

Zayıf Kaya Kütlelerinde Açılan Tünellerde Ampirik ve Nümerik Yöntemlerle Duraylılık Analizi

Stability Analyses of Tunnels Excavated in Weak Rock Masses Using Empirical and Numerical Methods

Ayberk KAYA¹, Fikri BULUT²

¹Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, RİZE

²Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, TRABZON

Geliş (received) : 09 Mayıs (May) 2013
Düzeltilme (revised) : 24 Haziran (June) 2013
Kabul (accepted) : 15 Temmuz (July) 2013

ÖZ

Zayıf kaya kütlelerinde açılacak tünellerin tasarımı, mühendislik jeolojisi açısından bazı zorluklar sunmaktadır. Tasarım aşamasında yapılacak küçük bir hata, kazı aşamasında maliyeti yüksek ve zaman alıcı sorunlara yol açabilmektedir. Bu tür ciddi sorunlarla karşılaşmamak için zayıf kaya kütlelerinde açılacak tünellerin, tasarım aşamasında, en uygun ve ekonomik kazı yöntemine göre projelendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünelinin güzergahında yüzeyleyen Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı formasyonu'na ait ince tabakalı marnların duraylılığı, ampirik ve nümerik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. İlk önce, ISRM (1981) tanımlama kriterleri esas alınarak marnların içerdiği süreksizlerin özellikleri ve kaya malzemesinin jeomekanik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, marnlar RMR, Q ve GSI sistemleri ile sınıflandırılmış ve kütle özellikleri tespit edilmiştir. Son aşamada ise marnlarda açılması planlanan tünelin duraylılığı, Singh vd. (1992), Goel vd. (1995), Bhasin ve Grimstad (1996) kriterleri ve Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) yardımıyla araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda güvenlik sayısı değerinin 0.08 ile 1.43 arasında değiştiği ve tünelde duraysızlık sorunuyla karşılaşma riskinin olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ampirik ve nümerik yöntemler, Sonlu Eleman Yöntemi, Tünel duraylılığı, Zayıf kaya kütleleri.

ABSTRACT

In terms of geological engineering, tunnel design in weak rock masses presents some challenges. A small misinterpretation in the design stages can lead to costly and time-consuming problems at the construction phases. To avoid serious problems of these kinds, tunnels excavated in weak rock masses should be projected with the most suitable and economical excavation method in design stage. In this study, stability of the thin-bedded marls belong to Paleocene aged Şenkaya Sırtı formation, outcropped on the route of Cankurtaran (Hopa-Artvin) tunnel, was investigated using empirical and numerical methods. Firstly, the properties of the discontinuities in the marls and geomechanical parameters of intact rock material were determined based on the description criteria of ISRM (1981). In the next stage, marls were classified by using the RMR, Q and GSI systems and rock mass properties were determined. In the final stage, the stability of the tunnel, planned to be excavated in the marls, was investigated by using the criterion of Singh et al. (1992), Goel et al. (1995), Bhasin and Grimstad (1996) and Finite Element Method (FEM). As a result of the analyses, it was concluded that the factor of safety value varies between 0.08 and 1.43 and there may be a risk of instability problem in the tunnel.

Key Words: *Empirical and numerical methods, Finite Element Method, Tunnel stability, Weak rock mass.*

GİRİŞ

Ülkemizdeki araç sayısı ve trafikteki araç kalitesi, büyüyen ve küreselleşen ekonomiye bağlı olarak artmakta ve gelişmektedir. Bu gelişme ve artış, beraberinde yeni, geniş ve daha konforlu yolların yapımını gündeme getirmiştir. Ülkemizin dağlık coğrafyası düşünüldüğünde, yapılan yolların standartlarının yükseltilmesi için doğal engellerin çeşitli mühendislik yapıları aracılığı ile aşılması gerekmektedir. Bu mühendislik yapılarından biri de, son yıllarda yol ağında sayısı giderek artan karayolu tünelleridir.

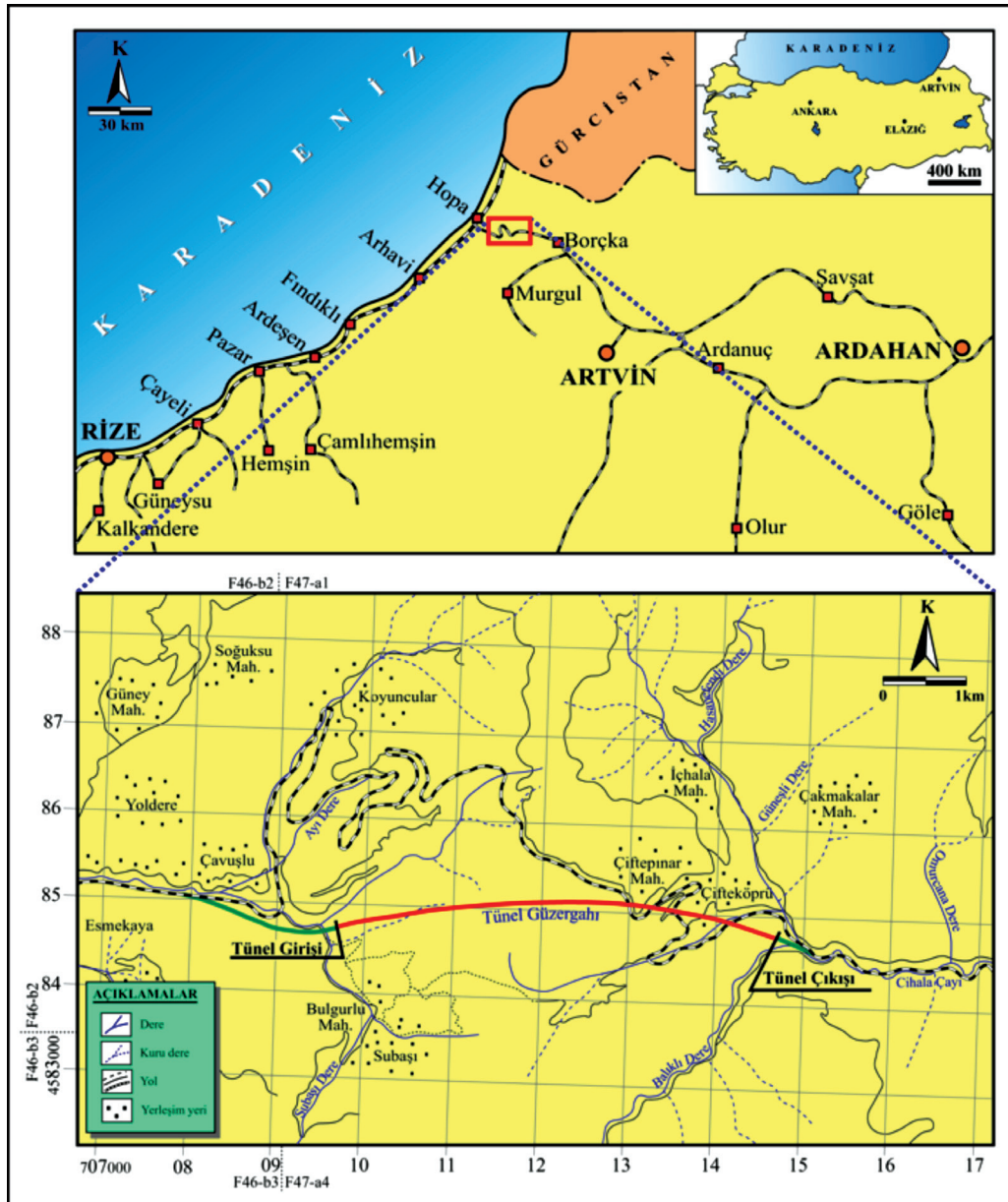
Tüneller, geometrilerinin ve üstlerine gelen yüklerin karmaşıklığı, kaya ve kaplama malzemelerinin özellikleri ve karşılıklı etkileşimleri nedeniyle projelendirmesi oldukça güç yapılarıdır. Bu nedenle tünel kazılarının, emniyeti sağlayacak en uygun tahkimat ve en az maliyetli kazı tasarımına göre projelendirilmesi gerekmektedir. Zayıf kaya kütlelerinde açılan

yeraltı kazıları, tünelcilere kazı sırasında büyük zorluklar sunmaktadır. Bu tür ortamlarda açılması planlanan tünellerin duraylılığı, tasarım aşamasında yapılacak ayrıntılı mühendislik jeolojisi çalışmalarıyla incelenmelidir. Yeraltı kazılarının duraylılığının belirlenmesi konusunda bir çok araştırmacı (Singh vd., 1992; Aydan vd., 1993; Barla, 1995; Goel vd., 1995; Hoek vd., 1995; Bhasin ve Grimstad, 1996; Carranza-Torres ve Fairhurst, 1999; Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000) ampirik eşitlikler önermiş ve bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler sayesinde de Sonlu Eleman (FEM), Ayrık Eleman (DEM), Sonlu Farklar (FDM) ve Sınır Eleman (BEM) gibi yeni nümerik analiz yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, 5288 m uzunluğu ile Türkiye’de projelendirilen en uzun çift tüplü tünellerin arasında yer alan ve hâlen kazı aşamasında olan Cankurtaran (Hopa-Artvin)

tünelinin güzergâhında (Şekil 1) yüzeyleyen Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı formasyonu'na ait ince tabakalı marınların kazı sonrası duraylılık özellikleri araştırılmıştır. Analizlerde, zayıf kaya kütlelerinin duraylılığını belirlemek için

literatürde yaygın olarak kullanılan Singh vd. (1992), Goel vd. (1995), Bhasin ve Grimstad (1996) tarafından önerilen ampirik eşitliklerden ve nümerik analiz kapsamında da Sonlu Eleman Yöntemi'nden (FEM) yararlanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.

MATERYAL VE YÖNTEM

Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergâhında yüzeylenen Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı formasyonu'na ait ince tabakalı marnlar, çıkış portalından itibaren yaklaşık 550 m sonra tünelin 300 m'lik kısmında yer almaktadır. En büyük örtü yükü kalınlığının 80 m olduğu tünelin bu bölümünde; 12 m genişliğinde, 10.5 m yüksekliğinde modifiye at nalı şekilli üst yarı, alt yarı ve taban kazı modelinin uygulanması planlanmaktadır. Tünel güzergâhında yüzeylenen diğer litolojik birimler zayıf kaya kütleli özelliği taşımadığından, bu proje kapsamında marnların kazı sonrası davranışlarını ortaya koymak daha fazla önem arz etmektedir. Marnların mühendislik özelliklerini belirlemek için 180 m uzunluğundaki YSK-7 ve 61 m uzunluğundaki YSK-1 numaralı temel sondajlarından ve yol şevlerinde yapılan hat etütlerinden yararlanılmıştır. Marn kaya kütleindeki süreksizliklerin özellikleri, ISRM (1981) tarafından önerilen ölçütlerine göre tanımlanmıştır. Gümüşhane Üniversitesi'nin Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda, alınan kaya malzemeleri üzerinde çalışmanın amacına uygun olan fiziko-mekanik deneyler yapılmıştır. Bu amaçla, ISRM (1977 ve 1985) tarafından önerilen yöntemlere göre birim hacim ağırlık ve nokta yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla marnlar, Q (Barton vd., 1974), RMR (Bieniawski, 1989) ve GSI (Sönmez ve Ulusay, 2002) sistemleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Deformasyon modülü (E_m), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), kaya kütle sabitleri (m_b , s , a) ve artık kaya kütle sabitleri (m_{br} , s_r , a_r) ise Çizelge 4'te sunulan araştırmacılar tarafından önerilmiş ampirik eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Dinamik poisson oranı (ν) ise sismik kırılma ölçümleriyle

elde edilen elastik ses dalgasının boyuna (V_p) ve enine (V_s) yayılma hızları yardımıyla tespit edilmiştir.

Marnlarda açılacak tünelin duraylılık özellikleri, ilk önce Singh vd. (1992), Goel vd. (1995) ve Bhasin ve Grimstad (1996) tarafından önerilmiş ampirik yöntemler ile araştırılmış, elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar tabanlı Phase² v7.0 (Rocscience, 2008) programında yapılan nümerik analizin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

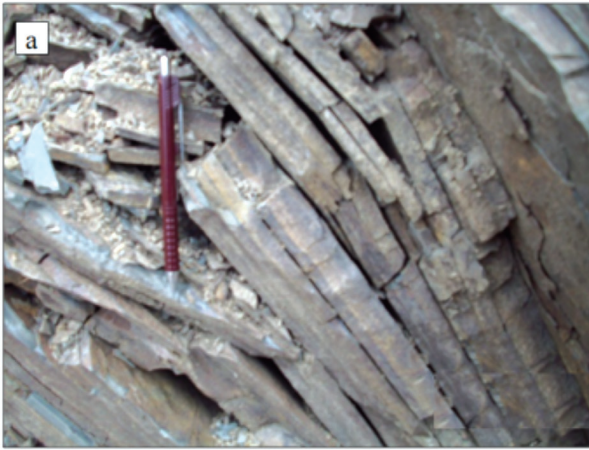
ÇALIŞMA ALANININ VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde, yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı Subaşı Sırtı formasyonu, Geç Kretase-Paleosen yaşlı Cankurtaran formasyonu, Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı formasyonu, Eosen yaşlı Kabaköy formasyonu ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ve yamaç molozları yüzeylenmektedir (Çapkınoğlu, 1981; Güven, 1993).

Subaşı Sırtı formasyonu, tabanda piroklastitlerle başlayıp kireçtaşı, marn, kumtaşı, tuf, silttaşı arakatıkları içeren ve tavana doğru tekrar piroklastit seviyesi ile son bulan bir volkano-tortul istif özelliğindedir. Birim, Cankurtaran tünelinin giriş bölümünün yer aldığı Subaşı Köyü civarında genişçe yüzeylenmektedir. Subaşı Sırtı formasyonu'nun üzerine uyumlu olarak gelen Cankurtaran formasyonu, tabanda ve tavanda ince tabakalanmalı marn ara seviyeleri içeren kireçtaşlarından, orta kısmında kalın tabakalı kireçtaşlarından oluşmaktadır. Birim, tünel güzergâhının orta kısmında yüzlek vermektedir. Çalışmanın konusunu oluşturan Şenkaya Sırtı formasyonu ise, bordo, gri ve kirli sarı renkli marnlardan oluşmakta olup, yer yer

ince tabakalanmalı kırmızı ve gri renkli kireçtaşı ile ince orta tabakalanmalı kiltası ara seviyeleri içermektedir (Şekil 2a, b). Marnlar bordo, gri ve kirli sarı renkli olup, genellikle belirgin bir

ve yoğun bir biçimde kloritleşmiştir. Çalışma alanı içindeki akarsu vadilerinin hem dar hem de oldukça yüksek eğimli olmasından dolayı alüvyon oluşukları iri bloklu malzemeler



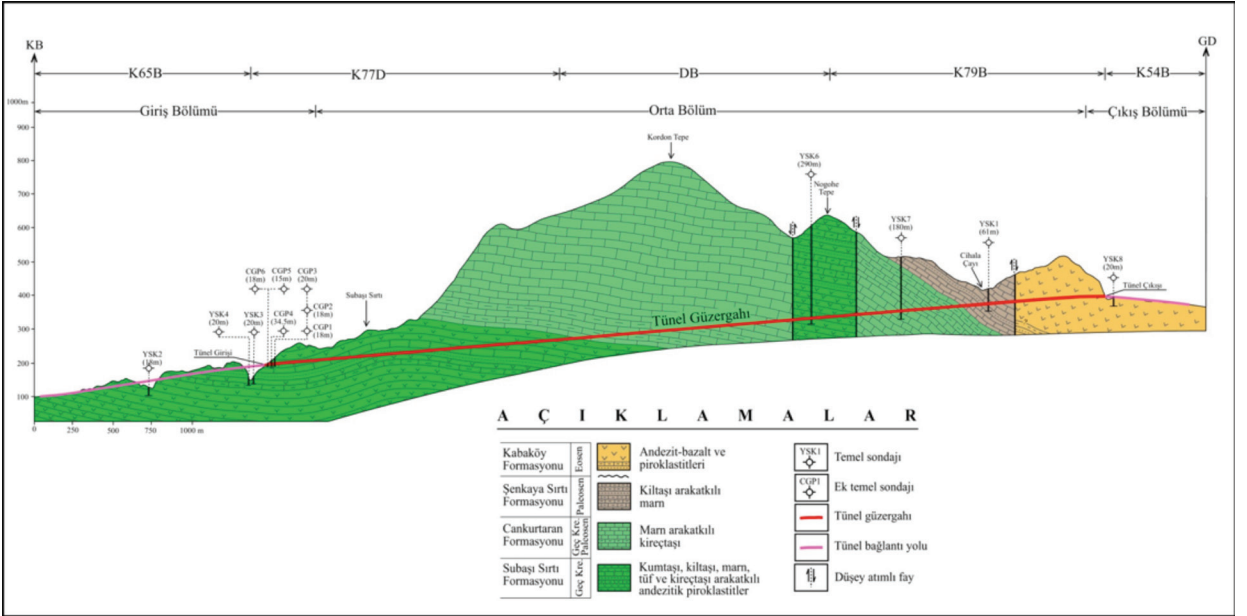
Şekil 2. Şenkaya Sırtı formasyonu'na ait marnların arazideki görünümü.

Figure 2. Field view of the marls belong to Şenkaya Sırtı formation.

tabakalanma göstermezler. Bazen kalın, çok kalın yer yer de masif bir görünüm sunarlar. Bol çatlaklı ve dağınık olup, yer yer yumrulu ve laminalı bir yapı gösterirler. Paleosen yaşlı birimlerin üzerine taban konglomerası ile açısız uyumsuzlukla gelen Kabaköy formasyonu ise, tabanda kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve marn tabakaları içeren andezit-bazalt ve piroklastitlerden oluşmaktadır. Formasyonun tabanındaki tortul seviye Cankurtaran tünelinin çıkış bölümünde gözlenemediğinden, Şenkaya Sırtı formasyonu ile Kabaköy formasyonu arasındaki sınırın bu alanda faylı olduğu düşünülmektedir. Bu bölgedeki bazaltlar, faylanmadan dolayı eklemlili ve düşük dayanımlı bir yapı kazanmış

şeklinde kendini göstermektedir. Tünel çıkış bölümünün bulunduğu Çiftköprü yöresindeki Cihala Çayı'nın birleştiği Çoruh Nehri boyunca, Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yoğun şekilde gözlenmektedir. Yamaç molozları, çalışma alanı içindeki yamaç eteklerinde yer almakta olup, bunlar yamaçların bulunduğu alandaki kayaç türlerine göre köşeli, yassı ve bazıları küt köşeli, blok, çakıl, kum, silt ve killerden oluşmuşlardır. Silt ve kil miktarı, diğer elemanlara göre daha fazladır.

Cankurtaran tünel güzergâhındaki birimlerin birleştirilmiş Jeolojik kesit üzerindeki görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Cankurtaran tünel güzergâhındaki birimlerin birleştirilmiş jeolojik kesiti üzerindeki görünümü (Kaya, 2012).

Figure 3. Combined cross-section view of the geological units on the route of the Cankurtaran tunnel (Kaya, 2012).

KAYA MALZEMELERİNİN FİZİKO-MEKANİK VE ELASTİK ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, marn tabakalarından alınan bloklardan laboratuvarında dikdörtgenler prizması şeklinde örnekler hazırlanmış ve kaya malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Deneyler, ISRM (1977) tarafından önerilen yöntemler esas alınarak yapılmıştır. Birim hacim ağırlık hesaplamaları yapılırken prizmatik örneklerin hacim ve ağırlıkları dikkate alınmıştır.

Marnların yüksek süreksizlik sıklığına sahip olması nedeniyle, açılan temel sondajlarından, tek eksenli basınç deneyi için standartlara uygun boyutlarda örnekler hazırlanamamıştır. Bu nedenle, kaya malzemelerinin tek eksenli basınç dayanımını belirlemede nokta yükleme deneyinden yararlanılmıştır. Nokta yükleme

deneyleri ISRM (1985) tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. ISRM (1985) tarafından önerilen yöntemde, kaya malzemesine ait nokta yük dayanım indeksinin 20-25 katının tek eksenli basınç dayanımına eşit olduğu belirtilmiştir. Kaya malzemesine ait tek eksenli basınç dayanımı değerleri hesap edilirken güvenli tarafta kalmak için nokta yük dayanım indeksi değerinin 20 katı alınmıştır. Ortalama tabaka kalınlığı 2.12 cm olan marnların elastisite modülünü doğrudan ve dolaylı yöntemlerle belirlemede zorluklar yaşandığından, Sönmez vd. (2006) tarafından önerilen abakta tek eksenli basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık değerleri çakıştırılarak elastisite modülü tahmin edilmiştir.

Kaya malzemesinin birim hacim ağırlık, nokta yük dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri özet olarak Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Marnlara ait birim hacim ağırlık, nokta yük dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri

Table 1. Unit weight, point load strength index, uniaxial compressive strengt and modulus of elasticity values of the marls

	Örnek sayısı	Ortalama	En büyük	En küçük	Std. Sp.
Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	10	22.73	24.73	18.95	0.0022
Nokta Yük Dayanım İndeksi ($I_{s(50)}$, MPa)	53	1.31	2.82	0.27	0.66
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ_{ci} , MPa)	-	26.19	56.31	5.37	13.27
Elastisite Modülü (E_p , GPa)	-	8.9	23.1	4.2	-

SÜREKSİZLİKLERİN ÖZELLİKLERİ

Cankurtaran tünel güzergâhındaki marnların içerdiği süreksizliklerin özelliklerini belirlemek için, YSK-2 ve YSK-7 numaralı temel sondajlarından ve yol şevlerinde yapılan hat etütü çalışmalarından yararlanılmıştır. Süreksizliklerin özellikleri, ISRM (1981) tarafından önerilen ölçütlerine göre tanımlanmıştır. Hat etütü çalışmaları ile süreksizliklere ait yönelim, ara uzaklık, açıklık, devamlılık, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı, bozunma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve yüzeylerindeki su durumu gibi özellikler tespit edilmiştir. ISRM (1981) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilen süreksizliklerin özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Elde edilen veriler yardımıyla hesaplanan süreksizlik sıklığı (λ) değerinin 41-94 m⁻¹ arasında değiştiği ve ortalama 63 m⁻¹ olduğu;

kaya kalite göstergesi (RQD) değerinin % 0 ile % 8 arasında değiştiği ve ortalama %3 olduğu, hacimsel eklem sayısı (J_v) değerinin ise 131.61 eklem/m³ olduğu belirlenmiştir. Marnlarda sistematik süreksizliklerin yanı sıra düzensiz süreksizliklerin de gelişmiş olması nedeniyle RQD’yi belirlemek için Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen (1) numaralı eşitlikten; J_v ’yi belirlemek için ise Palmström (1982, 1985 ve 1996) tarafından önerilen (2) numaralı eşitlikten yararlanılmıştır.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (1)$$

Burada; λ : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen ortalama süreksizlik sayısıdır.

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2)$$

Burada; S_n : gözlenen her bir süreksizlik takımı için bulunan metre cinsinden ara uzaklık değeridir.

Kaya, Bulut

Çizelge 2. Marnlardaki süreksizliklerin ISRM (1981) tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilmesi.

Table 2. Evaluation of the discontinuities in marls according to the definition criteria of ISRM (1981).

Süreksizlik özelliği				
Süreksizlik takımları	60/15	57/289	37/20	47/170
Süreksizlik türü	Eklem	Eklem	Eklem	Tabaka
Süreksizlik ara uzaklığı (cm)	6.89	3.56	2.39	2.12
Tanımlama (ISRM, 1981)	Yakın ara uzaklıklı	Dar ara uzaklıklı	Dar ara uzaklıklı	Dar ara uzaklıklı
Süreksizlik açıklığı (mm)	1.1	1.1	1.1	1.05
Tanımlama (ISRM, 1981)	Açık	Açık	Açık	Açık
Süreksizlik devamlılığı (m)	9.66	9.66	9.66	27.11
Tanımlama (ISRM, 1981)	Orta derecede devamlı	Orta derecede devamlı	Orta derecede devamlı	Çok yüksek devamlı
Süreksizlik pürüzlülüğü (JRC)	12-14	12-14	12-14	2-4
Tanımlama (ISRM, 1981)	Dalgalı pürüzlü	Dalgalı pürüzlü	Dalgalı pürüzlü	Düzlemsel pürüzlü
Süreksizliklerdeki dolgu malzemesinin özelliği	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması	Çok ince kil sıvaması
Süreksizlik yüzeylerinin bozunma derecesi (ISRM, 1981)	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş	Az bozunmuş
Süreksizlik yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 1981)	Çok az sızıntı gözleniyor	Çok az sızıntı gözleniyor	Çok az sızıntı gözleniyor	Çok az sızıntı gözleniyor

KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİNE GÖRE MARNLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kaya malzemelerine ait mekanik özellikler ve süreksizliklere ait özellikler yardımıyla Cankurtaran tünel güzergahında yer alan marnlar, Q (Barton vd., 1974), RMR (Bieniawski, 1989) ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından yeniden düzenlenmiş GSI (Marinos ve Hoek,

2000) sistemleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma yapılırken güvenli tarafta kalmak amacıyla marnlar için değerlendirilen parametrelerin en düşük değerleri göz önüne alınmıştır. Marnların, Bieniawski (1989)'a göre "çok zayıf", Barton vd. (1974)'e göre "son derece zayıf", Sönmez ve Ulusay (2002)'ye göre ise "bloklu/örselenmiş" kaya sınıfında olduğu saptanmıştır. Belirlenen RMR, Q ve GSI değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Marnların RMR₈₉, Q ve GSI sınıflama sistemlerine göre değerlendirilmesi.

Table 3. Evaluation of the marls according to the RMR, Q ve GSI classification systems.

Kaya kütle sınıflama sistemi	Değerlendirme
Temel RMR	26.1
Nihai RMR	21.1
Düzeltilmiş RMR	13.3
Tanımlama (Bieniawski, 1989)	Çok zayıf
Q	0.015
Q _N	0.15
Tanımlama (Barton vd., 1974)	Son derecede zayıf
GSI	24
Tanımlama (Sönmez ve Ulusay, 2002)	Bloklu/örselenmiş
Q: Kaya kütle kalitesi	RMR ₈₉ : Kaya kütle puanlaması
Q _N : SRF içermeyen Q	GSI: Jeolojik dayanım indeksi
SRF: 10 alınmıştır	

MARLARIN KÜTLE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Marn kaya kütlelerine ait dinamik poisson oranı (ν) değerini belirlemek için elastik ses dalgasının boyuna (V_p) ve enine (V_s) yayılma hızlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla, belirlenen en uygun yerde 12 kanallı Geometrics marka ve ES3000 model araştırma sismografi kullanılarak sismik kırılma ölçümleri alınmıştır. ASTM (2005) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak dinamik poisson oranı (ν) değeri saptanmıştır.

Hoek vd. (2002) tarafından önerilen eşitliklerle marnların tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}) ve kaya kütle sabitleri (m_b, s, a) belirlenmiş, deformasyon modülü (E_m) ise Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak tespit edilmiştir.

Kaya kütlelerinin yenilme sonrası nasıl bir davranış göstereceğinin bilinmesi, yeraltı

kazılarının tasarımında ve duraylılığında önemlidir. Tünel duvarları gibi sınırlandırılmış ortamlarda çoğu kaya kütle dayanım azalmasına uğrar ve birim deformasyon artık dayanım seviyesine ulaşır (Cai vd., 2007). Marn kaya kütlelerinin yenilme sonrasındaki durumuna ait artık kaya kütle sabitleri (m_{br}, s_r, a_r) ise Cai vd. (2007) tarafından önerilen eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir.

Ayrıca, marnlar için kaya malzemesi sabiti olan m_i 'yi belirlemek için, RocLab v1.0 (Rocscience, 2002) programından yararlanılmış ve 7 olarak seçilmiştir. Marnlarda mekanik yeraltı kazısının uygulanacağı varsayılmış ve örselenme faktörü (D) sıfır kabul edilmiştir.

Nümerik analizlerde kullanılmak amacıyla belirlenen dinamik poisson oranı (ν), deformasyon modülü (E_m), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), kaya kütle sabitleri (m_b, s, a), artık kaya kütle sabitleri (m_{br}, s_r, a_r) ve hesaplamalarda kullanılan eşitlikler Çizelge 4'te sunulmuştur.

Kaya, Bulut

Çizelge 4. Marnlara ait kaya kütle özellikleri ve bunların belirlenmesine yönelik, bazı araştırmacılar tarafından önerilen ampirik eşitlikler.

Table 4. Rock mass properties of the marls and empirical equations suggested by some researchers to determine them.

Araştırmacı	Eşitlik	Not	Değerler
ASTM (2005)	$v = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2)$	V_p : 1150 m/sn V_s : 600 m/sn	0.31
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = 100 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right)$	GPa	0.48
Hoek vd. (2002)	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$	MPa	0.29
Hoek vd. (2002)	$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$	m_i : 7 D : 0	0.46
Hoek vd. (2002)	$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$	D : 0	0.00022
Hoek vd. (2002)	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$		0.533
Cai vd. (2007)	$m_{br} = m_i e^{\left(\frac{GSIr-100}{28}\right)}$		0.37
Cai vd. (2007)	$s_r = e^{\left(\frac{GSIr-100}{9}\right)}$		0.000103
Cai vd. (2007)	$a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSIr/15} - e^{-20/3} \right)$		0.552

GSI_r : Artık jeolojik dayanım indeksi ($GSI_r = GSI e^{-0.0134GSI}$)
 σ_{ci} : Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
 V_p : Elastik ses dalgasının boyuna yayılma hızı (m/sn)
 V_s : Elastik ses dalgasının enine yayılma hızı (m/sn)

GSI : Jeolojik dayanım indeksi
 D : Örselenme faktörü
 m_i : Kaya malzemesi sabiti

AMPIRİK VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE DURAYLILIK ANALİZİ

Desteklenmemiş bir tünelin duraylı olarak kabul edilebilmesi için açıldığı kaya kütlelerine ait tek eksenli basınç dayanımının, açıklığın etrafında gelişen gerilmelerden büyük olması gerekmektedir. Bu iki parametrenin bilinmesi halinde kaya kütlelerinin kazı sonrası davranışı tahmin edilebilir. Yeraltı açıklıklarının duraylılığı, duraylılık analizlerinde güvenlik sayısı (G_s) ile ifade edilmektedir. Güvenlik sayısı, tünelin açıldığı kaya kütlelerine ait tek eksenli

basınç dayanımının tünel açıklığının etrafında gelişen gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu oran 1'den büyük olursa, tünelde duraysızlık sorununun gerçekleşmeyeceği kabul edilir. Duraylılık analizleri, iki boyutlu düzlemsel bozunum prensibine göre yapılmış olup, güvenlik sayıları ise hidrostatik gerilme altındaki yeraltı açıklıkları için kritik bölge olarak kabul edilen tavan için belirlenmiştir.

Singh vd. (1992) tarafından geliştirilen sıkışma derinliği kriterine göre, yeraltı açıklıklarının duraylılığı, kaya kütlelerinin kalitesi

(Q) ve örtü yükü kalınlığı (H) tarafından kontrol edilmektedir. Buna göre, Q değeri bilinen bir kaya kütleğinde, birimi metre olan $(350Q^{1/3})$ sınır derinliğinden daha derinde bir tünel açılırsa duraysızlık sorunu meydana gelir. Bu durumda (3) numaralı eşitlikte de gösterildiği gibi bir tünelin duraylı olabilmesi için $(350Q^{1/3}) > H$ koşulunun sağlanması gerekmektedir.

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

Burada; Q: kaya kütle kalitesi ve H: örtü yükü kalınlığıdır (m).

Goel vd. (1995) ise sıkışma derinliği üzerinde, kaya kütle kalitesi (Q) ve örtü yükü kalınlığının (H) yanı sıra açıklık genişliğinin (B) de etkili olduğunu belirtmiş ve sıkışma derinliğini, birimi metre olan $[(275Q_N^{0.33})B^{-0.1}]$ eşitliği ile tanımlamıştır. Benzer şekilde, Goel vd. (1995)'in kriterine göre, bir yeraltı açıklığının duraylı olabilmesi için $[(275Q_N^{0.33})B^{-0.1}] > H$ koşulunun sağlanmış olması gerekmektedir (Eşitlik 4).

$$G_s = \frac{(275Q_N^{0.33})B^{-0.1}}{H} \quad (4)$$

Burada; Q_N : SRF içermeyen Q, B: yeraltı açıklığının genişliği (m) ve H: örtü yükü kalınlığıdır (m).

Bhasin ve Grimstad (1996)'nın duraylılık kestirimi kriterine göre, bir tünel açıklığındaki en büyük asal gerilme (σ_1), polar koordinat sisteminde en büyük teğetsel gerilmedir (σ_θ) ve hidrostatik gerilme alanı altında ise düşey gerilmenin (σ_v) yaklaşık olarak iki katıdır. Kaya kütleğine ait tek eksenli basınç dayanımı (σ_{cm}), tünel duvarında gelişen en büyük teğetsel gerilmeden (σ_θ) büyük olursa tünelde duraysızlık sorunu gerçekleşmez. Bu durumda, güvenlik sayısı (5) numaralı eşitlikle tanımlanır.

$$G_s = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_\theta} = \frac{\sigma_{cm}}{2\sigma_v} \quad (5)$$

Burada; σ_{cm} : kaya kütleğinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), σ_θ : en büyük teğetsel gerilme (MPa) ve σ_v : düşey gerilmedir (MPa).

Tünelin açılacağı derinlikte oluşacak düşey gerilme (σ_v) miktarının belirlenmesinde, örtü yüküne bağlı olarak derinlikle birlikte arttığı kabulünün yapıldığı Fenner (1938) tarafından aşağıda önerilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\sigma_v = \gamma H \quad (6)$$

Burada; γ : birim hacim ağırlık (MN/m^3) ve H: örtü yükü kalınlığıdır (m).

Örselenmemiş yatay gerilme (σ_h) miktarını ölçmek oldukça zordur. Yatay gerilme, sığ derinliklerde oldukça değişkendir ve derinlere inildikçe hidrostatik olarak artma eğilimindedir. Bu çalışmada, tünelin açılacağı derinlikte oluşacak yatay gerilme miktarını belirlemek için Sheorey vd. (2001) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır.

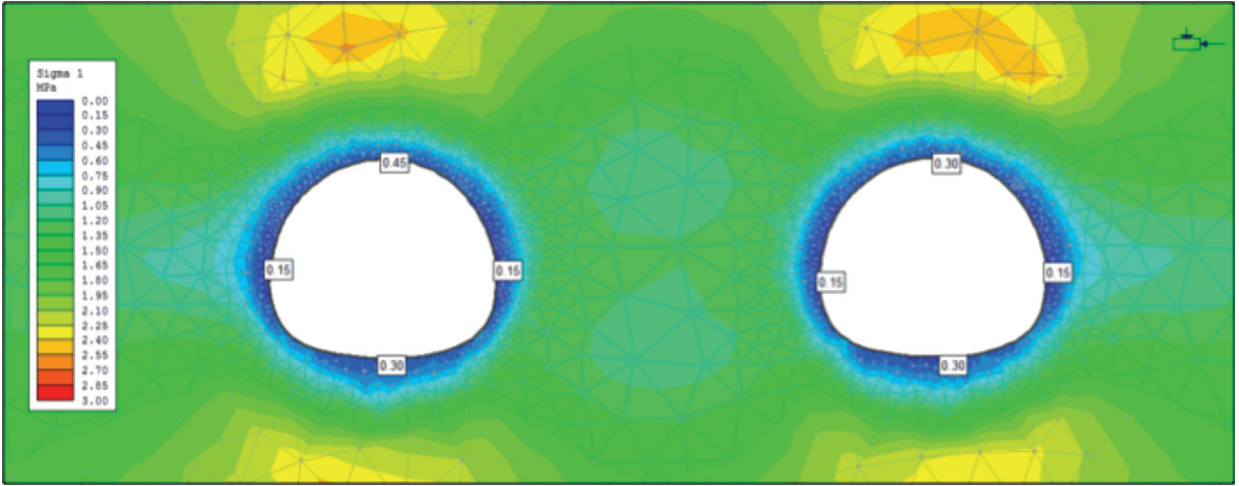
$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{\beta E_m G}{1-\nu} (H + 1000) \quad (7)$$

Burada; β : lineer ısıl genleşme katsayısı ($8 \times 10^{-6}/^\circ C$), G: jeotermik gradyan ($0.024 \text{ }^\circ C/m$), ν : kaya kütleğinin poisson oranı, H: örtü yükü kalınlığı (m) ve E_m : kaya kütleğinin deformasyon modülüdür (GPa).

Nümerik duraylılık analizleri kapsamında ise Rocscience (2008) tarafından geliştirilen "Phase² v7.0" (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) sonlu elemanlar programından yararlanılmıştır. Marn kaya kütleğinin için 12 m genişliğinde ve 10.5 m yüksekliğinde

üst yarı, alt yarı ve taban kazı modeli uygulanarak 18 m mesafeli çift tüp kazı kesiti oluşturulmuştur. Yapılan modellemede, detay analiz için kazı etrafında hassas zonlama yapılmış ve üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar kullanılmıştır. “Elastic-Perfectly Plastic (EPP)” malzeme olarak kabul edilen marn kaya kütlesi, yoğun süreksizlik içermesi nedeniyle analizlerde sürekli ortam olarak değerlendirilmiştir. Nümerik analiz için oluşturulan modelin üst kısmı, örtü yüksekliği göz önüne alınarak sınırlandırılmıştır. Kazı etrafında oluşacak en büyük asal gerilme (σ_1) miktarını ve yenilen sonlu elemanları

belirlemek için yapılan analizlerde, Hoek vd. (2002) tarafından önerilen yenilme kriterinden yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en büyük asal gerilme değerinin sol tüpün tavanında 0.45 MPa, sağ tüpün tavanında ise 0.30 MPa olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Duraylılık kabulü için $\sigma_{cm} > \sigma_1$ koşulunun sağlanması gerekli olduğundan, (8) numaralı eşitlikte verilen güvenlik sayısı, kaya kütlelerine ait tek eksenli basınç dayanımının (σ_{cm}) tünelin tavanında oluşan en büyük asal gerilmeye (σ_1) oranı olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Sonlu Eleman Yöntemi (FEM) ile desteksiz tünel açıklığı etrafında gelişecek en büyük asal gerilme dağılımlarının belirlenmesi.

Figure 4. Determination of the maximum principal stress distribution developed around the tunnel opening by Finite Element Method (FEM).

$$G_s = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_1} \quad (8)$$

Burada; σ_{cm} : kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı (MPa), σ_1 : en büyük asal gerilmedir (MPa).

Ampirik ve nümerik yöntemler kullanılarak yapılan analizler sonucunda belirlenen güvenlik sayıları özet olarak Çizelge 5’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düşey gerilmenin 1.82 MPa olduğu 80 m derinlikte, modifiye at nalı şekilli bir açıklık oluşturulursa, Singh vd. (1992)

ve Goel vd. (1995) tarafından önerilen sıkışma derinliği kriterlerine göre güvenlik sayısı, limit denge durumu olan 1'den büyük çıkmakta ve duraysızlık sorunu beklenmemektedir. Ancak, Bhasin ve Grimstad (1996) tarafından önerilen

duraylılık kestirimi kriterine ve Sonlu Eleman Yöntemi ile (FEM) yapılan nümerik analize göre ise güvenlik sayısı 1'den küçük çıkmakta ve desteksiz koşullar için duraysızlık sorununun gerçekleşebileceği sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 5. Farklı yöntemlere göre belirlenmiş güvenlik sayıları.

Table 5. Factor of safety values determined by different methods.

Kriter	Güvenlik sayısı (Gs)	Duraylılık durumu
Singh vd. (1992)	1.08	Duraylı
Goel vd. (1995)	1.43	Duraylı
Bhasin ve Grimstad (1996)	0.08	Duraysız
FEM	Sol tüp Sağ tüp	Duraysız Duraysız
B: 12 m H: 80 m Q: 0.15 Q _N : 0.015	σ_v : 1.82 MPa σ_h : 0.82 MPa σ_e : 3.64 MPa σ_{cm} : 0.29 MPa	σ_1 : 0.45 MPa (Sol tüp) σ_1 : 0.45 MPa (Sağ tüp) γ : 0.23 MN/m ³

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergahında yüzeylenen zayıf kaliteli kaya özelliğindeki Paleosen yaşlı Şenkaya Sırtı formasyonu'na ait marnların kazı sonrası duraylılık özellikleri, ampirik ve nümerik yöntemler yardımıyla incelenmiştir. Bu amaçla, zayıf kaya kütlelerinin duraylılığını belirlemede literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden yararlanarak güvenlik sayısı değerleri belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1) Singh vd. (1992) tarafından önerilen sıkışma derinliği kriterine göre yapılan duraylılık analizinde, güvenlik sayısı 1.08 olarak

belirlenmiş ve tünel açıklığının duraylı olduğu saptanmıştır.

- Goel vd. (1995)'in sıkışma derinliği kriterine göre güvenlik sayısı 1.43 olarak hesaplanmış ve tünelde her hangi bir duraysızlık sorununun gerçekleşmeyeceği sonucuna varılmıştır.
- Bhasin ve Grimstad (1996) tarafından önerilen duraylılık kestirimi kriterine göre güvenlik sayısının 0.08 olduğu tespit edilmiştir. Hesaplanan güvenlik sayısı 1'den küçük olduğu için tünel açıklığında duraysızlık sorununun gerçekleşmesi olasıdır.
- Sonlu Eleman Yöntemi ile (FEM) yapılan nümerik analize göre güvenlik sayısı sol tüp için 0.64, sağ tüp için ise 0.97 olarak

belirlenmiştir. Her iki tüpte de duraysızlık sorununun oluşması ihtimali vardır.

- 5) Singh vd. (1992) ve Goel vd. (1995)'in sıkışma derinliği kriterleriyle belirlenen güvenlik sayısının 1'den çok büyük olmaması, marnlar için güvenli tarafta kalmanın duraylılık açısından daha güvenilir olacağını göstermektedir. Bu nedenle, Cankurtaran tünelinin bu bölümünde duraysızlık sorunuyla karşılaşmamak için kısa kazı aralıklarıyla mekanik kazı yöntemi uygulanmalı ve plastik deformasyon zonunun genişlemesine izin vermeden hızlı bir şekilde en uygun destek elemanlarıyla desteklenmelidir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Rektörlüğü, Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2010.112.005.2 kod numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- ASTM (American Society for Testing and Materials), 2005. Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, ASTM Publications, 7 p.
- Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T., 1993. Squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (2), 137-163.
- Barla, G., 1995. Squeezing rocks in tunnels. *ISRM News Journal*, 2 (3-4), 44-49.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 189-239.
- Bhasin, R., Grimstad, E., 1996. The use of stress-strength relationship in the assessment of tunnel stability. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11 (1), 93-98
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York, 251 p.
- Cai, M., Kaiser, P., K., Tasaka, Y., Minami, M., 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 4 (2), 247-265.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 1999. The elastoplastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (6), 777-809.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (2), 187-213.
- Çapkinoğlu, Ş., 1981. Borçka-Çavuşlu (Hopa) arasının jeolojisi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Yüksek Lisans Tezi, 36 s (yayımlanmamış).
- Fenner, R. 1938. Untersuchungen zur erkenntnis des gebirgsdrucks. *Glückauf*, 74 (32), 681-695.
- Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithankar, A.G., 1995. Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10 (1), 97-109.
- Güven, İ.H., 1993. Doğu Pontidler'in jeolojisi ve 1/250.000 ölçekli komplikasyonu. MTA, Ankara (yayımlanmamış).
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International*

- Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43, 203-215.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995. Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam, 215 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion 2002 edition. Proceedings of the NARMS-TAC 2002, Mining Innovation and Technology, Toronto, Canada, 267-273.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1977. ISRM suggested methods: rock characterization, testing and monitoring. Pergamon Press, London, 211 p.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981. ISRM suggested methods: the quantitative description of discontinuities in rock masses. Pergamon Press, Oxford.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1985. Suggested method for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, 2 (22) 53-60.
- Kaya, A., 2012. Cankurtaran (Hopa-Artvin) tünel güzergahının ve çevresinin jeoteknik açıdan incelenmesi. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Doktora Tezi, 185 s (yayımlanmamış).
- Marinos, P., Hoek, E., 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, International Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering, Melbourne, Technomic Publishers, Lancaster, 1422-1446.
- Palmström, A., 1982. The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of jointing,. 4th International Congress of the IAEG, November, New Delhi, Proceedings book, 221-228.
- Palmström, A., 1985. Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, September, Sweden, Proceedings book: 103-110.
- Palmström, A., 1996. Rmi-A system for rock mass strength for use in rock engineering. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling, 2, L, 69-108.
- Priest, S.D., Hudson, J.A., 1976. Discontinuity spacing in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Abstracts, 13, 135-148.
- Rocscience, 2002. Roclab v1.0 rock mass strength analysis using the generalized Hoek-Brown failure criterion. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2008. Phase² v7.0 finite element analysis for excavations and slopes. Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Sheorey, P.R., Murali, M.G., Sinha, A., 2001. Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38 (1), 1211-1216.
- 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 (1), 59-74.
- Sönmez, H., Ulusay, R., 2002. A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modification to the criterion verified by slope stability case studies. Yerbilimleri Dergisi, 26, 77-9.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H.A., Kayabaşı, A., 2006. Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 224-235.

