



Bir açık ocak örneğinde yamaç molozu akma mekanizmasının belirlenmesi

Determination of slope debris flow mechanism in an open pit mine

Enver Vural Yavuz^{1,*} 

¹ Türk-Alman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34820, İstanbul, Türkiye

Öz

17 Kasım 2016 tarihinde, Türkiye'nin güneydoğusundaki Siirt ilinin Madenköy ilçesinde bulunan bir açık ocak bakır madeninde meydana gelen heyelan sonucunda 16 işçi hayatını kaybetmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, kazanın nedenlerini araştırmak, mekanizmasını ortaya koymak ve gelecekte meydana gelebilecek bu tür kütle hareketlerine karşı hazırlıklı olmaktır. Çalışma alanı Bitlis Masifi ile başlayan Eosen yaşlı birimler ile kuzeyden başlayıp güneye doğru gençleşen Paleozoik birimlerden oluşmaktadır. Daha sonraki incelemeler hidrojeolojik koşulların ve jeolojik yapının birimleri etkileyen en önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Çalışma alanının jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çok sayıda sondaj kuyusu açılarak alanın 3 boyutlu özellikleri ortaya çıkarılmış ve kesitler elde edilmiştir. Kütle hareketlerini en iyi temsil eden kritik jeoteknik sayısal kesit seçilmiş ve bölgenin duraylılığı Plaxis 2D ve 3D Connect Edition v22 yazılımı kullanılarak kuru ve suya doymun koşullarda sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Açık ocak madeni, Kütle hareketi, Moloz akması, Sonlu elemanlar yöntemi, Geri analiz.

1 Giriş

Bu çalışmanın amacı, açık ocak yöntemiyle işletilen bir bakır madeninde 17 Kasım 2016 tarihinde meydana gelen moloz akması (debris flow) olayının geri analizini (back analysis) gerçekleştirmektir. Maden sahasında yer tabanlı bir radar aleti çalışıyor olmasına rağmen, akmanın boyutu ve zamanlaması tahmin edilememiş ve olay sonucunda çok sayıda can kaybı yaşanmıştır. Madenköy bakır madeni, Türkiye'deki toplam bakır üretiminin yaklaşık %12'sini karşılamakta olup üretim daha önce yeraltı madenciligi yöntemi ile gerçekleştirilmişse de; işletme 2014 yılından sonra açık ocak olarak üretime devam etmiştir.

Ölümlere sebep olan şev yenilmesinin en olası nedeni ise maden sahasındaki jeoteknik ve hidrojeolojik özelliklerdir [1]. Jeolojik ortamdaki su içeriği arttığında boşluk suyu basıncı artmakta ve efektif gerilmede bir azalmaya yol açmaktadır [2-5]. Böylece ortamın kayma mukavemeti azalmakta ve bu da şev stabilitesinde negatif bir etkiye neden olmaktadır.

Yamaç molozu ve ayrılmış kayalarda eğime bağlı hareketler, özellikle yoğun yağış dönemlerinde oldukça yaygındır. Ayrışma miktarı ve yağmur suyunun kaya kütesinin orijinal yapısına ne ölçüde zarar verdiği, şev

Abstract

On 17 November 2016, 16 workers lost their lives as a result of a landslide in an open pit copper mine in Madenköy district of Siirt province in southeastern Turkey. The main aims of this study is to investigate the causes of the accident, to reveal its mechanism and to be prepared for such mass movements that may occur in the future. The study area consists from the north and getting younger towards the south. Further investigations have shown that hydrogeological conditions and geological structure are the most important factors affecting the units. A large number of boreholes were drilled to reveal the 3D features of the area and cross sections were obtained. The most critical geotechnical numerical cross section that best represents the mass movements was selected and the stability of the area was analysed by finite element method in dry and water saturated conditions using Plaxis 2D and 3D Connect Edition v22 software.

Keywords: Open pit mine, Mass movement, Debris flow, Finite element method, Back analysis.

yüzeyinden uzaklığa göre değişir. Ayrışma faktörleri şevin mukavemet ve geçirgenlik özelliklerini sürekli olarak değiştirilmekte ve böylece şevin yenilmeye karşı hassasiyetini sürekli olarak artırmaktadır. Kurak mevsimde, yeraltı suyu tablası ana kayanın altında derinlerde olabilir. Yamaç molozu olarak tanımlanan ayrılmış kayaç tipik olarak bunun üzerinde yer alır. Bu nedenle, malzeme suya doymun değildir ve boşluk suyu basınçları atmosfere kıyasla negatiftir. Bu negatif gözenek suyu basıncı "matrik emme" (matric suction) olarak adlandırılır. Şev stabilitesine ilişkin değerlendirmelerde, matrik emişin zemin mukavemeti üzerindeki etkisi sıklıkla göz ardı edilmektedir. Ancak, şev stabilitesi konularının anlaşılması, negatif boşluk suyu basıncındaki değişimler de dahil olmak üzere doymamış zeminin kayma mukavemeti hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir [6].

Özellikle, yüzeysel yağış kaynaklı heyelanların yenilme ve yenilme sonrası aşamaları sonlu elemanlar tekniği (FEM) kullanılarak çalışılmış [7]; bu yöntem bu tür durumlarda sıklıkla uygulanmıştır. FEM tabanlı simülasyonlar sonucunda elde edilen sayısal veriler, artan yağış şiddeti ve süresi ile birlikte şevin dayanımının (FoS) azaldığını göstermiştir [8]. Bir başka çalışmada, geliştirilmiş limit dayanım yöntemi (ELSM) ve dayanım azaltma yönteminin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: vural.yavuz@tau.edu.tr (E.V. Yavuz)

Geliş / Received: 22.03.2023 Kabul / Accepted: 22.05.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1269412

(SRM) yanı sıra limit denge yöntemi (LEM) ve iki sonlu eleman yaklaşımı ile belirlenen kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik faktörleri karşılaştırılmıştır. Analizler bir dizi örnek iki boyutlu şev durumu üzerinde yapılmıştır. İlgili akış kuralı kullanılarak elde edilen bulgulara göre, LEM iki sonlu eleman yaklaşımından biraz daha düşük bir güvenlik faktörü üretmiştir ve bu da iki sonlu eleman yönteminin tipik olarak mükemmel bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ELSM analizi için gerilme alanına ilişkin temel bir koşulun gerekli olduğu gösterilmiştir [9].

Şev stabilite analizlerinde kullanılan limit denge yöntemleri (LEM'ler) [10-16], dilimler ve önceden tanımlanmış kayma yüzeyleri varsayarlar. Basitlikleri ve güvenilir güvenlik faktörü (FoS) değerleri nedeniyle hala tasarım araçları olarak kabul edilmekle birlikte, kırılma yüzeyinin şekli ve dilimler arası konumlara etki eden kuvvetlerle ilgili varsayımlarla ilgili çeşitli dezavantajlar barındırmaktadırlar [17].

Yamaç ya da şev stabilitesi çalışmaları, neredeyse tamamen suya doygun basamaklı şevler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmaların çok azı, yenilmenin genellikle yağış nedeniyle meydana geldiği, doygun olmayan yamaç ya da şevlerinin incelenmesinde uygulanmaktadır. Şev yenilme mekanizması, "matric suction" da bir azalmaya neden olan su sızıntısını içerir. Bu da efektif gerilmeyi düşürür ve sonuç olarak ortam mukavemeti, şevde dengenin artık sürdürülemeyeceği bir noktaya düşer [6].

2 Materyal ve metot

Çalışmaya konu olan bakır madeni sahası, Siirt'in kuzeydoğusunda, 45 km mesafede yer almakta olup, Siirt'e yaklaşık 1 saat'de ulaşılabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu.

Bölgenin jeolojik özelliklerinin ve inceleme alanını oluşturan jeolojik birimlerin ve araştırılacak ortamın hidrojeolojik niteliklerinin daha net bir şekilde tanımlanması için bölgenin genel tektonik durumu kısaca açıklanmış ve daha sonra kronostratigrafik birimlerin tanıtımı sunulmuştur.

Çalışma alanı, Türkiye'de yaygın etkileri olan Alp Orojenezinin ürünü olan Alp-Himalaya sıradağlarında yer almaktadır. Kuzeyden Van Gölü, Karasu ve Murat Nehirleri, güneyden Anadolu Örtüşme Zonu ile sınırlıdır. Çalışma alanı ayrıca doğu, batı ve güney yönlerinde ofiyolitli kompleks serileri ile çevrili yaklaşık D-B doğrultulu Bitlis Masifi'nin orta doğu kesiminde yer almaktadır.

Bitlis Masifi, Türkiye'nin doğu ve güneydoğu Anadolu'sunda çok geniş bir alanın kırılma ve kıvrım mekanizmasını kontrol etmektedir. Kuzeyde Avrasya ile güneyde Afrika-Arap Plakası arasında yer alan Anadolu yarımadasının jeolojik yapısı, bu iki plakanın sürekli hareketleri ve bu iki plaka arasındaki eski ve yeni Tetis Okyanuslarının jeodinamik evrimi nedeniyle gelişmiştir [18]. Arap platformu ve kuzeydeki Avrasya Plakası tarafından oluşturulan ve yukarıda açıklandığı gibi jeodinamik bir oluşumla karakterize edilen yüzey kırık sistemleri, neo-tektonik ve aletsel dönemlerde oluşmuştur [19].

Bu jeodinamik sistem, Arap ve Anadolu levhalarının N-S yönündeki karşılıklı hareketlerine bağlı olarak bölgesel kıvrımların ve bindirmelerin E-W yönünde oluşmasına neden olmaktadır [18, 20-30].

Çalışma alanında yaşlıdan gence doğru sıralanan litostratigrafi birimleri izleyen bölümlerde ayrı ayrı tanıtılmaktadır (Şekil 2).

2.1 Spilit

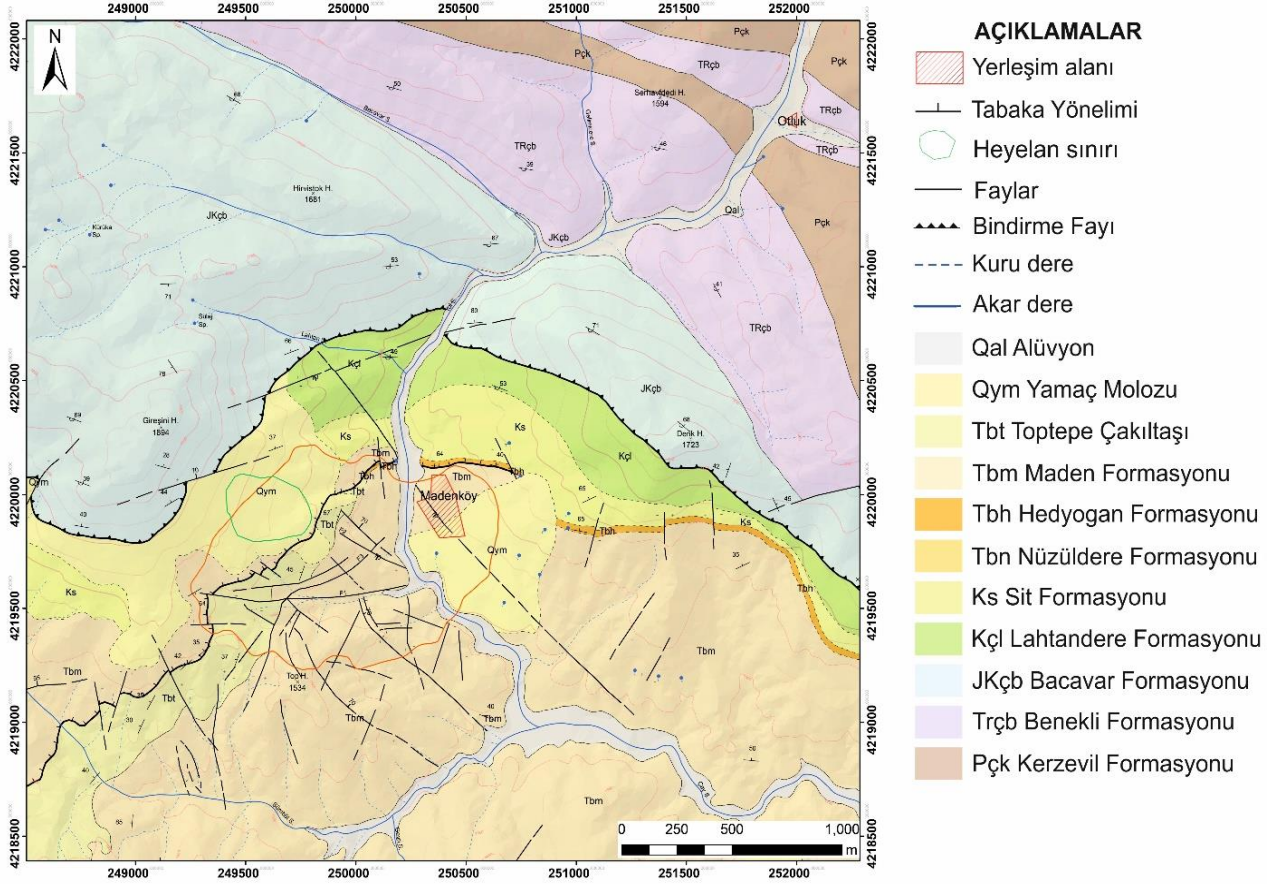
Alt-Orta Eosen yaşlı spilit, Maden Formasyonunun tabanında yer alan Maden Volkanitinin en alt litolojik birimidir. Spilitler, porfir spilitlerle geçişlidir ve yerel çalışma alanında dayklar tarafından kesilir.

Çapları 0.2-1.5 m arasında değişen küresel yastık lavlara sahiptirler. Pirit, kalkopirit, kalkosen ve kovellit minerallerinin kümelenildiği yerlerde cevher yataklarını oluşturur. Birimin alternans yüzeyi koyu yeşil renklidir. Altere olmuş kısımlarda kaolinleşme, kloritleşme, serisitleşme ve limonitleşme gözlenir. Kalkopirit, hematit ve manyetit taze örneklerin gaz boşluklarında amigdaloidal dokulu ikincil kalsit, kuvars ve rekristalize zeolit ile birlikte bulunur. Albit çubukları çoğunlukla killi, çubuk şeklindeki augitler ise opaktır [27]. Deniz tabanındaki sedimantasyon sırasında gravite tektonizmasına bağlı olarak kırmızı renkli pelajik çamurtaşları ile birlikte bulunur [20].

2.2 Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit

Jura - Alt Kretase yaşlı kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit birimi Bacavar Dağı'nın doğu kesimini sınırlayan bindirme kuşağının kuzeyinde oluşur. Bölgesel ölçekte Bacavar Formasyonu'nun ana litolojik birimlerinden oluşmaktadır.

Taban litojisini oluşturan kireçtaşları alterasyon yüzeylerinde gri-beyaz renkli, taze yüzeylerde ise açık gri renklidir. Üzerindeki dolomitler siyah renkli, ince dokulu ve bol kırıklıdır.



Şekil 2. Çalışma alanı ve çevresini içeren "1/25.000 Ölçekli Jeolojik Harita Derlemesi" ([31]'den [32] tarafından değiştirilmiştir)

Üste doğru ince taneli, sert, kırılğan, köşeli kırıklı dolomitik kireçtaşı dönüşürler. En üstte görülen kireçtaşları beyaz, gri, siyahımsı renkli ve masiftir. Bu durum dizinin bu kesiminde -kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit- araldanmasının olduğunu göstermektedir [31]. Metamorfizma koşulları, sekansların basınç ve sürtünme yüzeylerine maruz kalan farklı kısımlarda sertleşmesine ve mermerleşmesine neden olur. Kireçtaşlarının en belirgin yapısal özelliği farklı yönlerde gelişen kırıklar boyunca oluşan beyaz kalsit damarlarıdır.

Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit dizileri, Triyas yaşlı karbonatlı şeyl, kireçtaşı (Benekli Formasyonu) dizileri veya Üst Permiyen yaşlı fosilli dolomitik kireçtaşı, rekristalize kireçtaşı (Kerzevil Formasyonu) dizileri üzerine açılmalı olmayan uyumsuzlukla bindirmektedir [31].

2.3 Kireçtaşı, spilit

Üst Kretase yaşlı kireçtaşı, spilit birimi Gireşini Tepesi'nin güneyindeki Lahtandere bölgesinden bölgenin doğusuna kadar uzanır. Bu birim Lahtandere Formasyonu'nun ana litolojilerini içerir. Birim, kireçtaşı bantları ile arakatlı akış lavları ve yastık lavları olarak yapılandırılmış spilitlerle karakterize edilir. Dizinin en alt seviyesindeki kireçtaşları, üzerledikleri kireçtaşı, dolomitik

kireçtaşı, dolomit dizisine (Bacavar Formasyonu) ait kireçtaşları ile aynı özelliklere sahiptir.

Kireçtaşı, spilit (Lahtandere Formasyonu) dizisi, altındaki Jura-Alt Kretase yaşlı kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit (Bacavar Formasyonu) dizisi ile geçişlidir. Kırzalı bölgesinde Orta-Üst Paleosen-Alt-Orta Eosen yaşlı spilit (Maden Formasyonu) dizisi ve porfir spilit (Maden Formasyonu) dizisi tarafından üstten uyumsuzlukla örtülür. Madenköy ve Akyokuş köyleri arasında Üst Kretase yaşlı spilit, çamurtaşı, çört (Sit Formasyonu) dizisi ve porfir spilit, diyabaz, çamurtaşı, radyolarit, radyolariyen kireçtaşı (Sit Formasyonu) dizisi ile düşey ve yanal geçişlidir [31].

2.4 Porfiri spilit, diyabaz, çamurtaşı, radyolarit, radyolar kireçtaşı

Üst Kretase yaşlı porfir spilit, diyabaz, çamurtaşı, radyolarit, radyolariyen kireçtaşı Bacavar Dağı'nda spilit, çamurtaşı, çört birimine paralel olarak uzanır. Sit Formasyonu jeolojik biriminin üst kısmını oluşturur. Dizinin ana litolojik birimleri yeşil renkli, ince radyolarit ve çamurtaşı bantlı, yataklanma benzeri akma yapıları volkaniklerdir. Üst Kretase yaşlı alloktan bir birim olan Guleman Ofiyolitleri (Serpantiniter) tarafından ileri

makaslama ve aşırı ezilmiş zon özelliğine sahip tektonik bir kontak (tektonik Zon) tarafından üstlenilmiştir.

2.5 Yeniden kristalleşmiş kireçtaşı blokları

Kirazlı köyünün yerleşim alanını içeren geniş bir bölgede Kuvaterner yaşlı rekristalize kireçtaşı blokları görülmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Çalışma alanının Arap ve Anadolu plakaları arasındaki çarpışma bölgesinde yer alması ve bunun sonucunda ortaya çıkan kırıklı yapı, su çıkışlarının varlığını tetiklemektedir. Kazı şev basamaklarının birçok noktasında, bazen kümeler halinde yeraltı suyu çıkışları bulunmaktadır. Bunlar bazı şev basamaklarında stabilite sorunlarına, kaya kaymalarına ve taban basamağında çökme gibi kütle hareketlerine neden olmaktadır.

Kazı şevleri tarafından kesilen suya doymuş litostratigrafik birimlerin varlığı ve bunların depolanmış su biriktirme mekanizmasının su salınımlarının başlıca nedenleri olduğu iyi bilinmektedir. Açık ocak maden sahasındaki tüm yeraltı suyu çıkış noktalarının jeolojik (litolojik, yapısal) özellikleri bir çalışma ile belirlenmiş ve su çıkışlarının "fay, çatlak, tabaka" tipi süreksizliklerden kaynaklandığı ortaya konmuştur [32].

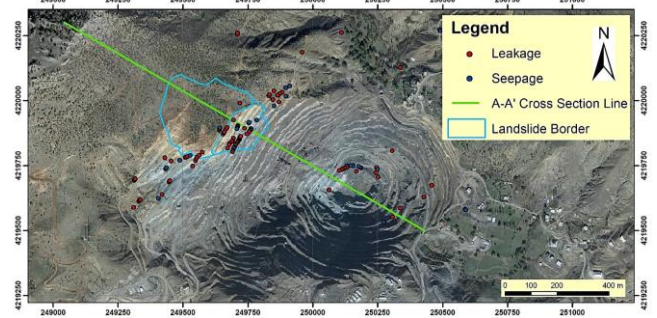
17 Kasım 2016 tarihinde meydana gelen sınırlı bir moloz akması, ölümcül kayıplara ve madencilik faaliyetlerinin askıya alınmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda erken uyarı sistemlerinin gerektirdiği şekilde basamaklardaki olası deformasyonları izlemek için maden alanına yer tabanlı radarlar (IBIS FM) [33] kurulmuş olmasına rağmen moloz akması çok hızlı, beklenmedik ve öngörülemez bir şekilde meydana gelmiştir [34, 35].



Şekil 3. 1929-2016 Dönemini Kapsayan Kümülatif Uzun Yıllar Yağış Ortalaması [32].

Çalışmanın amacı ile ilgili hidrojeolojik ve meteorolojik ölçüm verilerine göre uzun yıllara ait yağış grafiği sonuçları incelendiğinde, her 20 yılda bir yağışlı ve kurak dönemlerin birbirini takip ettiği görülmektedir. Grafikteki yağışların 1999-2016 yılları arasındaki dönemden sonra artış eğiliminde olduğu görüldüğünden, önceden bölgenin yağışlı döneme geçeceği öngörülerek önlem alınması gerektiği saptanmıştır (Şekil 3). Hidrojeolojik sonuçlar ışığında, su çıkış noktalarının açık ocak maden sahasının KB şevini çevreleyen zeminde yoğun olarak yer aldığı görüldüğünden,

bu durumda şev molozunun suya doygunluğunun artarak kayma olayını tetikleyeceği ortaya çıkmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışma sahasındaki su çıkış noktaları.

Kaymanın olası nedenlerini belirlemek amacıyla IBIS-FM'e dayalı ölçüm çalışmalarında alan, duraysızlığın meydana geldiği kısım ve iki farklı akma bölgesi olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. IBIS-FM, açık ocağın kuzeybatı şevini gözlemlemek için güneydoğu şevine kurulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. Açık ocak maden sahasının güneydoğudan kuzeybatıya görünümü.

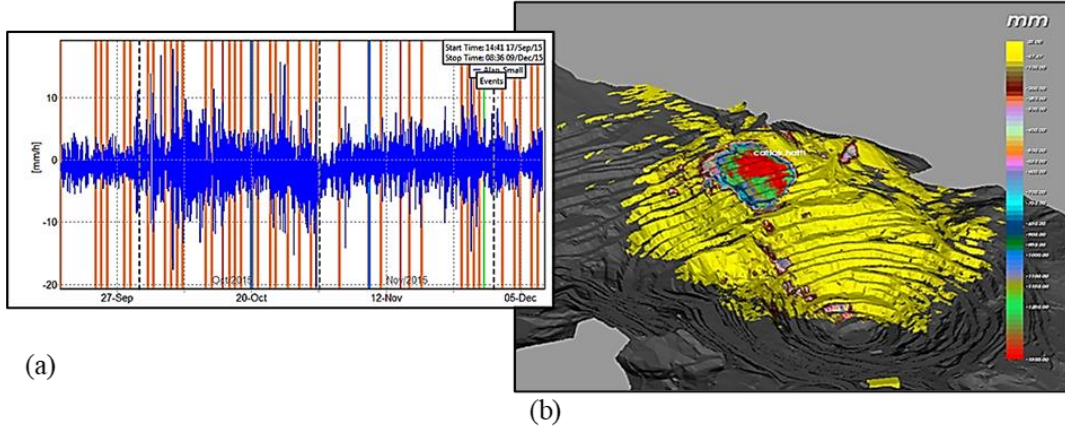
2015'in son üç ayındaki ölçümlerden sonra, 2016'da mevsimin kurak geçmesi ve bu kuraklık nedeniyle kayma riskinin azalması nedeniyle 21 Mayıs - 1 Ekim tarihleri arasında günlük raporlar ve değerlendirmeler alınmamıştır. Ekim 2016'da deplasman ölçümlerine yeniden başlanmış ve heyelan meydana gelene kadar Ekim ve Kasım aylarında açık ocak işletmesinin kuzeybatı yamacındaki alanda ölçümler yapılmıştır [36].

Bölgenin kuzeybatısında yapılan ölçümler ve aylık toplam yağış verileri birlikte yorumlandığında, 2015 yılındaki ölçümlere göre malzemenin 20 günlük periyotlar boyunca şişme özelliği gösterdiği tespit edilmiştir.

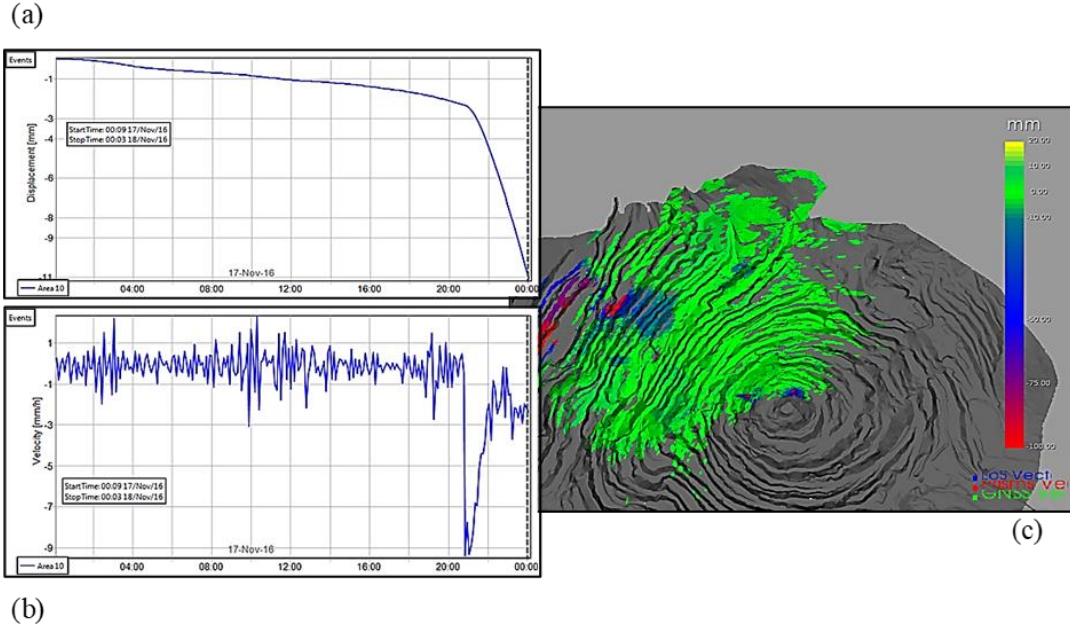
Negatif deplasman eğilimine sahip olan toprak malzemesi 2015 yılı Ekim ayı sonunda artan yağışlarla birlikte kil içeriğinden dolayı su emerek şişmektedir.

2015 yılında son üç aya ait Deplasman Haritası ve Grafiği incelendiğinde ise (Şekil 6) kümülatif hareket miktarının 159 cm civarında olduğu ve hareket hızının yaklaşık 0.65-0.80 mm/saat olduğu tespit edilmiştir.

Ocak 2016'da en fazla yağışın düştüğü alan negatif deformasyona maruz kalmıştır. Sonrasında negatif yer değiştirmede azalma olsa da pozitif yer değiştirme (şişme) tespit edilmemiştir.



Şekil 6. 2015 yılının son üç ayı için kümülatif yer değiştirmeler; (a) hız grafiği, (b) 3B gösterim.



Şekil 7. 17.11.2016 tarihli Akma Hareketi gerçekleştiğindeki (a) Deplasman grafiği, (b) Hız grafiği ve (c) Deplasman haritası

5-25 Şubat 2016 tarihlerinde yağışın azalması ile negatif deformasyonun azaldığı ve malzemenin şişmediği gözlemlenmiştir. Mart ayında aylık toplam 168.7 mm yağış düşmesine rağmen Şubat ayında daha fazla hareket gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebinin 2016 Ocak ayında meydana gelen kar yağışı ve aşırı yağış oranı olabileceği düşünülmektedir.

Ölçümlerin yeniden başladığı Ekim ayı başında, heyelanın meydana geldiği KB yamacının üst kısımlarında negatif deformasyon günde 10 mm'ye ulaşmış ve 2.5 m genişliğinde 10 m uzunluğunda bir çatlak oluşmuştur. Kasım ayının başlamasıyla birlikte deformasyon miktarı iki katına çıkarak günde 20 mm'ye ulaşmış ve hareketin hızı ortalama 0.80 mm/saat olmuştur. Bu aşamayı takip eden 2 hafta boyunca (4.11-17.11.2016) deformasyon ve hız oranları önceki değerlerine geri dönmüştür.

17.11.2016 tarihinde saat 20.30'da açık ocağın KB şevindeki şev molozu 5 cm/sn. hızla SE yönünde hareket

ederek basamakları doldurmuş ve 16 işçinin ölümüne neden olmuştur (Şekil 7 ve 8).



Şekil 8. Açık ocak maden alanının akma sonrası görünümü (güneydoğudan kuzeybatıya).

3.1 Sayısal geri analiz

Araştırmacılar [10-16] tarafından geliştirilen ve şev stabilite analizlerinde basitlikleri ve güvenilir FoS (güvenlik faktörü) değerleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan limit denge yöntemlerinin (LEM'ler), yenilme yüzeyinin şekli ve dilimler arasında etkili olan kuvvetler gibi konularda bazı sınırlamaları bulunmaktadır [17].

Sonlu elemanlar analiz metodu (FEM), şev stabilitesi analizleri için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu alanda kullanılabilecek üç farklı FEM analiz metodu bulunmaktadır. Bunlardan ilki, bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen Mukavemet Azaltma Yöntemidir (SRM) [9, 37-44]. SRM Yöntemine göre daha az kullanılan ikinci bir yaklaşım Yerçekimi Artışı Yöntemidir. Üçüncü yaklaşım ise şevlerin stabilitesini analiz etmek için de kullanılan sonlu elemanlar limit analizidir.

SRM (ϕ/c azaltma yöntemi) kullanılarak bir güvenlik analizi yapılırken, $\tan \phi$ (içsel sürtünme açısı) ve C (kohezyon) aşağıdaki kurala göre azaltılır **Denklem (1)**,

$$\begin{aligned} \Sigma Msf &= \tan(\phi'_{input}) / \tan(\phi'_{reduced}) \\ &= c'_{inp} / c'_{reduced} \end{aligned} \quad (1)$$

FEM analizinde ϕ/c azaltma yöntemi olarak da bilinen mukavemet azaltma yöntemi (SRM), modeldeki zeminin mukavemetini yapay olarak azaltmayı içerir. Bu, modelde dengesiz kuvvetlere neden olur ve bunlar daha sonra hesaplanarak deformasyonlar saptanır.

Bu yöntemin amacı, zemin mukavemetini kademeli olarak azaltmak ve yenilmenin meydana geldiği andaki mukavemet azaltma faktörünü belirlemektir. Bu mukavemet azaltma faktörü daha sonra zemin mukavemeti açısından bir güvenlik faktörü (FoS) olarak düşünülebilir. Bu yöntemin temelindeki fikir, mukavemette küçük bir azalma uygulandığında, gerilmelerde ve yer değiştirmelerde büyük bir değişikliğe yol açmasıdır. Bu da, Plaxis Kullanım Kılavuzuna göre, yenilmenin ne zaman meydana geldiğini belirlenmesini sağlar.

Literatürde şev stabilite analizi için kullanılan FEM modellerinin çoğu Lagrangian çerçeve içinde oluşturulmuşlardır. Ancak bazı durumlarda, çözümün yakınsamaması başarısızlığa yol açabildiğinden FEM, şev stabilitesi analizi için yumuşama-sertleşme modeli gibi daha karmaşık bünye modellerini hesaba katabildiği için LEM'e göre bir avantaja sahiptir [43]. FEM ayrıca güvenlik faktörüne (FoS) ek olarak gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin raporlanmasına da izin vermektedir [45].

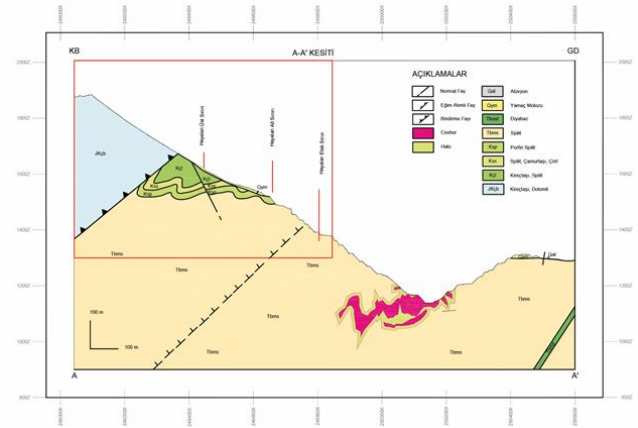
Şev stabilite analizi çoğunlukla bir şevin veya heyelanın birincil düzlemsel ana bölümüne uygulanır. Şev stabilite analizi üç boyutlu (3D) olarak uygulandığında, şev geometrisi, jeoloji, etkin yükler, su basınçları, kayma mukavemetleri ve kayma yüzeyinin tasarımı gibi faktörler de dikkate alınır. Bu durum, uygulanan analizi iki boyutlu (2D) veya düzlemsel analize göre daha gerçekçi hale getirebilir, ancak aynı zamanda bilinmesi gerekli daha fazla şev parametrelerine ihtiyaç duyulur [46].

3 boyutlu limit denge teknikleri, 2 boyutlu yöntemlerin dikey dilimleri yerine dikey sütunlar kullanır, ancak hesaplamaya yönelik iki yaklaşım genellikle aynıdır.

Bununla birlikte, 2 boyutlu teknikler için büyük bir zorluk yaratan dilimler arası kuvvet sorunlarını 3 boyutlu analizde çözmek daha zordur. Bishop'ın yinelemeli yöntemi [11] ve Janbu'nun yinelemeli, düzeltme faktörü yöntemi [47] gibi tüm metodolojiler, dilimler arası kuvvetlerin yatay olduğu konusunda üstü kapalı varsayımlarda bulunur. Kuvvet çözümleme yönleri dikkatlice seçilerek, yatay kuvvet elemanları Güvenlik Faktörü hesaplamasından çıkarılabilir [46].

Bu çalışmada, tüm açık ocağı kapsayan KB-GD doğrultulu bir kesit seçilmiş ve kesitin enkaz akışının meydana geldiği kısımda geri analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9).

Daha önce yapılan bir araştırmada, heyelan sonrası açık ocak madenini yeniden yapılandırmak için stabilite çalışmaları yapılmıştır [1]. İlk olarak, çeşitli jeolojik formasyonlardaki basamakları tasarlamak için analizler gerçekleştirilmiş ve basamak geometripleri, yükseklikleri ve açılıları belirlendikten sonra, çeşitli yönlerde ve derinliklerde yapılan bu değerlendirmelere bağlı olarak basamakların toplam şev açılıları tasarlanmıştır. Yeraltı ve yüzey suyunun durumu nasıl etkileyebileceğini anlamak için, analizler hem kuru hem de doymuş koşullar için gerçekleştirilmiştir. Bu ön örneklerin LEM analizine tabi tutulmasının ardından her bir alan için en iyi durum seçilmiştir. Açık işletmeye ait basamak yükseklikleri, basamak eğimleri ve basamak genişlikleri dahil olmak üzere ideal basamak geometrisi bu çalışma sonucudur. Stabilite analizleri Rocscience Slide programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tasarımın stabilitesi Janbu yaklaşımı ve Basitleştirilmiş Bishop yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, analiz edilen tüm bölümlerde, özellikle şev molozu altındaki formasyonlarda durumun stabil olduğu ve tüm açık ocakta tehlikeli bir ortam bulunmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Analizlerde kullanılan kritik bölüm A-A' ve hesaplamaların yapıldığı bölge (kırmızı ile sınırlanmış alan).

Bu nedenle çalışmamızda, hareketin analizi için seçilen bölgede şev molozu altındaki malzemenin duraylı olduğu varsayılmış ve hesaplamalar altta duraylı bir malzeme ve üstünde şev molozu olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada, hem kesit eğim yönü hem de kayma yönü aynı

yöndedir. Analizlerde Plaxis 2D ve 3D Connect Edition, v.22 yazılımı kullanılmıştır. Tercih edilen FEM yöntemi, moloz akışına çok iyi uyması ve mukavemet azaltma faktörü SRF'nin farklı senaryolar için kontrol edilebilmesi ve jeolojik kesit ortamını yorumlayabilmesi nedeniyle seçilmiştir.

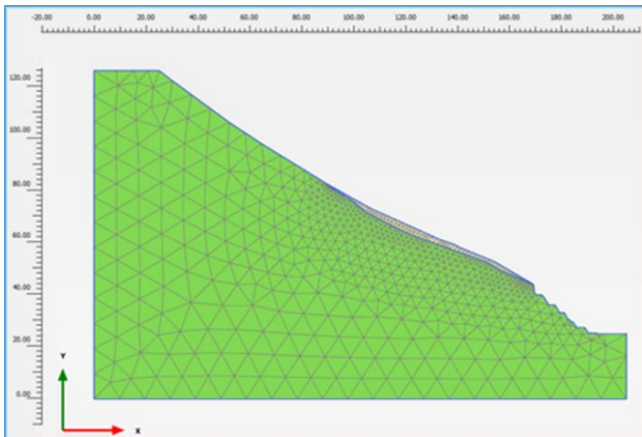
3.1.1 İki boyutlu analiz

Hesaplamalar sırasında ilk olarak maden sahası için belirlenen jeomekanik büyüklükler kullanılarak 2 boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmış ve seçilen kritik kesit için güvenlik faktörü hesaplanmıştır. Daha sonra aynı alanın uygun koşullar altında 2D analizi gerçekleştirilmiş ve bu koşullar altında güvenlik sayısı hesaplanmıştır. 2D analizler için Plaxis 2D Connect Edition, v22 yazılımı kullanılmış ve (205,125) metrelik bir model boyutu seçilmiştir. Sonlu eleman ağı spesifikasyonu 15 düğümlü bir düzlem gerilme modelidir (Şekil 10).

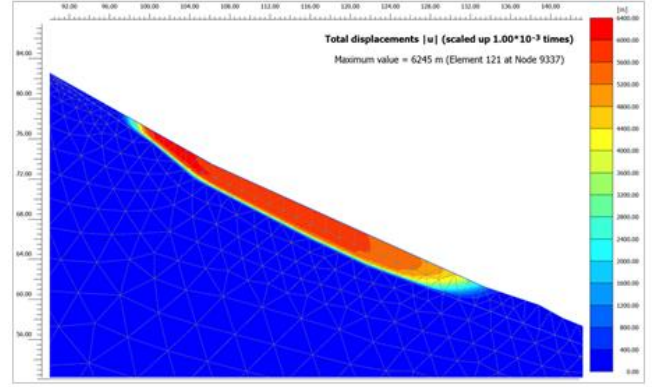
Heyelan analizi için iki temel jeolojik birim tanımlanmıştır. Bunlardan ilki maden sahasında akış hareketinin gerçekleştiği şev molozu, diğeri ise şev molozunun altında yer alan ana kayadır. Şev molozunun malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Daha önce yapılan stabilite analizinde [1] şev molozu altındaki birimlerin güvenli olduğu tespit edildiğinden bu çalışmada maden sahasında oluşan şev basamaklarının güvenliği incelemeye dahil edilmemiştir. Ana kaya'ya ait jeomekanik parametreler ise Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Stabilite analizinde şev molozu birimi için seçilen malzeme özellikleri.

Kırılma Kriteri		Mohr-Coulomb
Birim Hacim Ağırlık	γ	19 kN/m ³
Elastisite Modülü	E	20 MPa
Poisson Oranı	ν	0.30
Kohezyon	C	0.01 MPa
İçsel Sürtünme Açısı	ϕ	35°
Kısa vadeli stabilite koşulu için Güvenlik Faktörü		1.3
Uzun vadeli stabilite koşulu için Güvenlik Faktörü		1.5



Şekil 10. Plaxis 2D sonlu elemanlar modellemesi.

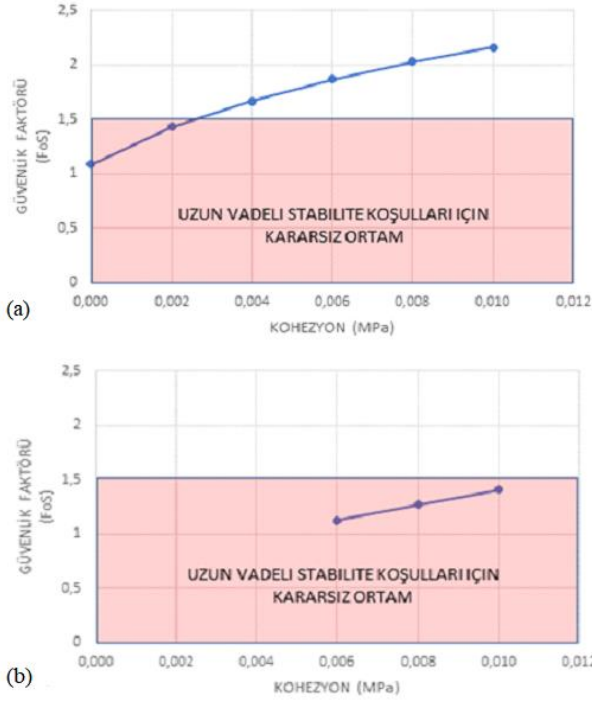


Şekil 11. Güvenlik Faktörü (FoS) = 2.162 için yenilme yüzeyi hareket mekanizması

Tablo 2. Ana kayayı oluşturan malzemelerin jeomekanik parametreleri [1].

Jeolojik Birimler	Tanım	Elastisite Modülü E (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı γ (MN/m ³)	Poisson Oranı ν	Kohezyon C (MPa)		İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)	
					Max	Min	Max	Min
Altere Spilit	Kss	8900	0.030	0.3	4	-	65	-
Porfiri Spilit	Ksp	7900	0.030	0.3	3	-	52	-
Kireçtaşı, Spilit	Kçl	24500	0.027	0.3	8.4	-	66	-
Kireçtaşı, Dolomit	Jkçb	15500	0.025	0.3	3.15	-	65	-
Spilit	Tbms	8800	0.030	0.3	4	-	65	-

Şev altındaki bu birim için yüksek mekanik büyüklükler tanımlanmıştır. 2D analizler sonucunda, kuru koşullar altında, seçilen bu büyüklüklerle güvenlik faktörünün $FoS = 2,162 > 1,500$ olduğu bulunmuştur, bu da şev stabilitesinin uzun vadeli stabilite koşulları için güvenli olduğunu göstermektedir (Şekil 11). Maden sahası için duyarlılık analizleri yapıldığında ve farklı mekanik büyüklükler ile güvenlik faktörü arasındaki ilişki incelendiğinde Tablo 3 ve Tablo 4'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Akma hareketi, belirlenen mekanik değerlerin etkisi ile şev molozu içerisinde gerçekleşmektedir (Şekil 12). Ancak arazi eğiminin yüksek olmasına rağmen heyelanın alt sınırında morfolojinin topuk etkisi yapması veya bu kesimde maden işletmesinin şev basamaklarının malzemenin hareketini engellemesi sebebiyle güvenlik faktörü yüksektir ve sistem güvenli görünmektedir.



Şekil 12. Yamaç molozunda güvenlik faktörü - kohezyon arasındaki ilişki; (a) kuru koşullarda, (b) doymuş koşullarda.

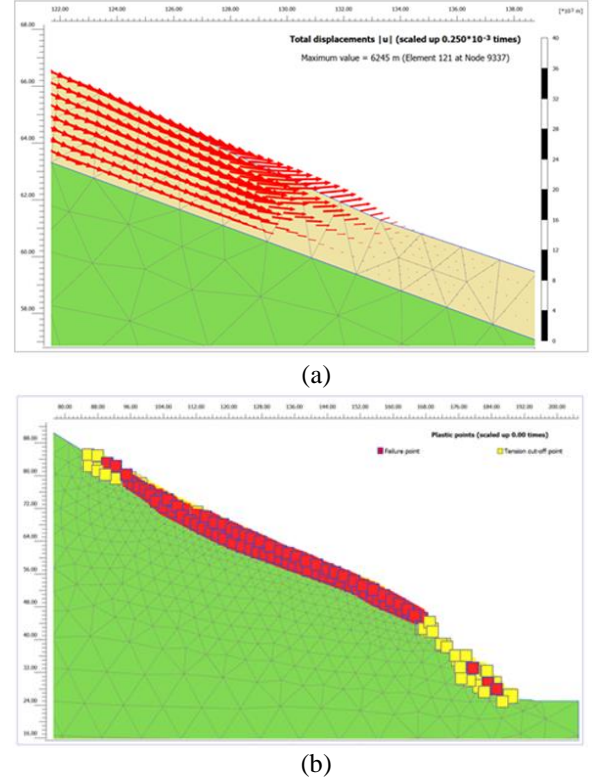
Tablo 3. $C = 0.01$ MPa sabit ve $\emptyset =$ değişken değerler için 2D analizlerden elde edilen FoS sonuçları karşılaştırılması.

İçsel Sürtünme Açısı \emptyset (°)	Güvenlik Faktörü (FoS)	
	Kuru Ortam	Doymuş Ortam
35	2.162	1.509
30	1.902	1.280
25	1.660	1.164
20	1.442	1.051
15	1.234	-
10	1.033	-
5	-	-
0	-	-

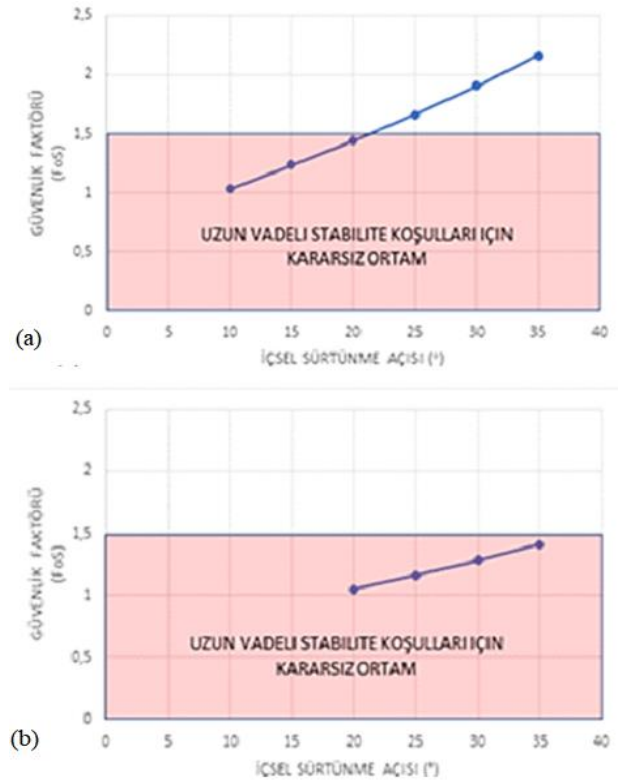
2D analizde arazinin düzlem yönündeki eğimi dikkate alınmadığı için bu analiz sonucu yanıltıcıdır. Arazinin düzlem yönündeki eğiminin düşük olması malzemenin bu yönde hareket etmesine neden olacak ve sonuç olarak tüm şev yüzeyi hareket edecektir (Şekil 13).

Tablo 4. $\emptyset = 35^\circ$ sabit ve $C =$ değişken değerler için 2D analizlerden elde edilen FoS sonuçlarının karşılaştırılması

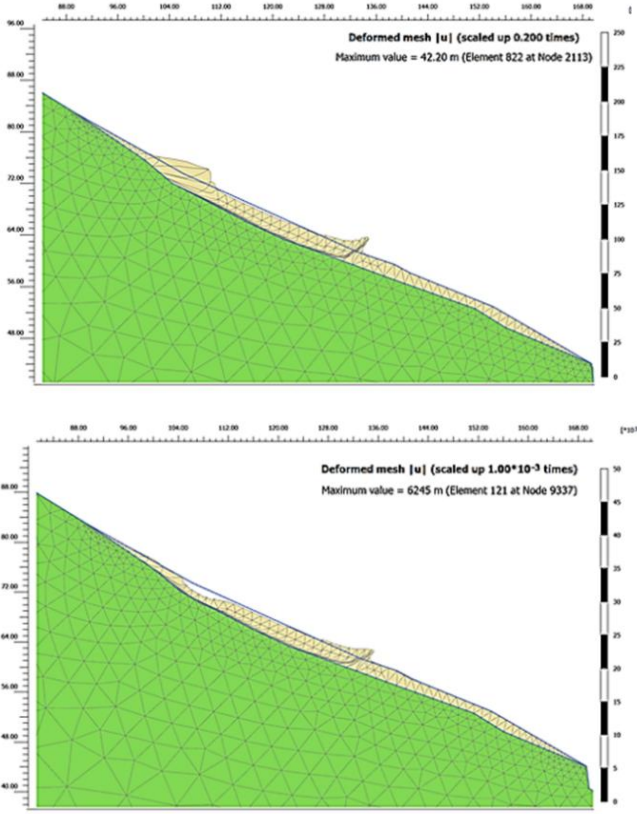
Kohezyon (MPa)	Güvenlik Faktörü	
	Kuru Ortam	Doymuş Ortam
0.010	2.162	1.409
0.008	2.029	1.272
0.006	1.887	1.124
0.004	1.668	-
0.002	1.428	-
0.000	1.088	-



Şekil 13. (a) Yamaç molozundaki yer değiştirme vektörleri. (b) Yamaç molozundaki kırılma noktaları.



Şekil 14. Yamaç molozunda güvenlik faktörü (FoS) ve iç sürtünme açısı (\emptyset) arasındaki ilişki; (a) kuru koşullarda, (b) doymuş koşullarda.

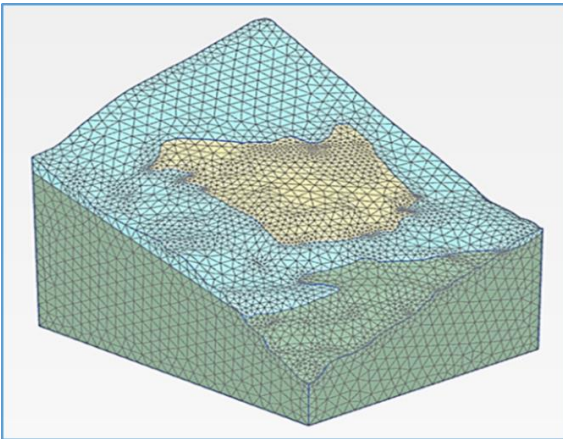


Şekil 15. İki farklı koşulda elde edilmiş "2D deforme ağı" görüntüleri, kuru koşullarda (üstte), doymun koşullarda (altta).

Analiz sonuçlarına göre, iç sürtünme açısı 25° 'den az olduğunda, $FoS < 1.500$ olur ve uzun vadeli güvenlik koşulu karşılanamaz. İç sürtünme açısı 20° 'den az olduğunda, kısa vadeli şev güvenliği koşulu (min $FoS = 1.3$) sağlanamaz ve sistemde 10° için stabilite koşulu gerçekleştirilemez (Şekil 14 ve Şekil 15).

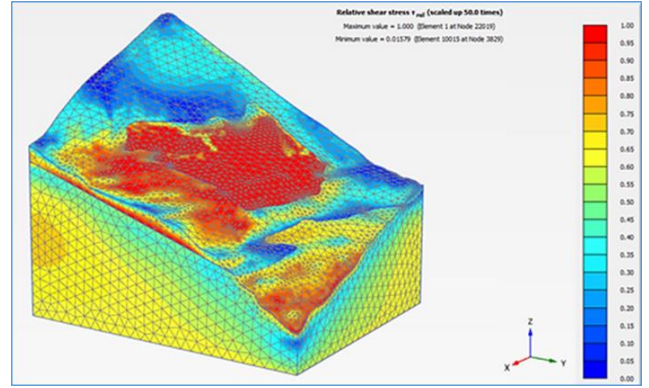
3.1.2 Üç boyutlu analiz

İki boyutlu analizlerin ardından, araştırma alanı aynı jeomekanik parametreler kullanılarak 3 boyutlu olarak yeniden modellenmiş ve güvenlik faktörleri hesaplanmıştır.



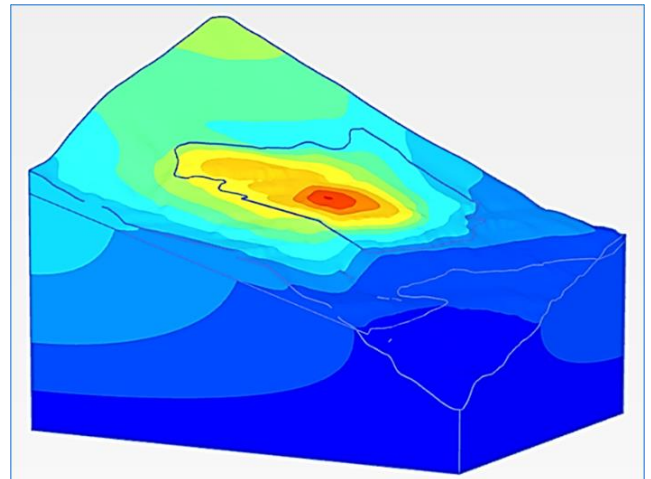
Şekil 16. Plaxis 3D sonlu elemanlar modellemesi.

3D modellemede, şev molozunun kuru koşullarda bile güvensiz olduğu görülmüş, bu nedenle doymun koşullarda 3D modelleme yapılmamıştır. Hesaplamalar Plaxis 3D Connect Edition v22 ile gerçekleştirilmiştir. Analiz modeli olarak heyelan alanını kapsayacak şekilde $555 \times 700 = 388.500 \text{ m}^2$ 'lik bir alan kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağı için her bir elemanda 10 düğüm noktası alınmış ve toplam 45.093 eleman ve 69.502 düğüm noktası tanımlanmıştır (Şekil 16).



Şekil 17. Kayma gerilmeleri etkisi altındaki malzemenin (yamaç molozu) sınırları (Kırmızı renkle gösterilen alan toprak kaymasına neden olabilecek güvensiz alanlardır).

Analizlerde $C = 0,01 \text{ MPa}$ ve $\phi = 35^\circ$ varsayıldığında, 2D modelde güvenlik faktörü $2,162 > 1,500$ ($FoS = 2,162 > 1,5$) olarak hesaplanmış ve sistem yeterli güvenliğe sahip olarak değerlendirilmiştir. Ancak model aynı mekanik büyüklüklerle 3D olarak çözüldüğünde, güvenlik faktörünün $1,147 < 1,3$ ($FoS = 1,147 < 1,3$) olduğu ve kısa vadeli güvenlik koşulunu bile karşılamadığı ortaya çıkmaktadır (Şekil 17).



Şekil 18. 3D analizlere göre, akma öncesi yer değiştirmelerin meydana geldiği alan.

Analizlerdeki bu önemli farklılığın nedeni, 2D analizler için seçilen kritik kesitin kişinin deneyimine bağlı olmasıdır. Gerçekçi bir proje tasarımı için 2D modellerde farklı

yönlerde çok sayıda kesit dikkate alınmalıdır. Zaman ve maliyet açısından daha zor olmasına rağmen, 3D analizler heyelan modellemesi için daha iyi sonuçlar vermektedir. Yenilme öncelikle şev molozunun topuk bölgesinde meydana gelmekte ve bu bölümde zeminin hareketi üst bölgeden malzeme akışına neden olmaktadır (Şekil 18).

4 Sonuçlar

Türkiye'nin güneydoğusundaki Madenköy açık ocak bakır madeni şev stabilitesi açısından incelenmiş ve Kasım 2016'da madene meydana gelen ve 16 kişinin hayatını kaybettiği heyelanın olası nedenlerini anlamak için bir çalışma yürütülmüştür. Karmaşık bir jeolojik ve hidrojeolojik yapıya sahip olan çalışma alanındaki tüm jeolojik yapılar tespit edilmiş ve daha önce yapılan diğer çalışmalar da dikkate alınarak hareketin meydana geldiği alanda FEM yöntemi ile 2 ve 3 boyutlu stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Açık ocağın tamamını kapsayan bir kesit seçilmiş ve enkaz akışının gerçekleştiği alanda geri analiz için hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çalışma alanı, Türkiye'de yaygın etkileri olan Alp Orojenezi'nin ürünü olan Alp-Himalaya Dağ silsilesinde ve ayrıca doğu, batı ve güney yönlerinde ofiyolit kompleks serileri ile çevrili olan Bitlis Masifi'nin orta doğu kesiminde yer almaktadır. Bitlis Masifi, Türkiye'nin Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde çok geniş bir alanın kırık ve kıvrım mekanizmasını kontrol etmektedir.

Çalışma alanının Arap ve Anadolu plakaları arasındaki çarpışma bölgesinde yer alması ve bunun sonucunda ortaya çıkan kırıklı yapı, su çıkışlarının varlığını tetiklemektedir. Kazı şev basamaklarının birçok noktasında, bazen kümeler halinde yeraltı suyu çıkışları bulunmaktadır. Bunlar bazı şev basamaklarında stabilite sorunlarına, kaya kaymalarına ve taban basamağında çökme gibi kütle hareketlerine neden olmaktadır.

Çalışmanın amacı ile ilgili hidrojeolojik ve meteorolojik ölçüm verilerine göre uzun yıllara ait yağış grafiği verileri incelendiğinde her 20 yılda bir yağışlı ve kurak dönemlerin birbirini takip ettiği görülmektedir. 1999-2016 yılları arasındaki dönemden sonra grafikteki yağışların artış eğiliminde olduğu ve bölgenin bu tarih aralığında yağışlı döneme geçiş yaptığı görülmektedir.

Hidrojeolojik sonuçlar ışığında, su çıkış noktalarının açık ocak maden sahasının kuzeybatı şevini çevreleyen basamaklar üzerinde yoğun bir şekilde yer aldığı görülmekte ve bu durumda şev molozunun suya doygunluğunun artarak kayma olayını tetikleyeceği ortaya çıkmaktadır. Taneler arasındaki kohezyon azaldığı gibi, kayacın su doygunluğu da artmaktadır. Başka bir deyişle, bu senaryo dolaylı olarak heyelanlara neden olan önemli bir unsurdur.

Çökme bölgesinde seçilen kesite uygulanan ortamın kuru ve doymuş koşullar altındaki stabilitesi 2D ve 3D analizlerle belirlenmiş ve çökmenin ana nedeninin şev molozunu doyuran zemin suyundaki artış olduğu tespit edilmiştir. Malzemenin suya doygun olduğu düşüncesi, hareket gününden önceki üç günlük yağmurla desteklenmektedir. Birçok şev hareketi yağış veya kar erimesi, sızıntı vb. nedenlerden kaynaklanır ve boşluk suyu basıncı, özellikle

şev molozunda kuvvet dengesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. FEM yöntemi kullanılarak yapılan 2D ve 3D stabilite analizlerinin sonuçları, şevin doymuş koşullar altında stabil olmadığını göstermiş ve gelecekte benzer olayların önlenmesi için sürekli izleme ve güvenlik önlemlerinin uygulanmasının önemini vurgulamıştır.

Toplam iç gerilmenin veya efektif gerilmenin yalnızca bir kısmı gerçekte toprak yapısına (iskelet) iletildiğinden ve denge sıkıştırılmaz su tarafından sağlandığından, ortamın deformasyonu esas olarak malzemedeki sıvı ve katı fazların bir arada bulunmasından kaynaklanır. Kayma gerilmesinin, katı parçacıklar arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşimlerin neden olduğu içsel sürtünme ve kohezyon ile bir malzeme boyunca iletildiği düşünülmektedir.

Stabiliteyi etkileyen riskler, toprak katmanlarının geçiş bölgelerindeki (kaya katmanının üzerindeki yumuşak toprak) mukavemet değişiklikleri, mevsimsel yüksek yoğunluklu yağışlar ve hızlı kar erimesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Yamaç molozu da geçirimsiz bir süreksizlik olan kaya malzemesinin üzerinden kaymıştır. Bu nedenle, geçirimsiz bölgenin üzerinde geçirimli bir malzeme varsa, geçirimli bölgenin doygunluğa neden olarak çökmeye karşı korunması gerekir. Yüzeysel ve yeraltı suyu drenaj sisteminin etkisiz olması durumunda açık ocak madenini göçmeye karşı korumak için doygun malzeme varsayımına dayalı stabilite değerlendirmeleri yapmak daha pratiktir.

2D analizlerde elde edilen güvenlik faktörüne göre sistem kendi içinde güvenli görünürken, 3D analizler şev molozunun güvensiz olduğunu ve sistemin hareket edeceğini göstermektedir. Bu çalışmada kritik alan olarak seçilen kesit heyelan bölgesindeki en kritik doğrultu olarak görüncü de heyelan bölgeleri için seçilen ve en kritik alan olarak kabul edilen tek bir bölge kendi içinde güvenli olabilir. Ancak farklı yönlerden alınacak kesitlerle hesaplamalar tekrarlanmalıdır. Harita üzerinde en olumsuz kesit olarak seçilen kesitten daha kritik kesitler olabilir ve iki boyutlu analizlerde bu durum gözden kaçabilir. Bu nedenle proje sürecinde can ve mal kayıplarının önüne geçmek için yüksek riskli projelerde hesaplamaların üç boyutlu modeller üzerinde daha kapsamlı incelenmesi gerekmektedir.

Stabilite analizlerini saha koşullarıyla doğrulamak amacıyla Devlet Meteoroloji İşleri Şirvan İstasyonuna ait günlük yağış verilerinin incelenmesi sonucu bölgede, hareketin olduğu Kasım ayında, kaydedilen yağış miktarının beklenen yağış miktarından 1.5 misli fazla olduğu saptanmış, hareketin olduğu günde ise toplam yağış miktarının beklenenden 3 misli fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre bölgenin Ekim sonu ve Kasım başında yağışlı günlerden önemli ölçüde etkilendiği anlaşılmaktadır. Akma'nın meydana geldiği gün devam eden yağmur, yamaç molozunda doygunluğu arttırmış ve özellikle su çıkış noktalarındaki yoğun su drenajı, üst kısımdaki malzemenin stabilitesini bozarak, önce alt kısımdan başlayan ve progresif olarak yukarı devam eden, ani harekete sebebiyet vermiştir.

Çalışma alanında, projelendirme sürecinde yapılan hesaplamalar ve analizler hep şev molozu dışındaki formasyonlara odaklanmış ve basamaklama çalışmaları ile birlikte bu birimlerde kapsamlı stabilite hesaplamaları yapılmıştır. Dolayısıyla maden üretim alanı dışında kalan

şev molozları çok fazla dikkate alınmamış ve bu bölgede bir sorun olmayacağı düşünülmüştür. Kapsamlı bir çalışma yapılmadan bu alanı da içeren 2 boyutlu bir stabilite çalışmasında bölgenin güvenli olduğu düşünülmüş ve bu çalışma da yeterli görülmüş ve bu hata 16 kişinin hayatına mal olmuştur.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 4

Kaynaklar

- [1] M. Lashgari, C.A. Öztürk, Slope failure and stability investigations for an open pit copper mine in Turkey, *Environmental Earth Sciences*, 81 (5), 1-17, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10125-7>.
- [2] M.A. Biot, "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164, 1941. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>.
- [3] S.M. Brooks, M.J. Crozier, T.W. Glade and M.G. Anderson, "Towards establishing climatic thresholds for slope instability: use of a physically-based combined soil hydrology-slope stability model", *Pure and Applied Geophysics*, 161, 881-905, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2477-y>.
- [4] P.L. Wilkinson, M.G. Anderson and D.M. Lloyd, An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (12), 1285-1297, 2002. <https://doi.org/10.1002/esp.409>.
- [5] S. Weill, E. Mouche, J. Patin, A generalized Richards equation for surface/subsurface flow modelling, *Journal of Hydrology*, 366 (1-4), 9-20, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.007>.
- [6] M. Karthikeyan, Unsaturated seepage and slope stability analysis, MSc Thesis, National University of Singapore, Singapore, 2000.
- [7] L. Cascini, S. Cuomo, M. Pastor and G. Sorbino, Modeling of rainfall induced shallow landslides of the flow-type, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136 (1), 85-98, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000182](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000182).
- [8] M. Raj, A. Sengupta. Rain-triggered slope failure of the railway embankment at Malda, India *Acta Geotechnica*, 9 (5), 789-798, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0345-9>.
- [9] S.Y. Liu, L.T. Shao and H.J. Li, Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods, *Computers and Geotechnics*, 63, 291-298, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.008>.
- [10] W. Fellenius, Calculation of stability of earth dams, In: *Transactions. 2nd International Congress On Large Dams*, 4, pp. 445-9, 1936.
- [11] A.W. Bishop, The use of the slip circle in the stability of slopes, *Geotechnique* 5 (1), 7-17, 1955. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>.
- [12] J. Lowe, L. Karafiath, Stability of Earth Dams Upon Drawdown, *Proceedings of the 1st PanAm Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 2, pp. 537-552, 1960.
- [13] N.R. Morgenstern, V.E. Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, 15 (1), 79-93, 1965. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- [14] E.E.A. Spencer, Method of the analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces, *Géotechnique*, 1 (1), 11-26, 1967. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>.
- [15] N. Janbu, Slope stability computations, *Soil Mechanics and Foundation Engineering Report*, Technical University of Norway, Trondheim, 1968.
- [16] S.K. Sarma, Stability Analysis of Embankments and Slopes, *Géotechnique*, 23 (3), 423-433, 1973. <https://doi.org/DOI:10.1061/AJGEB6.0000903>.
- [17] D.A. Bouzid, Finite element analysis of slope stability by expanding the mobilized principal stress Mohr's circles-Development, encoding and validation-, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14, (4), 1165-1179, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.01.016>.
- [18] A.M.C. Sengör, Y. Yılmaz, Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach, *Tectonophysics*, vol. 75, pp.181-241, 1981. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4).
- [19] E. Culfa, E. Genç, E. Yıldırım, Interpretation of Relationship between Field and Monitored Data in Madenköy (Siirt) Open-Pit Copper Mining, MSc Thesis, Istanbul Technical University, 2018.
- [20] F. Alyamaç, Siirt İli Madenköy, Hürmüz ve Soğanlı (Miskin) Köylerinin Jeolojik İncelenmesi, MTA Araştırma Raporu, 42 s., Ankara, 1979.
- [21] C. Baştuğ, Bitlis Napının Stratigrafisi ve Güneydoğu Anadolu Sütür Zonunun Evrimi, Yeryuvarı ve İnsan, 1, (3), 55-61, 1976.
- [22] A. Çağatay, Güneydoğu Anadolu Bakır Yataklarının Jeolojik - Mineralojik Araştırmaları, MTA Enstitüsü Yayınları, 89, pp. 46-69, Ankara, 1977.
- [23] M.A. Çağlayan, R.N. İnal, M. Şengün and A. Yurtsever, Structural setting of Bitlis massif. In O. Tekeli and M.C. Göncüoğlu (eds), *International Symposium on the Geology of the Taurus Belt*, Proceedings, pp. 245-254, Ankara, 1984.
- [24] R. Çalgın, Geology and Mineralogy of the Siirt - Madenköy Deposit, Turkey. Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 1, pp.217, 1980.
- [25] M.C. Göncüoğlu, N. Turhan, Geology of the Bitlis Metamorphic Belt, In: O. Tekeli and M.C. Göncüoğlu (eds), *International Symposium on the Geology of the Taurus Belt*, Proceedings, pp.237-244, Ankara, 1984.
- [26] R. Yıldırım, F. Alyamaç, Siirt İli Madenköy Hürmüz Bölgesinin Jeolojik İncelenmesi, MTA Enstitüsü, Rapor No 1444, MTA İnceleme 5811, Ankara, 1976.
- [27] F. Kayhan, R. Yıldırım, Y. Ulutürk, Siirt Madenköy Copper Deposit SE-Turkey, XXVII. *Geologorum Conventus*, 11 (2), 223, 4-14 August, Moscow. 1984.

- [28] M, Şengün, Tatvan'ın güneyinin jeolojik/petrografik incelenmesi (Bitlis massif), PhD Thesis, Istanbul Technical University, 157p., Istanbul, 1984.
- [29] D.E. Karıg, H. Kozlu, Late Palaeogene-Neogene evolution of the triple junction region near Maras south-central Turkey. *Journal of the Geological Society*, London, 147 (1990), 1023-1034, 1990. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.147.6.1023>.
- [30] Y. Ulutürk, Siirt Madenköy Bakır Yatağı - İnceleme, MTA Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [31] M.N. Çağlayan, M. Şengün, 1:100.000 Geniş Ölçekli Türkiye Jeolojik Haritaları (pafta Van-L48), MTA Genel Müdürlüğü, Jeolojik Etüt Dairesi Başkanlığı Yayını no. 66, Ankara, 2002.
- [32] T. Öztaş, V. Yavuz and M. Korkut, Siirt ili-Şirvan ilçesi-Madenköy Park Elektrik Üretim Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Bakır Madeni Açık İşletme Alanının 3B Hidrojeolojik Modeli ve Nihai Susuzlaştırma Projesi, Final Raporu, Istanbul, Türkiye, 2016.
- [33] Hexacon, Geosystems Division, Italy, Interferometric Radar, Ibis FM-Evo <https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/ibis-fm-evo>, Accessed 3 January 2023.
- [34] T. Carlà, P. Farina, E. Intriери, H. Ketizmen and N. Casagli, Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine, *Engineering Geology* vol. 235, pp. 39-52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.01.021>.
- [35] E. Intriери, T. Carlà and G. Gigli, Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale. *Earth-Science Reviews*, vol. 1, no.193, pp. 333-349, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.019>.
- [36] H. Çetinkaya, A. Usta, Siirt-Madenköy IBIS-M Uygulama Raporu, Ankara, (2015-16).
- [37] O.C. Zienkiewicz, C. Humpheson and R.W. Lewis, Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, *Géotechnique*, vol. 25, no.4, pp.671-689, 1975. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.67>.
- [38] D.J. Naylor, Finite Elements and Slope Stability, In: J.B. Martins (eds) *Numerical Methods in Geomechanics*. NATO Advanced Study Institutes Series, vol 92. Springer, Dordrecht, 1982. https://doi.org/10.1007/978-94-009-7895-9_10.
- [39] I.B. Donald, S.K. Giam, Application of the nodal displacement method to slope stability analysis, *Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, 22-26 August, Sydney, Australia, pp.456-460, 1988.
- [40] T. Matusi, K.C. San, Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, *Soils and Foundations*, vol. 32, no.1, pp. 59-70, 1992. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.59>.
- [41] K. Ugai, D. Leshchinsky, Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results, *Soils and Foundations*, vol. 35, no.4, pp. 1-7, 1995. https://doi.org/10.3208/sandf.35.4_1.
- [42] E.M. Dawson, W.H. Roth and A. Drescher, Slope stability analysis by strength reduction, *Géotechnique* vol. 49, no. 6, pp. 835-840, 1999. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835>.
- [43] D.V. Griffiths, P.A. Lane, Slope Stability Analysis by Finite Elements, *Geotechnique*, vol. 49, no. 3, pp. 387-403, 1999. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>.
- [44] Y.M. Cheng, T. Lansivaara and W.B. Wei, Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics*, vol. 34, no. 3, pp. 137-150, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011>.
- [45] R. Dey, S. Javankhoshdel, 3D FEM modeling of the initiation of progressive landslides, *Proceedings of 74th Canadian Geotechnical Conference and 14th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference (GeoNiagara 2021)*, September 26-29, Toronto, Niagara, Canada, 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003188339>.
- [46] E.N. Bromhead, M. L. Ibsen, X. Papanastassiou and A.A. Zemichael, Three-dimensional stability analysis of a coastal landslide at Hanover Point, Isle of Wight, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35, 79-88, 2002. <https://doi.org/10.1144/qjgeh.35.1.79>.
- [47] N. Janbu, Slope stability computations, In: Hirschfeld RC, Poulos SJ (eds) *Embankment- Dam Engineering: Cassagrande Volume*. John Wiley & Sons Inc, New York, 47-86, 1973. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90139-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90139-4).

