

Makale Gönderim Tarihi: 02.12.2022

Yayına Kabul Tarihi: 09.02.2023

## Fay Denetimli Bir Açık Ocakta Duraylılık Analizi

*Stability Analysis in a Fault controlled Open Pit Mine*

Ahmet Hamdi Deliormanlı<sup>1</sup>, Mehmet Volkan Özdoğan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, İzmir

Sorumlu Yazar: mehmet.ozdogan@deu.edu.tr

### Özet

İnsan yapımı veya doğal şevlerin güvenli tasarımını belirlemek için şev stabilitesi analizlerinden yararlanır. Açık maden ocaklarının şevleri söz konusu olduğunda bu analizler oldukça önemlidir. Bu nedenle mühendisler tarafından en güvenli ve ekonomik çalışma şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bir şev tasarımının çözümü jeoteknik ve çevresel şartlara bağlı karmaşık bir problemdir. Bu çalışmada örnek bir açık ocak için şev duraylılık analiz çalışmalarına yer verilmiştir. Ocağa ait jeoteknik şartlar ortaya konmuş ve stereografik izdüşüm yöntemi kullanılarak kinematik analiz gerçekleştirilmiştir. Ardından ocakta bulunan fayın ocak stabilitesine olan etkisi ayrıca değerlendirilmiştir. Kinematik analiz sonuçlarına göre ocakta 33° lik genel şev açısı güvenli çalışma şartlarını sağlarken fay üzerinde yapılan limit-denge analizleri sonucuna göre 30° lik genel şev açısı güvenli çalışma açısı olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Şev stabilitesi, Açık ocak, limit denge, kinematik analiz

### Abstract

*Slope stability analysis is carried out to determine the safe design of a human-made or natural slopes. It is quite important if the slope of an open pit mine considered. Therefore engineers have to ensure the safest and economical operation conditions. Solution of a design problem of a slope is complex due to various geotechnical and environmental conditions. In this study a slope stability analysis have been carried out for an open pit mine. The geotechnical conditions of pit have been revealed and slope kinematic analysis was performed employing a stereographic projection. Also the effect of faults on pit stability was evaluated. According to analyse result the kinematic analyse indicate 33° for overall slope angle, limit-equilibrium analyse indicate 30° for a safe pit.*

**Keywords:** *Slope stability, Open pit, limit- equilibrium, kinematic analysis*

## **1.Giriş**

Açık ocak madenciliğinde şev tasarımları maliyet ve iş güvenliği arasında bir optimizasyon problemi olup sistematik ve dinamik bir şekilde yönetilmesi gereken bir operasyondur. Çevherin en düşük maliyetle üretilebilmesi için kazı miktarını azaltacak en dik şevler istenirken bu şevlerin yenilme gerçekleşip ocakta herhangi bir tehlike yaratmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Açık ocakta şevlerin duraylılığına etkiyen 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.

Gerek açık ocak şevlerinin değerlendirilmesinde gerekse doğal şevlerin duraylılığının değerlendirilmesinde kullanılan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemler içinde en çok tercih edilen yöntemler kinematik analizler, limit denge analizleri, sayısal analizler (nümerik) ve Şev Kütle Puanlaması (SMR) gibi kaya kütle sınıflandırma sistemleri ile değerlendirilmektedir. (Hoek ve Bray, 1981; Hoek, 1999; Ulusay vd.,2001; Pantelidis, 2009; Alejano vd., 2011; Karaman, 2013)

Her şevli yapı kendine özgü yapısal özelliklere sahiptir dolayısıyla şevlerin duraylılık koşullarını belirlemek için genel koşullar koymak oldukça zordur. Bu sebeple şev analizleri yaparken oluşturdukları şev ortamının türüne göre duraylılık analizleri gerçekleştirilir (Özgenoğlu&Öcal, 1995). Bu ortamlar:

- Süreksiz ortamlar (süreksizlikleri içeren kaya kütleleri)
- Yarı sürekli ortam (patlatılmış kaya kütleleri, kaya dolguları gibi)
- Sürekli ortam (toprak, öğütülmüş atık malzeme, masif kaya kütleleri gibi)

Süreksiz ortamlarda duraylılık analizleri yapılırken, kinematik analiz yöntemleri seçilirken, sürekli ortam, yarı sürekli ortam veya sürekli ve süreksiz ortamların birlikte bulunduğu durumlarda ise kinematik analiz, limit denge veya sayısal analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

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 oldukça 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.

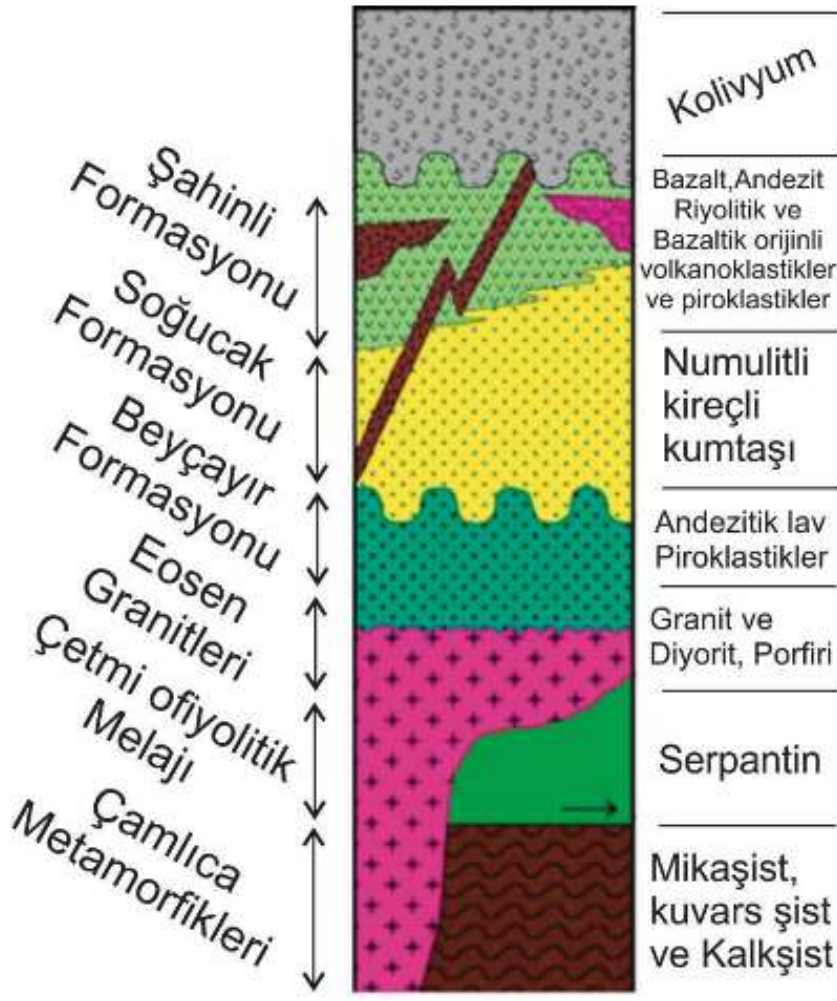
Limit denge analizi ise hem 2 boyutlu hemde 3 boyutlu duraylılığı analizlerinde en çok kullanılan analiz yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde potansiyel yenilme mekanizması tanımlanır ve mevcut jeoteknik durum için güvenlik katsayısı hesaplanır (Huang,2014). Bu amaçla analiz edilen şev dilimlere bölünerek hem her dilim için hem de sistem olarak denge koşulları hesaplanır. Limit denge analiz yöntemi, Bishop, Janbu, Spencer vb. yöntemleri gibi bir çok araştırmacı tarafından analiz yöntemleri geliştirilmiştir.

Çalışma kapsamında iki adet büyük fay ile kesilen bir açık ocak için önce kinematik analiz yöntemi ile yenilme durumu değerlendirilmiş ardından fay malzemesi üzerinden yenilme durumu için limit denge yöntemi ile duraylılık analizi yapılmıştır. Son olarak fay malzemesindeki deği-

şimler göz önüne alınarak olasılıksal yöntem ile kayma düzlemi malzemesindeki dayanım değişimlerinin şev duraylılığı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

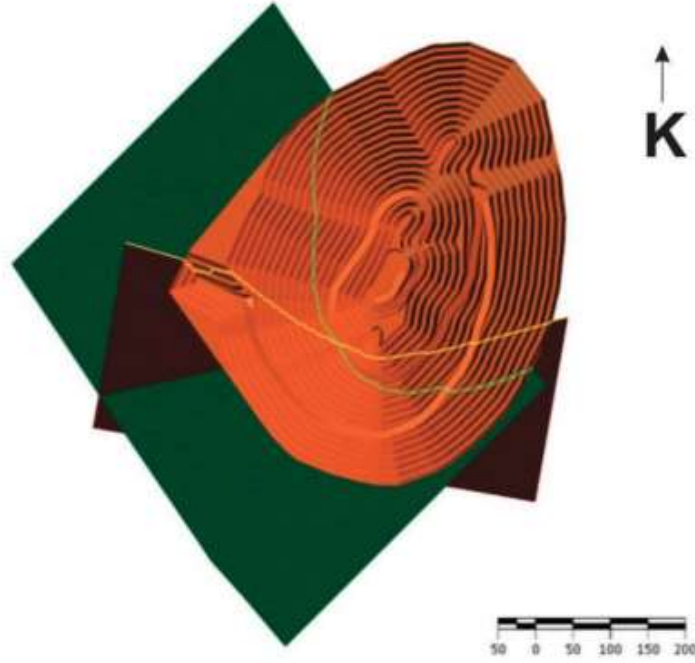
## 2. Çalışma Sahası ve Jeolojisi

Çalışma sahası Çanakkale ilinin Lapseki ilçesinde yer almaktadır. Çalışılan ruhsat alanı içerisinde yaşlıdan gence doğru paleozoik yaşlı Çamlıca metamorfiklerine ait mikaşist birimleri kre-tase yaşlı Çetmi melanjına ait ofiyolit kayaçlar, kumtaşı kıraçtaşı-kumtaşı birimlerini içeren orta eosen yaşlı Soğucak formasyonu, çalışma alanında geniş yayılım gösteren Eosen yaşlı Şahinli formasyonuna ait Volkanik birimler, orta Eosen yaşlı Beyçayırı Volkanik birimleri ve eosen yaşlı Granodiyoritler ile Kuvartern yaşlı Koliviyum birimi yüzlek vermektedir. MTA haritaları ve sahayla ilgili yapılmış önceki çalışmalar kullanılarak hazırlanan stratigrafik kolon şekil 1’de verilmiştir. (Nihai ÇED raporu, 2015)



Şekil 1. Çalışma sahasına ait stratigrafik kesit (Nihai ÇED raporu, 2015)

Topografyadan 185 metre derinliğe ulaşan açık ocaкта batı şevleri 37°-38°, doğu şevleri ise 38°-40° olarak planlanmıştır. Ocak içerisinden geçen ve birbirini kesen iki adet fayın varlığı belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Ocağın 3B model görüntüsü ve fayların konumu (Faylar; Sarı Hat: 190/60, Yeşil Hat: 225/35).

### 3. Çalışma Metodu

Çalışma sahasında ocağın duraylılığı öncelikle stereografik izdüşüm yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla yapılan arazi çalışmasından elde edilen süreksizliklerin ve şev yüzeylerinin konumları ve yönelimleri kullanılmış ardından muhtemel yenilme durumları kinematik analiz yapılarak değerlendirilmiştir.

Ocaktaki kinematik koşullardan kaynaklı riskler değerlendirildikten sonra ocak içinden geçen faylardan kaynaklı fay malzemesi üzerinden oluşabilecek olan yenilme durumları limit denge yöntemi ile fay malzemesinin dayanım parametrelerine bağlı olarak belirlenmiştir.

Sahada duraylılık analizlerine yönelik olarak süreksizliklerin konumları arazi ölçümleri ile belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde 4 adet ana süreksizliğe ait yönelimler belirlenmiştir. Sahada yapılan yönelim ölçümleri eğim/eğim yönü olarak okunmuştur. Belirlenen süreksizliklere ait yönelimler Çizelge 1’de verilmiştir. Ölçülen süreksizliklerin konumları stereonet üzerinde Şekil 3’de verilmiştir. Yapılan arazi çalışmasında 4 adet ana süreksizlik takımının ikisinin fay olduğu belirlenmiştir.

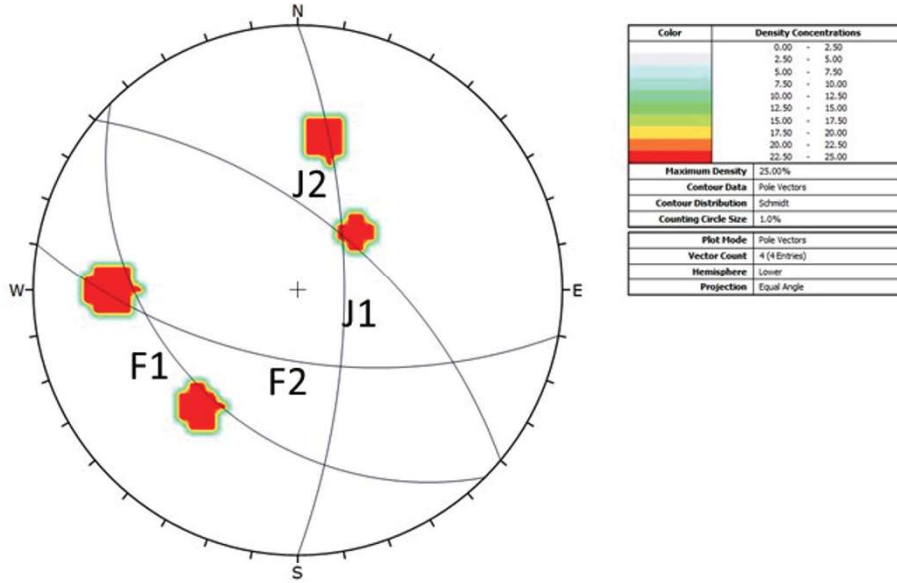
Çizelge 1. Süreksizliklere ait yönelimler

Süreksizlik Takımı	Eğim	Eğim Yönü
F1	35	225 (Fay)
J1	70	090
J2	60	040
F2	60	190 (Fay)



Çalışma sahasında şev duraylılık analizlerine yönelik olarak arazi ölçümleri ve araziden alınan numuneler üzerinde laboratuvar testleri yapılmıştır. Çalışma sahasından süreksizlik yüzeylerinden alınan numunelerin kodları ve yaklaşık konumları şekil 4'de gösterilmiştir.

Süreksizlik yüzeylerinin kesme dayanımı parametrelerini belirlemek için alınan numuneler üzerinde doğrudan kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda elde edilen kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Sahada ölçülen süreksizliklerin stereonet üzerindeki konumları .



Şekil 4. Numune alınan bölgeler (Faylar; Sarı Hat: 190/60, Yeşil Hat: 225/35)

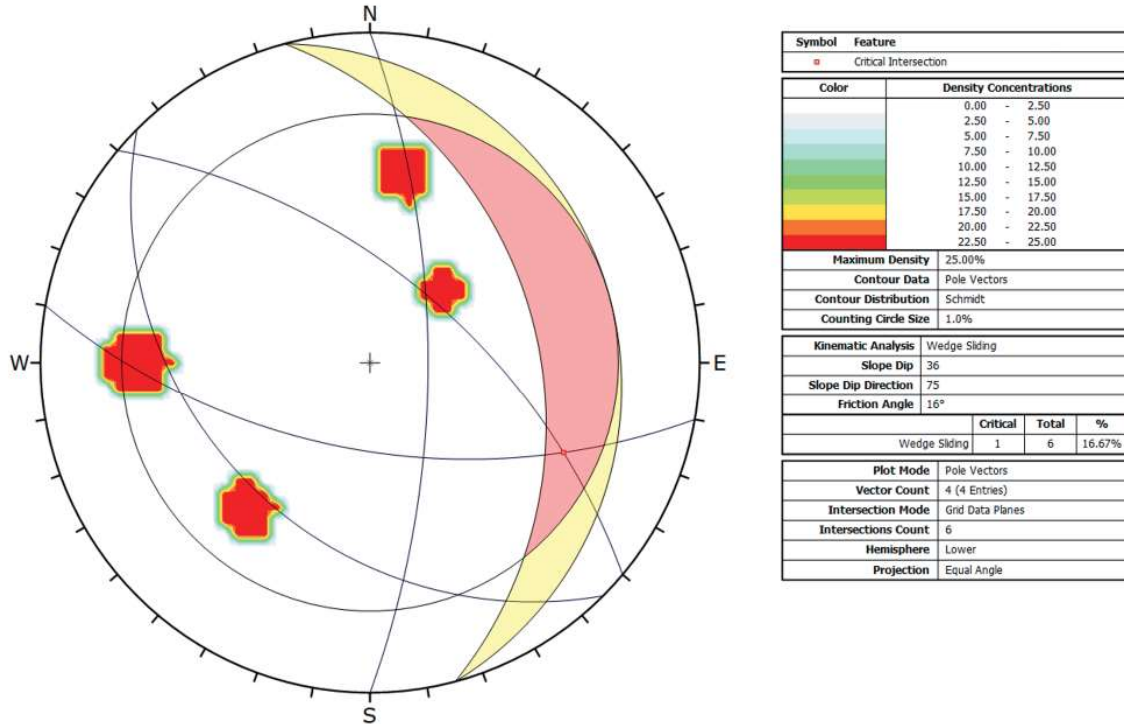
Çizelge 2. Süreksizlik yüzeylerinden alınan malzemelerin içsel parametreleri

Numune Kodu	Kohezyon (c) (kg/cm <sup>2</sup> )	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Ocak dibi	0.21	16.09
Prizma	0.28	28.43
Referans	0.41	23.00
Ref-karşısı	0.39	22.90
Refkarşısı alt	0.09	38.29

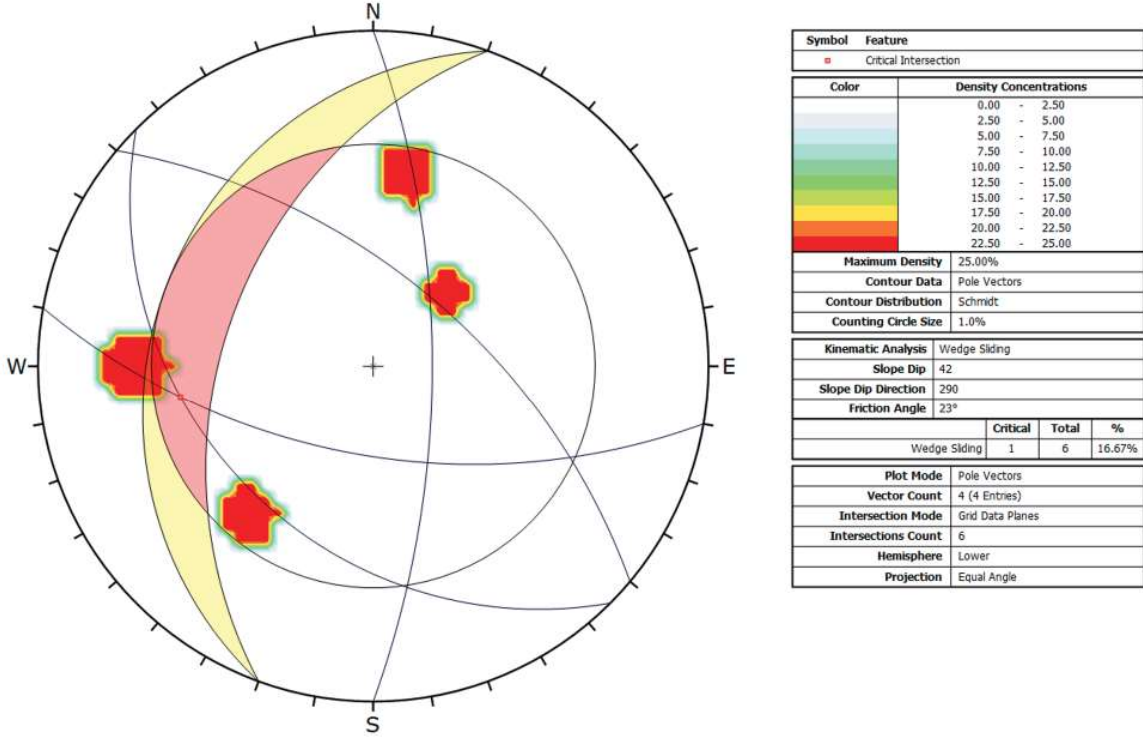
## 4.Sonuçlar

### 4.1 Kinematik Analizler

Çalışılan ocakta genel şev açıları 36-42 derece arasında değişmektedir. Süreksizlik düzlemlerinin içsel sürtünme açıları ortalama 16-38 derece olarak belirlenmiştir. Bu parametreler temel alındığında yapılan kinematik analizlerde elde edilen kama tipi yenilme durumları en yoğun şekilde GD ve GB şevlerinde görülmektedir. Bu durum Şekil 5-Şekil 6'da verilmiştir. Ocak içinde formasyonların eğim yönleri 100-150 arasında değişim göstermektedir.

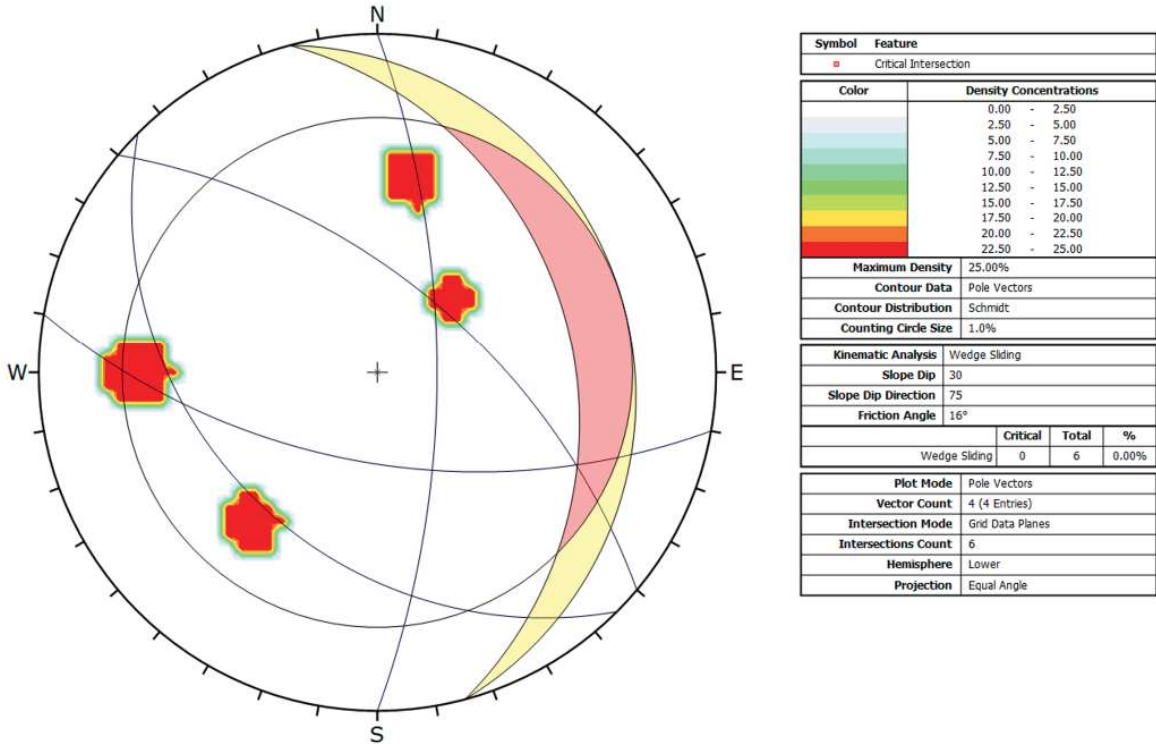


Şekil 5. 36 derecelik genel şev açısında kama türü yenilme analizi

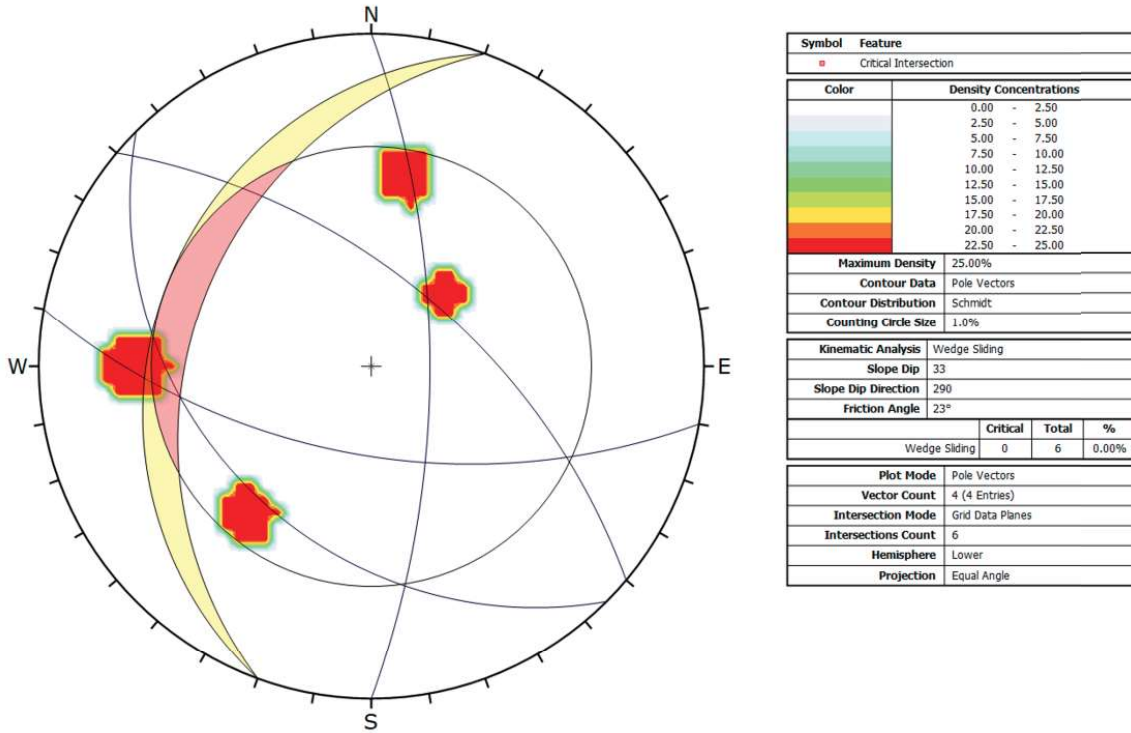


Şekil 6. 42 derecelik genel şev açısında kama türü yenilme analizi

Çalışılan ocakta GD ve GB şevlerinin genel açısının 30-33 dereceye düşürülmesi durumunda, şevlerde görülen kama tipi yenilmelerin riskleri ortadan kalkacağı görülmektedir. (Şekil 7-Şekil 8).



Şekil 7. 30 derecelik genel şev açısında kama türü yenilme analizi



Şekil 8. 33 derecelik genel şev açısında kama türü yenilme analizi

#### 4.2 Fay Düzlemlerinin Duraylılığa Etkisi

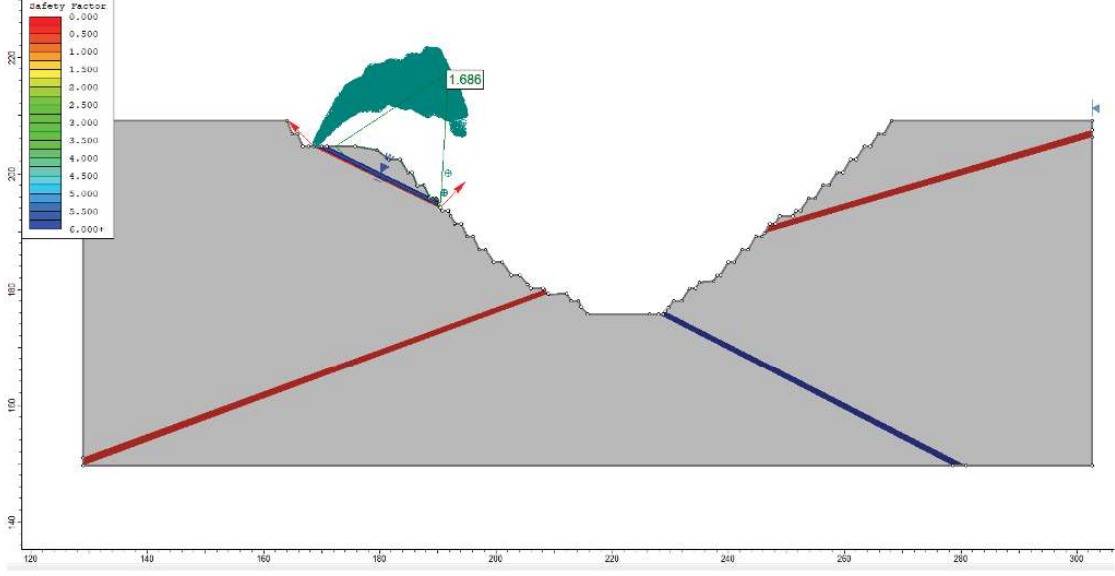
Çalışma sahasında ocak içerisinde geçen ve çakışan 190/60 ve 225/35 fayları bulunmaktadır. Ocak için yapılan kinematik analiz sonrası çalışma kapsamında faylı seviye üzerinde kalan basamakların fay malzemesi üzerinden yenilme ihtimali limit denge yöntemi ile değerlendirilmiştir. 190/60 ve 225/35 fayları için ayrı ayrı yapılan değerlendirme sonuçları Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Analizlerde kullanılan birimlere ait değişkenler Çizelge 3 de verilmiştir.

Çizelge 3. Analizlerde kullanılan değişkenler

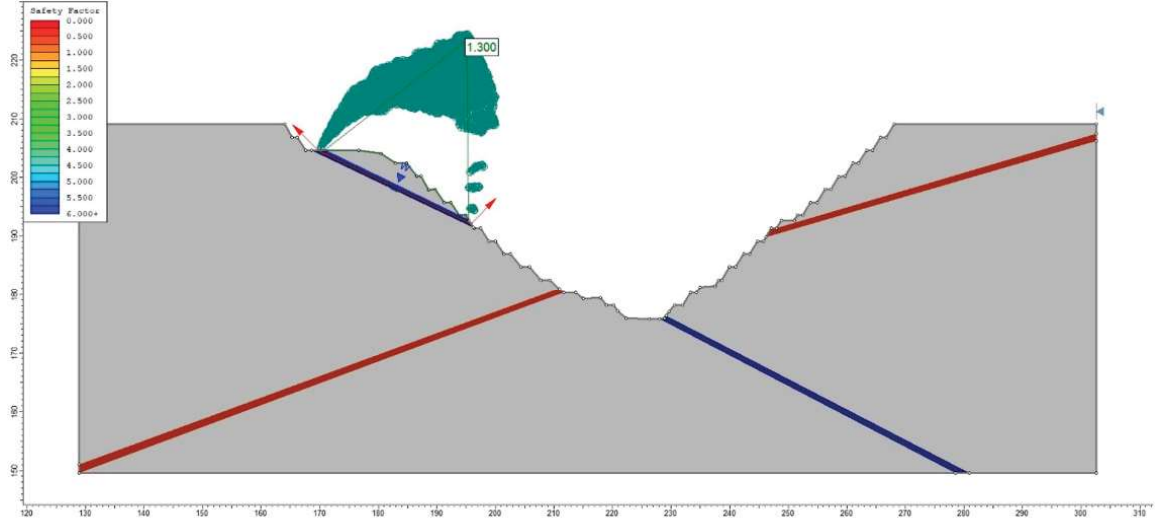
	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	Kohezyon (c) (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)
Kaya Kütleli	24.80	27.0	200	23
Fay (190/60)	22.00	24.0	20	16
Fay(225/35)	22.50	24.5	30	22

Bishop yöntemine göre yapılan limit denge analizi sonuçlarına göre 190/60 fayı değerlendirildiğinde 30° ve 33° genel şev açıları için fay malzemesi üzerinden yenilme gerçekleşmesi durumu için güvenlik katsayısı sırasıyla 1.30 ve 1.686 olarak bulunurken, ocakta genel şev açısının 40° olduğu 225/35 fayı üzerinden yenilme gerçekleşmesi durumu için güvenlik katsayısı 2.24 olarak bulunmuştur. 225/35 fayı oldukça güvenli sınır içinde kalmışken 30° genel şev açısında 190/60 fayı açık ocaklar için istenilen minimum güvelik katsayısı olan 1.2-1.3 değerinde bulunmuştur.

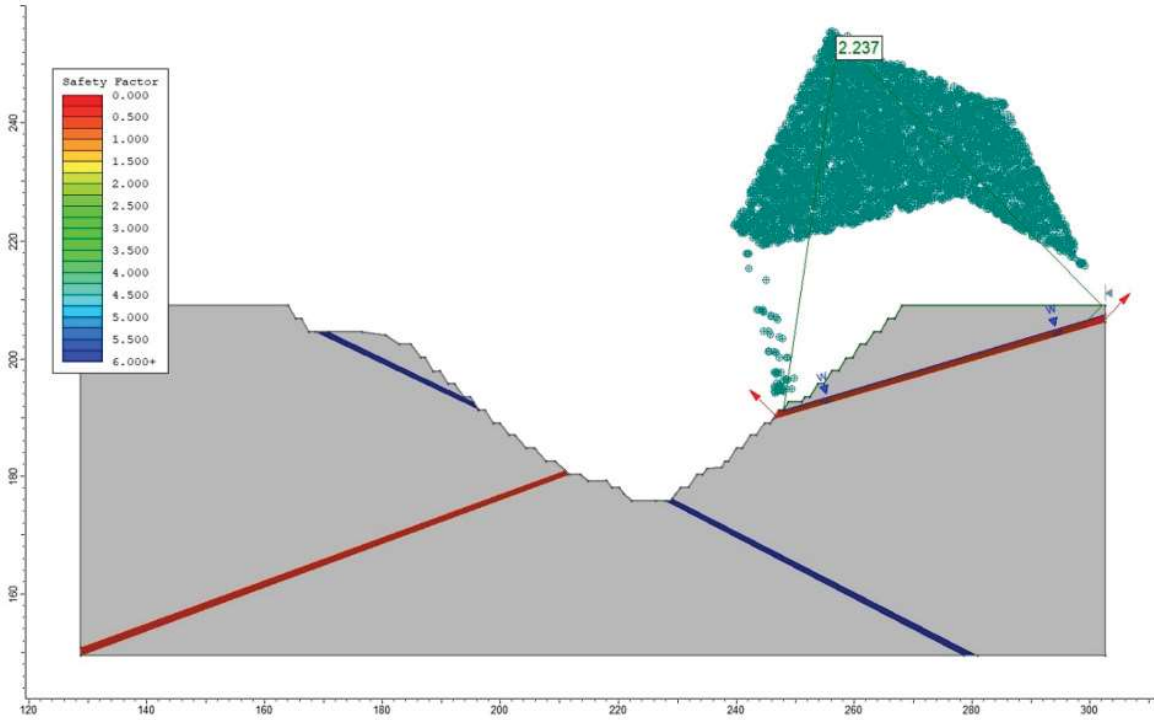




Şekil 9. Fay (190/60) için limit denge analizi (Genel Şev açısı 30° olması durumunda)

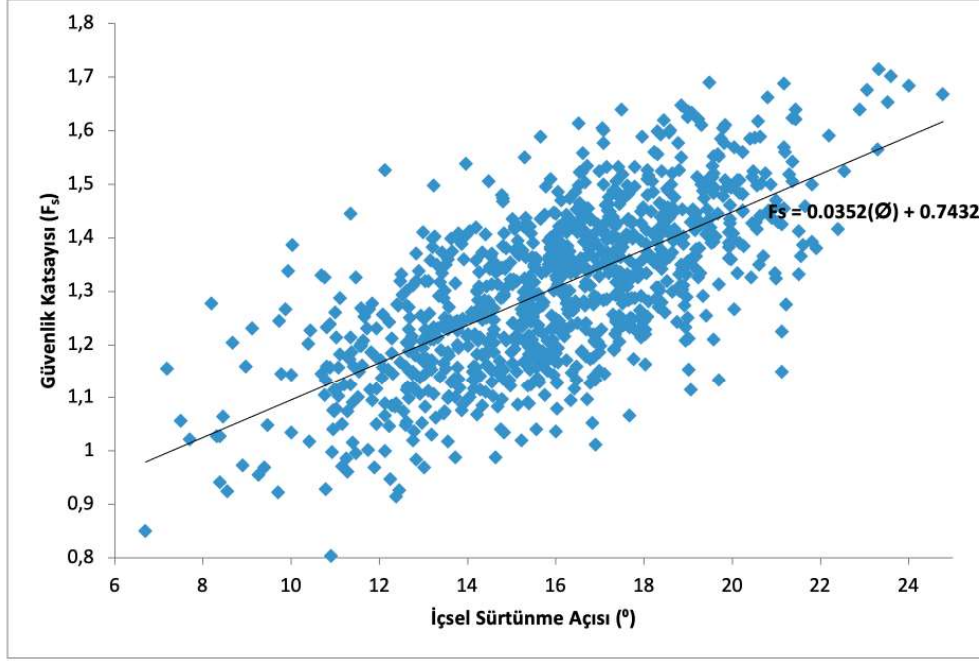


Şekil 10. Fay (190/60) için limit denge analizi (Genel Şev açısı 30° olması durumunda)

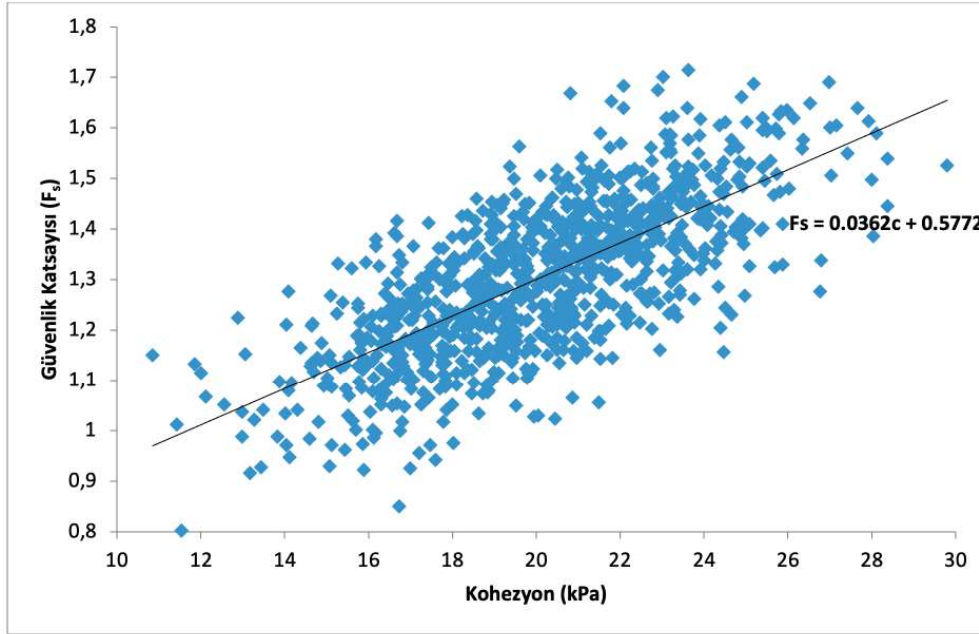


Şekil 11. Fay (225/35) için limit denge analizi

Yapılan hesaplamaların ardından fay malzemesinin mekanik özelliklerini homojen olmaması ve meydana gelebilecek farklılıkları değerlendirmek amacıyla genel şev açısının  $30^\circ$  olması durumunda 190/60 fay malzemesinin içsel parametrelerindeki değişimler deterministik olan limit denge yöntemine ilave olarak olasılıksal yöntem ile analiz edilmiştir. Bu amaçla Monte-Carlo örnekleme metodu kullanılmış ve fay malzemesinin kohezyon ve içsel sürtünme açısının 1000 farklı değeri için şevin güvenlik katsayısı değeri hesaplanmıştır.  $30^\circ$  genel şev açısı için deterministik yöntem ile 1.300 bulunan şev güvenlik katsayısı olasılıksal yöntem ile 1.306 olarak hesaplanmıştır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı bağımsız değişkenlerindeki değişimin güvenlik katsayısı üzerindeki etkisi ise Şekil 12 ve Şekil 13'de verilmiştir. Monte-Carlo yöntemi ile yapılan analizlerde tek başına içsel sürtünme açısının mevcut durum olan  $16^\circ$  den  $7^\circ$  düşmesi durumunda şev güvenlik katsayısı 1'in altında düşmekte ve denge durumu bozulmaktadır. Aynı şekilde kohezyon değerinin 20 kPa dan 11.7 kPa değerinin altına düştüğü durumda yine şevde fay üzerinden yenilme oluşacaktır.



Şekil 12. Fay malzemesinin içsel sürtünme açısındaki değişimin güvenlik katsayısı üzerindeki değişimi



Şekil 13. Fay malzemesinin kohezyonundaki değişimin güvenlik katsayısı üzerindeki değişimi

## 5. Değerlendirme

Açık ocak şev duraylılığı açısından değerlendirilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, 38° genel şev açısında ocağın kinematik koşulları değerlendirildiğine riskler barındırdığı ve genel şev açısının 33°'ye düşürülmesi gerektiği belirlenmiştir. Ancak ocakta bulunan fay düzlemi de göz önünde bulundurularak yapılan limit denge analizleri sonucunda açık ocak işletmeciliği açısından güvenli genel şev açısının 30° seviyesine kadar düşürülmesi gerektiği görülmüştür. Ayrıca yapılan deterministik analizlerin yanında yapılan olasılıksal analizler sonucunda fay malzemesinin mekanik özelliklerindeki düşmenin de yine ocak duraylılığına kayda değer biçimde

etki ettiği belirlenmiştir. Yapılan çalışmada da görülmektedir ki şev duraylılık analizleri ocak karakteristiğine göre birçok değişkene bağlı olup güncellenen saha bilgileri ile dinamik olarak değerlendirilmelidir.

### **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.

Lapseki Altın-Gümüş Madeni ve Zenginleştirme Tesisi Projesi Nihai ÇED Raporu. MİTTO Danışmanlık, Haziran 2015

Hoek, E., Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd edition. London, Institute of Mining and Metallurgy. 358 p.

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

Huang Y.P., 2014. *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods*. American Society of Civil Engineers. 376 p.

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

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.

Özgenoğlu, A., Öcal A., 1995. Açık Ocaklarda Şev Stabilite Analizi için Uzman Sistem Geliştirilmesi. TUBİTAK Poje: YBAG- 0063

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