

## Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımları

Celal AĞAN<sup>1</sup>  
Serkan ERTÜRK<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışma Suruç ovasının sulanması amacıyla inşa edilen Suruç tüneli güzergahındaki geoteknik çalışmaları ve tünel destek tasarımını kapsamaktadır. Suruç tüneli (7.9 m kazı çapı), Türkiye'nin birinci, dünyanın ise beşinci en uzun sulama tüneli olacaktır (17.2 km). Tünel kireçtaşı ve marn birimlerinden geçmektedir. Saha çalışmaları sondaj, numune alımı, geçirgenlik deneyleri, laboratuvar testleri, kaya kütlelerinin karakterize edilmesi (RMR, Q ve GSI sistemleriyle), süreksizlik ölçümleri ve kinematik analizleri kapsamaktadır. Kinematik analiz sonuçlarına göre kazı şevlerinde, tünel giriş ve çıkışında kayma riski olmadığı için daha detaylı şev duraylılık analizlerine gerek görülmemiştir. Tünel basınçları, yenilme zonu sınırları ve destek tasarımları ampirik, analitik ve sayısal yöntemlerle belirlenmiş, doğrulukları convergence-confinement yöntemiyle ve Plaxis 8.2 yazılımı ile sınanmıştır. Tünelin desteksiz, Q sisteminin önerdiği elemanlarla desteklendiği (kaya saplaması ve püskürtme beton destekli) ve önceden dökülmüş hazır betonla desteklendiği durumlar karşılaştırılmış, en küçük deformasyonlar önceden dökülmüş hazır beton destek elemanlarıyla (0.90 mm) elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya kütleleri sınıflama yöntemleri, Hoek-Brown yenilme kriteri, Convergence-confinement yöntemi, sayısal analiz, tünel destek tasarımı, Suruç Tüneli.

### ABSTRACT

#### Geotechnical and Support Design of Suruç Tunnel, Turkey's Longest Irrigation Tunnel

This research concerns with geotechnical and support designs along the Suruç tunnel, which will be used for irrigation of the Suruç Plain. The tunnel has a diameter of 7.9 m. It will be the Turkey's 1st and the World's 5th longest irrigation tunnel (17.2 km). The tunnel runs through limestone and marly formations. Field studies include rock mass characterization (by using RMR, Q and GSI systems), discontinuity surveying, drilling, permeability tests and sampling. Support requirements were determined by using the rock

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 05.06.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.310455

1 Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa - agancelal@hotmail.com

2 Harran Üniversitesi, Yapı İşleri Daire Başkanlığı, Şanlıurfa - ser\_erturk@hotmail.com

mass classification systems, and evaluated by the convergence-confinement method and Plaxis 8.2 software. The minimum deformations (0.90 mm) occurred in precast lining.

**Keywords:** Rock mass classification system, Hoek-Brown failure criterion, Convergence confinement method, numerical analyses, Tunnel support design, Suruç Tunnel.

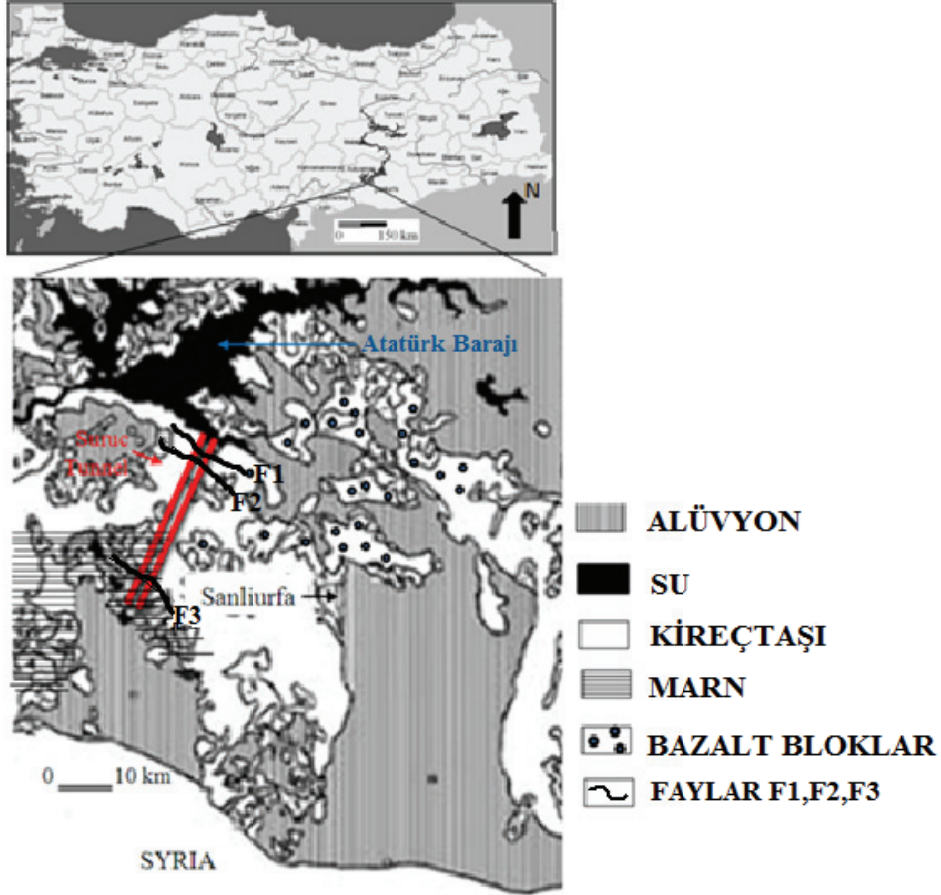
## 1. GİRİŞ

Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP), Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu bölgesinde yaşayan 9 milyon kişinin [1] sürdürülebilir kalkınması amaçlı çok sektörlü bir bölgesel kalkınma projesidir. GAP'ın temel hedefleri tarım, sulama, hidroelektrik enerji üretimi, kentsel ve kırsal altyapı, ormancılık, eğitim ve sağlıktır. GAP'ın tamamlanmasıyla 1.82 milyon hektar alan sulamaya açılacak ve GAP kapsamında 22 baraj ve 19 hidroelektrik santralleri ve sulama şebekeleri hizmete girecektir. GAP'ın belkemiği olan Atatürk Barajı temelden 169 m yüksekliğe sahiptir. 84.5 milyon m<sup>3</sup> dolgu hacmi ile dünyanın en büyük altıncı barajıdır. 1,2 milyon m<sup>2</sup> enjeksiyon perdesine sahip dünyadaki en büyük yapıdır. Atatürk barajında iki adet 26.5 km uzunluğunda ve 7.62 m çapında sulama tüneli (Şanlıurfa Tüneli) bulunmaktadır. Şanlıurfa tüneli 1995 yılından beri çalışmakta olup amacı Urfa, Harran ve Ceylanpınar ovalarını (toplam 4763.7 km<sup>2</sup>) sulamaktır. Suruç ve Bozova ilçelerinin sulanması amacıyla yapılmakta olan Suruç tüneli (7.9 m kazı çapı, 7 m tünel son kesit çapı), 17.2 km uzunluğu ile Türkiye'nin birinci dünyanın ise beşinci en uzun sulama tüneli olacaktır. Bu proje ile ekonomisi daha çok tarıma dayalı olan ve 1980'li yıllara kadar bereketli bir bölge olan Suruç ve Bozova ilçe merkezlerine bağlı 105 yerleşim yerine ait toplam 94814 ha bereketli tarım arazisi suya kavuşacaktır. Suruç tüneli DSİ kontrolünde [1] tarafından tasarlanmış olup, tünel kazısı İlci Yapı Grubu tarafından yapılmaktadır.

Çalışma sahası MTA'nın 1/25 000 ölçekli topografik haritalarına göre N41-a1, N40-b2, N40-b3, N40-b4, N40-c1, N40-c2 and N40-c3 paftalarına düşmektedir. Tünel girişi Şanlıurfa'nın 40 km kuzeybatısında olup, Şanlıurfa-Gaziantep O-52 karayolundan ulaşım sağlanmaktadır (Şekil 1).

Bu çalışmanın amacı; böylesine büyük bir ölçeğe ve öneme sahip Suruç tünelinin (i) tünel güzergahı boyunca karşılaşılabilecek kaya malzemelerinin ve kütlelerinin geoteknik ve mekanik parametrelerini tespit etmek, (ii) tünel giriş, çıkış ve kazı kesitlerinin şev duraylılık analizlerini yapmak ve (iii) üç farklı jeolojik birimden geçecek olan tünel için uygun destek tasarımı önermektir.

Bu amaçla, tünel güzergahı boyunca detaylı jeolojik, geoteknik ve kinematik incelemeler yapılmış, ayrıca sondaj, numune alımı, geçirgenlik deneyleri ve laboratuvar testleri yapılmıştır. Tünel giriş, çıkış ve kazı kesitlerinin şev duraylılık analizlerini yapmak için, Dips 2.2 yazılımı [2] kullanılarak kinematik analizler yapılmıştır. Kaya kütlesi sınıflandırmaları için uygun bulunan yüzleklere RMR, Q and GSI sınıflama sistemleri uygulanmıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından RMR, Q and GSI sınıflama sistemleri baz alınarak önerilen ampirik bağıntılarla, kaya kütlelerinin dayanım parametreleri belirlenmiştir. Destek önerileri için Q sistemi kullanılmıştır. Daha sonra, deformasyonlar, gerilme konsantrasyonları ve tünel çevresindeki gevşeme zonu kalınlığı convergence-confinement yöntemiyle çözümlenmeli olarak, Plaxis 8.2 [3] yazılımıyla sayısal olarak irdelenmiştir. Son olarak, önerilen destek sistemlerinin performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Suruç tüneli konum ve jeolojik haritası

## 2. JEOLJİ

Tünel jeolojik koşullarının bilinmesi kazı yöntemi, uygun malzeme, ekipman ve destek tipi belirlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca, inşaat maliyeti ve jeolojik koşulların aydınlatılmadığı yerlerde ki bazı projelerde iyileştirme maliyeti orijinal bütçeyi fazlasıyla aşmaktadır [4].

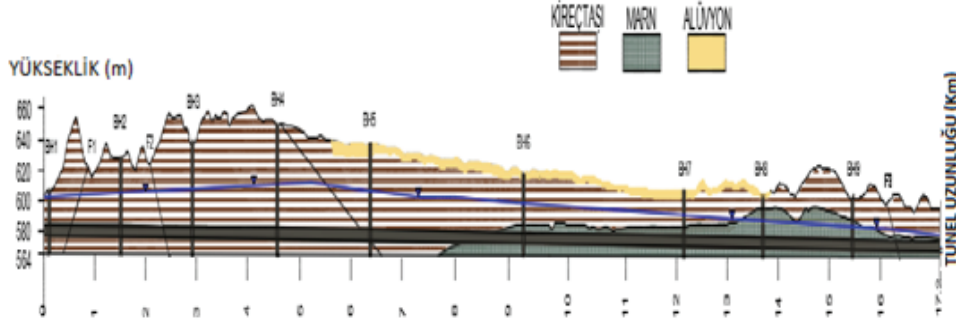
17.2 km uzunluğunda planlanan Suruç tüneli kireçtaşı ve marn birimlerinden oluşan Gaziantep birimi içerisinde kazılmaktadır. Güzergahın 8.1 km'si kireçtaşı ve 9.1 km'si marn birimlerinden geçmektedir. Gaziantep birimi, ince-orta tabakalı, yer yer kalın tabakalı, açık gri, bej, beyaz, açık kahve renklerde kırılğan, yer yer marn ara seviyeli killi kireçtaşlarından oluşur. Suruç tüneline en fazla örtü kalınlığı marnda 80 m ve kireçtaşında 50 m'dir.

Güzergahın bazı kısımlarında yüzeyde alüvyon ve yamaç molozundan oluşan Kuvaterner çökeltileri görülmektedir. Alüvyon, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine [5] göre

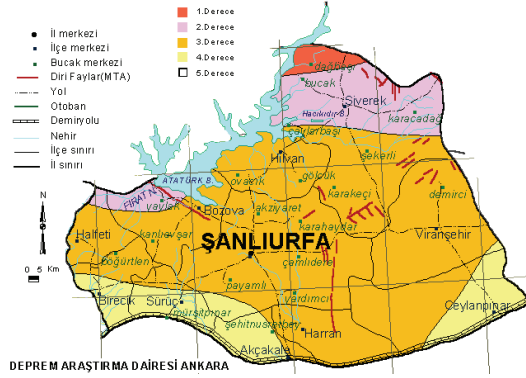
### Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımlar

SW-SP olarak sınıflandırılır ve çakıl, kum, silt ve kil ve düzgün taneli malzemelerden oluşur. Sondaj sonuçlarına göre alüvyonun kalınlığı en fazla 10 m'dir. Yamaç molozu CL-ML olarak sınıflandırılır ve ince taneli çakıl, kum ve siltli kilden oluşmaktadır. Sondaj sonuçlarına göre yamaç molozunun kalınlığı en fazla 2 m'dir (Şekil 2).

Çalışma alanında üç adet KB-GD doğrultulu fay gözlenmiştir (Şekil 2). Arap plakasının Anadolu plakasını itmesiyle oluşan bu kırıklar, 580 km uzunluğuyla Doğu Anadolu fay zonu Türkiye'nin en önemli tektonik özelliklerinden biridir. Faylar Suruç tünelinin 0.3 km, 2.1 km ve 16.2 km'sinde görülecektir (Şekil 2). Birinci ve üçüncü faylar normal fay, ikinci fay ise ters faydır.



Şekil 2. Tünel güzergahının boyuna jeolojik kesiti ve sondaj kuyularının yerleri



Şekil 3.

Bu bölge [6] tarafından hazırlanan Türkiye deprem haritasına göre kısmen 3. ve kısmen de 4. derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır (Şekil 3).

### 3. GEOTEKNİK İNCELEMELER

Suruç tüneli kireçtaşı, marn ve fay zonu olmak üzere üç ayrı birime ayrılmış ve her birimin geoteknik özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Geoteknik incelemeler ve kaya mekaniği çalışmaları süreksizlik ölçümleri, kinematik analizler, sondaj, geçirgenlik testleri ve laboratuvar testlerini ihtiva etmektedir.

#### 3.1. Süreksizlik ölçümleri, kinematik analizler

Süreksizliklerin aralığı, açıklığı, devamlılığı ve yönelimleri gibi özellikleri kaya kütesinin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu süreksizlik özellikleri [7] standartlarına uygun olarak yerinde tespit edilmiştir. Tünel güzergahında ölçülen 75 süreksizlik ölçümüyle 1 hakim (baskın) eklem seti tespit edilmiştir. Ayrıca, tünel girişleri, kazı kesitleri ve kaya tabakalarının doğrultu ve eğim açıları ölçülmüştür. Jeolojik birimlere ait içsel sürtünme açıları da girdi olarak kullanmak üzere kinematik analize dahil edilmiştir.

Hakim (dominant) eklem seti;  $D$  :  $N45^{\circ}W / 80^{\circ}NE$

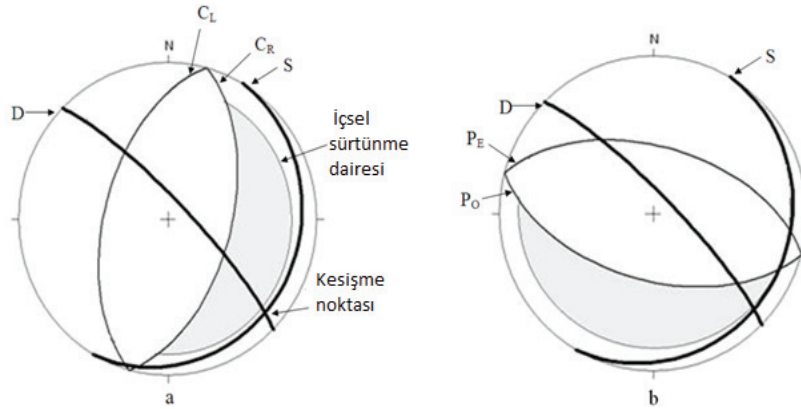
Tabakalaşma (stratification);  $S$  :  $N30^{\circ}E / 12^{\circ}SE$

Tünel giriş ( $P_E$ ) ve çıkış ( $P_O$ ) portalları;  $P_E$  :  $N75^{\circ}W / 55^{\circ}NE$  ,  $P_O$  :  $N75^{\circ}W / 55^{\circ}SW$

;  $C_L$  :  $N15^{\circ}E / 55^{\circ}NW$ ,  $C_R$  :  $N15^{\circ}E / 55^{\circ}SE$

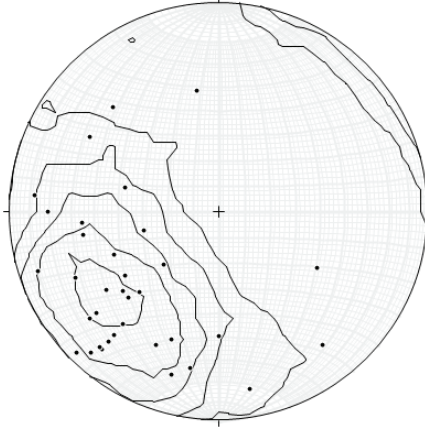
Kireçtaşı ( $\phi_L$ ) ve marn ( $\phi_M$ ) en düşük içsel sürtünme açıları;  $\phi_L$  :  $25^{\circ}$  ,  $\phi_M$  :  $15^{\circ}$

Bu ölçümler eşit alanlı stereografik çizime dayalı Dips 2.2 yazılımı [2] ile değerlendirilmiştir. Kazı şevlerinde, tünel giriş ve çıkışında herhangi bir düzlemsel ve kama tipi kayma riski tespit edilmemiştir (Şekil 3). Bu nedenle Kazı kesitleri sol ( $C_L$ ) ve sağ ( $C_R$ ) yamaçlar, daha detaylı şev duraylılık analizlerine gerek görülmemiştir.



Şekil 4. (a) Kazı kesitleri sol ( $C_L$ ) ve sağ ( $C_R$ ) yamaçlarda ve (b) tünel giriş ( $P_E$ ) ve çıkış ( $P_O$ ) portallarında kinematik analizler

Ölçülebilen 75 adet eklem ve tabakaların kutup dağılım şekli ve kontur diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur.



*Şekil 5. Ölçülebilen 75 adet eklem ve tabakaların kutup dağılım şekli ve kontur diyagramı*

### **3.2. Sondaj**

Tünel güzergahı boyunca litolojinin belirlenmesi, temel kayaç koşullarının daha iyi anlaşılması, yeraltı su seviyesinin (YASS) ölçülmesi ve geçirgenlik deneylerinin yapılması amacıyla toplam 530 m uzunluğunda 10 adet sondaj kuyusu DSİ tarafından açılmış (SK-1, SK-2, SK-3, ... SK-10) ve laboratuvar testleri için bu kuyulardan karot numune alınmıştır (Şekil 2). Ayrıca, her bir sondaj kuyusu için kaya kalite değeri (RQD, 10 cm veya daha fazla uzunluklarda sondaj karotu yüzdesi), toplam karot verimi (TKV, sondaj deliği karot verimi yüzdesi) ve jeolojik birimlerin Lugeon cinsinden geçirgenlik değerleri belirlenmiş ve Tablo 1'de özetlenmiştir.

### **3.3. Geçirgenlik testleri**

Sondajlar sırasında toplam 51 adet basınçlı su testi yapılmış ve bu birimlerin geçirgenlikleri Lugeon değerleri olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1'deki veriler incelendiğinde, düşük kaya kalitesi ile geçirgenliğin arttığı görülmektedir. Ancak, geçirgenlik ve derinlik arasında hiç bir bağıntı tespit edilememiştir. Lugeon sonuçlarına göre kireçtaşı geçirgen, marn ise geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır. Tünelin kireçtaşı içerisinde kazıldığı bölümlerde, su sızıntılarını önlemek için mutlaka enjeksiyon yapılmalıdır.

Tablo 1. Sondajlardan elde edilen geoteknik parametreler [1]

Sondaj no	Derinlik (m)	Birim	YASS (m)	RQD (%)			TKV (%)			Lugeon		
				min	mak	ort	min	mak	ort	min	mak	ort
SK-1	38	Kireçtaşı	-	0	95	30	60	100	85	1.2	3.4	2.0
SK-2	58	Kireçtaşı	-	0	85	29	30	100	70	2.4	7.8	4.7
SK-3	70	Kireçtaşı	32	15	85	50	60	100	87	2.3	2.8	2.5
SK-4	81	Kireçtaşı	38	0	85	55	35	100	85	2.1	3.6	2.6
SK-5	70	Kireçtaşı	32	0	90	22	15	100	71	4.6	8.3	6.1
SK-6	53	36 m kireçtaşı 17 m marn	23	0	43	9	30	65	48	-	-	-
				<b>10</b>	<b>90</b>	<b>33</b>	<b>45</b>	<b>95</b>	<b>70</b>	<b>0.1</b>	<b>0.7</b>	<b>0.3</b>
SK-7	43	26 m kireçtaşı 17 m marn	17	15	70	41	65	100	80	-	-	-
				<b>10</b>	<b>85</b>	<b>48</b>	<b>65</b>	<b>95</b>	<b>82</b>	<b>0.1</b>	<b>1.3</b>	<b>0.5</b>
SK-8	42	11 m kireçtaşı 31 m marn	16	0	0	0	15	50	33	-	-	-
				<b>0</b>	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>84</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.2</b>
SK-9	42	16 m kireçtaşı 26 m marn	16	10	30	16	33	75	59	-	-	-
				<b>50</b>	<b>85</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>97</b>	<b>0.13</b>	<b>0.52</b>	<b>0.31</b>
SK-10	31	10 m kireçtaşı 21 m marn	14	0	17	10	25	70	54	-	-	-
				<b>0</b>	<b>95</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>66</b>	<b>0.16</b>	<b>0.77</b>	<b>0.49</b>

### 3.4. Laboratuvar test sonuçları

Sondajlardan alınan 77 adet numune [7] standartlarına uygun olarak DSİ laboratuvarlarında test edilmiş, kaya numunelerine ait birim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Elastisite modülü ve Poisson oranı belirlenmiştir. Direk kesme kutusu deneyiyle kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Bu verilere sayısal analizlerde girdi parametreleri olarak da ihtiyaç vardır. Sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Laboratuvar test sonuçları [1]

Parametreler	Kireçtaşı			Marn		
	min	ort	mak	min	ort	mak
Kohezyon (MPa)	2.3	4.0	5.2	3.1	3.5	3.9
İçsel sürtünme açısı (°)	25.0	30.0	36.0	15.0	22.0	30.0
Birim ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	19.8	23.0	24.2	19.3	23.1	24.9
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	4.1	20.0	44.0	2.0	8.1	13.5
Elastisite modülü (GPa)	2.5	9.0	15.1	1.0	3.2	5.7
Poison oranı	0.15	0.20	0.25	0.24	0.30	0.38

#### 4. KAYA KÜTLESİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ

Kaya kütlelerinin doğru karakterize edilmesi tünel tasarımının, kazı yönteminin, destek türünün doğru seçilmesi açısından önemli bir jeolojik faktördür. Kaya kütleleri karakterize etme çalışmaları sondaj verileri de kullanılarak, mevcut yüzlelerde ve yamaçlardaki kaya yüzeylerinde yapılmıştır.

Günümüze kadar araştırmacılar tarafından birçok kaya kütle sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir [8]. Ancak, kireçtaşı ve marn birimlerini karakterize etme çalışmaları için en çok bilinen yöntemler olan, RQD [9], RMR [10], Q [11], RMİ [12] ve GSI [13] yöntemleri kullanılmıştır. Tercihen, modifiye edilmiş versiyonların RMR [14], Q [15] ve GSI [16-18], kullanımına özen gösterilmiştir. Sınıflandırma sistemleriyle elde edilmiş en yüksek (mak), en düşük (min) ve ortalama (ort) değerler tablolar halinde sunulmuştur.

RMR sisteminin girdileri UCS, RQD, süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu koşulları ve süreksizlik yönelimidir. RMR tahminlerin özeti Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. RMR çalışmasının girdileri ve sonuçları

Birim	UCS (MPa)	RQD (%)	Süreksizlik aralığı (mm)	Süreksizlik yüzeylerinin durumu	Su	Eklem uyum derecesi	RMR değerleri
Kireçtaşı	min	4.1	0	60	10-25 lt/dak	olumlu	<b>34</b>
	ort	20	40	200			<b>43</b>
	mak	44	95	2000			<b>69</b>
Marn	min	2	0	60	<10 lt/dak	olumlu	<b>37</b>
	ort	8.1	65	500			<b>49</b>
	mak	13.5	95	2000			<b>71</b>
Fay	1	0	10			Çok olumsuz	<b>15</b>

RMR sistemi gerilme parametrelerinden yoksun olduğundan, kaya kütlelerini karakterize etme çalışmaları Q sistemiyle de yapılmıştır. Q sisteminin girdileri RQD, çatlak seti sayısı (J<sub>n</sub>), çatlak pürüzlülük (J<sub>r</sub>), eklem değişiklikleri (J<sub>a</sub>), çatlak su indirgeme faktörü (J<sub>w</sub>) ve gerilme indirgeme faktörüdür (SRF).

Kaya kütlelerinin Q değerlerini hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$Q = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w / SRF) \quad (1)$$

[19] Q'nun gerilmeden serbest hali olan Q<sub>N</sub>'i aşağıdaki denklem ile ifade etmektedir. Q<sub>N</sub> hesaplamak için SRF'nin 1 olduğu varsayılır.



$$Q_N = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w) \quad (2)$$

[20] tünel kalite indeksini Q' olarak güncellemiş ve aşağıdaki denklemle bulmayı önermiştir. Q' hesaplamak amacıyla, Jw'nin 1 olduğu varsayılır. Böylece, Denklem 2 aşağıdaki hali alır.

$$Q' = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \quad (3)$$

Son olarak, [21] Q sistemi güncelleyerek Q<sub>C</sub> parametresini önermiştir. Aşağıdaki denklem yeni bir parametre ile mevcut mühendislik parametreleri arasındaki bağıntıların belirlenmesi amacıyla önerilmiştir.  $\sigma_{ci}$  bozulmamış kayanın UCS değeridir.

$$Q_C = Q \cdot (\sigma_{ci} / 100) \quad (4)$$

Q tahminlerinin özeti Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Q çalışmasının girdileri ve sonuçları

Birim	$\sigma_{ci}$ MPa	RQD %	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>w</sub>	SRF	Q	Q <sub>N</sub>	Q'	Q <sub>C</sub>
Kireçtaşı	min	-	-	-	-	-	-	<b>0.03</b>	-	-	-
	ort	20	40	6	3	2	0.66	<b>1.3</b>	6.6	9.8	0.26
	mak	-	-	-	-	-	-	<b>3.1</b>	-	-	-
Marn	min	-	-	-	-	-	-	<b>0.02</b>	-	-	-
	ort	8.1	65	6	3	6	1	<b>1.1</b>	5.4	5.5	0.09
	mak	-	-	-	-	-	-	<b>1.6</b>	-	-	-
Fay	1.0	15	6	0.5	8	0.33	10	<b>0.0052</b>	$\frac{0.0}{5}$	0.2	0.0005

Son olarak, kaya kütlelerinin karakterize edilmesi GSI sistemi tarafından yapılmıştır. R<sub>r</sub> (pürüzlülük derecesi), R<sub>w</sub> (bozunma derecesi), R<sub>f</sub> (dolgu derecesi), SCR (yüzey koşulları derecesi), S<sub>x</sub> (x yönünde süreksizlik sayısı), S<sub>y</sub> (y yönünde süreksizlik sayısı), S<sub>z</sub> (z yönünde süreksizlik sayısı), J<sub>v</sub> (hacimsel eklem sayısı) ve SR (yapısal derece) parametrelerinin seçimi için [17]'nin önerileri takip edilmiştir. Çünkü çalışma sahasında üç eksenli yüzler ile J<sub>v</sub> değerlerinin belirlenmesi için bazı uygun yüzlekler tespit edilmiştir.

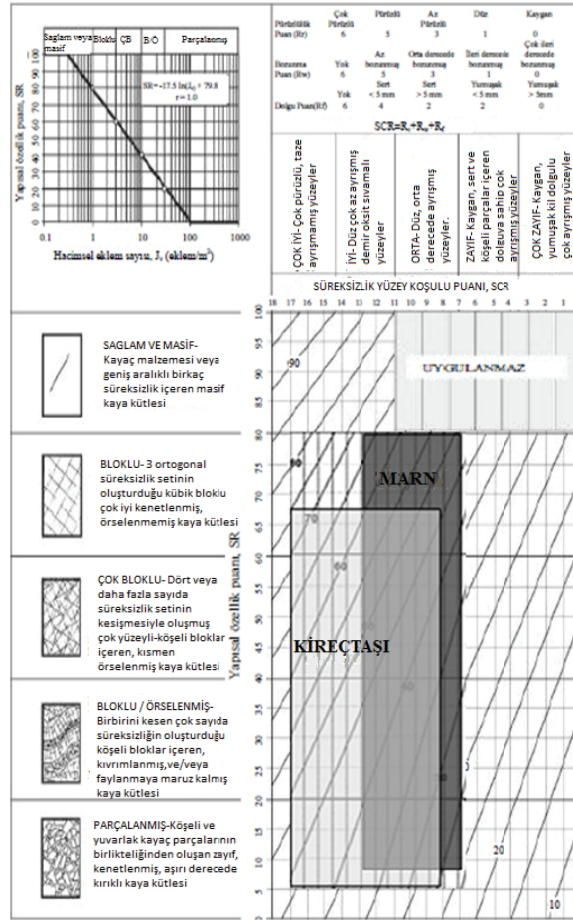
Ayrıca, [18] tarafından yakın zamanda güncellenmiş GSI grafiği, GSI değerlerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. GSI tahminlerinin bir özeti Tablo 5'de sunulmuştur.

Farklı birimler için GSI değerlerinin aralıkları [18] tarafından önerilen GSI grafiğine işlenmiş ve Şekil 4'de sunulmuştur. Kireçtaşı ve marn için GSI'nin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri birbirine oldukça yakındır. Bütün birimler için kesişen GSI değerleri tarandığında, 25-62 arasında değişen tüm GSI değerlerinin bütün tünel güzergahını temsil edebileceği yorumu yapılmıştır.

Tablo 5. GSI çalışması girdileri ve sonuçları

Birim		Rr	Rw	Rf	SCR	Sx, Sy, Sz * (cm)	Jv	SR	GSI
Kireçtaşı	min	1	3	2	6	2, 20, 25	1000	5	23
	ort	3	5	4	12	15, 40, 100	17	18	42
	mak	5	6	6	17	50, 60, 200	2	66	74
Marn	min	1	2	2	5	2, 20, 35	715	8	22
	ort	1	3	2	6	15, 50, 150	9	52	39
	mak	3	5	4	12	100, 100, 200	1	80	68
Fay		1	1	2	4	2, 5, 10	10000	0	16

\* süreksizlik aralığı in x, y, z eksenleri



Şekil 6. GSI değerleri ve aralıkları (Sonmez ve Ulusay, 2002)

## 5. KAYA KÜTLESİ PARAMETRELERİ

Suruç tünel güzergahındaki kaya kütlelerinin dayanım özellikleri RMR, Q, GSI ve UCS değerlerini kullanan Hoek-Brown'un ampirik yenilme kriteri [20] ile belirlenmiştir. Ayrıca, geomekanik kalite göstergeleri olan RMR, Q ve GSI değerleri kullanılarak, kireçtaşı ve marn birimlerine ait deformasyon modülleri dolaylı olarak belirlenmiştir.

### 5.1. Hoek-Brown kaya kütleli sabitleri

$m_i$ ,  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  kaya kütleli sabitleri, [20] tarafından önerilen ve aşağıda verilen formüller kullanılarak tespit edilmiştir. Sağlam kaya sabiti  $m_i$  [20] önerilerine göre kireçtaşı için 10 ve marn için 8 seçilmiştir.  $D$  kaya kütleli kazısının örselenme faktörü olarak ifade edilmektedir. Tam kesit TBM kazı sırasında çok az örselenmeye neden olduğundan  $D$  bu çalışmada sıfır olarak kabul edilmiştir.

$$m_b / m_i = \exp [(GSI - 100) / (28 - 14.D)] \quad (5)$$

Eğer,  $GSI < 25$

$$s = 0 \quad (6)$$

$$a = 0.65 - (GSI / 200) \quad (7)$$

Eğer,  $GSI > 25$

$$s = \exp [(GSI - 100) / 9] \quad (8)$$

$$a = 0.5 \quad (9)$$

[22] tünelde  $m_b$  ve  $s$  sabitlerini hesaplamak için 10 numaralı denklemi önermiştir.

$$m_b / m_i = 0.135 \cdot (Q_N)^{1/3} \quad (10)$$

$$s = 0.002 \cdot Q_N \quad (11)$$

[23]'de  $m_b$  ve  $s$  sabitlerini hesaplamak için aşağıdaki denklemleri önermiştir. [24]'ün açıkladığı kaya kütleli eklemlenme parametresi ( $J_p$ ) kireçtaşı için 0,2 ve marn için ise 0.3 olarak girilmiştir.

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.64} \quad (\text{örselenmiş kayalar için}) \quad (12)$$

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.875} \quad (\text{örselenmemiş kayalar için}) \quad (13)$$

$$s = (J_p)^2 \quad (14)$$

Hesaplanan kaya kütleli sabitleri olan  $m_b$ ,  $m_i$ ,  $a$  ve  $s$  değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Tünel güzergahı boyunca hesaplanan kaya kütlesi parametreleri

Parametre	Denklemler No	Kireçtaşı			Marn		
		min	ort	mak	min	ort	mak
$m_i$		10	10	10	8	8	8
$m_b$	5	0.64	1.26	3.95	0.49	0.91	2.55
	10	-	2.38	-	-	2.18	-
	12	-	3.56	-	-	3.70	-
Ortalama			<b>2.40</b>			<b>2.26</b>	
S	8	-	0.0016	0.056	-	0.0011	0.029
	6	0	-	-	0	-	-
	11	-	0.013	-	-	0.011	-
	14	-	0.04	-	-	0.09	-
Ortalama			<b>0.018</b>			<b>0.034</b>	
A	9	-	0.5	0.5	-	0.5	0.5
	7	0.53	-	-	0.54	-	-
Ortalama			<b>0.5</b>			<b>0.5</b>	
$\sigma_c$ (küttele) (MPa)	16	-	0.97	-	-	2.25	-
	17	0.26	1.86	12.09	0.14	0.97	4.03
	18	0.82	4.0	8.8	0.6	2.43	4.05
	20 (denklemler 11, 8'den s)	0	0.81	10.4	0	0.27	2.29
	20 (denk.11'den s)	-	2.28	-	-	0.85	-
	22	-	17.57	-	-	16.69	-
	23	10.78	19.39	63.27	13.32	26.89	67.96
	24	0.15	1.15	9.33	0.08	0.63	3.17
	25	3.84	6.59	31.40	4.61	9.45	35.40
	26	0.32	2.23	11.9	0.18	1.12	3.91
	27	-	6.68	-	-	3.61	-
	28	-	7.34	-	-	5.17	-
	Ortalama			<b>5.07</b>			<b>4.32</b>
$E_{(küttele)}$ (GPa)	29	-	-	38	-	-	42
	30	3.98	6.68	-	4.73	9.44	-
	31	2.32	8.01	10.29	0.91	2.73	3.74
	33	1.68	2.91	14.03	2.01	4.18	15.84
	34	-	2.84	-	-	1.03	-
	35	1.67	6.43	12.75	0.68	2.38	4.87
	36	2.56	5.88	31.35	3.45	9.33	34.69
	37	0.42	2.82	26.41	0.28	1.51	10.36
	38	3.93	7.95	32.85	5.06	11.76	35.79
	40	-	6.38	-	-	4.48	-
	41	0.13	1.64	12.09	0.05	0.48	3.96
Ortalama			<b>5.15</b>			<b>4.73</b>	

## 5.2. Kaya kütleline ait dayanımı

[25] kaya kütle dayanımını hesaplamak için bir denklem önermiştir ve bu denklemdeki  $\sigma_{ci}$  bozulmamış kayanın MPa cinsinden UCS değeridir.

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[7.65 \cdot (RMR - 100) / 18.75] \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

[26]  $\sigma_{c(kütle)}$ 'yi hesaplamak için bir denklem önermiştir. Burada B metre cinsinden tünel genişliği,  $\gamma$  ise  $t/m^3$  cinsinden kaya kütleline birim hacim ağırlığıdır.

$$\sigma_{c(kütle)} = [5.5 \cdot \gamma \cdot (Q_N)^{1/3}] / [\sigma_{ci} \cdot (B)^{0.1}] \quad (\text{MPa}) \quad (16)$$

[27] kayaçların  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[(RMR - 100) / 24] \quad (\text{MPa}) \quad (17)$$

[12] kayaçların  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot J_p \quad (\text{MPa}) \quad (18)$$

[20] aşağıdaki gibi genelleştirilmiş ampirik yenilme kriteri önermiştir;

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot [m_b \cdot (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s]^a \quad (\text{MPa}) \quad (19)$$

Burada  $\sigma'_1$  etkili en büyük asal gerilme,  $\sigma'_3$  ise etkili en küçük asal gerilmedir. Kaya kütleline UCS'sini belirlerken,  $\sigma'_3$  0 olarak kabul edilir ve  $\sigma_{ci}$  ise laboratuvar testlerden elde edilir. Böylece, Denklem 12 Denklem 13 haline dönüştürülerek  $\sigma'_1$  hesaplanır. Bu değer  $\sigma_{c(kütle)}$  adını alarak aynı zamanda kaya kütleline UCS'si haline gelir.

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (\text{MPa}) \quad (20)$$

[28]  $Q > 10$  olan sert kayaçlar için  $\sigma_{c(kütle)}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = (\sigma_{ci}/100) \cdot 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (21)$$

[22]  $Q < 10$  ve  $\sigma_{ci} > 2$  olan kayaçlar için Denklem 21'i aşağıdaki gibi değiştirilmiştir.

$$\sigma_{c(kütle)} = 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (22)$$

[29] kayaçların  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 0,0016 \cdot (RMR)^{2.5} \quad (\text{MPa}) \quad (23)$$

[30] kayaçların  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[(RMR - 100) / 20] \quad \text{(MPa)} \quad (24)$$

[31] kaya kütlelerinin RMR değerlerini kullanarak  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 0.5 \cdot \exp(0.06 \cdot RMR) \quad \text{(MPa)} \quad (25)$$

[32] kayaların  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot [RMR / (RMR + 6 \cdot (100 - RMR))] \quad \text{(MPa)} \quad (26)$$

[33] kaya kütlelerinin Q değerlerini kullanarak  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 5 \cdot \gamma \cdot [Q \cdot (\sigma_{ci}/100)]^{1/2} \quad \text{(MPa)} \quad (27)$$

[21] kaya kütlelerinin  $Q_C$  değerlerini kullanarak  $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 5 \cdot \gamma \cdot (Q_C)^{1/3} \quad \text{(MPa)} \quad (28)$$

Hesaplanan  $\sigma_{c(kütle)}$  değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

### **5.3. Kaya kütlelerinin deformasyon modülü**

Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü olan  $E_{kütle}$ 'yi RMR, Q, GSI ve UCS değerleri kullanarak dolaylı olarak tahmin edebilecek bazı önermeler literatürde bulunmaktadır.

[34]  $RMR > 50$  olan kaya kütlelerinin RMR değerleri kullanılarak  $E_{(kütle)}$  hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(kütle)} = 2 \cdot RMR - 100 \quad \text{(GPa)} \quad (29)$$

[35]  $RMR \leq 50$  olan kaya kütlelerinin RMR değerlerini kullanılarak  $E_{(kütle)}$  değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(kütle)} = 10^{(RMR - 10) / 40} \quad \text{(GPa)} \quad (30)$$

[36] kaya kütlelerinin  $E_i$  ve RF değerlerini kullanılarak  $E_{(kütle)}$  değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(kütle)} = E_i \cdot RF \quad \text{(GPa)} \quad (31)$$

$E_i$  bozulmamış kaya elastik modülü ve RF ise [36] tarafından ifade edilen yüzde olarak azalma faktörüdür;

$$RF = 0.0028 \cdot RMR^2 + 0.9 \cdot \exp(RMR / 22.82) \quad (32)$$

[37] zayıf kayaçlardaki 50 m'den derin tüneller için  $E_{(k\ddot{u}tle)}$  değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 0.3 \cdot H^\alpha \cdot 10^{(RMR-20)/38} \quad (GPa) \quad (33)$$

Burada H t\ddot{u}nel derinliğidir,  $\alpha$  ise \u00e7ok zayıf kayalar i\u00e7in 0,30 - \u00e7ok sert kayalar i\u00e7in 0.16 arasında değişen bir fakt\u00f6rd\u00fcr. Bu \u00e7alışmada, H 80 m,  $\alpha$  ise 0.2 olarak se\u00e7ilmiştir.

[15]  $Q>1$  olan kaya k\ddot{u}tlesinin  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 25 \cdot \log Q \quad (GPa) \quad (34)$$

[38] kaya\u00e7ların  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = E_i \cdot 0.5 \cdot [1 - \cos \pi (RMR / 100)] \quad (GPa) \quad (35)$$

[29] kaya\u00e7ların  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki gibi bir denklem önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 0.0097 \cdot (RMR)^{3.54} \quad (MPa) \quad (36)$$

[39]  $\sigma_{ci}<100$  MPa olan zayıf kaya\u00e7ların GSI değerini kullanarak  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = (\sigma_{ci} / 100)^{0.5} \cdot 10^{(GSI - 10) / 40} \quad (GPa) \quad (37)$$

[40] kaya\u00e7ların RMR değerini kullanarak  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 0.1 \cdot (RMR / 10)^3 \quad (GPa) \quad (38)$$

[12]  $RMI>0.1$  olan kaya\u00e7ların  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 5.6 \cdot (RMI)^{0.375} \quad (GPa) \quad (39)$$

[21] kaya k\ddot{u}tlelerinin  $Q_c$  değerini kullanarak  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'yi hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = 10 \cdot (Q_c)^{1/3} \quad (GPa) \quad (40)$$

Son olarak [41] kaya\u00e7ların  $E_i$  ve  $D$  değerini kullanarak  $E_{(k\ddot{u}tle)}$ 'sini hesaplamak i\u00e7in aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(k\ddot{u}tle)} = E_i \cdot \{0.02 + [1 - (D/2)]/[1 + \exp ((60 + 15 \cdot D - GSI) / 11)]\} \quad (GPa) \quad (41)$$

Tünel güzergâhından elde edilen kaya kütlesi sabitleri  $m_i$ ,  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$ , kaya kütlesi dayanımı  $\sigma_c$  (kütle) ve kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü  $E_{(kütle)}$  değerleri Tablo 6'da topluca sunulmuştur.

## 6. TAHKİMAT BASINCININ BELİRLENMESİ VE TAHKİMAT TASARIMI

Bu çalışmada tahkimat basınçlarının ( $P_i$ ) tahmininde Q ve RMR kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Ancak, kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri her ne kadar destek basıncı ve destek ihtiyaçlarının belirlenmesinde başarılı olsa da, tüneli çevreleyen kaya kütlesiyle destekler arasındaki etkileşimleri yok sayarlar. Bu zaafı ortadan kaldırmak ve emniyetli tünel destek tasarımı yapabilmek amacıyla, aynı hesaplamalar analitik ve sayısal yöntemler de tekrarlanarak, ampirik yöntemlerle elde edilen sonuçlar kontrol edilmiştir.

### 6.1. Tahkimat basıncının tahmini

[11] kaya kütlelerinin Q değerleri kullanarak destek basıncını ( $P_i$ ) hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = 0.2 \cdot Q^{-1/3} / J_r \quad (\text{MPa}) \quad (42)$$

[42] kaya kütlelerinin RMR,  $\gamma$  ve B değerlerini kullanarak  $P_i$  hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = [(100 - \text{RMR}) / 100] \cdot \gamma \cdot B \quad (\text{MPa}) \quad (43)$$

[19] 50 m 'den derin tüneldeki kaya kütlelerinin RMR, B ve H değerlerini kullanarak  $P_i$  hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = (7.5 \cdot B^{0.1} \cdot H^{0.5} - \text{RMR}) / 20 \cdot \text{RMR} \quad (\text{MPa}) \quad (44)$$

Tünel güzergahındaki kireçtaşı ve marn jeolojik birimlerinin destek basınç miktarları hesaplanmış ve Tablo 7'de sunulmuştur.

*Tablo 7. Suruç tüneli için destek basıncı hesapları (MPa)*

Denklem no	Kireçtaşı	Marn	Fay zonu
42	0.06	0.07	2.31
44	0.05	0.09	0.22

### 6.2. Ampirik Yöntemler

Ampirik yöntemler olan RMR ve Q sistemleri kullanılarak tünel için gerekli destek sistemleri seçilmiştir. Kireçtaşı ve marn için ortalama RMR değerleri sırasıyla, 43 ve 49'dur. Her iki birimde III sınıf kaya kütlesi sınıfındadır. III. sınıf kaya kütlesi için RMR



sistemi 4 m uzunluğunda sistematik kaya saplaması, duvarlarda ve taç kısmında 1,5-2 m aralıklı tel hasır, tavanda 50-100 mm duvarda ise 30mm kalınlığında püskürtme beton önermektedir.

[11] tarafından önerilen eşdeğer boyut ( $D_e$ ) kazı destek oranı (KDO) ve kazı açıklığı parametreleriyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$D_e = \text{Kazı açıklığı, çap veya yükseklik ( m )} / \text{Kazı Destek oranı, KDO} \quad (45)$$

Suruç tünelinin kazı açıklığı 7 m ve KDO 1,6 olarak kabul edilmiş,  $D_e$  4.37 olarak hesaplanmıştır.

[11] ve [15]  $D_e$  ve Q değerlerine göre bazı destek grafikleri önermektedir. Bunlarda kireçtaşı birimi için  $D_e$  değeri 4.37 ve Q değeri de 1.3 olduğundan, 1.8 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonunun ve 4.5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonu önerilmiştir. Marn için  $D_e$  değeri 4.37 ve Q değeri de 1.1 olduğundan, 1.7 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonları ve 5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonu önerilmiştir.

### 6.3. Çözümlemeli yöntem

Destek ihtiyacı çözümlemeli olarak convergence-confinement yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntem ilk olarak [43] tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde zeminin ve uygulanacak desteğin deformasyon özelliklerine ihtiyacı vardır. Böylece, destek üzerine tahmini yükler uygulanabilmektedir. Convergence-confinement yöntemi Hoek-Brown yenilme kriterini karşılayan kaya kütleleri için uygun olup, ilk olarak [44-47] tarafından uygulanmıştır.

Tünel yarıçapı R, yarıçapa bağlı düzgün gerilme alanı  $S_0$  ve tünel iç basıncı  $p_i$  olarak kabul edilirse, kritik destek basıncı  $p_i^{cr}$  aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$p_i^{cr} = [P_i^{cr} - (s / m_b^2)] \cdot m_b \cdot \sigma_{ci} \quad (\text{MPa}) \quad (46)$$

Burada  $P_i^{cr}$  aşağıdaki formül ile elde edilebilen ölçekli kritik basınçtır.

$$P_i^{cr} = 0.0625 \cdot [1 - (1 + 16 \cdot S_0)^{0.5}]^2 \quad (\text{MPa}) \quad (47)$$

$S_0$  aşağıdaki formül ile verilen ölçekli gerilme alanıdır.

$$S_0 = (\sigma_0 / m_b \cdot \sigma_{ci}) + (s / m_b^2) \quad (\text{MPa}) \quad (48)$$

Eğer  $p_i > p_i^{cr}$  ise yenilme beklenmez. Bu durumda, kaya kütlelerinin çevresi elastik davranış gösterir. Aşağıdaki denklem ise, tünel duvarlarındaki içe doğru elastik yer değiştirmeyi verir. Kaya kütlelerinin kayma modülüne  $G_{rm}$  denir.

$$u_r^{el} = R \cdot (\sigma_0 - p_i) / (2 \cdot G_{rm}) \quad (\text{mm}) \quad (49)$$

Eğer  $p_i < p_i^{cr}$  den düşük ise yenilme beklenir. Kırık bölgenin yarıçapı  $R_{p1}$  aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$R_{pl} = R \cdot \exp[2 \cdot (P_i^{cr} - P_i)^{0.5}] \quad (m) \quad (50)$$

[13] bazı durumlarda plastik hacmin değişmediğini varsaymanın daha uygun olabileceğini belirtmiştir. Bu durumda, toplam içe doğru plastik deformasyon aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$u_r^{pl} = [(\sigma_0 - p_i^{cr}) / (2 \cdot R \cdot G_{rm})] \cdot \{[(1 - 2 \cdot \nu) / 2] \cdot [(P_i^{cr})^{0.5} / (S_0 - P_i^{cr})] + 1\} \cdot (R_{pl} / R) + \{(1 - 2 \cdot \nu) / [4 \cdot (S_0 - P_i^{cr})]\} \cdot [\ln(R_{pl} / R)]^2 - [(1 - 2 \cdot \nu) / 2] \cdot [(P_i^{cr})^{0.5} / (S_0 - P_i^{cr})] \cdot [2 \cdot \ln(R_{pl} / R) + 1] \quad (mm) \quad (51)$$

Burada  $\nu$  Poisson oranıdır. Bu çalışmada parametrelerin hesaplanması için [45]'in önerileri izlenmiştir. Suruç tünel için R ve  $\sigma_0$  değerleri kireçtaşı ve marn benzerdir ve bunlar sırasıyla 7 m ve 1.84 MPa olarak alınmıştır. İç destek basıncı  $p_i$ , tünelin desteklenmeyen kısımları için sıfır kabul edilmiştir. Kritik destek basıncı, desteklenmeyen tünel için en fazla deformasyonlar, plastik bölgelerin yarıçapı ve gerilme değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Kritik destek basıncı, plastik bölge, en fazla deformasyon ve yüzdeleri

Birim	Kritik destek basıncı $p_{cr}$ , MPa	Plastik zon bölgesi $R_{pl}$ , m	En fazla deformasyon $u_{max}$ , mm	Deformasyon, %
Kireçtaşı	0.023	4.7	18.7	0.27
Marn	0.009	4.0	16.4	0.24

[48] gerilmeler, geoteknik sorunlar ve destek türleri arasındaki bazı ilişkileri için Tablo 9'u önermiştir.

Tablo 8 ve 9'dan görüldüğü gibi, kireçtaşı ve marn birimlerinin her ikisinin de gerilme değerleri %1'den azdır. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri tarafından tavsiye edilen destek sistemleri Tablo 10'da sunulmaktadır.

Tablo 9. Deformasyon geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki [48]

Deformasyon $\epsilon$ , %	Geoteknik problemler		Destek tipi	
	A < 1	Çok basit tünel destekleri. Bazı duraylılık sorunları olabilir. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tasarım için uygun bir dayanak oluşturur.	Çok iyi tünel koşulları, az yoğunlukta tavan saplamaları ve püskürtme beton.	

Tablo 9. Deformasyon geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki [48] (devam)

Deformasyon $\epsilon$ %	Geoteknik problemler	Destek tipi
B	1 - 2.5 Convergence-confinement yöntemi bölgenin aşamalı gelişiminin, farklı destek türleri arasındaki etkileşimin ve tüneldeki kaya kütlelerini çevreleyen plastik zonun oluşumunu öngörmek için kullanılır.	Tavan saplamaları ve püskürtme beton kaplama. Bazı durumlarda çelik bağlar gerekebilir.
C	2.5 - 5 Sıkışmanın düzeyi daha belirgindir. Genellikle kazı 'alın duraylılığı' önemli bir sorun oluşturmaz.	İksanın hızlı bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Püskürtme beton kaplaması içinde ağır profilli çelik desteklerin yerleştirilmesi gerebilir.
D	5 - 10 Tünel tasarımında iki boyutlu sonlu analizler kullanılır. Alın duraylılık problemleri yoğunlaşmaktadır.	Çok ciddi sıkışma ve alın duraylılık sorunları olmaktadır. Hızlı bir şekilde püskürtme beton ile birlikte çelik destek yerleştirilmesi gerekmektedir.
E	> 10 Şiddetli alın duraylılık sorunuyla beraber sıkışma olmaktadır.	Aşırı sıkışma nedeniyle tavanda süren ve alında güçlendirme gerekmektedir. Sıkışmanın denetimi açısından püskürtme beton kaplaması içinde esnek çelik bağ kullanımını tercih edilebilir.

Tablo 10. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tarafından önerilen Suruç tünelinin destek sistemi

Yöntem	Birim	Kireçtaşı	Marn	Fay
Q	Q	1.3	1.1	0.0052
	Span/ESR	4.37	4.37	4.37
	Destek	2m uzunluğunda sistematik bulon, 1.8 m aralıklı, 4.5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	2m uzunluğunda sistematik bulon, 1.7 m aralıklı, 5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	2m uzunluğunda sistematik bulon, 0.8 m aralıklı, 20 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton

*Tablo 10. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tarafından önerilen Suruç tünelinin destek sistemi (devam)*

Yöntem	Birim	Kireçtaşı	Marn	Fay
RMR	RMR	43	49	15
	Destek	4m uzunluğunda sistematik bulon, taç kısmında tel kafes ile duvar ve taç kısımlarında 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarlarda 3 cm	4m uzunluğunda sistematik bulon, taç kısmında tel kafes ile 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarlarda 3 cm	5-6 m uzunluğunda sistematik bulon, tel kafes ile duvar ve taç kısmında 1-1.5 m aralıklı. invert saplaması. püskürtme beton taç kısmında 15-20 cm, kenarda 15 cm, ve yüzeyde 5 cm. ortalama ağırlıktaki nervür mesafesi 0.75 m çelik kaplama ve destek kesit kapatılmalı gereklidir.

#### **6.4. Sayısal yöntem**

Gerilmeleri, deformasyonları ve destek basınçlarını modellemek amacıyla Plaxis 8.2 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım iki-boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapabilmektedir [3]. Sonlu elemanlar analizine kaya kütlesi davranışlarını daha iyi yansıtabilmek amacıyla Hoek-Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Hoek-Brown yenilme kriteriyle uyumlu olabilmek için, lineer-elastik malzeme modeli seçilmiştir. Lineer-elastik malzeme modeline uyumlu olduğu için [3], malzeme tipi olarak gözeneksiz davranış seçilmiştir. Girdi parametreleri birim ağırlık, Young modülü, Poisson oranı ve içsel sürtünme açısıdır.

Modelin dış sınırı tünel çapının 2 katı olarak tasarlanmıştır. Tünel çapı 7 m olarak girilmiştir. Kireçtaşı ve marn için yüzeyin altında tünel kazı derinliği sırasıyla 80 m ve 50 m olarak varsayılmıştır. Kaya kütlesinin giriş parametreleri için Bölüm 4'te verilen değerler seçilmiştir. Emniyetli tarafta kalabilmek için mekanik parametrelerin artık değerlerinin pik değerlerin yarısı kadar oldukları varsayılmıştır. Düşey gerilmelerin örtü kalınlığının bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Yeraltı suyu yüzeyden 20 m derinde olarak girilmiştir. Böylece, Plaxis 8.2 yazılımı analizlerine göre yerinde düşey gerilmeler 1.1 MPa, yatay gerilmeler 1.6 MPa hidrostatik basınç ise 0.68 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar [29]'un önerileriyle uyumlu bulunmuştur.

Analiz üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci analizde desteksiz kazı koşulları, ikinci analizde Q sistemiyle destekli ve üçüncü analizde ise tam kesit TBM kazı sistemiyle beton kaplama destek sistemleri incelenmiştir. RMR sisteminde gerilme, eklem pürüzlülüğü ve eklem dolgusu gibi parametreler dikkate alınmadığı için, Q sistemi destek önerilerinin incelenmesi uygun görülmüştür. Otomatik ağ oluşturma seçeneği kullanılmış olup, tünel

çevresi daha sık ağlarla modellenmiştir. Daha sonra tünel çevresinde oluşan gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Kireçtaşı ve marn birimleri için hesaplanan gerilmeler, deformasyonlar ve plastik noktalar Şekil 7 ve Şekil 8’de sunulmuştur.

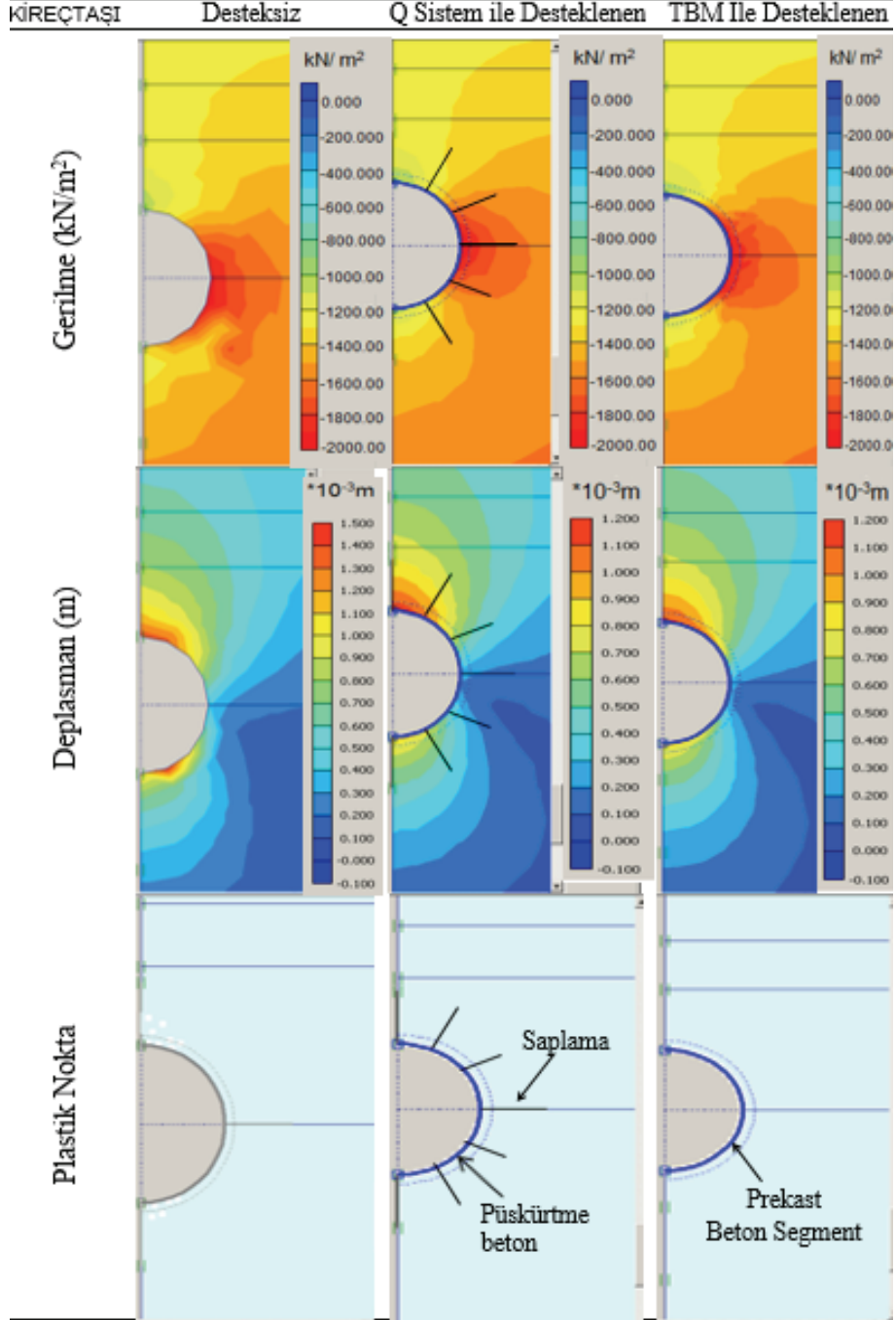
Desteklenmiş ve desteklenmemiş durumlar için plastik bölgenin ölçütü, tünelin deformasyonları ve gerilmeleri incelemiştir. Tablo 11’de görüldüğü gibi deformasyonlar çok küçük olmasına rağmen (1.47 mm), kireçtaşı ve marn birimlerinden geçen fay zonları ve tünelin desteklenmeyen kısımlarında bazı duraysızlıklar olacağı anlamına gelmektedir.

Deformasyonlar ve plastik bölgenin büyüklüğü TBM sistemindeki beton destek kaplamaları ve Q sisteminin destek elemanları tarafından en aza indirgenmiştir. Bunlar önerilen desteklerin yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8’den görüldüğü gibi, kaya saplamaları aşırı gerilme altındaki zonu aşmaktadır. Ancak, fay zonlarında daha fazla destek elemanları gerekebilir. Fay zonunun bulunduğu yerde FEM için gerekli laboratuvar testleri gerçekleştirilemediğinden, fay zonları için sayısal analizler yapılamamıştır.

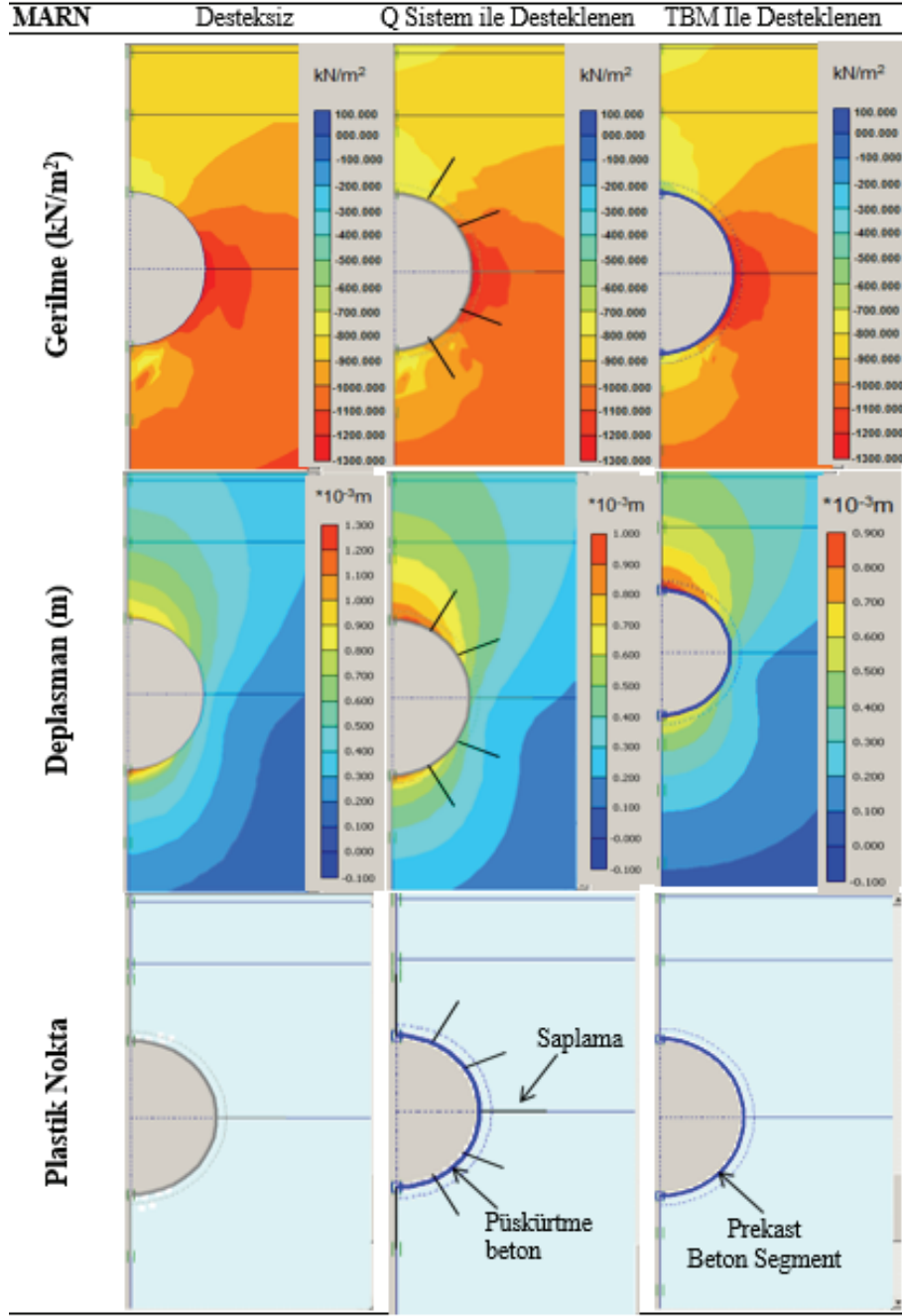
Analitik yöntemde belirlenen kalıcı deformasyona uğramış plastik bölgenin yarıçapı sayısal analizlerle belirlenenlerden daha büyüktür. Ancak, bazı sonlu elemanlar programlarının çok küçük gerilmelerde ve sayısal modelde sonlu ayrışmaların yol açtığı küçük farklılaşmalara uygun olmayabilecekleri unutulmamalıdır. Bu yüzden [47]’nin belirttiği gibi, yenilmenin büyüklüğünden ziyade, plastik zonun yayılımının tespit edilmesi bu analizler açısından daha anlamlıdır.

Tablo 11. Plastik zonun yarıçapı, en büyük deformasyonlar ve destek basınçları

		Kireçtaşı	Marn
Plastik zonun yarıçapı, $R_{pl}$ , m	Desteksiz	4.6	4.1
	Q sistemi ile destekleme	3.6	3.6
	TBM kaplaması ile destekleme	3.6	3.6
En büyük deformasyon, $u_{kütle}$ , mm	Desteksiz	1.47	1.22
	Q sistemi ile destekleme	1.18	0.99
	TBM kaplaması ile destekleme	1.15	0.90
Destek basıncı, MPa		1.95	1.25



Şekil 7. Kireçtaşı bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik noktalar



Şekil 8. Marn bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik noktalar

## 7. YORUM VE ÖNERİLER

Ülkemizde her ne kadar karayolu tünelleriyle ilgili araştırmalar daha yaygın olsada [49], bu çalışmada Türkiye'nin birinci dünyanın beşinci en uzun sulama tüneli olan Suruç tüneline ait geoteknik araştırmalar, kaya kütlesi karakterizasyonu ve tahkimat tasarımları irdelenmiştir. Tünel kireçtaşı ve marn birimleri içerisinde kazılmaktadır. Kaya kütlelerinin karakterizasyonu RMR, Q ve GSI sistemleriyle, mekanik özellikleri ise laboratuvar testleriyle tespit edilmiştir. Süreksizliklerin niceliksel açıklamaları, doğrultuları ve eğimleri yerinde ölçümlerle tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, kireçtaşı, marn ve fay zonu için bazı duraysızlık sorunları beklenmektedir. Çözümlemeli ve sayısal yöntemlerle, deformasyonlar ve tünelin desteksiz bölgelerindeki plastik alanlar belirlenmiştir. Ampirik yöntemle göre, destek sistemleri olarak kaya saplaması ve püskürtme beton önerilmiştir. Ayrıca, Suruç tüneli tam kesit TBM ile kazılmakta olduğu için prekast beton kaplama da incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, önerilen destek sistemleri sayesinde deformasyonlar ve plastik bölge sınırları azaltılmıştır. Deformasyonlardaki en fazla azalma beton kaplama destek sistemi ile elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, bu çalışmada uygulanan ampirik, çözümlemeli ve sayısal analizler uyumlu sonuçlar vermiştir. Bundan dolayı, bu analizlerin tünel destek tasarımı projelerinde birlikte kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmanın en büyük noksanlığı, belirlenen deformasyonların tünelde yapılacak gerçek deformasyon ölçümleriyle teyit edilememesidir. Gerek kazı işleminin tam kesitli TBM ile yapılması gerekse de şantiye çalışmalarını aksatmamak adına gerçek deformasyon ölçümleri yapmak üzere tünelin çeşitli bölgelerinde teçhizatlandırma işlemi için çalışma izni alınamamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, ön tahminde bulunulmuş tünel deformasyon değerlerinin ve önerilen destek sistemlerinin doğruluğunun teyidi için, kazı çalışmaları sırasında ve sonrasında yerinde deformasyon ölçümlerinin yapılması önerilir.

### Semboller

a	Kaya kütlelerinin yüzey pürüzlülük katsayısı
ASTM	American Society for Testing and Materials
CL	Düşük plastisiteli kil
C <sub>L</sub>	Sol kazı kesiti
C <sub>R</sub>	Sağ kazı kesiti
ML	Silt
D	Hakim eklem seti
D	Kazı metoduna bağlı olarak kaya kütlesi örselenme katsayısı
D <sub>e</sub>	Eşdeğer boyut
DSİ	Devlet Su İşleri
E <sub>(Kütle)</sub>	Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü
E <sub>i</sub>	Kaya numunesinin elastik modülü



$\varepsilon$	Deformasyon (mm)
GAP	Güneydoğu Anadolu Projesi
GD	Güneydoğu
GSI	Geological strength index (jeolojik dayanım indeksi)
$G_{rm}$	Kaya kütlelerinin kayma modülü
H	Örtü kalınlığı
ha	Hektar
$J_p$	Kaya kütlelerinin ekleme parametresi
$J_n$	Çatlak seti sayısı
$J_a$	Eklem değişiklikleri
$J_r$	Çatlak pürüzlülük
$J_v$	Hacimsel eklem sayısı
$J_w$	Çatlak su indirgeme faktörü
KB	Kuzeybatı
KDO	Kazı destek oranı
km	Kilometre
$km^2$	Kilometrekare
m	Metre
$m^2$	Metrekare
$m^3$	Metreküp
mak	Maksimum
min	Minimum
$m_i$	Sağlam kayacın petrografik katsayısı
$m_b$	$m_i$ katsayısının indirgenmiş hali
mm	Milimetre
ort	Ortalama
$p_i^{cr}$	Kritik destek basıncı
$P_i^{cr}$	Ölçekli kritik destek basıncı
$P_i$	Destek basıncını
$P_E$	Tünel girişi
$P_O$	Tünel çıkışı
Q	Barton kaya kütle sınıflama sistemi
RMR	Rock mass rating (kaya kütle puanı)
RMI	Rock mass index (kaya kütle indeksi)
RQD	Rock quality designation (kaya kalite göstergesi)

*Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımlar*

Rr	Pürüzlülük derecesi
Rw	Bozunma derecesi
Rf	Dolgu derecesi
R <sub>pl</sub>	Kırık bölgenin yarıçapı
S	Tabakalaşma
s	Taneler arası tutunma derecesi
SCR	Yüzey koşulları derecesi
Sx	x yönünde süreksizlik sayısı
Sy	y yönünde süreksizlik sayısı
Sz	z yönünde süreksizlik sayısı
SR	Yapısal derece
S <sub>0</sub>	Ölçekli gerilme alanı
SK	Sondaj kuyusu
SRF	Gerilme indirgeme faktörü
SP	Kötü derecelenmiş kum
SW	İyi derecelenmiş kum
TBM	Tunnel boring machine (tünel delme makinesi)
TCR	Toplam karot verimi
TKV	Karot verimi yüzdesi
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
u <sub>r</sub> <sup>el</sup>	Elastik yer değiştirme
YASS	Yeraltı su seviyesi
Ø <sub>M</sub>	İçsel sürtünme açısı (marn)
Ø <sub>L</sub>	İçsel sürtünme açısı (kireçtaşı)
v	Poison Oranı
σ' <sub>1</sub>	Etkili büyük asal gerilme
σ' <sub>3</sub>	Etkili küçük gerilme
σ <sub>ci</sub>	Bozulmamış kaya tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
σ <sub>c</sub> (kütle)	Kaya kütlelerinin basınç dayanımı (MPa)
γ	Kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı (t/m <sup>3</sup> )

**Teşekkür**

Yazarlar DSİ 15. Bölge Müdürlüğüne, İlci İnşaat A.Ş.'ye, Bar-Su ve Geotecna Progetti Srl. Şirketlerine, Editör ve hakem kuruluna teşekkürlerini sunar.

### **Kaynaklar**

- [1] Bar-Su and Geotecna Progetti Srl. Engineering Companies, Suruç tunnel report, 2010.
- [2] Diederichs, M.S., Hoek, E., DIPS 2.2. Advanced Version Computer Programme, Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1989.
- [3] Plaxis B.V., User manual for Plaxis 8.2. Computerlaan 14, 2628 XK Delft, The Netherlands, 2000.
- [4] Ichikawa, K., Geological investigation of dams. Proc. of 2nd Asian Symposium on Engineering Geology and the Environment. Malaysian National Group, Bangi, Malaysia, s 1-57, 1999.
- [5] ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, Unified Soil Classification System (USCS). ASTM International, USA, 1984.
- [6] AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi), Deprem Dairesi Başkanlığı: <http://www.deprem.gov.tr>, (1996).
- [7] ISRM (International Society for Rock Mechanics): The complete ISRM suggested methods rock characterization, testing and monitoring:1974-2006, Editors: R. Ulusay, J.A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, p 613 (2007).
- [8] Ulusay, R., Sonmez, H.: Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri (in Turkish), TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, Ankara (2002).
- [9] Deere, D.U.: Geological consideration. In: Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. (Eds.), Rock Mechanics in Engineering Practice. Wiley, London (1968).
- [10] Bieniawski, Z.T.: Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, 335-344 (1973).
- [11] Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J.: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 4, 189– 239 (1974).
- [12] Palmstrom, A.: RMi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD Thesis, Oslo University, Norway. p 400 (1995).
- [13] Hoek, E., Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 27 (3), 227– 229 (1997).
- [14] Bieniawski, Z.T.: Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York. pp 251 (1989).
- [15] Grimstad, E., Barton, N.: Updating the Q-system for NMT. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, p 20 (1993).
- [16] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M.: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens

- schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57, 151-160 (1998).
- [17] Sonmez, H., Ulusay, R.: Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (6), 219–233 (1999).
- [18] Sonmez, H., Ulusay, R.: A discussion on the Hoek –Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri* 26, 77–99 (2002).
- [19] Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithankar, A.G.: Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 10 (1), 97– 109 (1995).
- [20] Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F.: Support of underground excavations in hard rock. *Balkema, Rotterdam, Brookfield*, p 213 (1995).
- [21] Barton, N.: Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39 (1), 185– 216 (2002).
- [22] Singh, B., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K., Mehrota, V.K.: Rock mass strength parameters mobilized in tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 12 (1), 47–54 (1997).
- [23] Palmstrom, A.: Recent developments in rock support estimates by the RMI. *J. Rock Mech. Tunn. Technol.* 6 (1), 1–19 (2000).
- [24] Palmstrom, A.: Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass Index (RMI). *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (2), 175-188 (1996).
- [25] Ramamurthy, T.: Stability of rock mass. *Indian Geotechnical Journal*, 1–74 (1986).
- [26] Goel, R.K.: Correlations for predicting support pressures and closures in tunnels. PhD Thesis, Nagpur University, Nagpur, India, p 308 (1994).
- [27] Kalamaris, G.S., Bieniawski, Z.T.: A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *Proceedings of the Eighth International Congress on Rock Mechanics*, vol. 1. *Balkema, Rotterdam*, 295–302 (1995).
- [28] Bhasin, R., Grimstad, E.: The use of stress–strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (1), 93–98 (1996).
- [29] Aydan, O., Ulusay, R. and Kawamoto, T.: Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 34 (3/4), 777-786 (1997).
- [30] Sheorey, P.R.: *Empirical Rock Failure Criteria*. *Balkema, Rotterdam* (1997).
- [31] Trueman, R.: An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff. In Read, S.A.L., Richards, L.R., and Perrin, N.D., 1999. Applicability of the Hoek–Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris, 2*, 655–660 (1998).

- [32] Aydan, O., Dalgic, S.: Prediction of deformation behavior of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ). Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 228–233 (1998).
- [33] Barton, N.: TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Rotterdam, Balkema, pp 169 (2000).
- [34] Bieniawski, Z.T.: Determining rock mass deformability: experience from case histories. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr.* 15, 237–247 (1978).
- [35] Serafim, J.L., Pereira, J.P.: Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. Proceedings International Symposium Engineering Geology and Underground Construction, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 1133–1142 (1983).
- [36] Nicholson, G.A., Bieniawski, Z.T.: A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. *Int. J. Mining and Geological Engineering* 8, 181–202 (1990).
- [37] Verman, M.K.: Rock mass-tunnel support interaction analysis, PhD Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India (1993).
- [38] Mitri, H.S., Edrissi, R., Henning, J.: Finite element modeling of cable-bolted slopes in hard rock underground mines. SME Annual Meeting 14–17 February, New Mexico. SME, Albuquerque, 94–116 (1994).
- [39] Hoek, E., Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34 (8), 1165–1186 (1998).
- [40] Read, S.A.L., Richards, L.R., Perrin, N.D.: Applicability of the Hoek–Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris, vol. 2, 655–660 (1999).
- [41] Hoek, E., Diederichs, M.S.: Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (2), 203–215 (2006).
- [42] Unal, E.: Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University (Reference Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock Mechanics in Mining and Tunnelling*, p. 113, Rotterdam: A. A. Balkema (1983).
- [43] Fenner, R.: Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes. *Gluckauf*, 74, 681–695 and 705–715 (1938).
- [44] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C.: The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, 777–809 (1999).
- [45] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C.: Application of the convergence–confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 15 (2), 187–213 (2000).
- [46] Basarir, H., Ozsan, A., Karakus, M.: Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 81, 131–145 (2005).
- [47] Basarir, H.: Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 86, 225–237 (2006).

*Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımlar*

- [48] Hoek, E., Marinos, P.: Predicting tunnel squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 -November 2000, Part 2 December 2000 (2000).
- [49] Çubuk, M.K., Öztürk, E.A., Hatipoğlu, S., Sinoplu, M.Z.: Türkiye'deki Karayolu Tünellerinde Trafik Güvenliği. *İMO Teknik Dergi* 3, 4471-4486 (2008).