



## Avnik (Bingöl) Açık Ocak Demir İşletmesinde Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle İncelenmesi

### *Investigation of Slope Stability of Avnik (Bingöl) Open Pit Iron Mine by Different Methods*

Ogün Ozan VAROL <sup>1\*</sup>, Mustafa AYHAN <sup>2</sup>, Mutluhan AKIN <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

<sup>3</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Kapadokya Jeolojik Miras ve Kaya Oyma Yapıları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir, Türkiye

Geliş (received): 13 Eylül (September) 2022 Kabul (accepted): 05 Ocak (January) 2023

#### ÖZ

Ülkemizin en önemli demir yataklarının işletildiği Avnik Demir İşletmesi, Bingöl ilinin güney doğusunda ve yaklaşık 40 km uzaklıkta yer almaktadır. Bu çalışmada kazı derinliğinin günümüzde 333 m'ye ulaştığı Avnik Demir İşletmesi'ndeki şevlerin duraylılığı incelenmiştir. Yapılan arazi çalışmaları kapsamında açık ocak işletmesinin şevlerini oluşturan birimlerde süreksizlik hat etütleri yapılmıştır. Süreksizlik hat etütleri neticesinde süreksizliklerin özellikleri belirlenmiştir. Yapılan arazi çalışmaları sonucunda inceleme alanındaki metamorfik kayaların ileri derecede çatlaklı ve kırıklı bir yapı kazandığı ortaya konmuştur. Öte yandan açık ocak işletmesinde daha önceki dönemlerde iki farklı noktada birleşik kayma yüzeyli duraysızlıklar gelişmiştir. Açık ocak işletmesindeki kritik işletme şevleri boyunca kesitler alınmış ve bu kesitler üzerinde statik - kuru ve dinamik – kuru koşullar için limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak şev duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Hem limit denge hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına göre açık ocak işletmesinin kuzeyinde yer alan şevlerin dinamik koşullarda güvenlik katsayılarının azaldığı ve kritik limit denge durumuna oldukça yaklaştığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Şev duraylılığı, Limit denge analizi, Sonlu elemanlar analizi, Açık ocak madeni, Avnik

#### ABSTRACT

Avnik iron mine is the most important iron mine in our country, that is located in southeast of Bingöl province. In this study the slope stability of the Avnik iron mine that has a depth of 333 m was examined. In the field works, discontinuity survey was done and discontinuities properties were determined. As a result of the field studies, it was revealed that the metamorphic rocks in the study area have a highly fractured and fissured structure. On the other hand, instabilities with combined failure surfaces developed at two different the open pit mine previously. Corss - sections were taken along the open pit slopes which have critical stability condition and slope stability analyzes were performed on these cross - sections using limit equilibrium and finite element methods for static - dry and dynamic - dry conditions. According to the results of both methods, it was

*determined that the factor of safety values for the slopes in the north of the open pit decreased in dynamic conditions and approached the critical limit equilibrium state.*

**Keywords:** Slope stability, Limit equilibrium analysis, Finite element analysis, Open pit mine, Avnik

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.893997>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: ogunozanvarol@yyu.edu.tr

## GİRİŞ

Açık ocak maden işletmelerinde şev duraylılığını etkileyen unsurlar iç ve dış faktörler olarak ikiye ayrılmaktadır. İç faktörler çalışma sahasının jeolojik, hidrojeolojik ve şevleri oluşturan kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri ile ifade edilirken dış faktörler çalışma sahasının projelendirme aşamasında karar verilen şev açısı, şev geometrisi, yer altı su drenajını, dinamik yükleri (deprem etkisi, patlatma vb.) temsil etmektedir (Keskin, 2008). Bu faktörler her işletmede farklı olacağından bir şevin duraylı olmasını sağlayan koşulları belirleyen genel kurallar koymak çok zordur. Şev duraylılık çalışmaları uzmanlık isteyen çoğu zaman sayısal hesap ağırlıklı işlemlerdir. Şev duraylılık analizi çalışmaları, jeolojik verilerin toplanması ve değerlendirilmesi, süreksizliklerin tanımlanması ve kinematik analizlerin yapılması, süreksizliklerin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi ve detaylı duraylılık analizlerinin yapılması gibi birçok aşamayı içerir (Eskikaya vd., 2005).

Derin açık ocak işletmelerinde, sahayı yansıtabilecek duraylılık analizi yapabilmek için, ilk olarak çalışma sahasının jeolojik, hidrojeolojik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sahada jeolojik çalışmalar yapılmalıdır. Jeolojik çalışmalar, açık ocak çukurunu oluşturan birimlerin tanımlanması ile başlar ve bu birimleri oluşturan kaya kütlelerinin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi ile devam eder. Kaya kütlelerinin jeoteknik özellikleri, kaya malzemesinin laboratuvarında belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri ile kaya kütlelerinin içerdiği süreksizliklerinin tanımlanması ve bu

süreksizliklerin davranışları ve dayanım özelliklerini kapsamaktadır. Kaya kütlelerinin davranışlarını belirlemek amacıyla kaya kütlelerinden kaya malzemesi örnekleri alınmakta ve bu örneklerin davranışlarını ve özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvarında birçok deney gerçekleştirilmektedir. Arazi ve laboratuvarında gerçekleştirilen başlıca çalışmalar aşağıda sıralanmıştır;

- Kaya birimlerinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin arazi çalışmaları ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenmesi.
- Süreksizlik hat etütleri kapsamında, süreksizliklerinin geometrisinin, yöneliminin, süreksizliklerin içerdikleri dolgu türü ve dolgu miktarı ile aralık, açıklık, pürüzlülük ve bozunma gibi parametrelerin tespit edilmesi.
- Açık ocak işletmesinde statik ve varsa tünek yer altı suyu seviyelerinin tespit edilmesi.
- Açık ocak işletmesinin bulunduğu bölgenin tektonik özelliklerinin tespit edilmesi.

Şev duraylılık analizlerinin araziye yansıtan bir biçimde yapılmaması veya hiçbir şekilde şev duraylılık analizlerinin yapılmadan işletmeye geçilmesi açık ocak işletmesinin derinleşmeye başlaması ile şevlerde beklenmedik duraysızlık problemlerinin yaşanmasına neden olabilir. Bu duraysızlıklar geriye dönülemez sonuçlar doğurabilir. Şevlerde meydana gelebilecek duraysızlıklar neticesinde büyük hacimlerde malzeme bir anda yer değiştirebilir. Bunun neticesinde tüm üretim bir anda durabilir ve işletmede can kayıpları meydana gelebilir. Bugüne kadar gerek açık ocak işletmelerinde gerekse de diğer mühendislik yapılarında bulunan şevlerde duraysızlıklar meydana

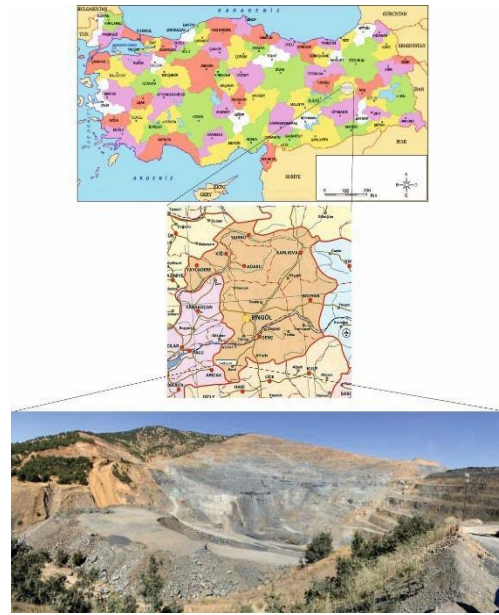
gelmiş ve kaymaların yönüne göre yerleşim yerlerinde zararlar meydana gelmiş ve can kayıpları yaşanmıştır. Ülkemizde de Afşin-Elbistan'da yaşanan şev duraysızlıkları sonucunda büyük miktarda kütle yer değiştirmiş ve maalesef can kayıpları yaşanmıştır. Şevlerin duraylılığı limit denge yönteminde, güvenlik katsayısı denilen birimsiz bir değer ile ifade edilmektedir. Bu değer; kaymayı engelleyen faktörlerin kaymaya neden olan faktörlere oranı ile belirlenmektedir (Chen ve Cheng, 2017; McCombie ve Wilkinson, 2002; Yang ve Yin, 2004; Zhu vd., 2003).

Literatürde Bingöl (Avnik) demir yatakları şev duraylılığı hakkında ulaşılabilen en detaylı çalışma Paşamehmetoğlu vd. (1980) tarafından yapılmıştır. Araştırmacılar, cevher yatağını farklı sektörlere ayırarak her bir sektör için farklı koşullarda emniyet katsayıları hesaplamışlar ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler sunmuşlardır. Araştırmacılar, hidrojeoloji araştırmaları için sondaj çalışmalarını sırasında yeraltı suyu hakkında bilgi edinmeye çalışmış fakat sondaj kuyularının kısa sürede çökmesi ve yeraltı su düzeyi ölçümleri için kuyulara gözlem boruları yerleştiremediklerinden dolayı hidrojeoloji hakkında bir bilgi edinememişlerdir. Geçmişte araştırmacıların yaşadığı bu zorlu durum yapılan bu çalışmada da yaşanmış olup mevcut işletmeden hidrojeoloji hakkında bilgi alınamamış ve yapılmış herhangi bir hidrojeoloji çalışmadığı olmadığı görülmüştür. Bu nedenden dolayı yapılan analizlerde ortam kuru kabul edilip analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma kapsamında 2008 yılından itibaren Dimin Madencilik A.Ş tarafından işletilmekte olan ve ülkemizin en önemli demir işletmeleri arasında yer alan açık ocak maden işletmesinin şev duraylılığı limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

## AVNİK (BİNGÖL) AÇIK OCAK İŞLETMESİ VE ÇALIŞMA ALANI MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

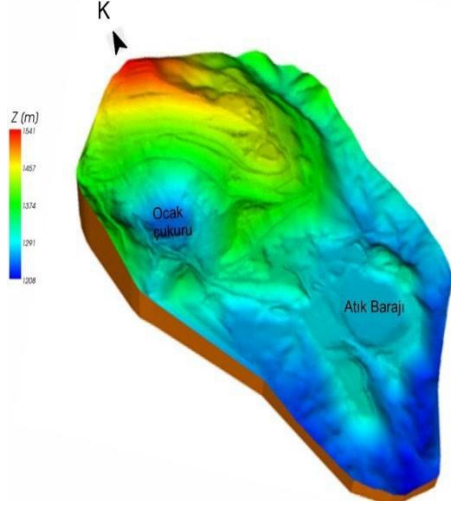
Avnik demir işletmeleri, Bingöl'e 40 km, Genç ilçesine ise 30 km mesafede bulunmaktadır (Şekil 1). Avnik demir işletmesi, bünyesinde bulunan yaklaşık 450 çalışanı ile ülkemizin önemli demir işletmeleri arasında yer almaktadır. Çalışmanın yürütüldüğü esnada açık ocak işletmesinin en üst kotu 1541 m, en alt kotu 1208 m, ocak derinliği ise 333 m'dir (Şekil 2). Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin şev açıları yaklaşık 45°, ocağın genel şev açısı ise 38°'dir (Şekil 3). Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin genişlikleri 3 m, yükseklikleri ise 6 m'dir.



**Şekil 1.** Çalışma sahası yerbulduru haritası ve açık ocak demir işletmesinin genel görünümü (bakış yönü kuzey)

**Figure 1.** Location map of the study area and a general view of open pit iron mine (viewpoint from North)

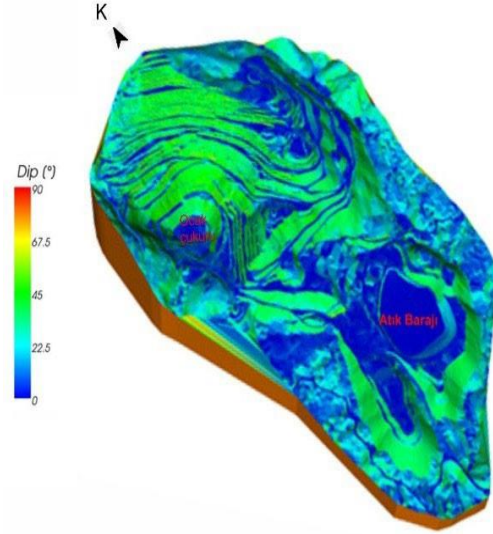
Şev duraylılığının incelemesinde ve şev tasarımında ilk olarak şevde gelişebilmesi muhtemel yenilme modelleri ortaya konulmalıdır. İleri derecede eklemli kaya kütlelerinde süreksizlik kontrollü yenilme meydana gelme olasılığı daha düşüktür ve yenilme yüzeyleri dairesele yakın olarak gelişmektedir. Bunun aksine süreksizliklerin kontrol ettiği duraysızlıklarda süreksizliklerin yönelimi ve şev aynası ile olan konumsal ilişkileri önemlidir. Araziden derlenen süreksizlik ve şev yönelim verileri stereografik izdüşüm yöntemi ile değerlendirilerek süreksizlikler için hakim yönelimler belirlenmektedir.



**Şekil 2.** Avnik açık ocak işletmesinin sayısal yükseklik modeli

**Figure 2.** Digital elevation model of Avnik open pit mine

Şev duraylılığının incelenmesine dair analitik – nümerik yöntemlere geçilmeden önce kinematik analizlerin yapılması yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem dahilinde, kohezyon, gözenek suyu basıncı, dış yükler vb. etkenler göz önüne alınmadan sadece süreksizliklerin ve şevin yönelimi ile süreksizliklerin içsel sürtünme açısı girdi parametresi olarak kullanılmaktadır (Ulusay, 2001). Öte yandan stereografik izdüşümde



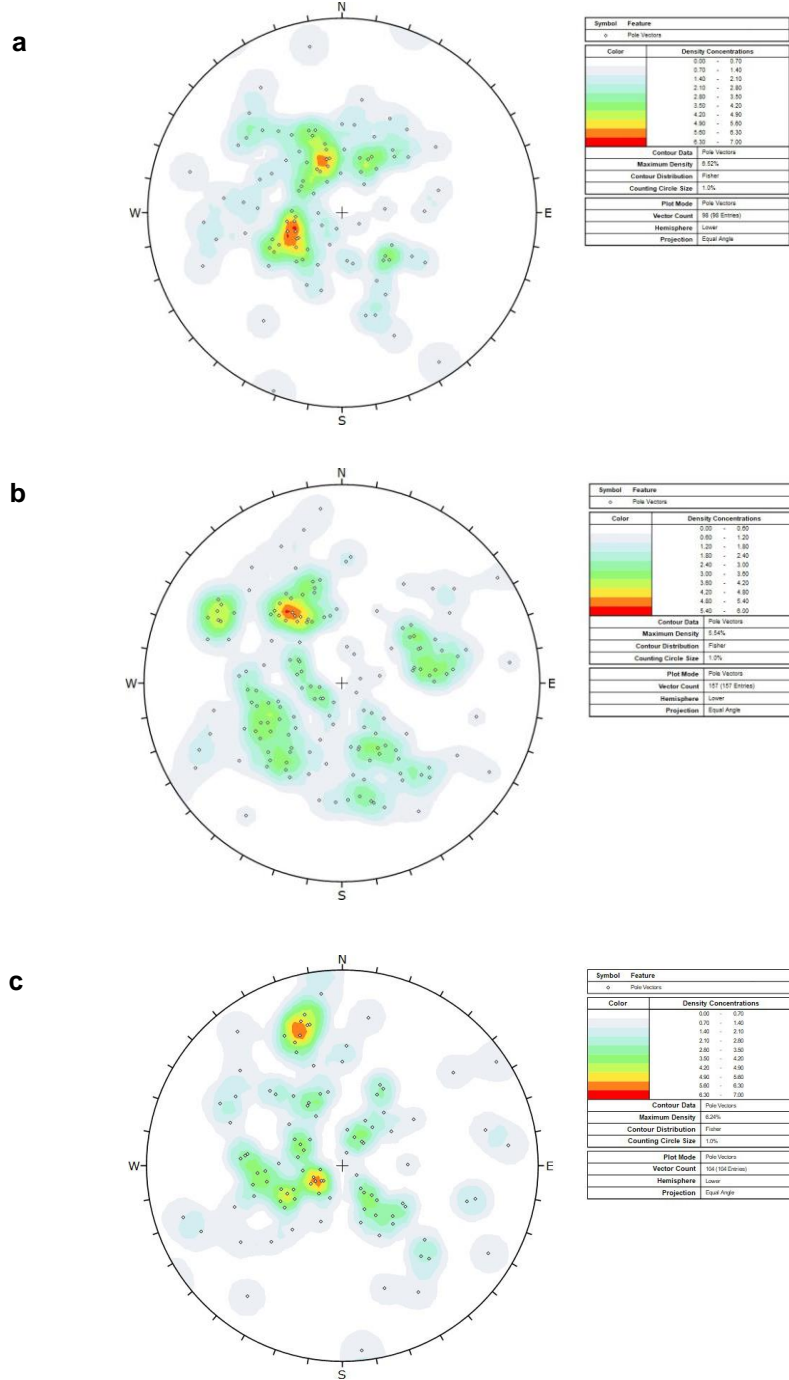
**Şekil 3.** Açık ocak işletmesinde bulunan işletme basamaklarının şev açıları

**Figure 3.** Slope angle of the open pit benches

dağınık bir kutuplaşma gösteren kaya kütlelerinde toprak zeminlerdekine benzer şekilde dairesel veya birleşik yüzeyler boyunca kayma gerçekleşebilir.

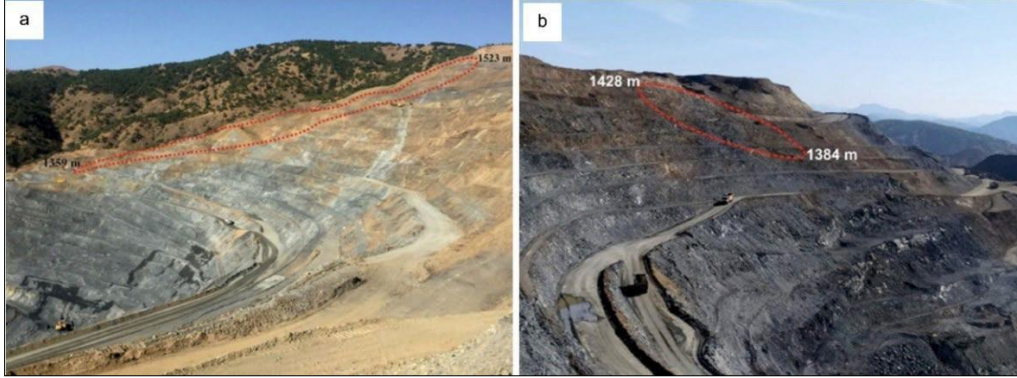
Arazi çalışmaları neticesinde farklı litolojiler için ortaya konan eklem türü süreksizliklerin stereografik dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Süreksizliklerin stereonet üzerindeki dağılımlarından da görüldüğü gibi süreksizliklerin kutup noktaları çok belirgin bir yoğunlaşma göstermemektedir. Bundan dolayı incelenen açık ocak sahasında süreksizlik kontrollü bir yenilme olasılığı daha azdır. Bunun yanı sıra, yapılan arazi çalışmalarında açık ocak şevlerinde geçmiş yıllarda mikaşist ve fillit birimlerinde oluşan birleşik yüzeyli şev duraysızlıkları gözlenmiştir (Şekil 5). Varol vd. (2021) yaptıkları çalışmada mikaşist ve fillit birimlerinde önceki yıllarda meydana gelen şev duraysızlıklarına ait kesitler üzerinde geri analizler yapmışlardır. Geri analizlerden elde edilen makaslama dayanım parametreleri ile bu çalışma kapsamında arazi çalışmaları

neticesinde belirlenen GSI değerleri ile kullanılarak elde edilen makaslama dayanım Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü parametreleri uyum göstermektedir.



**Şekil 4.** Süreksizliklerin stereonet üzerinde stereografik izdüşümü. a) mikaşist, b) fillit, c) gnays

**Figure 4.** Stereografic projection of discontinuities on stereonet. a) mica schist, b) phyllite, c) gneiss



**Şekil 5.** Açık ocak işletmesinde oluşan şev duraysızlıkları. a)mikaşist, b)fillit

**Figure 5.** Slope instabilities in the open pit. a) micaschist, b) phyllite

Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinde yapılan süreksizlik hat etütleri çalışmalarında süreksizlerin özellikleri belirlenmiştir. Süreksizliklerin devamlığının 20 metreden fazla, süreksizlik açıklıklarının 0.1-1 mm arasında değiştiği, süreksizliklerin az pürüzlü olduğu özellikle mikaşistlerin yüzeylerinin oldukça kaygan bir yapıya sahip olduğu, süreksizliklerin dolgulu olmadığı ve az bozunmuş olduğu tespit edilmiştir.

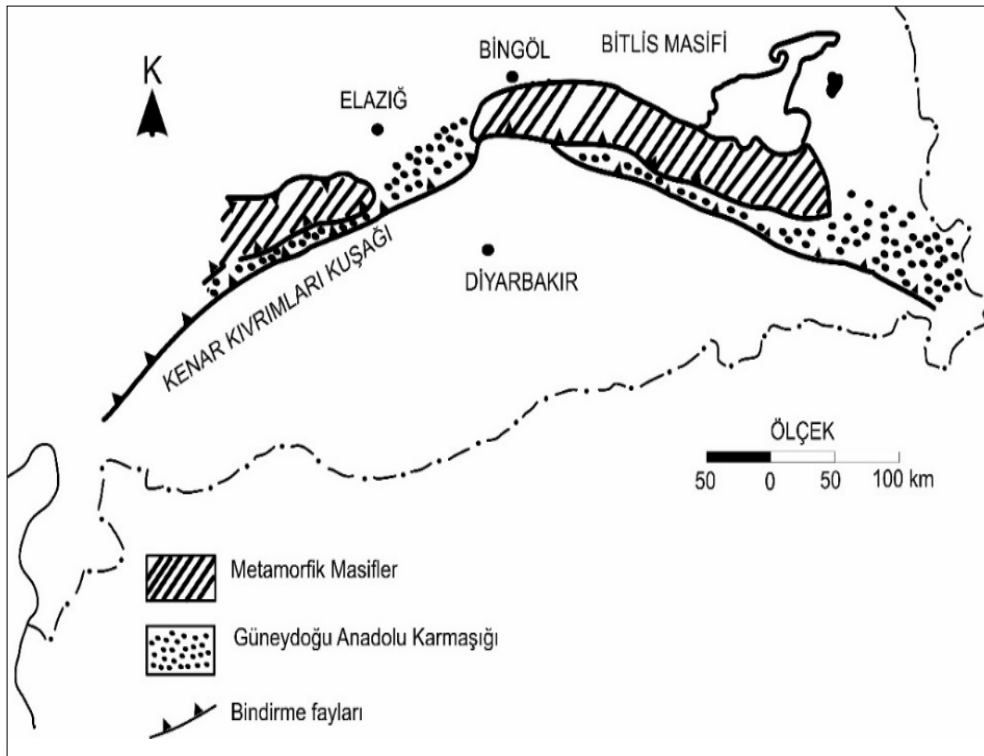
#### ÇALIŞMA SAHASININ GENEL JELOJİSİ

Güneydoğu Anadolu'da bindirme fayları boyunca yer alan üç kuşak Miyosen tektoniği neticesinde bugünkü halini almıştır (Şekil 6). Bu üç kuşaktan ikisi bindirme faylarının kuzeyinde bulunmakta olup, metamorfik kuşaklar batıda Malatya – Pötürge, doğuda ise Bitlis Masifi ile temsil edilmektedir. Metamorfik masiflerin güneyinde Güneydoğu Anadolu ofiyolit kuşağı, bu kuşağın güneyinde ise yerli kenar kıvrımları kuşağı yer almaktadır (Erdoğan ve Dora, 1983). Bitlis metamorfikleri alt birlik ve üst birlik olmak üzere aralarında açısız uyumsuzluk bulunan iki kaya grubundan oluşmaktadır (Şekil 6). Daha yaşlı olan alt birlik birimleri granit kütleleri tarafından kesilmiş ve daha sonra daha genç olan üst birlik tarafından örtülmüştür. Bitlis Masifinde çalışmalar yürüten araştırmacılar tarafından

gnays ve amfibollerden oluşan yaşlı kayaları eski temel olarak isimlendirmişlerdir (Erdoğan, 1982; Erdoğan ve Dora, 1983). Bu birimler Avnik bölgesinde bulunan ve alt birim olarak adlandırılan grupla eşleşmektedir (Yılmaz, 1975; Yılmaz, 1971). Yılmaz (1975; 1971) bölgede yürüttüğü çalışmalar neticesinde eski temel üzerine uyumsuzluklar ile mermer ve şistlerden oluşan yapının geldiğini belirtmiştir. Bu yapıya epimetamorfik örtü ismi verilmiştir. Bu örtü Avnik yöresinin Şekil 7'de verilen stratigrafik kesitinin de eşdeğeridir. Avnik yöresinde alt birlik olarak adlandırılan yaşlı birim, birbiriyle düşey ve yanal yönde geçişler gösteren ve aşağıdan yukarıya doğru gnays, felsik, metatüf – metavolkanit ve mafik metavolkanitler olarak sıralanan üç kaya biriminden oluşmaktadır. Alt birlik birimleri Avnik ve Yayla granitleri tarafından kesilmektedir (Erdoğan ve Dora, 1983). Alt birliğin en alt birimini oluşturan gnayslar gri renkli ve yer yer boşluklu, biyotitli, granatlı feldispat – kuvars gnayslar ve yeşil renkli, magnetit ve amfibolce zengin gnayslı yapılardır. Felsik metatüf – metavolkanit birimi ise ilksel porfiritik yapısını koruyan metalavlar ve bu metalavlar ile ardışıklı yer alan mavi ve yeşil renge sahip metatüflerden oluşmaktadır. Bu metatüfler bazı yerlerde koyu reşil renkte ve iri feldispat porfirobastları içeren benekli

amfibolit özelliği göstermektedir. Amfiboller içinde saçılmış türde bulunan magnetitce zengin zonlar Avnik yöresinde yanal devamlı kuşaklar oluşturmaktadır. Avnik açık ocak işletmesi en üstte mikaşist, fillit ve gnays biriminden oluşmaktadır. Cevher oluşumları gnays biriminde ve fillit

biriminde gözlenmektedir. Açık ocağı oluşturan kaya kütleleri, bölgenin geçirdiği tektonizma nedeniyle aşırı kırıklı ve çatlaklı bir yapı kazanmış durumdadır. Bu nedenle açık ocak işletmesindeki şevlerde birleşik yüzeyli yenilmeler olasıdır.



**Şekil 6.** Güneydoğu Anadolu Bölgesi tektonik kuşakları (Erdoğan ve Dora, 1983'den değiştirilmiştir)

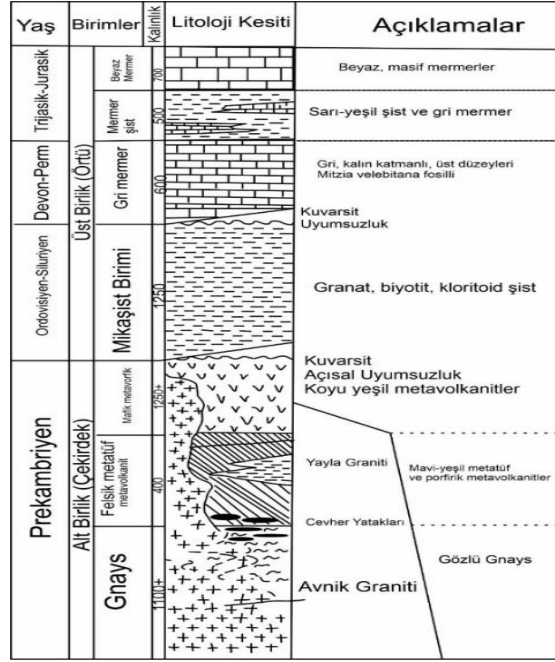
**Figure 6.** Tectonic belts in the Southeastern Anatolia Region (modified from Erdoğan and Dora, 1983)

## İKİ BOYUTLU LİMİT DENGE VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ŞEV DURAYLILIĞI ANALİZLERİ

Yapılan duraylılık analizlerinin çalışma sahasının mevcut durumunu yansıtmaları için insansız hava aracı (İHA) ile alınan nokta bulutundan arazi sayısal yüzey modeli oluşturulmuş ve açık ocak işletmesini oluşturan jeolojik birimler sayısal yüzey modeli üzerine tanıtılmıştır.

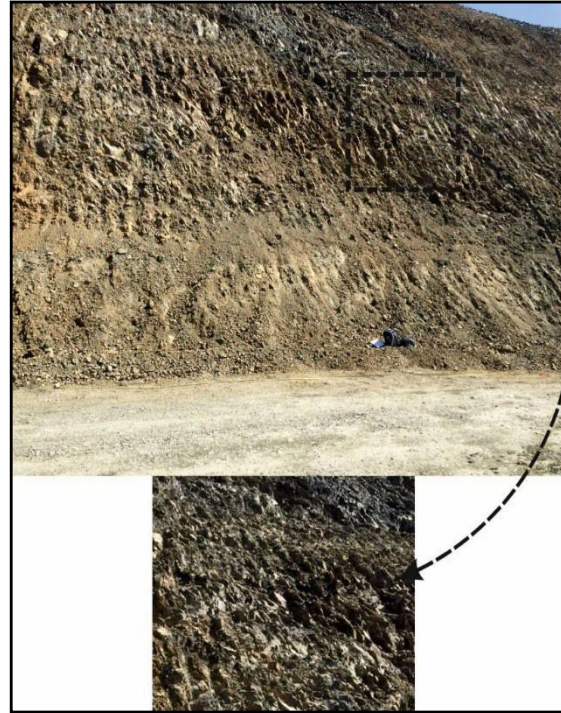
Daha sonra model üzerinden dört farklı kesit alınarak kesitler üzerinde 2-boyutlu statik - kuru ve dinamik - kuru koşullarda duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan, 2-boyutlu limit denge analizleri Slide2 (Rocscience Inc., 2020a) yazılımı ile gerçekleştirilen, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler ise RS2 (Rocscience Inc., 2020b) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 7.** Bitlis metamorfiklerinin Avnik yöresindeki genel stratigrafik kesiti (Erdoğan ve Dora, 1983'den değiştirilmiştir)

**Figure 7.** General stratigraphic section of the Bitlis metamorphites in the Avnik region (modified from Erdoğan and Dora, 1983)



**Şekil 8.** Aşırı kırıklı-çatlaklı mikaşist biriminden bir görünüm.

**Figure 8.** A general view of highly fractured micaschist



Avnik açık ocak işletmesinde geçmiş yıllarda mikaşist ve fillit birimlerinde şev duraysızlıkları yaşanmıştır (Şekil 5). Yaşanan duraysızlık açık ocak işletmesini iş sağlığı güvenliği açısından olumsuz etkilediği gibi aynı zamanda ekonomik açıdan da bazı olumsuz etkileri olmuştur. Bu bakımdan açık ocak işletmesinin şevlerinin duraylılık analizlerinin yapılması önem taşımaktadır. Çalışma sahasını oluşturan birimler ileri derecede kırıklı – çatlaklı bir yapıya sahiptir (Şekil 8). Çalışma sahasında yapılan analizlerde açık ocak işletmesindeki kaya kütlelerinin yenilme ölçütü olarak Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır. Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinden elde edilen yenilme zarfları Şekil 9'da sunulmuştur. Yapılan süreksizlik hat etütleri neticesinde elde edilen arazi verileri ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen

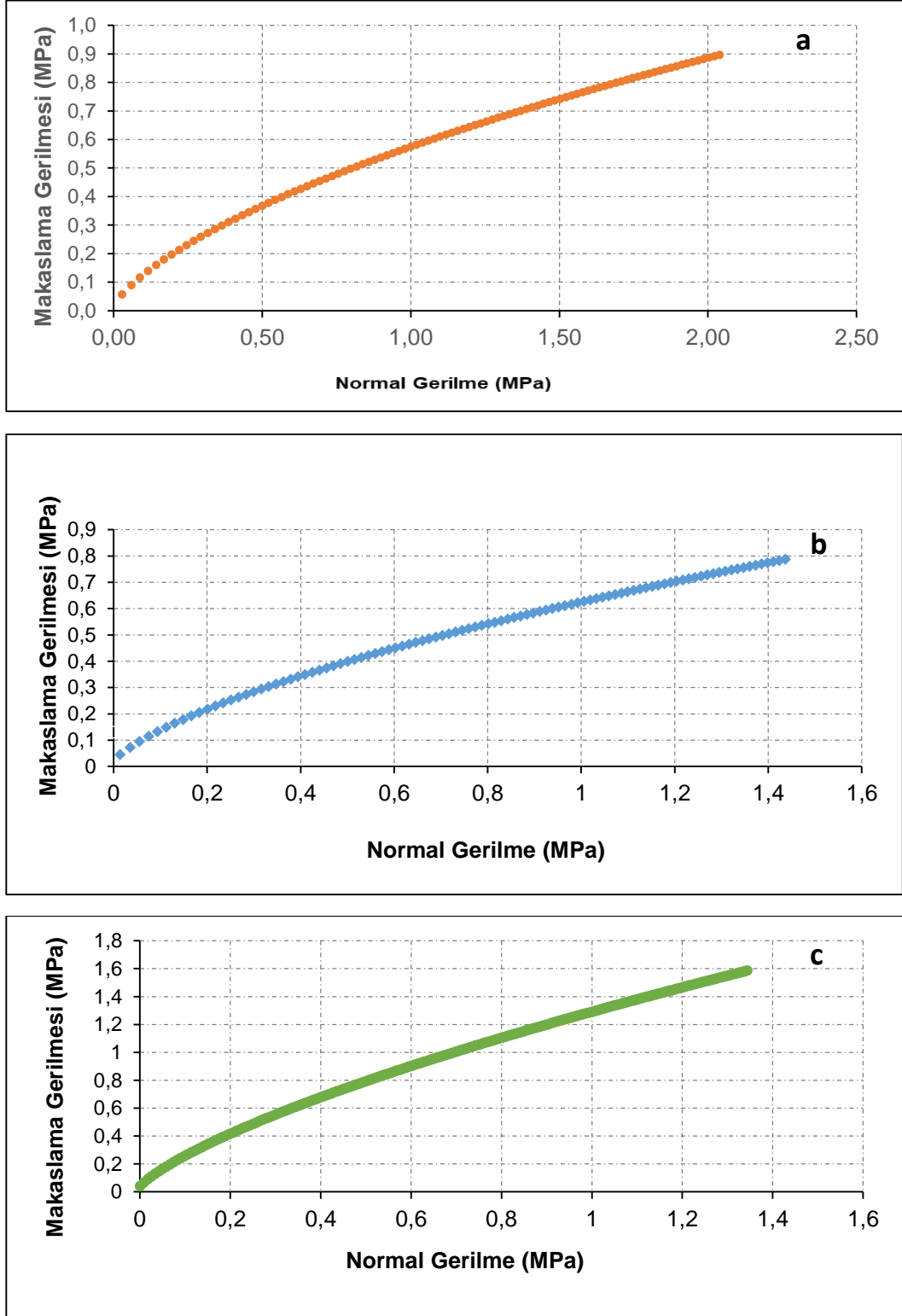
kantitatif GSI abağı kullanılarak GSI değerleri belirlenmiştir. Yapısal özellik puanı (SR) hacimsel eklem sayısı (Jv) ile belirlenirken, süreksizlik yüzey koşulu (SCR) ise profilometre ölçümleri neticesinde elde edilen yüzey pürüzlülük derecesi, bozunma puanı ve dolgu puanlarının toplamı olarak belirlenmektedir. SR ve SCR hesaplamaları sonucunda, fillit, mikaşist ve gnays için hesaplanan GSI değerleri sırasıyla 41, 35 ve 45 olmuştur (Şekil 10). Limit denge analizlerinde şevlere ait minimum güvenlik katsayısı elde edilirken Basitleştirilmiş Bishop yöntemi (Bishop, 1955), Basitleştirilmiş Janbu yöntemi (Janbu, 1973), Morgenstern-Price yöntemi (Morgenstern ve Price, 1965) ve Spencer yöntemi (Spencer, 1967) kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Kaya birimlerinin ortalama fiziko-mekanik özellikleri

**Table 1.** Average physico-mechanical properties of rock units

Birimler	Numune Sayısı	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Doymun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Kütlece Su Emme (%)	Gözeneklilik (%)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)		
						Nokta Deneyi*	Yük	Tek Eksenli Basınç Deneyi
Mikaşist	8	23.88	24.64	2.52	6.10	11.96	-	-
Fillit	8	27.15	27.21	0.23	0.64	24.54	-	-
Gnays	4	38.51	38.74	0.60	2.37	-	-	39.46

\*UCS=Is(50)\*k; k=10 kullanılarak nokta yük deneyinden hesaplanmış tek eksenli basınç dayanımı değeridir.



**Şekil 9.** Hoek – Brown yenilme kriteri kullanılarak çizilen yenilme zarfları a)mikaşist, b)fillit, c)gneiss  
**Figure 9.** Failure envelopes using Hoek – Brown failure criterion a)micaschist, b)phyllite, c)gneiss

Analizlerin yapılabilmesi için çalışma sahasından 4 adet kesit alınmış ve kesitler üzerinde hem limit denge hem de sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).

Sahadan alınan numuneler üzerinde Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Maden İşletme Laboratuvarı'nda ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya ve Zemin Mekanik Laboratuvarı'nda kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ISRM (2007) önerileri doğrultusunda deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde birimlerin fizikomekanik özellikleri belirlenmiştir (Tablo 1).

Gnays numunesinin kuru ve doymuş birim hacim ağırlıklarının yüksek çıkmasının sebebi cevherleşmenin gnays biriminde olmasından kaynaklanmaktadır. Çılaşmanın yürütüldüğü esnada Avnik (Bingöl) açık ocak demir işletmesinin mevcut derinliği 333 metredir. Açık ocak işletmesini oluşturan basamakların şev açıları 45°, ocağın genel şev açısı ise 38°'dir. Açık ocak işletmesinde şev genişlikleri 3 m, şev yükseklikleri ise 6 m'dir.

Limit denge ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Statik koşullar için gerçekleştirilen Limit denge analizleri neticesinde elde edilen minimum güvenlik katsayıları Şekil 12'de gösterilmektedir. Kesitler üzerinde yapılan analiz sonuçlarına göre statik ve kuru koşullarda şevlerde duraylılık problemleri beklenmemektedir. Fakat 1-1' kesitinin statik ve kuru durumda güvenlik katsayısı 1'e (1.23) yaklaşmaktadır. Kesitler üzerinde yapılan analizler incelendiğinde basitleştirilmiş Janbu yöntemi ile yapılan analizlerde düşük güvenlik katsayıları elde edilirken Spencer yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde daha yüksek güvenlik katsayıları bulunmuştur. Birçok araştırmacı da bu konuda

çalışmalar yürütmüş ve Morgenstern – Price ve Spencer yöntemleri kullanılarak yapılan analizlerin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir (Hammouri vd., 2008; Kadakci Koca ve Koca, 2020; Nasvi ve Krishnya, 2019). Bu durumun nedeni Morgenstern – Price ve Spencer yöntemlerinde hem moment hem de kuvvet eşitlikleri kullanılarak analizler yapılmaktadır. Son yıllarda şev duraylılık analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi de çok sık kullanılmaktadır. Makaslama dayanım azaltımı yöntemi (shear strength reduction method) şev duraylılığının ortaya konmasında sıklıkla tercih edilmektedir (Griffiths ve Lane, 1999; Hammah vd., 2005). Sonlu elemanlar analizlerinde model alt elemanlara ayrılmakta ve bu elemanlara ağ adı verilir.

Sonlu eleman yönteminde ağ tipi üniform, 6 üçgen ağ kullanılarak analizler yapılmıştır. Kaya davranışı olarak çok kırıklı- çatlaklı üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen minimum güvenlik katsayıları ve SRF değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'te de görüldüğü üzere sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen değerler ile limit denge analizleri ile elde edilen değerler uyum içerisindedir.

### PSÖDO STATİK DURAYLILIK ANALİZLERİ

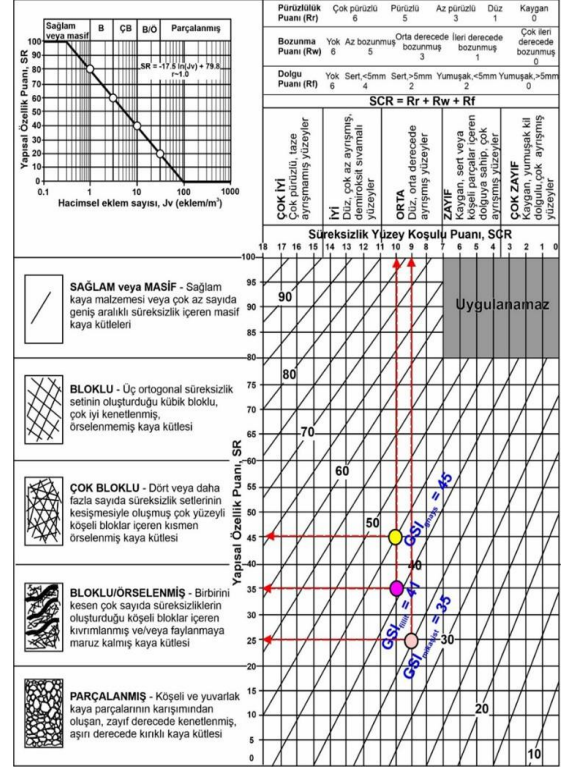
Çalışma sahasının bulunduğu Bingöl bölgesinde 1900 yılından 2020 yılına kadar en büyüğü 7,9 olmak üzere 489 adet deprem meydana gelmiştir (AFAD, 2020). İnceleme alanına ait maksimum yatay yer ivme değeri Türkiye Deprem Tehlike Haritası İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak çalışma sahasındaki en büyük yatay yer ivmesi (PGA) 0.614 g, en büyük yer hızı (PGV) ise 37.568 cm/s olarak elde edilmiştir ("TDTH Web Arayüzü", 2021). Aynı zamanda, çalışma sahasına ait ivme değeri Ulusay vd. (2004)

tarafından önerilen Eşitlik 1 kullanılarak da hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada Mw değeri bölgede oluşan en büyük deprem değeri dikkate alınarak 7.9, çalışma alanının Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu Fay Zonlarının kesim noktasında ve çevresinde irili ufaklı aktif faylar olmasından dolayı faya olan uzaklık (Re) değeri 10 km olarak alınmıştır.

$$PGA = 2.18e^{0.0218(33.3Mw-Re + 7.8427SA + 18.9282SB)} (1)$$

Burada; Mw moment magnitudü, Re çalışma sahasının faya olan uzaklığı (km), ortam özelliği olan SA ve SB kaya ortam için 0, ortamın zemin olduğu durumlarda SA=1 ve SB=0, ortamın yumuşak zemin olduğu hallerde SA=0 ve SB=1 olarak alınır.

Yukarıdaki eşitlik yardımıyla Avnik (Bingöl) açık ocak işletmesi için PGA değeri 0.553 g olarak hesaplanmıştır. Ulusay vd. (2004) tarafından önerilen eşitlik ile elde edilen PGA değeri ile Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak elde edilen PGA değerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Psödo statik analizlerde Türkiye Deprem Tehlike Haritası İnteraktif Web Uygulaması'ndan elde edilen 0.614 g değeri kullanılmıştır.



**Şekil 10.** Mikaşist, fillit ve gnays birimleri için arazi verileri neticesinde kantitatif GSI abağı ile belirlenen GSI değerleri (Sonmez ve Ulusay, 2002)

**Figure 10.** GSI values determined by quantitative GSI chart as a result of field data for micaşchist, phyllite and gneiss units

**Tablo 2.** Limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan parametreler  
**Table 2.** Parameters used in limit equilibrium analyses and finite element analyses

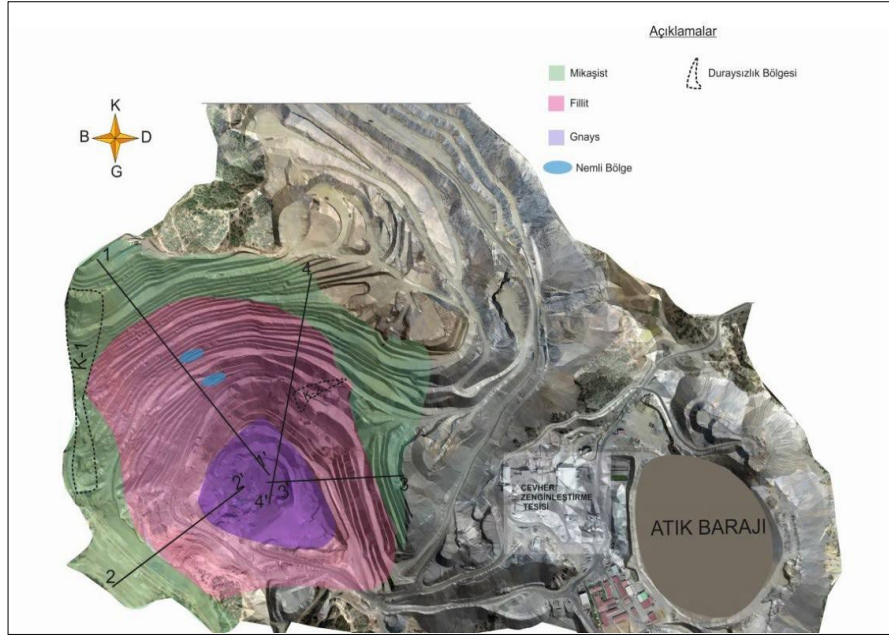
	Mikaşist	Fillit	Gnays
GSI	35	41	45
$m_b$	0.176	0.152	0.787
s	3.31e-05	8.57e-05	0.000162
a	0.516	0.511	0.508
$\sigma_{ci}^*$	32 MPa <sup>(1)</sup>	35 MPa <sup>(2)</sup>	38 MPa <sup>(3)</sup>
Sağlam kayanın elastisite modülü**	21.60 GPa	19.30 GPa	19.95 GPa
Poison oranı***	0.3	0.3	0.3
Modül oranı (MR)***	675	550	525
$m_i^{****}$	12	7	28
D****	0.9	0.9	0.9

\*<sup>(1)</sup>Yiming vd. (2019), \*<sup>(2)</sup>Xu vd. (2016), Hu vd. (2019), Singh vd. (2014), \*<sup>(3)</sup>Laboratuvar verileri ve Monticelli vd. (2020) dikkate alınmıştır. \*\*Modül oranı (MR) yaklaşımı ile belirlenmiştir. \*\*\* (Rocscience Inc., 2020c) yazılım önerileri dikkate alınmıştır.

**Tablo 3.** Kesitler üzerinde yapılan limit denge analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan SRF değerleri

**Table 3.** Minimum factor of safety values calculated from limit equilibrium analyses and SRF values from finite element analyses on sections

	Analiz Yöntemi	1-1' Kesiti	2-2' Kesiti	3-3' Kesiti	4-4' Kesiti
Limit denge yöntemi	Bishop	1.21	2.06	2.08	1.63
	GLE / Morgenstern-Price	1.22	2.18	2.11	1.64
	Janbu	1.14	1.94	1.96	1.54
	Spencer	1.23	2.19	2.11	1.66
Sonlu elemanlar yöntemi	SRF	1.20	2.03	2.21	1.67

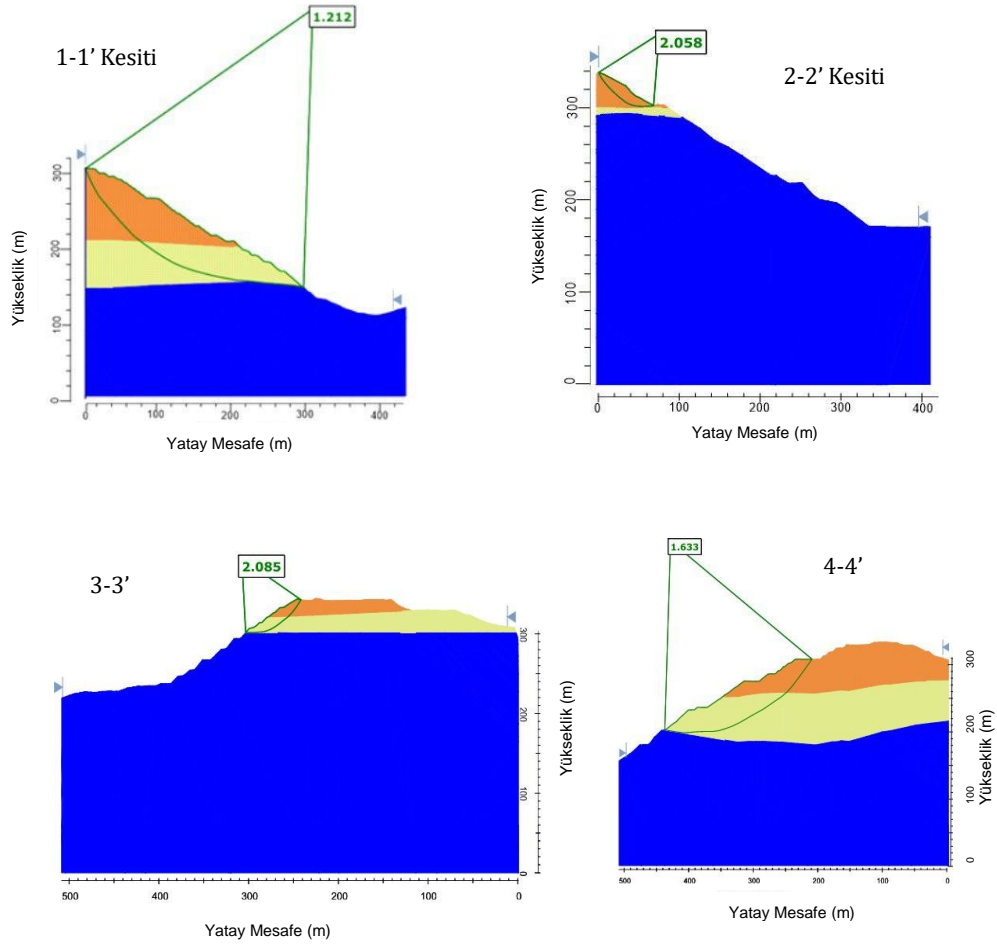


**Şekill 11.** Limit denge ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan kesitler

**Figure 11.** Cross sections used in limit equilibrium and finite element analyses

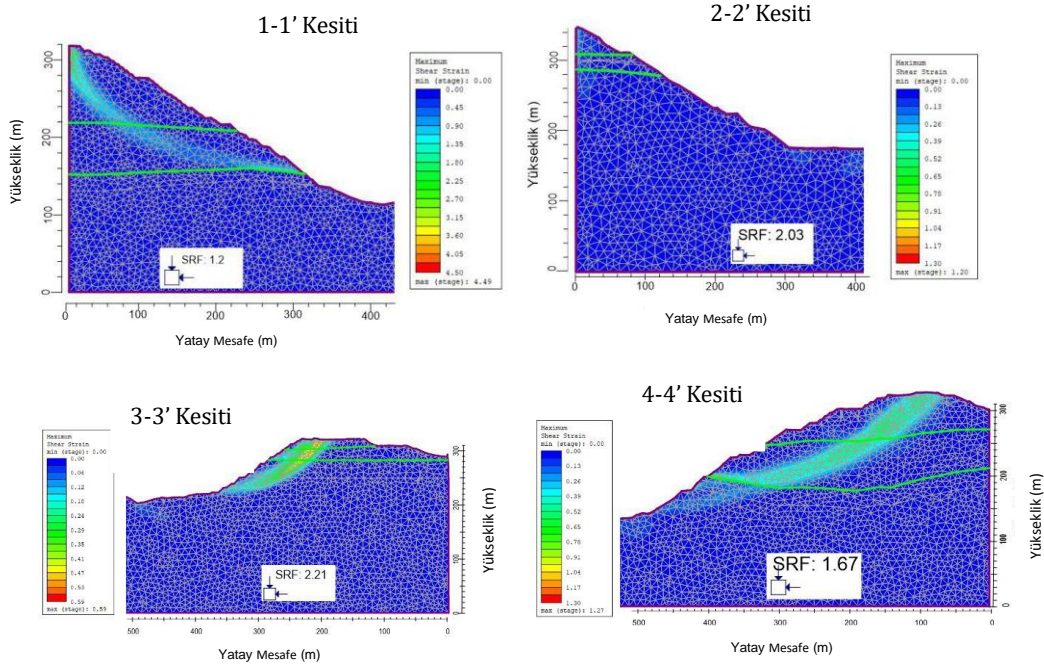
Bingöl (Avnik) açık ocak işletmesi sismik olarak aktif olan Doğu Anadolu Fay Zonu ve Kuzey Anadolu Fay Zonu'na oldukça yakın bir lokasyonda bulunmaktadır. Bu sebeple işletmede bulunan şevlerin duraylılık durumlarının depremlerinde incelenmesi önem arz etmektedir. Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerden alınan kesitler üzerinde hem sonlu elemanlar hem de limit denge analiz yöntemiyle Psödo statik analizler yapılmıştır. Psödo statik analizler Hynes – Griffin ve Franklin (1984) tarafından önerildiği şekli ile inceleme sahasında etkin olan maksimum

yatay yer ivmesinin (0.614 g) yarısı (0.307 g) seçilerek yapılmıştır (Hynes-Griffin ve Franklin, 1984). Kesitler üzerinde yapılan limit denge analizleri Şekil 14'te sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler ise Şekil 15'de gösterilmiştir. Kesitlerden elde edilen güvenlik katsayıları ve SRF değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Hem limit denge yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına göre şevlere etkiyebilecek 0.307 g yatay ivme bileşeni şevlerin duraylılığını olumsuz yönde etkilemektedir.



Birim	Renk	Birim Hacim Ağırlık kN/m <sup>3</sup>	Yenilme Tipi	UCS (Mpa)	mb	s	a
Mikaşist	<span style="color: orange;">■</span>	23.88	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	32	0.176	3.31e-05	0.516
Fillit	<span style="color: yellow;">■</span>	27.15	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	35	0.152	8.57e-05	0.511
Gnays	<span style="color: blue;">■</span>	38.51	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	38	0.787	0.000162	0.508

**Şekil 12.** Kesitler üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları  
**Figure 12.** Minimum factor of safety values obtained from limit equilibrium analysis on the sections



**Şekil 13.** Kesitler üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen dayanım azaltma faktörü (SRF)

**Figure 13.** Strength reduction factor (SRF) obtained from finite element method on the sections

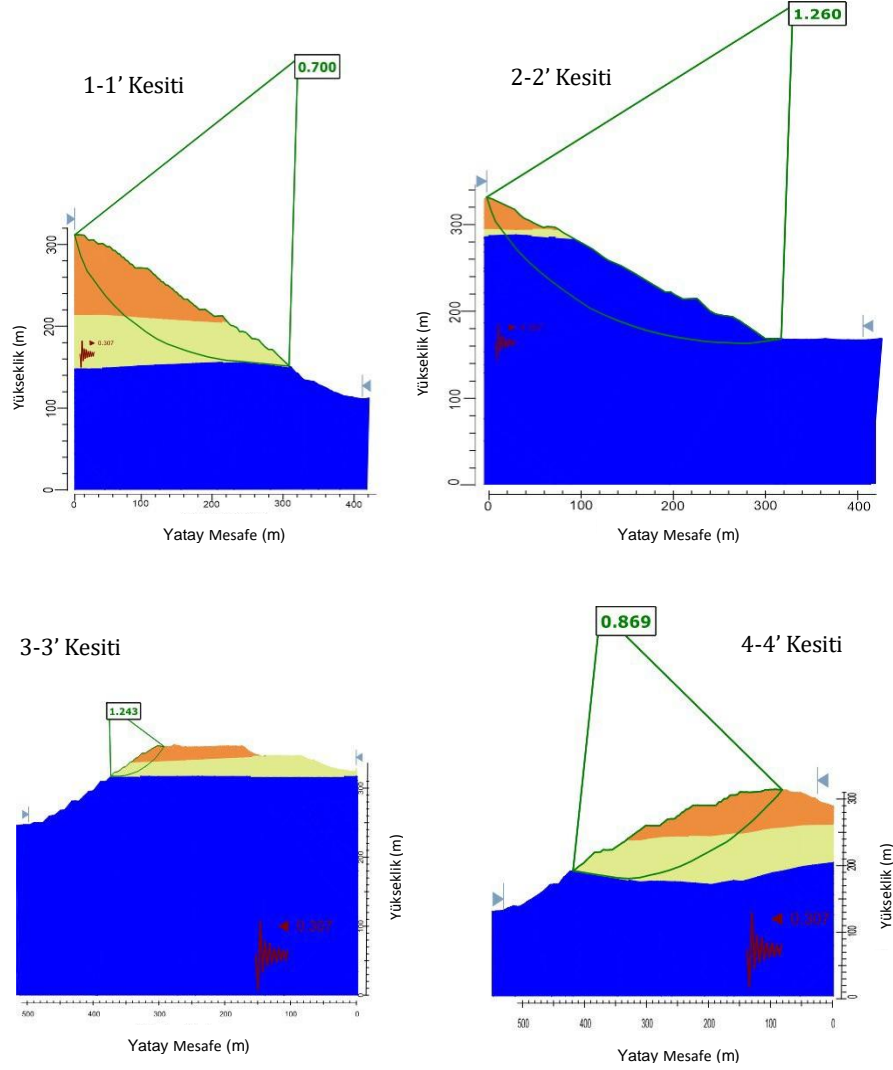
## SONUÇ

Yapılan limit denge analizleri sonuçlarına göre Janbu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde en düşük güvenlik katsayıları elde edilirken; Spencer yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde daha yüksek güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Morgenstern-Price ve Spencer yöntemi ile yapılan analizler gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Bu durumun sebebi Morgenstern-Price ve Spencer yöntemi ile yapılan analizlerde kuvvet dengesi ve moment dengesinin bir arada kullanılmasıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde her bir kesit için makaslama dayanımı azaltımı yöntemi (SSR) kullanılarak güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan

analizler neticesinde 1-1' kesiti için 1.2; 2-2' kesiti için 2.03; 3-3' kesiti için 2.21 4-4' kesiti için 1.67 güvenlik katsayıları belirlenmiştir. Hem limit denge analizleri hem de sonlu elemanları yöntemi ile statik koşullarda yapılan analiz sonuçlarına göre elde edilen güvenlik katsayılarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. 1-1' kesiti (açık ocağın kuzey yamacı) ile 4-4' kesitleri (açık ocakta oluşan duraysızlık bölgesine yakın nokta) hem açık ocak işletmesinin en tepeden en dip noktasına kadar olan alanı kapsadığından hem de geçmişte yaşanan şev duraysızlıklarına yakınlığı nedeniyle hassas kesitlerdir. Limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz sonuçları da bu kesitlerde yer alan şevlerin duraysızlığa karşı hassas olduğunu ve dikkat edilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

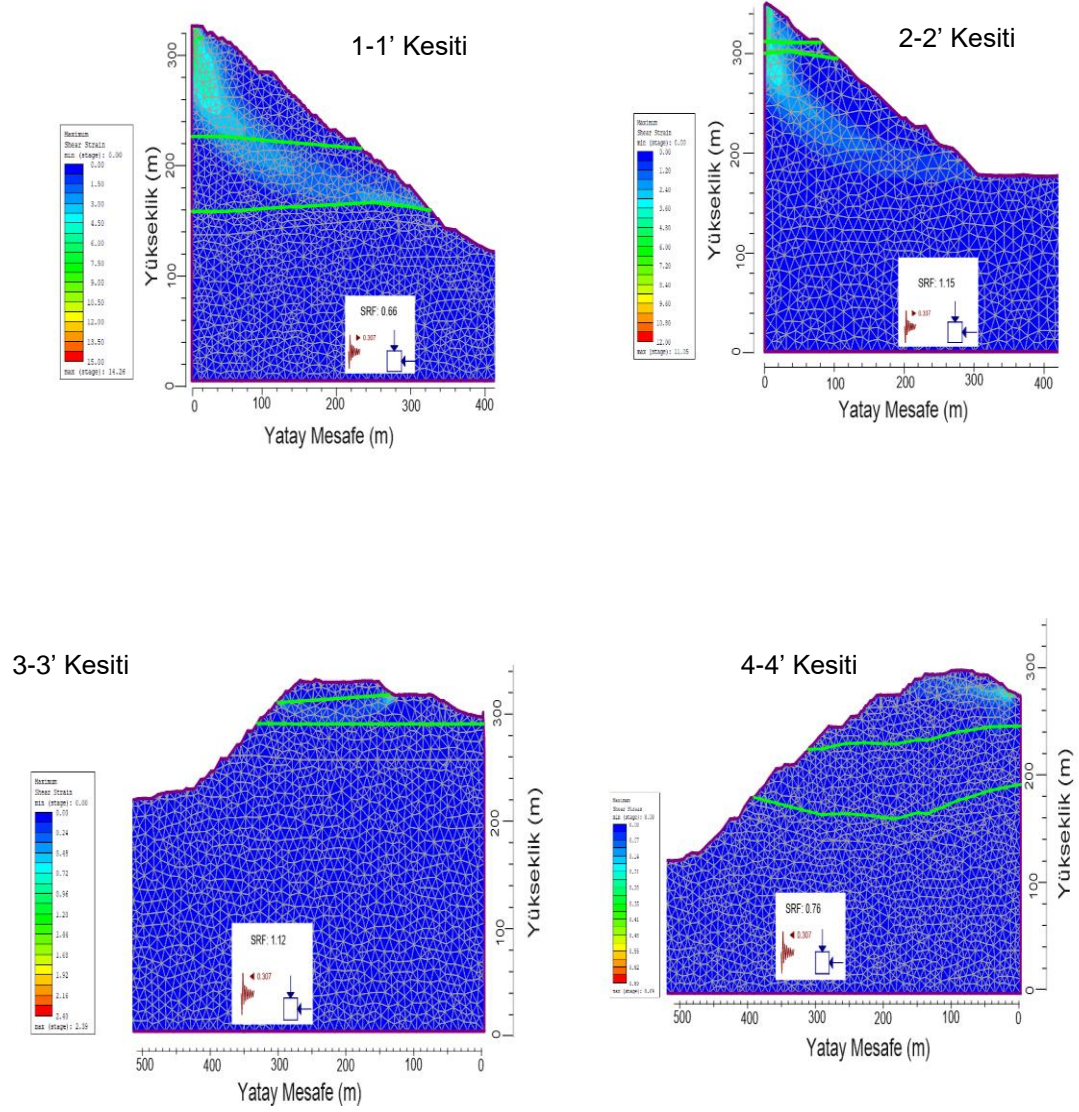




Birim	Renk	Birim Hacim Ağırlık kN/m <sup>3</sup>	Yenilme Tipi	UCS (Mpa)	mb	s	a
Mikaşist	Orange	23.88	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	32	0.176	3.31e-05	0.516
Fillit	Green	27.15	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	35	0.152	8.57e-05	0.511
Gnays	Blue	38.51	Genelleştirilmiş Hoek-Brown	38	0.787	0.000162	0.508

**Şekil 14.** Kesitler üzerinde 0.307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi

**Figure 14.** Minimum factor of safety obtained from limit equilibrium method under the 0.307g seismic load on the sections



**Şekil 15.** Kesitler üzerinde 0.307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi

**Figure 15.** Finite element analyses under the 0.307g seismic load on the sections

**Tablo 4.** Kesitler üzerinde 0.307 g yatay ivme bileşeni etkisi altında yapılan limit denge ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları ve SRF değerleri*Table 4. Minimum factor of safety calculated from limit equilibrium analysis and finite element analysis on sections under the 0.307 g seismic load*

Analiz Yöntemi	1-1' Kesiti	2-2' Kesiti	3-3' Kesiti	4-4' Kesiti
Bishop	0.70	1.26	1.24	0.87
GLE / Morgenstern-Price	0.70	1.27	1.14	0.80
Janbu	0.64	1.26	1.14	0.80
Spencer	0.70	1.29	1.27	0.88
SRF	0.66	1.15	1.12	0.76

Çalışma sahası ülkemizi kesen iki önemli fay hattı olan Doğu Anadolu Fay Zonu ile Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun kesişme noktasında sismik olarak oldukça aktif bir alanda yer almaktadır. Aynı zamanda açık ocak sahasında yapılan üretim faaliyetlerinin delme – patlatma yöntemiyle yapıldığı göz önüne alındığında açık işletmede mevcut bulunan şevlerin üzerinde dinamik yüklerin duraylılık üzerindeki etkisinin araştırılması önemli bir husustur. Dinamik koşullar için yapılan limit denge analizleri neticesinde 0.307 g yatay ivme bileşeni altında kritik limit denge koşuluna yakın veya 1.0 altında güvenlik katsayısı değerleri elde edilmiştir. Kesitler üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan ve dinamik yüklerinin etkisinin incelendiği analiz sonuçlarına göre özellikle 1-1' kesiti ve 4-4' kesiti dinamik yüklerin etkisi altında duraysız duruma gelirken diğer kesitlerin de limit dengeye yaklaştığı görülmektedir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar özellikle 1-1' ve 4-4' nolu hassas kesitlere yakın bölgelerde yapılacak delme – patlatma operasyonlarının şevleri çok fazla örselemeden kontrollü bir şekilde yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Açık ocak işletmesinde üretim faaliyetleri delme – patlatma işlemleri ile gerçekleştirilmektedir. Patlatma işlemlerinin şevlerde oluşturduğu dinamik etki göz önünde bulundurularak patlatma yapılan birime uygun olarak patlayıcı miktarları belirlenmelidir. Patlatma işlemleri yapılırken sismograflar ile ölçümler alınmalı ve patlatma öncesi ve sonrası şev duraylılık analizleri yapılarak yapılan patlatma işleminin şevler üzerinde bir etki oluşturup oluşturmadığı gözlenmelidir. Bu sayede hem delme – patlatma işlemlerinin verimi artacak hem de şev duraylılığı korunmuş olacaktır.

Derinleşen açık ocak işletmelerinde sıklıkla uygulanan ve gelişen teknoloji ile yaygınlaşan radar sistemleri kullanılarak özellikle kuzey bölgesinde yer alan şevlerdeki deformasyonlar anlık uzaktan izleme sistemleri ile izlenmeli ve olası kaymalara karşı önlemler alınmalıdır.

Açık ocak işletmelerinde şev duraylılığını etkileyen bir diğer önemli husus ise yüzey sularıdır. Yüzey suları kırıklar aracılığıyla ocak tabanına kadar taşınabilmektedir. Bundan dolayı açık ocak işletmesini oluşturan şevlerde detaylı hidrojeolojik çalışmalar yapılmalı ve bu

veriler ışığında duraylılık koşulları yeniden değerlendirilmelidir.

Açık ocak işletmesinin dinamik bir işletme olduğu ve üretim faaliyetlerinin devam ettiği göz önünde bulundurulduğunda ocağın günden güne derinleştiği bir gerçektir. Derinleşen açık ocak işletmelerinde şev duraylılığı konusuna hassasiyetle yaklaşılmalıdır. Mevcut durumda açık ocak işletmesinde bulunan basamak şevlerinin yükseklikleri 6 m, ocağın genel şev açısı ise 38°'dir. Cevherin yönelimi ve doğrultusu dikkate alınarak özellikle açık ocağın kuzey kısmında bulunan ve açık ocağın üst kotlarını oluşturan mikaşistlerin duraylılık açısından hassas oldukları göz önünde bulundurulmalı ve ocağın gelecek planlamaları bu hususlar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Bu doğrultuda kuzey yönündeki genel şev açısının bir miktar düşürülmesinde yarar vardır.

#### KAYNAKLAR

AFAD. 2020. "14 Haziran 2020 Karlıova (Bingöl) Mw 5.7 Depremine ilişkin Ön Değerlendirme Raporu" (s. 12).

Bishop, A. W. 1955. "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes". *Geotechnique*, 5(1), 7-17.

Chen, L., Cheng, C.-Pang. 2017. "Influence of failure probability due to parameter and anchor variance of a freeway dip slope slide—A case study in Taiwan". *Entropy*, 19(8), 431-431.

Erdoğan, B. 1982. "Bitlis Masifi'nin Avnik (Bingöl) Yöresinde Jeolojisi ve Yapısal Özellikleri". EÜ Yerbilimleri Fakültesi, Doçentlik Tezi.

Erdoğan, B., Dora, O. Ö. 1983. "Bitlis Masifi apatitli demir yataklarının jeolojisi ve oluşumu". *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 26, 133-144.

Bununla birlikte ocak geometrisinin değişmesine bağlı olarak şevler için belirli aralıklarla şev duraylılık analizleri yapılarak şevlerin güvenlik katsayıları belirlenmelidir.

#### KATKI BELİRTME

Bu çalışma Ogün Ozan Varol'un doktora tezinden üretilmiştir. Yazarlar, doktora çalışmasını Mühendislik 20.004 numaralı proje ile destekleyen Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğüne ve açık ocak maden sahasında çalışmamıza olanak sağlayan, arazi çalışmalarında her türlü desteği sağlayan DİMİN A.Ş yetkililerine ve teknik elemanlarına teşekkürlerini sunarlar.

Yazarlar, dergi editörüne ve hakemlere yapıcı eleştirileri ile makalenin gelişmesinde sağladıkları dikkate değer katkı için teşekkür ederler.

Eskikaya, Ş., Karpuz, C., Hindistan, M. A., Tamzok, N. 2005. "Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı". Basım, TMMOB-Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 4-5.

Griffiths, D. V, Lane, P. A. 1999. "Slope stability analysis by finite elements". *Geotechnique*, 49(3), 387-403.

Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B., Curran, J. H. 2005. "The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Brown criterion".

Hammouri, N. A., Malkawi, A. I. H., Yamin, M. M. A. 2008. "Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach". *Bulletin of*

- Engineering Geology and the Environment, 67(4), 471-478.
- Hu, Y., Ren, F., Ding, H., Fu, Y., Tan, B. 2019. "Study on the process and mechanism of slope failure induced by mining under open pit slope: a case study from Yanqianshan iron mine, China". *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- Hynes-Griffin, M. E., Franklin, A. G. 1984. "Rationalizing the seismic coefficient method.". Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.
- ISRM. 2007. "The complete ISRM suggested methods for rock characterization. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), *Testing and Monitoring:974-2006*". *Testing and Monitoring*, 628-628.
- Janbu, N. 1973. "Slope stability computations". Publication of: Wiley (John) and Sons, Incorporated.
- Kadakci Koca, T., Koca, M. Y. 2020. "Comparative analyses of finite element and limit-equilibrium methods for heavily fractured rock slopes". *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1-13.
- Keskin, M. Ö. 2008. "Çukurova yöresi kuvarsit işletmelerinde bilgisayar destekli şev dizaynı ve şev stabilite analizleri". Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, 256.
- McCombie, P., Wilkinson, P. 2002. "The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis". *Computers and Geotechnics*, 29(8), 699-714.
- Monticelli, J. P., Ribeiro, R., Futai, M. 2020. "Relationship between durability index and uniaxial compressive strength of a gneissic rock at different weathering grades". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(3), 1381-1397.
- Morgenstern, N. R. u, Price, V. E. 1965. "The analysis of the stability of general slip surfaces". *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Nasvi, M. C. M., Krishnya, S. 2019. "Stability Analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) Using Finite Element and Limit Equilibrium Methods". *Indian Geotechnical Journal*, 49(6), 620-634.
- Paşamehmetoğlu, A. G., Bilgin, A., Özgenoğlu, A., Karpuz, C. 1980. "Avnik (Bingöl) Demir Yatakları Açık İşletme Şev Duraylılığı İncelenmesi", 20.
- Rocscience Inc. 2020a. "2D Limit equilibrium slope stability analysis". Toronto, Ontario, Canada: Rocscience.
- Rocscience Inc. 2020b. "RS2 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes". Toronto, Ontario, Canada. Geliş tarihi gönderen [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)
- Rocscience Inc. 2020c. "RSData" (Versiyon 1.007). Rocscience.
- Singh, R., Umrao, R., Singh, T. 2014. "Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 845-857.
- Sonmez, H., Ulusay, R. 2002. "A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies". *Yerbilimleri*, 26(1), 77-99.
- Spencer. 1967. "A method of analysis of the stability of embankments assuming

parallel inter-slice forces". *Geotechnique*, 17(1), 11-26.

TDTH Web Arayüzü. 2021, Ekim 30. Geliş tarihi 11 Şubat 2022, gönderen <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>

Ulusay, R. 2001. "Jeoteknik Etütler için Veri Toplama ve Değerlendirme Teknikleri". Konulu Eğitim Seminerinin Kaynak Yayına Ek Notlar, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Vakfı, Ankara.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H., Gokceoglu, C. 2004. "An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey". *Engineering Geology*, 74(3-4), 265-291.

Varol, O. O., Ayhan, M., Akin, M. 2021. "Kaya kütle makaslama dayanımının geri analiz yöntemi ile belirlenmesi: Bir vaka analizi". *Scientific Mining Journal*, 60(3), 137-145.

Xu, N., Zhang, J., Tian, H., Mei, G., Ge, Q. 2016. "Discrete element modeling of strata and surface movement induced by mining under open-pit final slope". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88, 61-76.

Yang, X. L., Yin, J. H. 2004. "Slope Stability Analysis with Nonlinear Failure Criterion". *Journal of Engineering Mechanics*, 130(3), 267-273.

Yılmaz, O. 1975. "Cacas bölgesi (Bitlis masifi) kayaçlarının petrografik ve stratigrafik incelenmesi: Türkiye Jeol". *Kur. Bült*, 18(1), 33-40.

Yılmaz, O. 1971. "Etude pétrographique et géochronologique de la région de Cacas (partie méridionale du massif de Bitlis, Turquie)-Anatolie".

Yiming, W., Siame, T., Bowa, V. M. 2019. "Slope Stability of the Middle Stack of an Open Pit Mine". *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8, 61-69.

Zhu, D. Y., Lee, C. F., Jiang, H. D. 2003. "Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis". *Geotechnique*, 53(4), 377-395.