

Makale Gönderim Tarihi: 22.05.2023

Yayına Kabul Tarihi: 17.08.2023

Fay Denetimli Bir Metal Madeninde 3D Limit Denge Yöntemi ile Şev Duraylılık Analizleri

*Slope Stability Analysis with 3D Limit Equilibrium Method in a Fault Controlled Metal Mine*H. Eray YAMAN¹, Ozan SAVAŞ^{2*}¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksek Okulu, Madencilik Tek. Prog., İzmir²Hacettepe Teknokent, GOA Ar-Ge Madencilik ve Çevre Teknolojileri Ltd. Şti., Ankara* Sorumlu Yazar: oznsavs@gmail.com

Özet

Şev duraysızlığı ile ilgili risklerin yönetimi, açık maden ocaklarının güvenli ve ekonomik işletilmesinde temel bir süreçtir. Bu riskleri daha iyi yönetmek için çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde, şev açılarını azaltarak şev duraysızlığının tüm olasılıklarını ortadan kaldırmak hedeflense de bu durumun ekonomik açıdan engelleyici olduğu hemen anlaşılabilir. Açık maden işletmeciliğinde planlama ve üretim aşamaları çok titizlik ile çalışılması gereken aşamalardır. Buradaki asıl amaç, minimum dekapaj yaparak maksimum cevheri elde edebilmek üzerinedir. Bu amaç doğrultusunda basamak yüksekliklerini, basamak genişliklerini ve şev açılarını düzgün belirleyebilmek çok kritiktir. Bu çalışmada, bahsi geçen parametrelerin tanımlı olduğu bir saha üzerinde çoklu limit denge yöntemi ile şev duraylılığı analizleri yapılmıştır. Fayları tespit edilen ocak üzerinde yapılan çalışmalar, ocaktaki gerçek kayma yüzeyleri ile karşılaştırılmış ve analizlerin birebir tutarlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yüzeylerin kayma olasılıkları arasından en düşük güvenlik katsayısını veren en kritik kayma yüzeyleri belirlenmiştir. Çalışma sırasında GLE ve Bishop olmak üzere iki farklı hesaplama yöntemi kullanılarak sonuçlar irdelenmiştir. Analizlerde “Plaxis 3D LE” programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, Limit denge, Gle, Bishop, Açık ocak

Abstract

Management of risks associated with slope stability is a fundamental process in the safe and economical operation of open-pit mines. Various analysis methods have been developed to better manage these risks. Today, although it is aimed to eliminate all possibilities of slope instability by reducing the slope angles, it is clear that this situation is economically prohibitive. Planning and production stages in open pit mining operations are the stages that need to be studied with great care. The main purpose here is to obtain the maximum ore with minimum pickling. For this purpose, it is very critical to be able to determine the bench heights, bench widths and slope angles properly. In this study, slope stability analyzes were carried out with the multiple limit equilibrium method on a field where the aforementioned parameters are defined. Among the slip possibilities of the surfaces, the most critical slip surfaces giving the lowest safety coefficient were determined. During the study, the results were examined by using different calculation methods, namely GLE and Bishop. The “Plaxis 3D LE” program was used in the analysis.

Keywords: Slope stability, Limit equilibrium, Gle, Bishop, Open pit mine

1. Giriş

Şev duraysızlığı ile ilişkili personel, ekipman ve devam eden üretim risklerinin yönetimi, açık ocak madenciliğinde jeoteknik ve maden mühendislerinin kilit rollerinden biridir. Şev stabilitesi çalışmalarının amacı zemin yapılarında, kazılarda ve dolgularda ekonomik ve güvenli sonuçlar elde etmektir. Bu bağlamda, birinci aşama jeoteknik, malzeme, çevresel ve ekonomik parametrelerin ayrıntılı bir çalışmasını içerir. İkinci olarak, en uygun şev duraylılık analizini belirlemek için şevin boyutunu, yapısını ve olası nedenlerini incelemek gerekir. Konunun bu özellikleri genellikle teknik jeolojiden zemin ve kaya mekaniğine kadar kapsamlı araştırmaları gerektirir. Gerçekçi bir şev analizi, topoğrafya, jeoloji, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları gibi birçok faktörü içermelidir. Açık ocakta şevlerin duraylılığını etkileyen en temel değişkenler, şev geometrisi, malzemenin jeomekanik özellikleri, fay, kırık, tabakalanma, kıvrım, çatlak gibi kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, yeraltı suyu koşulları ve sismik hareketler olarak sıralanmaktadır. Bu değişkenlerin tamamının değerlendirmeye katılması şev duraylılığı analizlerini karmaşık hale getirmektedir.

Kaya şevlerindeki yenilmeler çoğunlukla kütle içindeki süreksizliklere bağlıdır. Dolayısıyla yenilmeler bu süreksizliklerin konumları ve özellikleri ile şev yüzeyinin konumunun ilişkisine bağlıdır. En büyük jeoteknik yapılar arasında yer alan açık ocaklar içerisinde faylı zonların bulunması yaygın olan bir durumdur. Faylar en büyük süreksizlik yapılarını oluştururken faylı bölgedeki malzeme yapısı (kil bantları gibi) aynı zamanda şevlerde doğrudan yenilme yüzeylerinin oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla fay içeren açık ocaklarda duraylılık analizleri yapılırken bu karmaşık durum göz önünde bulundurulmalıdır (Deliormanlı ve Özdoğan, 2023)

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. (Varol ve ark., 2022).

Gerek açık ocak şevlerinin değerlendirilmesinde gerekse doğal şevlerin duraylılığının değerlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler arasında en çok tercih edilen yöntemler; Kinematik analizler, Limit denge analizleri, Sayısal (nümerik) analizler ve Şev Kütle Puanlaması (SMR) gibi kaya kütle sınıflandırma sistemleridir (Hoek ve Bray, 1981; Hoek, 1999; Ulusay vd., 2001; Pantelidis, 2009; Alejano vd., 2011; Komurlu, 2022; Karaman, 2013)

Bu çalışmada, işletme tarafından oluşturulmuş şev yapısına göre 3 Boyutlu Limit-Denge Denklemi Şev Duraylılığı Analizleri yapılmıştır. Plaxis 3D LE programının analitik yöntemler kullanılarak hesapladığı “Çoklu Limit Denge Yöntemi” ile şev duraylılık analizleri çözümlenmiştir. Limit denge metodlarında bir kayma yüzeyi kabul edilerek kaymaya çalışan zemin kütlelerinin dengesi araştırılır ve bir güvenlik katsayısı elde edilir. Yüzeylerin kayma olasılıkları arasından en düşük güvenlik katsayısını veren en kritik kayma yüzeyi bulunur. Çalışma sırasında GLE ve Bishop olmak üzere ki farklı hesaplama yöntemi kullanılarak sonuçlar irdelenmiştir.

2.Çalışma Sahası ve Genel Jeoloji

Çalışma alanı Marmara Bölgesi içerisinde yer alır ve Alpin Orojenik Sistemi ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmalar, Biga Yarımadasının jeotektonik konum olarak Pontidler içinde yer aldığını göstermektedir. Biga Yarımadası Kaz Dağları ve çevresinde yüzeylenen yüksek dere-

celi metamorfizmaya uğramış kayaçlardan oluşur. Birim alttan üste doğru mermer ara bantlı amfibollü gnays, metaofiyolitler ve kuvarso-feldispatik gnayslar ile temsil edilir. Bölge, Tersiyer sırasında Paleosen Eosen'den başlayarak Miyosen sonuna kadar süregelen bir magmatizmanın etkisi altında kalmıştır. Bu sırada çoğunlukla granodiyorit bileşimli birçok granitoyid kütlesi temel kayaçlarına sokulum yaparken, andezit-dasit-riyodasit-riyolit bileşimli volkanik kayaçlar ise benzer zaman aralıklarında temel kayaçlarını kesmiş veya bunları uyumsuz olarak örtmüştür. Yine bu dönemde Biga Yarımadası'nda volkanik aktiviteyle çoğu kez eş yaşlı olarak yoğun bir sedimantasyon meydana gelmiştir (Siyako vd., 1989).

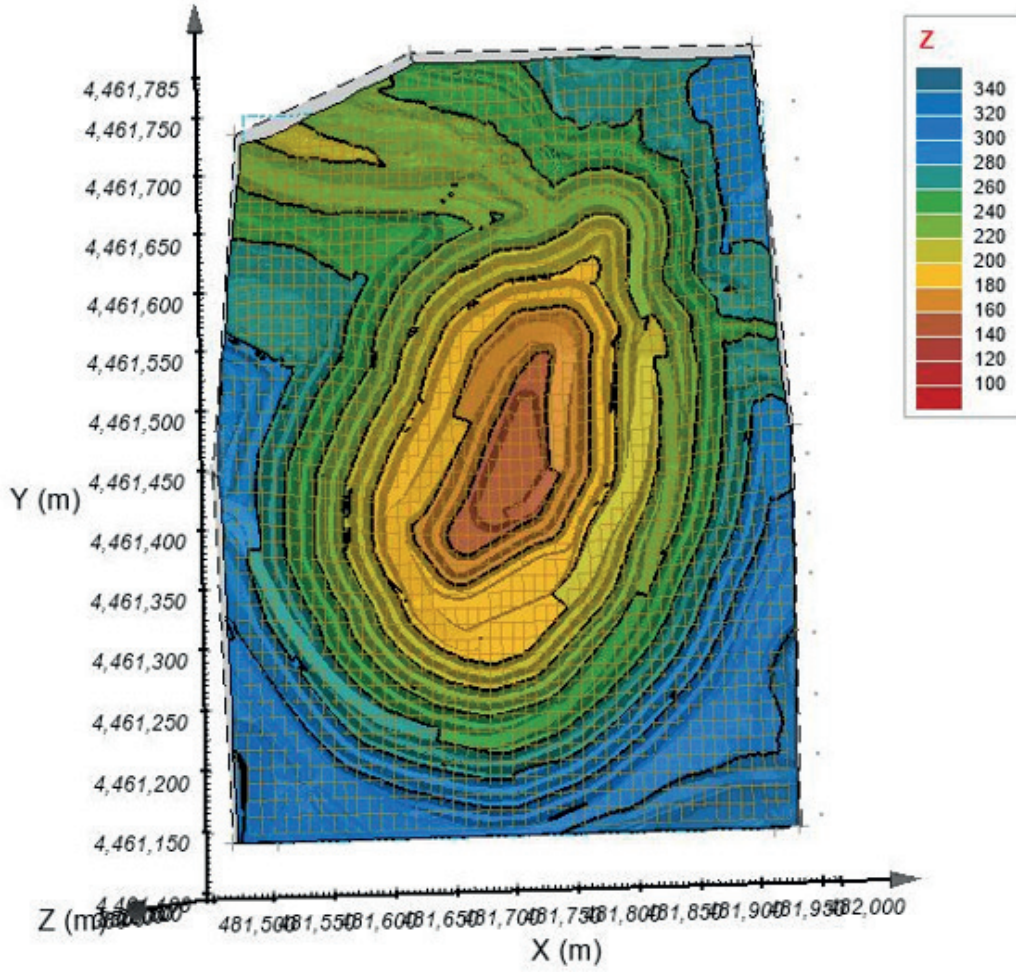
İnceleme alanı ve çevresinde gözlenen birimler Şahinli formasyonunun Bilaller üyesi olarak adlandırılmıştır. Bu formasyon tuf, volkanik kırıntılı, volkanik ve tortul breş, mikaşist ve bazalt dayklarından oluşur. Tesis alanında yapılan sondajlar sırasında inceleme sahasının üst seviyelerinin tuf ile kaplandığı, alt derinliklerde volkanik kırıntılı birimlerin görüldüğü gözlenmiştir. Volkan kırıntılı birimler, yer yer türbiditik çökeller, andezitik bazaltik bileşimli lavlardan oluşur ve tektonikten etkilenir. Formasyon çok sayıda bazaltik bileşimli dayk tarafından kesilmektedir. Bilaller üyesi: Şahinli formasyonu içindeki volkanik kırıntılıları, yer yer türbiditik çökeller ve bu çökellerden ayırt edilemeyen bazaltik ve yer yer bazaltik andezit bileşimli lavlar Bilaller üyesi olarak adlandırılır.

Çalışmaya konu olan bölge ve çevresinde Miyosen yaşlı volkanik ve sedimanter birimler yaygın olarak gözlenir. Çalışma bölgesi ve çevresinin genelleştirilmiş ölçeksiz kolon kesiti Şekil 1'de sunulmuştur.

Ü. SİSTEM	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	SİMGE	KAYA TÜRÜ	AÇIKLAMALAR	
SENOZOYİK	TERSİYER	EOSEN	Kuvaterner	Qal		Alüvyon	
				OLİGOSEN	Bayramiç fm.	Tplb	Konglomera-kumtaşı-çamurtaşı
					Atikhisar volkaniti	Toa	Asidik lav, kül-blok akıntıları, tuf ve ignimbritler
				ÜST	Erdağ volkaniti	Teer	Bazaltik, bazaltik andezitik lav ve piroklastikler
					Ceylan fm.	Tec	Kiltaşı, kumtaşı, kireçtaşı ve tuf
					Söğücek fm.	Tes	Nummulitli, kumlu ve çakıllı kireçtaşları
					Şahinli formasyonu	Teşa	Bazaltik, bazaltik andezitik lav ve piroklastikler ile volkanoklastikler
					Fıçtepe formasyonu	Tef	Delta düzlüğü ve akarsu çökellerine ait çamurtaşı, kumtaşı çakıltısı ardalanması
					Beyçayır volkanitleri	Teb	Andezit-dasitik andezit-dasit türü subvolkanik sokulum ve lavlar
				PALEOZOYİK- MESOZOYİK			Çetmi melanji
Palamut fillit ü.	Kçap	Yeşil-kahve-gri renkli fillit ve şist					
Çamlıca metamorfileri	Kça	Kuvarsit, serisit kuvars şist, kuvars şist, meta kumtaşı ve mermer					
						Z (Teg) Şevketiye granitoyidi	

Şekil 1. Blaise Pascal'ın 1669 yılında çizilmiş bir portresi (URL1)

Açık ocak işletmesinin sayısal yükseklik modeli Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Açık ocak işletmesinin sayısal yükseklik modeli

3. Çalışma Metodu

İşletme tarafından oluşturulmuş şev yapısına göre 3 Boyutlu Limit-Denge Denklemi Şev Duraylılığı Analizleri yapılmıştır. Kaya kütle özellikleri kullanılarak Plaxis 3D LE programının analitik yöntemler kullanarak hesapladığı “Çoklu Limit Denge Yöntemi” ile şev duraylılığı analizleri yapılmıştır. Limit denge metotlarında bir kayma yüzeyi kabul edilerek kaymaya çalışan zemin kütesinin dengesi araştırılır ve bir güvenlik katsayısı elde edilir. Yüzeylerin kayma olasılıkları arasından en düşük güvenlik katsayısını veren en kritik kayma yüzeyi bulunur. Çalışma sırasında GLE ve Bishop olmak üzere ki farklı hesaplama yöntemi kullanılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Bishop yöntemi: Bu yöntem yatay ve düşey kuvvet dengesini dikkate alır ve dilimler arası kayma kuvvetini ihmal ederek işlem yapmaktadır.

Genelleştirilmiş Limit Denge yöntemi (GLE): GLE yaklaşımında zeminlerin mukavemetini oluşturan kohezyon ve sürtünme bileşenlerinin güvenlik sayıları aynıdır. İncelenen kayma dairesini oluşturan tüm dilimler için güvenlik sayısı aynıdır. Tüm dilimler üzerinde etkili olan yatay kuvvetlerin toplamından kuvvet dengesi güvenlik sayısı F_s hesaplanmaktadır.

Bu hesaplama metotları ve çözümlene yöntemleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir. Nümerik modelde kullanılan kaya parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

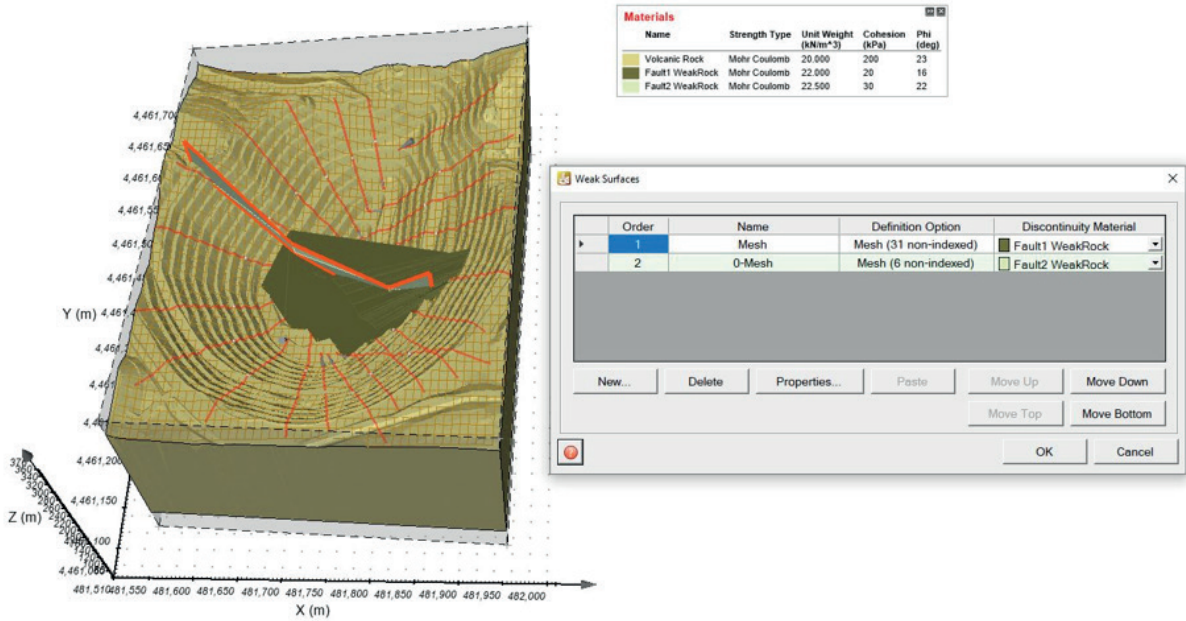
Ocak içinde tespit edilen faylar, program üzerinde Fault1 WeakRock ve Fault2 WeakRock olarak tanımlanmış olup saptanan kaya parametreleri üzerinden hesaplamaları yapılmıştır.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan kaya parametreleri

	Birim Hacim Ağırlık (kN/m³)	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme açısı (°)
Kaya Kütleli	24.80	200	23
Fay 1	22	20	16
Fay 2	22.5	30	22

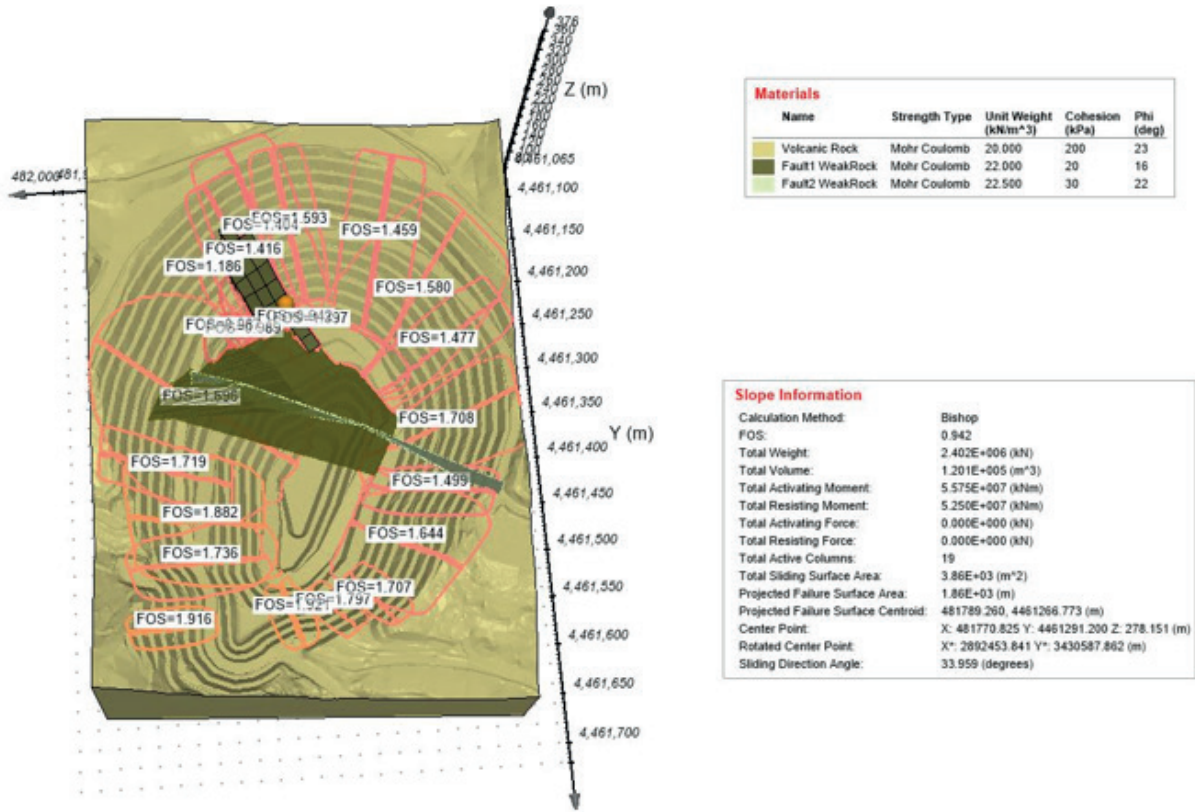
Analiz aşamasında gerçekleştirilen adımlar aşağıda özetlenmiştir:

Plaxis Designer kullanılarak ocak üçgen modeli üzerinde çalışılacak alan belirlenip hacim tanımlama işlemi yapılmıştır. Hacmi belirlenen ocak Plaxis 3D LE uygulamasına aktarılarak hem yüzey için hem de tespit edilen süreksizlik elemanları için materyal özellikleri tanımlanmıştır. Ocak üzerinde güvenlik katsayısı FOS değerleri hesaplanılması istediğimiz alanlarda konturlar belirlenmiştir. Belirlenen konturlar için Bishop ve GLE yöntemleri irdelenerek çözüm işlemi başlatılmış olup yaklaşık 235 dakika sürmüştür.

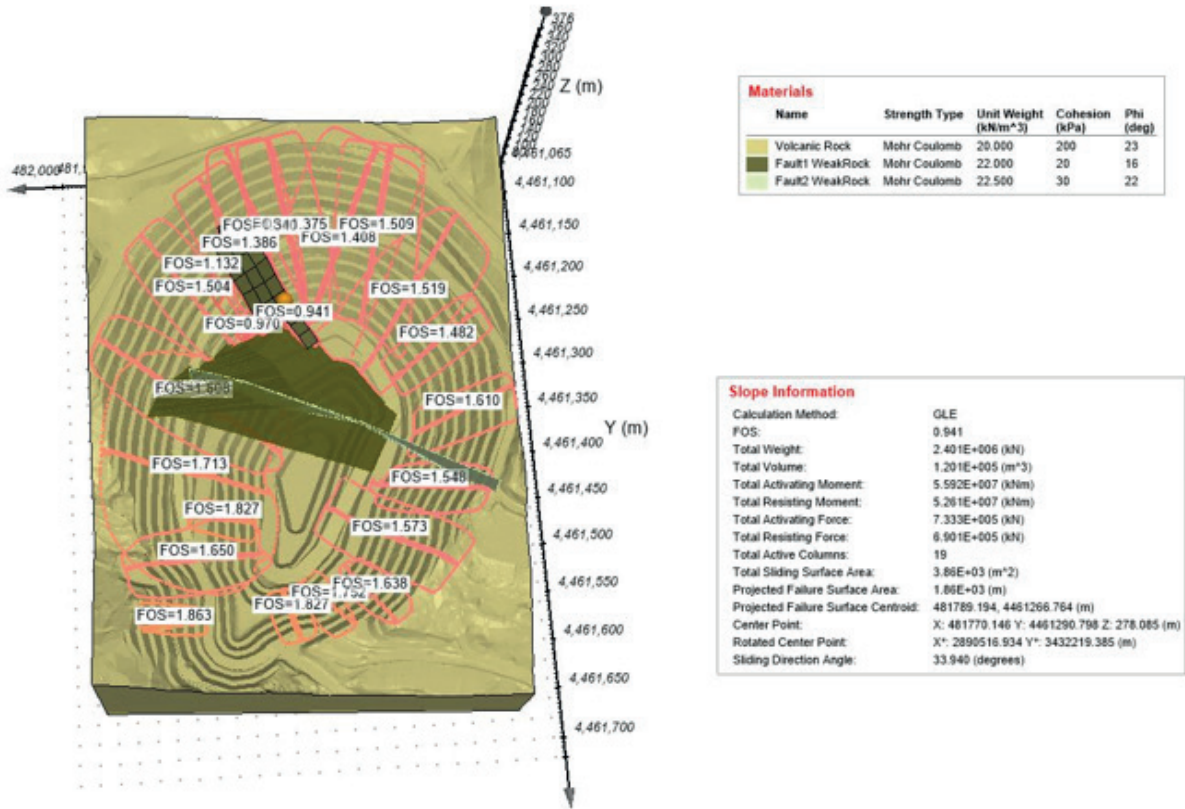


Şekil 3. Fayları tanımlanan ocak üzerinde belirlenen konturlar ve 3 boyutlu tasarımın genel görüntüsü

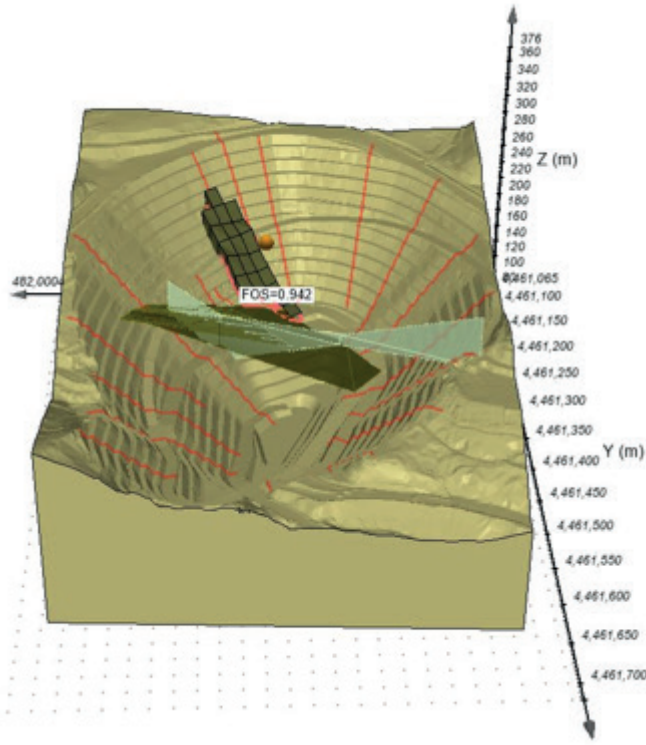
Homojen bir analiz yapmak amacıyla konturlar belirli aralıklarla ocak geneline (22 adet) çizdirilmiştir. Dana önce ocak üzerinde ilgili çalışmalar sonucunda tespit edilen faylar program üzerinde zayıf yüzey/süreksizlik malzemesi olarak tanımlanmıştır. Her bir konturun kapsadığı alan için limit-denge yöntemi, Bishop ve GLE yaklaşımı ile güvenlik katsayıları (FOS) hesaplanmıştır. Bu iki hesaplama yöntemi kullanılarak açık ocak için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.



Şekil 4. Bishop metodu ile hesaplanan güvenlik faktörü değerleri ve en düşük güvenlik faktörü (0.942)



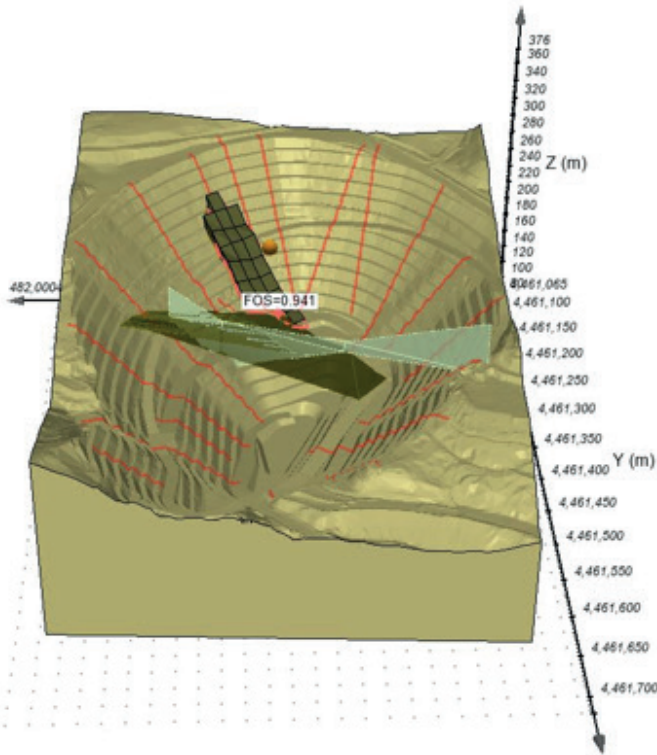
Şekil 5. GLE metodu ile hesaplanan güvenlik faktörü değerleri ve en düşük güvenlik faktörü (0.941)



Materials				
Name	Strength Type	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Volcanic Rock	Mohr Coulomb	20.000	200	23
Fault1 WeakRock	Mohr Coulomb	22.000	20	16
Fault2 WeakRock	Mohr Coulomb	22.500	30	22

Slope Information	
Calculation Method:	Bishop
FOS:	0.942
Total Weight:	2.402E+006 (kN)
Total Volume:	1.201E+005 (m ³)
Total Activating Moment:	5.575E+007 (kNm)
Total Resisting Moment:	5.250E+007 (kNm)
Total Activating Force:	0.000E+000 (kN)
Total Resisting Force:	0.000E+000 (kN)
Total Active Columns:	19
Total Sliding Surface Area:	3.86E+03 (m ²)
Projected Failure Surface Area:	1.86E+03 (m)
Projected Failure Surface Centroid:	481789.260, 4461266.773 (m)
Center Point:	X: 481770.825 Y: 4461291.200 Z: 278.151 (m)
Rotated Center Point:	X*: 2892453.841 Y*: 3430587.862 (m)
Sliding Direction Angle:	33.959 (degrees)

Şekil 6. Bishop metodu çözümü sonucu oluşan kritik kayma yüzeyi



Materials				
Name	Strength Type	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Volcanic Rock	Mohr Coulomb	20.000	200	23
Fault1 WeakRock	Mohr Coulomb	22.000	20	16
Fault2 WeakRock	Mohr Coulomb	22.500	30	22

Slope Information	
Calculation Method:	GLE
FOS:	0.941
Total Weight:	2.401E+006 (kN)
Total Volume:	1.201E+005 (m ³)
Total Activating Moment:	5.592E+007 (kNm)
Total Resisting Moment:	5.261E+007 (kNm)
Total Activating Force:	7.335E+005 (kN)
Total Resisting Force:	6.901E+005 (kN)
Total Active Columns:	19
Total Sliding Surface Area:	3.86E+03 (m ²)
Projected Failure Surface Area:	1.86E+03 (m)
Projected Failure Surface Centroid:	481789.194, 4461266.764 (m)
Center Point:	X: 481770.146 Y: 4461290.798 Z: 278.085 (m)
Rotated Center Point:	X*: 2890516.934 Y*: 3432219.385 (m)
Sliding Direction Angle:	33.940 (degrees)

Şekil 7. GLE metodu çözümü sonucu oluşan kritik kayma yüzeyi

4. Tartışma ve Sonuçlar

Açık ocak şev duraylılığı açısından değerlendirilmesi amacı ile yapılan bu çalışmada, işletme tarafından oluşturulmuş şev yapısına göre 3 Boyutlu Limit-Denge Denklemi Şev Duraylılığı Analizleri yapılmıştır. Plaxis 3D LE programının analitik yöntemler kullanarak hesapladığı “Çoklu Limit Denge Yöntemi” ile şev duraylılık analizleri çözümlenmiştir.

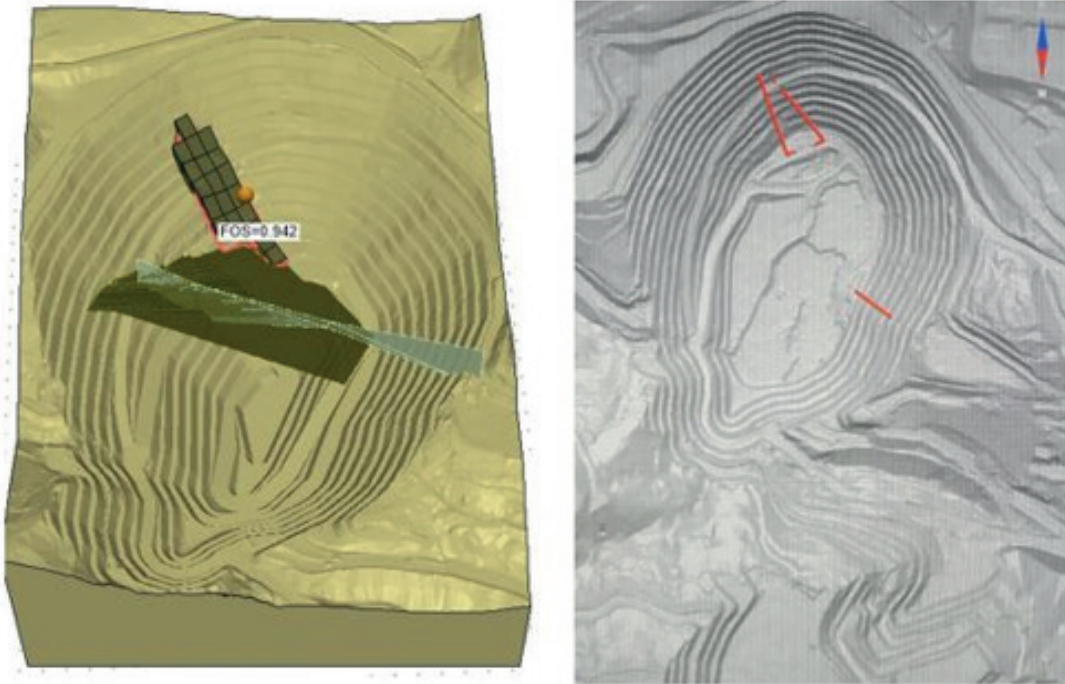
Açık ocak şev duraylılığı analiz ve çözümlerinde ocak içerisinde tespit edilen fayların kaya kütle özellikleri saptanması ile analizlere dahil edildiği takdirde, çözümlenin çok daha sağlıklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

3 Boyutlu limit denge yöntemi kullanılarak, Bishop ve GLE metotlarının irdelendiği bu çalışma kapsamında analiz sonuçlarına bakıldığında;

- Bishop metodu kullanılarak elde edilen en düşük güvenlik faktörü değeri 0,942 olarak hesaplanmıştır.
- GLE metodu kullanılarak elde edilen en düşük güvenlik faktörü değeri 0,941 olarak hesaplanmıştır.

Ocak geneline bakıldığında süreksizliklerin ve zayıf yüzey olarak tanımladığımız fayların çözümlmeye dahil edilmediği senaryosunda ortalama güvenlik faktörü 1,400 - 1,700 dolaylarında olduğu gözlemlenmektedir. Bu da açık ocak madenciliğinde yapılan şev duraylılık analizlerinde, ocakta bulunan fay düzleminin çözümlene üzerindeki önemini göstermektedir.

Şekil 8’de limit denge analiz sonuçlarında programın saptadığı kayma yüzeyi ile ocakta tespit edilen gerçek kayma noktası karşılaştırılmıştır. Buradaki önemli unsur olarak, kama yapan fayların bulunduğu bölge önünde bırakılan topuk nedeniyle bu bölgede hareket kısıtlanmış ve bunun neticesinde burada biriken kuvvetler topuk kenarı bölgesinden kendine yol bulmuştur.



Şekil 8. Programın saptadığı kayma yüzeyi ile ocakta tespit edilen gerçek kayma noktası

Kaynaklar

Alejano, L.R., Ferrero, A.M., Oyanguren, P.R., Fernandes, M.I.A., 2011. Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, 16-26.

Deliormanlı, A.H., Özdoğan, M.H., 2023. Fay Denetimli Bir Açık Ocakta Duraylılık Analizi, *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, MT Bilimsel, 23.

Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd edition. London, Institute of Mining and Metallurgy. 385 p.

Hoek, E., 1999. Putting numbers to geology – an engineer’s viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, 1-19.

Karaman, K., 2013. Kaya Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi (Ünye, Ordu) *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 37 (1), 27-47.

Komurlu, E., 2022. Case studies on Q-slope method use for slope stability analyses. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 44, 190-197.

Pantalidis, L., 2009. Rock slope stability assesment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46, 315-325.

Siyako, M., Burkan, K.A. ve Okay, A.I., 1989, Biga ve Gelibolu Yarımadalarının Tersiyer Jeolojisi ve hidrokarbon olanakları: *TPJD Bült*, 1/3, 183- 199.

Ulusay, R., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., Tuncay, E., 2001. Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoğlu coal mine and possible remedial measures, *Environmental Geology*, 40 (6), 769-786.