K., Kainthola, A., & Panthee, S. (2017). Numerical analysis of surface subsidence in asymmetric parallel highway tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 170–179.
- Fenner, R. (1938). Untersuchungen zur erkenntnis des gebirgsdrucks. *Glückauf*, 74(32), 681–695.

- Hoek, E. (2001). Big tunnels in bad rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9), 726-740.
- Hoek, E. (2012). Rock support interaction analysis for tunnels in weak rock masses. Retrieved from <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>
- Hoek, E., & Guevara, R. (2009). Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(2), 389-418.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*, 32, 45-51.
- Hoek, E., & Marinos, P. G. (2010). Tunnelling in overgerilmersed rock. *Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2009: Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst, Dubrovnik, Cavtat, 29-31 October 2009*, Taylor and Francis Group, London, pp. 49-60.
- Incecik, M., & Poşluk, E. (2018). Tunnel T26 on the Ankara-İstanbul high-speed rail route-Tunnelling under difficult conditions. *Geomechanics and Tunnelling*, 11(5), 434-440.
- ISRM. (1981). Suggested methods: Rock characterization, testing, and monitoring. In E. T. Brown (Ed.), *Permagon Press*. London.
- Jethwa, J., Singh, B., & Singh, B. (1984). Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach. *Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium*, Cambridge, UK, 3-6 September 1984, pp. 231-238.
- Karahan, S., Poşluk, E., Büyükdemirci, F. B., & Gökçeoğlu, C. (2025). Re-design of a railway tunnel intersected by surface rupture of the Erkenek fault segment during the 6 February 2023 Pazarcık (Mw 7.7) Earthquake (Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84, Article 198.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2013). Araştırma mühendislik hizmetleri teknik şartnamesi. *Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı (T.A.D.B.)*.
- 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.
- Mhanna, M., & Hussein, H. H. (2024). Analysis of squeezing- induced failure in a water tunnel and measure of rehabilitation: A case study of Tishreen Tunnel, Syria. *Deep Underground Science and Engineering*, 1, 1-13.
- NGI (Norwegian Geotechnical Institute). (2015). Using the Q-system: Rock mass classification and support design (Handbook).
- ÖNORM B 2203. (1994). *Untertagebauarbeiten-Werkvertragsnorm*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- Panet, M., & Sulem, J. (2022). Convergence-confinement method for tunnel design. *Gewerbestrasse*, 1-151.
- Panthi, K. K., & Nilsen, B. (2007). Predicted versus actual rock mass conditions: A review of four tunnel projects in Nepal Himalaya. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 173-184.
- Poşluk, E. (2024). T26 Tünelindeki sıkışan kayalarda tünel açma makinesi (TBM) ile klasik kazı yöntemlerinin karşılaştırılması. *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü*, 304 s., İstanbul.
- Poşluk, E., & Korkanç, M. (2017). Yüksek Hızlı Tren Tünellerinde Tünel Emniyet Modellemeleri: Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi Tüneli No. 26 Örneği. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 642-652.
- Poşluk, E., & Korkanç, M. (2018). Difficulty on performance prediction of excavation with machine in weak rocks. *Journal of Geological Engineering*, 42(2), 143-158.

- Poşluk, E., & Korkanç, M. (2018). Zayıf Kayalarda Makine ile Kazı Performans Tahminindeki Zorluklar. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 42(2), 143–158.
- Rabcewicz, L. v. (1964a). The New Austrian Tunnelling Method, Part One. *Water Power*, 453–457.
- Rabcewicz, L. v. (1964b). The New Austrian Tunnelling Method, Part Two. *Water Power*, 511–515.
- Rabcewicz, L. v. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part Three. *Water Power*, 19–24.
- Rabcewicz, L. v., & Golser, J. (1973). Principles of dimensioning the supporting system for the “New Austrian Tunnelling Method.” *Water Power*, 88–93.
- RocScience. (2020). Phase2 8.0 Excavation & Support Design.
- Satıcı, Ö., & Topal, T. (2015). Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 39(1), 45–57.
- Singh, B., Jethwa, J. L., Dube, A. K., & Singh, B. (1992). Correlation between observed support pressure and rock mass quality. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7, 59–74.
- Şentürk, K., & Karaköse, C. (1981). Orta Sakarya bölgesinde Liyas öncesi ofiyolitlerinin ve mavi şistlerinin oluşumu ve yerleşmesi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 24(1), 1–11.
- Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports. In R. V. Proctor & T. L. White (Eds.), *Rock Tunnelling with Steel Supports* (Vol. 1, pp. 17–99). Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company.
- TSI. (2008). Technical specification of interoperability relating to ‘Safety in Railway Tunnels’ in the trans-European conventional and high-speed rail system.
- UIC (International Union of Railways). (2003). *Safety in Railway Tunnels (Code 779-9)*.
- Yedigöze Tİnşaat A.Ş. (2015). T34-GT2 Tüneli hesap raporu. (Yayımlanmamış).
- 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.

