



Heyelan Tünel İlişkisinin Sayısal Analizlerle Değerlendirilmesi (Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi T8 Tüneli)

Evren POŞLUK^{*1}, Kenan OĞUL², Hasan BOZKURT³

¹ TCDD 1. Bölge Modernizasyon Servis Müdürlüğü, Rasim Paşa Mahallesi Tren Garı Yolu Sokak, 34716, İstanbul, Türkiye.

² TCDD Demiryolu Yapım Dairesi Başkanlığı, Hacı Bayram Mahallesi Hipodrom Caddesi No:3, 06050, Ankara, Türkiye.

³ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü C Blok Kat:2 Gülümbe Kampüsü 11230-Bilecik, Türkiye.

*evrenposluk@gmail.com

(Alınış/Received: 12.11.2024, Kabul/Accepted: 11.12.2024, Yayınlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Yüksek standartlı demiryolları, kat ettikleri uzun mesafeler ve içerdiği yoğun mühendislik yapıları sebebiyle tasarım, yapım ve işletmecilik açısından oldukça karmaşık yapılardır. Demiryolu güzergah çalışmaları sırasında tünel, viyadük, altgeçit, üstgeçit gibi sanat yapılarına sıklıkla başvurulmakta, buda projenin maliyetini, yapım süresini ve işletmecilik sürecinde bakım maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yüksek standartlı demir yolu projelerinin temelini güzergah çalışmaları oluşturmaktadır. Bu çalışmada, heyelan altından geçen Doğançay Ripajı T8 Tüneli 2 farklı güzergah alternetifi (heyelana en yakın ve en uzak) irdelenmiştir. Bu amaçla öncelikle sondaj ve jeodezik yöntemler kullanılarak heyelan geometrileri belirlenmiş ardından geri analiz ve ileri analiz yöntemleri kullanılarak heyelanların farklı güzergahlara etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak heyelanlı bir bölgeden geçen T8 Tünelinde en kısa tünel güzergahının daha fazla destekleme gerektireceği bu nedenle heyelan kayma yüzeyinden en uzak mesafede tünelin konumlandırılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu anlayışa göre konumlandırılan T8 Tüneli sorunsuz bir şekilde 2021 yılında ulaşıma açılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüksek Standartlı Demiryolları, Heyelan, Kayma Yüzeyi, Tünel, Tünel Güzergahı

Evaluation of Landslide Tunnel Relationship with Numerical Analysis (Ankara-Istanbul High Speed Train Project T8 Tunnel)

Abstract: High standard railways are quite complex structures in terms of design, construction and operation due to the long distances they cover and the intensive engineering structures they contain. During railway route studies, engineering structures such as tunnels, viaducts, underpasses and overpasses are frequently used, which directly affects the cost of the project, construction period and maintenance costs during the operation process. Therefore, route studies constitute the basis of high standard railway projects. In this study, 2 different route alternatives (closest and farthest to the landslide) of Doğançay Ripajı T8 Tunnel passing under the landslide were examined. For this purpose, firstly, landslide geometries were determined using drilling and geodetic methods, then the effects of landslides on different routes were evaluated using back analysis and forward analysis methods. As a result, it was understood that the shortest tunnel route in the T8 Tunnel passing through a landslide region would require more support, therefore the tunnel should be positioned at the farthest distance from the landslide sliding surface. Positioned according to this understanding, the T8 Tunnel was opened to traffic in 2021 without any problems.

Keywords: High Standard Railways, Landslide, Slip Surface, Tunnel, Tunnel Route

1. Giriş

Yüksek standartlı demiryolu projelerinin yapım ve uygulanmasında, güvenli ve konforlu taşımacılık yapabilmek amacıyla tasarım kriterleri oluşturulmuştur [1,2]. Farklı kabullere

Atıf için/Cite as: E. Poşluk, K. Oğul, H. Bozkurt, "Heyelan tünel ilişkisinin sayısal analizlerle değerlendirilmesi (Ankara-İstanbul hızlı tren projesi t8 Tüneli)," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 13-26, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1537683

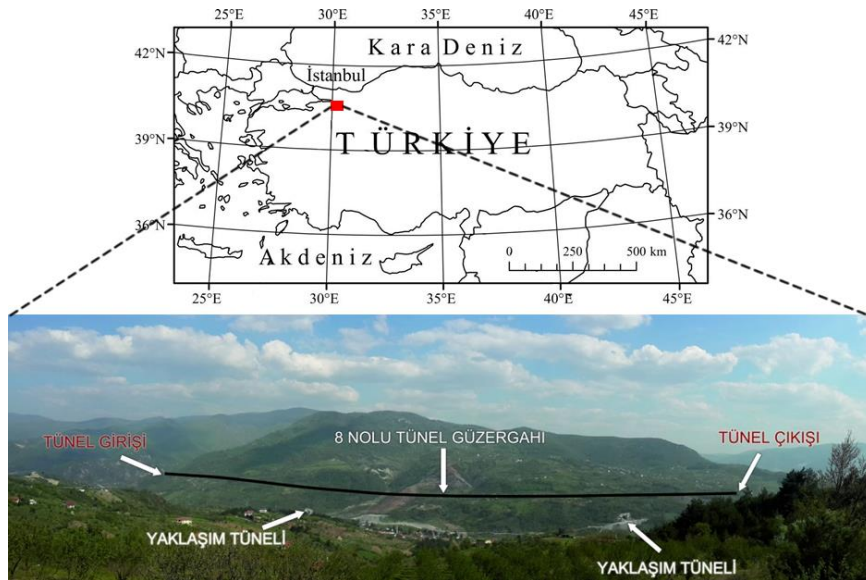
dayanan bu kriterler ülkelere göre değişiklik göstermektedir [3]. Ülkemizde yüksek hızlı demiryolu kriteri olarak 3500 m en düşük kurp yarı çapı ve % 1,6 en yüksek boyuna eğim kullanılmaktadır. Ülkemizin sarp coğrafyasında bu standartlar uygulandığında sıklıkla sanat yapısı kullanılması gerekmektedir. Güzergah planlayıcılar güzergah maliyetini azaltmak için genellikle kısa sanat yapılarının olduğu hatları tercih etmektedir. Bu tercih sonucunda ise hızlı demiryolu hatları çoğunlukla yamaçlardan geçmektedir. Yamaçlardan geçen hatlarda ise heyelanlar, çökmeler, kaya düşmeleri, göçükler gibi olumsuz jeolojik riskleri bulunmaktadır [4].

Kaya düşmesi, kayma, akma gibi jeolojik olaylarla anılan heyelanlar ise doğal yada insan faaliyetleri sonucunda tetiklenmektedirler [5]. Özellikle yeraltı açıklıklarında yapılan kazı çalışmalarında eski (fosil) heyelanlar tetiklenmekte ve yeraltı açıklığı için risk oluşmaktadır [6]. Tünel güzergahı boyunca heyelanlar veya paleo-heyelanlar varsa, bu heyelanların kayma yüzeyleri belirlenmeli ve tünelle ilişkileri tanımlanmalıdır. Ayrıca, heyelanlar sayısal analizde dikkate alınmalıdır [7]. Karmaşık jeolojik koşullarda inşaa edilen tüneller kendilerine özgü sorunlar içerir. Bu sorunların önceden öngörülmesi ve çözümü kapsamlı bir dizi çalışmanın birlikte yürütülmesi ile mümkündür.

Bu çalışma, heyelanlı bir sahadan geçen T8 Tüneli güzergahının maliyet etkin bir şekilde belirlenmesi amacıyla yürütülen bir dizi çalışmayı konu almaktadır. Çalışmalara heyelanların belirlenmesi, heyelanların hareketlerinin takibi, bölgedeki birimlerin jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin tespitiyle başlanmış ardından heyelanın tünele olan etkisi sayısal analizlerle tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. T8 Tünel Hattının Jeolojik ve Jeoteknik Özellikleri

T8 Tüneli, Ankara-İstanbul hızlı tren projesi güzergahında Adapazarı iline bağlı Doğançay beldesi ile Geyve ilçesi arasında (proje km: 138+954 ile 142+780 arasında) bulunmaktadır. Sakarya Nehrine paralel uzanan tünel hattında örtü kalınlığı 60 m ile 114 m arasında değişmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. T8 Tünel güzergahı

T8 Tüneli Üst Kampaniyen-Alt Eosen yaşlı Abant Formasyonu birimlerinden geçmektedir [8]. Tünel boyunca Abant Formasyonunun kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bunları damar, dayk ve stoklar halinde kesen granit birimlerinden geçilmektedir (Şekil 2a). Kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması çoğunlukla gri renkte orta derecede ayrışmalı ve çoğunlukla zayıf

dayanımlıdır. Birimin granitik sokulumlar tarafından kesilen bölgelerinde dayanım artmaktadır [9]. Birim içinde KD-GB doğrultulu fay zonlarına sıklıkla rastlanmaktadır. Fay zonu bölgeleri örselenmiştir. Granit sokulumları ise yüzeyde kahverenkli, derinlerde ise grimsi yeşil renkli olup genelde orta derecede ayrılmıştır (Şekil 2b). Granit sokulumları yüzeylerde zayıf, derinlere doğru sağlam dayanımlı ve sık eklemlidir [10]. Birim içinde kalınlığı birkaç metreye kadar ulaşan fay zonları mevcuttur.



Şekil 2. a) Abant Formasyonu granit üyesi b) Abant formasyonu kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı üyesi

2.1. Kaya malzemesinin jeomekanik özellikleri

T8 Tünel güzergahında yapılan jeolojik ve jeoteknik çalışmalarla granit, sağlam kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bu birimlerin altere seviyeleri ayırtlanmıştır. T8 Tünel güzergahı ve yakın çevresinde yapılan 17 adet sondaj çalışmasından elde edilen silindirik karot numuneleri üzerinde, ISRM [10] standartları kullanılarak kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık, tek eksenli basınç direnci, elastisite modülü, poisson oranı değerleri belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. T8 Tünel güzergahında yapılan sondajlara ait deney sonuçları [11, 12]

		Örnek sayısı	Ortalama	En Büyük Değer	En Küçük Değer	Standart sapma
Granit	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	31	25,36	28,04	23,61	0,84
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	30	20,94	50	3,3	12,93
	Elastisite Modülü (E, MPa)	13	6705	10500	1009	300,99
	Poisson Oranı (u)	11	0,28	0,43	0,12	0,1
Sağlam Kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması)	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	37	23,92	26,62	18,1	1,96
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	24	11,8	165,3	2,78	30,41
	Elastisite Modülü (E, MPa)	16	700	1650,3	400	77,23
	Poisson Oranı	5	0,29	0,3	0,23	0,2
Ayrılmış Kaya (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması)	Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	22	23,79	26,41	18,1	2,14
	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (oci, MPa)	18	6,05	36,51	1,15	9,56
	Elastisite Modülü (E, mPa)	16	541	146,85	0,03	38,72
	Poisson Oranı	4	0,27	0,3	0,18	0,3

2.2. Süreksizliklerin özellikleri

T8 Tüneli güzergah koridoru boyunca gözlenen granit, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması ve bu birimin alterasyonundan oluşan heyelan malzemesidir. Bu birimlerin ve bu birimlerin

içerdiği süreksizliklerin belirlenmesi amacı ile öncelikle yapılan sondajlardan yararlanılmıştır. Bununla birlikte bölgede gözlemlenen mostra ve yol yarma şevlerinde hat etüdü çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda süreksizliklerin yönelimi, ara uzaklık, açıklık, süreksizliklerin devamlılığı, süreksizlik yüzeylerindeki su durumu, süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülüğü, süreksizlik yüzeylerinin dalgalılığı, ayrışma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve kalınlığı gibi özelliklerin tespiti ISRM [10]'e göre yapılmıştır (Tablo 2). Ayrıca yeraltı suyu emilim durumu RMQR [13] sınıflama sisteminin önerdiği şekilde tespit edilmiştir. Tünel güzergah hattında yapılan sondajlardan derlenen veriler ile Kaya Kalitesi (RQD) değerlerinin granit için 55, altere kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı birimi için 17 ve kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı (sağlam kaya) biriminde ise 37 olarak belirlenmiştir.

2.3. Kaya kütle sınıflama sistemlerine göre tünel güzergah hattının değerlendirilmesi

Kaya kütlelerinin sınıflandırılması kaya kütlelerinin davranışlarını ve karakterini belirlemek açısından önemlidir. Bu amaçla ilk ciddi çalışma 1946 yılında Terzagi tarafından yapılmıştır. Kaya kütle sınıflama sistemleri ile özellikle zayıf-çok zayıf kayalarda doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve tecrübe gerektirmektedir [14]. Günümüzde en çok kullanılan sistemler RMR [15], Q [16], GSI [17] olarak sayılabilir. Bununla birlikte son yıllarda gelişim aşamasında olan RMQR [13] sistemi de bu çalışmada kullanılmıştır (Tablo 3).

Tablo 2. Tünel güzergahında bulunan kayaçların süreksizlik değerlendirmesi

	Süreksizlik Özellikleri								
	Granit		Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Sağlam Kaya)			Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Altere)			
Süreksizlik takımları	60/15	57/289	57/18	47/277	48/68	37/20	53/287	41/170	44/308
Süreksizlik türü	Eklem	Eklem	Eklem	Eklem	Tabaka	Eklem	Eklem	Eklem	Tabaka
Süreksizlik ara uzaklığı (cm)	18,3	21,1	18,6	12,8	13,1	9,7	9,2	12,8	12,3
Süreksizlik açıklığı (mm)	2	1,7	3,1	5,3	2,7	5,7	6,6	6,2	3
Süreksizlik devamlılığı (m)	2,2	2	6,6	5,1	>20	>10	>10	>10	>20
Süreksizlik pürüzlülüğü (ISRM, 1981)	Dalgali, pürüzlü	Dalgali, pürüzlü	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Az dalgali, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz	Düzlemsel, düz
Dolgu malzemesinin özelliği	Çok ince kuvars sıvaması	Çok ince kuvars sıvaması	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)	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Orta derecede bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş
Süreksizlik yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 1981)	Nemli	Nemli	Nemli	Nemli	Kuru	Nemli	Nemli	Nemli	Kuru
Ayrıca yeraltı suyu emilim durumu (Aydın vd., 2014)	Kılcal emici	Kılcal emici	Orta derecede emici	Kılcal emici	Kılcal emici	Orta derecede emici	Orta derecede emici	Orta derecede emici	Kılcal emici

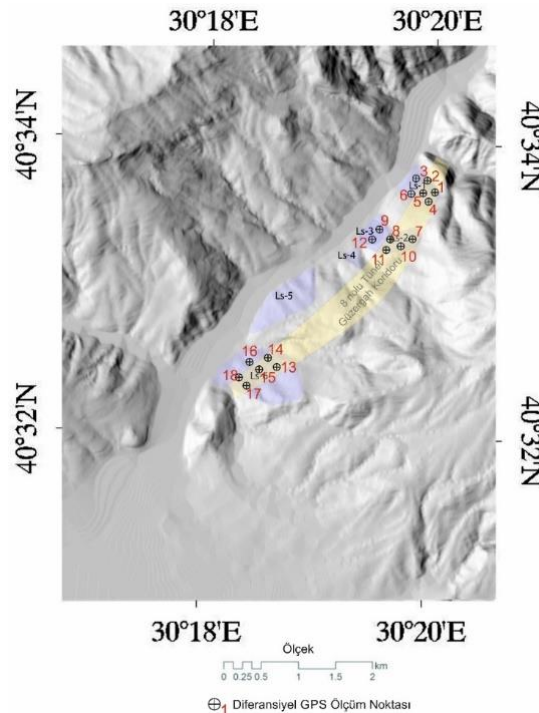
Tablo 3. T8 Tüneli güzergahındaki birimlerin kaya kütle sınıflama sistemlerine göre tanımlamaları

	RMR ₈₉ (Düzeltilmiş)	Q	GSI	RMQR
Granit	47	2,44	55	56
Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Sağlam Kaya)	27,5	0,52	30	33
Kumtaşı, Silttaşı, Çamurtaşı Ardalanması (Ayrışmış)	15,5	0,22	21	23

3. T8 Tünel Güzergahında Bulunan Heyelan Hareketlerinin Belirlenmesi

Çalışma sırasında yapılan uydu görüntüsü analizi, sayısal yükseklik modeli değerlendirilmesi ve müteakiben gerçekleştirilen arazi çalışmasına bağlı olarak T8 Tüneli güzergahı boyunca 6 ayrı heyelan kütleleri (Ls-1-6) tespit edilmiş olup bu heyelanlardan Ls-1, Ls-2, ve Ls-6 tünel güzergahında bulunmaktadır (Şekil 3). Heyelan hareketlerinin belirlenmesi çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada heyelanların yüzey yayılımları belirlenmiş ardından güncel hareketliliği tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise heyelan derinlikleri ve tünele olan etkileri irdelenmiştir. Çalışma sahası içerisinde haritalanan kütle hareketlerine bağlı olarak gelişen yüzey deformasyonlarının izlenmesi amacıyla saha içerisinde 18 adet yüzey ölçüm istasyonu tanımlanmıştır (Şekil 3).

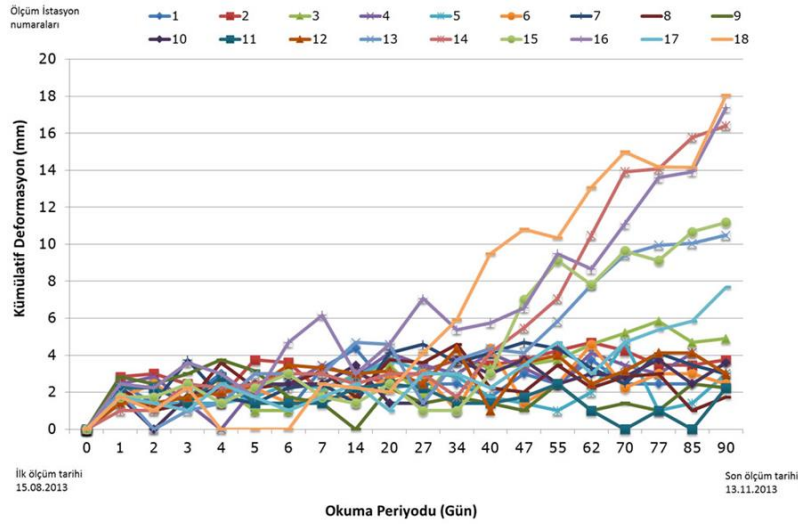
Ölçümlerde diferansiyel GPS (Küresel Konumlama Sistemi, 1 mm hassasiyette) yöntemi kullanılmıştır. Diferansiyel GPS yöntemi GPS yönteminin hassasiyetini arttırmayı amaçlar. GPS yönteminde konumsal verinin hassasiyetini, uydu pozisyonu, bulutluluk, bina ve ağaç örtmesi gibi etmenler sınırlayabilir. Bunlara ek olarak uydu sinyalleri atmosfere girerken gecikmeler olabilir [18]. Diferansiyel GPS yöntemi sabit bir alıcı ve kompakt kolay taşınabilir özellikte el ünitesinden oluşur [19]. Diferansiyel GPS ünitesi hem uydulardan hem de sabit noktada toplanarak gönderilen bilgileri farklı şekilde karşılaştırarak karmaşık temel modeller oluşturularak hata oranlarını azaltır [20].

**Şekil 3.** T8 Tünel koridoru boyunca tespit edilen heyelanlar.

Heyelan bölgelerinde yapılan diferansiyel GPS ölçümleri, 90 gün boyunca alınmıştır. Ölçümler periyotları ilk hafta günlük sonra ise haftalık olarak devam ettirilmiştir. Kuzey (y), Doğu (x) ve Yükseklik (z) şeklinde alınan ölçümler, ilk ölçümden çıkartılarak yer değiştirmeler bulunmuş, ardından toplam yer değiştirme vektörü Denklem 1. kullanılarak hesaplanmış ve grafik oluşturulmuştur (Şekil 4).

$$di = \sqrt{dxi^2 + dyi^2 + dzi^2} \quad (1)$$

Grafik incelendiğinde T8 Tüneli güzergahında bulunan Ls-1, Ls-2 ve Ls-3 isimli heyelanlarda hareketin olmadığı ancak Ls-6 isimli heyelan kütesinde yağışlı mevsime geçilmesi ile birlikte hareketlenmelerin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle yamaçta kalan 14-16 ve 18 numaralı istasyonlarda 1,8 cm kümülatif deformasyon ölçülmüştür. Bu verilerle Ls-6 heyelanının kripi davranış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 4. Diferansiyel GPS ölçüm değerleri

T8 Tüneli güzergahına denk gelen heyelanların derinliğinin belirlenmesi amacıyla öncelikle heyelanların yüzey yayılımları belirlenmiştir. Ardından heyelanların alansal yayılım ve dairesel yenilme modeline uyduğu kabul edilerek, Larsen vd. [21] tarafından önerilen ampirik model Denklem 2. kullanılmıştır. Ampirik model ile ulaşılan heyelan derinlikleri karotlu sondaj ve inklinometre ölçümleri kullanılarak heyelan geometrileri oluşturulmuştur (Tablo 4).

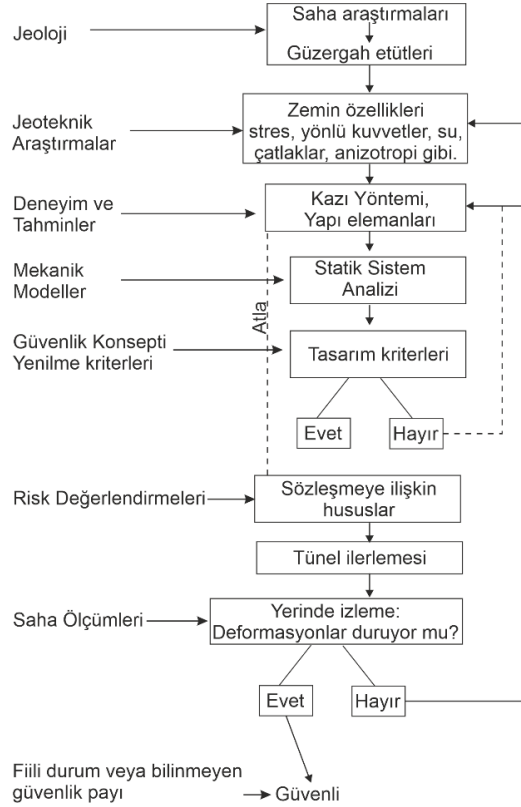
$$V = \alpha Ay \quad (2)$$

Tablo 4. T8 Tüneli güzergahında bulunan heyelanların yayılım ve derinlikleri

Heyelan Adı	Heyelan Yayılımı (m ²)	İnklinometre okumalarına göre heyelan derinliği	Sondajlara göre heyelan derinliği	Heyelan derinliğinin T8 Tünel Koridoruna olan mesafesi (en uzak-En yakın)
LS1	0,1592	17	14	22-32
LS2	0,2224	15	15	12-24
LS6	0,55	15.6	18	3-11

4. Tünel Tasarımı

Mühendislik tasarımı için güvenilir girdi parametrelerinin sağlanması, mühendislik jeologları ve tünel tasarım mühendisleri için en zor görevlerden biridir [22]. Doğru tasarım süreci, girdi parametrelerin gelişmiş tasarım yöntemleriyle eşleşmesi ile mümkündür. Bu süreç ITA [23] tarafından özetlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Tünel tasarımı akış şeması [23]

Tünel tasarımında kaya kütle sınıflama sistemleri, Konverjans Sınırlama Yöntemi, Gözleme dayanan tasarım yöntemleri ve sayısal analizler en çok kullanılan yöntemlerdir. Kaya kütle sınıflandırması, bir kaya kütlelerini tanımlanmış ilişkilere göre gruplara veya sınıflara ayırma sürecidir [15]. 100 yılı aşkın bir süredir kullanılan yöntemlerden günümüzde yeraltı kazı destek sistemi tasarımı amacıyla en çok Kaya Kütle Derecelendirme Sistemi (RMR) [15, 23]. ve Tünel Açma Kalite İndeksi (Q) [16], Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) [17] tercih edilmektedir [34].

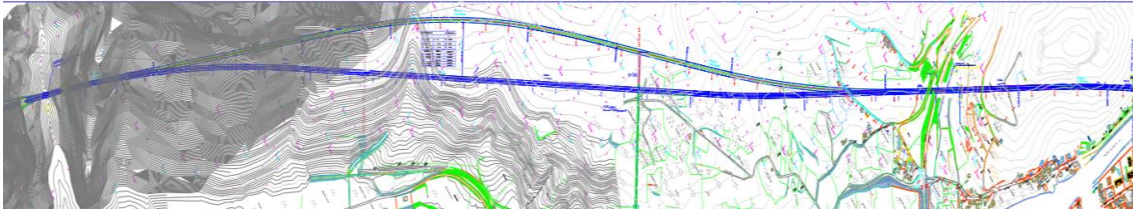
CCM tünellerde önerilen destek sisteminin gerekli yük kapasitesini tahmin etmek için kaya destek etkileşiminin üç boyutlu problemlerini simüle etmek amacıyla kullanılabilen iki boyutlu basitleştirilmiş bir yaklaşımdır [23]. Yöntemin temel prensibi destek ve zemin arasındaki denge durumunu hesaplamak için birleştirilen Zemin Reaksiyon Eğrisi (GRC), Boyuna Yer Değiştirme Profili (LDP), ve Destek Sınırlama Eğrisi (SCC) üç farklı eğriye dayanmaktadır. Gözleme dayanan tünel tasarımı ise yerinde gözlemler ile kaya kütlelerinin deformasyonunu ve destek sistemindeki yükün oluşumunu izlemek için enstrümanların kullanımı, gözlemsel yaklaşımı karakterize eder [25]. Gözlemsel yaklaşımlar günümüzde NATM ve ADECO-RS yöntemleridir.

20. yüzyılın ikinci yarısında tünel açma ve yeraltı kazı problemlerinin çözümünde sayısal yöntemler uygulanmaya başlanmıştır [26]. Tünel modellemelerinde en çok kullanılan hem sonlu

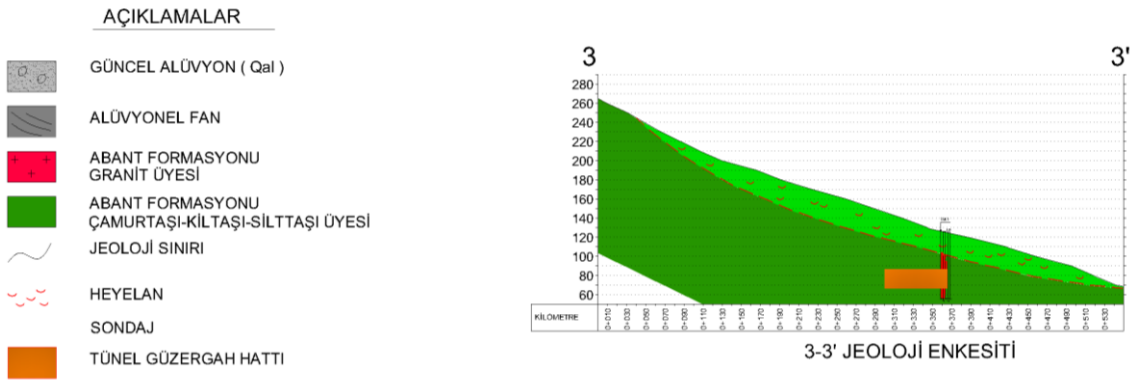
elemanlar hem de sonlu farklar modellemesinde, lineer elastik modeller, elastik plastik modeller (Mohr-Coulomb, Generalized Hoek-Brown, Drucker Prager mukavemet modelleri vb.) ve viskoplastik modeller başta olmak üzere çok sayıda malzeme modeli kullanılabilir. Bu çalışmada NATM yöntemiyle farklı projelerde uygulanan tünel destek modelleri sayısal analiz yöntemi kullanılarak sorgulanmış, tünel heyelan ilişkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.

4.1. Jeolojik modelin oluşturulması

T8 Tüneli güzergah kısıtlamaları nedeniyle en uzun 3827 m en kısa 3805 m olabilmektedir (Şekil 6). Hareketin devam ettiği Ls-6 heyelanı ile T8 Tüneli heyelan etkileşiminin irdelenmesi amacıyla kritik kesit bu hatlar üzerinde belirlenmiştir (Şekil 6). Kritik kesitte T8 Tüneli heyelan kayma yüzeyinin 4.2 ile 21 m arasında altında olup tünel üzeri örtü kalınlığı ise 28 ile 50,9 m arasında değişmektedir (Şekil 7).



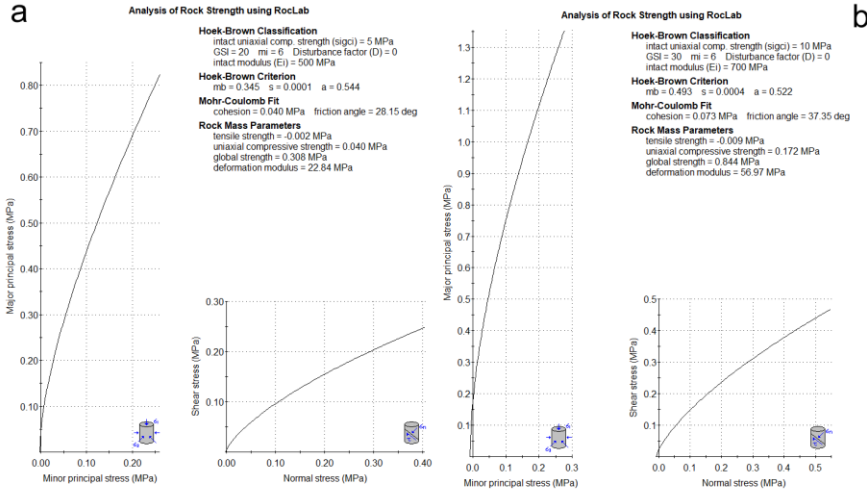
Şekil 6. T8 Tünel güzergahları (en kısa hat koyu, en uzun hat açık mavi ile gösterilmektedir)



Şekil 7. Ls-6 numaralı heyelanın jeolojik modeli

4.2. Analiz parametrelerinin belirlenmesi

T8 Tüneli üzerindeki heyelanın tünele etkisinin araştırması amacıyla gerek geri analiz gerekse ileri analiz çalışmalarında sağlam kaya ve ayrılmış kaya Abant Formasyonu (kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanması) birimleri için kaya kütle parametreleri belirlenmiştir. Ayrılmış kaya birimleri için GSI değeri 20, kaya malzemesi sabiti olan "mi" değeri 6 alınmıştır. Sağlam kaya Abant Formasyonu için GSI değeri 30, kaya malzemesi sabiti olan "mi" değeri 6, tünel üzeri örtü kalınlığı 30 m ve örselenme faktörü makineli kazı yapılacağı için D=0 alınmıştır. Bu veriler RockLab [27] bilgisayar programı ile değerlendirilmiş ve birimlere ait normal gerilme – kesme dayanımı grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 8).

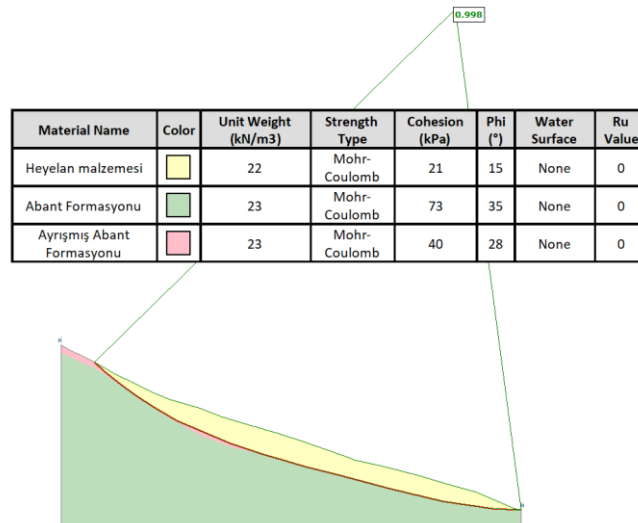


Şekil 8. Abant Formasyonu birimleri için oluşturulan gerilme-kesme dayanımı grafikleri (a) ayrıışmış Abant Formasyonu birimleri, b) sağlam kaya Abant Formasyonu birimleri; [27]

Geri analiz:

Bir şev kayması olduğunda, şevde güvenlik sayısının (GS) bire eşit yada altında olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla bir şevin hareketi anındaki şev modeli gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir [27]. Bir şevin hareket anındaki koşulları belirleyerek şeve uygun model oluşturma süreci geri analiz veya geri hesaplama olarak adlandırılır [28]. Geri analiz yönteminde şevin hareket anındaki güvenlik sayısının yaklaşık "1" olduğu esas alınır. Hesaplamalar sonucunda elde edilen zemin parametreleri, kayma yüzeyindeki ağırlıklı ortalama kayma dayanımı parametreleridir ve $GS = 1$ koşulunu sağlayan c:kohezyon, ϕ :içsel sürtünme açısı veri çiftleri deneme yanılma yoluyla belirlenir [28].

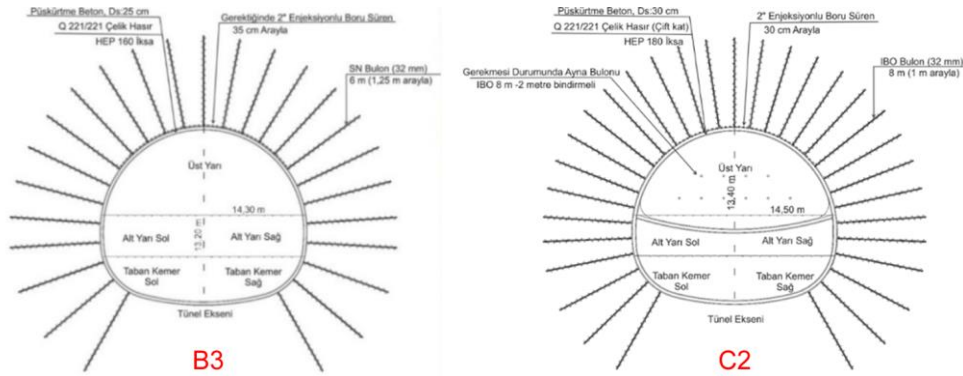
T8 Tüneli üzerindeki heyelan kütesine ait kütle parametreleri, limit denge yöntemleri kullanan Slide V.9 bilgisayar programı kullanılarak geri analiz yöntemi ile hesaplanmıştır. Analizlerde limit denge yöntemlerinden; tam dairesel olmayan kayma koşullarında iyi sonuçlar verdiği bilinen "Janbu" hesap yöntemleri kullanılmıştır [8]. Analiz sonuçlarına göre heyelan malzemesinin birim hacim ağırlığı $2,2 \text{ kN/m}^3$, kohezyonu 4,2 kPa ve içsel sürtünme açısı $12,2^\circ$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Geri analiz yöntemiyle elde edilen heyelan malzemesi parametre değerleri

İleri analizler:

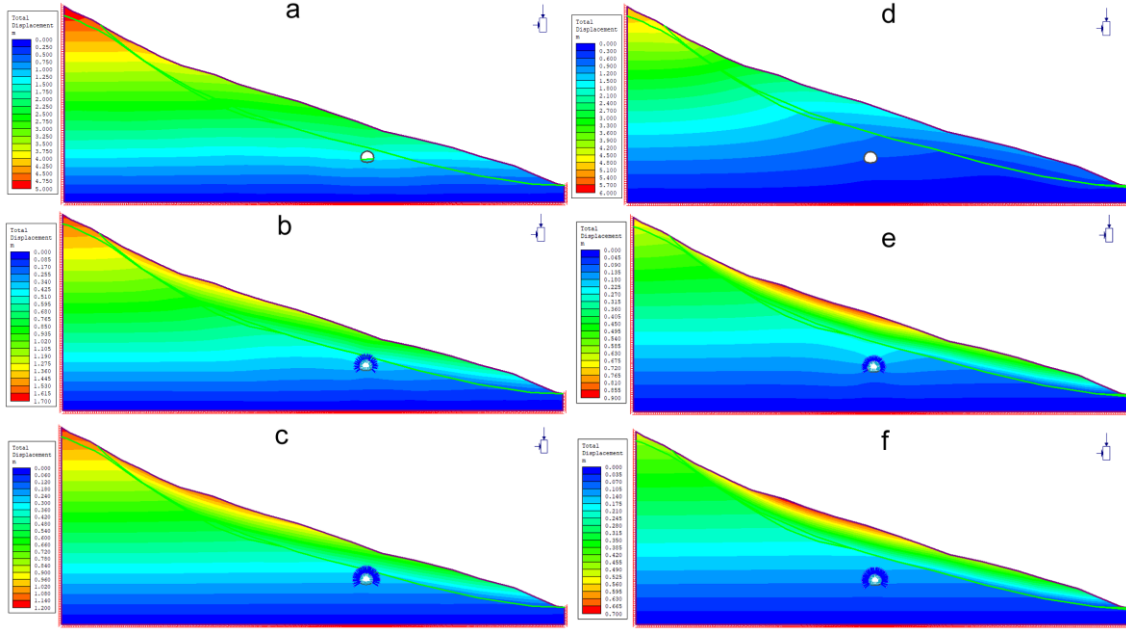
İleri analizler tünel heyelan ilişkisini sorgulayarak T8 Tünel güzergahı için en uygun maliyetli hattın belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Analizler heyelana en yakın ve en uzak tünel güzergahları için desteksiz, ONORM-B 2203 [29]'e göre oluşturulmuş B3 ve C2 destekli tünel koşullarında gerçekleştirilmiştir. Destek sistemi detayları Şekil 10'de verilmiştir. 2 boyutlu analizler gerçek yüzey modelinde Phase2d V. 8,0 [30] programı ile yapılmıştır. Analizlerde malzeme gevşemesi %60 olarak seçilmiş, kazıdan sonra desteklere gelecek yük ise %40 olarak alınmıştır [31]. Analizlerde kullanılan k (σ_h/σ_v) değeri Sheorey [32] formülü kullanılarak 0,5 olarak hesaplanmış analizlere girilmiştir. 6 farklı analizde kullanılan modelleme aşamaları Çizelge 5'de verilmiştir.



Şekil 10. Sayısal analizlerde kullanılan desteklemeler [11, 12]

Tablo 5. Sayısal analiz aşamaları

Aşama	Heyelana En Yakın Tünel Konumu			Heyelana En Uzak Tünel Konumu		
	Desteksiz	B3 Destekleme	C2 Destekleme	Desteksiz	B3 Destekleme	C2 Destekleme
1	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması	Yerinde gerilmelerin oluşturulması
2	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)	Üst yarı gevşemesi (60%)
3	Üst yarı kazısı	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Üst yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
4	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)	Alt yarı gevşemesi (60%)
5	Alt yarı Kazısı	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı Kazısı	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Alt yarı kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
6	Taban kemer bölümü gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban bölümü gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)	Taban kemer gevşemesi (60%)
7	Taban kemer bölümü kazısı	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban bölümü kazısı	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin yerleştirilmesi
8		Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması		Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması	Taban kemer kazısı ve desteklemesinin tam kapasiteye ulaşması



Şekil 11. Sayısal analiz sonuçları (a) Heyelana en yakın desteksiz tünel koşulu, b) heyelana en yakın B3 destekleme, c) heyelana en yakın C2 destekleme, d) heyelana en uzak desteksiz tünel koşulu, e) heyelana en uzak B3 destekleme, f) heyelana en uzak C2 destekleme).

Sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde tünelin heyelana en uzak olduğu durumda tünel çevresinde oluşan toplam yer değiştirmelerin daha düşük olduğu görülmektedir (Tablo). Bununla birlikte tünel stabilitesinin sağlanması amacıyla uygulanan desteklemelerde ise tünelin heyelana en yakın olduğu koşullarda B3 desteklemenin yeterli olmadığı ve 51 cm civarında deformasyonların oluştuğu anlaşılmaktadır. Burada C2 desteklemede ise 30 cm yer değiştirmeler gözlenmektedir. Buna karşın heyelandan en uzak tünel konumunda ise B3 desteklemede 22,5 cm'ye inmektedir. C2 desteklemede ise bu değer 14 cm seviyesine gerilemektedir.

Tablo 6. Sayısal analiz sonuçları özet tablosu

Tünel Desteklemeleri	Heyelana en yakın tünel konumu			Heyelana en uzak tünel konumu		
	Desteksiz	B3	C2	Desteksiz	B3	C2
Tünel tavanı toplam yer değiştirmeleri (mm)	1500,00	510,00	300,00	900,00	225,00	140
Tünel tabanı toplam yerdeğiştirmeleri (mm)	1250,00	340,00	240,00	600,00	135,00	115
Tünel sol duvar toplam yerdeğiştirmeleri (mm)	1500,00	425,00	240,00	600,00	180,00	115
Tünel sağ duvar toplam yerdeğiştirmeleri (mm)	1500,00	425,00	300,00	600,00	180,00	115
Tünel birincil desteklemesi max, moment, (kNm/m)	-	122,23	145,49	-	249,74	276,34
Tünel birincil desteklemesi max, Kesme kuvveti (kN/m)	-	177,79	278,06	-	275,35	124,73
Kaya blonu yükleri (kN)	-	71,09	215,36	-	234,00	169,78

5. Sonuçlar

Bu çalışmada heyelanlı bir sahada tünel konumunun destek ihtiyacına olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Demiryolu güzergahında bulunan

T8 Tüneli incelenmiştir. Sayısal yükseklik modeli üzerinde heyelanlar ve yayılımları belirlenmiştir. Bu heyelanlar 90 günlük periyotta jeodezik yöntemlerle takip edilmiştir. Sondajlar, sayısal yükseklik modeli ve ampirik yaklaşımlar kullanılarak aktif heyelanın geometrisi belirlenmiştir. Belirlenen heyelan modelinde Oluşturulan heyelan geometrisi ile tünel etkileşimleri desteksiz, B3 destekli ve C2 destekli durumlar için Phase V.8 programıyla sorgulanmıştır.

a) Analiz sonuçları, tünel tavanının heyelan kayma yüzeyinden uzaklaştıkça toplam yer değiştirmelerin azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla heyelanlı bir sahada tünel güzergahı belirlenirken mümkün olduğunca heyelan kayma yüzeyinin altından geçilmesi gerekmektedir.

b) doğru jeolojik verilerle oluşturulmuş tünel modellemesi ile sayısal analizlerden yararlanılarak tünelin en az destekleme ile geçeceği güzergah oluşturulmalıdır.

c) Tüneli heyelandan uzaklaşmaya çalıştırmak tünel uzunluğunu arttırmaktadır. Dolayısıyla Tünel uzunluğu ile tünel destekleme ihtiyacı arasında bir seçim yapılması gerekmektedir. Buda ancak maliyet hesaplaması ile mümkündür.

T8 Tünelinin 3805 m uzunluğundaki en kısa hattının 3827 m uzunluğundaki en uzun hattına oranla 1.3 daha maliyetli olacağı değerlendirilerek çalışmalar en uzun hatta yapılmış ve T8 Tüneli 2021 yılında tren trafiğine açılmıştır.

Teşekkür

Yazarlar TCDD yetkililerine, Fugro-SIAL ve Yüksel Proje çalışanlarına göstermiş oldukları destekten dolayı teşekkür ederler.

Kaynakça

- [1] *Application of digital track geometry analysis to the planning of tamping and lining/levelling work*, UIC Code 715-1, 2003
- [2] *Recommandations pour la gestion des rails*, UIC Code 715-2, 2003
- [3] E. Poşluk, “Dünyadaki Son Gelişmeler Çerçevesinde Yüksek Hızlı Demiryolu Tünel Tasarımı ve Türkiye’deki Durum,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 15, pp. 13–29, 2022
- [4] J. Hadjigeorgiou, “Understanding managing and communicating geomechanical mining risk,” *Mining Technology*, vol. 129(3), pp. 159-173, 2020
- [5] Y Y. Jiao, X L. Zhang, J. Zhao, “A two-dimensional DDA contact constitutive model for simulating rock fragmentation,” *Journal of Engineering Mechanics—ASCE*, vol. 138 (2), pp. 199–209, 2012.
- [6] J. Torano, R R. Diez, J M R, Rivas Cid, M M C, Barciella, “FEM modeling of roadways driven in a fractured rock mass under a longwall influence,” *Computers and Geotechnics*, vol. 29 (6), pp. 411–431, 2002.
- [7] C. Gokceoglu, E B. Aygar, H A. Nefeslioglu, S. Karahan, S. Gullu, “A geotechnical perspective on a complex geological environment in a high-speed railway tunnel excavation (a case study from Türkiye),” *Infrastructures*, vol. 7(11), pp. 155, 2022.
- [8] E. Temur, A. Aksay, “1:100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Adapazarı G24 Paftası,” *MTA Yayınları no:31*, 2002.
- [9] E. Poşluk, S. Dalğıç, İ. Kuşku, E A. Poşluk, “Heyelan İslahında Gereken Dayanma Kuvvetinin Limit Denge Yöntemi ile Belirlenmesi” *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, vol. 27(2), pp. 77-88, 2014.
- [10] ISRM, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods prepared by the Commission on Testing Methods*. Kozan Ofset, Ankara. 2007.

- [11] Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi Doğançay Ripajı İlk Kısım proje raporu, Ankara, 2013 (Yayımlanmamış).
- [12] FUGRO-SİAL, “Ankara İstanbul Hızlı Tren Projesi Doğançay Ripajı İlk Kısım 8 nolu tünel değerlendirme raporu” Ankara, 2013 (Yayımlanmamış).
- [13] Ö. Aydan, R. Ulusay, N. Tokashiki, “A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 47, pp. 1255–1276, 2014.
- [14] H. Sönmez, R. Ulusay, “A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies,” *Yerbilimleri*, vol. 26, pp. 77-99, 2002.
- [15] Z T, Bieniawski, *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, p. 251, 1989.
- [16] N. Barton, R. Lien, J. Lunde, “Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support,” *Rock Mechanics*, vol. 6, pp. 189-239, 1974.
- [17] E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi, “Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of Athens schist formation,” *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 57, pp. 151-160, 2002.
- [18] P M. Kintner, B M. Ledvina, “The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems,” *Adv. Space Res.* vol. 35, pp. 788–811, 2005.
- [19] L K. Napton, E.A. Greathouse, *Archaeological mapping, site grids, and surveying*, Leftcoast Press, Walnut Creek, CA, pp. 177–234, 2009.
- [20] P. Bolstad, *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*, Eider Press, White Bear Lake, MN, 2000.
- [21] I.J., Larsen, D R. Montgomery, O. Korup, “Landslide erosion controlled by hillslope material” *Nature Geoscience*, vol. 3, pp. 247-251, 2010.
- [22] E. Poşluk, “T26 Tünelindeki Sıkışan Kayalarda Tünel Açma Makinesi (TBM) ile Klasik Kazı Yöntemlerinin Karşılaştırılması”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2024.
- [23] ITA, “ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels, Guideline for the Design of Tunnels,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 3, pp. 237-248, 1988.
- [24] M. Panet, J. Sulem, “Convergence-confinement method for tunnel design,” *Gewerbestrasse*, vol. 1, pp.1-151, 2022.
- [25] D., Kolymbas, “The new austrain tunnelling method, Tunnelling and tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling,” *Tunnelling*, pp. 171-175, 2008.
- [26] O C. Zienkiewicz, K. Morgan, “Finite Elements And Approximation,” A Wiley-Interscience Publication, New York, 1983.
- [27] Roclab, 2011, Version 1.032, www.rocscience.com
- [28] B. Ün, A. Yıldız, “Şev Stabilesi Probleminin Geri Analizle Çözümü: Örnek Bir Vaka,” *Journal of Engineering and Science*, vol. 9(1), pp. 174-181, 2021.
- [29] ÖNORM B 2203, Österreichisches Normungsinstitut. ÖNORM B 2203 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm. Wien, 1994.
- [30] RocScience, 2020. Phase2 8.0 User Guide, [Accessed: 17-Nov-2021]. https://www.rocscience.com/downloads/phase2/Phase2_TutorialManual.
- [31] FHWA, Federal Highway Administration, “Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels,” *Civil Elements*, pp. 702, 2009.
- [32] P R. Sheorey, M G. Murali, A. Sinha, “Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38 (1), pp 1211–1216, 2001.
- [33] J M. Duncan, S. G. VVright “Zemin Şevlerinin Duraylılığı,” Çeviren: Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi, Ankara, 299 s., 2005.
- [34] M. Incecik, E. Poşluk, “Tunnel T26 on the Ankara–İstanbul high speed rail route–Tunnelling under difficult conditions,” *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 11(5), pp. 434-440, 2018.

Özgeçmiş**Evren POŞLUK**

1981 yılında doğmuştur. Jeoloji Mühendisliği Lisans eğitimini Karadeniz Teknik Üniversitesinde, Yüksek Lisans Eğitimini Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesinde, Doktora Eğitimini ise İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'da tamamlamıştır. 2011 yılında katıldığı TCDD Yapım Dairesinde yüksek hızlı demiryolu yapım işlerinde görev yapmış, ardından TCDD 1. Bölge Modernizasyon Servis Müdürlüğünde çalışmaya başlamıştır. Kaya mekaniği, tüneller ve şevler konusunda çalışmalar yürütmektedir.

E-Posta: evrenposluk@gmail.com

**Kenan OĞUL**

1981 yılında Eskişehir'de doğdu. İlk ve orta eğitimini Eskişehir'de tamamladı. 1998 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Meslek Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2005 Yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesinde, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Kocaeli Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Dumlupınar Üniversitesinde Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2009 yılından beri Yüksek Hızlı Demiryolu Yapım işlerinde görev yapmakta olup halen Demiryolu Yapım Dairesi Başkan Yardımcılığı görevini yürütmektedir.

E-Posta: k.ogul@hotmail.com

**Hasan BOZKURT**

1986 yılında Bilecik'te doğdu. 2008 yılında Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2008-2011 yılları arasında Nippon Koei-Temelsu Uluslararası Müşüvirlik Firmasında Sanat Yapıları Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 2011 Yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2017 Yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi-Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Doktora Programından mezun oldu. Bilecik Şeyh Edebali İnşaat Mühendisliği Bölümünden Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

E-Posta: hasan.bozkurt@bilecik.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Evren POŞLUK: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Sayısal analizler ve Yazma-orijinal taslak hazırlama. Kenan OĞUL: Gözden geçirme ve düzenleme. Hasan BOZKURT: Gözden geçirme ve düzenleme.