

Bir Kaya Şevinin Devrilme Türü Duraysızlık Açısından Kinematik ve Sayısal Analizlerle Değerlendirilmesi (Devgeriş, Samsun)

Assessment of A Rock Slope in Terms of Toppling Failure by Kinematic and Numerical Analyses (Devgeriş, Samsun)

Ayberk KAYA

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, RİZE

Geliş (received) : 25 Ocak (January) 2016
Düzeltilme (revised) : 22 Mart (March) 2016
Kabul (accepted) : 13 Nisan (April) 2016

ÖZ

Devrilme, yamaç içine doğru eğimli, birbirine paralel ve dike yakın süreksizlikler içeren kaya kütlerinde açılmış şevlerde gözlenen bir yenilme türüdür. Karadeniz Sahil Yolu'nun Devgeriş (Samsun) Mahallesi kesimindeki Eosen yaşlı tüflerde açılmış kaya şevi, süreksizlik kontrollü bir yenilmeye maruz kalma riski altındadır. Bu kaya şevinin kuzeybatı sınırından itibaren açılmış taşocağından malzeme alımı neticesinde şev içine doğru eğimli olan J2 nolu (245/80) eklem seti boyunca açılmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle, kaya şevinde eklemlere bağlı olan bir yenilmenin gerçekleşme durumunu araştırmak için kinematik analizlerden ve sonlu elemanlar (FEM) tabanlı sayısal duraylılık analizlerinden yararlanılmıştır. Yapılan kinematik analizler, J2 nolu eklemler boyunca devrilme olasılığının olduğunu göstermektedir. Devrilme olasılığı sayısal analizlerle incelendiğinde güvenlik sayısının en kötü koşullar için 0.86, mevcut koşullar için 1.23 olduğu ve devrilme türü bir yenilmenin gerçekleşebileceği belirlenmiştir. Kaya şevi, bulonlarla desteklendiğinde veya yatıklaştırıldığında duraysızlık sorunu ortadan kalkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Destek Tasarımı, Devrilme, Kaya Şevi, Kinematik Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Şev Duraylılığı.

ABSTRACT

Toppling is a failure mode observed in rock slopes with parallel and almost vertical discontinuities which are inclined into the hill. The rock slope excavated in Eocene aged tuffs, is located in the Devgeriş (Samsun) district of Black Sea coast highway, and exposed to discontinuity-controlled failures. As a result of the quarry operation at the northwest side of studied rock slope, some cracks occurred along

A.Kaya

E-posta: ayberk.kaya@erdogan.edu.tr

the direction of J2 (245/80) joint set. Therefore, the kinematic and FEM-based numerical analyses were carried out in order to investigate the possibility of discontinuity-controlled failures. The results of the kinematic analyses showed that toppling failure is possible along the J2 joint set. It was determined that the factor of safety value is 0.86 for the worst condition and 1.23 for current condition when possibility of toppling failure is investigated by numerical analyses. After bolting or slope flattening, the rock slope becomes stable.

Key Words: *Support Design, Toppling, Rock Slope, Kinematic Analysis, Finite Element Method, Slope Stability.*

GİRİŞ

Türkiye’de kütle hareketlerinin en çok gözlemlendiği bölge Doğu Karadeniz Bölgesi’dir. Bölgenin topoğrafik ve jeolojik yapısı, yağışların bol olması ve buna bağlı olarak kayaçların ayrışması, potansiyel heyelan alanlarını oluşturmaktadır. Son yıllarda hızlı nüfus artışına bağlı olarak bu alanlarda yeni yerleşim yerleri için büyük hacimli kazıların yapılması veya plansız açık ocak işletmeciliği, pek çok kütle hareketini tetiklemiştir ve tetiklemeye devam etmektedir. Meydana gelen bu duraysızlıklar, hem ekonomik kayıplara hem de can kayıplarına yol açmaktadır. Kaya şevlerinde meydana gelen yenilmeler ise genellikle kütle içindeki süreksizliklere bağlı olarak gelişmektedir. Kazı aşamasında bu tür duraysızlık sorunlarıyla karşılaşmamak için şevlerin duraylılığı, tasarım aşamasında uygun analiz yöntemleriyle araştırılmalıdır.

Samsun İli’nin Devgeriş Mahallesi’ndeki çalışma alanı (Şekil 1), şehir merkezinden yaklaşık 3 km uzaklıkta olup, Karadeniz Sahil Yolu’nun hemen bitişiğindeki 2008 yılında basamaklandırılmış kaya şevini kapsamaktadır. Bu kaya şevinin kuzeybatı sınırından itibaren 6 yıl süre ile hidrolik kırıcı kullanılarak açık ocak işletmeciliği yapılmış ve düzensiz geometriye

sahip bir alan meydana getirilmiştir (Şekil 2). Bu faaliyet sonucunda taşocağı sınırından itibaren kaya şevini kesen süreksizler boyunca açılmalar meydana gelmiştir. Bu amaçla, Eosen yaşlı tüflerde açılmış bu şevin duraylılığını araştırmak için ayrıntılı mühendislik jeolojisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar arazi, laboratuvar ve duraylılık analiz çalışmaları olmak üzere üç aşamada yürütülmüştür. Arazi çalışmaları kapsamında jeoloji haritası hazırlanmış, eklemlerin özelliklerini belirlemek için hat etütleri yapılmış ve laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere blok örnekler alınmıştır. Laboratuvar çalışmalarında tüflerin fiziko-mekanik ve elastik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Şev duraylılık araştırmalarında ise kinematik ve sonlu elemanlar tabanlı sayısal analizlerden yararlanılmıştır.

ÇALIŞMA ALANININ VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve çevresinde, yaşlıdan gence doğru Geç Kretase yaşlı tortul kayaçlar, Eosen yaşlı volkanik ve tortul kayaçlar, Miyosen-Pliyosen yaşlı tortul kayaçlar ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar yüzeylenmektedir (Güven, 1993).

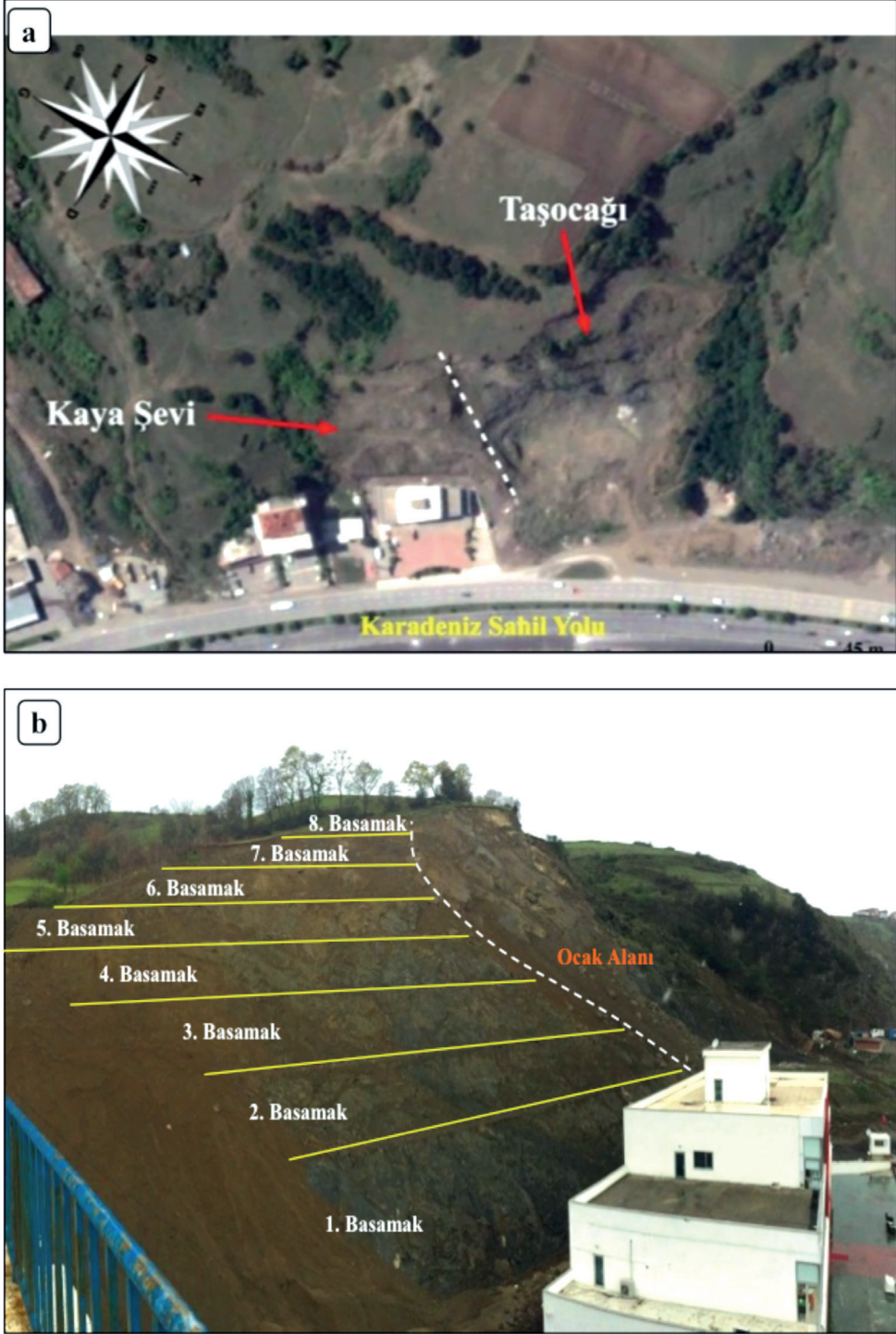
İlk defa Barka vd. (1986) tarafından tanımlanan Tekkeköy Formasyonu, KB-GD doğrultusu boyunca çalışma alanında ve çevresinde genişçe bir alanda yüzeylenmektedir. Formasyon, tabanda ince tabakalı kumtaşı ve marn ile başlayıp üst seviyelere doğru kalın tabakalı tüflerle son bulmaktadır. Birim, yer yer bazalt daykları tarafından kesilmiştir. Çalışma alanında, formasyona ait, içinde eksfoliasyonların geliştiği açık yeşil renkli tüfler

yüzeylenmektedir. Yer yer ince laminalı tuf seviyeleri de gözlenmektedir. Birim, sistematik ve geliş güzel oluşmuş eklemeler içermektedir. Eklem yüzeyleri orta derecede bozunmuş olup, bozunma rengi koyu kahve-sarı arasındadır. Birimin yaşı, Barka vd. (1986) tarafından yapılan çalışmada Eosen olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı ve çevresine ait jeoloji haritası Şekil 3'te verilmiştir.



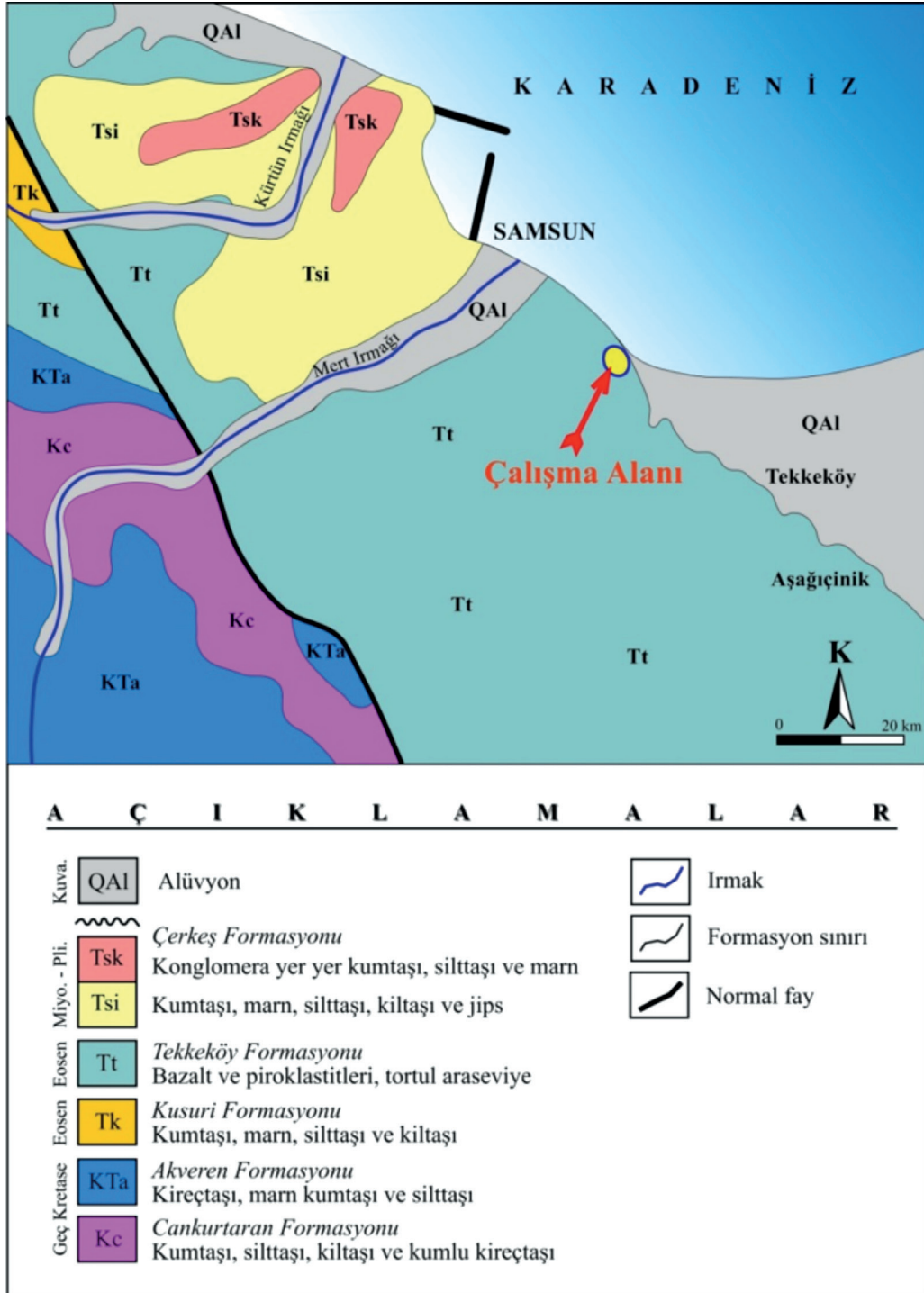
Şekil 1. Çalışma alanına ait yer bulduru haritası.

Figure 1. Location map of the study area.



Şekil 2. Kaya şevinin ve taşocağının (a) hava fotoğrafındaki ve (b) arazideki görünüşleri.

Figure 2. (a) Aerial and (b) field views of the studied rock slope and quarry.



Şekil 3. Çalışma alanı ve yakın çevresine ait jeoloji haritası (Güven, 1993'ten değiştirilerek).

Figure 3. Geological map of the close vicinity of the study area (modified from Güven, 1993).

TÜFLERİN FİZİKO-MEKANİK VE ELASTİK ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanından alınan bloklardan laboratuvar ortamında silindirik numuneler hazırlanarak tüflerin fiziko-mekanik ve elastik özellikleri belirlenmiştir.

ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemler esas alınarak tüflerin birim hacim ağırlığı, nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri saptanmıştır. Tüflerin taze ve eklem yüzeylerinden, ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemlere göre L-tipi Schmidt sertlik çekici kullanılarak geri tepme sayısı ölçümleri alınmıştır. Ölçümler düşey tutuş açısına göre yapıldığı için belirlenen değerlere herhangi bir düzeltme uygulanmamıştır.

Tüflerin birim hacim ağırlık (γ), nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$), tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}), elastisite modülü (E_i) ve Schmidt sertlik çekici geri tepme sayısı (R ve r) değerleri Çizelge 1’de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Tüflere ait fiziko-mekanik ve elastik özellikler.
Table 1. *Physico-mechanical and elastic properties of the tuffs.*

Özellikler	Örnek Sayısı	Ortalama	En Büyük	En Küçük	Std. Sp.
Birim hacim ağırlık (g, kN/m ³)	18	19.84	21.46	18.71	2.14
Nokta yükü dayanım indeksi ($I_{s(50)}$, MPa)	42	4.10	6.71	2.84	2.02
Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci} , MPa)	15	20.52	34.41	14.16	6.13
Elastisite modülü (E_i , GPa)	5	5.4	7.3	5.7	2.4
Schmidt sertlik çekici geri tepme sayısı*		R: 36, r: 26			

*R-taze yüzey, r-eklem yüzeyi

EKLEMLERİN ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanındaki tüflerin içerdiği eklemlerin özelliklerini belirlemek için kaya şevindeki basamak aynalarında yapılan hat etüdü çalışmalarından yararlanılmıştır.

Eklemlerin özellikleri, ISRM (2007) tarafından önerilen ölçütlere göre tanımlanmıştır. Hat etüdü çalışmaları ile eklemlere ait yönelim, aralık, açıklık, devamlılık, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı, bozunma derecesi, dolgu malzemesinin özelliği ve yüzeylerindeki su durumu gibi özellikler tespit edilmiştir.

Pürüzlü özellikte olan eklem yüzeylerinin makaslama dayanımı parametreleri ise Barton ve Bandis (1990) tarafından tavsiye edilen yenilme ölçütü kullanılarak belirlenmiştir. İlk önce CANMET (1977) tarafından önerilen yöntemle göre deformasyon kontrollü doğrudan makaslama deneyleri yapılmış ve tüflere ait temel sürtünme açısı (ϕ_b) 30° olarak belirlenmiştir (Şekil 4a). Kaya şevine etkiyen normal gerilme seviyesi, şevin yüksekliği (65 m) ile kayanın birim hacim ağırlığının (19.84 kN/m³) çarpılmasıyla 1.3 MPa olarak hesaplanmıştır. Daha sonra da 0-1.3 MPa arasında değişen farklı normal gerilmeler (σ_n) için (1) ve (2) nolu eşitlikler yardımıyla kayma gerilmesi (τ) değerleri hesaplanmış ve elde edilen

σ_n - τ veri çiftleri kullanılarak doğrusal olmayan yenilme zarfı çizilmiştir. Bu yenilme zarfına çizilen teğetten pürüzlü eklem yüzeylerinin sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri belirlenmiştir (Şekil 4b).

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (1)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_r + JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n} \quad (2)$$

Burada;

τ : kayma gerilmesi (MPa)

σ_n : eklem düzlemine etki eden normal gerilme (MPa)

JRC: eklem yüzeyi pürüzlülük katsayısı

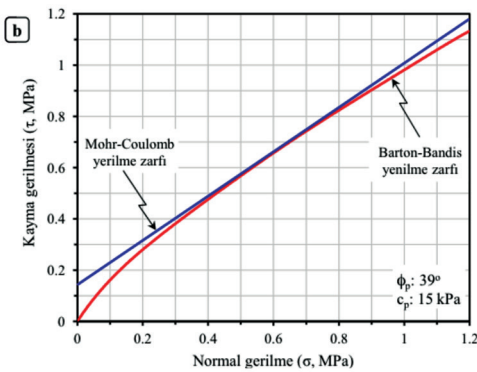
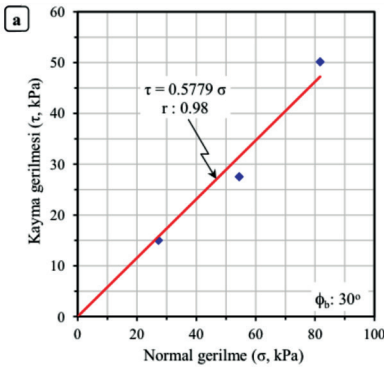
JCS: eklem yüzeyinin dayanımı (MPa)

ϕ_r : artık sürtünme açısı

ϕ_b : pürüzsüz ve düz yüzeye ait temel sürtünme açısı

R: taze yüzeyin Schmidt çekici geri tepme sayısı ve

r: eklem yüzeyinin Schmidt çekici geri tepme sayısıdır.



Şekil 4. (a) Pürüzsüz yüzeye ait ϕ_b değeri ile (b) eklem yüzeylerine ait ϕ ve c değerlerini belirlemek için çizilen σ - τ grafikleri.

Figure 4. σ - τ graphs in order to determine (a) ϕ_b value of the smooth surface and (b) ϕ and c values of the joint surfaces.

Kaya kalite göstergesi (RQD), Priest ve Hudson (1976) tarafından önerilen (3) nolu eşitlikten; hacimsel eklem sayısı (J_v) ise Palmström (2005) tarafından tavsiye edilen (4) nolu eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (3)$$

$$J_v = \frac{110 - RQD}{2.5} \quad (4)$$

Burada;

λ : 1 metre uzunluğundaki ölçüm hattını kesen eklem sayısı ve

J_v : 1 m³'lük kaya bloğundaki eklem sayısıdır.

ISRM (2007) tarafından önerilen tanımlama ölçütlerine göre değerlendirilen eklemlerin özellikleri ile literatürde tanımlanan yöntemlere göre belirlenen eklem sıklığı (λ), kaya kalite göstergesi (RQD), hacimsel eklem sayısı (J_v), sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri Çizelge 2'de özet olarak sunulmuştur.

TÜFLERİN KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ

Tüflerden oluşan kayakütlesine ait tek eksenli basınç dayanımı ve kaya kütle sabitleri Hoek vd. (2002) tarafından önerilen eşitlikler yardımıyla; deformasyon modülü ise Hoek ve Diederichs (2006) tarafından önerilen eşitlik kullanılarak belirlenmiştir. Poisson oranı hesaplanırken Aydan vd. (1993) tarafından önerilen ampirik eşitlikten yararlanılmıştır. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değerini saptamak için Hoek vd. (2013) tarafından önerilen denklem kullanılmış ve GSI değeri 46 olarak belirlenmiştir. Ayrıca,

Kaya

RocLab v1.0 (Rocscience, 2002) programından yararlanılarak tüfler için kaya malzemesi sabiti (m_j) 13 olarak, şev kazısı sırasında mekanik

kazı uygulandığı için örselenme faktörü (D) 0.7 olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2. Tüflerdeki eklemlere ait özellikler.
Table 2. Properties of joints in the tuffs.

Özellik	Değer
Eklem takımları	J1: 320/60 (Set 1) J2: 245/80 (Set 2) J3: 080/60 (Set 3)
Eklem aralığı (cm)	6.7*
Tanımlama (ISRM, 2007)	Yakın aralıklı
Eklem açıklığı (mm)	1.5*
Tanımlama (ISRM, 2007)	Açık
Eklem devamlılığı (m)	10.5*
Tanımlama (ISRM, 2007)	Yüksek devamlı
Eklem yüzeyi pürüzlülüğü (JRC)	14-16
Tanımlama (ISRM, 2007)	Dalgalı pürüzlü
Eklemlerdeki dolgu malzemesinin özelliği	Çok ince kil sıvaması yer yer <2 mm kalsit dolgu
Eklem yüzeylerinin bozunma derecesi (ISRM, 2007)	Orta derecede bozunmuş
Eklem yüzeylerindeki su durumu (ISRM, 2007)	Kuru ve sızıntı yok
Eklem sıklığı (l, m^{-1})	15*
Tanımlama (Franklin vd., 1971)	Çok çatlaklı- kırıklı
Hacimsel eklem sayısı ($J_v, \text{eklem}/m^3$)	22
Tanımlama (ISRM, 2007)	Çok küçük bloklar
Kaya kalite göstergesi (RQD, %)	55.7
Tanımlama (Deere, 1964)	Orta
Sürtünme açısı ($\phi, ^\circ$)	39
Kohezyon (c, kPa)	15

* Ortalama değer

Sayısal duraylılık analizlerinde kullanılmak amacıyla belirlenen Poisson oranı (ν_m), deformasyon modülü (E_m), tek eksenli basınç

dayanımı (σ_{cm}), kaya kütle sabitleri (m_b, s, a) ve hesaplamalarda kullanılan eşitlikler Çizelge 3'te verilmiştir.

DURAYLILIK ANALİZLERİ

Bu çalışmada, tüflerde açılan kaya şevinin duraylılığı kinematik ve sayısal analizler yapılarak incelenmiştir. Duraylılık analizleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, kaya şevindeki yenilmelerin eklemeler tarafından kontrol edildiği varsayılarak potansiyel yenilme türlerini (düzlemsel ve kama tipi kayma, devrilme) ortaya koymak amacıyla kinematik analizler yapılmıştır. Kinematik analizlerde girdi parametresi olarak ana eklem takımlarının ve kaya şevinin yönelimleri ile eklem yüzeylerine ait sürtünme açısı değeri (ϕ : 39°) kullanılmıştır.

Çalışmada, Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen kinematik analiz yönteminden yararlanılmıştır. Sekiz adet basamaktan oluşan 070/48 yönelimli kaya şevi için yapılan kinematik analizler sonucunda J2 nolu (245/80) eklem setinin devrilme türü bir yenilme oluşturma olasılığının olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Taşocağı ile kaya şevi sınırındaki 6. ve 7. basamaklarda gözlenen açılmalar, devrilme riski taşıyan J2 nolu eklemelerin doğrultusu boyunca gelişmiştir (Şekil 6). Arazideki bu durum kinematik analiz sonuçlarıyla da uyumluluk göstermektedir.

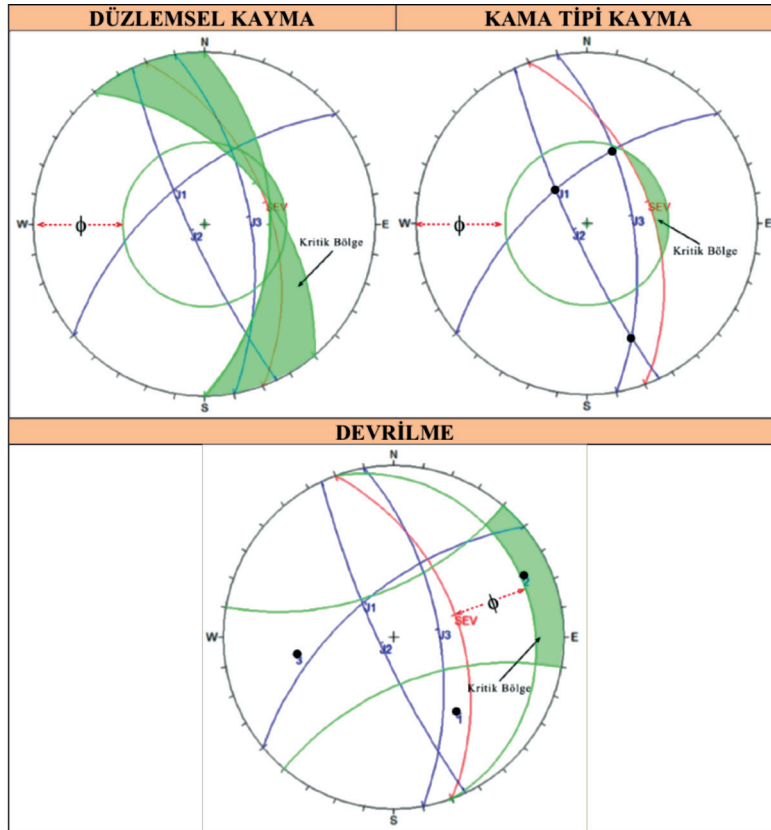
Çizelge 3. Tüflere ait kaya kütle özellikleri ve hesaplamalarda kullanılan eşitlikler.
Table 3. Rock mass properties of the tuffs, and equations used in the calculations.

Literatür	Eşitlik	Not	Değerler
Hoek vd. (2013)	$GSI = 1.5JCond_{89} + RQD/2$	$JCond_{89}$: 12	46
Aydan vd. (1993)	$v_m = 0.25(1 + e^{-\sigma_{cm}/4})$		0.40
Hoek ve Diederichs (2006)	$E_m = E_i \cdot 0.02 + \frac{1 - (D/2)}{1 + e^{(60+15D-GSI)/11}}$	GPa	0.45
	$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$	MPa	2.17
	$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$	m_i : 13 D : 0.7	0.66
Hoek vd. (2002)	$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$		0.0004
	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$		0.508

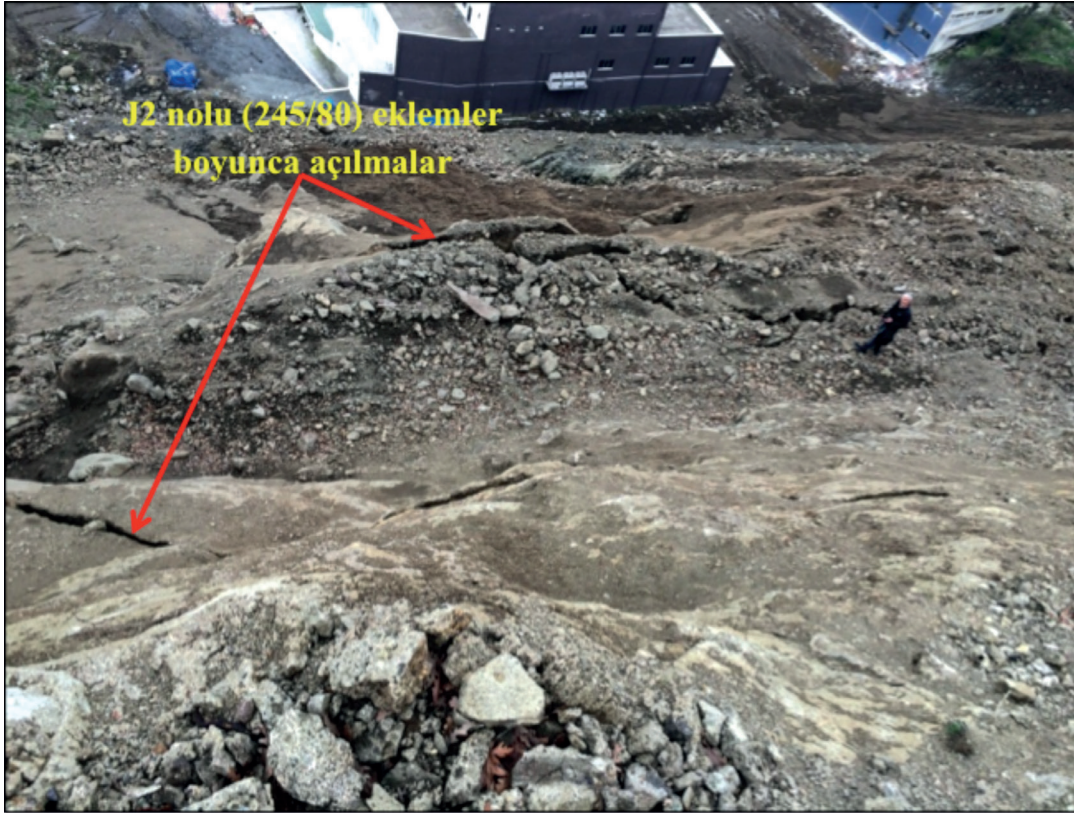
$JCond_{89}$: Eklem durumu puanı, Bieniawski (1989) tarafından tanımlanmıştır

Son aşamada ise incelenen kaya şevindeki eklem kontrollü kayma riski, hem kaya kütesinin deformasyon ve kütle özelliklerinin hem de eklemlerin makaslama dayanımının göz önüne alındığı sonlu elemanlar (FEM) tabanlı Phase² v8.0 (Rocscience, 2011) programı kullanılarak incelenmiştir. Oluşturulan üç düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar modelinde Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak gerilme-deformasyon analizleri yapılmış ve yenilme türleri incelenmiştir. Sayısal analizlerde şevin mevcut koşullardaki duraylılık durumunun yanı sıra en kötü koşullardaki duraylılık durumu da incelenmiştir. En kötü koşullardaki duraylılık durumu incelenirken, eklemlerin suyla dolu

olduğu varsayılmış ve sismik yükler dikkate alınmıştır. Ulusay vd. (2004) tarafından önerilen deprem azalım ilişkisi yardımıyla en büyük yatay yer ivmesi, 0.17 g olarak hesaplanmış ve sismik yük olarak modele eklenmiştir. Hesaplamalarda, çalışma alanına yaklaşık 20 km uzaklıkta bulunan ve son yıllarda sismik hareketlilik açısından aktif olan Karadeniz Fayı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, kaya şevinin duraylılık durumu için yeterli güvenlik sayısı değeri, 1.3 olarak seçilmiştir (Mines Branch, 1972). Analizlerde kullanılan değişkenler Çizelge 1-3'te sunulmuştur. Şevin geometrisi sekiz basamaklı kazı düzenine göre oluşturulmuştur (Şekil 7).

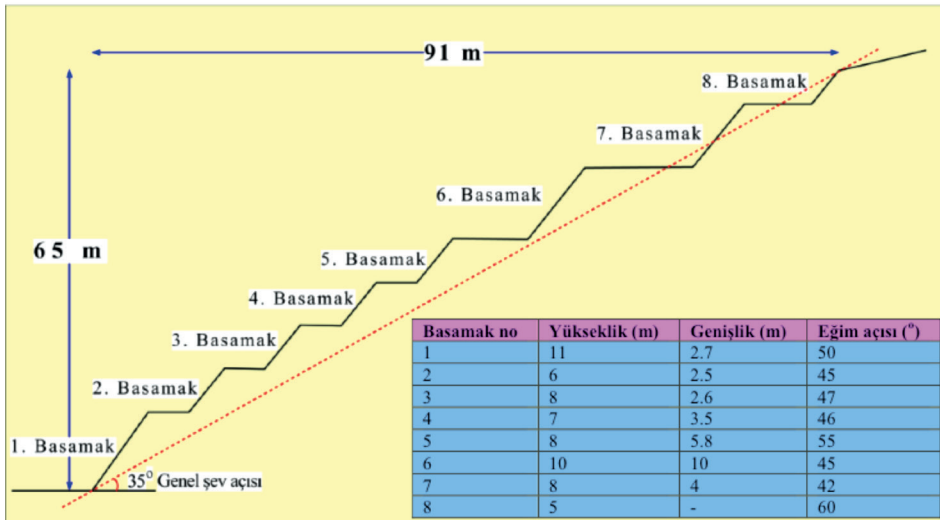


Şekil 5. Kaya şevi için düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilmenin kinematik analizi.
Figure 5. Kinematic analyses of planar sliding, wedge sliding and toppling for the rock slope.



Şekil 6. Kaya şevindeki J2 nolu (245/80) eklemler boyunca açılmaları gösteren fotoğraf.

Figure 6. The photograph showing cracks developed along the J2 joint plane (245/80) at the rock slope.



Şekil 7. Çalışma alanındaki kaya şevinin geometrisini gösteren kesit.

Figure 7. Cross-section showing the geometry of the rock slope in the study area.

Yapılan sayısal duraylılık analizleri sonucunda kaya şevine ait güvenlik sayısının en kötü koşullar için 0.86 (Şekil 8a); mevcut koşullar için ise 1.23 (Şekil 8b) olduğu ve devrilme riski taşıdığı saptanmıştır. Şekil 8c'de, yenilmelerin J2 nolu eklemler boyunca basamakların üst bölümünde geliştiği ve derinlere doğru eğilme deformasyonu şekli olarak yamaç aşağı doğru hareket ettiği görülmektedir. Dolayısıyla, olası yenilme probleminin önlenmesi için kaya şevinin desteklenmesi veya yeniden basamaklandırılması gerekmektedir.

Kaya şevini duraylı hale getirecek en uygun yöntemi belirlemek için Phase² v8.0 programından yararlanılmış ve yapılan sayısal analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, mevcut şev geometrisi dikkate alınarak sistematik bulonlama uygulaması yapılmıştır. Duraylılık için kabul edilen güvenlik sayısını (F: 1.3) sağlayacak optimum bulon tasarımını belirlemek amacıyla farklı aralıklarda ve uzunluklarda Ø28 mm çaplı SN tip kaya bulonları kullanılmış ve performansları test edilmiştir. Sonuç olarak, kaya şevinin ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci basamakları 2.0 x 2.0 m aralığında ve 6 m uzunluğunda; açılmaların gözlemlendiği altıncı, yedinci ve sekizinci basamakların ise 2.0 x 2.0 m aralığında ve 10 m uzunluğunda bulonlarla desteklenmesi halinde güvenlik sayısının 1.24'ten 1.33'e çıktığı belirlenmiştir (Şekil 9a).

İkinci aşamada ise J2 nolu eklemler boyunca açılmaların gözlemlendiği kütleli ortadan kaldırmak için altıncı basamağın topuğundan itibaren farklı açılarda ve yüksekliklerde şev

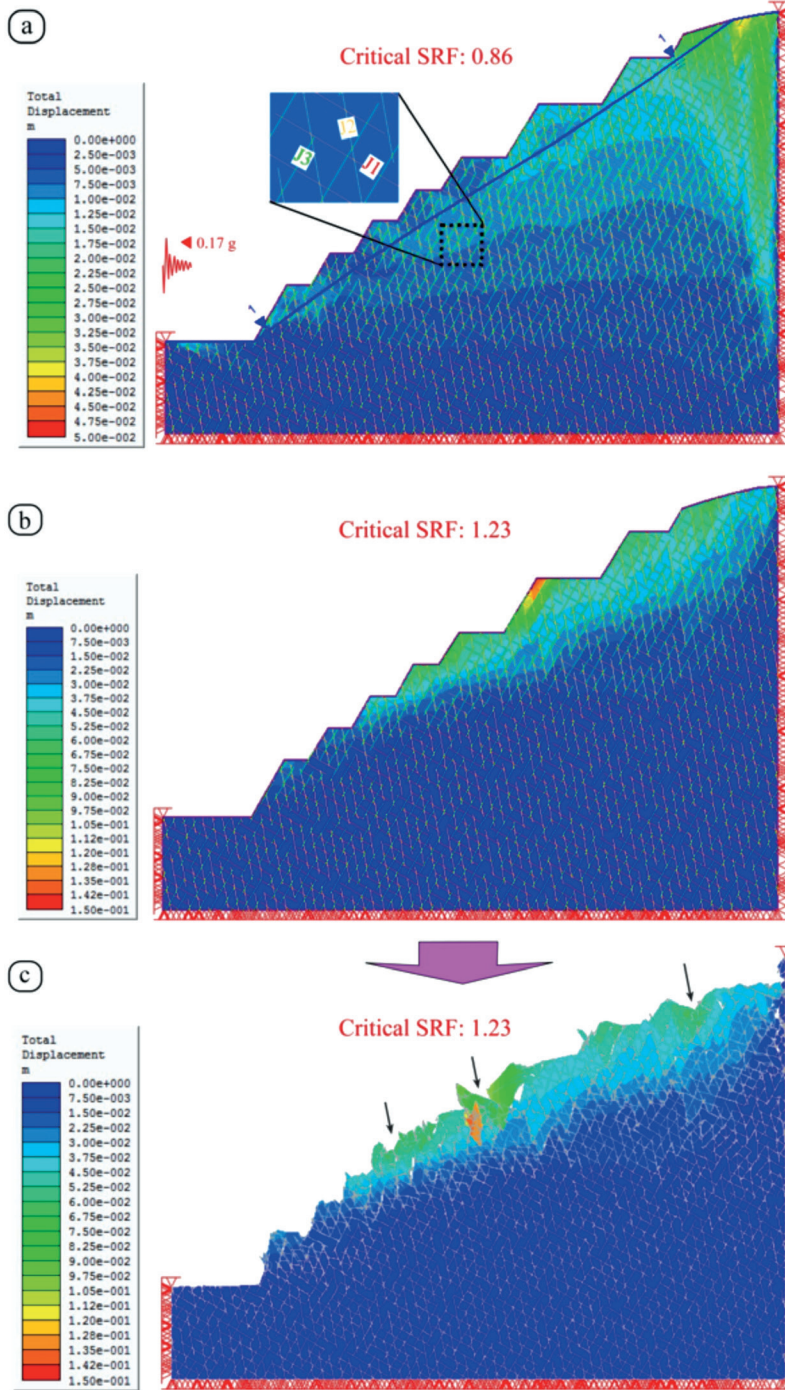
kazıları uygulanmış ve duraylılık için kabul edilen güvenlik sayısını sağlayan optimum basamak geometrisi belirlenmiştir. Kaya şevinin üst zonu, 30° eğiminde, 12 m yüksekliğinde ve 5 m genişliğinde üç basamak olarak yatıklaştırıldığında güvenlik sayısının 1.42 olduğu saptanmıştır (Şekil 9b).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Karadeniz Sahil Yolu'nun Devgeriş (Samsun) mahallesi kesimindeki Eosen yaşlı tüflerde açılmış kaya şevinin duraylılığı, kinematik ve sayısal analizler yapılarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

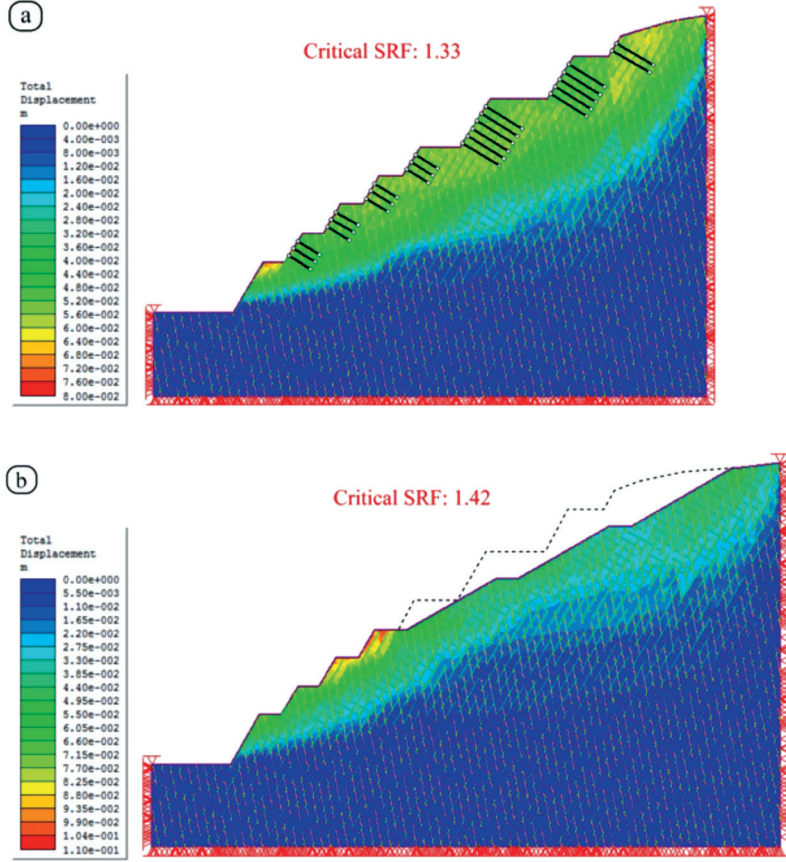
a) Yapılan kinematik analizler sonucunda kaya şevindeki J2 nolu (245/80) eklem setinin, devrilme türü bir yenilme oluşturma olasılığının olduğu belirlenmiştir. Taşocağı ile kaya şevi sınırındaki 6. ve 7. basamaklarda, J2 nolu eklemlerin doğrultusu boyunca gelişmiş açılmalar, kinematik analiz sonuçlarının doğruluğunu kanıtlamaktadır.

b) Kaya şevinde J2 nolu (245/80) eklem setine bağlı bir yenilmenin gerçekleşme olasılığı sonlu elemanlar (FEM) tabanlı sayısal analiz yöntemi ile incelendiğinde kaya şevi için güvenlik sayısı en kötü koşullar için 0.86, mevcut koşullar için ise 1.23 olmaktadır. Bu değerler, duraylılık için kabul edilen F: 1.3 değerinden küçüktür.



Şekil 8. Kaya şevinin yenilme öncesi (a) en kötü ve (b) mevcut koşullardaki durumu ile (c) yenilme sonrası durumunu gösteren sayısal analiz sonuçları.

Figure 8. Results of numerical analyses for the rock slope showing the pre-failure case (a) in worst, (b) current conditions, and (c) post-failure case.



Şekil 9. Kaya şevinin (a) bulon uygulaması ve (b) yatıklaştırılması sonrasında duraylılık durumlarını gösteren sayısal analiz sonuçları.

Figure 9. Results of numerical analyses for the rock slope showing stability conditions after (a) bolting and (b) slope flattening.

c) Sayısal duraylılık analizi sonuçlarına göre kaya şevinde devrilme türü bir yenilme beklenilmektedir. Kaya şevinin duraylılığının sağlanması için bulonlama yapılması veya şevin yatıklaştırılması önerilmektedir. İyileştirme yöntemlerinin performansları FEM tabanlı sayısal analiz yöntemiyle incelendiğinde bulonlama sonrası güvenlik sayısı 1.33'e, şev yatıklaştırma işlemi sonrası ise 1.42'ye çıkmaktadır. Önerilen yöntemlerden hangisinin uygulanacağına maliyet analizleri yapılarak karar verilmelidir.

d) Kaya şevlerinin duraylılığının araştırılmasında hem kaya kütlelerinin hem de

süreksizliklerin özelliklerini dikkate alan sayısal analizleri kullanmak daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, duraylılık değerlendirmelerinde birden fazla yöntemi kullanarak sonuçları kontrol etmek, güvenilir şev tasarımı açısından önemlidir.

TEŞEKKÜR

Arazi çalışmalarının yürütülmesinde yardımcı olan Jeoloji Mühendisi Köksal AKIN'a, çalışmayı titizlikle değerlendiren hakemlere ve editöre teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T., 1993. The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (2), 137-163.
- Barka, A., Sütçü Y. F., Gedik, İ., Tekin, T. F., Arel, E., Özdemir, M., Erkal, T., 1986. Sinop nükleer enerji santrali için jeolojik araştırmalar sonuç raporu, MTA, Rapor No: 7963, Ankara.
- Barton, N., Bandis, S. C., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, 603-610.
- CANMET, 1977. Pit slope manual: supplement 5-1, plane shear analysis. *Canada Centre for Mineral and Energy Technology Report*, 16-77.
- Deere, D. U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposed. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1, 17-22.
- Franklin, J. A., Broch, E., Walton, G., 1971. Logging the mechanical character of rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 80 (A), 1-9.
- Güven, İ. H., 1993. Doğu Pontidlerin jeolojisi ve 1/250000 ölçekli komplikasyonu, MTA, Ankara.
- Hoek, E., Bray, J. W., 1981. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining, Metallurgy, London, 358 p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference*, Toronto, Canada, 267-273.
- 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., Carter, T.G., Diederichs, M. S., 2013. Quantification of the Geological Strength Index chart. *47th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium*, San Francisco, USA.
- ISRM, 2007. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006* (Editors: Ulusay and Hudson), International Society for Rock Mechanics, Kozan Ofset, Ankara, 628 p.
- Mines Branch, 1972. *Tentative design guide for mine waste embankments in Canada*. Department of Energy, Mines and Resources, Canada, 200 p.
- Palmström, A., 2005. *Measurements of and Correlations Between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*, *Tunnels and Underground Space Technology*, 20, 362-377.
- 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, 2011. *Phase² v8.0 2D finite element program for calculating stresses and estimating support around the underground excavations*. Geomechanics Software and Research, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H., Gökçeoglu, C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology*, 74 (3-4), 265-291.

