

3 Boyutlu Nümerik Modelleme Yöntemi İle Bir Şev Stabilitesi Analizi Çalışması

A Slope Stability Analysis with 3D Numerical Modeling Method

C. Okay AKSOY^{1*}, G. Gülsev UYAR AKSOY², H. Eray YAMAN³

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir

² Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksek Okulu, Madencilik Tek. Prog. İzmir

*Sorumlu yazar: okay.aksoy@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4328-4862

Özet

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. Günümüzde 3 boyutlu nümerik modelleme yöntemleri kullanılarak şev stabilitesi analizleri rahatlıkla yapılmaktadır. 3 boyutlu nümerik modelleme yöntemleri ile nihai durumda maden ocağında oluşan deformasyonlar, gerilmeler, ocağın genel şev açıları ve ocağın güvenlik kat sayısı gibi parametreler simüle edilebilmektedir. Bu çalışmada “Sonlu Elemanlar Yöntemi” ile yapılan 3 boyutlu nümerik analizlerde “Plaxis 3D” programı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, nümerik modelleme, açık ocak

Abstract

Planning and production stages in open mining operations are the stages that must be studied with great care. The main purpose here is to obtain maximum ore by making minimum strip-ping. For this purpose, it is very critical to be able to properly determine the bench heights, bench widths and slope angles. Nowadays, slope stability analysis can be done easily by using 3D numerical modeling methods. With 3D numerical modeling methods, parameters such as deformations and stresses which are occurred in the open pit mine, general slope angles and factor of safety of the open pit mine can be simulated in the final case. In this study “Plaxis 3D” program was used in the 3 dimensional numerical analysis made with “Finite Element Method”.

Keywords: Slope stability, numerical modeling, open pit mine

1.Giriş

Açık maden işletmeciliği geçmişten günümüze kadar ulaşan madencilik yöntemlerinin başında gelmektedir. Kaya mühendisliğinde son tasarımı gerçekleştirmek oldukça uzun ve pahalı bir süreç gerektirmektedir (Küçük ve ark., 2017). Hem güvenli hem de ekonomik madencilik yapabilmek için ocakta oluşturulacak şevlerin dikkatli dizayn edilmesi gerekir. Tüm bu işlemlerin başında ise maden ocağı işletilecek bölgedeki kaya parametrelerini iyi tayin edilmesi ve karakterizasyonunun iyi yapılması gerekmektedir. Kaya parametrelerini belirlemek amacıyla bazı araştırmacılar tarafından kaya kütle sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler Tablo 1’de verilmiştir (Palmström, 2000).

Şev duraylılığı analizlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan 3 Boyutlu Nümerik Modelleme yazılımı kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, matematiksel olarak ilk geliştirilen yöntem olduğu için diğer metodlara nazaran oldukça daha iyi performans sergiler. 3 boyutlu nümerik modelleme analizlerinde kullanılan prensipler Şekil 1’de verilmiştir (Küçük ve ark., 2017; Aksoy ve ark., 2017; Aksoy ve ark., 2019; Aksoy ve Ark., 2020).

2. Çalışma Alanı İçin Yapılan 3 Boyutlu Nümerik Analizler ve Şev Açılarının Belirlenmesi

Çalışma sahasında gerçekleştirilecek açık maden işletmeciliği sonunda bırakılacak olan nihai şevlerin durumunu görebilmek için, nihai şev geometrisine göre 3 Boyutlu Nümerik Modelleme Analizleri yapılmıştır. Bahsi geçen sahanın analizlerinde, ocağın 320 kotundan 180 kotuna ineceği ve bu arada cevher kazanımı gerçekleşeceği senaryosuna göre modelin ana yapısı kurulmuştur. 320 kotu ile 290 kotu arası QFP (kuartz porfori feldspat) formasyonu 290 kotu ile 0 kotu arası da mikaşist formasyonu modelde tanımlanmıştır. Bu senaryo, işletmeden tarafımıza iletilen üretim modelinden çıkarılmıştır. Şekil 2’de modelin ana görüntüsü verilmektedir.

Tablol. Bazı Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri (Palmström, 1995; Edelbro, 2006; Palmström ve Stille, 2007; Aksoy, 2010)

Sınıflama Sisteminin Adı	Formu ve Tipi (*)	Ana Uygulama Alanları	Kaynak
Terzaghi Kaya Yüklü Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı ve Kaya Davranış formu, Fonksiyonel Tip	Tünellerde çelik tahkimat dizaynı	Terzaghi, 1946
Lauffer Tahkimatsız Durabilme Süresi Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Tünel dizayn verileri	Lauffer, 1958
Yeni Avusturya Tünelcilik Metodu (NATM)	Tanımlayıcı ve Kaya Davranış formu, Tünel Konsepti	Yüksek gerilimli zeminlerde kazı ve dizayn	Rabcewicz, Müller ve Pacher, 1958-64
Kaya Mekanik Özellikleri için Kaya Sınıflaması	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kaya Mekaniği verileri	Patching ve Coates, 1968
Kaya ve Zeminlerin Sınıflaması	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kominikasyon için partükül ve blok tanımlamaları	Deere et al., 1969
Kaya Kalite Göstergesi (RQD)	Sayısal Form, Genel Tip	Karot loglaması ve diğer sistemlerde kullanılır	Deere et al., 1967
Boyut-Dayanım Sınıflaması	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Kaya dayanımı ve blok çaplarını esas alır, genelde madencilikte	Franklin, 1975
Kaya Yapısı Derecesi (RSR)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Tünellerde çelik tahkimat dizaynında	Wickham et al., 1972
Kaya Kütle Derecesi (RMR)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Tünel ve madencilikte	Bieniawski, 1973
Q Sınıflama Sistemi	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Yeraltı madenciliği kazısında tahkimat dizaynı	Barton et al., 1974
Mining RMR (MRMR)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Madenlerde kaya tahkimatı	Laubscher (1975) in Laubscher (1977)
Topolojik Sınıflama	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kominikasyon	Matula ve Holzer, 1978
Tek Form Kaya Sınıflama Sistemi	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Kominikasyon	Williamson, 1980
Basit Jeoteknik Sınıflama	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Genel	ISRM, 1981
Slope Mass Rating (SMR)	Tanımlayıcı Form, Genel Tip	Şevlerde stabilite problemleri ve destekleme sistemleri	Romano (1985)
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Yeraltı kazısında tahkimat dizaynı	Hoek, 1994
Kaya Kütle İndeksi (R _{Mi})	Sayısal Form, Fonksiyonel Tip	Genel karakterizasyon, tahkimat dizaynı, TBM uygulamaları	Palmström, 1995

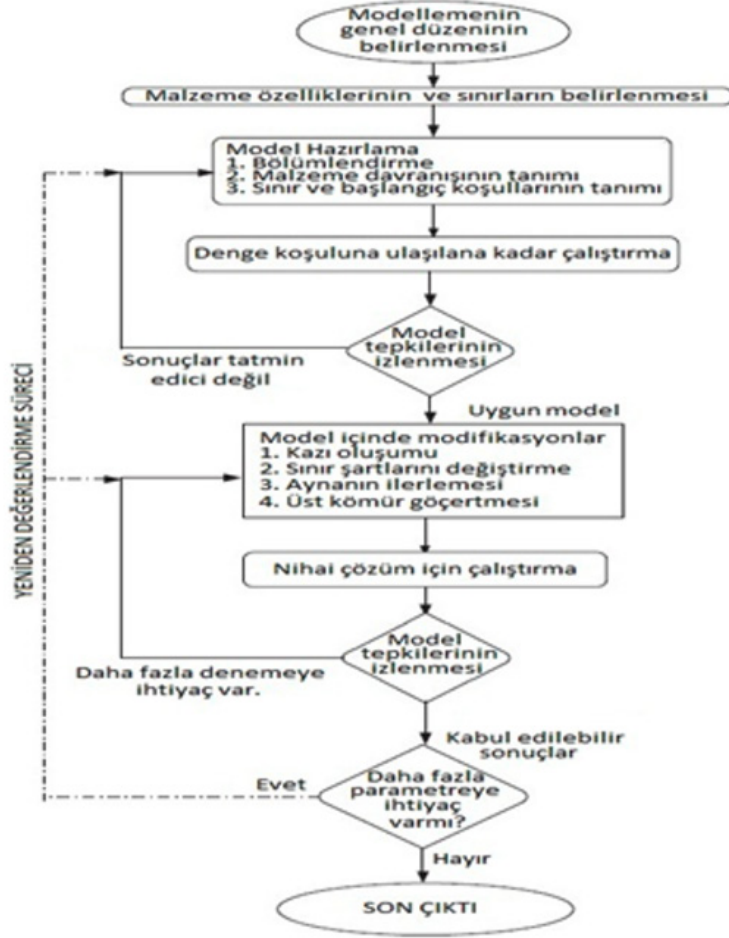
(*)Tanımlayıcı Form: Tanımlama için verilerin sisteme girilmesi

Sayısal Form: Karaktere göre sayısal derecelerin veri olarak kullanılması

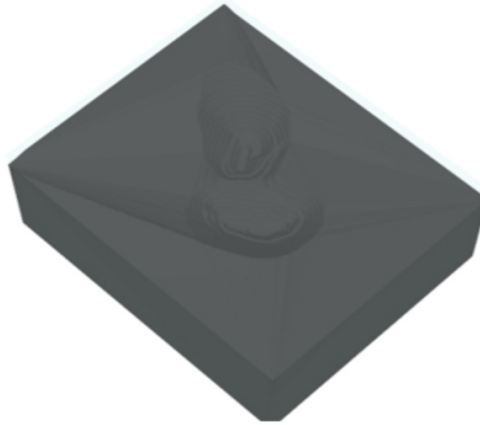
Davranış Formu: Tünellerde kaya davranışının veri olarak kullanılması

Genel Tip: Sistemin genel karakterizasyon olarak çalışması

Fonksiyonel Tip: Sistemin özel uygulamalar için yapılandırılması (Örneğin, tahkimat için)

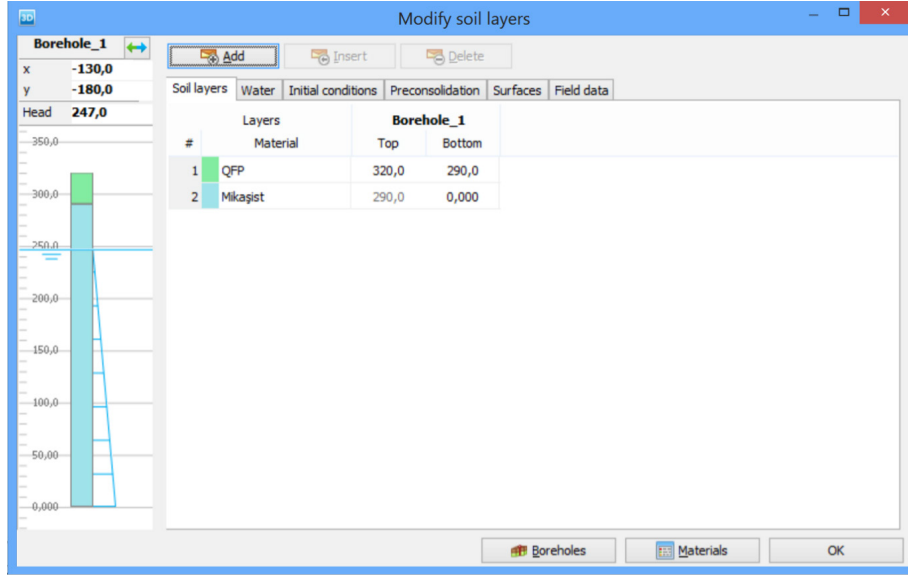


Şekil 1. Nümerik modelde kullanılan prensipler (Küçük ve ark., 2017)



Şekil 2. Modelin ana görüntüsü

Şekil 2’de görüldüğü üzere ocak 320 kotundan, 180 kotuna kadar inmektedir. Şekil 3’te modele tanımlanan kaya kütlesi ve yeraltı su seviyesi görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere 247 m kotunda yeraltı su seviyesi tanımlanmıştır. Modelde kullanılan kaya kütlesine ait veriler Tablo 2’de verilmektedir. 3 boyutlu nümerik modelleme analizlerinde Mohr-Coulomb Yenilme Koşulu kullanılmıştır.



Şekil 3. Modelde tanımlanan kaya kütleleri ve yeraltı suyu seviyesi

Tablo 2. Modelde kullanılan kaya kütlesi parametreleri

Kaya Cinsi	GSI	m_i	E (MPa)	V	C (kPa)	ϕ (°)
Mikaşit	47	12	405.96	0.25	273	16.71
QFP	49	14	525.87	0.20	414	22.75

Modelleme çalışmaları toplamda 16 aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamaların tanımlamaları aşağıda verilmektedir.

Başlangıç Aşaması: Modelin başlangıç yükleme durumu

Aşama 1: Modelin 310 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 2: Modelin 300 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 3: Modelin 290 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 4: Modelin 280 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 5: Modelin 270 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 6: Modelin 260 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 7: Modelin 250 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 8: Modelin 240 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 9: Modelin 230 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 10: Modelin 220 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 11: Modelin 210 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 12: Modelin 200 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 13: Modelin 190 m kot kazı aşamasının yapılması

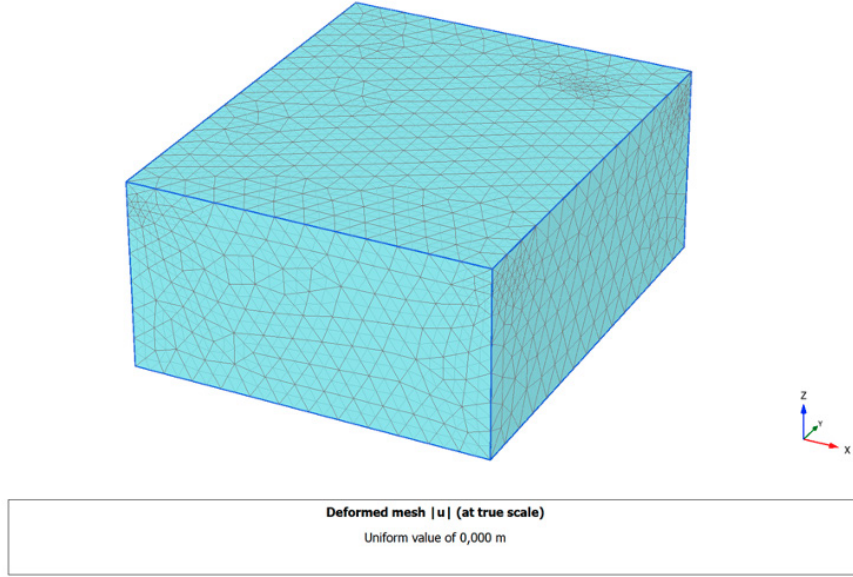
Aşama 14: Modelin 180 m kot kazı aşamasının yapılması

Aşama 15: Bu aşamada c-Phi reduction metodu ile güvenlik katsayısı belirlenmiştir.

2.1. 3 Boyutlu Nümerik Modelleme Aşamaları ve Sonuçları

İşletmeden gelen veriler ve senaryo kapsamında gerçekleştirilen 3 boyutlu nümerik modelleme analizlerine ait detaylı sonuçlar aşağıda verilmektedir.

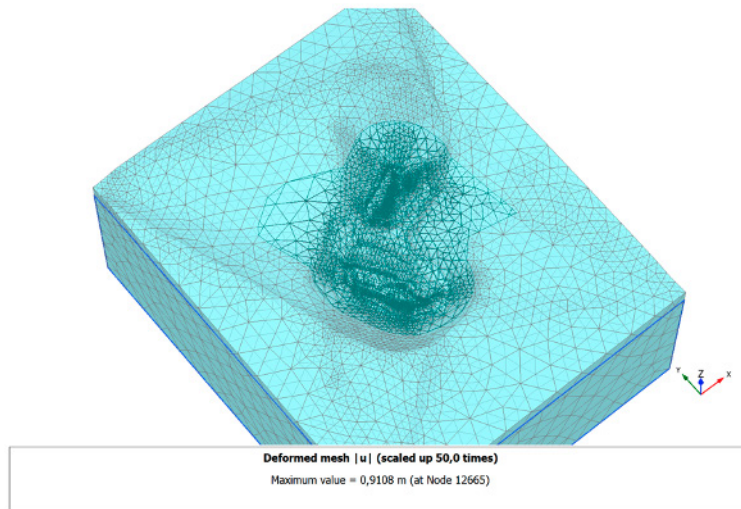
Başlangıç Aşaması: Bu aşamada modelin yükleme koşulları oluşturulmuştur. Modelin ocak oluşacak şekilde kazı aşamalarının yapıldığı yükleme koşullarının (gravite yüklemesi) yüklenildiği ve deformasyonların sıfırlandığı aşamadır.



Şekil 4. Modelin yükleme koşullarının oluşturulduğu aşama

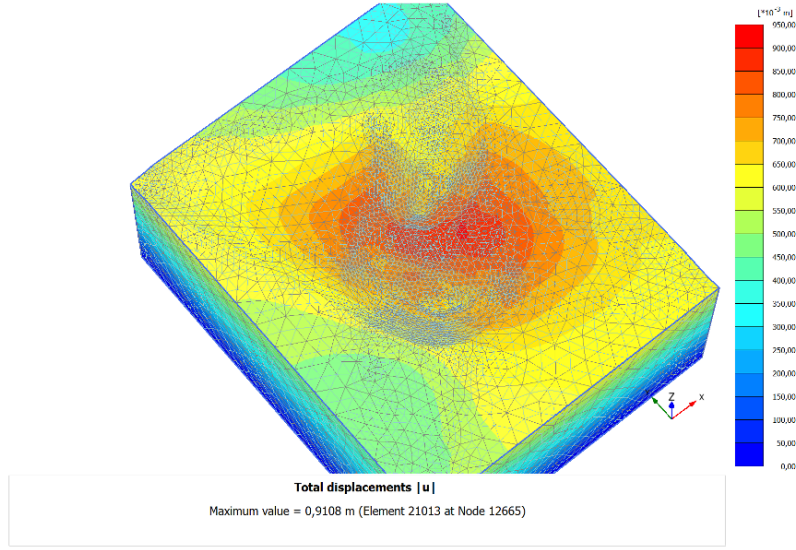
Modelde 320 metre kotundan 180 metre kotuna kadar 10'ar metre basamak yükseklikleri tanımlanmıştır. Modelde tanımlanan basamak genişlikleri 4'er metredir. 320 metre ile 180 metre arası yapılan kazılar toplamda 14 aşamada tanımlanmıştır. Yapılan nümerik modelleme analizlerinden elde edilen sonuçları barındıran son kazı aşaması Aşama 14 'e ait detay bilgiler aşağıda verilmektedir.

Aşama 14: Kazı işlemlerinin son aşamasıdır. Bu aşamada model 190 m kotundan 180 m kotuna kadar 10m'lik kazıya tabi tutulmuştur. Aşağıdaki şekillerde modelde oluşan toplam, yatay (x-y), dikey (z) deformasyonlar ile toplam ve efektif gerilmeler verilmektedir.

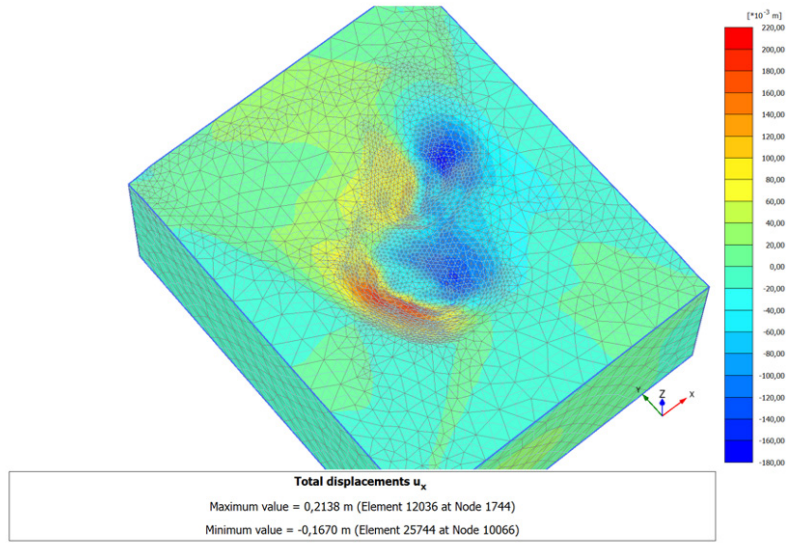


Şekil 5. Modelin 14. Aşamasından görünüm

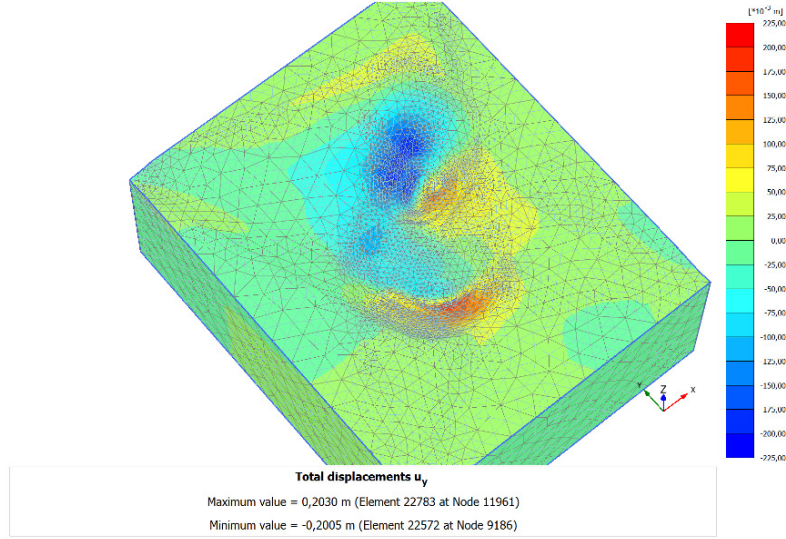
Aşağıdaki şekillerde modelde oluşan toplam, yatay (x-y), düşey (z) deformasyonlar ile toplam ve efektif gerilmeler verilmektedir.



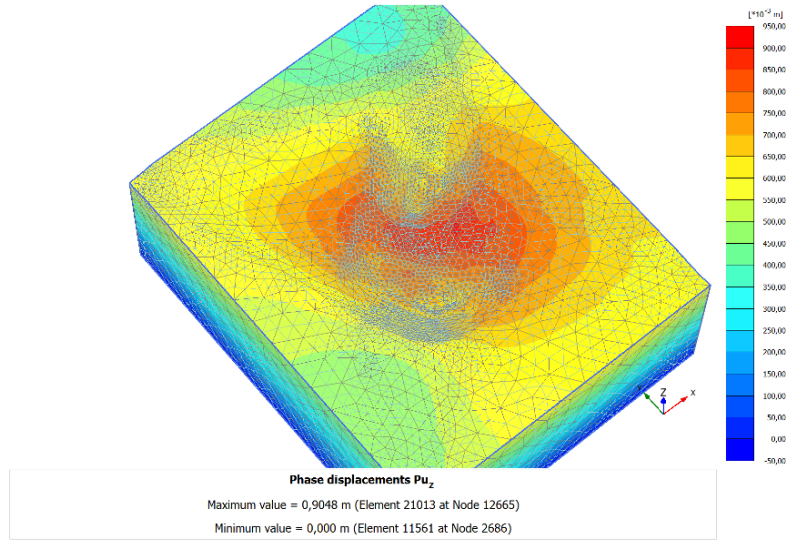
Şekil 6. Modelde oluşan toplam deformasyonlar



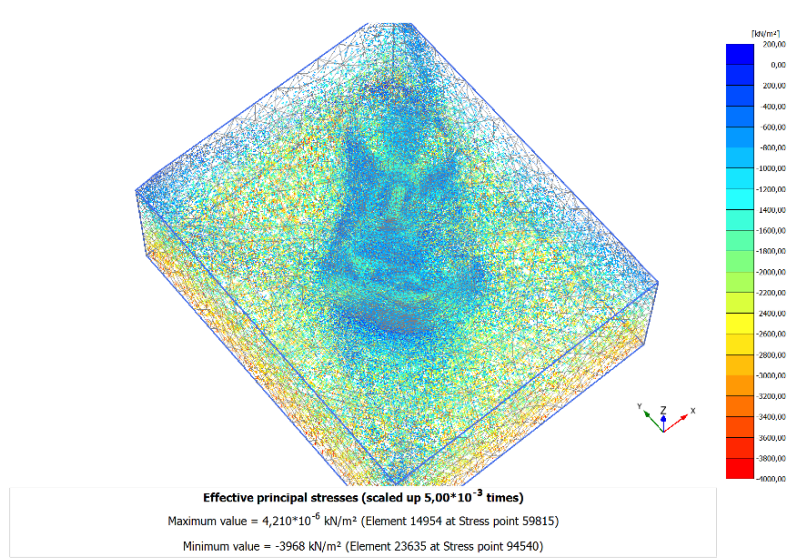
Şekil 7. Modelde oluşan x-yönündeki yatay deformasyonlar



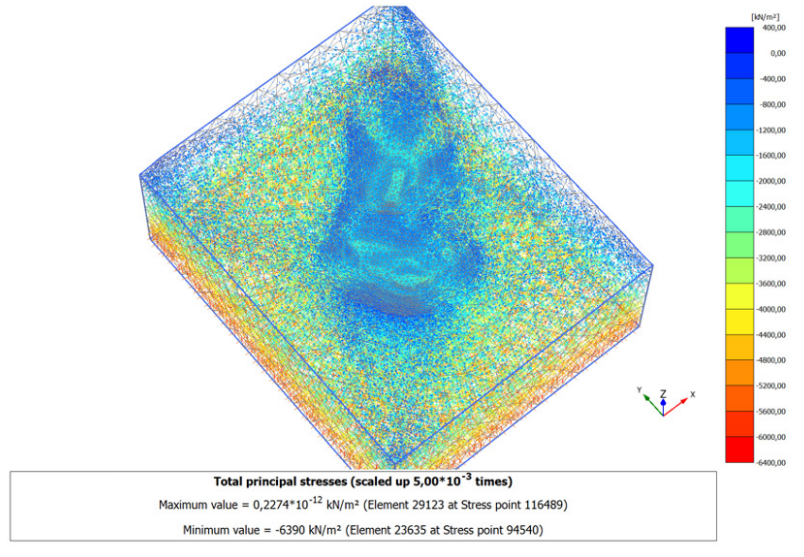
Şekil 8. Modelde oluşan y-yönündeki yatay deformasyonlar



Şekil 9. Modelde oluşan z-yönündeki düşey deformasyonlar

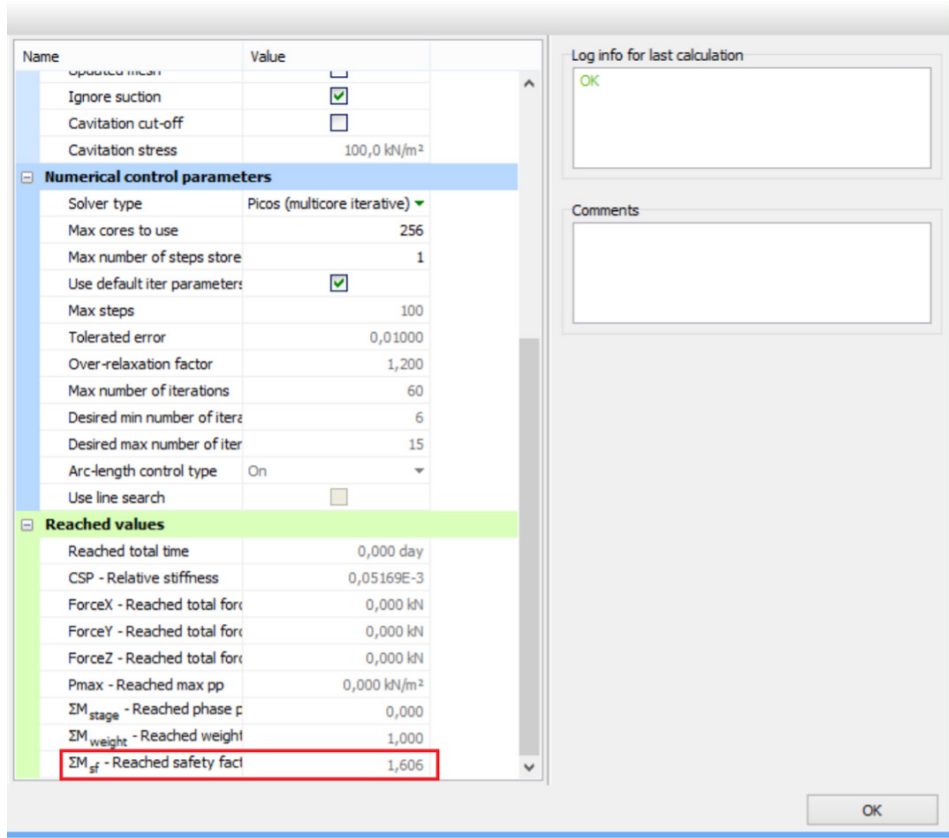


Şekil 10. Modelde oluşan efektif gerilmeler



Şekil 11. Modelde oluşan toplam gerilmeler

Aşama 15: Bu aşamada model 180 m kotuna kadar kazısı tamamlanmış olan açık ocağın güvenlik faktörü hesap edilmiştir. Şekil 12'de c-Phi reduction metodu ile güvenlik katsayısı hesabı verilmektedir.



Şekil 12. Hesaplama sonucu elde edilen Güvenlik Faktörünün görüntüsü

3. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- Bu analizler esnasında kullanılan kaya parametreleri çalışma sahasını işleten firma tarafından elde edilmiştir. Ek olarak, kaya kütlelerinin geçirgenliği ve yeraltı su seviyesi de, çalışma sahasını işleten işletme tarafından sağlanmıştır. Analizlerde yeraltı su seviyesi de tanımlanarak kaya geçirgenliklerinin stabiliteye etkileri de modele dahil edilmiştir.
- Sahada gözlemlenen kaya kütleleri “Sıkışan Kaya” diye tanımlanabilir. Ancak, analizlerde Mohr-Coulomb Yenilme Koşulu kullanılmıştır. Bunun nedeni, diğer yenilme mekanizmalarına nazaran Mohr-Coulomb Yenilme Koşulu ile doğruya daha yakın sonuçlar elde edilebilmesidir. Saha şartlarındaki kaya kütlelerini temsil eden verilerin sağlıklı olarak elde edilememesi de göz önüne alındığında, bu yöntem en uygun yöntem olarak görülmektedir.
- 3 boyutlu modelin en üst kotu 320 metre en alt kotu da 180 metre olarak tanımlanmıştır. 320 metre kotundan 180 metre kotuna kadar 10’ar metre basamak yükseklikleri ile aşamalandırılmıştır. Modelde tanımlanan basamak genişlikleri 4’er metredir. Model toplamda 14 adet kazı aşamasına sahiptir. Tüm kazılar bittikten sonra modelde oluşan toplam deformasyonların 0.91 m olduğu görülmektedir. Modelin x-yönünde maksimum 0.21m’lik ve minimum 0.16 m’lik yatay deformasyonların olduğu görülmüştür. Modelin y-yönünde maksimum 0.203 m’lik ve minimum 0.200 m’lik yatay deformasyonların olduğu görülmüştür. Modelin z-yönünde maksimum 0.90 m’lik düşey deformasyon olduğu görülmüştür. Kazı aşamaları sonucunda modelde minimum 4210×10^{-3} kN/m²’lik ve maksimum 3968 kN/m²’lik efektif ve minimum 2274×10^{-8} kN/m²’lik ve maksimum 6390 kN/m²’lik toplam gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Efektif ve toplam gerilmelerin farklı olmasının nedeni, modelin yeraltısuyu etkilerini de içeriyor olmasıdır.

- Aşama 15'te herhangi bir kazı aşaması yoktur. Bu aşamada tamamlanan tüm kazı aşamalarından sonra c-Phi reduction metodu ile güvenlik katsayısı belirlenmiştir. Modelin son hali itibari ile oluşan güvenlik katsayısı 1.606 olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ocağın farklı lokasyonlarında farklı şev açıları uygulandığında minimum dekapaj ve maksimum cevher kazanımı için uygun şevlerin oluşturulduğu görülmektedir. Ocakta, farklı lokasyonlarda elde edilen güvenli şev açıları 46 ile 31derece arasında değişmektedir.

Referanslar

Aksoy CO, GG Uyar AKSOY, A Guney, Özacar V, HE Yaman (2020), "Influence of time-dependency on elastic rock properties under constant load and its effect on tunnel stability", *Geomechanics and Engineering*, 20 (1), 1-7

Aksoy CO, Gulsev G. Uyar, Semih Utku, Suleyman Safak, Vehbi Ozacar, (2019), "A new integrated method to design of rock structures", *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 339-352,

Aksoy CO, Şafak S, Uyar G G, Özacar V (2018), "A new mathematical approach for representing the deformation mechanism of rocks under constant load", *Geotechnique Letters*, 8, 80-90.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mec.* 6, 189-236.

Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Instn. Civ. Eng.* 15(12), 335–344.

Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., Cording, E.J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: *Proc. 8th U.S. Symp. Rock Mech.* AIME, New York, pp. 237-302.

Edelbro, C., 2006, Strength of hard rock masses: a case study. Technical report, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology.,

Franklin, J.A., 1975. Safety and economy in tunnelling. In: *Proc. 10th Int. Can. Rock Mech. Symp.* Queens University, Kingston, Canada, pp. 27-53.

Hoek, E., 1994. Strength of rock masses. *News Journal of ISRM.* 2(2), 4-16. ISRM, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 18, 85-110.

Laubscher, D.H., 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses-mining applications. T. I.

Min. Metall. A86, A1–A8. Lauff er, H., 1958. Classification for tunnel construction. *Geol. Bauwesen.* 24(1), 46–51 (in German).

Matula, M., Holzer, R., 1978. Engineering typology of rock masses. In: *Proc. Felsmekanik Kolloquium, Grundlagen und Anwendung der Felsmekanik.* Karlsruhe, Germany, pp. 107-121.

Küçük, K., Aksoy, C.O., Onargan, T., Ozacar, V., Yaman H.E., Kocaman, C., 2017. Soma Deniz Açık Kömür Ocağında 3 Boyutlu Nümerik Modelleme İle Şev Stabilitesi Performansının İncelenmesi. IMCET 2017, Antalya, 158-169

Palmström, A., 1995, RMI-A rock mass characterization system for rock engineering purposes, PhD Thesis, University of Oslo, Norway

Palmström, A., 2000, Recent developments in rock support estimates by the RMI, Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 6, 1, 1-19

Palmström A., Stille, H., 2007, Ground behaviour and rock engineering tools for underground excavations, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 22, Issue 4, July 2007, Pages 363–376

Patching, T.H., Coates, D.F., 1968. A recommended of rock classifications for rock mechanics purposes. CIM Bull., 1195–1197.

Rabcewicz L., 1964. The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Water Power, November 1964, 453-457, Part two, Water Power, December 1964, 511-515

Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: Proceedings of the Int. Symp. on the Role of Rock Mech., Zacatecas, pp.49-53.

Terzaghi, K., 1946. Rock defect sand loads on tunnel supports. In: Proctor, R.V., White, T.L. (Eds.), Rock Tunneling with Steel Supports. Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, OH, 1, pp.17–99.

Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., Skinner, E.H., 1972. Support determination based on geologic predictions. In: Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf. AIME, New York, pp. 43-64.

Williamson, D.A., 1980. Uniform rock classification for geotechnical engineering purposes. Trans. Res. Rec. 783, 9-14.