

**AÇIK OCAK İLE YER ALTI İŞLETMESİ  
ARASINDA BIRAKILAN EŞİK TOPUĞUN  
ÜRETİLMESİ İLE MEYDANA GELEN  
DURAYLILIK KOŞULLARININ SAYISAL  
ANALİZİ: BİR MADEN ÖZELİNDE  
İNCELEME**

**DOKTORA TEZİ**

Victor Abel Massawe



**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Ankara, 2024

## ÖZET

# AÇIK OCAK İLE YER ALTI İŞLETMESİ ARASINDA BIRAKILAN EŞİK TOPUĞUN ÜRETİLMESİ İLE MEYDANA GELEN DURAYLILIK KOŞULLARININ SAYISAL ANALİZİ: BİR MADEN ÖZELİNDE İNCELEME

**Victor Abel Massawe**

**Doktora, Maden Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Prof.Dr. Bahtiyar ÜNVER**

**Haziran 2024, 158 sayfa**

Eşik topuk (CP; Crown Pillar), yer altı madencilik operasyonlarını yer üstü veya açık ocak operasyonlarından ayırır. Personelin ve makinelerin güvenliğini sağlamak için havalandırmayı iyileştirir ve ocak şevlerinin duraylılığı korurken, bir yer altı madenini su baskını ve kaya düşmesi risklerine karşı korur. Çevreleyen kaya kütlelerinin stabilitesini garanti altına almak için optimum CP kalınlığının doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir ve kapsamlı bir analiz gerektirir. Yıllar boyunca görgül yaklaşımlardan gelişmiş üç-boyutlu sayısal yöntemlere kadar çok sayıda tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Ancak kaya kütleleri özellikleri ve kazı geometrisi gibi değişkenler, her bir madene özgü tahminlerde farklı sonuçların elde edilmesine neden olabilir. CP'de bulunan cevher genellikle bir kayıp olarak kabul edilir, ancak bazen CP'den yüksek tenörlü cevher üretim ihtiyacı doğabilir. Normal olarak CP'de bulunan cevher üretiminin maden ömrünün (LoM) sonuna doğru üretim işleminin planlanması geleneksel bir uygulamadır. Yüksek kaliteli cevherin CP'den çıkarılması, dengesiz ocak eğimlerine neden olabilir ve dolgu, doğal olarak oluşan bir kaya kütleleri ile aynı düzeyde mukavemet veya desteğe ulaşamayabilir. Maden kapanma aşamasında, özellikle ocağın uzun vadeli sürdürülebilirliğini etkileyen faktörlere odaklanılarak bu koşullar ele alınmaktadır. Bu, yerel topluluk ve ekosistem için çevresel faydaların öncelikli olarak değerlendirilmesini içerir.

Örneğin, CP dolgu malzemesinin açık ocak içinde su tutmaması ve bunun sonucunda yer altı ortamının kirlenmesi riski vardır. Bu tez, CP'nin tasarlanması ve çıkarılmasıyla ilgili istikrar koşullarını ele almayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda, maden kapanma üzerine güvenli bir maden ocağı gölü oluşturmayı amaçlayan rehabilitasyon stratejileri de önermekte ve yerel toplumu ve ekosistemi olumlu yönde etkileyebilecek sürdürülebilir bir çevre stratejisi sunmaktadır. Bu hedeflere ulaşmak için Tanzanya'daki bir altın madeni olan Bauhinia Creek Madeni'nden alınan bir örnek olay çalışması kullanılmıştır. Örnek çalışmanın geometrik, jeomekanik özellikleri, yerinde gerilmeler ve jeoteknik verileri; CP kalınlığını doğrulamak, CP'de bulunan cevher üretimini simüle etmek ve duraylılık değerlendirmesi yapmak için kullanılan FLAC3D ve 3DEC sayısal modellerini oluşturmak için kullanılmıştır. Sonuçta ocak gölünün tabanını oluşturmak için en iyi dolgu malzemeleri önerilmektedir. Bu tez, CP'nin üretilmesi sonrasında açık ocak şevindeki hasarın olduğunu göstermektedir. Duraylı olmayan ocak eğimleri ve özellikle ocak tabanına yakın gevşek kayalar, ocak gölündeki suyu kirletebilir ve böylece Asit Maden Drenajına (AMD) katkıda bulunabilir. Tez, açık ocağın, eğimlerin göreceli stabiliteye ulaşacağı bir seviyeye kadar doldurulmasını önermektedir. Bu, açık ocak gölünde suyun tutulması ve AMD oluşumunun azaltılması için uygun boyutlarda iyi paketlenmiş kaya malzemelerinin kullanılmasını içerir.

**Anahtar Kelimeler:** Eşik topuk, Şev duraylılığı, Maden kapama, Açık ocak gölü, Ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi, FLAC3D, 3DEC.

## **ABSTRACT**

# **NUMERICAL ANALYSIS OF ROCK STABILITY CHALLENGES ACTUATED BY THE EXTRACTION OF CROWN PILLAR AND ITS IMPLICATION IN SUSTAINABLE PIT LAKE FORMATION: A MINE- SPECIFIC INVESTIGATION**

**Victor Abel MASSAWE**

**Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER**

**June 2024, 158 pages**

Crown pillar (CP) separates underground mining operations from surface or open pit operations. It protects an underground mine against the risks of flooding and rockfalls, all while improving ventilation and maintaining pit slope stability to ensure the safety of personnel and machinery. Accurately determining the optimal CP thickness to guarantee the stability of the surrounding rock mass is crucial and requires thorough analysis. The ore contained within the CP is often considered as a loss, yet occasionally, the need to extract high-grade ore from the CP is realized. The extraction of the high-grade ore in the CP may result in unstable pit slopes and the backfill may not achieve the same level of strength or support as a naturally occurring rock mass. During the mine closure phase, these challenges are addressed, particularly focusing on factors that impact the long-term sustainability of the pit. This includes considering environmental benefits for the local community and ecosystem as a priority. This doctoral thesis employs an integrated approach that combines a case study with both continuum and discontinuum numerical methods to analyse the stability of the CP during its initial establishment and subsequent extraction. In order to accomplish the objective, a case study obtained from Bauhinia Creek Mine, a gold mine located in Tanzania, is employed in conjunction with Itasca codes, namely FLAC3D and 3DEC. The case study

incorporates various geometric and geomechanical properties, including in-situ stresses and geotechnical data, which are utilized to construct numerical models in FLAC3D and 3DEC. These models serve multiple purposes, such as validating the thickness of the CP estimated earlier with an empirical scaled span method, simulating the extraction process of the CP, and conducting stability assessments. Subsequently, the deformed part of the FLAC3D model is replicated in 3DEC to analyse the influence of discontinuities and verify the failure mechanism. Ultimately, this thesis suggests the creation of a sustainable pit lake during mine closure and rehabilitation phase, including fill materials that form a base of the pit lake. Generally, this thesis demonstrates that extracting CP significantly increases the extent of failure in the hanging wall and pit slope. Unstable pit slopes and loose rocks, particularly near the pit floor, can contaminate water in the potential pit lake, thereby contributing to Acid Mine Drainage (AMD). The thesis concludes by suggesting the filling of the pit to a specific level where the slopes of the pit attain a state of relative stability, using well-packed rock materials of appropriate sizes. The author hopes that the objective of this thesis will make a substantial contribution to the understanding of CP estimation and extraction, which represents a crucial connection between mining practices and environmental concerns.

**Keywords:** Crown pillar, Slope stability, Pit lake, Mine closure, Scaled span method, FLAC3D, 3DEC.

## TEŞEKKÜRLER

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda bu doktora tezini tamamlamamda bana destek olan herkese en içten teşekkürlerimi sunarım. Prof.Dr. Bahtiyar ÜNVER, bu çalışmanın başından bu yana stratejileri ve temel ilkeleri ile bana yol gösteren önemli bir işbirliği ortağım olmuştur. Dr. Öğr. Üyesi Fırat ATALAY, Dr. Mehmet Suphi ÜNAL ve Dr. Süleyman Yasin KILLIOĞLU, bu çalışmada kullanılan kritik yazılımlarda yolumu bulmamda ve uzmanlaşmamda bana çok yardımcı olmuşlardır.

Aynı zamanda tez izleme komitesi (TİK) üyelerine de tavsiyeleri ve teşvikleri için teşekkürlerimi sunarım. Doç.Dr. Mustafa ERKAYAOĞLU başkanlığındaki jüri üyelerine ve Doç.Dr. Onur GÖLBAŞI, Dr. Öğr. Üyesi Fırat ATALAY ve Dr. Öğr. Üyesi Hilal Soydan ULUBAY'a teşekkür ederiz. Onların yorumları sadece bu tezin kalitesini artırmakla kalmadı, aynı zamanda gelecek çalışmalar için de ilham kaynağı teşkil etmiştir.

Hacettepe Üniversitesi ve Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Maden Mühendisliği bölümleri aracılığıyla Itasca kodlarının, özellikle FLAC3D, 3DEC ve Griddle'in kullanılabilirliği, bu tezde çok önemli ve gerekli bir rol oynamıştır. Ayrıca, Rhinoceros kodu ve çeşitli Rocscience paketleri, jeoteknik verilerin yorumlanması ve ağ oluşturma görevlerinin gerçekleştirilmesi için çok önemli olmuştur. Bu değerli araçların geliştiricilerine en içten şükranlarımı sunarım. Bu tezin önemli bir kısmı, Tanzanya'da Shanta Gold Maden Şirketi tarafından işletilen New Luika Altın Madenleri'nin bir parçası olan Bauhinia Creek Madeni'nden bir örnek çalışmaya odaklanmaktadır. Maden yönetimine, özellikle de yer altı bölümlerindeki ekiplere en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez teslim edildiği tarihte, bu çalışmanın bir parçası Journal of Environmental Management dergisinde yayınlanmıştır (DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120693) ve ek bir makale şu anda prestijli bir dergide hakem değerlendirme sürecinden geçmektedir. Bilginin yayılmasını kolaylaştıran diğer birçok platformun yanı sıra bu platformları da takdir ediyorum.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜRLER.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	x
ŞEKİLLER.....	xi
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışma Amacı ve Sorun Tanımlanması .....	2
1.2. Çalışma Kapsamı ve Yöntemleri.....	4
1.3. Tezin Orijinalliği ve Literatüre Etkisi .....	6
1.4. Tezin Yapısı.....	7
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	10
2.1. Madencilik Projelerine İlişkin Toplum Görüşleri.....	10
2.2. Madencilik Yöntemleri ve Duraylılık Koşulları .....	11
2.3. Maden Kapanma Süreci .....	15
2.4. Ocak Gölü Oluşturulmasının Gerekçesi.....	16
2.5. Ocak Gölünün Riskleri, Fırsatları ve Faydaları .....	17
2.6. Eşik Topuk Yenilmesi .....	19
2.7. CP ve Çevresindeki Kaya Kütlesinin Özellikleri .....	21
2.7.1. Jeoloji ve Jeoteknik Haritalama.....	22
2.7.2. Kaya Kütlesi Sınıflandırması .....	23
2.8. Kaya Kütlesi Jeomekanik Özellikleri .....	26
2.8.1. Yerinde Gerilmeler.....	27
2.8.1.1. Yerinde Gerilme Koşullarını Etkileyen Faktörler.....	28
2.8.1.2. Yerinde Kaya Gerilmelerini Tahmin Stratejileri .....	31
2.8.1.3. Doğu Afrika Rift Sistemi .....	34
2.8.1.4. Rungwe Volkanik Bölgesi .....	37

2.8.1.5. Gerilme Oranı Teorisi .....	39
2.8.2. Deformasyon modülü .....	43
2.9. Kaya Kütle Davranışı Modelleri.....	45
2.9.1. Mohr-Coulomb Yenileme Ölçütü.....	48
2.9.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütü.....	50
2.9.3. Kaya Malzemesi Özelliklerinin Tahmin Edilmesi.....	52
2.9.4. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown Yenileme Ölçütleri Arasındaki İlişki ...	57
3. EŞİK TOPUK TASARIMI VE ÜRETİLMESİ .....	60
3.1. Teorik Yaklaşımlar .....	60
3.1.1. Kiriş Döşeme Teorisi.....	60
3.1.2. Voussoir Kemer Teorisi.....	61
3.2. Ölçeklendirilmiş Açıklık Yöntemi .....	63
3.3. Eşik Topuğun Cevheri Çıkartma.....	66
4. SAYISAL YÖNTEMLER.....	67
4.1. Sayısal Modelleme .....	67
4.1.1. Sonlu Farklar Yöntemi.....	71
4.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	73
4.1.3. Ayrık Eleman Yöntemi .....	75
4.1.4. Ayrık Kırık Ağı Yöntemi.....	77
4.2. Itasca Kodları ile Sayısal Modelleme .....	78
4.2.1. FLAC3D ile Sayısal Modelleme.....	80
4.2.2. 3DEC ile Sayısal Modelleme .....	81
4.2.3. Entegre FLAC3D ve 3DEC modelleri .....	83
4.3. CP Analizlerinde Sayısal Yöntemler - Genel Bir Bakış.....	84
5. ÖRNEK ÇALIŞMA.....	86
5.1. Genel Görünüm .....	86
5.1.1. Sahanın Jeolojik ve Jeoteknik Özellikler .....	88
5.1.2. Kaya Kütleleri Özellikleri.....	90



5.1.3. Arazi Gerilmeler.....	91
5.1.4. Dolgu Malzemeleri .....	91
5.1.5. BC Eşik Topuk Özellikleri .....	93
5.2. BC Sayısal Modelleme .....	95
5.2.1. FLAC3D Modeli - Ağ Oluşturma ve Yanal destek koşulları.....	96
5.2.2. Bünye Modeli Seçimi.....	99
5.2.3. FLAC3D Model Doğrulaması .....	100
5.3. Eşik Topuğun Kalınlığının İncelenmesi .....	102
5.3.1. Basınç altında ve Makaslanmış Bölgelerin Analizi.....	102
5.3.2. Ölçeklendirilmiş Açıklık Yönteminde Kullanılan Parametrelerin Analizi .....	106
5.4. Eşik Topuğun Üretilmesi .....	107
5.5. Eşik Topuk üretiminin Sayısal Benzetimi.....	109
5.5.1. FLAC3D ile Süreklilik Analizi .....	109
5.6. 3DEC ile Sayısal Modelleme .....	113
5.6.1. 3DEC Model Parametrelendirmesi.....	115
5.7. 3DEC Model Sonuçları .....	116
5.8. Sahada Gözlem ve Model Doğrulaması .....	118
6. SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR AÇIK OCAK GÖLÜ OLUŞTURMADA KARŞILAŞILAN ZORLULUKLAR .....	121
6.1. Şev Açısının Ocak Duraylılığı Üzerindeki Etkisi .....	122
6.2. CP Tasarımının ve Cevher Üretiminin Etkileri .....	122
6.3. Maden Kapanışına Doğru Öngörülen Rehabilitasyon .....	125
6.3.1. Açık Ocak Dolgu Malzemesi.....	126
6.4. Eşik Topuğundaki Cevher Üretilmeli mi? .....	128
7. UYGULAMADA KULLANILABİLİRLİK VE KISITLAMALAR ÜZERİNE TARTIŞMA.....	130
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	132

8.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler .....	133
9. KAYNAKLAR .....	134
ÖZGEÇMİŞ .....	159

## ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Dünya çapında çeşitli açık ocak madenlerinde ocak şev duraysızlığının nedenleri .....	13
Çizelge 2.2. Dünya Çapında Ocak Göllerine İlişkin Yürütülen Çeşitli Araştırmalar.....	18
Çizelge 2.3. Deformasyon modülünü tahmin etmek için kullanılan denklemler ...	44
Çizelge 2.4. FLAC3D'den türetilmiş çeşitli bünye modelleri (Itasca, 2019).....	47
Çizelge 2.5. Magmatik kaya malzemesi için sabit $m_i$ değerleri (Hoek vd., 1993).....	53
Çizelge 4.1. 2023 yılında çeşitli örnek çalışmaların sayısal modellemesindeki varsayımlar ve basitleştirmeler .....	69
Çizelge 5.1. BC madeninde karşılaşılan farklı litolojilerin ortalama kaya malzemesi dayanım parametreleri .....	89
Çizelge 5.2. Genelleştirilmiş Hoek-Brown parametrelendirmesi ve BC madenindeki kaya kütlelerinin dayanım özellikleri .....	90
Çizelge 5.3. Dolgu özellikleriyle Açıklık değişimi: çimento bulamacı, atık kaya ve işleme tesisinden çıkan atıkların kütlesi.....	92

## ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Sahada gözlem, sürekli (continuum) ve süreksizlik içeren (discontinuum) ortamlarda sayısal analizin entegre bir şekilde yapılması .....	5
Şekil 2.1. Açık ocak şevlerinin genel duraylılık özellikleri .....	12
Şekil 2.2. Ocak tabanına yakın CP ve patlama kaynaklı örselenme.....	14
Şekil 2.3. Eşik topuğun yenilme mekanizması (Carter, (2014)'ten düzenlenmiştir).....	20
Şekil 2.4. Hudson ve diğerlerinden (2003) uyarlanan kaya gerilme tensörü bileşenleri hakkında bilgi geliştirme adımları .....	32
Şekil 2.5. NLGM'nin EAR'a göre konumu (Hall, 2020'den alınmıştır) .....	34
Şekil 2.6. RVP, Usangu havzası, Rukwa rift ve Kuzey Malavi riftinin birleştiği noktada yer almaktadır (Njinju vd., 2023'ten aktarılmıştır).....	37
Şekil 2.7. Dünyada yapılan ölçümlere dayalı derinliğe bağlı düşey gerilme değişimi (Brown ve Hoek, 1978'den alıntılanmıştır).....	40
Şekil 2.8. Hudson ve Harrison, (1997) tarafından modifiye edilen ortalama yatay gerilme ve düşey gerilme oranının değişimi.....	41
Şekil 2.9. MC yenilme ölçütünün Mohr diyagramında gösterimi .....	49
Şekil 2.10. Tek eksenli sıkışma dayanımı testinin Mohr diyagramında gösterimi .....	50
Şekil 2.11. Jeolojik gözlemlerden elde edilen GSI tahminlerine ilişkin genel çizelge (Marinos vd., (2007)'den alınmıştır).....	55
Şekil 2.12. Hoek-Brown ve eşdeğer Mohr-Coulomb ölçütleri için büyük ve küçük asal gerilmeler arasındaki ilişkiler (Hoek vd., 2002) .....	59
Şekil 3.1. Kaya giriş kemerinin geometrisi ve mekaniği (Tavakoli, 1994).....	62
Şekil 3.2. Etkin eşik topuk açıklığının boyutlandırılması için bir tanım çizelgesi ..	65
Şekil 4.1. Itasca kodlarında modelleme yöntemi (Itasca, 2019).....	79
Şekil 5.1. New Luika Altın Madeni'nin (Shanta Altın Madeni) konumu.....	87
Şekil 5.2. BC madenindeki farklı alanları ve eğim açılarını gösteren kesit görünümleri (kesit A-A') ve ocak doğrultusu boyunca (kesit B-B')....	88
Şekil 5.3. Kuvars damarının (cevher kütlesi) ana hatlarını gösteren BC madeninin plan görünümü .....	89

Şekil 5.4. BC madeninde cevher yatağı boyunca, çeşitli konumlardaki CP kalınlığını gösteren kesit görünümü.....	94
Şekil 5.5. CP arkasındaki MPBX'ler ve betonarme topuklar dağılımı .....	94
Şekil 5.6. BC madeni örnek çalışması için sayısal modelleme prosedürleri .....	95
Şekil 5.7. FLAC3D'de oluşturulan sayısal modelin izometrik görünümü.....	96
Şekil 5.8. FLAC3D modelindeki çeşitli ağ elemanlarının ve niteliklerinin katkısıyla ilişkili göreceli hata .....	98
Şekil 5.9. BC madeninın modellenmiş kısmına yerinde gerilmelerin uygulaması .....	98
Şekil 5.10. Modelinden elde edilen kayıtlar ve MPBX kayıtları için kümülatif görelı yerdeğıştirme .....	101
Şekil 5.11. MPBX 04 yakınındaki burkulmuş betonarme topuk .....	102
Şekil 5.12. BC madeninde (a) CP'nin altındaki cevher kütlesinin çıkarılmasından sonra ve (b) müteakip boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin doğusundaki ve batısındaki cevherin çıkarılmasından sonra ocak tabanından yer altına doğru yenilme zonlarının ilerlemesini gösteren kesit görünümü. ....	104
Şekil 5.13. A-A' kesitinde (a) CP'nin altındaki cevher kütlesinin çıkarılmasının etkilerini ve (b) ortaya çıkan boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin hem solunda hem de sağında cevher kütlesinin çıkarılmasından sonraki değışiklikleri gösteren gerilme konturu ve hız vektörü.....	105
Şekil 5.14. (a) CP'nin altındaki cevherin çıkarılmasının ardından ve (b) boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin doğu ve batısındaki cevher kütlesinin çıkarılmasından sonra düşey yerdeğıştirme konturunu gösteren A-A' kesiti.....	105
Şekil 5.15. BC madenindeki çeşitli etkili Açıklıklar için tahmin edilen CP kalınlığı .....	107
Şekil 5.16. CP'deki cevher kütlesini birkaç kısma (duraylı yapılar) ayrılmış olarak gösteren kesit .....	108
Şekil 5.17. CP cevher üretim planı .....	109
Şekil 5.18. Analiz için kullanılan kesitleri gösteren FLAC3D modelinin plan görünümü .....	110

Şekil 5.19. C-C Kesiti: N bacasının oluşumunu takip eden sağlam duvarlar. Kesit B-B': N bacasının oluşumundan sonra fay zonu yakınında artan düşey yerdeğiştirme .....	111
Şekil 5.20. Kesit A-A': J bacasının oluşturulmasını takiben yer altı galerisinde artan yerdeğiştirme. Kesit B-B': J ve N bacalarının oluşumundan sonra fay zonu yakınında artan düşey yerdeğiştirme .....	111
Şekil 5.21. N ve J bacalarının oluşumundan sonra gerilme dağılımını, hız vektörlerini ve yenilme zonlarını gösteren fay zonuna yakın bir kesit.....	111
Şekil 5.22. CP cevher üretimi sonrası fay zonuna yakın yenilme zonları ve gerilme dağılımı.....	113
Şekil 5.23. Tüm bacaların oluşumundan sonra yerdeğiştirme konturunu gösteren fay zonuna yakın üstten görünüm ve kesit (B-B' kesiti) ...	113
Şekil 5.24. Açık ocağın ve tavan taşının arasında 3DEC modeline dahil edilen bölge .....	114
Şekil 5.25. Tabana yakın açık ocak şevindeki tahmini eklem takımı sayısı .....	114
Şekil 5.26. (a) 3DEC model bölgeleri (b) 3DEC bölgelerini kesen ayrık kırılma ağı (DFN) (c) Eklem takımları ile kesildikten sonra 3DEC modeli...	115
Şekil 5.27. 3DEC modelindeki ortalama yerdeğiştirme konturu.....	117
Şekil 5.28. Sayısal modelin çeşitli kesitlerinde gözlemlenen yerdeğiştirme büyüklüğü.....	118
Şekil 5.29. CP'de yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasından sonra sahada gözlemlenen deformasyon .....	119
Şekil 5.30. Sahadaki deformasyonun boyutunun FLAC3D ve 3DEC'de tahmin edilen yenilme ile karşılaştırılması.....	120
Şekil 6.1. (a) şev açısı=65° (b) Şev açısı =55° için güvenlik faktörü.....	123
Şekil 6.2. CP cevher üretiminden sonra oluşan ve CP boşluk dolgusu ile basitçe desteklenemeyen askıda kalan bölge .....	124
Şekil 6.3. İdeal CP tasarımı ve müteakip cevher üretim planı .....	125
Şekil 6.4. Önemli bir yenilme (veya yerdeğiştirme) gösteren ocak şevinin kaldırılması gerekmektedir .....	126
Şekil 6.5. (a) BC madeninde (b) teorik durumda açık ocak kapanma sürecinin yanı sıra bir ocak gölü oluşturmak için önerilen işlemler .....	127



# 1. GİRİŞ

Birçok bağlamda eşik topuk, yer altı operasyonlarının birbirini takip eden iki katını ayıran kaya kütlelerini ifade eder. Ancak bu doktora tezinde "CP; Crown pillar" olarak kısaltılan "eşik topuk" terimi, yalnızca açık ocaktan yer altı maden işletmelerine geçiş sırasında kasıtlı olarak bırakılan bir cevher veya kaya kütlelerini ifade etmektedir. Topuk, bir yer altı madenini su baskını ve kaya düşmesi risklerine karşı korurken, havalandırmayı optimize eder ve hem personelin hem de makinelerin nihai güvenliği için açık ocak şevlerinde duraylılığı korur. Genellikle CP, tamamı terk edilemeyecek kadar değerli, yüksek tenörlü cevherden oluşabilir. Bu nedenle, bir yandan yüksek tenörlü cevherin geri kazanımını en üst düzeye çıkarırken diğer yandan da CP'nin kullanım amacını yerine getirebilecek minimum kalınlığını belirlemek için bir tahmin yapılır. Aşırı kalın bir CP yüksek tenörlü cevherin önemli bir kısmını hapsedebilirken, çok ince bir topuk yenilmeye ve potansiyel olarak felakete sonuçlanabilecek olaylara neden olabilir. Yenilme, yerçekiminden ve CP'de oluşan gerilmelerden etkilenir. Yenilme mekanizmaları CP geometrisi, CP'nin altındaki kazılar, kaya kütleleri kalitesi ve kaya kütlelerindeki süreksizliklerin geometrisi ve mukavemetleri arasındaki ilişkilere bağlıdır. Bu faktörler, CP kalınlığının tahmini için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesine ve modifiye edilmesine rehberlik etmiştir.

Genelde CP'deki yüksek tenörlü cevher maden ömrünün sonuna doğru, personel ve makineler artık yer altında aktif olarak çalışmadığında çıkarılır. Sadece nadir ve tartışmalı durumlarda CP cevheri maden ömründen önce kârlı bir şekilde çıkarılabilir ve yapay CP ile değiştirilebilir. Geleneksel yer altı sondaj ve patlatma kazılarına benzer şekilde bir CP'nin çıkarılması, indüklenen gerilmeler, potansiyel çekme ve makaslama örselenmeleri veya rehabilitasyonun gecikmesi halinde gerilme gevşemesi gibi zamana bağlı yenilmelerin neden olduğu kaya kütleleri duraylılığı sorunlarını ortaya çıkarır. CP'deki yüksek tenörlü cevherin ne zaman çıkarıldığına bakılmaksızın, ocak şevlerinin duraylılığını değerlendirmek uzun vadeli hususlara öncelik verir.

Şev duraylılığını değerlendirmek, işletme verimliliği ve planlamanın ötesine geçerek özellikle maden kapanmayı takip eden yıllarda toplum ve kamu algısını da kapsamalıdır. Bu, madencilik döngüsünün rehabilitasyon aşamasının müteakip



faaliyetlerindeki alternatiflerin tartılmasını da içerir. Ocağın tamamen mi yoksa kısmen mi doldurulacağı gibi sorular yanıtlanmalıdır. Kısmi dolgu durumunda, sürdürülebilir bir ocak gölünü garanti edecek önlemler değerlendirilmelidir. Tüm bunları başarmak için en uygun mühendislik yaklaşımı, CP'deki cevherin üretilmesinden önce yakındaki kaya kütlelerinin duraylılığı üzerindeki potansiyel etkilerinin simüle edilmesini içerir. Sayısal yöntemlerin önemi burada ortaya çıkmaktadır.

Tahminlerin doğruluğunu artırmak için genellikle entegre sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Temel olarak, sayısal modelleme bir dizi varsayım ve basitleştirme yoluyla gerçekleştirilir ve bir modelin tahminlerde bulunmak için geçerli veya güvenilir kabul edilip edilemeyeceği konusunda sürekli olarak şüphe uyandırır. Sayısal modellerin doğasında var olan belirsizliğin kabul edilmesi, model sonuçlarına güvenmek için yeterli bir temel olup olmadığının ve belirli bir modelin önemli sonuçlar çıkarmak için güvenilir olduğu iddiasını doğrulamak için hangi kanıtların gerekli olduğunun sorgulanmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, entegre bir yaklaşım geliştirmek büyük önem taşımaktadır. CP kalınlığının yetersiz olduğunu iddia etmek, bu yaklaşımlardan yalnızca birine dayanmak yerine hem görgül hem de süreklilik analizleriyle daha iyi desteklenir. Benzer şekilde, bir kazının kaya kütleleri yenilmesine yol açtığı argümanını desteklemek, sahadaki gözlemlerin ve hem sürekli hem de süreksizlik içeren yöntemlerle sayısal analizlerin bir birleşimine dayandığında daha güvenilirdir.

Bu doktora tezi, CP kalınlık tahmin tekniklerinin gelişimini, CP üretim ile ilgili kaya duraylılığı koşulları hakkında mevcut literatürü incelemeyi ve bir örnek çalışma kullanarak, çoklu sayısal yöntemler yardımıyla CP kalınlık tahmini ve üretim koşullarını incelemeyi amaçlamaktadır. Daha sonra, tez, ocak rehabilitasyon çabalarının bir parçası olarak sürdürülebilir bir ocak gölü oluşturmak için bir strateji olarak ocağın kısmi geri doldurulmasını önermektedir.

### **1.1. Çalışma Amacı ve Sorun Tanımlanması**

Metalik mineraller için talep, tüketim malları talebi ve endüstriyel ve küresel ekonominin genişlemesiyle birlikte artmaktadır. Özellikle elektronik, yenilenebilir enerji ve otomotiv sektörleri gibi alanlarda teknolojiye hızlı ilerlemeler, belirli

metallere olan talebi daha da artırmıştır. Günümüzde, ekonomik öngörülemezlik nedeniyle, hükümetler veya yatırımcılar, değeri korumak ve enflasyona karşı korunmak için belirli metalleri satın alabilir ve stoklayabilir. Bunlar maden aramalarını, büyük ölçekli madencilik projelerinin başlatılmasını ve madencilik operasyonları sırasında metal geri kazanımını artırma çabalarını yönlendiren çok sayıda nedenin sadece birkaç örneğidir.

Yer yüzeyin altında sığdan belirgin derinliklere kadar değişen yatakları üretim arayışında madenler hem yüzey hem de yer altı operasyonlarını kullanmaktadır. Bu madencilik yöntemleri ister eşzamanlı olarak kullanılsın ister açık ocaklar daha sonra yer altı operasyonlarına geçsin, güvenlik amacıyla bir CP oluşturulur. CP'nin kalınlığı, yer altında çalışan makine ve personeli korumak için yeterince sağlam olmasını, ancak değerli yüksek tenörlü cevherin içinde bırakılmasını önlemek için aşırı kalın olmamalıdır. Ek olarak, CP yüksek tenörlü cevher içeriyorsa, tipik olarak madenin sonuna doğru çıkarılır. Üretim işlemi, ocak şevleri de dahil olmak üzere çevredeki kaya kütlelerinde gerilme kırıklarına neden olabilir ve bu kırıklar yayılabilir. Bu üretim işleminin maden ömrünün sonuna doğru, potansiyel olarak makinelerin ve personelin artık çalışmadığı veya yer altı alanlarına erişiminin olmadığı zamanlarda gerçekleştiği göz önüne alındığında, güvenlik endişeleri göz ardı edilebilir. Bu tür dikkatsiz bir muhakeme, CP çıkarımından kaynaklanan potansiyel hasarı daha da kötüleştirebilir.

Maden kapanma ve rehabilitasyonu sürecinde açık ocak, ekosisteme ve yerel topluma nasıl fayda sağlanabileceği açısından değerlendirilir. Madencilik faaliyetleri durdurulduktan sonra kuru bir açık ocağı terk etmek pratik değildir. Dolayısıyla açık ocak atık malzemelerle doldurulmaktadır. Ancak, tüm açık ocağın tamamen geri doldurulması genellikle pratik değildir. Bu nedenle, kapanma ve rehabilitasyon aşamasında, ocak bir ocak gölüne dönüştürülmek amacıyla kısmen doldurulur. Bu ocak gölünün sürdürülebilirliği, kullanılan dolgu malzemesinin kalitesine ve ocak duvarlarının dayanıklılığına bağlıdır. Metalik madenlerdeki gevşek kayaların, özellikle de sülfür içeren minerallerin, su ve oksijene maruz kaldıklarında asidik maden drenajına yol açabileceğini bilmek önemlidir. Ocak gölünün bitki ve hayvan yaşamını desteklemesi amaçlanıyorsa bu durumdan kaçınılmalıdır. Gevşek kayaların varlığı da CP çıkarımının bir sonucu olabilir. Üretim işlemi, ocağı yer altına

bağlayan yeni çatlaklar oluşturabilir. Bir ocak gölü oluşturulursa, su bu çatlaklar yoluyla potansiyel olarak yer altı ortamına kaçabilir.

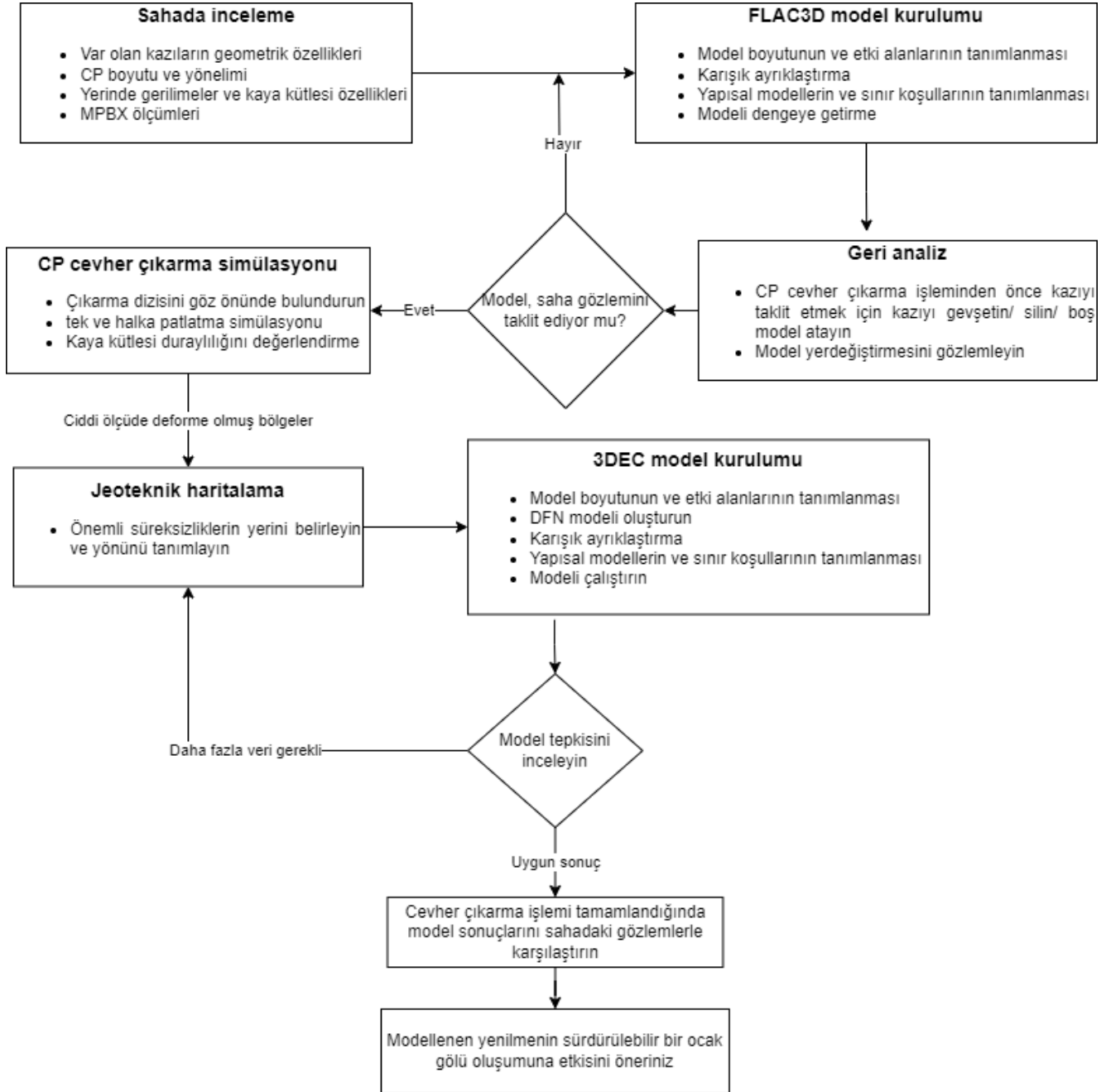
Bu nedenle, başlangıçta oluşturulan CP kalınlığından sonraki üretim işlemine kadar ortaya çıkan yenilme seviyesini araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu tez, yenilme nedenlerini göstermek ve rehabilitasyon önlemleri önermek için bir örnek çalışma ve sayısal modelleme yaklaşımlarını kullanmaktadır. Bu önlemler, özellikle bir ocak gölü oluşturulması amaçlanıyorsa, uygun dolgu derinliğinin belirlenmesini kapsamaktadır.

## **1.2. Çalışma Kapsamı ve Yöntemleri**

Var olan literatür, CP cevher çıkarımının çevredeki kaya kütlelerinin örselenmesini veya yenilmesini şiddetlendirebileceği yer altı operasyonlarına geçiş yapan açık ocak madenlerini göz ardı etme eğilimindedir. Bu doktora tezi, bu sorunları tanımlamakta ve CP cevheri çıkarılmadan önce ve sonra duraylı ocak şevinin oluşturulmasına odaklanarak rehabilitasyon önlemleri önermektedir. Şekil 1.1'de bu amaca ulaşmak için izlenen yöntem gösterilmektedir. Esas olarak, Tanzanya'daki Bauhinia Creek (BC) madeninden alınan bir örnek çalışma, bu araştırmanın temelini oluşturmak için kullanılmıştır. Madendeki yenilme boyutu, maden kapanma sırasında rehabilitasyon yöntemlerinden biri olarak sürdürülebilir bir ocak gölünün oluşturulmasındaki koşullarla da ilgilidir. Bu bağlamda, kısmi geri dolgu, riskleri, fırsatları ve faydaları ile ilişkili olarak incelenmiştir.

Üç boyutlu Itasca sayısal kodları, özellikle FLAC3D ve 3DEC, orta seviyede ancak güvenilir veriler kullanarak, madencilik ve jeoteknik dahil olmak üzere kaya mühendisliği alanlarında duraylılığı tahmin etmede olağanüstü verimliliklerini kanıtlamışlardır. Bu çalışmada uygulanmalarının arkasındaki temel faktör de yeteneklerine duyulan bu güvendir. Ölçekli Açıklık yöntemi (Scaled Span Method), sayısal yöntemler ve sahada yapılan incelemeler ile gerçekleştirilen analizlerin entegrasyonu sayesinde bu tez, söz konusu kodların sahip olduğu potansiyelden yararlanarak konunun kapsamlı bir şekilde kavranmasını sağlamaktadır. Ölçekli Açıklık yöntemi, CP kalınlığının tahmininde kullanılan özelliklerin doğruluğunu araştırarak CP kalınlığını değerlendirmektedir. Sayısal model, özellikle FLAC3D,

analizini yer gözlemleriyle karşılaştırarak, cevher üretim dizisini simüle ederek ve potansiyel yenilme bölgelerini tahmin ederek CP duraylılığını doğrulamaktadır.



Şekil 1.1. Sahada gözlem, sürekli (continuum) ve süreksizlik içeren (discontinuum) ortamlarda sayısal analizin entegre bir şekilde yapılması

FLAC3D modelinde tanımlanan deforme olmuş zonlar, sahada gözlemlenen kırıklar ve süreksizlikler dikkate alınarak 3DEC modelinde ayrıca analiz edilir. Nihayetinde, bu sayısal tekniklerden elde edilen sonuçlar, CP cevher çıkarımı sonrası sahada gözlemlenen gerçek sonuçlarla karşılaştırılır. Sonuçlara varmadan önce, örnek

çalışma temel alınarak FLAC3D modelleri, ocak şev açısının ve CP tasarım değişkenlerinin yenilme kapsamı ve ocak geri dolgusu üzerindeki etkilerini incelenmelidir. Yenilme derecesinin ve dolgu malzemesi türünün bir ocak gölünün sürdürülebilirliğini belirlemede çok önemli bir rol oynadığını vurgulamak çok önemlidir.

### **1.3. Tezin Orijinalliği ve Literatüre Etkisi**

"Açık Ocak ile Yer Altı İşletmesi Arasında Bırakılan Eşik Topuğun Üretilmesi ile Meydana Gelen Duraylılık Koşullarının Sayısal Analizi: Bir Maden Özelinde İnceleme" başlıklı bu doktora tezi, her bölümün yapısını oluşturan üç ana bileşene ayrılabilir. İlk olarak, "Sayısal Analiz", belirli bir madene veya örnek çalışmaya göre uyarlanmış, hem süreklilik hem de süreksizlik yaklaşımlarını kapsayan sayısal yöntemlerin ayrıntılı kullanımını ifade etmektedir. Bu yöntemler, CP'nin tasarlanması ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılması sırasındaki yenilme mekanizmalarının tahmin edilmesinde etkili olmaktadır. İkinci olarak, "Kaya Duraylılık Koşullarının", kaya mekaniği ve mühendisliğinin karmaşıklıklarını çevreleyen tartışmaları ele alarak madencilik operasyonlarında jeolojik oluşumların ortaya çıkardığı çeşitli koşulları incelemektedir. Son olarak, "Açık Ocak ile Yer Altı İşletmesi Arasında Bırakılan Eşik Topuğun Üretilmesi", bu tezin maden mühendisliği alanına katkısının altını çizmekte, özellikle açık ocak ve yer altı madeni arasında kalan bir CP'nin boyutlandırılması ve cevher çıkarılmasıyla ilgili hususlara odaklanmaktadır. Tez çalışmasının bu şekilde organize edilmesiyle, her bölüm tezdeki ana temaları ve keşif alanlarını ortaya koymakta ve sayısal analiz, kaya duraylılığı koşulları ve madencilik bağlamlarında CP cevherinin çıkarılması konularının kesişimine yönelik kapsamlı bir araştırma yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Bu tezin özgünlüğü, CP'nin bırakılması ve içinde kalmış olan yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasından kaynaklanan kaya duraylılığı koşullarının ayrıntılı bir analizini sağlayan madene özgü araştırılmasında bulunmaktadır. Çalışma, CP'nin en uygun kalınlığını doğru bir şekilde belirlemek ve duraylılığını değerlendirmek için maden geometrisi, kaya kütlelerinin jeomekanik özellikleri, gerilme dağılımı ve jeoteknik veriler gibi çeşitli faktörleri dikkate almaktadır. FLAC3D ve 3DEC gibi

gelişmiş sayısal yöntemleri eş zamanlı olarak kullanan tez, cevher üretim sürecini simüle etmekte ve madenin duraylılığını değerlendirmektedir. Ayrıca tez, maden kapanma ile ilgili koşulları ele alarak, oluşturulan ocak gölünün uzun vadeli sürdürülebilirliğini etkileyen faktörlerin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Güvenli bir maden ocağı gölü oluşturmak için rehabilitasyon stratejileri önermekte ve yerel toplumu ve ekosistemi olumlu yönde etkileyebilecek sürdürülebilir bir çevre stratejisi sunmaktadır. Araştırma, önerilen yöntemlerin uygulanmasını göstermek ve benzer madencilik operasyonları için pratik bilgiler sağlamak amacıyla Tanzanya'daki Bauhinia Creek Madeni'nden bir örnek çalışmayı kullanmaktadır.

Mevcut literatüre etkisi açısından bu tez, kaya duraylılığı koşullarının kavranmasına önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve CP cevherinin çıkarılmasına ilişkin değerli bilgiler sağlamaktadır. İleri sayısal analiz teknikleri kullanarak ve madenlerdeki kaya duraylılığını etkileyen madene özgü faktörleri dikkate alarak mevcut bilgileri genişletmektedir. Bu tezde sunulan bulgular ve öneriler, açık ocak ve yer altı madencilik operasyonlarında yer alan maden mühendisleri, araştırmacılar ve profesyoneller için, CP tahminini ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılma süreçlerini uzun vadeli duraylılık sağlayacak şekilde optimize etmeye yönelik rehberlik de dahil olmak üzere değerli bir referans olarak hizmet edebilir.

Genel olarak, bu doktora tezi, madene özgü araştırması, gelişmiş sayısal analiz yöntemleri ve CP'nin oluşturulması, cevherinin çıkarılması ve maden kapanma için pratik önerileri ile maden mühendisliği ve kaya duraylılık analizi alanına özgün bir katkı sağlamaktadır. CP tahmini ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılması ile ilgili koşulların ve çözümlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak mevcut literatüre katkıda bulunmakta ve bu tezi alanında önemli bir araştırma çalışması haline getirmektedir.

#### **1.4. Tezin Yapısı**

Doktora tezi sekiz bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde araştırma konusu tanıtılmakta, CP tasarımı ve tutulan cevherin çıkarılmasında kaya duraylılığı koşullarının değerlendirilmesinin önemi vurgulanmaktadır. Araştırma hedefleri, sorular ve metodolojinin ana hatlarını çizmekte ve çalışmanın madencilik

faaliyetlerine odaklanmasına ilişkin bağlam ve hedefleri sağlayarak sonraki bölümler için zemin hazırlamaktadır.

"Literatür Taraması" başlıklı ikinci bölüm, CP tasarımı ve cevher çıkarımında karşılaşılan kaya duraylılığı koşullarına ilişkin mevcut bilgileri titizlikle incelemektedir. Toplumun bakış açısını, ocak gölü kurma nedenlerini, çevredeki kaya kütlelerinin mekanik özelliklerini, yerinde gerilmeleri ve kaya duraylılığı değerlendirmesi için sayısal yöntemleri kapsayan önceki araştırma ve çalışmaları incelemektedir. Bu bölüm, araştırmanın teorik temelini oluşturmakta ve konunun kapsamlı bir şekilde anlaşıldığını göstermektedir. Alandaki gelişmeleri, karşılaşılan koşulları ve bilgi eksikliklerini vurgulayarak okuyucuların tezin önemini ve benzersizliğini kavramalarına rehberlik etmektedir.

Üçüncü bölüm, CP kalınlığını tahmin etmeye yönelik tekniklere özel olarak odaklanarak, çalışmada kullanılan metodolojinin ayrıntılı bir incelemesini sunmaktadır. CP'lerin oluşturulma süreci ve cevher üretim için kullanılan stratejiler tanımlanmaktadır. Bu bölüm, okuyuculara sonraki bölümler için çok önemli olan temel bilgileri sağlamaktadır. Örneğin, dördüncü bölümde sayısal teknikler ve bunların CP oluşturma ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasındaki uygulamaları ele alınmaktadır. CP kalınlığının tahmin edilmesinin üçüncü bölümde açıklanan ancak sayısal metodolojilerle doğrulanan yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebileceğini kabul etmektedir. Ayrıca, bu bölümde FLAC3D ve 3DEC gibi sofistike 3D sayısal kodlar ele alınmakta ve bu gelişmiş araçların entegre edilmesinin faydaları anlatılmaktadır.

Beşinci bölüm, örnek çalışmanın konumu, kaya kütlesi özellikleri, yerinde gerilme koşulları, CP'nin tahmini ve izlenmesi ve entegre sayısal analizleri detaylandırarak kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Tahmin edilen CP'nin yarattığı kaya duraylılığı koşulları ve daha sonra gerçek madende kalmış olan cevherin çıkarılması açıklanmaktadır. Bölüm ayrıca sayısal analizlerin sonuçlarını CP cevher çıkarımı sonrası sahada yapılan gözlemlerle karşılaştırmaktadır. Bu bölüm, mevcut literatür ile "Sürdürülebilir Bir Ocak Gölü Oluşturmanın Koşulları" başlıklı altıncı bölüm arasında önemli bir bağlantı görevi görmektedir. Altıncı bölüm, maden kapanma ve rehabilitasyon aşaması için en uygun rehabilitasyon uygulamalarını önermek üzere sayısal analizlerden elde edilen bulgulardan yararlanmaktadır.

Son bölümler, özellikle de yedinci ve sekizinci bölümler, örnek olay çalışmasında kullanılan yöntemlerin pratik uygulamalarını ve sınırlamalarını incelemektedir. Ayrıca, tezde ele alınmayan ancak mevcut literatürü geliştirebilecek veya önerilen yaklaşımların uygulanması sırasında dikkate alınması halinde sonuçları iyileştirebilecek hususlar da vurgulanmaktadır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm, toplumun madencilik projelerine ilişkin algılarının ve paydaşların bu tür projeleri başlatmak için verdikleri taahhütlerin incelenmesiyle başlamaktadır. Daha sonra madencilik yöntemlerinin seçimi ve bir CP'nin tasarlanması ele alınmaktadır. Bölüm, maden kapanma sırasında ocak rehabilitasyonu ile ilgili kararları ve bir ocak gölü oluşturma gerekliliğini ele almaktadır. Ayrıca, CP'lerin faydaları ve yenilmesiyle ilişkili potansiyel riskler tartışılmaktadır. CP yenilmenin temel nedenlerini kavramak için bölüm, bir CP'yi çevreleyen kaya kütlelerinin özellikleri ve karakteristikleri hakkında ayrıntılı bir açıklama sunmaktadır. Ayrıca, özellikle durumunu ve tahmin stratejilerini etkileyen faktörlere odaklanarak, yerinde gerilme konusuna da açıklık getirmektedir. Örnek çalışmanın Doğu Afrika Rift (EAR; East Africa Rift) sistemindeki Rungwe Volkanik Bölgesi (RVP; Rungwe Volcanic Province) içinde yer aldığı göz önüne alındığında, bu bölüm söz konusu jeolojik yapıların uzak alan gerilmelerinin yönünü ve büyüklüğünü nasıl etkilediğini kısaca tartışmaktadır. Ayrıca bölümde, okuyucuların sayısal modellemede kullanılan parametreleri anlamalarına yardımcı olmak için gerilme oranı teorisi, deformasyon modülü ve bünye modeller (yenilme ölçütleri) hakkında kısa bir bilgi verilmektedir.

### 2.1. Madencilik Projelerine İlişkin Toplum Görüşleri

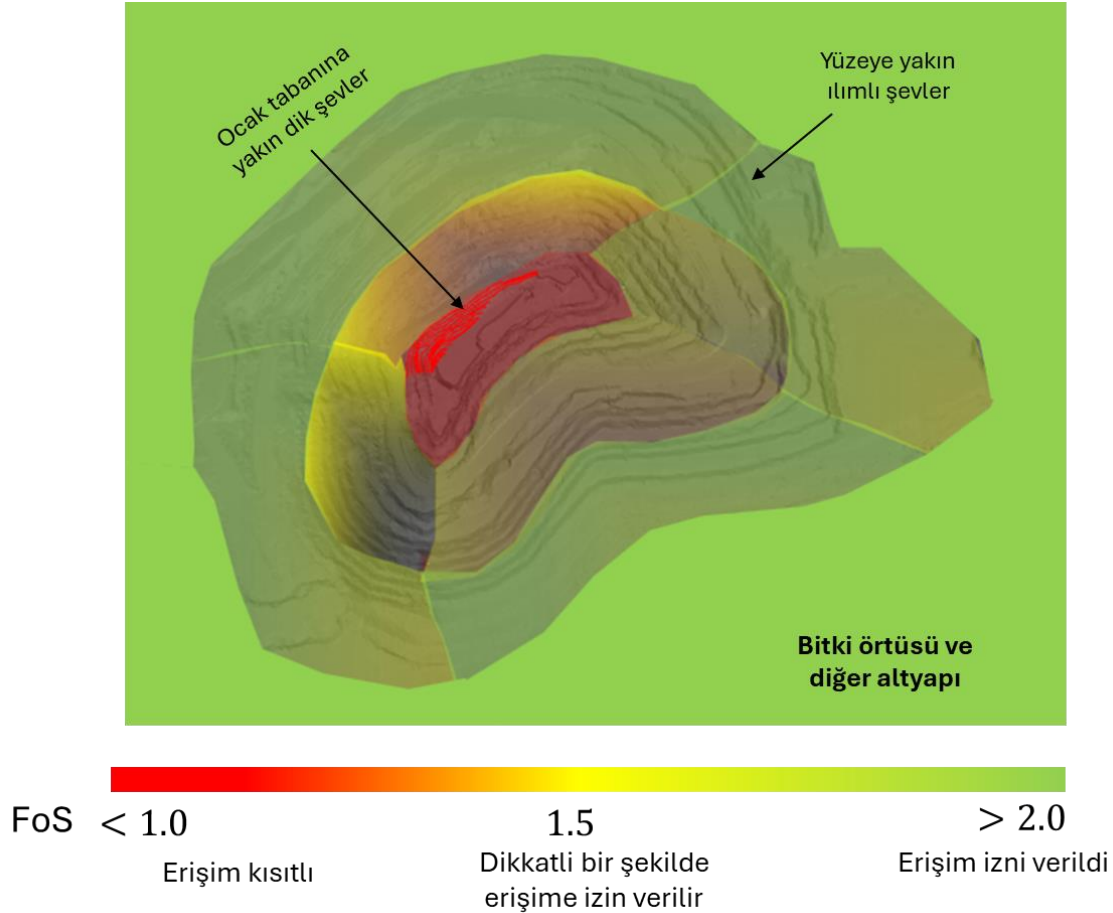
Yeni bir madencilik projesinin başında toplulukların çoğu, yaşam tarzlarının ekosistemlerinin olumsuz yönde etkileneceğine inanmaktadır. Topluluk üyeleri yeni projenin etkileri konusunda genellikle direnmekte ve bölünmüş görüşlere sahip olmaktadır (Walsh vd., 2017; Litmanen vd., 2016). Sosyal-çevresel etkiler, topluluğun yerinden edilmesi, madencilığe bağımlılık, kültür, geçim kaynakları, maden üretim karşıtlığı, sanayi yanlısı politikalar ve tazminat gibi çeşitli faktörler direniş olasılığını artırmaktadır (Conde ve Le Billon, 2017; Zhou vd., 2015; Bond ve Kirsch, 2015). Paydaşlar, taahhütlerde bulunarak ve güvence sağlayarak sosyal lisans elde edebilir (Garcia, 2008). Güvenceler ve taahhütler arasında arazi, gıda güvenliği, su kalitesi, toprak kalitesi, ekosistemler, yaban hayatı ve ailelerin yerinden edilmesi üzerindeki etkilerin azaltılmasına yönelik önlemlerin yanı sıra artan göçün önlenmesi de yer almaktadır (Worlanyo ve Jiangfeng, 2021).

Madencilik faaliyetleri sırasında istihdam yaratma, teknoloji aktarımı, kurumsal sosyal sorumluluklar (KSS), tarımsal hizmetler, doğanın korunması, çiftçilere tarımsal girdi sağlanması, menfaat paylaşımı ve altyapı bakımı gibi vaatler bir dereceye kadar yerine getirilmektedir (Söderholm ve Svahn, 2015; Bird, 2016). Vicdanlı madencilik uygulamaları, işyerindeki çevresel ve insani etkileri en aza indirmek için önleyici tedbirleri de içermektedir (Dong vd., 2019). Bununla birlikte, beklentilerin çoğu ancak maden kapanma ve rehabilitasyon aşamasında yerine getirilebilir. Bu aşamada, bir zamanlar bitki örtüsü ve hayvanlar için mevcut olan uzun vadeli çevresel faydaların geri kazanılması gibi çok önemli bir soruya cevap verilmelidir. Maden kapanma ve rehabilitasyon faaliyetlerinin niteliği büyük ölçüde operasyonlar sırasında uygulanan madencilik yöntemine ve müteakip duraylılık koşullarına bağlıdır.

## **2.2. Madencilik Yöntemleri ve Duraylılık Koşulları**

Madencilik yöntemi seçiminde yatağın mekânsal özellikleri, jeoteknik özellikler, jeolojik ve hidrolojik koşullar, ekonomik hususlar, teknolojik faktörler ve çevresel kaygılar gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmaktadır (Alpay ve Yavuz, 2009). Örneğin, ekonomik avantajlar nedeniyle sığ maden kaynakları için açık ocak madencilik yöntemi tercih edilebilir. Ocağın duraylılığı büyük ölçüde kaya kütlelerinin kalitesine ve şev açısına bağlıdır (Kalenchuk vd., 2019). Üretim aşamasında, cevher kütlesi ve kaya kütlesi bilgisi iyi anlaşıldıkça bu faktörler değişebilmektedir (Carter vd., 2022). Çizelge 2.1, ocak duvarı veya şev yenilmelerinin nedenlerini araştıran çeşitli küresel konumlardan birkaç önemli örnek çalışmayı derlemektedir. Eklemler, faylar veya kırıklar gibi süreksizlikler, özellikle de ocak duvarında açığa çıkanlar, kama, düzlemsel veya devrilme yenilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir (Havaej ve Stead, 2016). Ayrıca, gözenek suyu basıncındaki artış ve patlama titreşimi gibi faktörler, ocağın doğası gereği sağlam olan duvarlarını zayıflatarak potansiyel olarak uzun vadeli duraylılık koşullarına yol açabilir (Lu vd., 2023). Şevlerdeki, özellikle de yavaş gelişen şevlerdeki erken duraysızlık belirtileri izlenebilir (Agung vd., 2023), ancak açık ocaklardaki en ciddi şev duraysızlıkları genellikle hızlı ve beklenmeyen bir şekilde oluşmaktadır. Açık ocak boyunca tüm basamaklar için güvenlik faktörü (FoS; Factor of Safety) hesaplandığında, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi en düşük değerlerin tipik olarak ocak tabanına yakın yerlerde

bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni, madencilik faaliyeti ilerledikçe ocak tabanının da daralmasıdır. Bu alandan daha fazla cevher üretim girişimleri, daha dik bir şev ve düzensiz bir ocak tabanına yol açabilir (Ren vd., 2020). Tabandaki basamakların yüksekliği arttığında ve ocak şevi çok dik hale geldiğinde, şevlerin genel duraylılığını olumsuz etkileyebilmektedir (Dintwe vd., 2022).



Şekil 2.1. Açık ocak şevlerinin genel duraylılık özellikleri

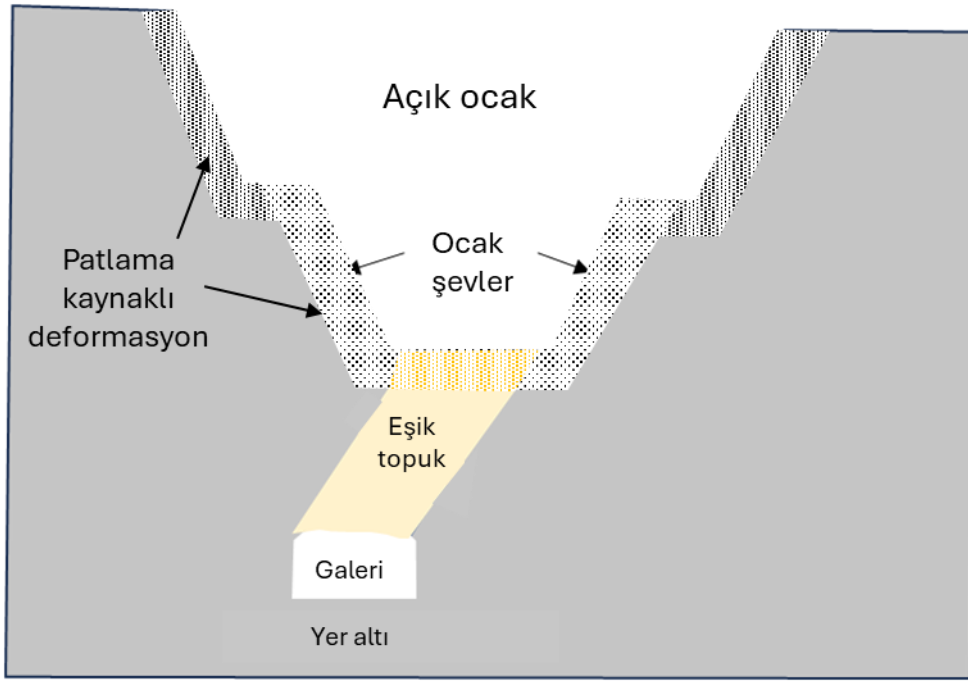
Alternatif olarak, nakliye maliyetlerini ve aşırı atık üretim işlemini azaltmak amacıyla daha derinde bulunan cevherin üretilmesi için yer altı madenciliği seçilebilir. Bir denge kurmak için, dikey olarak oldukça derinlere uzanan sığ mineralizasyon açık ocak madenciliği ile başlayabilir ve daha sonra daha derin cevher çıkarımı için yer altı madenciliğine geçilebilir (Chung vd., 2022). Bu yaklaşım aynı zamanda istihdam olanaklarının korunması ve metalik minerallere yönelik artan küresel talebin karşılanması ihtiyacıyla da uyumludur. Burada CP olarak kısaltılan "Eşik Topuk" terimi, yer altı madencilik faaliyetlerine geçiş sırasında açık ocak veya yüzey

ile yer altı arasında kasıtlı olarak sağlam bırakılan bir kaya kütlesini tanımlamaktadır (bkz. Şekil 2.2).

Çizelge 2.1. Dünya çapında çeşitli açık ocak madenlerinde ocak şev duraysızlığının nedenleri

Proje alanı/Bölge	Ocak şevinin yenilmesi/istikrarsızlık nedenleri	Yazar(lar)
Las Cruces açık ocak madeni, Sevilla - İspanya	- Akma türü yenilme(Yağış nedeniyle gözenek suyu basıncında artış) - kayan mekanik özelliklerinin kötüleşmesi davranışı	López-Vinielles vd., 2020
Yanqianshan Demir Madeni -Çin	- Madencilik faaliyetleri, özellikle yer altı madenciliği	Hu vd., 2019
Muara Enim - Endonezya	- Zayıf bir kaya tabakasının varlığı - Yüksek gözenek suyu basıncı	Wang ve Griffiths, 2019
İsimsiz (gizli)	- Alandaki kazı faaliyetlerinden etkilenme.	Carlà vd., 2017
Venetia Madeni - Güney Afrika	- Nispeten dik ocak şevleri - Fay (zayıf zon)	Barnett, 2003
Adı açıklanmayan bakır madeni	- Akma türü yenilme (yağışa bağlı gözenek suyu basıncı artışı)	Carlà vd., 2018
Batı Avustralya demir cevheri	- Alttan kesen zayıf tabakaya (şeyl bandı) artan yüklenme	Bar vd., 2020
Alipaşa feldspat açık ocak madeni, Türkiye'nin batısında	- Yapraklanma düzlemlerinin ve eklemlerin elverişsiz yönelimleri - Süreksizlikler boyunca düşük kayma mukavemeti - Yenilme öncesinde gerilme çatlaklarını dolduran olağanüstü şiddetli yağışlar	Tanyas ve Ulusay, 2013
Emei İlçesi, Sichuan Bölgesi - Çin.	- Sık sık patlatma - Etkin gerilmede azalma (Alttaki zayıf tüflere sürekli yağış düşmesi ve dolayısıyla suyu gözenek basıncının artması)	Ma vd., 2018
Madenkoy, Siirt İli - Türkiye	- Geçirimsiz tabakaların üzerinde yer alan geçirimli bölgede aşırı gözenek suyu basıncı	Lashgari ve Ozturk, 2022
Palabora Madeni - Güney Afrika	- Yer altı madenciliği (kama oluşturan, ocağın altındaki mağara bölgesine kadar uzanan yaygın eklem setleri)	Moss vd., 2006
Tom Price Demir Cevheri Madeni	- Ocak tabanındaki basamak ilerlemesi ile tetikleme (fay düzlemlerindeki kaymanın bir	Day ve Seery, 2007

	birleşimi, yenilme tabanında ciddi bir kabarma oluşmuştur)	
Kentobe açık ocak barit madeni - Kazakistan	- Güvenlik banketleri ve ocak şevleri dayanıklılığı sağlayamamıştır.	Besimbaeva vd., 2018
British Columbia'da çok sayıda açık ocak - Kanada	- Yapısal özellikler, yağış, patlama titreşimi, dik ocak şevleri, oyuk dolgulu faylar, gerilme çatlakları, dik eğimli faylar ve fay kayması alanı	Nunoo, 2018



Şekil 2.2. Ocak tabanına yakın CP ve patlama kaynaklı örselenme

Alternatif bağlamlarda, bir CP, yer altı operasyonlarının ardışık iki katını ayıran bir kaya kütesini temsil edebilir. Topuk, bir yer altı madenini su baskını ve kaya düşmesi risklerine karşı korurken, havalandırmayı optimize eder ve hem personelin hem de makinelerin nihai güvenliği için açık ocak duvarlarında duraylılığı korur (Nguyen vd., 2019).

CP'de bulunan cevher genelde bir kayıp olarak değerlendirilir ancak birçok durumda yüksek tenörlü cevherin tamamı terk edilemez. Yüksek tenörlü cevherin geri kazanımını en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda amacına ulaşabilecek en düşük CP kalınlığını belirlemek için bir tahmin yapılmaktadır. Çok kalın bir CP yüksek tenörlü cevherin önemli bir kısmını hapsedebilirken, çok ince bir topuk yenilmeye ve

potansiyel olarak felakete yol açabilir (Szwedzicki, 1999; Bakhtavar vd., 2010). Açık ocak, yer altı veya geçişli açık ocak-yer altı madenlerindeki tüm kaya duraylılığı koşulları yalnızca üretim sırasında değil, uzun vadede de çevresel hususlar ve yerel toplulukların beklentileri dikkate alınarak ele alınmalıdır.

### **2.3. Maden Kapanma Süreci**

Maden kapanma konusunda her ülkede uygulanan, küresel olarak standartlaştırılmış bir kılavuz bulunmamaktadır (Garcia, 2008). Ancak Brezilya (Sánchez vd., 2014), Amerika Birleşik Devletleri (Federal Düzenlemeler Kanunu Başlık 40 Bölüm 264 ve 265 (EPA, 2014)) ve Güney Afrika (Swart, 2003; Krause ve Snyman, 2014; PwC, 2016) gibi bazı ülkelerin maden kapanma için temel referans olarak hizmet eden kendi ulusal kılavuzları veya yönetmelikleri bulunmaktadır. Kanada (MERN, 2017) ve Avustralya (DMP, 2015) gibi diğer ülkelerin de kendi bölgelerinde veya eyaletlerinde kılavuzları bulunmaktadır. Bu arada, diğer ülkeler ilerlemelerini ölçmek veya Birleşmiş Milletler, Uluslararası Para Fonu ve Asya-Pasifik Ekonomik İşbirliği gibi çok uluslu şirketlerden gelen fonlarla ilgili düzenlemelere uymak için ölçütler kullanabilir (Garcia, 2008). Laurence, (2006) karar vericilerin süreç boyunca kritik faktörleri gözden kaçırmamalarına yardımcı olmak amacıyla maden kapanma için bir model önermiştir. Model, çevresel riskler, güvenlik ve sağlık riskleri, toplumsal ve sosyal riskler, yasal ve finansal riskler ve teknik riskler gibi faktörlerin derecelendirmelerini toplayarak maden kapanma riskini ölçmektedir. Laurence, paydaşların modelinde çevresel hedefler, toplum iyimserliği ve katılımı ve kamu güvenliği konuları gibi "müzakere edilemez" sonuçlara öncelik vermeleri gerektiğini vurgulamıştır.

Atık kaya sahaları, atık barajları ve açık ocaklar, tüm "müzakere edilemez" neticeleri kapsayan en önemli konudur. Bunun nedeni, asitli su arıtma sistemlerinin işletilmesinde sürekli (aktif) bakım gerektirmeleridir. Birçok akademisyen araştırmalarını bu üç konuyla ilgili olarak maden kapanma üzerine odaklamaktadır (Sánchez vd., 2014). Bu doktora tezi, açık ocaklara, özellikle de yer altı faaliyetlerine geçen madenlerin uzun vadeli ocak duraylılığına ışık tutmak için bir örnek çalışma kullanacaktır.

## 2.4. Ocak Gölü Oluşturulmasının Gerekçesi

Açık ocak tamamen geri doldurulmalı, şev eğimleri azaltılmalı ve arazi çevredeki topografyaya uyum sağlayacak şekilde düzleştirilmelidir (MERN, 2017; Das vd., 2022). Bu ifade, en azından sığ ve metalik olmayan açık ocak madenlerinin çoğu için geçerlidir. Ancak, çoğu büyük metalik açık ocak madeni söz konusu olduğunda, yer altı su kalitesi ve maliyet-fayda analizi sonuçlarına göre ocağın tamamen geri doldurulması genellikle pratik görülmemektedir. Örneğin, Kaliforniya Bölgesi Madencilik ve Jeoloji Kurulu'nun tüm açık ocak madenlerinin geri doldurulmasını zorunlu hale getiren 1975 tarihli Yüzey Madenciliği ve İslahı Yasası'nı (SMARA; Surface Mining and Reclamation Act ) yürürlüğe koymasının üzerinden yirmi beş yıl geçmesine rağmen, Kaliforniya'daki büyük metalik açık ocak madenlerinin çoğunda tam geri doldurma işlemi gerçekleştirilmemiştir (Testa ve Pompy, 2007). Aslında, ocağın geri doldurulması işlemi otomatik olarak tam bir ocak rehabilitasyonunu garanti etmemektedir. Dolgu malzemesi gözenek suyu kalitesi ve mansap yer altı suyu üzerindeki nihai etki, dolgu malzemesinin kalitesine bağlıdır (Johnson ve Carroll, 2007). Kuzey İsveç'teki Kimheden açık ocak madeni 1982 ve 1996 yılları arasında yüksek miktarda bakır ve çinko konsantrasyonuna sahip atık kaya ile doldurulmuş ve tamamen ıslah edilmiştir. Dolgu malzemesinin su ve oksijene maruz kaldığında sülfür minerallerinin oksidasyonu yoluyla asit maden drenajına neden olma potansiyeli göz önünde bulundurularak kompozit bir kuru örtü uygulanmıştır. Örtü, killi topraktan ve atık dolgusunun üstüne etkin bir şekilde yerleştirilen sınıflandırılmamış topraktan oluşan koruyucu bir tabakadan oluşuyordu (Villain vd., 2013; 2015). Yapılan çalışmalara rağmen, 2009 ve 2010 yılları arasında dolgu yapılan ocağın yer altı suyunda ölçülen erimiş oksijenin yüksek olması, ıslahın dolguda anoksik koşullar oluşturmada başarısız olduğunu göstermiştir (Villain vd., 2013). Daha önceki çalışmalar, dolgulu ocağı çevreleyen kaya üst tabakasının çatlaklı olduğunu göstermiştir; bu da ocak duvarlarının oksijene ve/veya oksijen içeren suya karşı geçirgen olduğunu ve dolayısıyla sülfidik atığın sürekli oksidasyonunu ve oksidasyon ürünlerinin akıp gittiğini göstermektedir (Villain vd., 2015).

Chen ve diğerleri (2022) tarafından sunulan örnek çalışmada da görüldüğü üzere, açık ocak metalik madenlerin kısmi dolgusu belli bir düzeyde başarı göstermiştir.

Dolgu stratejik olarak, üst yüzeyi ocak içinde öngörülen nihai istikrar kazandırılmış su seviyesi ile aynı hizada olacak veya bu seviyeyi aşacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu kurulum sadece ocak tabanına yakın yüksek kırıklı şevlerin duraylılığını kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda yağış, yer altı suyu deşarjı, ocak duvarlarından yüzeysel akış ve yağışların dolgu ocağına sızması gibi çeşitli kaynaklardan gelen suyun birikmesine katkıda bulunarak sonuçta bir ocak gölü oluşmasına neden olur (Johnson ve Carroll, 2007; Bozan vd., 2022).

## **2.5. Ocak Gölünün Riskleri, Fırsatları ve Faydaları**

Ocak gölleri ciddi riskler teşkil etmekle birlikte yerel halk için fırsatlar da sunmaktadır. Beklenen riskler arasında ocak şevinin duraysızlığı ve sadece su kalitesini tehlikeye atmakla kalmayıp aynı zamanda karbon kaybını da şiddetlendiren asit maden drenajı (AMD) yer almaktadır. Dünya çapında ocak gölleri üzerine yapılan ve bazıları Çizelge 2.2'de listelenen çalışmalar, bu göllerin potansiyel avantajlarına ilişkin iyimserliği artırmıştır. Bu çalışmalar sıklıkla biyojeokimyasal (She vd., 2023; Villain vd., 2013; Kusuma vd., 2023), kavramsal ve sayısal modelleme (McCullough ve Vandenberg, 2020), limnolojik karakterizasyon (Lu, 2004), jeoteknik hususlar ve risk yönetimi (De Bruyn vd., 2019; De Graaf vd., 2019; Carter vd., 2022) gibi konuları içermektedir. Bu çalışmalarda genellikle ocak gölü risklerinin, azaltma önlemlerinin ve gelecekteki avantajların daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmak için örnek çalışmalar ve deneyler kullanılmaktadır (Schultze vd., 2022). Elbette, ocak göllerinin sayısı katlanarak artmaktadır (Vandenberg vd., 2022). Ancak aynı zamanda, potansiyel risklerin anlaşılması ve azaltılması için takdire şayan çabalar da devam etmektedir. Buna uluslararası ocak gölü su kalitesi veri tabanının olumlu gelişimi de dahildir (Johnson ve Castendyk, 2012). Göl, küçük kasabaların ekonomik olarak ayakta kalmasını sağlayan turizm, su ürünleri yetiştiriciliği ve tarım gibi alternatif endüstrilerin yanı sıra rekreasyon ve çevresel olanaklar için de alan sağlayabilir (Castro ve Moore, 2000; Blanchette ve Lund, 2016; Lund vd., 2020).

Su kalitesini değerlendirmeden önce, temel ön koşul ocak gölünün varlığıdır. Bu noktada ocak şevlerinin ve CP'nin duraylılığı büyük önem kazanır. Duraylı CP sadece üretim sırasında personeli ve makineleri koruma avantajı sağlamakla



kalmaz, aynı zamanda üretim sona erdikten sonra sürdürülebilir bir ocak gölünün varlığını da garanti eder. Tersine, CP'nin yenilmesi veya zarar görmesi durumunda, ocaktan gelen su yer altına sızarak kuru bir ocak oluşmasına ve yer altı ortamının kirlenmesine yol açacaktır.

Çizelge 2.2. Dünya Çapında Ocak Göllerine İlişkin Yürütülen Çeşitli Araştırmalar

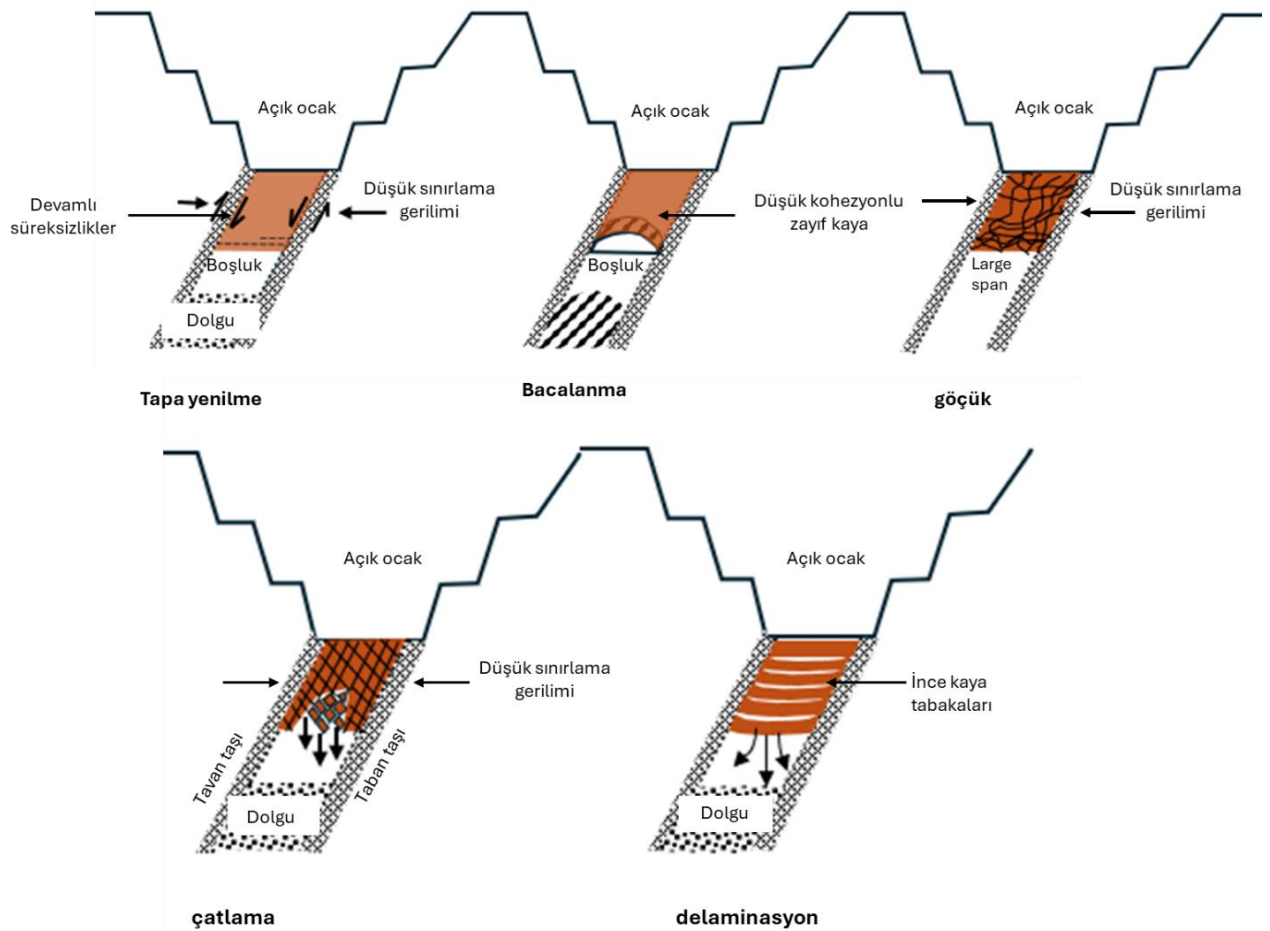
Çalışma Türü	Maden veya Bölge	Yazar(lar)
	Nanshan demir madeni, Anhui - Çin	She vd., 2023
	Kimheden açık ocak madeni - İsveç	Villain vd., 2013
	Endonezya	Kusuma vd, 2023
	Ada bakır madeni - Kanada	Stevens vd., 2005
	Martha madeni - Yeni Zelanda	Castendyk ve Webster-Brown, 2010
Biyojeokimyasal, fizyokimyasal ve limnoloji	Çoklu örnek çalışmalar Wallonne Bölgesi - Belçika	Castendyk vd., 2015a; 2015b Oggeri vd., 2023
	Trakya - Kuzeydoğu Yunanistan	Triantafyllidis and Psarraki, 2020
	Sleeper altın madeni, Nevada - ABD	Dowling vd., 2004
	Genel Bilgiler	McCullough and Vandenberg, 2020
	Genel veritabanı	Vandenberg vd., 2022
	Elbe Nehri taşkın ovaları - Almanya	Herzprung vd., 2016
	Hope Downs Kuzey - Batı Avustralya	Bozan vd., 2022
Jeoteknik değerlendirmeler, Sayısal modelleme ve risk yönetimi	Most Gölü - Çek Cumhuriyeti	Renaud vd., 2022
	Genel Bilgiler	De Bruyn vd., 2019
	Victor Madeni - Kanada	De Graaf vd., 2019
	Latrobe Vadisi - Avustralya	Dyson vd., 2022
	Genel ocak duraylılığı	Carter vd., 2022
	Genel Bilgiler	Coulibaly vd., 2020

Kamuoyu algısı	As Pontes - İspanya	Lopez ve Blanchette, 2020
	Genel çalışma	Lund ve Blanchette, 2023
	Avustralya	McCullough ve Lund, 2006
	Birleşik Devletler	Carlson vd., 2011
	Danau Seran - Endonezya	Caesarina ve Hirsan, 2020
Sel ve Sedimentasyon	Collie kömür tabanı - Avustralya	Lund vd., 2020
	Genel Bilgiler	Apostu vd., 2020
	Genel Bilgiler	Omoso, 2023
	Litvanya	Gadeikis vd., 2014
Multi-spektral görüntüleme ve yapay sinir ağları	Lusatia - Almanya	Hanelli vd., 2023
	Amynteon - Yunanistan	Louloudis vd., 2022
	İrankuh - İran	Bahrami vd., 2016
	Kardia - Kuzey Yunanistan	Louloudis vd., 2022b

## 2.6. Eşik Topuk Yenilmesi

Eşik topuk (CP) yenilmesi sıklıkla yerçekimi, süreksizlikler veya CP arkasında oluşan gerilmelerden etkilenir. Carter (2014), Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, CP yenilmesinin gerçekleştiği beş mekanizma tanımlamıştır: tapa yenilmesi, bacalanma, göçük, çatlama ve delaminasyon. Tapa yenilme normalde dik eğimli, iyi tanımlanmış kalıcı süreksizlikler veya jeolojik temaslar gerektirir. Düşük sınırlayıcı gerilmelerde veya açık ocak madenciliği sırasında yatay gerilmeler azaldıkça, süreksizlikler üzerindeki etkili sürtünme azalarak bir blok veya tapanın aşağı doğru kaymasını başlatır (Bar vd., 2018). Bu durumda, ideal CP kalınlığını tahmin etmek için görgül yöntemler kullanılabilir. Benzer şekilde, sayısal modelleme de uygulanabilir, ancak yalnızca modeller kontrol eden tapa yapısının doğru bir şekilde kopyalanmasına izin verdiğinde (Carter, 2014). Bacalanma, düşük kohezyonlu zayıf kayalarda meydana gelebilir (Bar vd., 2018). Yine, sınır denge analizi ve ölçeklendirilmiş açıklık yaklaşımı gibi görgül yöntemlerin yanı sıra sayısal modelleme yaklaşımları da CP kalınlığı tahmininde kullanılabilir. Bir kez daha, sınır denge analizi ve ölçeklendirilmiş Açıklık yaklaşımı gibi görgül tekniklerin yanı sıra sayısal modelleme yöntemleri de CP kalınlığının tahmin edilmesinde kullanılabilir (Carter, 2014).

Göçüklerin ilerlemesi için tipik olarak geniş açıklıklar ve düşük sınırlayıcı gerilmeler gerekir. Devamlı süreksizlikler veya kaya kütlelerinin yaygın olarak parçalanması mevcut olabilir (Bar vd., 2018). Mathews-Potvin / Laubscher duraylılık koşullarının değerlendirmeleri ve Ölçekli Açıklık kontrollerinin hepsi geçerli araçlardır. Ayrıca sayısal modelleme kodunun çeşitli ayırık eleman biçimlerini, yalnızca bu tür kodlar göçük sürecini doğru bir şekilde temsil edebildiğinde kullanmak mümkündür (Carter, 2014). Çatlama, en az üç eklem setine sahip bloklu bir kaya kütleleri gerektirir ve bu da yüksek sınırlama gerilmeleri altında makul ölçüde kararlı olacaktır. Bununla birlikte, düşük yanal destek koşullarında kamalar oluşur ve boşluğa düşer (Bar vd., 2018). CP kalınlığı tahmininde sayısal yöntemler, özellikle de ayırık blokları ve çözülme simüle eden yapıyı içerebilen veya oluşturabilen ayırık eleman yöntemi, CP kalınlığı tahmininde uygulanabilir. Ölçeklendirilmiş açıklık değerlendirmeleri de dahil olmak üzere bazı görgül yöntemler mevcut koşullar dahilinde yeterli korelasyon örneklerine sahip olmaları halinde uygulanabilir (Carter, 2014).



Şekil 2.3. Eşik topuğunun yenilme mekanizması (Carter, (2014)'ten düzenlenmiştir)

Delaminasyon, tabakalar arasında ayrılmaya izin veren yatak düzlemleri, yapraklanma veya sürekli eklemler gibi ince veya tabakalı kaya tabakalarında meydana gelebilir (Bar vd., 2018). Limit denge kiriş ve plaka analizinin bazı formları, ayrıca Voussoir çözümleri ve uygun kaya yapısı replikasyonu ile sayısal modelleme ve yine ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi dahil olmak üzere çeşitli uygun görgül yöntemler uygulanabilirliğe sahiptir (Carter, 2014).

Genel olarak, bu yenilme mekanizmaları CP geometrisi, CP'nin altındaki kazılar, kaya kütlesi dayanımı ve kaya kütlesi içindeki süreksizliklerin özellikleri arasındaki ilişkilere bağlıdır. CP boyutlarını etkili bir şekilde tahmin etmek ve böylece farklı kaya koşullarında bu yenilmeler önlemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. CP boyutlandırmasının ayrıntılarına girmeden önce, süreksizlikler, yerinde gerilmeler ve kaya kütlesi dayanımı dahil olmak üzere çevredeki kaya kütlelerinin davranışını etkileyen faktörleri değerlendirmek faydalı görünmektedir. Bu faktörler, kaya kütlesi özellikleri, gerilme oranı teorisi, deformasyon modülü ve kaya kütlesi yenilme ölçütlerini içeren çalışmalarla ölçülmektedir.

## **2.7. CP ve Çevresindeki Kaya Kütlelerinin Özellikleri**

Kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesi, bir CP'nin kalınlığının tahmin edilmesinde önemli bir adımdır. Çoğu CP yenilme veya göçmesinin, kaya kütlesi içindeki iyi tanımlanmış olumsuz yönelimli eklemler veya makaslamalar boyunca dislokasyon veya kaymadan kaynaklandığı görülmektedir. Bunlar ya tavan taşı ya da taban taşı temasında ya da yırtılma veya parçalanma süreçlerinde meydana gelmektedir (Carter, 2014). Birçok durumda, öngörülemeyen CP yenilmelerine katkıda bulunan önemli bir faktör, ilk CP tasarımında göz ardı edilmiş kaya kütlesi yapılarıdır. CP içinde gözlemlenen küçük süreksizlikler, yer altı madencilik faaliyetleri tarafından tetiklenebilir, bu da onların genişlemesine ve nihayetinde CP yenilme ile sonuçlanmasına neden olabilir. Örneğin, Çin'deki Shirengou demir madeninde CP'nin duraylılığını gözlemlemek için kurulan bir mikrosismik izleme sistemi gömülü fayın yayılımını yakalayabilmiştir. Mikro-sismik olayların zamansal ve mekânsal dağılımına ve örselenme mekanizmasına dayanarak, fayın yayılmasının eşik topoğun yenilmesini tetiklediği ve yer altı galerilerine su sızıntısında artışa yol açtığı belirlenmiştir (Zhang vd., 2015).

CP kalınlığı tahmin edilirken tüm süreksizliklerin kapsamlı bir şekilde tanımlanmasını ve dikkate alınmasını sağlamak için kaya kütlesi özellikleri hakkında tüm temel bilgilerin toplanması tavsiye edilir. Bu bilgiler jeolojik haritalama, kaya kütlesi sınıflandırması, jeoteknik testler, kaya kütlesi modellemesi, yer altı suyu analizi ve izleme ve gözetim yoluyla elde edilebilir. Madencilik ekibi, bu özellikler belirleme yöntemlerinden elde edilen bilgileri entegre ederek kaya kütlesi özelliklerine ilişkin kapsamlı bir anlayış geliştirebilir ve böylece CP tasarımı, kalınlık tahmini ve duraylılık değerlendirmesine ilişkin bilinçli kararlar verebilir.

### **2.7.1. Jeoloji ve Jeoteknik Haritalama**

Kapsamlı jeolojik ve jeoteknik haritalama, CP ve çevresindeki kaya kütlesi içindeki kaya türleri, yapılar ve süreksizlikler hakkında değerli bilgiler sunar. Bu veriler, bölgenin daha geniş jeolojisini anlamak ve potansiyel zayıf zonları ortaya çıkarmak için gereklidir. Her kaya türünün farklı yükleme ve çevre koşulları altında performansını etkileyen farklı özelliklere sahip olduğunu dikkate almak gerekir. Kumtaşı, kireçtaşı veya çamurtaşı gibi tortul bir kaya kütlesi, farklı özelliklere sahip katmanlardan oluşur. Bir tortul dizisi içinde, tabakalar katmana paralel ve dik yönlerde farklı özellikler sergileyecektir. Bu anizotropi, uygulanan gerilmenin yönüne bağlı olarak mukavemetini önemli ölçüde etkiler ve bir galerin çevresinde yenilmenin ilk olarak nerede meydana gelebileceğini etkiler (Tang ve Hudson, 2010). Tsesarsky, (2012) bazı tortul kaya kütlelerinin mekanik davranışını incelemiş ve sonuçlarını klasik Voussoir kiriş çözümü ile karşılaştırmıştır. Deforme olan kaya tabakası (Voussoir kirişi) içinde oluşan itme hattının geometrisinin parabolik olduğunu bulmuştur. Bu yenilme mekanizması Şekil 2.3'te gösterilen delaminasyon yenilme mekanizmasına benzemektedir. Öte yandan, magmatik bir kaya kütlesi, oluşumu sırasındaki akışkan magma hareketleri nedeniyle farklı konumlarda farklı özellikler sergileyebilir. Özelliklerdeki çeşitliliğe rağmen, kaya malzemesi birleşik sıkıştırma ve makaslama yüklemesi altında makaslama yenilme eğilimindedir. Kaya eğimi arttıkça mukavemeti ve elastik modülleri yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde azalma eğilimindedir (He vd., 2020). Magmatik kayada oluşan CP, sokulumlu yapılar, süreksizliklere ve indüklenmiş gerilmelere bağlı olarak çok çeşitli yenilme mekanizmaları sergileyebilir.

Geoteknik haritalama, CP duraylılığını etkilemesi ihtimali olan kritik süreksizliklerin sayısının, konumunun (sıklık ve aralık), yöneliminin ve boyutunun, kaya malzeme dayanımının, hidrolojik durumun ve yüzey özelliklerinin belirlenmesini gerektirir (Villaescusa, 2014; Pathapati vd., 2023; Bakhtavar vd., 2010; Carter, 2014). Bu yapıların haritalanması, topuk duraylılığını değerlendirmek için çok önemli olan yönelimlerini, aralıklarını ve dağılımlarını anlamayı kolaylaştırır. Görgül ve sayısal yöntemler de dahil olmak üzere CP kalınlık tahmin yöntemleri, jeolojik ve jeoteknik haritalamadan toplanan verileri kullanma eğilimindedir. Bir CP'nin haritalanması için yalnızca iki yöntem mevcuttur: sondaj kuyusu kayıt verilerinin kullanılması veya doğrudan bir şekilde tespit edilmesini sağlayan açık ocak duvarlarından veri gereklidir. Özellikle ocak duvarlarında görülebilen yapıların doğrudan haritalanması, CP ve çevresindeki kaya kütledeki ek müdahaleleri en aza indirmek için sondaj deliği kaydı yerine tercih edilir. Doğrudan haritalama, hat örnekleme, hücre örnekleme ve şerit haritalama gibi teknikleri kapsar. Okuyucuların bu tekniklerle ilgili ayrıntılı prosedürler için Villaescusa'nın (2014) çalışmasına başvurmaları tavsiye edilmektedir.

Jeoteknik haritalamanın, kaya kütle davranışına etki edecek olan önemli parametrelere odaklandığını bilmek önemlidir. Bununla birlikte, haritalamanın gerçekleştirildiği açık yüzey, tüm endişe alanı hakkında kapsamlı bilgi sağlamayabilir (Hamman vd., 2017). Ocak tabanına yakın ocak şevinde haritalanan yapıların CP boyunca ve sonraki taban ve tavan taşlarına doğru uzandığı varsayılmaktadır. Bu varsayım belirli ölçüde bilinmezlik içerir ve büyük ölçüde jeolog veya jeoteknik ekibin deneyimine ve yorumlama becerilerine dayanmaktadır. Net bir jeolojik yorumlama mümkün değilse veya yanlış bir sonuca varılırsa, kaya kütle sınıflandırmasına ilişkin bu verilerden elde edilen nicel bir değer, CP kalınlığının genel tahminini etkileyebilir.

### **2.7.2. Kaya Kütle Sınıflandırması**

Kaya kütle sınıflandırmaları, CP kalınlık tahmini ve duraylılık analizlerinde kullanılan görgül yöntemlerin ve sayısal modelleme yaklaşımlarının omurgasını oluşturmaktadır. Sınıflandırma yöntemleri, kaya malzemesinin özelliklerinin yerleşik mühendislik yapılarının duraylılığını belirlemede tek başına yeterli olmadığı

anlayışından hareketle geliştirilmiştir. Bir kaya kütlesi benzer sağlam kaya özellikleri sergilese bile, süreksizliklerin veya yapısal özelliklerin varlığı nedeniyle mukavemette farklılıklar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, kaya kütlesi sınıflandırmasının amacı, bir kaya kütlesini benzer jeoteknik özelliklere sahip alanlara veya bölgelere ayırmaktır.

Terzaghi'nin Kaya Yüğü Yüksekliği Sınıflandırması, Lauffer'in Sınıflandırması, Deere'in Kaya Kalitesi Tanımlaması (RQD; Rock Mass Designation), Kaya Yapısı Derecelendirmesi (RSR; Rock Structure Rating) kavramı, Kaya Kütlesi Derecelendirmesi (RMR; Rock Mass Rating), madencilik için Modifiye Kaya Kütlesi Derecelendirmesi (MRMR; Modified Rock Mass Rating) sistemi, Norveç Geoteknik Enstitüsü Q-sistemi (NGI Q-Sistemi), Kaya Kütlesi indeksi (RMI; Rock Mass index) ve Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI; Geological Strength Index) sistemi dahil olmak üzere çok sayıda kaya kütlesi sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir. Örneğin, Şekil 2.3'te gösterilen farklı CP yenilme mekanizmalarına yol açabilen kaya kütlesindeki değişkenlik ve çeşitlilik, RMR veya MRMR sistemi, NGI Q sistemi ve GSI sistemi gibi geleneksel kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri kullanılarak değerlendirilebilir. Bu sınıflandırma sistemlerinin literatürdeki dokümanları kapsamlıdır ve aralarındaki ilişkiler oldukça iyi kurulmuştur. Daha fazla bilgi için okuyucuların Goel ve Singh, (2011) ve Zhang, (2016) tarafından yapılan çalışmaları incelemeleri tavsiye edilir.

Jeolojik ve jeoteknik haritalama sırasında toplanan jeoteknik verilerin formatı, bir jeoteknik mühendisinin gerektiğinde herhangi bir sayıda kaya kütlesi sınıflandırma tekniğini kullanabileceği şekilde esnekliğe izin vermelidir. Bu nedenle, toplanan parametreler tercihen yorumlanmış kaya kütlesi sınıflandırma parametrelerinden ziyade mühendislik jeolojisi verilerini tanımlamalıdır (Villaescusa, 2014). Temelde, herhangi bir mühendislik sınıflandırma sisteminde, en düşük derecelendirme "zayıf kaya kütlesi" olarak etiketlenirken, en yüksek derecelendirme "mükemmel kaya kütlesi" anlamına gelir. Dolayısıyla, bir sınıflandırmanın her bir parametresi, genel derecelendirme düştükçe daha etkili hale gelir. Birçok sınıflandırma sistemi hem çok mükemmel hem de çok zayıf kaya koşullarında hassasiyet gösterirken, orta kaya koşullarında doğruluk azalma eğilimindedir.

CP gibi mühendislik kaya yapılarında, CP kalınlığının tahmini sırasında en zayıf kaya kütlesi CP duraylılığı için belirleyici faktör olarak kabul edilir. CP kalınlığını

tahmin etme yöntemleri daha sonraki bölümlerde tartışılacaktır. Carter (2014) gibi çalışmalar da yenilmelerin çoğunun, özellikle cevher kütlesi ile ana kaya arasındaki temasın yakınında, kaya kütlesi içindeki olumsuz yönelimli eklemler veya makaslama zonları boyunca yerdeğiştirme veya kayma ya da parçalanma veya aşınma süreçleri nedeniyle meydana geldiğini öne sürmektedir. Örneğin Ölçeklendirilmiş Açıklık Yönteminde, ister tavan taşı, ister taban taşı, cevher kütlesi, fay zonu veya başka bir jeolojik bölge olsun, en zayıf veya en yaygın unsurun kaya kalitesi bir Kritik Açıklık tanımlamak için seçilmelidir.

Sayısal modelleme teknikleri geliştikçe, kaya kütlesi duraylılıklarının farklı sınıflar veya dereceler arasındaki değişimini modellemek ve görselleştirmek daha kolay hale gelmektedir. Günümüzde, kaya kütlesi sınıflandırmalarına dayalı sayısal yöntemler, basit olmaları ve jeolojik ve jeoteknik belirsizlikleri etkili bir şekilde ele alma kapasiteleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sayısal analizler, kaya özelliklerinde ani bir değişiklik olması durumunda mühendislerin destekleyici önlemler konusunda hızlı bir şekilde karar vermelerini sağlar.

Sayısal kodlar, kaya kütlesi sınıflamasının etkisinin veya mühendislik yapılarının çevresindeki süreksizliklerin varlığının analiz edilmesini sağlayan "ilerledikçe tasarım" yaklaşımını kolaylaştırmıştır. Bu yaklaşım, mühendislerin kaya kütlesi davranışı ve sahadaki koşullara ilişkin gelişen anlayışa dayalı olarak tasarımları gerçek zamanlı olarak değerlendirmelerine ve ayarlamalarına imkan sağlamaktadır. Örneğin, Karian ve v.d., (2016) bir CP alanında galeri yenilmesine karşı çeşitli önlemlerin etkinliğini araştırmak amacıyla 2 boyutlu bir sonlu eleman sayısal modeli kullanmıştır. Çeşitli kaya kütlesi sınıflandırmaları altında CP duraylılığını simüle edebilmişler ve bulgularına dayanarak uygun kaya desteği türleri önerebilmişlerdir.

Kaya kütlesi sınıflandırması, yalnızca saha jeolojisinin kavramsal bir modelinin oluşturulmasında değil, aynı zamanda idealleştirilen (modelleme için) gerçekliği yanlış bir şekilde değerlendirmemesini sağlamak üzere analizler için gerekli niceliğin sağlanmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Sayısal modelleme ile birlikte yürütüldüğünde kaya kütlesi özelliklerinin belirlenmesi, kaya kütlesi davranışının mekaniğini çok daha derinden anlama potansiyeli sunar (Marinos vd., 2007). İster 3 boyutlu ister 2 boyutlu bir sayısal modelde olsun, kaya bölgeleri ve süreksizlikler ya sürekli ya da süreksiz elemanlar kullanılarak simüle edilebilir.



Örneğin, sürekli fay zonları sayısal olarak yumuşak, zayıf malzemeden oluşan zonlu bölgelerle temsil edilir. Öte yandan, süreksiz faylar ayırık elemanlarla temsil edilir. Süreksiz elemanlar, ayırık bir temas boyunca kayma ve normal yerdeğiştirmenin yorumlanmasını ve görselleştirilmesini kolaylaştırır. Sürekli faylar, daha yumuşak kaya kütlesi etrafındaki gerilmenin yeniden dağılımını ve faylar ile çevredeki daha yetkin kaya kütlesi arasındaki gerilme değişiminin sayısal olarak yansıtılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, sürekli elemanlar fay kayması veya normal örselenmelerin grafiksel olarak görselleştirilmesine kolayca izin vermez (Kalenchuk vd., 2019).

Bu alt bölümün özeti olarak, okuyucular sayısal modelleme tekniklerinin sağladığı çeşitli avantajlara rağmen, makul sonuçların elde edilmesinin doğru verilerin kullanılmasına bağlı olduğunu anlamalıdır. Sayısal kodlar, CP'nin örselenme özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmek için hem CP'nin hem de çevresindeki kaya kütlesinin dayanımı ve süreksizliklerine ilişkin güvenilir verilere ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, sayısal benzetimlerin güvenilirliğini ve geçerliliğini sağlamak için kapsamlı ve doğru veri toplama ve karakterizasyonun önemini vurgulamaktadır. Elbette, deneme yanılma için hesaplama verimliliğinden yararlanmak, özellikle koşulların geri analiz yoluyla ele alınabileceği senaryolarda avantajlı olabilir. Ancak, amaç bir mühendislik yapısı yüzünden gelecekte meydana gelebilecek kaya kütlesi örselenmesini tahmin etmek olduğunda, kapsamlı ve özenli jeolojik haritalama ve kaya kütlesi sınıflandırmasına öncelik vermek zorunludur. Bu yaklaşım, jeolojik koşulların kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak daha doğru tahminler yapılmasına ve mühendislik tasarımları ile destek önlemlerine ilişkin daha bilinçli kararlar alınmasına yol açmaktadır.

## **2.8. Kaya Kütlesi Jeomekanik Özellikleri**

Bir kaya kütlesinin jeomekanik özellikleri, gerilme ve gerinime maruz kaldığında verdiği mekanik tepkiyle ilgilidir. Bu özellikler mukavemet, sertlik, deforme olabilme, geçirgenlik, anizotropi ve gözenek basıncını içerir. Bu özelliklerin anlaşılması, bir çok mühendislik ve jeolojik uygulama açısından, özellikle de CP gibi jeolojik yapılardaki (veya mühendislik yapılarındaki) duraylılık koşullarının değerlendirilmesinde çok önemlidir. Koşullar, sığ derinlikte oldukça ayrılmış düşük

kaliteli kayanın kaya sıkışması veya akmasından, kısmen ayrılmış bloklu eklemli kayanın tavan ve yan duvarlarından blokların yerçekimiyle düşmesinden, büyük derinlikteki masif kayanın pullanmasına, plakalanmasına ve kaya patlamalarına kadar uzanmaktadır (Hoek ve Brown, 2019).

Yapısal kontrollü ve gerilme kontrollü yenilme analizleri, bu duraylılık koşullarının analizinde bağımsız olarak kullanılmaktadır. Yapısal kontrollü yenilme stereografik ve bilgisayar teknikleri ile değerlendirilebilir. Stereografik teknikler, yenilme mekanizmalarını anlamak ve kazılarda izole edilmiş kamaların duraylılığını değerlendirmek için değerli olan manuel yöntemleri içerir. Bu teknik, tamamen üç boyutlu bir sorunun iki boyutlu olarak analiz edilmesine olanak tanıyan stereografik projeksiyonu kullanır (Hoek ve Brown, 2019; Brady ve Brown, 2006). Projeksiyon, jeolojik ve jeoteknik haritalama sırasında kaydedilen kaya katmanları, faylar, kırıklar ve diğer süreksizlikler dahil olmak üzere çeşitli jeolojik özelliklerin mekansal düzenlemelerini ve yönelimlerini analiz etmeye yardımcı olur. Etkili olmasına rağmen, eklemli kayalarda gerçekleştirilen önemli kazıların tasarımı ve analizi için stereografik tekniğin kullanılması aşırı zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle, sayısal modelleme gibi bilgisayar teknikleri genellikle tercih edilmektedir. Bu tez büyük ölçüde sayısal modelleme tekniklerine dayanmaktadır, bu nedenle ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecektir.

### **2.8.1. Yerinde Gerilmeler**

Yerinde kaya gerilmelerinin dağıtımı, kaya mekaniği ve kaya mühendisliğinin birincil odak noktasıdır. Bu, tektonik ve depremler gibi temel jeolojik süreçleri anlamının yanı sıra kaya oluşumlarının içinde veya üzerinde yapılar tasarlamayı da içerir (Zhang, 2016). Bu tezde kullanılan gerilmelerle ilgili terimler, Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM; International Society for Rock Mechanics) tarafından önerilen tanımlara uymaktadır. Okuyucuların daha fazla bilgi edinmek için Hudson ve diğerleri, (2003), Sjöberg vd., (2003), Haimson ve Cornet, (2003) ve Christiansson ve Hudson, (2003) yayınlarına başvurmaları tavsiye edilir.

Bir kaya kütleindeki doğal gerilmeler (yerinde gerilmeler), üstteki tabakalardan ve zamanla meydana gelen jeolojik süreçlerden kaynaklanır. Özellikle CP ve çevresindeki kaya kütleleri civarındaki yerinde gerilmelerin belirlenmesi, tasarım

aşamasında veya CP cevher üretim benzetimi sırasında yürütülen gerilme analizleri için kesin yanal destek koşullarının oluşturulmasında temel bir adımdır. Sayısal analiz, büyük ve küçük ana gerilmelerin yönü ve büyüklüğü ile CP çevresindeki kritik gerilme seviyeleri de dahil olmak üzere gerilme durumunun temel olarak anlaşılmasını gerektirir.

Yerinde gerilmeler, kullanılabilir bütçe, zaman çerçevesi ve gerekli veri hassasiyeti gibi faktörlere bağlı olarak tahmin edilebilir veya ölçülebilir. Ancak, seçilen yaklaşıma bakılmaksızın yerinde gerilme tahmin edilmesi nispeten basit ve kolaydır. Bu tahmin, mühendislik tasarımının ilk aşamalarında, planlama sürecine yardımcı olarak ve uygun gerilme ölçüm yöntemlerinin ve bunların ilgili konumlarının belirlenmesinde değerlidir. Yerinde kaya gerilmelerinin ölçülmesi, mevcut gerilme koşullarını bozan ya da bozmayan yöntemlerle yapılabilmektedir. Yerinde kaya koşullarını bozan teknikler tipik olarak kaya kütlesi içinde gerilmeler, örselenmeler veya çatlak açma basınçları oluşturmayı içerir. Bunlar arasında hidrolik çatlatma, Önceden Var Olan Çatlakların Hidrolik Testi (HTPE; Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures), sondaj deliği rahatlatma yöntemleri ve yüzey rahatlatma yöntemleri sayılabilir. Öte yandan, yerinde gerilme koşullarını bozmayan yöntemler, kaya davranışını kaya koşullarını önemli ölçüde değiştirmeden gözlemlemeye dayanır. Bu yöntemler arasında karot alma, sondaj deliği kırılmaları, geri analiz, akustik yöntemler (Kaiser etkisi), gerilme geri kazanım yöntemleri, jeolojik gözlemsel yöntemler ve deprem odak mekanizmaları yer almaktadır (Brady ve Brown, 2006; Jaeger vd., 2007; Zhang, 2016). Bu yöntemler mevcut literatürde kapsamlı bir incelenmiştir ve dolayısıyla bu tez kapsamında tekrar incelenmeyecektir. Bunun yerine, bu tez, yerinde kaya gerilmelerini tahmin etmek için görgül korelasyonları veya geçmiş gerilme ölçümlerinden elde edilen gözlemleri ve farklı analitik modelleri kapsayan çeşitli yöntemleri incelemeye odaklanacaktır.

### **2.8.1.1. Yerinde Gerilme Koşullarını Etkileyen Faktörler**

Yerinde gerilme seviyeleri değişken yüzey topografyası, sokulumlar, kırık setleri (süreksizlikler) ve tektonik gerilme gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde dalgalanabilir. Bununla birlikte, sert kaya oluşumlarında, yerel tektonik koşullardan bağımsız olarak, özellikle derinliğin ilk birkaç yüz metresinde dikey gerilme bileşeninin en düşük asal gerilme olma eğiliminde olduğunu anlamak önemlidir

(Hudson vd., 2003). Açık ocak - yer altı madenlerindeki CP'nin çoğu bu derinliktedir. Ortalama düşey gerilme bileşeninin derinlik gerilmesi ile yakın hizada olduğu düz zemin yüzeylerinin aksine (yani,  $\sigma_v = \gamma z$ ), bu durum açık ocak-yer altı CP durumları için geçerli değildir.

CP ve çevresindeki kaya kütlelerinin herhangi bir noktasındaki gerilme durumu, derinlik gerilmesinin ve yüzeydeki ek yükün ocak sınırları içindeki dağılımından kaynaklanan gerilme bileşenlerinin birleşik etkisi olarak görülebilmektedir. Özellikle CP dahil olmak üzere ocağı çevreleyen kaya kütlesi içinde, düşey bileşene göre yüksek bir yatay gerilme bileşeni beklenmektedir. Açık ocağın kaya kütlesi içindeki gerilme dağılımı üzerindeki etkisinin, ocaktan uzaklaştıkça hızla azalması beklenmektedir (Kang vd., 2002).

Bir kaya kütlelerinde sokulumlar, ana kaya kütlelerinden sonra oluşan litolojik birimleri ifade eder. Yaygın sokulumlar arasında kuvars ve fluorspar gibi minerallerden oluşan dayklar ve damarlar gibi ekstrüfiz özellikler yer alır (Bodnar ve Student, 2006). Bir CP içindeki cevherleşmiş bölge bir sokulum olarak kabul edilebilir. Bir kaya kütlesi içindeki sokulumlar, mevcut yerinde gerilme durumunu iki şekilde etkilemiş olabilir. İlk olarak, eğer sokulum, çevresindeki kayanın yatay pasif direncine karşı basınç altında yerleştirilmişse, yüksek gerilmeli bir bileşen sokulum düzlemine dik olarak hareket edebilmektedir (Brady ve Brown, 2006). İkinci olarak, bir sokulumun etkisi, sokulumun ve çevresindeki kayanın göreceli örselenme modülleri ile bağlantılı olacaktır (Zhu vd., 2019). Ana kaya kütlelerindeki efektif gerilmede bir değişiklik veya tektonik aktivite nedeniyle uygulanan yerdeğiştirmeler gibi sistemin herhangi bir yüklenmesi, ana kaya kütlelerine kıyasla sokulumda nispeten yüksek veya düşük gerilmelere neden olacaktır. Nispeten sert bir kapanım nispeten yüksek gerilme durumları yaşayacaktır ve bunun tersi de geçerlidir (Fairhurst, 2003). Ana kaya ile sokulum arasındaki elastik modül farkının bir sonucu, sokulumun kendisi nispeten tekdüze bir gerilme durumu yaşarken, sokulumun yakınındaki ana kayada yüksek gerilme eğimlerinin varlığıdır (Brady ve Brown, 2006; Fairhurst, 2003).

Bir kaya kütlelerindeki kırıkların varlığı, ortamdaki gerilmelerin denge durumunu sınırlar (Zhang ve Ma, 2021). Yukarı kaldırılmış veya yükseltilmiş bir kaya

kütlesindeki dikey kırıklar tipik olarak düşük yatay gerilme bileşenleriyle ilişkilidir (Molnar vd., 2007). Kaya kütlesindeki sıkıştırma yenilmesiyle uyumlu yönelim, konformasyon ve yüzey özellikleri sergileyen kırık setleri, gelişimlerine neden olan gerilme bölgesinin özellikleriyle bağlantılı olabilmektedir (Brady ve Brown, 2006). Bir dizi eşlenik fay gözlemlendiğinde, faylanmadan önceki ana alan gerilmesinin yönünün fayların dihedral açısının dar açığı ile aynı hizada olduğu yorumlanır. Küçük ana gerilme eksenini geniş açığına karşılık gelirken, ara ana gerilme eksenini fayların kesişme çizgisi ile hizalanmaktadır (Allaby, 2020). Bununla birlikte, alan ana gerilmelerinin yöneliminin bu şekilde yorumlanması, kırık olayından sonra hakim olan gerilme durumu için geçerli olmayabilir (Brady ve Brown, 2006). Tercihen, ortamdaki gerilme durumu, kırık yüzeylerindeki denge koşullarını koruma ihtiyacı ile belirlenebilmektedir. Bir kaya kütlesi içindeki bir kırık bölgesi tipik olarak farklı yönelimlere sahip elemanlardan oluşmaktadır. Mekanik olarak uyumlu bir gerilme bölgesinin de benzer şekilde hem büyüklükler hem de ana gerilmelerin yönelimleri açısından yerel olarak değişebileceği sonucuna varılmıştır (Amadei, 1983). Dolayısıyla, kaya kütlesinin yerinde gerilmelerinin değişmesi faylanma, makaslama veya geniş çaplı kayma olaylarının doğal bir sonucudur.

Bir kaya kütlesindeki gerilme durumu, tektonik aktivite tarafından üretilen yaygın bir kuvvet bölgesine bağlanabilmektedir. Bu tür bir yükleme sonucu oluşan gerilmeler bölgesel ölçekte meydana gelir ve bölgedeki faylanma ve kıvrılma gibi yapısal özelliklerle ilişkili olabilmektedir (Matenco vd., 2007). Aktif tektonizma, kaya kütlesinin bileşenleri uygulanan gerilme durumuna viskoplastik olarak tepki verebileceğinden, bir bölgenin mutlaka sismik olarak aktif olduğuna işaret değildir (Brady ve Brown, 2006). Bununla birlikte, tektonik olarak gerilmeli bir kaya kütlesinde, daha dayanıklı birimler, hem örtü gerilmesinden hem de diğer yatay bileşenden önemli ölçüde daha yüksek bir alt yatay gerilme bileşeninin varlığını sergilemelidir (Shen vd., 2020).

Genel olarak, bir kaya kütlesindeki yerinde gerilme durumunu tahmin etmek önemli koşullar ortaya çıkarmaktadır. Gerilme tensörünün mekânsal değişkenliği, herhangi bir bireysel tahmin veya ölçümün tensör bileşenlerinin yığın ortalamaları ile çok az ilişkisi olabileceği anlamına gelmektedir. Bir CP'nin kalınlığını tahmin ederken veya CP cevher çıkarımını simüle ederken, hem tavan hem de taban taşında kazı sonrası

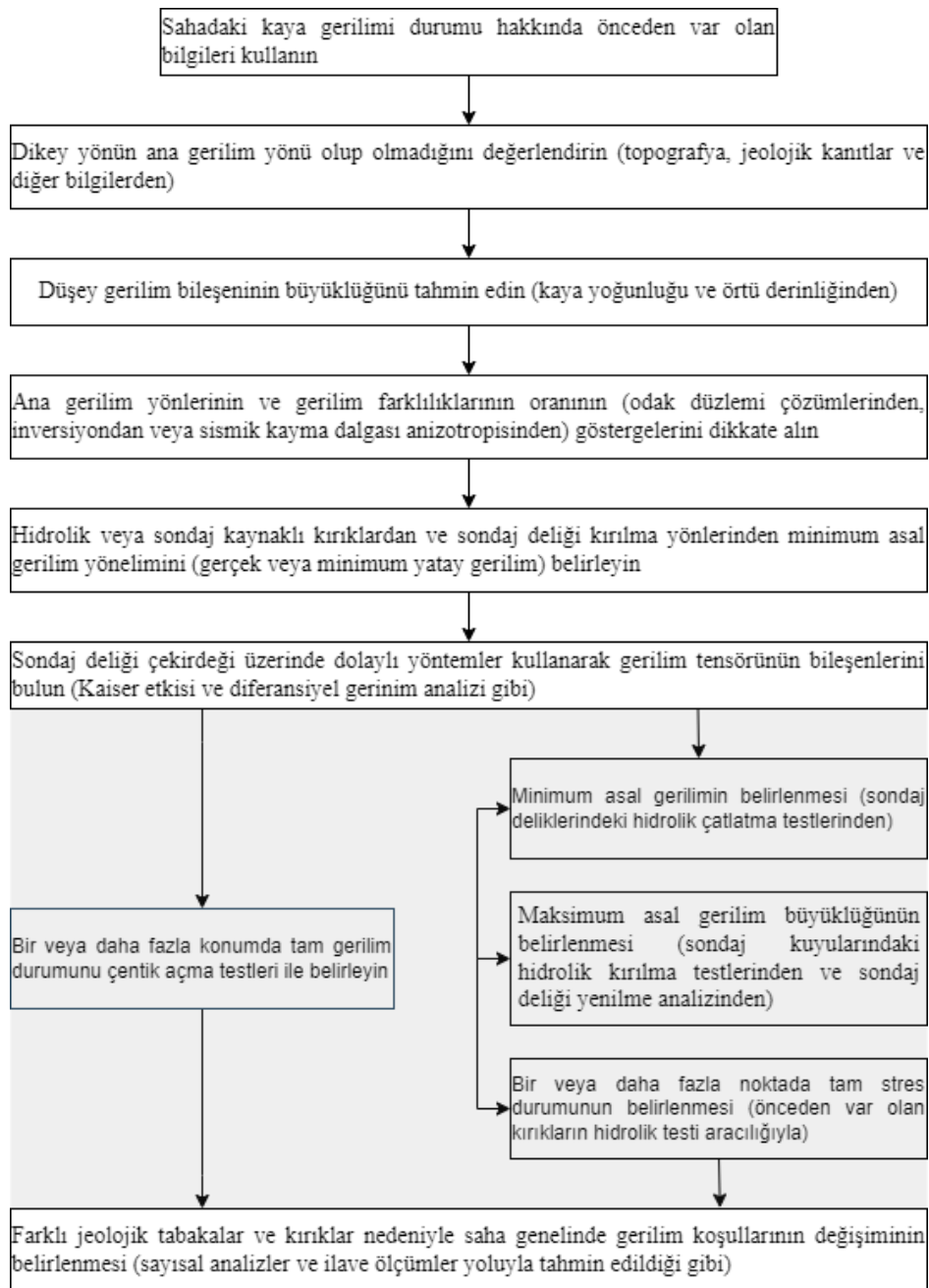
gerilme dağılımını temel olarak yöneten, CP'nin etkilediği zondaki ortalama gerilme durumudur. Başka bir deyişle, yerinde gerilme durumunun başarılı bir şekilde tanımlanması, hem gerilme tensörünü yerel olarak belirlemek için bir yöntem hem de örneklenen hacim boyunca sahadaki gerilme tensörü için temsili bir çözüm elde etmek üzere bir dizi gözlemi entegre etmek için bir strateji gerektirmektedir (Hudson vd., 2003).

### **2.8.1.2. Yerinde Kaya Gerilmelerini Tahmin Stratejileri**

Yerinde kaya gerilmelerini tahmin etmeden veya ölçmeden önce, eldeki belirli problemle ilgili temsili bir temel hacim (REV; Representative Elementary Volume) tanımlamanın mümkün olup olmadığını belirlemek önemlidir. Kırıklı bir kaya kütlelerinde, geleneksel sürekli mekanikler uygun olmayabilir ve gerilme kavramı, kırılmanın yapısal yerdeğişiklikler tarafından kontrol edilmesi nedeniyle uygulanamayabilir. Bu gibi durumlarda, sürekli bir yaklaşım yalnızca bünye bloklarından önemli ölçüde daha büyük hacimleri ele alırsa yararlıdır. Bu nedenle, gerilme ölçümleri REV'den daha büyük hacimleri veya bölgeleri içermelidir (Hudson vd., 2003). Örneğin, bir açık ocak-yer altı CP'si REV'niz olarak kullanıldığında, ana kayadan önemli ölçüde farklı mekanik özelliklere sahip cevherleşmiş bir damar zaten bulunabilmektedir. Ayrıca, patlama titreşimleri ve genel açık ocak madencilik faaliyetleri nedeniyle yerel gerilmeler oluşmuş olma ihtimali de vardır. Doğru yerinde gerilme tahmini, önceki açık ocak madencilik faaliyetlerinin etkisinden yeterince uzak konumları içeren çok daha büyük bir hacmin dikkate alınmasını gerektirir. Sayısal modelleme, jeolojik özelliklerin ve önceki kazıların neden olduğu gerilme alanındaki potansiyel pertürbasyonların belirlenmesine katkıda bulunabilmektedir (Stephansson ve Zang, 2012).

Bu tez, Bölüm 2.8.1.1'de yerinde gerilme hem büyüklüğünün hem de yönünün değişken olduğunu ortaya koymaktadır. Adım yaklaşımını kullanarak yerinde gerilmeleri tahmin etmek için birden fazla yöntemin uygulanmasını teşvik etmektedir. ISRM, yerinde kaya gerilme tensörünün anlaşılmasını sistematik olarak geliştirmek için bir strateji önermiştir. Bu yaklaşım Hudson ve diğerleri (2003) tarafından Şekil 2.4'te gösterildiği gibi özetlenmiştir. Yerinde gerilmeleri tahmin etmenin ilk adımlarından biri, söz konusu kaya kütlelerinin hacmi içindeki kaya gerilme hakkında mevcut tüm bilgilerin toplanmasıdır. Bu, jeolojik bağlamın

kavranmasını, Dünya Stres Haritasındaki verilerin birleştirilmesini ve bölgede daha önce gerçekleştirilen gerilme ölçümlerini detaylandıran rapor ve makalelerin gözden geçirilmesini içermektedir. Kaya oluşumlarının, yapısal jeoloji ortamının ve gerilme ölçümlerinin yapılacağı kaya oluşumunun petrofabrik tanımının başlangıçta anlaşılması, gerilme tahmin stratejisinin oluşturulması için önemli bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca, kayanın elastik gevrek davranış gösterip göstermeyeceğinin veya plastik örselenme veya viskoelastik etkilerin önemli olup olmayacağına belirlenmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Hudson ve diğerlerinden (2003) uyarlanan kaya gerilme tensörü bileşenleri hakkında bilgi geliştirme adımları

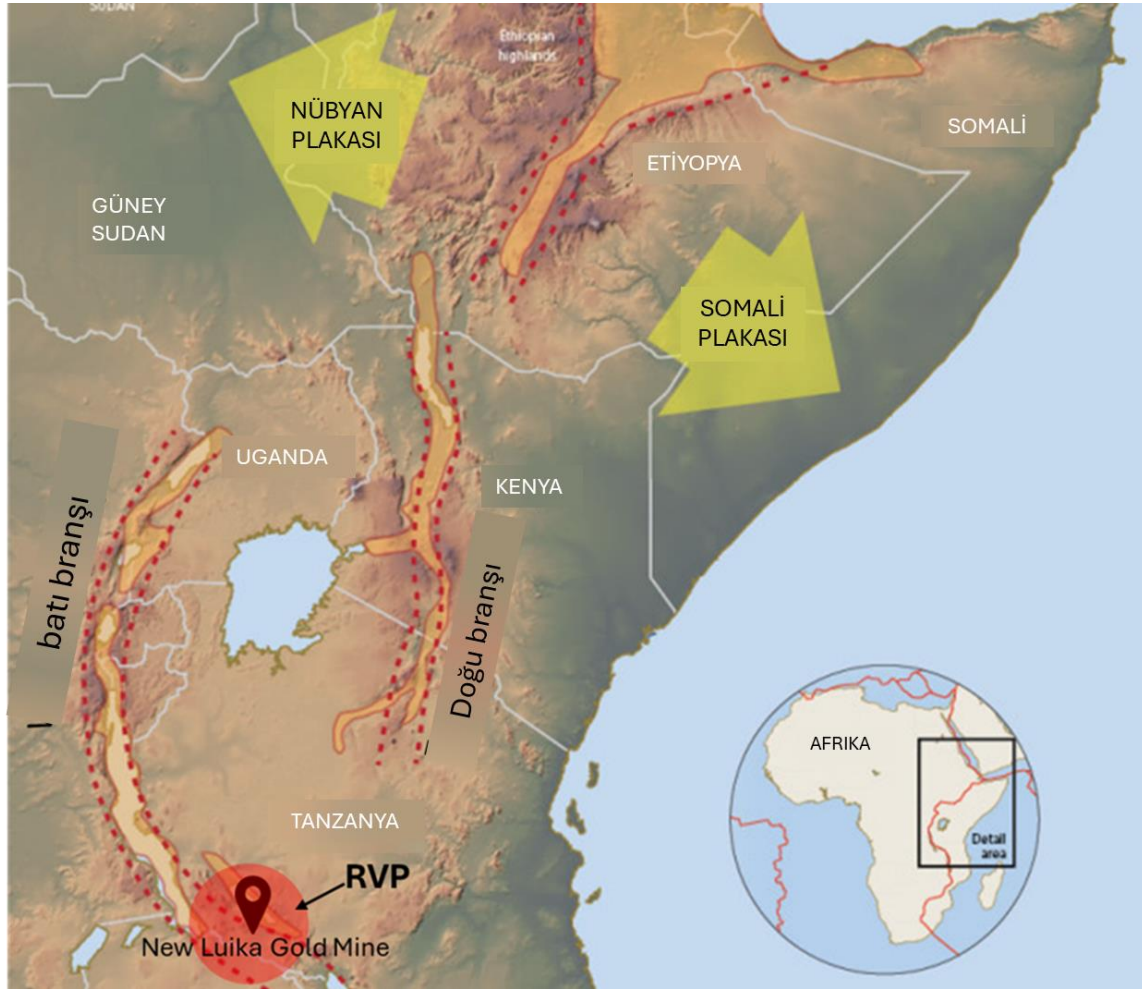
Bu aşamada, topografyanın yanı sıra herhangi bir yanal jeolojik değişim potansiyeli de göz önünde bulundurularak, asal gerilmelerin dikey mi yoksa yatay mı varsayılabileceğine ilişkin bir anlayış geliştirilir. Ayrıca, yerel tektonik hakkındaki bilgilere dayanarak, yatay asal gerilmelerin düşey gerilmelere kıyasla göreceli büyüklükleri belirlenebilmektedir. Asal gerilmelerin büyüklükleri ve yönleri hakkında erken bir değerlendirme yapmak, yeni gerilme tahmin kampanyasının sonuçlarını değerlendirmek için kullanılabilir bir ön hipotez sağlamaktadır (Stephansson ve Zang, 2012).

Özetle, Şekil 2.4'te belirtilen adımların bir saha araştırmasına ne ölçüde uygulanabileceği özel hedeflere, uygulamanın pratik fizibilitesine ve eldeki kaynaklara bağlı olacaktır. Kısmen yüksek masrafları olduğundan, zaman zaman üstten delme testleri, hidrolik çatlatma testleri ve HTPF (Şekil 2.4'ün gölgeli kısmında vurgulanmıştır) gibi yerinde gerilme ölçüm yöntemleri atlanmaktadır. Bunun yerine, esneklik veya gerilme oranı teorisine dayalı varsayımlar yapılmaktadır. Ancak yazar, pahalı olmasına rağmen doğrudan gerilme ölçümleri hedefine öncelik verilmesini önermektedir. Kaya kütlesinin gerilmeler nedeniyle örselenmeye veya kırılmaya eğilimli olduğu durumlarda, yerinde gerilme büyüklüklerinin ve yönelimlerinin daha doğru ölçümlerinin yapılması çok önemlidir. Yer altında çalışan personelin güvenliği çok değerlidir ve hiçbir maliyet düşüncesi onların sağlığının önüne geçmemelidir. Çeşitli tekniklerden elde edilen gerilme tahminlerinin entegre edilmesi her zaman şiddetle tavsiye edilir. Ancak, bu entegrasyon farklı tahminlerle ilişkili belirsizlikleri açıkça hesaba katmalıdır. Daha fazla sayıda ölçüm içeren veri kümelerine aşırı ağırlık vermektan kaçınmak için ilgili her teknik için tahmin sayısını dikkatlice değerlendirmek önemlidir.

Bu tez, Tanzanya'nın güneybatısındaki BC madeninden türetilen bir örnek çalışma kullanılarak, CP'nin tasarlanması ve ardından topuktaki cevherin çıkarılmasıyla harekete geçirilen kaya duraylılığı koşullarını değerlendirme ihtiyacı ile motive edilmiştir. Yeni Luika Altın Madeni'nin (NLGM; New Luika Gold Mine) bir parçası olan bu maden, Rungwe Volkanik Bölgesi'nde (RVP; Rungwe Volcanic Province) yer almaktadır. İl, Doğu Afrika Rift (EAR; East African Rift) sisteminin magma eksikliği olan batı kolu içinde magma destekli riftleşme ile karakterize edilen kendine



özgü bir bölgede yer almaktadır (bkz. Şekil 2.5). Sayısal modelleme yerinde gerilme tensörü ile ilgili parametreler gerektirdiğinden, okuyucuya bu bölgedeki yerinde gerilme durumunun büyüklüğünü ve yönelimini etkileyen faktörler hakkında kısa bir bilgi sağlamak oldukça yararlı olacaktır.



Şekil 2.5. NLGM'nin EAR'a göre konumu (Hall, 2020'den alınmıştır)

### 2.8.1.3. Doğu Afrika Rift Sistemi

Riftleşme, genişleme yönü, önceden var olan yapıların yeniden aktif hale gelmesi, tortulaşma ve dayk dinamikleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenen karmaşık normal faylanma ile karakterize edilen oldukça kompleks bir süreçtir. Önceden var olan kırıklar yeniden aktif hale geldiğinde, riftleşmenin ilk aşamaları, belirli bölgelerde oldukça asimetrik olabilen havza çökmesini kolaylaştıran birkaç büyük Açıklıklı sınır fayının aktivasyonunu içerir. Rift faylarının plan-görünüş geometrisi, öncelikle litosferik zayıflıkların uzanım yönüne kıyasla göreceli yönelimine bağlıdır: dik riftleşme, önemli çökme ile uzun, uzanım-ortogonal sınır faylarına yol açarken, eğik

riftleşme, daha az belirgin çökme ile fayların ve havzaların daha kademeli bir şekilde düzenlenmesiyle sonuçlanmaktadır. Rift trendi ile ilgili farklı yönelimlere sahip kalıtsal dokular, hem bölgesel hem de yerel ölçeklerde rift mimarisini etkilemektedir (Corti, 2012).

Riftlerin kinematiğini ve evrimini anlamak, büyük ölçüde gerilme alanı yönelimleri hakkındaki bilgilere dayanır. Rift yapılarına komşu bölgelerden toplanan veriler, rift ile ilişkili gerilme alanından kaynaklanan mekânsal varyasyonları ortaya çıkarabilirler (Barth vd., 2009; Brune, 2014). Genellikle, deprem odak mekanizmaları, kuyu sondajları, yerinde gerilme ölçümleri gibi jeolojik ve jeofizik veriler ile fay kayması ve volkanik hizalanmalar gibi son jeolojik veriler, tektonik gerilme bilgilerini çıkarmak için kullanılır. Sahada gözlemlenen fay düzlemi yönelimlerinin yanı sıra deprem odak mekanizmaları, dayk tutumları ve derin yerinde gerilme ölçümlerinden çıkarılan kanıtlar, litosfer içindeki asal gerilme alanının yaklaşık olarak yatay ve dikey düzlemler boyunca hizalandığını göstermektedir (Zoback, 1992).

EAR sistemi, aktif kıtasal riftleşmenin nispeten nadir görülen bir örneğidir. Kıta boyunca yaklaşık 3000 km kadar uzanan EAR sistemi, batıdaki Nübyan plakasını doğudaki Somali plakasından ayırır. Bu sistem normalde iki ana kola ayrılır: Batı ve Doğu Kolları (bkz. Şekil 2.5). Afar üçlü kavşağından başlayan rift, Etiyopya yaylalarından geçerek Kenya'da Gregory Rift'ine yol açar ve nihayetinde Natron Gölü'nün ötesinde kuzey Tanzania'da dağılır ve Doğu Rift Kolu'nu oluşturur. Batı Rift Kolu ise Güney Sudan'dan doğar, Tanganyika ve Malawi Gölleri gibi rift vadisi gölleri boyunca uzanır ve Mozambik'te son bulur. Rift Sisteminin güney boyutu daha az tanımlanmıştır ve Güneybatı Hint okyanusu sırtı ile bağlantısı tartışma konusu olmaya devam etmektedir (Delvaux ve Barth, 2010).

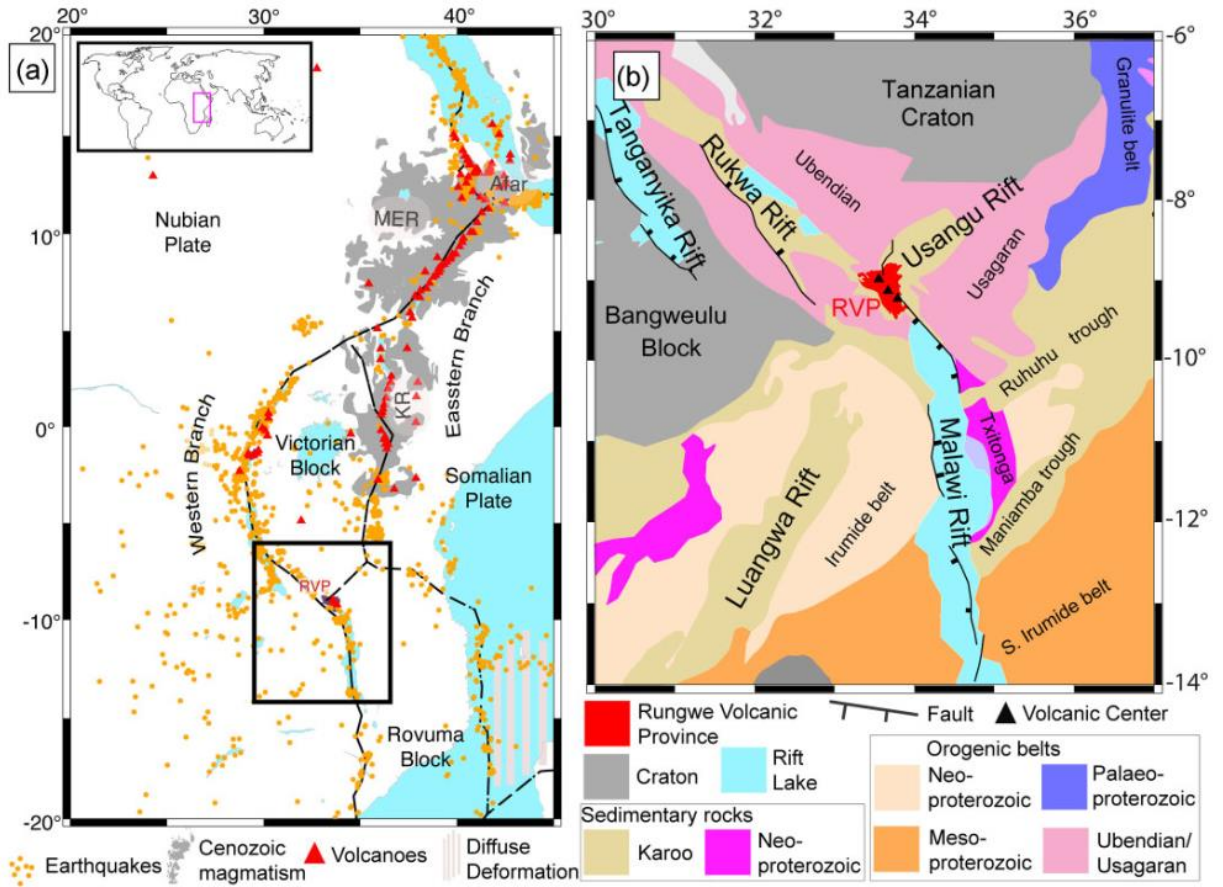
1900'lerdeki sınırlı deprem odak mekanizması verileri, EAR sisteminin kinematik çalışmasının uzaktan algılama görüntülerinden büyük ölçekli tektonik yapıların yorumlanmasına dayanmasına neden olmuştur (Corti, 2012). Daha sonra bu çalışmalar, rift çöküntülerini sınırlayan ana faylar boyunca toplanan jeolojik fay kayması verilerinin paleostres inversiyonu ile geliştirilmiştir (Delvaux vd., 2012). Ancak bu yaklaşım, fay kayması verileri genellikle aktif olduğu varsayılan faylar boyunca taban kayalarında ölçüldüğünden, yeterli zamanlama kontrolünden yoksun

olduğu için eleştirilmiştir. 1990'larda yapılan araştırmalar, ölçülen verilerin çoğunun mevcut riftleşme dinamikleriyle ilgisi olmayan geçmiş tektonik olaylara atfedilebileceğini ortaya koymuş ve jeolojik zaman içindeki gerilme alanı dalgalanmalarının önemini vurgulamıştır (Delvaux ve Barth, 2010). Daha sonra, 2000'li yıllarda GPS jeodezisine dayalı kinematik modeller ortaya çıkmıştır (Fernandes vd., 2004; Calais vd., 2006; Stamps vd., 2008). Bununla birlikte, 1900'lerdeki odak mekanizması verilerine benzer şekilde, kullanılan sınırlı sayıda kalıcı GPS istasyonu, levha hareketlerinin yeterli ayrıntıda çözümlenmesini sağlayamamıştır. Neyse ki, son zamanlarda, Doğu Afrika için mevcut odak mekanizmalarının sayısı, daha uzun gözlem süreleri, sismik ağdaki iyileştirmeler, yerel sismik ağların konuşlandırılması ve daha rafine hesaplama prosedürleri nedeniyle önemli ölçüde artmıştır (Delvaux ve Barth, 2010). Artık EAR sisteminin geniş alanları ve Afrika Kıtası'nın komşu bölgeleri boyunca tektonik gerilme modelini görselleştirmek mümkündür.

Son zamanlarda elde edilen veriler, öncelikle EAR sisteminden etkilenen Afrika plakasının doğu kısmının, minimum yatay gerilme baskın bir doğu-batı yönelimiyle karakterize edilen genişleme gerilmeleri yaşadığını göstermektedir. Buna karşılık, Nübyan plakası, maksimum yatay gerilme doğu-batı yönünde sıralandığı bir sıkışma rejimine maruz kalmaktadır. Delvaux ve Barth, (2010) 24 farklı bölgede gerilme inversiyonları gerçekleştirmek için 332 odak mekanizmasından oluşan bir veri seti kullanmıştır. Bunlar arasında, Tanzania kratonunu çevreleyen rift havzalarının genellikle eğilimlerine kabaca dik minimum yatay gerilme yönelimleri sergilediği sonucuna varmışlardır. Minimum yatay gerilme iki baskın yönü tespit edilmiştir: EAR sisteminin kuzeybatı kesimlerinde ve güneybatı yüksek plato bölgesinde WNW-ESE uzantısı ve batı rift kolunun orta kısmında, doğu rift kolunun güney ucunda, en güney rift bölümünde ve kıta kenarında ENE-WSW uzantısı. Ayrıca, genel genişleme rejiminin öncelikle Afrika yüksek platolarının litosferik yerçekimi potansiyel enerjisi ile bağlantılı olarak levha sınır kuvvetlerinden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Buna ek olarak, Hint Kıyısı ve Mozambik Kanalı'nın alçak bölgeleri uzanımsal faylanmadan etkilenmiş gibi görüldüğünden, uzanım aynı zamanda karmaşık 3D kabuk yapısı ve Tanzania kratonunun altındaki bir manto plume başının yayılması veya litosferin tabanındaki manto akışı gibi derin süreçlerin bir kombinasyonuna da bağlanabilmektedir.

#### 2.8.1.4. Rungwe Volkanik Bölgesi

Yaklaşık 1500 kilometrekarelik bir alana yayılan Rungwe Volkanik Bölgesi (RVP), EAR Sisteminin bir bileşenidir. Malawi Gölü'nün (Tanzanya'da Nyasa Gölü olarak da bilinir) kuzey ucunda yer alan RVP, Doğu Afrika Rift Sistemi'nin Doğu ve Batı kollarının Tanzanya kratonu etrafındaki ayrışma noktasını işaret etmektedir. Daha yakından incelendiğinde, RVP aynı zamanda Usangu havzası, Rukwa yarığı ve Kuzey Malawi yarığının birleşme noktasında da tanımlanabilir (bkz. Şekil 2.6).



Bölüm 2.8.1.2'nin son paragrafında belirtildiği gibi, NLGM bu il içerisinde yer almaktadır. İldeki yerinde gerilmelerin anlaşılmasının, NLGM içindeki BC madeninde açık ocak-yer altı CP oluşumunun ve ardından üretimin sayısal modellenmesi için gerekli gerilmelerin çıkarılmasına yardımcı olması beklenmektedir. RVP'de yapılan önceki araştırmalar öncelikle çevredeki EAR havzalarının, özellikle de Rukwa ve Malawi yarıklarının tektonik ortamına ve yapısına odaklanmıştır.

Ayrıca, bölgedeki riftleşme, göl tortulaşması ve volkanizma arasındaki zamanlama ilişkisinin anlaşılmasına vurgu yapılmıştır (Fontijn vd., 2012).

Araştırmacılar uzun bir süre boyunca, riftleri kapsayan RVP içindeki fayları, tortul tabakaları ve volkano-tektonik mimariyi kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Delvaux ve Hanon (1993) da dahil olmak üzere bazı yazarlar, Rukwa-Malawi-Usangu yarıklarını yarı radyal bir uzanımsal gerilme alanı altında gelişen üçlü bir kavşak olarak yorumlamıştır. Diğer yorumlar, Malawi ve Tanganyika riftleri arasındaki kuzeybatı doğrultulu fayları kıta içi bir transform fay zonu olarak görmektedir (Shaban vd., 2023). Ring, (1994) Malawi havzalarındaki tortul tabakalardaki kayma göstergelerini kullanarak, Pliyosen ortalarında doğu-kuzeydoğu (DKD) yönünden güneydoğu (GD) yönüne doğru bir Pliyosen rotasyonunu yorumlamış ve aynı dönemde volkan inşası ile çakışmıştır. Delvaux ve Barth (2010) tarafından odak mekanizması verilerine dayanarak yapılan çalışmada, Rungwe Volkanik Bölgesi'ndeki (RVP) odak düzlemlerinin, maksimum yatay gerilme yönelimlerinin geniş bir dağılımıyla birlikte yüksek açılı ve düşük açılı odak düzlemlerinin bir kombinasyonunu sergilediği sonucuna varılmıştır. Bu kombinasyon, iç heterojenliği gösteren nispeten büyük bir ortalama uyumsuzluk açısına sahip bir gerilme tensörü vermiştir. Minimum yatay gerilme yönünü, Tanganyika-Rukwa-Malawi rift parçasının eğilimine paralel olarak kuzey-kuzeybatı-güney-güneydoğu (KKB-GGD) olarak tahmin etmişlerdir. Maksimum yatay gerilme yönelimlerinin geniş dağılımına rağmen, Brazier vd., (2005), RVP'de kuzeybatı-güneydoğu (KB-GD) ile kuzey-güney (K-G) fayları boyunca gözlenen çarpma atımlı faylanmanın, doğu-kuzeydoğu-batı-güneybatı (DKD-BGB) yönelimli yatay ana sıkıştırma ile bir sıkıştırma gerilme rejimi anlamına geldiğini öne sürmüşlerdir. Bu çalışmaların birçoğu ve diğerleri genellikle şu ifadelerden biriyle sonuçlanmaktadır: RVP gelecekte önemli volkanik aktivitelere açıktır; ve bölgedeki rift kinematiği, esas olarak Prekambriyen çağından kalma mevcut süreksizliklerin ardışık olarak yeniden etkinleştirilmesini içeren çok aşamalıdır.

Burada bahsedilen çalışmalardan çıkarılan sonuçlar, RVP'deki yerinde gerilmelerin yöneliminin bir bölgeden diğerine yerel olarak değiştiğini ima etmektedir. Bu tez, bölgede bir mühendislik projesi oluşturulurken kritik gerilme yönünün ve büyüklüğünün doğru bir şekilde ölçülmesinin çok önemli olduğuna vurgu

yapmaktadır. Ne yazık ki, BC madeninde, yerinde gerilmelerle ilgili tek bir ölçüm yapılmamıştır. Jeoteknik rapor, Dünya Gerilme Haritası'ndan elde edilen ve bölgedeki ana yatay gerilme yönelimlerinde önemli farklılıklar olduğunu gösteren verileri kabul etmektedir. Bu bilgilere dayanarak rapor, yaklaşık kuzeybatı-güneydoğu ana yatay gerilme bileşeni yöneliminin proje için uygun olabileceğini önermektedir. Bu öneri madendeki cevherleşmiş zonun yönelimine dayanmaktadır. Önerilen yatay gerilme bileşeni cevher kütlelerine yarı dik olduğundan, proje için en kötü durum gerilme alanı olarak kabul edilir ve madencilik faaliyetleri sırasında cevher kütlesi çevresinde potansiyel olarak daha yüksek dayanak gerilmesi seviyelerine neden olur. Ancak, herhangi bir gerilme değeri mevcut olmadığından, bu yatay gerilme bileşeninin gerçek seviyesi belirsizliğini korumaktadır ve gerilme analizleri için gerilme oranı varsayılmıştır. Gerilme oranı teorisi literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte, okuyucuların bu teze ilgisini çekmek için, bir sonraki alt bölümde bu teoriye kısa bir genel bakış sunulacaktır.

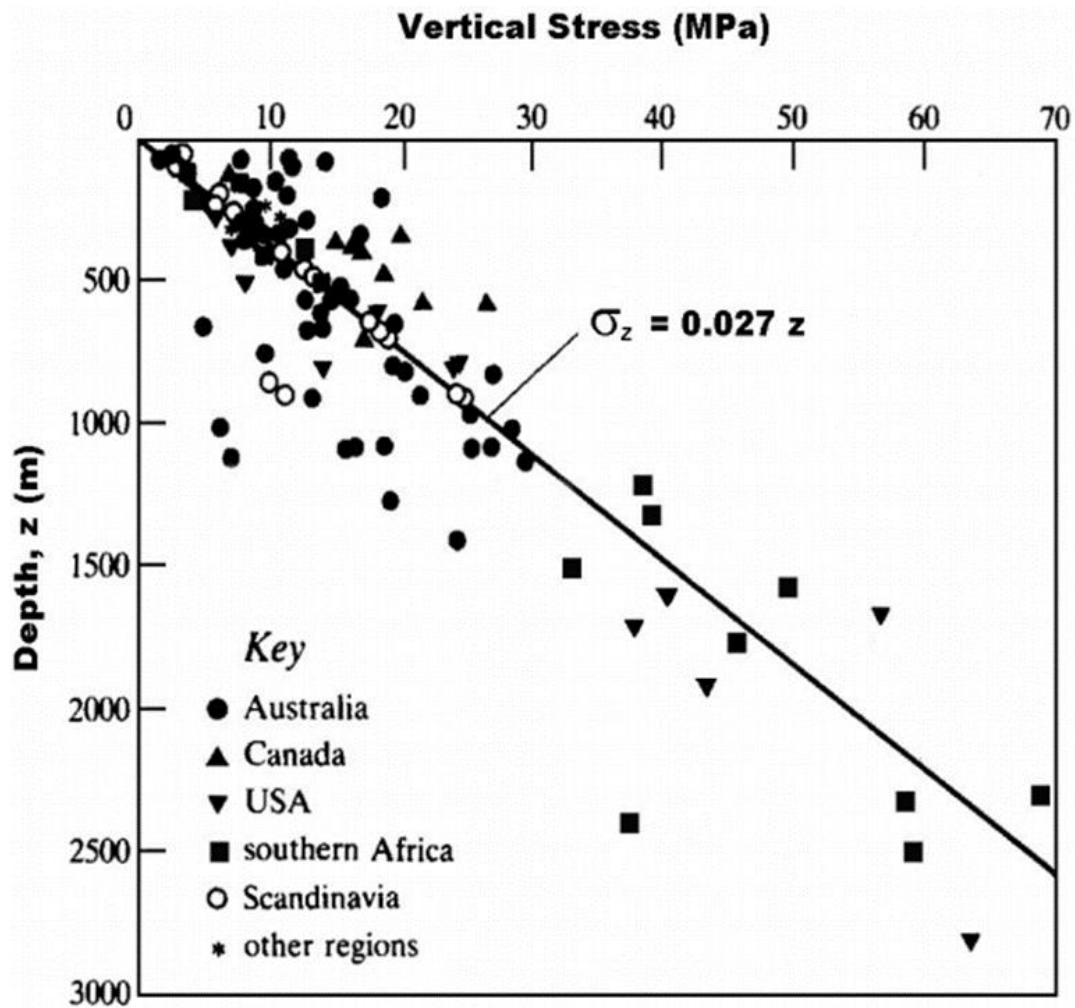
#### 2.8.1.5. Gerilme Oranı Teorisi

1978 yılında Hoek ve Brown 120'den fazla veri kümesi üzerinde çalışmış, daha sonra bu sayı Villaescusa ve diğerleri (2002) tarafından dünya çapında çeşitli madencilik ve inşaat mühendisliği alanlarını kapsayan yaklaşık 900 veri kümesine genişletilmiştir (Brady ve Brown, 2006). Elde edilen sonuç,  $\sigma_v$  olarak gösterilen düşey gerilmenin denklem (1)'de gösterildiği gibi derinlikle (z) ilişkili olduğu ve burada 0,027 değerinin üstteki kaya kütlelerinin MN/m<sup>3</sup> olarak ortalama birim ağırlığını ifade etmesidir. denklem (1) denklem (2)'de gösterildiği gibi yeniden yazılabilir, burada  $\gamma$  üstteki kaya kütlelerinin birim ağırlığını ifade eder. Şekil 2.7'de yüzeyin altındaki derinliğe karşı düşey gerilmesi gösteren grafik, özellikle sığ derinliklerde biraz dağınık değerler ortaya koymaktadır. Sığ madenlerde öngörücü tasarım için yerinde gerilmeleri tahmin etmek amacıyla bu yöntemin kullanılması endişelere yol açsa da, yerinde gerilme yöneliminin güvenilir bir tahmini ile birleştirildiğinde duraylılık mekanizmalarının araştırılması için yine de değerli olabilir.

$$\text{Dikey gerilme, } \sigma_v = 0.027z \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_v = \gamma z \quad (2)$$

Ortalama yatay gerilme,  $\sigma_{hav}$ ,  $\sigma_{hav} = K\sigma_v$  olarak verilir, burada K ortalama yatay gerilme dikey gerilmenin oranını temsil eder ve  $K = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v}$  olarak ifade edilmektedir. K-değerlerinin limiti, Denklem (3)'te gösterildiği gibi 1978 yılında Brown ve Hoek tarafından tanıtılmıştır. Terzaghi ve Richart 1952'de yerçekimsel olarak yüklenmiş bir kaya kütlesi için ve üstteki tabakaların oluşumu sırasında yanıl gerilme olmaması durumunda K-değerinin  $K = \frac{\nu}{1 - \nu}$  ile ifade edildiğini, burada  $\nu$ 'nin kaya kütlesinin Poisson oranı olduğunu ifade etmişlerdir (Brady ve Brown, 2006).

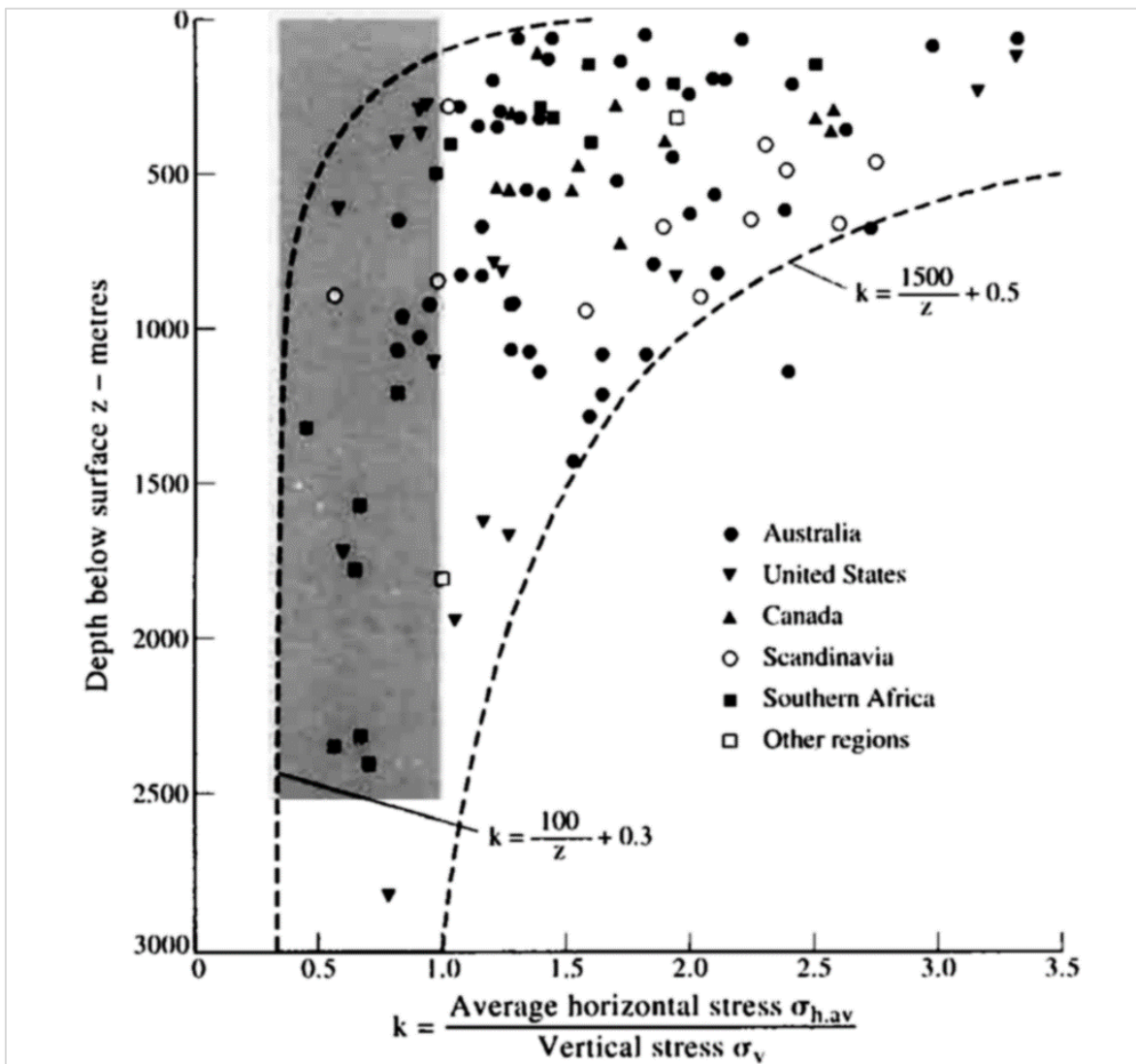


Şekil 2.7. Dünyada yapılan ölçümlere dayalı derinliğe bağlı düşey gerilme değişimi (Brown ve Hoek,1978'den alıntılanmıştır)

$$\frac{100}{z} + 0.3 \leq K \leq \frac{1500}{z} + 0.5 \quad (3)$$

Terzaghi denklemi, Poisson oranının 0,25 ila 0,5 arasında değişen uç değerleri dikkate alındığında, Şekil 2.8'deki gölgeli alanla temsil edildiği gibi, 0,33 ila 1,0

arasında uzanan bir K-değerleri aralığı sunmaktadır. Terzaghi'nin K-değeri, yanlışlıkları fark edilene kadar yaygın olarak kabul görmüştür. Bunun yanlış olarak değerlendirilmesinin nedeni, K-değerinin zaman zaman sığ derinliklerde maksimum değerine ulaşarak Terzaghi tarafından önerilen eşikleri aşmasıdır. Bu, derinlik arttıkça azalan yüksek ortalama yatay gerilme anlamına gelmektedir. Hudson ve Harrison, (1997), Wittke, (1990) ve Brady ve Brown, (2006) tarafından açıklandığı üzere erozyon, tektonik, kaya anizotropisi, süreksizliklerin yakınındaki yerel etkiler ve sonuç olarak ortaya çıkan ölçek etkileri gibi faktörler yüksek yatay gerilmelere katkıda bulunmaktadır (ayrıca bkz. alt bölüm 2.8.1.1).



Şekil 2.8. Hudson ve Harrison, (1997) tarafından modifiye edilen ortalama yatay gerilme ve düşey gerilme oranının değişimi



Terzaghi ve Richart (1952) tarafından önerilen K değerinin yanlış olduğu gösterildikten sonra, Sheorey (1994) elasto-statik termal gerilme modelini tanıtmıştır. Bu model, kabuk ve manto boyunca elastik sabitler, yoğunluk ve termal genişleme katsayısındaki değişimleri dikkate alarak lisosferik gerilmelerini tahmin etmektedir. Denklem (4), Sheorey tarafından geliştirilen K-değerini tahmin etmek için basitleştirilmiş formülü sunmaktadır.

$$K = \frac{\nu}{1 + \nu} + \frac{\beta E_h G}{(1 - \nu)\gamma} \left(1 + \frac{1000}{z}\right) \quad (4)$$

burada:

$\nu$  kayanın Poisson oranı,

$\gamma$  kayanın  $N/m^3$  olarak birim ağırlığıdır

$z$ , m olarak yüzeyin altındaki derinlik

$E_h$ , olarak yatay yönde ölçülen ortalama deformasyon modülü

$\beta$  kayanın  $1/(\text{°C})$  olarak doğrusal termal genişleme katsayısı

$G$  kayanın jeotermal eğimidir,  $(\text{°C})/m$  olarak ifade edilmektedir

K-değeri  $\sigma_{hav}/\gamma z$  ile değiştirilerek denklem (4) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir,

$$\sigma_{hav} = \frac{\nu}{1 + \nu} \gamma z + \frac{\beta E_h G}{(1 - \nu)} (z + 1000) \quad (5)$$

Sheorey vd., (2001), elastik sabitlerin yatay yerinde gerilme üzerindeki etkisini incelemek için denklem (5)'i kullanmıştır. Ölçümler topografyadan, önemli jeolojik özelliklerden veya tektonik faaliyetlerden önemli ölçüde etkilenmediği sürece denklem, gözlemlenen yerinde gerilme ölçüm verilerine makul bir uyum sağlamıştır. Kömür hariç çeşitli kayalar için makul temsili değerler,  $6 \times 10^{-6}/\text{°C}$  ile  $8 \times 10^{-6}/\text{°C}$  arasında değişen  $\beta$  değerleri önermiştir. Kabuk kayaları için  $0.0241\text{C}/m$ 'lik bir termal gradyan kullanılmıştır. Temsili  $\nu = 0.25$  ve  $\gamma = 2.7 \times 10^3 N/m^3$  değerleri ile K değeri denklem (6) kullanılarak tespit edilebilmektedir.

$$K = 0.33 + 9.5E_h \left(0.001 + \frac{1}{z}\right) \quad (6)$$

Deformasyon modülü kavramı,  $E_h$ , daha önce belirtildiği gibi sadece Sheorey K-değeri bağlamında değil, aynı zamanda sokulumlarla ilgili Bölüm 2.8.1.1'de de ele

alınmaktadır. Temel olarak, Fairhurst (2003) tarafından ortaya konulduğu üzere, kaya kütlesi üzerindeki tektonik aktivite gibi herhangi bir dış etki, ana kaya kütlesindekilere kıyasla sokulum içinde değişen gerilme seviyelerine neden olan yerdeğiştirmelere neden olabilir. Nispeten sert bir sokulum daha yüksek gerilme durumlarına maruz kalacak ve tersine, daha uyumlu bir sokulum ise daha düşük gerilmelere neden olacaktır. Ana kaya ile sokulum arasındaki elastik modüllerde kayda değer bir farklılığın olduğu durumlarda, sokulumu yakın ana kayada belirgin gerilme değişimleri gözlenir. Bu nedenle, sokulumun ana kayanın dayanımı üzerindeki etkisinin boyutunu belirlemek için yerinde gerilmeleri değerlendirirken deformasyon modülünün yaklaşık olarak hesaplanması zorunlu hale gelmektedir. Bölüm 2.8.2, deformasyon modülünü tahmin etmek için yıllar boyunca denenmiş çeşitli metodolojilerin bir özetini sunmaktadır.

### **2.8.2. Deformasyon modülü**

Uluslararası Kaya Mekaniği ve Kaya Mühendisliği Derneği (ISRM), bir kaya kütlesinin deformasyon modülünü, hem elastik hem de elastik olmayan davranışlar dahil olmak üzere, bir kaya kütlesinin yüklenmesi sırasında gerilmenin karşılık gelen gerilme oranı olarak kabul etmektedir. Kaya kütlesinin bu özelliği, Young modülü veya esneklik modülünün eklemlili kayanın davranışını tanımlamada yetersiz kalması üzerine önemli hale gelmektedir. Zaman içinde, Plaka Kriko Testleri, Plaka Yükleme Testleri, Radyal Kriko Testleri ve benzeri yöntemler gibi deformasyon modülünün doğrudan yerinde ölçümlerinin maliyetli, verimsiz ve uygulanmasının zor olduğu ortaya koyulmuştur (Palmström ve Singh, 2001). Bu nedenle, birçok durumda, deformasyon modülünün değeri, düşük maliyetle kolayca elde edilebilen ilgili kaya kütlesi parametreleri gözlemlenerek dolaylı olarak tahmin edilmektedir. Çizelge 2.3, deformasyon modülünü tahmin etmek için yaygın olarak uygulanan denklemleri göstermektedir.

Hoek, Bieniawski, Serafim ve Pereira tarafından geliştirilen denklemler, uygulanabilirlikleri belirli kaya özellikleriyle sınırlanmaktadır. Ne Hoek vd. ne de Serafim ve Pereira'nın denklemleri masif kaya kütleleri için uygundur. Palmström ve Singh, (2001) Hindistan'ın çeşitli bölgelerinden toplanan verileri analiz ederken benzer bir gözlemlerde bulunmuştur. Ayrıca, RMR ve RMI sistemlerinden elde edilen

tahminlerin, Q sistemine kıyasla eklemli kaya kütleleri için daha doğru deformasyon modülü değerleri verme eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni, Q sisteminin sağlam kaya özelliklerine ilişkin veri içermemesidir. Bu gözleme rağmen, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi ve güvenilirliklerinin doğrulanabilmesi için birden fazla yaklaşımın kullanılmasını önermektedirler.

Çizelge 2.3. Deformasyon modülünü tahmin etmek için kullanılan denklemler

Denklem	Sınır aralığı	Yazar
$\frac{E_h}{E_r} = 10^{0.0186RQD-1.91}$	$0 \leq RQD \leq 100\%$	(Zhang ve Einstein, 2004)
$E_h(\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \times 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_c \leq 100\text{MPa}$	(Hoek vd., 2002)
$E_h(\text{GPa}) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_c > 100\text{MPa}$	(Palmström, 1996)
$E_h = 5.6RMI^{0.375}$	$RMI > 0.1$	(Palmström ve Singh, 2001)
$E_h = 25\log_{10}Q$	$Q > 0.1$	(Barton vd., 1981)
$E_h = 10Q_c^{1/3}$	$Q > 1.0, RMR > 50,$ $\sigma_c < 100\text{MPa}$	(Grimstad ve Barton, 1993) (Barton, 2002)
$E_h = 2RMR - 100$	$RMR > 50$	(Bieniawski, 1978)
$E_h = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$	$RMR < 50$	(Serafim ve Pereira, 1983)

**Burada,**

$E_r$  = kaya malzemesinin elastik modülü, **RQD** = Kaya Kalitesi Sınıflandırması,

$\sigma_c$  = Kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, **GSI** = Jeolojik Dayanım

İndeksi, **RMI** = Kaya kütle indeksi, **Q** = Q-sistemi ve **RMR** = Kaya Kütleli Derecelendirme Sistemi

**D** = kaya kütlelerinin patlama nedeniyle maruz kaldığı yenilme etkisi ve gerilme gevşemesine bağlı olan faktör

Bölüm 2.7 ve 2.8'de özetlenen kaya kütleli özellikleri ve sınıflandırma sistemlerine ilişkin tartışmalar, kaya kütleli içinde veya üzerinde yer alan mühendislik yapılarının duraylılığını etkileyebilecek faktörlerin anlaşılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu

tartışmalar esasen temel bir soru etrafında toplanmaktadır: Kaya kütlesinin yenilmesine neden olan kuvvetleri nasıl ölçebiliriz? Bu faktörlerin matematiksel bir çerçevede yorumlanması, mühendisleri duraylılık analizi için güçlü ve entegre bir araçla donatmaktadır. Yapısal modeller (yenilme ölçütleri) açıkça bu soruyu ele almak için geliştirilmiştir. Bölüm 2.9, örnekler vererek yapısal modeller kavramını incelemektedir. Bu bölümde ayrıca kaya mekaniği ve mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan iki yenilme ölçütü açıklanmakta ve bunların beşinci bölümde sunulan örnek çalışmada nasıl uygulandığı ele alınmaktadır.

## **2.9. Kaya Kütle Davranışı Modelleri**

Yapısal modeller, malzemenin mekanik davranışını keyfi bir bağlamda tanımlamak için matematiksel bir çerçeveyi temsil etmektedir (Zhang vd., 2016). Bu modeller, çeşitli teorik ilkeler ve matematiksel yaklaşımlar tarafından belirlenen belirli varsayımlara dayanarak gerçek dünya gözlemlerine teorik yaklaşımlar olarak hizmet etmektedir (Jing ve Stephansson, 2007). Laboratuvar veya sahada gözlemlenen malzeme davranışlarını yansıtmayı amaçlamaktadırlar. Kaya kütleleri, her biri farklı fiziksel davranışlar sergileyen bir dizi süreksizlik, yapı ve sağlam kayalardan oluşmaktadır. Bu karmaşık fiziksel davranışın her yönünü matematiksel modeller kullanarak simüle etmek pratik değildir. Genellikle, bünye modelleri geliştirilirken, genel davranışın en kritik yönlerine öncelik verilmektedir. Bu, kaya kütlelerini karakterize etmek için farklı yol gösterici ilkelere ve matematiksel yaklaşımlara dayalı olarak çeşitli bünye modellerinin formüle edildiği ve bunun sonucunda farklı malzeme özellikleri ve parametreleriyle ilişkili modellerin ortaya çıktığı anlamına gelmektedir.

Jing ve Stephansson (2007) yapısal bir modelin formüle edilmesi için görgül ve teorik olmak üzere iki temel yaklaşım tanımlamıştır. Model geliştirmeye yönelik görgül yaklaşımda, laboratuvar veya sahada yapılan deneylerden elde edilen ölçülmüş sonuçlara en iyi uyumu sağlamak için görgül fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşım genelde en küçük kareler regresyonu gibi matematiksel regresyon teknikleri kullanılarak eğri uydurmayı içermektedir. Ek olarak, yapay olarak tanımlanmış parametreler genellikle regresyon süreci ile belirlenir. Görgül yaklaşımlarla oluşturulan modeller, yükleme koşulları ve parametre aralıkları uygun

şekilde dikkate alınırsa tatmin edici sonuçlar verebilmektedir. Buna karşılık teorik yaklaşımlar, formülasyon için temel matematiksel çerçeveler olarak tipik olarak plastisite teorisi, temas mekaniği, yenilme mekaniği vb. gibi katı mekaniğin dallarından birine dayanmaktadır. Teorilerin doğasında bulunan gerekli varsayımlar korunmalı ve kaya kütlelerinin en kritik yönlerinin modelde yakalanmasını sağlamak için malzeme parametrelerinin veya özelliklerinin seçimine dikkat edilmelidir. Bu özellikler veya parametreler laboratuvar veya sahada yapılacak deneylerle belirlenmelidir.

Yıllardır, kaya kütleleri için çok sayıda deformasyonel davranış modeli önerilmiştir (bkz. Çizelge 2.4). Modelin seçimi, belirli jeolojik malzemeye ve analizin amacına bağlıdır. Örneğin, elastisite modeli doğrusal gerilme-gerinim davranışı sergileyen homojen, izotropik, sürekli malzemeler için geçerlidir. Ortotropik veya enine izotropik elastik modeller gibi çeşitlemeleri ise genellikle iyi tanımlanmış elastik anizotropi sergileyen elastik malzemeler için tercih edilmektedir. Öte yandan, Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown yenilme ölçütleri gibi plastiklik modelleri genellikle kesme yüklemesine maruz kaldığında yenen malzemeler içindir, ancak yenilme gerilmesi büyük ve küçük asal gerilmelere bağlıdır. Drucker-Prager ve Modifiye Cam-kil gibi modeller, düşük sürtünme ile karakterize edilen kil gibi yumuşak malzemeler için uyarlanmıştır. Öte yandan, CYSoil, CHSoil, Plastik-Sertleşme ve Şişme modelleri topraktaki kazıları incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Analiz hedefleri açısından, Gerinimle sertleşen/yumuşayan Mohr-Coulomb, Mohr-Coulomb Gerilme, Bilineer gerinim sertleşen/yumuşayan malzeme modelleri, kaya kütlelerinin yenilme sonrası davranışlarını tasvir etmek için geliştirdiği orijinal modellerinin uyarlamalarıdır.

Sayısal modellemede, bir kaya kütlelerini analiz etmek için birden fazla bünye modeli kullanmak yaygın bir uygulamadır. Bu yaklaşım genellikle belirsizlikler veya belirli verilerin eksikliğinin yanı sıra hesaplama verimliliği açısından sağladığı avantajlarla da motive edilmektedir. Örneğin, bir kaya kütlelerindeki yanal destek koşullarını tanımlarken, boş bir bünye modeli atamak, elastik bir bünye modeli tarafından yönetilen malzemelerdeki kazıları benzetimini yapabilmektedir. Elastik modeller, hesaplama verimliliği ile bilinir ve model üzerindeki sınır koşulu etkilerinin hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Modelin kapsamı ve yanal destek koşulları

belirlendikten sonra, istenen diğer bünye modelleri analize dahil edilebilmektedir. Benzer şekilde, Mohr-Coulomb bünye modeli, plastik yenilme analizi yapılırken Hoek-Brown bünye modeli veya türevlerine tercih edilebilmektedir. Bu doktora tezinde, sunulan örnek çalışmanın hedefleriyle ilgili oldukları için tartışma Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown bünye modelleri ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 2.4. FLAC3D'den türetilmiş çeşitli bünye modelleri (Itasca, 2019)

Bünye Modeli	Temsili Malzemeler	Uygulama örnekleri
Boş	boşluk	Delikler, kazılar, malzemenin daha sonraki aşamada ekleneceği bölgeler
Elastik	Homojen, izotropik sürekli; doğrusal gerilme-gerinim davranışı	Mukavemet sınırının altında yüklenen imal edilmiş malzemeler (örn. çelik); güvenlik faktörü hesaplaması
Ortotropik elastik	Birbirine dik üç elastik simetri düzlemine sahip malzemeler	Dayanım sınırının altında yüklenmiş sütunlu bazalt
Enine izotropik elastik	Elastik anizotropi sergileyen ince lamine malzeme (örn. kayrak taşı)	Mukavemet sınırının altında yüklenen lamine malzemeler
Drucker-Prager	Sınırlı uygulama; düşük sürtünmeli yumuşak killer	Örtük sonlu eleman programlarıyla karşılaştırma için ortak model
Mohr-Coulomb	Gevşek ve çimentolu granüler malzemeler; toprak, kaya, beton	Genel toprak veya kaya mekaniği (örn. şev duraylılığı ve yer altı kazıları)
Gerinim sertleşmesi / yumuşaması Mohr-Coulomb	Doğrusal olmayan malzeme sertleşmesi veya yumuşaması sergileyen granüler malzemeler	Yenilme sonrası çalışmalar (örn. ilerleyen çöküş, akma direği, göçük)
Ubiquitous-eklem	Mukavemet anizotropisi sergileyen ince lamine malzeme (örn. kayrak taşı)	Yakın tabakalarda kazı çalışmaları
Anizotropik-elastisite ubiquitous-eklem	Sertlik ve mukavemet anizotropisi sergileyen ince lamine malzeme (örn. kayrak taşı)	Sıkı yataklanmış tabakalarda kazı
Bilineer gerinim ile sertleşen/yumuşayan ubiquitous-eklem	Doğrusal olmayan malzeme sertleşmesi veya yumuşaması sergileyen lamine malzemeler	Lamine malzemelerin kırılma sonrası çalışmaları

Çift yenilme	Basıncın sürekli hacim azalmasına neden olduğu hafif çimentolu granüler malzeme	Hidrolik olarak yerleştirilmiş dolgu
Modifiye Cam-kil	Kil	Kil üzerinde geoteknik inşaat
Hoek-Brown	İzotropik kaya malzemesi	Kayada geoteknik inşaat; güvenlik faktörü hesabı
Hoek-Brown-PAC	İzotropik kaya malzemesi	Kaya içinde jeoteknik inşaat
CYSOIL and CHSOIL	Topraklar	Kazı, tünel, şev duraylılığı, dolgu, temel analizi
Plastik Sertleşme	Topraklar	Kazı, tünel, şev duraylılığı, dolgu, temel analizi
Şişlik	İslanma kaynaklı örselenmelere sahip topraklar	İslanma kaynaklı örselenmelerin önemli olduğu topraklara uygulama
Mohr-Coulomb-Gerilme	Kayalar ve topraklar	Alt kesimin üzerindeki üst örtünün dinamik tepkisi veya örselenmesi

### 2.9.1. Mohr-Coulomb Yenileme Ölçütü

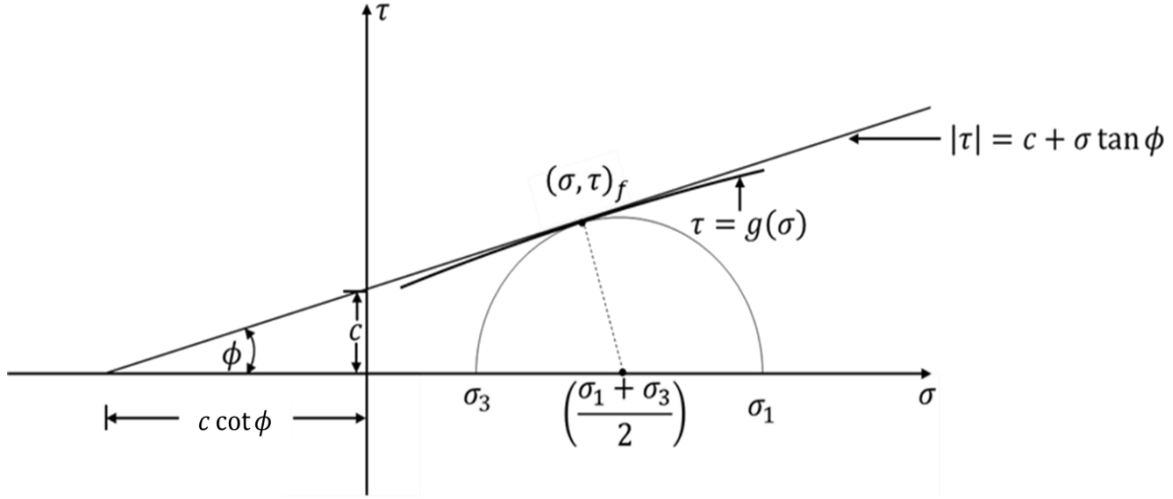
Mohr-Coulomb (MC) yenilme ölçütü,  $\sigma_2$  ara asal gerilmeden kaynaklanan herhangi bir etki ihmal edilerek, izotropik bir malzemenin yenilme koşullarını tanımlayan asal gerilme alanındaki bir dizi doğrusal denklemdir (Labuz ve Zang, 2012). MC ölçütü Mohr ve Coulomb'un bir katkısıdır. Mohr'un teorisi, yenilmenin yalnızca maksimum ( $\sigma_1$ ) ve minimum ( $\sigma_3$ ) asal gerilmelerden etkilendiğini ve bir yenilme düzlemine etki eden normal ve kayma gerilmeleri ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) arasındaki ilişkiyi temsil eden yenilme zarfının şeklinin doğrusal veya doğrusal olmayan davranış sergileyebileceğini öne sürmektedir. Coulomb'un teorisi, belirli bir düzlemde yenilmeye yol açacak normal ve kayma gerilmelerinin kritik kombinasyonunu tanımlamak için doğrusal bir yenilme zarfına dayanır. Denklem (7), Coulomb tarafından önerilen kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ile normal gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$|\tau| = c + \sigma \tan \phi \quad (7)$$

Burada  $c$  içsel kayma mukavemeti olarak da bilinen kohezyondur ve  $\phi$  içsel sürtünme açısıdır, içsel sürtünme katsayısı  $\mu = \tan \phi$ 'dir. Denklem (7) Şekil 2.9'da  $\phi$  açısı ile  $\sigma$ -eksenine eğimli düz bir çizgi olarak gösterilmiştir. Trigonometrik

bağıntılar kullanılarak, denklem (7)'nin asal gerilmeler açısından alternatif formu denklem (8)'de gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \sin \phi + c \cos \phi \quad (8)$$



Şekil 2.9. MC yenilme ölçütünün Mohr diyagramında gösterimi

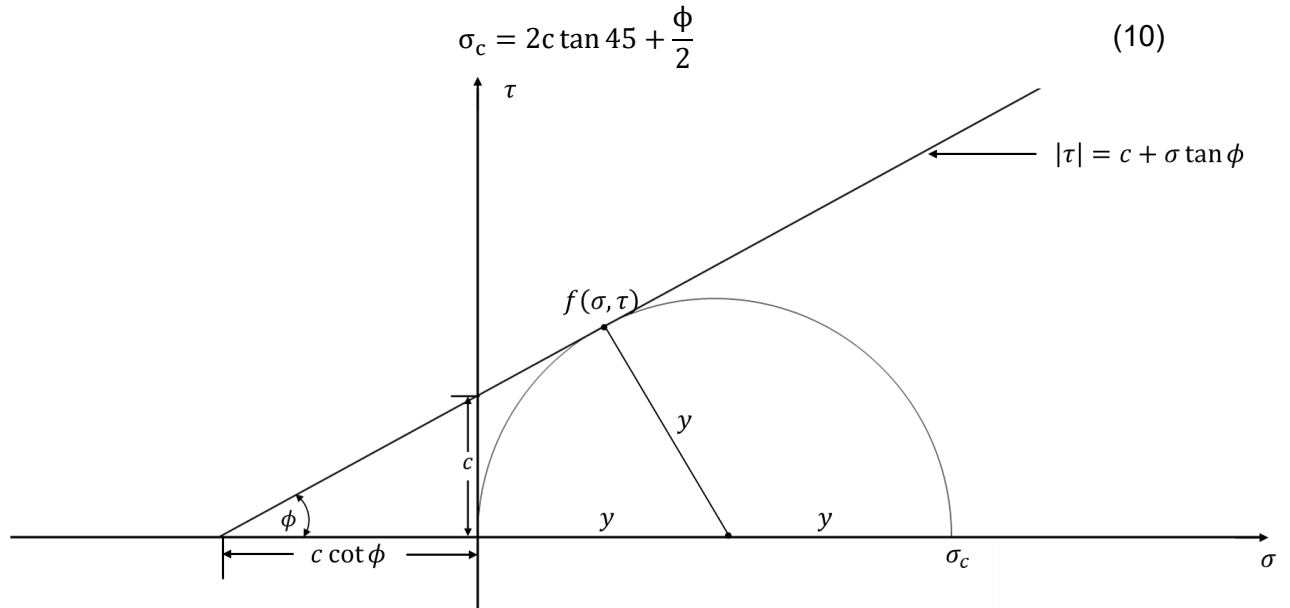
Denklem (8) alternatif olarak denklem (9)'da gösterilen şekilde ifade edilebilmektedir; burada  $\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  ve  $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 'dir. Denklem (9) ile verilen ilişkiyi bilerek, Mohr zarfı Şekil 2.9'daki  $\sigma - \tau$  düzlemi üzerinde kurulabilmektedir ve eğer yenilme anındaki gerilme durumu, çapı  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  olan çevre, yenilme zarfına teğet ise yenilme meydana gelmektedir,  $\tau = g(\sigma)$ . Bu nedenle, denklem (8)'den, Coulomb ölçütü doğrusal bir Mohr zarfı varsayımına karşılık gelmekte ve böylece "Mohr-Coulomb yenilme ölçütü" terimine yol açmaktadır.

$$\tau_m = f(\sigma_m) \quad (9)$$

Jeomalzemeler üzerinde yapılan denemeler, yenilme anındaki  $\tau_m$ 'nin  $\sigma_m$  ile arttığını göstermektedir. Mohr diyagramında oluşturulduğu üzere, kritik gerilme çemberinin yenilme zarfı ile teğetlik noktası,  $(\sigma, \tau)_x$ , yenilme düzlemindeki normal ve kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Tüm asal gerilmeler sıkışma olduğunda, deneyler bu ölçütün tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_c$ 'nin tek eksenli çekme dayanımından çok daha büyük olduğu kayalarda oldukça iyi uygulandığını göstermektedir (Labuz ve Zang, 2012). Şekil 2.10'da Mohr diyagramı ile gösterilen tek eksenli sıkışma testi dayanım testini göz önünde bulundurun.



Trigonometrik ilişkiye göre,  $y = \frac{c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$  veya  $y = c \tan 45 + \frac{\phi}{2}$ . Böylece,  $2y$ 'ye eşdeğer tek eksenli sıkışma dayanımı  $\sigma_c$  denklem (10)'daki gibi hesaplanabilir.



Şekil 2.10. Tek eksenli sıkışma dayanımı testinin Mohr diyagramında gösterimi

Bu nedenle, yenilme noktasında,  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  arasındaki ilişki denklem (8) ve (10)'un bütünleştirilmesi yoluyla denklem (11)'de ifade edildiği gibi kurulabilmektedir.

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

Mohr-Coulomb (MC) modeli kaya kütlelerinin incelenmesinde en uygulanabilir modeldir. Hoek-Brown yenilme ölçütleri sayesinde kohezyon ve sürtünme açısı parametreleri kolayca tahmin edilebilmektedir.

### 2.9.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütü

1980 yılında Hoek ve Brown, kaya kütlelerinin belirli indüklenmiş gerilmeler altında beklenen tepkisini değerlendirmeyi amaçlayan kaya kütleleri için görgül kırılma yenilme ölçütünü geliştirmiştir (Hoek ve Brown, 1982). Çalışmalarında, gerilme-gerinim modelleri, kaya kütlesi dayanım özellikleri ve zamansal etkiler gibi kaya kütlesi davranışını etkileyen çeşitli faktörleri dikkate almışlardır. Ancak, öncelikli odak noktaları öngörülen gerilmeler altında sergilenen en yüksek mukavemeti belirlemek olmuştur. Kaya malzemelerinin özelliklerinden başlayarak, daha sonra

bu özellikleri kaya kütlesi eklemlerinin özelliklerine göre ayarlamak için faktörler eklemiştir. Yinelemeli deneyler (deneme yanılma) yoluyla, denklem (12)'de belirtildiği gibi, yenilme sırasındaki asal gerilmeler arasında görgül bir ilişki kurmuşlardır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \quad (12)$$

burada:

$\sigma_1$  = Yenilme anındaki ana asal gerilme

$\sigma_3$  = Küçük asal gerilme

$\sigma_c$  = Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

m ve s = kayanın özelliklerine ve  $\sigma_1$  ve  $\sigma_3$  yenilme gerilmelerine maruz kalmadan önce ne ölçüde kırıldığına bağlı olan sabitler

1988 yılında Hoek ve Brown, ölçüt ve kısıtlamalarına ilişkin bazı yanlış anlamaları ele almıştır. Denklem (12)'yi efektif asal gerilmeler cinsinden ifade edecek şekilde revize ederek denklem (13) olarak sunmuşlardır. Kayanın tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS), laboratuvar boyutunda bir numune, tipik olarak 50 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda bir karot üzerinde yapılan testlerle belirlenmektedir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma'_3 + s\sigma_c^2} \quad (13)$$

burada:

$\sigma'_1$  = yenilme anındaki ana asal efektif gerilme

$\sigma'_3$  = yenilme veya sınırlama basıncındaki minör asal efektif gerilme

Bir kaya kütlesinin tek eksenli basınç dayanımı, denklem (13)'te  $\sigma'_3 = 0$  yerine konularak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\sigma_{c\text{mass}} = \sigma_c \sqrt{s} \quad (14)$$

Benzer şekilde, tek eksenli çekme dayanımı,  $\sigma_t$ , denklem (13)'te  $\sigma'_1 = 0$  yerine konularak ve karesel denklem aşağıdaki gibi basitleştirilerek elde edilmektedir:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (15)$$

### 2.9.3. Kaya Malzemesi Özelliklerinin Tahmin Edilmesi

Kaya kütleleri üzerinde yer altı veya yer üstü kazılarıyla karşılaştırılabilir ölçekte üç eksenli veya makaslama testleri yapmak mümkün olsaydı, "s" ve "m" parametrelerinin değerlerini doğrudan belirleyebilmek mümkün olurdu. Ancak bu çoğu zaman pratik değildir. Hoek ve Brown 1988 yılında yaptıkları çalışmada, 1980 modellerinin pratik uygulamalarından elde ettikleri bilgileri bir araya getirmişlerdir. Bieniawski'nin RMR'si (1974) ile sırasıyla Denklem (16) ve (17)'deki "s" ve "m" sabitleri arasında, kazılmış ve kazılmamış (veya birbirine kenetlenmiş) kaya kütlelerini birbirinden ayıran rafine bir dizi ilişki önermişlerdir.

$$\begin{aligned} \frac{m}{m_i} &= \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{14}\right) \\ \text{kazılmış kaya kütlesi için} \quad s &= \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{6}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{m}{m_i} &= \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{28}\right) \\ \text{kazılmamış veya birbirine} \quad s &= \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{9}\right) \\ \text{kenetlenmiş kaya kütlesi için} \end{aligned} \quad (17)$$

Burada:

s ve m kaya kütle sabitleridir

$m_i$  kaya malzemesi için m değeridir

Denklem (17)'den türetilen "s" ve "m" sabitleri, analiz edilen kaya hacmi yeterince küçük olduğunda, yapı süreksizliklerinden yoksun olduğunda (kaya malzemeler) denklem (13)'e uygulanabilmektedir. Benzer şekilde, denklem (16)'dan elde edilen "s" ve "m" değerleri, incelenen kaya hacmi, hiçbir diğerklerinden önemli ölçüde daha zayıf olmayan dört veya daha fazla yakın aralıklı süreksizlik kümesi içerdiğinde denklem (13) ile kullanım için uygundur. Bununla birlikte, denklem (13) yapısal süreksizlik anizotropisi durumlarında uygun değildir. Örneğin, değerlendirilen kaya hacmi yalnızca birkaç yapısal süreksizlik içerdiğinde uygulanmamalıdır. kaya malzeme dikkate alındığında, "s" sabiti 1.0 olarak ayarlanır ve denklem (13) aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sqrt{m_i \sigma_c \sigma'_3 + \sigma_c^2} \quad (18)$$

$m_i$  sabitinin değeri kaya malzemesinin mineralojisine, bileşimine ve tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Hoek vd., (1993), standart bir jeolojik sınıflandırmada kategorize edilen kayalar için  $m_i$  değerleri sağlamıştır. Çizelge 2.5, çok sayıda üç eksenli deneyden elde edilen çeşitli magmatik kaya türleri için bu  $m_i$  değerlerinden bazılarını göstermektedir.

Çizelge 2.5. Magmatik kaya malzemesi için sabit  $m_i$  değerleri (Hoek vd., 1993)

Tane Büyüklüğü	Kaya malzeme	$m_i$
Pürüzlü	Granit	32.7
	Gabro	25.8
	Norit	21.7
Orta	Dolerit	15.2
	Riyolit	20
Pürüzsüz	Andezit	18.9
	Bazalt	17

Orijinal Hoek-Brown yenilme ölçütü (denklem (13)) eklemli kaya kütlelerine uygulandığında, tahmin edilen dayanımlar, küçük asal efektif gerilme  $\sigma'_3$ 'ün önemli sıkışma değerleri sergilediği koşullar altında tatmin edici kabul edilmektedir. Bununla birlikte,  $\sigma'_3$ 'ün düşük değerleri için, ölçüt aksenal dayanımı fazla tahmin etmekte ve sonlu bir çekme dayanımı öngörmektedir (Hoek vd., 1993). Bu sınırlamayı ele almak için denklem (19), düşük  $\sigma'_3$  değerlerine sahip eklemli kaya kütleleri için uyarlanmış bir ölçüt olarak tanıtılmıştır. Denklem (19), sıkı kenetlenmenin makaslama veya aşınma nedeniyle kısmen bozulduğu, kaya kütlelerini çekme dayanımı veya kohezyondan yoksun hale getiren ve numunelerin sınırlama olmaksızın parçalanmasına neden olan düşük kaliteli kaya kütleleri için tasarlanmıştır. Bu senaryoda "s" sabitinin değeri sıfırdır.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} \right)^a \quad (19)$$

burada:

$m_b$  ve "a" çatlak kaya için sabitlerdir

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü denklem (20)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (20)$$

GSI sistemi 1994 yılında hayata geçirilmeden önce Hoek-Brown ölçütü sahada denklem (16) ve (17)'ye göre uygulanmaktaydı. RMR değerleri, Bieniawski'nin Kaya Kütleli Sınıflandırmasının 1976 versiyonu ile 10 (kuru) yer altı suyu sınıflandırması ve 0 (çok elverişli) ortak yönlendirme ayarlaması ile yapılan korelasyondan elde edilmiştir. Bieniawski'nin RMR sınıflandırmasının 1989 versiyonu kullanılırsa, yer altı suyu derecesi 15 olarak belirlenir ve ortak yönelim ayarlaması sıfır olarak kalır. Hoek ve Brown, (1997) GSI değerlerini kullanarak  $m_b$ , "s" ve "a" sabitlerini tahmin etmek için aşağıdaki gibi yöntemler sağlamıştır:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (21)$$

GSI > 25 için, yani iyi ila makul kalitedeki kaya kütleleri için, denklem (20) aşağıdaki gibi verilen "s" ve "a" sabitleri ile uygulanmaktadır:

$$s = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (22)$$

$$a = 0.5 \quad (23)$$





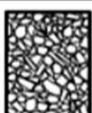

GSI < 25, yani çok zayıf kaya kütleleri için denklem (20), "s" ve "a" sabitleri aşağıdaki gibi verilerek uygulanmaktadır:

$$s = 0 \quad (24)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (25)$$

"s" ve "a" sabitlerinin değiştirilmesi için GSI=25 seçimi tamamen rasgeledir. Kapsamlı denemeler, bu değişimin tam merkezinin pratikte önem taşımadığını göstermiştir (Hoek ve Brown, 1997). Hoek ve diğerleri (2002), genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütünü geliştirme çabaları kapsamında bir "D" faktörü getirmişlerdir. Bu faktör, 25'ten büyük veya 25'ten küçük GSI değerleri için "s" ve "a" arasında geçiş yapma zorunluluğunu etkili bir şekilde ortadan kaldırmaktadır. "D", patlama nedeniyle oluşan yıkım ve gerilme gevşemesi nedeniyle kaya kütlelerinin maruz

kaldığı bozulmanın boyutuna bağlı bir faktörü temsil etmektedir. Bozulmamış, kendi halinde kaya kütleleri için 0'dan yüksek seviyede bozulmuş kaya kütleleri için 1'e kadar uzanır. Denklem (20)'deki  $m_b$ , "s" ve "a" sabitleri, Şekil 2.11'de gösterilen GSI değerleri ve "D" faktörü kullanılarak aşağıdaki şekilde belirlenmektedir:

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		60	50		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			40		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Şekil 2.11. Jeolojik gözlemlerden elde edilen GSI tahminlerine ilişkin genel çizelge (Marinos vd., (2007)'den alınmıştır)

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (26)$$

$$s = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (27)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (28)$$

burada:

$m_b$ ,  $m_i$  malzeme sabitinin indirgenmiş bir değeridir,  
"s" ve "a" kaya kütleline ilişkin sabitlerdir

Kaya kütleline tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma_{c_{mass}}$ , denklem (20)'de  $\sigma'_3 = 0$  alınarak elde edilmektedir:

$$\sigma_{c_{mass}} = \sigma_c s^a \quad (29)$$

Hoek vd., (2002) ayrıca gevrek malzemeler için tek eksenli çekme dayanımının çift eksenli çekme dayanımına eşit olduğunu, yani  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$  olduğunu öne sürmüştür. Bu durumda kaya kütleline çekme dayanımı,  $\sigma_t$  aşağıda gösterildiği şekildedir:

$$\sigma_t = \frac{s\sigma_c}{m_b} \quad (30)$$

Genellikle, yenilme,  $\sigma_c$  sınırda indüklenen gerilme tarafından aşıldığında bir kazi sınırında başlamaktadır (Diederichs vd., 2004; Xue vd., 2014; Barton ve Shen, 2017). Yenilme, sınırdan iki eksenli bir gerilme bölgesine yayılmakta ve denklem (20) ile tanımlanan yerel mukavemet, indüklenen gerilmelerden  $\sigma'_1$  ve  $\sigma'_3$  daha yüksek olduğu zaman nihai olarak dengelenmektedir (Germanovich ve Dyskin, 2000). Hoek ve diğerleri (2002), yalnızca yenilme yayılımının karmaşık sürecine odaklanmak yerine bir kaya kütleline kolektif davranışını incelemenin bazı durumlarda faydalı olduğunu belirtmektedir. Örneğin, bir kaya kütleline dayanımını değerlendirirken, kaya kütleline genel dayanımına ilişkin bir tahminde bulunmak, kaya kütlelineindeki kırılma yayılımının kapsamına ilişkin ayrıntılı bilgilere sahip olmaktan daha yararlıdır. Bu kavram, küresel bir "kaya kütleline dayanımı" kavramına

yol açmaktadır ve Hoek ve Brown (1997), bunun denklem (31)'de belirtildiği gibi Mohr-Coulomb denkleminde yaklaşık olarak hesaplanabileceğini öne sürmüştür.

$$\sigma'_{c_{mass}} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (31)$$

Burada  $c'$  ve  $\phi'$ ,  $\sigma'_t < \sigma'_3 < \sigma_c/4$  gerilme aralığı için tahmin edilmektedir. Nihayetinde, küresel kaya kütleli dayanımı denklem (32)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma'_{c_{mass}} = \sigma_c \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(\frac{m_b}{4} + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (32)$$

#### 2.9.4. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown Yenileme Ölçütleri Arasındaki İlişki

Hoek-Brown plastiklik modeli asıl olarak görgül bir ilişkidir ve izotropik kaya malzeme ve kaya kütleleri için mukavemet sınırını tanımlayan doğrusal olmayan bir yenilme yüzeyinin tasviridir. Bu doğrusal olmayan yenilme yüzeyi, geçerli minimum esas gerilme seviyesinde Mohr-Coulomb teğeti tarafından sürekli olarak yaklaştırılmaktadır (Rafiei Renani ve Cai, 2022). Mohr-Coulomb Bünye modeli ile sayısal modellemede, her kaya kütleli ve gerilme aralığı için eşdeğer sürtünme açıları ve kohezif dayanımlar genellikle Hoek-Brown yenilme ölçütüne göre tahmin edilmektedir (Lee ve Bobet, 2014; Xia vd., 2024; Shen vd., 2012; Priest, 2005). Bu işlem, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi,  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$  ile tanımlanan bir dizi minimum asal gerilme değeri için denklem (20) çözülerek oluşturulan eğriye ortalama bir doğrusal ilişki uydurularak yapılmaktadır (Hoek vd., 2002).  $\sigma'_{3max}$ , Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb ölçütleri arasındaki ilişkinin dikkate alındığı sınırlama gerilmesinin üst sınırıdır. Uydurma işlemi, doğrusal Mohr-Coulomb grafiğinin üstündeki ve altındaki bölgeler arasında bir denge sağlanmasını içerir. Uyum, sırasıyla sürtünme açısı ( $\phi'$ ) ve kohezyon ( $c'$ ) için denklem (33) ve (34) ile sonuçlanmaktadır.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (33)$$



$$c' = \frac{\sigma_c [(1 + 2a)s + (1 + a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1 + a)(2 + a) \sqrt{1 + \frac{(6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1})}{((1 + a)(2 + a))}}} \quad (34)$$

Burada,  $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_c$

Denklem (33) ve (34)'te kullanılacak uygun  $\sigma'_{3max}$  değeri belirli bir uygulamaya bağlıdır. Tüneller söz konusu olduğunda,  $\sigma'_{3max}$  değeri, derin tüneller için iki yenilme ölçütü için eşdeğer karakteristik eğrileri veya sığ tüneller için eşdeğer çökme profillerini veren değerdir. Hoek vd., (2002) tarafından yapılan çalışmalar, yüzey altındaki derinliğin 3 tünel çapından daha az olduğu sığ tüneller için, yüzeyin çökmesinden kaçınılması koşuluyla, yenilme boyutu ve yüzey çökmesinin büyüklüğünün derin tüneller için ortaya çıkanlarla aynı ilişkiyi verdiği sonucuna varmaktadır. Denklem (35), çeşitli örnek çalışmalar için uydurulan denkleme dayalı olarak geliştirilmiştir.

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cmass}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cmass}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (35)$$

Burada  $\sigma'_{cmass}$  denklem (32) ile tanımlanan kaya kütlesi dayanımı,  $\gamma$  kaya kütlelerinin birim ağırlığı ve H tünelin yüzey altındaki derinliğidir.

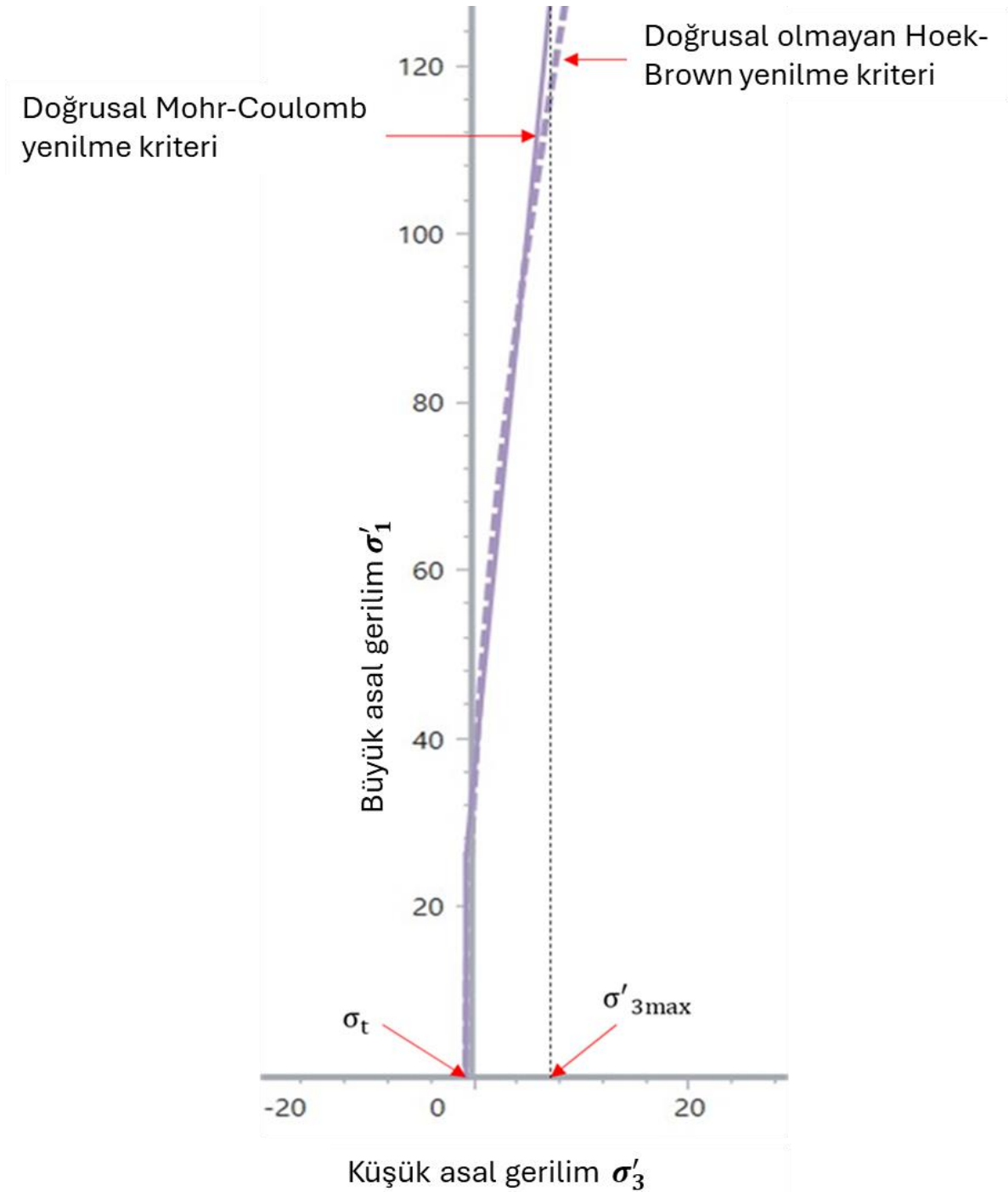
Yatay gerilme düşey gerilmeden daha yüksek olduğu durumlarda,  $\gamma H$  yerine yatay gerilme değeri kullanılmalıdır. Bu denklem, yüzeye kadar uzanmayan bir yenilme bölgesi ile çevrili tüm yer altı kazıları için geçerlidir. Şevler için Bishop'un dögüsel yenilme analizi (Bishop, 1955; Su vd., 2008) kullanılarak yapılan benzer çalışmalar, geniş bir şev geometrisi ve kaya kütlesi özellikleri aralığında denklem (36)'nın formüle edilmesiyle sonuçlanmıştır.

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cmass}} = 0.72 \left( \frac{\sigma'_{cmass}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad (36)$$

Burada H şevin yüksekliğidir.

Bu açıklama, beşinci bölümde özetlenen örnek çalışmada kaya kütlelerinin özelliklerinin ölçülmesine temel oluşturmaktadır. Daha açık bir ifadeyle, göreceli

olarak daha hızlı bir şekilde hesaplama yapılmasını sağlayan işlemsel verimliliği nedeniyle CP'nin ve çevresindeki kaya kütlelerinin duraylılığını analiz etmek için Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılacaktır. Bununla birlikte, Mohr-Coulomb ölçütü için gerekli özellikler Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak yaklaştırılacaktır.



Şekil 2.12. Hoek-Brown ve eşdeğer Mohr-Coulomb ölçütleri için büyük ve küçük asal gerilmeler arasındaki ilişkiler (Hoek vd., 2002)

### 3. EŞİK TOPUK TASARIMI VE ÜRETİLMESİ

Bu bölüm, teorik yaklaşımlara ve görgül ölçeklendirilmiş açıklık yöntemine odaklanarak madencilik faaliyetlerinde taç sütunların oluşturulması ve çıkarılmasıyla ilgili yöntem ve ilkelere kısa bir genel bakış sunmaktadır. Genel olarak, bir CP'nin en küçük dikey kalınlığını tahmin etmek için görgül, teorik ve sayısal modelleme teknikleri de dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin herhangi birinin bir arada kullanılması, ideal olarak CP değerlendirmesi için daha iyi sonuçlar sağlayabilmektedir (Xu vd., 2019). Bu bölüm, teorik yaklaşımların kullanımındaki düşüşü ve görgül yöntemlerin, özellikle de ölçeklendirilmiş Açıklık yönteminin öne çıktığını vurgulayarak sona ermektedir.

#### 3.1. Teorik Yaklaşımlar

Teorik yaklaşımlar, tabakalaşmış ve bloklı kayalarda ani bir çatının örselenme davranışını tahmin etmeyi ve kontrol etmeyi içermektedir (Brady ve Brown, 2006). CP duraylılığı, yapısal analizler ve göçebilirlik değerlendirmeleri birleştirilerek, CP'nin basit destekleri kapsayan kiriş yığınlarının bir sapsması gibi davrandığı varsayılarak incelenmektedir (Carter, 2014). CP-ayak temasında makaslama yenilmesi potansiyelini değerlendirmek için, üstteki tabakaların birim ağırlığı kullanılmaktadır (Xu vd., 2019). Döşeme kirişi teorisi, yaylanma teorisi ve voussoir kiriş teorisi gibi çok sayıda yöntem bu varsayıma dayanmaktadır.

##### 3.1.1. Kiriş Döşeme Teorisi

Kiriş döşeme teorisi, kazılan kısımdaki üst kaya kütesinin her iki ucu sabitlenmiş düz bir kiriş olduğunu varsaymaktadır. Yerçekimi altındaki kaya ağırlığı ve ek yük de dahil olmak üzere tüm yük doğrudan düz tavan kirişine aktarılmaktadır. Kirişten gelen yük, kiriş üzerinde merkezi olarak hareket eden bir punto yükü olarak temsil edilmektedir (Swift ve Reddish, 2002). Kaya tabakasının bükülme çekme mukavemetini bir kontrol hedefi olarak alan Xu vd., 2019, güvenli tavan kalınlığını denklem (37)'de gösterildiği gibi hesaplamaktadır.

$$H = 0.25 \ln \frac{\rho L_n + \sqrt{(\rho L_n)^2 + 8bg \times 10^{-3} \sigma_t}}{\sigma_t b} \quad (37)$$

Buradaki "b" tavanın açıkta kalan genişliği (tavan açıklığı), " $\sigma_t$ " tavan kayasının çekme dayanımı, " $\rho$ " üstteki kaya birim ağırlığı, " $L_n$ " eşik topuk açıklığı ve "g" ekipmandan gelen dış yük anlamına gelmektedir.

1960'ların başında Ruppeneit benzer varsayımlarda bulunmuş ve kaya kütlesinin özelliklerini, kazı açıklığını ve ekipman ağırlığının etkisini içeren denklem (38)'i formüle etmiştir (Xu vd., 2019).

$$H = K \frac{0.25\rho L_n^2 + (\rho^2 L_n^2 + 800\rho_B g)^{1/2}}{98\rho_B} \quad (38)$$

Burada " $\rho_B$ " tavanın taşıyabileceği kaya dayanımı ve "K" güvenlik faktörüdür.

Kabul edilen döşeme kirişi teorisi, maksimum çekme gerilmesi kayanın eğilme dayanımından daha büyük olduğunda yenilmenin meydana gelmesinin beklendiğini belirtmektedir. Bu, eğilmadaki çekme dayanımının normalde saf gerilmadaki dayanımdan daha büyük olduğu herhangi bir gevrek kaya malzemesi için, bu döşeme kirişi teorisi altında yenilme olasılığının yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Tavakoli, 1994). Dahası, bu yaklaşım kaya kütlesindeki süreksizlikleri göz ardı ederken, gerçekte çoğu maden tavanı eklemlidir.

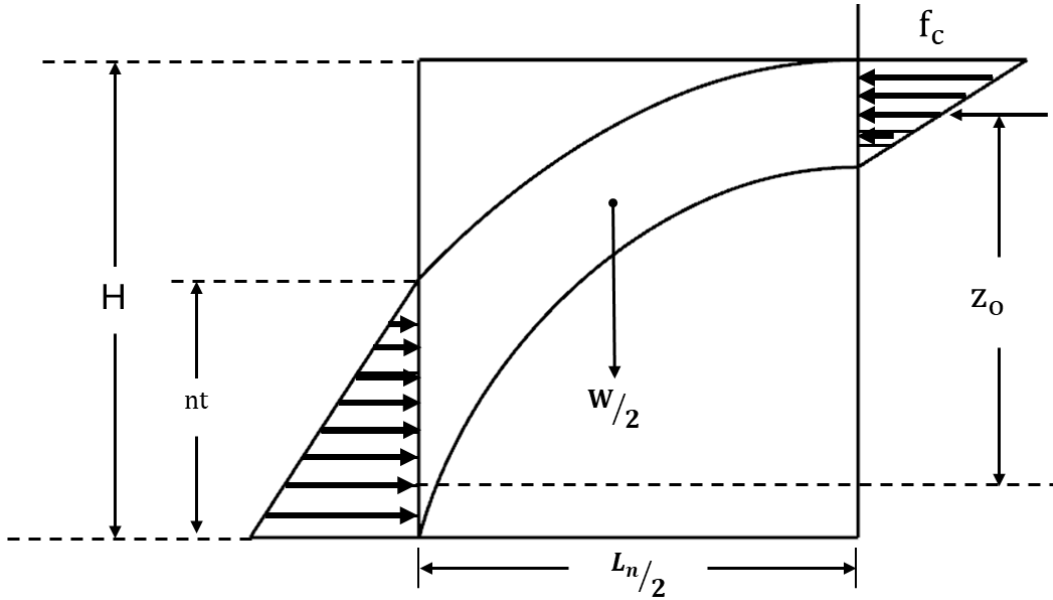
### 3.1.2. Voussoir Kemer Teorisi

Voussoir kemer teorisine göre, sabit uçlu bir kiriş için (CP için varsayıldığı gibi), nihai mukavemet elastik mukavemetini aşmaktadır. Görgül gözlemler, iyi yataklanmış kayada bir açıklığın kazılmasını takiben, yataklanma düzlemlerinin temas noktalarında ayrılmanın meydana gelme eğiliminde olduğunu ve kazı yüzeyinde çekme çatlaklarının ortaya çıkmasına neden olduğunu göstermektedir (Hoek vd., 2000). Tipik bir kaya kirişi için voussoir kemer teorisinin geometrisi ve mekaniği Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Açıklığı " $L_n$ " ve kalınlığı "H" olan tavan kirişi kendi ağırlığı "W"yi destekler ve kirişin her bir yarım açıklığı dayanak kesiti etrafında dönme eğilimindedir. Sıkışma gerilmesi, dayanağın alt yüzeyinde en yüksek değerine ulaştıktan sonra yukarıda belirli bir noktada doğrusal olarak sıfıra düşer ve kiriş kesitinin "nt" derinliği boyunca işleyen üçgen bir yük dağılımı oluşturmaktadır (Tavakoli, 1994). Orta Açıklıkta, kiriş kesitine göre benzer ancak tersine çevrilmiş bir gerilme dağılımı meydana gelmektedir. Dağıtılan her yükün sonucunun etki çizgisi,

bu gerilme üçgeninin alanının merkezinden geçmektedir. Maksimum direnç momentini oluşturan çiftin başlangıç moment kolu denklem (39) ile belirlenmektedir.

$$H = \frac{z_o}{1 - 2n/3} \quad (39)$$

Burada "n" yatay sıkışma altındaki tavan kirişi kesitinin oranı ve "z<sub>o</sub>" kuvvet çiftinin iç kol momentidir. Tavakoli, (1994) tarafından yapılan araştırmada ilave matematiksel manipülasyona atıfta bulunulmuştur. Sıkıştırılmış kemer teorisine dayalı CP kalınlığını tahmin etmek için basit matematiksel denklem, Xu ve arkadaşlarının (2019) bir çalışmasında belirtilmiş ve denklem 51'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kaya kiriş kemerinin geometrisi ve mekaniği (Tavakoli, 1994)

$$H = \frac{L_n/2 + h \tan(45 - \phi/2)}{f} \quad (40)$$

Burada "h" kemer yüksekliği, "f" kayanın sertlik katsayısı ve "φ" kayanın iç sürtünme açısıdır." L<sub>n</sub>", denklem (37) ve (38)'deki ile aynı anlama sahiptir.

Genel olarak, teorik yaklaşımlar CP kalınlık tahmininden ziyade çökme, blok göçük ve kömür madenciliği uygulamaları ile ilişkilendirilmektedir. CP kalınlık tahminindeki uygulamaları, 1900'lerde sahip oldukları öneme kıyasla azalmıştır. Bu düşüş,

1980'lerin sonlarında ölçeklendirilmiş Açıklık yönteminin kullanılmaya başlanmasını takiben gerçekleşmiştir.

### 3.2. Ölçeklendirilmiş Açıklık Yöntemi

CP kalınlık tahmin yöntemleri kapsamında, görgül yaklaşımlar en geleneksel yöntemler olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemler temel pratik kurallardan ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi gibi daha gelişmiş görgül yaklaşımlara doğru evrimleşmiştir. Pratik kuralların yaygın olduğu eski zamanlarda, deneyimli madenciler kararlarını, iyi kaya koşulları için 1:1 kalınlık-Açıklık oranı ve kötü kaya koşulları için 3:1 oran önermek gibi varsayımsal kılavuzlara veya "1 ila 2 patlama mertebesinde CP kalınlıkları" gibi ifadelere dayandırmaktaydı (Carter, 1992; 2014)

Szwedzicki'de (2001) kapsamlı bir şekilde anlatılan 1900'lerdeki CP yenilmeleri ve kaya kütlesi özelliklerini belirleme tekniklerindeki ilerlemeler, Golder Associates'e 1980'lerin sonlarında ölçeklendirilmiş açıklık yöntemini geliştirmesi için ilham vermiştir. Ölçeklendirilmiş açıklık yönteminin geliştirilmesinin ilk aşamalarında, hem desteksiz hem de destekli Açıklıkları içeren çeşitli örnekler üzerinde çalışılmıştır. Aslında, önceki deneyimler ve orijinal örnek dokümanlarda detaylandırılan bir dizi güvenlik faktörü, duraylılık sağlamak için kritik Açıklık çizgisinden kabul edilebilir bir sapma seviyesinin belirlenmesine yönelik kriterleri belirlemek üzere analiz edilmiştir. Destekli açıklıklar için, Mathews yöntemi (Mawdesley vd., 2001) gibi temel inşaat yapısal analiz yöntemlerinden ve kaya kütlesiyle ilgili inşaat ve maden mühendisliği sınıflandırmalarından elde edilen kılavuzlar dikkate alınmıştır. Bu arada, desteksiz açıklıkların duraylılığı, kaya kütlesinin kalitesi ve civata, kablo, püskürtme beton vb. desteklerin eklenmesinin etkisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Carter, 1992).

Geleneksel görgül kuralların ölçekten etkilendiği ve bunların başlangıçta geliştirildiklerinden farklı boyutlardaki eşik topuklarına uygulanmasını zorlaştırdığı ortaya çıkmıştır. Bu ölçek sorununa bir çözüm olarak ve tipik bir eşik topuğun 3B geometrisini daha iyi karakterize etmek için ölçeklendirilmiş Açıklık yöntemi araştırılmıştır. Ayrıca, bu yöntemi tipik bir eşik topuğun duraylılığıyla ilgili önemli kaya kütlesi özelliklerini tanımlamak için kullanılan mevcut kaya kütlesi sınıflandırma sistemleriyle uyumlu hale getirmek ve bu yöntemlerde yer alan bilgilerden yararlanmak amaçlanmıştır. Kaya kalitesi değerlendirmesi ile ilgili makul

bir standart olarak hali hazırda bulunan NGI Q-sistem kalite ölçeği (Barton vd., 1974) seçilmiştir. Nihai 3B ölçeklendirme yaklaşımında, bir eşik topuğun tüm temel özellikleri "Ölçeklendirilmiş Açıklık" temelinde boyutsal olarak ölçeklendirilmiştir. Bu ölçeklendirmeye rehberlik eden temel ilke sezgiseldir: bir yer altı kazısının boyutu büyüdükçe, yenilme riski ve eşik topuğun göçme olasılığı da artmaktadır. Tersine, içinde kazı yapılan kaya kütlelerinin kalitesi arttıkça eşik yapısının yenilme riski de azalmaktadır (Carter, 2014).

Ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi, uygun CP kalınlığını tahmin ederken göz önünde bulundurulması gereken kritik faktörleri dahil ederek topuğun yenilme riskini azaltmak için tasarlanmıştır. Bir CP'nin duraylılığı, CP kalınlığı, yatay yerinde gerilmeler ve cevher kütlelerinin eğimi gibi faktörlerdeki artışla birlikte artmaktadır. Öte yandan, bir CP'nin genel hat uzunluğu, özgül ağırlık ve yer altı suyu basıncı gibi faktörlerdeki artış CP duraylılığını azaltmaktadır. Ölçeklendirilmiş Açıklık yöntemi, ölçeklendirilmiş eşik topuk açıklığı ( $C_s$ , denklem (41)'de olduğu gibi) ile kritik Açıklık ( $S_c$ , denklem (42)'de olduğu gibi) arasında bir ilişki kurmaktadır. Belirlenmiş bir NGI Q-değeri kullanılarak,  $C_s$ 'nin  $S_c$ 'yi aşması halinde CP'nin potansiyel olarak duraysız olduğu kabul edilir. Bu nedenle güvenlik faktörü, kritik açıklığın ölçeklendirilmiş eşik topuk açıklığına oranı olarak tahmin edilmektedir.

Ölçeklendirilmiş açıklık yönteminin parametreleri başlangıçta dik eğimli yataklar için tanımlanmıştır, ancak daha sonra 2002 yılında Carter vd. topuk açıklığı tanımını sığ eğimli cevher yataklarını da kapsayacak şekilde genişletmiştir. Carter ayrıca 2014 yılında madencilik faaliyetlerinde hala meydana gelen istenmeyen eşik topuk yenilme örneklerinin özellikle eşik yeterliliğine ilişkin yer koşulları konusundaki anlayış eksikliğine atfedildiğine dikkat çekmiştir. Burada, önemli bir zayıf fayın belirli bir topukla kesişmesi durumunda, fay zonunun uygun Q değerlerinin atanması açısından kontrol eden zayıflık olarak kabul edilmesi gerektiğini önermiştir.

$$C_s = S \left( \frac{\gamma}{T(1 + S_R)(1 - 0.4 \cos \theta)} \right)^{0.5} \quad (41)$$

$$S_c = 3.3xQ^{0.43}x\sinh^{0.0016}(Q) \quad (42)$$

burada:

$S$  = Eşik topuk açıklığı (m)

$\gamma$  = Özgül ağırlık

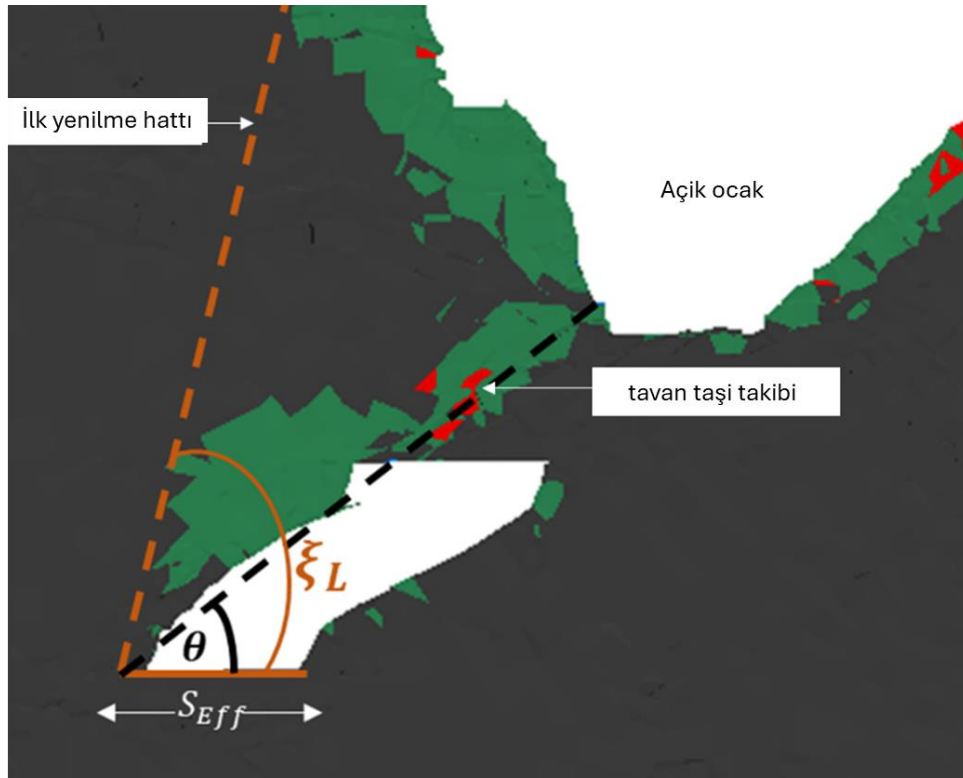
$T$  = Eşik topuğun dikey kalınlığı (m)

$L$  = Eşik topuk uzunluğu (m)

$S_R$  = Açıklık oranı =  $S/L$

$\theta$  = Cevher kütlesi eğimi

Buna ek olarak, sığ eğimli bir CP (eğim açısı  $< 45^\circ$ ) durumunda, Carter vd., (2002) CP'nin "etkin açıklık" açısından tanımlanmasını önermektedir. Etkin Açıklık ( $S_{Eff}$ ), yenilme hattı kapsamındaki tavan taşı açıklığının yatay izdüşümü olarak tanımlanmaktadır (bkz. Şekil 3.2). Etkin açıklık, tavan taşın uzunluğu ( $L_H$ ), CP'nin eğim açısı ( $\theta$ ) ve olası yenilme açısı ( $\xi_L$ ) kullanılarak, denklem (43)'te gösterildiği gibi matematiksel olarak hesaplanabilmektedir. Mağaranın olası açısı, denklem (44)'te gösterildiği gibi CP'nin eğim açısı ve sürtünme açısı kullanılarak da tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3.2. Etkin eşik topuk açıklığının boyutlandırılması için bir tanım çizelgesi

$$S_{Eff} = L_H \left( \cos \theta - \frac{\sin \theta}{\tan \xi_L} \right) \quad (43)$$



$$\xi_L = \theta + \tan^{-1} \left[ \sqrt{2\pi} \cdot \tan \left( 45 - \frac{\Phi}{2} \right) \right] \quad (44)$$

### 3.3. Eşik Topuğun Cevheri Çıkartma

Genelde, CP'de bulunan yüksek tenörlü cevher maden ömrünün sonuna doğru, madencilik ekipmanı ve personeli artık madencilik faaliyetlerine aktif olarak katılmadığında çıkarılır. Çıkarma işleminin zamanlaması temel olarak ekonomik faktörler ve güvenlik risklerinin en düşük seviyeye indirilmesiyle belirlenmektedir. Bunun ardından, başlangıçta CP tarafından muhafaza edilen ocak şevi artık yerçekimi, gerilme bağlı örselenme ve patlama titreşimi nedeniyle yenilme veya kırılmaya maruz kalmaktadır (Kalenchuk vd., 2019). Patlatma titreşimleri, kırılmalara neden olma veya ocak tabanına yakın şevlerde yeni süreksizlikler yaratma potansiyeline sahiptir, bu da özellikle su gözenek basıncı arttığında yerçekimi altında yenilmeye duyarlı duraysız kaya bloklarının oluşmasına neden olmaktadır (Lu vd., 2024). Ayrıca, delme ve patlatma yöntemiyle CP kazısının neden olduğu yerinde gerilme aniden serbest kalması, çevredeki duvarlarda yenilme neden olabilmektedir (Lu vd., 2012). Ciddi ölçüde yenilme, şevlerin desteklenmesi ya da madenin etkili bir şekilde kapanması gibi geleneksel yöntemlerle çözülemeyecek kadar büyük bir sorun haline gelebilmektedir (Hutchinson vd., 2002). CP cevheri çıkarıldıktan hemen sonra boşluk doldurulmazsa, gerilme gevşemesi nedeniyle daha fazla yenilme meydana gelebilmektedir (Guggari vd., 2023; Stewart ve Trueman, 2004).

Genel olarak, CP cevheri çıkartma işlemi ocak şevlerinde meydana gelen yenilme daha da kötüleştirme eğilimindedir. Yenilmiş ocak şevlerinde veya tabanında sülfür mineralleri içeren gevşek veya ayrıışmış kayalar suyla temas ederse, asidik maden drenajına (AMD) yol açarak potansiyel bir ocak gölünün sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilmektedir (Sullivan vd., 2005).

## 4. SAYISAL YÖNTEMLER

Bu bölüm, kaya mekaniği ve mühendisliğinde kullanılan sayısal yöntemler ve modelleme tekniklerine kısa bir genel bakış sunmaktadır. Karmaşık fiziksel gerçeklerin matematiksel ifadelerle basitleştirilmesi ve karışık fiziksel oluşumların kapsamlı bir şekilde tasvir edilmesi için sayısal yöntemlerin kullanılması kavramını tanıtmaktadır. Bölümde kaya kütlelerinin özellikleri, mühendislik değerlendirmelerinin kaya mekaniği ile dengelenmesi ihtiyacı ve sayısal modellere varsayımların ve basitleştirmelerin dahil edilmesi tartışılmaktadır. Ayrıca, çeşitli mühendislik örnek çalışmaları için sayısal modellemedeki varsayımları gösteren bir çizelge sunmaktadır. Ayrıca, sürekli yöntemler (FDM; Finite Difference Method, FEM; Finite Element Method, BEM; Boundary Element Method), ayrık yöntemler (DEM; Discrete/Distinct Element Method, DFN; Discrete Fracture Network) ve hibrit sürekli/ayrık yöntemler de dahil olmak üzere kaya mekaniğinde yaygın olarak uygulanan sayısal yöntemler incelenmektedir. Aslında bu bölüm, kaya kütlesi özelliklerinden kaynaklanan karmaşıklıkları ele alarak ve etkili hesaplama çözümlerine ulaşmada varsayımların ve basitleştirmelerin önemini vurgulayarak, geoteknik ve kaya mekaniği mühendisliğinde sayısal modellemeye kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır. Beşinci Bölüm'deki örnek çalışmaya müteakip tartışma için zemin hazırlamaktadır.

### 4.1. Sayısal Modelleme

Modelleme, karmaşık fiziksel gerçeklerin basitleştirilmiş matematiksel ifadelerle dönüştürülmesini gerektirmektedir. Ayrıca, karmaşık fiziksel olguları kapsamlı bir şekilde tasvir etmek için sayısal yöntemler kullanılır, bu nedenle sayısal model ve sayısal analiz gibi terminolojiler yaygın olarak kullanılmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde "karmaşık fiziksel gerçeklik", hem özellikler hem de mekânsal dağılım açısından doğal değişkenlikleriyle bilinen jeolojik malzemeleri ifade etmektedir (Barbour ve Krahn, 2004). Kaya mühendisliğinde "kaya kütlesi" terimi tipik olarak yatak düzlemleri, faylar, eklemler, kıvrımlar ve diğer yapısal özellikleri kapsayan tüm saha içi ortamı ifade etmektedir. Kaya kütleleri üzerinde veya içinde yapılar inşa etmek gibi kaya mühendisliğinin gereklilikleri, kaya mekaniği araştırmalarından önce gelmektedir.

Bir mühendislik yapısının sayısal analizi, mühendislik değerlendirmelerinin kaya mekaniği ile dengelenmesini beraberinde getirmektedir. Hudson ve Harrison'a (1997) göre, doğal olarak bir kaya kütlelerinin süreksiz, homojen olmayan, anizotropik ve elastik olmayan, genellikle DIANE olarak kısaltılan bir yapıda olduğunu belirtmek önemlidir. Bununla birlikte, kaya ve kaya kütlelerinin denge ve hareketinin incelenmesini içeren kaya mekaniğinde, bir kaya kütlesi sürekli, homojen, izotropik ve doğrusal elastik olarak da varsayılabilir veya basitleştirilebilir, bu da CHILE olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, hem kaya mekaniği hem de mühendislik tasarımında, yeterli veriye sahip olmamak karşılaşılan bir durum olmaktan ziyade kaçınılmaz bir durumdur (Jing ve Hudson, 2002). Genellikle, hesaplama kaynakları açısından verimli bir şekilde istenen hedefe ulaşmak için sayısal modele varsayımlar veya basitleştirmeler dahil edilmektedir. Çizelge 4.1, sadece 2023 yılında çeşitli mühendislik yapılarının sayısal modellemesindeki bazı varsayımları göstermektedir. Yıllar içinde, bu tür varsayımları karşılamak için farklı sayısal yöntemler geliştirilmiştir.

Kaya mekaniği problemleri için en yaygın uygulanan sayısal yöntemler şunlardır:

- Sürekli yöntemler - sonlu fark yöntemi (FDM), sonlu eleman yöntemi (FEM) ve sınır eleman yöntemi (BEM).
- Ayrık yöntemler - ayrık eleman yöntemi (DEM), ayrık kırılma ağı (DFN) yöntemleri.
- Hibrit sürekli/ayrık yöntemler.

Sürekli veya ayrık yöntemlerin seçimi, analizin belirli hedeflerinin yanı sıra problem ölçeği ve kırık sistemi geometrisi gibi faktörlere bağlıdır. Sürekli yöntem, yalnızca birkaç kırık olduğunda ve kırık açılması ve tam blok ayrılması gibi faktörler önemli faktörler olmadığında uygulanabilir (Jing ve Hudson, 2002). Bunun anlamı, malzemelerin herhangi bir noktada yırtılıp açılmayacağı veya parçalara ayrılamayacağıdır. Problem alanındaki belirli bir noktanın çevresindeki tüm malzeme noktaları, örselenme süreci boyunca aynı çevrede kalmaktadır. Malzemeler mikroskobik ölçekte doğal olarak ayrık olsa da, mikroskobik bileşenleri ayrı ayrı temsil etmek hem matematiksel olarak zordur hem de pratik uygulamalarda gereksizdir (Jing, 2003).

Çizelge 4.1. 2023 yılında çeşitli örnek çalışmaların sayısal modellemesindeki varsayımlar ve basitleştirmeler

Örnek çalışma	Amaç	Varsayımlar / Basitleştirme	Sayısal yöntem	Yazar(lar)
Jinping II hidroelektrik projesi ve Çin'in Guizhou bölgesindeki bir otoyol tüneli.	Tünelcilikte kazı plastik zonu analiz	- düzlem gerinim durumu - genelleştirilmiş doğrusal olmayan birleşik mukavemet teorisi - Sürekli, homojen ve izotropik çevre kaya - Tahmin edilen sonuç göstergeleri teğetsel gerilme, eksenel gerilme ve plastik zon yarıçapıdır	Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)	Wang vd., (2023)
Boukhadra madeni, Cezayir'in kuzeydoğusu	Bir yer altı kazısında duraylılık analizi	- Kaya kütlesi heterojenliği - Anizotropik elastik-perfektif plastik model - Eklemlili kaya modelinin parametreleri, izotropik Mohr-Coulomb modelinin parametreleriyle yakından ilişkilidir.	Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)	Benyoucef vd., (2023)
Çin'in güneybatısındaki DLS Tüneli	Tabakalı kaya kütlelerinde açık TBM tünel açma	- Ayrık ve sürekli bölgeler - Kaya kütlesi ile kalkan arasındaki arayüzey bağlantı analizi için kalkan yüzeyinde bir bağlantı duvarı oluşturulmuştur. - Kalkan ve rijit bloklar arasındaki temas için yumuşak bağ modeli kullanılmıştır ve burada temasın gerilme dayanımı 0'dır. - Kalkan ve rijit bloklar arasında kayma yok. - TBM'nin ilerlemesi, kabuk elemanlarının eklenmesi ve çıkarılmasıyla sağlanmıştır. - Yer altı suyunun rolü dikkate alınmamıştır.	Birleştirilmiş FDM-Ayrık Elemanlar Yöntemi (FDM-DEM)	Fang vd., (2023)
Jiangxi Eyaletindeki	Eklemlili kaya kütleli tünellerinde	- Scott Russell dalga jeneratörü deneyi (Monaghan ve Kos, 2000)	Bütünleştirilmiş iş sürekli olmayan	Hongyun vd., (2023)

Yonglian Tüneli	su girişi ve göçme analizi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voronoi geometrik modeli, suya dayanıklı kaya kütlelerinin kırılma seviyesini simüle etmek için kullanılmıştır</li> <li>- Tünelin üzerindeki bazı bloklar hareketli tutulur ve diğer bloklar sabit bloklar olarak ayarlanmıştır</li> </ul>	örselenme analizi (DDA) ve düzleştirilmiş tanecik hidrodinamiği yöntemi (SPH)	
Churcha madeni (RO), Hindistan	Kömür damarının çıkartılması sırasında kaya kütlelerinin gerinim patlama potansiyelinin ve duraylılığını incelemek	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Çevredeki kaya kütlelerinin duraylılığı ve destek sisteminin gerekliliği güvenlik faktörü ile değerlendirilir</li> <li>- Kesilmiş yük modelin üst kısmına uygulanır</li> <li>- Esnek elasto-plastik model</li> <li>- Sheorey'in kaya kütleleri yenilme ölçütü</li> <li>- Mohr-Coulomb gerinim yumuşatma (MCSS) modeli</li> </ul>	FDM	Das vd., (2023)
Kuzey Yunanistan'daki Papadia barajında varsayımsal bir yenilme örneği	Baraj kırılma sürecini ve taşkın dalgası yönlendirmesini simüle etmek amacıyla	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rezervuar geometrisi bir yükseklik-depolama hacmi diyagramı ile temsil edilir</li> <li>- Yenilmenin başlangıcında baraj rezervuarındaki su yüzeyi baraj kretinin yüksekliğindedir ve aynı zamanda depolama alanındaki giriş Muhtemel Maksimum Taşkın (PMF) zirvesine eşittir</li> <li>- Dolusavak ağaç gövdeleri veya başka bir malzeme tarafından engelleniyorsa</li> <li>- Rezervuardan gelen su benzetimin başında baraj kretinin üzerinden akar ve baraj gövdesindeki erozyon kanalı hemen gelişmeye başlar</li> </ul>	Saint Venant denklemlerini de çözebilen 2D FEM Hidrolojik Mühendislik Merkezi-Nehir Analiz Sistemi (HEC-RAS) modeli	Mattas vd., (2023)

Öte yandan, ayırık yöntem, sürekli yaklaşım için çok fazla kırığın olduğu veya tek tek bloklarda önemli yerdeğiştirmelerin mümkün olduğu durumlarda orta düzeyde kırıklı kaya kütleleri için idealdir (Jing ve Hudson, 2002). Bir yöntemin diğerine açık bir üstünlüğü yoktur. Bununla birlikte, hibrit modeller olarak bilinen sürekli ve ayırık modellerin birleştirilmesi, her bir yaklaşımla ilişkili bazı dezavantajları azaltabilmektedir. Bu tez FDM, FEM, DEM ve DFN'ye kısa bir genel bakış sunmaktadır. Özet, CP tasarımı ve cevher üretimi sırasındaki kaya duraylılığı koşullarının analizinde kullanılan sayısal tekniklerin seçiminin ardındaki mantığı aydınlatmayı amaçlamaktadır.

#### 4.1.1. Sonlu Farklar Yöntemi

FDM'deki temel teknik, objektif fonksiyonun kısmi türevlerini (örneğin yerdeğiştirme) koordinat yönlerindeki belirli uzamsal aralıklar üzerinde tanımlanan farklarla değiştirerek, yöneten kısmi diferansiyel denklemlerin (PDE'ler) ayrıklaştırılmasıdır,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , bu da ilgilenilen alan üzerindeki nodların bir ağında (mesh) objektif fonksiyonların cebirsel eşzamanlı denklem sistemini verir (Leveque, 2007). Sınır nodlarında tanımlanan yanal destek koşullarını içeren eşzamanlı cebirsel sistem denklemlerinin çözümlü, daha sonra tüm nodlarda hem yöneten PDF'leri hem de belirtilen yanal destek koşullarını karşılayan amaç fonksiyonunun gerekli değerlerini üretecektir (Jing, 2003). FDM'de denklemleri formüle etme ve çözüme süreci yerelleştirilmiştir, bu da bilgisayar uygulamalarında bellek ve depolama yönetimi için daha verimli olmasını sağlamaktadır. FEM ve BEM'den farklı olarak, örnekleme noktaları civarında PDE'ye yaklaşmak için enterpolasyon fonksiyonları kullanılırken, FDM'de bu tür enterpolasyon fonksiyonları kullanılmamaktadır. Bu nedenle, PDE'leri çözmek için en doğrudan ve sezgisel teknik olarak kabul edilir. Bu doğrudan yaklaşım ayrıca, FEM veya BEM'de görüldüğü gibi global matris denklem sistemlerini kullanan diğer sayısal yöntemlerin gerektirdiği iteratif (yinelemeli) çözümlere veya tahminci-düzeltici eşleme (predictor-corrective mapping) şemalarına ihtiyaç duymadan, plastisite ve yenilme gibi karmaşık yapısal malzeme davranışlarının daha basit simülasyon avantajını sunmaktadır (Jing ve Hudson, 2002). FDM'nin matematiksel türevini ve önemini kavramak için okuyucuların Leveque, (2007), Smith, (1985) ve Chapra ve Canale'nin (2021) çalışmalarını

incelemeleri tavsiye edilir. Bu kaynaklar, FDM'nin ilkeleri ve çeşitli alanlardaki uygulamaları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Düzenli ağ sistemleri kullanan geleneksel FDM'nin, özellikle kırıkları, karmaşık yanal destek koşullarını ve malzeme heterojenliğini etkili bir şekilde ele alamaması gibi sınırlamaları bulunmaktadır (Liu vd., 2022). Bununla birlikte, üçgen veya Voronoi ağ sistemleri gibi düzensiz ağların kullanılmasıyla önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve bu da Sonlu Hacim yöntemleri (FVM) gibi tekniklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yaklaşımlar, kaya mekaniği problemlerinin doğasında bulunan karmaşıklıkları ele almak için gelişmiş yetenekler sunmaktadır (Itasca, 2019). Bu nedenle FVM yaklaşımı, malzeme heterojenliği, ağ oluşturma ve keyfi şekillerdeki yapılandırılmamış ağlarla yanal destek koşullarının işlenmesinde FEM kadar esnek bir yaklaşımdır (Jing ve Hudson, 2002). Aslında FLAC3D kodu, FVM kullanan kaya mühendisliği problemlerinde gerilme analizi için en prestijli bilgisayar kodlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Uyarlanabilirliği, şev duraylılığı, yer altı açıklıkları, birleşik hidro-mekanik süreçler, kaya kütlesi özelliği, tektonik süreçler ve buzul dinamikleri de dahil olmak üzere kaya mekaniğinin çeşitli yönlerinde yaygın olarak uygulanmasında açıkça görülmektedir. FLAC3D kodu, ağ elemanlarına daha fazla hacimsel esneklik sağlayan karma ayırıklaştırma tekniğini içermektedir. Bu teknik, üst üste binen iki çoklu tetrahedra grubundan bir eleman oluşturmayı ve böylece dört ana ağ şekli oluşturmayı içerir: altı yüzlü, prizmalar, piramitler ve dört yüzlü (Itasca, 2019).

FVM, kaya mekaniği analizinin birçok alanında üstünlük sağlarken, kaya kütlesi kırıklarını veya süreksizliklerini açıkça temsil etmek bir sorun olmaya devam etmektedir. Açık kırık temsiline dahil edilememesi, kaya mekaniği için FVM yaklaşımının gerçekten de zayıf bir noktasıdır. Bununla birlikte, bu yaklaşım kaya ve toprak örneklerinin laboratuvar testlerinde makaslama bandı oluşumu ve tektonik yüklemeye bağlı fay sistemi oluşumu gibi kırılma süreçlerini araştırmak için etkili bir şekilde kullanılmıştır. Bu yaklaşım, ağı açıkça açmadan veya elemanları ayırmadan, ağ noktalarında veya eleman merkezlerinde malzeme yenilmesi veya oluşan hasarın yayılmasının benzetimi yoluyla gerçekleştirilir.

#### 4.1.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

FEM, kaya mekaniği ve kaya mühendisliğinde en popüler sayısal yöntem olarak kabul edilmektedir. Popüleriği büyük ölçüde malzeme homojenliğı ve anizotropisi, karmaşık yanal destek koşulları ve dinamik problemleri ele almadaki esnekliğı ve aynı zamanda karmaşık bünye modelleri ve kırıklarla başa çıkmadaki orta düzey verimliliğinden kaynaklanmaktadır (Jing, 2003). Sonlu elemanlar yöntemi, polinom interpolasyon fonksiyonları açısından parçalı ayrıklaştırma kullanılarak alan integral denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır (Zhang ve Sanderson, 2002). Genel olarak, bir FEM analizi üç temel adımı içerir: bölge ayrıklaştırması, yerel yaklaşım ve global matris denkleminin bir araya getirilmesi ve çözümü. Bölgenin ayrıklaştırılması, ilgilenilen bölgenin bir dizi küçük alt bölgeye (elemanlara) ve nodlara bölünmesini içermektedir (Jing, 2003). FEM temel olarak elemanlar üzerindeki saha büyüklüklerini tahmin etmektedir. Temel bir varsayım, her bir eleman içindeki bilinmeyen fonksiyonun ( $u^e_i$ ), polinom formunda ifade edilen sistem bilinmeyenlerinin ( $u^j_i$ ) nod değerlerini içeren bir deneme fonksiyonu kullanılarak yaklaşılabileceğidir. Deneme fonksiyonunun, denklem (45) ile belirtildiğı gibi, yöneten PDE'ye bağılı kalması gerekmektedir.

$$u^e_i = \sum_{j=1}^M N_{ij} u^j_i \quad (45)$$

Burada " $N_{ij}$ " genellikle Gauss kareleme entegrasyonunu kullanmak için içsel koordinatlarda tanımlanan şekil fonksiyonları olarak adlandırılır (Wittke, 1990) ve "M" elemanların derecesidir. Şekil fonksiyonları kullanılarak, problemin orijinal PDE'si aşağıdaki gibi yazılan cebirsel bir denklem sistemi ile değiştirilmektedir:

$$\sum_{i=1}^N [K^e_{ij}] u^e_j = \sum_{i=1}^N (f^e_i) \quad \text{or} \quad Ku = F \quad (46)$$

Burada  $[K^e_{ij}]$  matrisi katsayı matrisi,  $\{u^e_j\}$  vektörü bilinmeyen değişkenlerin nod değerleri vektörü ve  $\{f^e_i\}$  vektörü gövde kuvveti terimleri ve başlangıç/yanal destek koşullarından gelen katkılardan oluşmaktadır (Jing, 2003). FEM'in matematiksel türevini ve önemini kavramak için okuyucuların Wittke, (1990), Hughes, (1987),



Chapra ve Canale, (2021), Zienkiewicz ve diğeri, (2013), Liu ve Quek, (2014) ve Khennane, (2013) çalışmalarını incelemeleri tavsiye edilmektedir.

FEM'in sayısal analizde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, kaya mekaniği ve kaya mühendisliğindeki uygulamasında çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Kaya kütlelerinin doğal heterojenliğinden kaynaklanan birincil endişe, kırıkların etkili bir şekilde yönetilmesini ve yayılmasını FEM kullanımı için büyük bir engel haline getirmektedir. Kırık elemanları arttıkça, FEM'deki küresel sertlik matrisi zayıf bir şekilde koşullanma eğilimine girmektedir. Sonuç olarak, FEM formülasyonları genellikle kırık elemanlarının ayrılamayacağını varsaydığından, blok rotasyonları, tam ayrılma ve geniş kırık açılması gibi fenomenler yeterince ele alınamaz. Kırık büyümesini simüle ederken, FEM, küçük eleman boyutu, kırık büyümesi ile sürekli yeniden ağ oluşturma ve kırık yolu ile eleman kenarlarının uygunluğunu sağlama gerekliliği nedeniyle sınırlamalarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu koşullar toplu olarak FEM'in kırık problemlerini ele almadaki etkinliğini BEM muadillerine kıyasla azaltmaktadır (Jing ve Hudson, 2002). Bir başka koşul da standart FEM'in doğasında bulunan ve aşırı ağ bağımlılığına yol açarak kaya kırılmasının lokalizasyonunu (Lisjak ve Grasselli, 2014) ve büyük ölçekli dinamik kırılmayı (Li vd., 2023b) yakalama kabiliyetini sınırlayan süreklilik varsayımından kaynaklanmaktadır.

Kaya kütlesi analizinde FEM'in uygulanabilirliğini artırmak için çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Örneğin, son yıllarda, eXtended veya Genelleştirilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM veya GFEM) gibi nod zenginleştirme veya Gömülü sonlu elemanlar yöntemi (EFEM) gibi element zenginleştirme içeren sonlu elemanlara gömülü çatlaklı modeller, kırılma yayılımının benzetimine başarıyla uygulanmıştır (Motamedi vd., 2016). GFEM, birliğin bölünmesi ilkesi temelinde geliştirilmiştir. Ağ yapısı, ilgilenilen alanın geometrisinden bağımsızdır ve obje geometrisine bakılmaksızın düzenliliğe izin vermektedir. Kırıklar, çevredeki nodlar tarafından atlama fonksiyonları ve çatlak ucu fonksiyonları kullanılarak simüle edilebilmektedir (Strouboulis vd., 2000; 2001).

Geliştirilmiş FEM, özellikle en az veya hiç yeniden ağ oluşturmaya gerek olmadan kırık analizi için geliştirilmiştir. Temel kavram, amaç fonksiyonunun FEM'de rastgele seçilmiş süreksizlikler ve süreksiz türevlerle doğrudan temsil edilmesidir, ancak

FEM ağlarının kırıklara uymasına ve kırık büyümesi için yeniden ağ oluşturmaya gerek kalmamaktadır (Duarte vd., 2001). Geliştirilmiş FEM, kırık analizi için kapasitesini güçlendirmiştir. FEM'in malzeme heterojenliği ve doğrusal olmama durumlarını ele almadaki doğal gücü ile birleştiğinde, bu durum gelişmiş FEM'i doğrusal olmayan kırılma analizi için çok uygun hale getirmektedir (Jing, 2003). Yine Oliver v.d., (2006) tarafından yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada, EFEM'in GFEM'e kıyasla daha yüksek hesaplama verimliliği sergilediği gösterilmiştir. Bununla birlikte, EFEM kırık ucu gerilmelerini doğru bir şekilde yakalamakta zorlanabilmektedir (Motamedi vd., 2016).

#### **4.1.3. Ayrık Eleman Yöntemi**

Ayrık eleman yöntemi (DEM), problem bölgesini ayrı birimlerden oluşan bir derleme olarak gören sayısal teknikleri içermektedir. DEM'in temel kavramları, ilgilenilen bölgenin bükülmez veya deforme olabilir bloklar/parçacıklar topluluğu olarak ele alınması ve aralarındaki temasların tanımlanması ve tüm örselenme/hareket süreci boyunca sürekli olarak güncellenmesi ve uygun bünye modelleri ile temsil edilmesi gerektiğidir (Jing ve Hudson, 2002). Kaya mühendisliği problemleri için, kaya blokları kesişen kırıklarla tanımlanır ve problemin geometrisini oluşturmak için bu kırıkların konumlarının, yönlerinin ve boyutlarının bilinmesi gerekmektedir. Genellikle, izole kırıklar veya kırıkların kör uç segmentleri, DEM'i geliştirmedeki mevcut sınırlamalar nedeniyle göz ardı edilir, çünkü kırık uçlarında başlama ve yayılma benzetimi zorlayıcıdır (Jing ve Stephansson, 2007). Yöntemin teorik temeli, bükülmez ve/veya deforme olabilen kütleler için hareket denklemlerinin formüle edilmesini ve çözülmesini içermektedir. Bu, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ayrıklaştırmasına dayanan örtük formülasyonlar ve FDM veya sonlu hacim yöntemi (FVM) ayrıklaştırmasını kullanan açık formülasyonlar yoluyla elde edilmektedir. Öne çıkan açık DEM metodolojileri, kaya mekaniğindeki iki ve üç boyutlu sorunları ele almak için kullanılan UDEC ve 3DEC yazılım programlarını içermektedir (Itasca, 2019; Lisjak ve Grasselli, 2014).

Kaya mekaniği uygulamalarında mekanik süreçleri bir DEM yöntemiyle simüle etmek için aşağıdaki problemler çözülmelidir:

1. Kaya bloklarının veya kırık sistemlerinin topografyasının tanımlanması;

2. Blok örselenmesinin temsili (FVM veya FEM kullanarak rijit veya deforme olabilir);
3. Temas tespiti için bir algoritma geliştirilmesi;
4. Kaya blokları ve kırıklar için bünye denklemlerinin elde edilmesi;
5. Blokların hareket denklemlerinin entegrasyonu.

DEM'deki matematiksel formülasyon da dahil olmak üzere bu sorunların üstesinden gelmek için kullanılan metodolojiler literatürde kapsamlı bir şekilde belgelenmiştir. İlgilenen okuyucuların Jing ve Stephansson, (2007), Jing, (2003) ve Zhang ve Sanderson, (2002) çalışmalarını incelemeleri tavsiye edilmektedir. DEM'ler başlangıçta eklemli yapıların ve tanecikli malzemelerin modellenmesi için tasarlanmış olsa da, kapsamları, mekanik davranışın, kırılma malzemelerdeki kırılma gibi örselenmesin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan süreksizliklerden etkilendiği sistemleri içerecek şekilde genişlemiştir. Özellikle, ayrık elemanlar arasındaki bağların dahil edilmesi, yeni kırık oluşumunun benzetimini mümkün kılmış, böylece DEM'lerin süreklilikten süreksizliğe geçişi simüle etmek için uygulama alanını genişletmiştir (Lisjak ve Grasselli, 2014).

DEM'in kaya mekaniği problemlerini çözerken karşılaştığı en önemli kısıt, kırıkların veya süreksizliklerin konumları, yönleri ve boyutları ile ilgili doğal belirsizliklerdir. Deterministik olarak karakterize edilebilen ana özellikler dışında, bu bilgilerin çoğu hem problem çözümlerinden önce hem de sonra büyük ölçüde bilinmemektedir. Bunun sonucunda, problemin çözümleri doğal olarak kırık sisteminin geometrisine ilişkin belirsizlikleri içermektedir. İncelenen kaya kütlesi içindeki kırıkların dağılımı hakkında bilgi edinmek için, süreksizlik popülasyonunun istatistiksel analizi yaygın olarak kullanılmaktadır (Jing ve Stephansson, 2007). Jing ve Stephansson tarafından açıklandığı üzere DEM'in bir diğer kısıtı, stokastik modellerin özellikle bir kazı çevresinde akım yollarına yeterince yaklaşamayabileceği çatlaklı sert kayalardaki sıvı akışıyla bağlantılıdır. Bunun nedeni, kırıklı sert kayalardaki akışkan akışının yola son derece duyarlı doğasıdır. Dolayısıyla, kırıklı kaya kütlelerindeki sıvı akışının çözümü, kırık sisteminin doğru bir şekilde karakterize edilmesine daha fazla bağlıdır ve bu da potansiyel olarak daha büyük bir belirsizliğe yol açmaktadır. Bu önemli dezavantajlara rağmen DEM, kırıkları ele almadaki belirgin avantajları

nedeniyle kaya mühendisliği veya genel jeomekanik koşulları çözümlenmede en çok tercih edilen yöntemlerden biri olmaya devam etmektedir.

#### 4.1.4. Ayrık Kırık Ağı Yöntemi

Ayrık kırık ağları (DFN), doğrudan görselleştirmenin pratik olmadığı çok çeşitli kırık özelliklerini ele almak için kullanılmaktadır. Sayısal bir yöntemden ziyade eklemlerin istatistiksel bir açıklamasıdır ve kırık sistemi geometrisini anlamaya ve temsil etmeye dayanmaktadır. DFN bağımsız bir sayısal yöntem olarak sınıflandırılır çünkü DEM'e sık sık entegre edilmesine rağmen, bu yöntemin uygulanması, süreksizliklerin ayrı ayrı tanımlandığı geleneksel DEM yaklaşımından farklıdır. Aslında, yaklaşım stokastiktir, yani bir DFN modelinin geometrik özellikleri yalnızca geometrik özelliklerinin bağımsız istatistiksel dağılımları ile sınırlandırılmıştır (Itasca 2019). Yoğunluk, yönelim, boyut ve açıklık dahil olmak üzere kırık parametrelerinin dağılımı, kırık şeklinin (dairesel, eliptik veya çoğunlukla çokgen) dağılımını tanımlayan bir olasılık fonksiyonundan belirlenmektedir (Elmo vd., 2014).

Doğrudan haritalama, sınırlı bölgeye sahip yüzey maruziyetleri, sınırlı uzunluk veya derinlikteki sondaj kuyuları ve benzer şekilde sınırlı maruziyet bölgelerine sahip yer altı kazılarının (tüneller, mağaralar, şaftlar gibi) duvarları ile sınırlı olduğundan ve haritalama için hem alt hem de üst kesme sınırları bulunduğu için, kırık ağı bilgilerinin güvenilirliği, haritalamanın kalitesine ve örneklemin temsil edilebilirliğine bağlıdır. Bunun sonucunda, DFN'in yeterli olup olmadığının değerlendirilmesi zorlaşmaktadır (Jing, 2003). Ayrıca, DFN modelinde çok sayıda kırığın açık bir şekilde temsil edilmesi hesaplama modelini daha az verimli hale getirdiğinde, büyük ölçeklerdeki geniş alan problemleri için uygulanabilirliği azalmaktadır. Benzer şekilde, kırıklar içindeki gerilme ve örselenme süreçlerinin yanı sıra kaya matrisi içindeki gerilme ve örselenmesinin kırık örselenmesi üzerindeki etkisi de tipik bir şekilde göz ardı edilmektedir. Bunun başlıca nedeni, ilgili sayısal tekniklerin karmaşıklığı ve gereken olağanüstü hesaplama çabalarıdır (Jing ve Stephansson 2007).

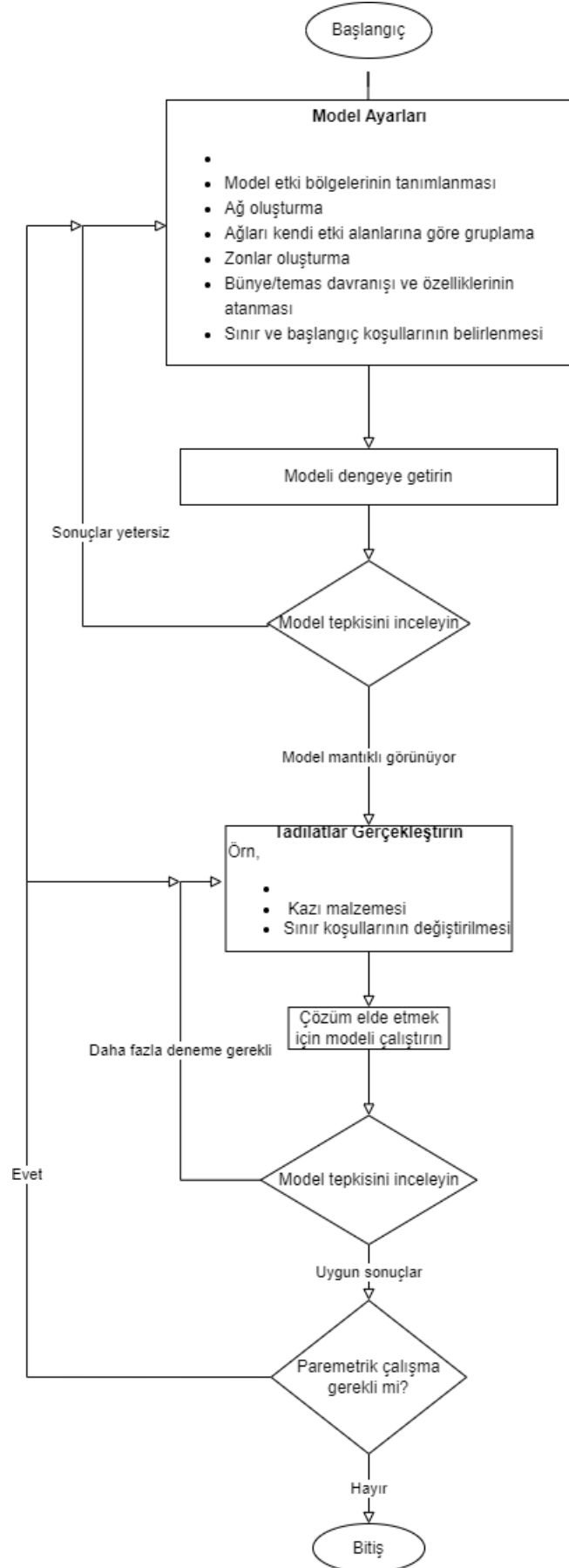
Bu sınırlamalar DEM modellerinin sınırlamalarına çok benzemektedir ve gelişmiş haritalama ve ölçüm tekniklerinin kullanılmasıyla ancak kısmen hafifletilebilmekte veya niteliksel olarak ele alınabilmektedir (Jing ve Hudson, 2002). Sınırlamalarına

rağmen yöntem, kavramsal çekiciliği sayesinde kırıklı kayalarla ilgili sorunların ele alınmasında yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Çok sayıda DFN formülasyonu ve bilgisayar kodu mevcut olup en dikkate değerlerinden biri 3DEC'deki uygulamadır (Jiang vd., 2024). Kaya mekaniği ve mühendisliğinde DFN modelinin teorik temeli ve pratik uygulamaları hakkında daha derin bir anlayış için okuyucuların Jing ve Stephansson, (2007), Lei ve diğerleri, (2017), Dershowitz ve diğerleri, (2004) ve Kolapo vd., (2023) çalışmalarını incelemeleri tavsiye edilmektedir.

#### **4.2. Itasca Kodları ile Sayısal Modelleme**

Kayalar ve topraklar üzerindeki yapıları ve kazıları anlamak ve tasarlamak, sahaya özgü verilerin sınırlı olması nedeniyle oldukça zordur. Deforme olabilirlik ve mukavemet gibi özellikler büyük ölçüde değişiklik gösterdiğinden tüm sahaya ait verilerinin elde edilmesi imkansız hale gelebilmektedir (Zhou ve Zhao, 2011). Bu tür senaryolarda, başlangıç noktası olarak sayısal modellerden yararlanmak çok değerlidir. Sayısal modeller, önemli sistem dinamikleri hakkında içgörüler sunarak daha basit, daha gelişmiş tasarım hesaplamalarının önünü açmaktadır (Chan vd., 2020). Bu bağlamda, Itasca kodları değerli bir yardımcı araç olarak ortaya çıkmaktadır. Kodlar, kapsamlı öngörüselleştirme için veya kavramsal araştırmalar için sanal bir test alanı olarak kullanılabilir. Bunların kullanımı ile ilgili verilecek karar, kodların doğal yeteneklerinden ziyade büyük ölçüde eldeki pratik koşullara ve kaynaklara dayanmaktadır.

Kodlar, nitelikli verilere yeterince erişildiğinde güvenilir tahminler sunma becerisi göstermektedir. Söz konusu kodlar altı temel adımdan oluşan basit bir metodolojiye bağlıdır: model analizi için hedeflerin tanımlanması; fiziksel sistemin kavramsal bir resminin oluşturulması; basit idealize modellerin oluşturulması ve çalıştırılması; probleme özgü verilerin bir araya getirilmesi; bir dizi ayrıntılı model hazırlanması; model hesaplamalarının yapılması ve sonuçların yorumlanmak üzere sunulması (Itasca, 2019). Bu adımları kullanan genel çözüm prosedürleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Itasca kodlarında modelleme yöntemi (Itasca, 2019)

FLAC3D, 3DEC ve PFC gibi Itasca kodları, model içindeki bantların gelişimini ve değişimini sağlayarak çatallanma sorunlarını ele alma kapasitesine sahiptir. Bu özellik, dinamik hareket denklemlerini kullanmalarıyla kolaylaştırılır ve bant oluşumuyla ilişkili kinetik enerjinin fiziksel gerçekliği yansıtacak şekilde doğru bir şekilde serbest bırakılmasını ve dağıtılmasını sağlamaktadır (Varas vd., 2005; Lin vd., 2013; Boukpeti ve Drescher, 2020).

Kodlar, özellikle FLAC3D ve 3DEC, şevler, istinat duvarları ve tüneller gibi çeşitli yapı türleri için güvenlik faktörünü (FoS) de hesaplayabilmektedir. Bu hesaplama, belirli mukavemet özelliklerinin yenilme durumu gözlenene kadar kademeli olarak düşürüldüğü mukavemet indirgeme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem (Dawson ve Roth, 1999; Zou vd., 2016; Fu ve Liao, 2010) tarafından yapılan çalışmalarda tartışılmıştır. Sonraki bölümlerde, iki önemli Itasca koduna, yani FLAC3D ve 3DEC'ye kısa bir genel bakış sağlanacak ve tartışılan örnek çalışma ile alakaları vurgulanacaktır.

#### **4.2.1. FLAC3D ile Sayısal Modelleme**

FLAC3D, üç boyutlu açık Lagrangian FVM kullanan mühendislik mekaniği için tasarlanan bir hesaplama programıdır. Kullanıcı tarafından ayarlanabilen üç boyutlu bir ağ sistemi içinde çok yüzlü elemanlar ( zonlar olarak adlandırılır) kullanılmaktadır. Bu zonlar tuğla ( altı yüzlü), kama, piramit ve dört yüzlü gibi şekillerde olup çeşitli malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Her zon, uygulanan kuvvetlere veya sınır kısıtlamalarına maruz kaldığında belirli doğrusal veya doğrusal olmayan gerilme-gerinim kurallarını takip etmektedir. Temsil edilen malzeme şekil değiştirip akabilirken, ağ da deforme olup ( büyük gerinim modunda) malzeme ile birlikte hareket edebilmektedir. Açık Lagrangian yöntemi ve karma ayrıklaştırma zonlama tekniği, plastik göçme ve akmanın doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Hiçbir matris teşkil edilmediğinden, büyük ölçekli üç boyutlu hesaplamalar aşırı bellek talepleri olmadan gerçekleştirilebilmektedir (Nagel ve Sanchez-Nagel, 2011).

Bu yazılım, geoteknik mühendisliği problemlerini 3B olarak analiz etmek için etkili bir araç olduğunu kanıtlamakta ve geomühendislik uygulamalarında gerçekçi boyutlardaki modeller için makul sürelerde hesaplamalar yapılmasına olanak

sağlamaktadır (Itasca, 2019). Kullanıcı tercihlerine göre ek modeller oluşturma seçeneğiyle birlikte Çizelge 2.4'te listelenen on dokuz bünye modeline sahiptir. Bir FLAC3D gridindeki her zon farklı bir bünye modeline veya özelliğine sahip olabilir ve herhangi bir özelliğin sürekli gradyanı veya istatistiksel dağılımı belirlenebilmektedir. Ayrıca kullanıcılar herhangi bir özellik için sürekli gradyanlar veya istatistiksel dağılımlar da belirtebilmektedir. Dahası, FLAC3D, ağ kesimleri arasındaki farklı arayüzleri simüle etmek için bir arayüz modeli sunarak faylara, eklemlere veya sürtünme sınırlarına benzer şekilde kayma ve ayrılmaya imkan tanımaktadır.

FLAC3D'deki yenilme zonu matrisleri, elastik malzemeler için, özellikle de sabit gerinimli dörtyüzlüler için FEM ile benzerdir. Bununla birlikte, FLAC3D kendisini çeşitli yönlerden ayırmaktadır: plastik göçme ve akışın hassas bir modellemesi için karma bir ayırıştırma şeması kullanmaktadır; tam dinamik denklemleri kullanarak sayısal koşullar olmadan fiziksel açıdan duraysız süreçleri ele almasını sağlamaktadır; örtük yöntemlere göre hesaplama süresi avantajları sunan açık bir çözüm şeması benimsemektedir; çözüm algoritmasını değiştirmeden herhangi bir bünye modelini barındırabilmektedir; ağırlıklı olarak, gerilme durumlarını etkilemeden yerdeğiştirmelerde ve malzeme özelliklerinde esnek değişikliklere izin veren artımlı bir formülasyon kullanmaktadır. Bu farklılıklar genellikle FLAC3D'nin lehine olsa da, iki olumsuzluk bulunmaktadır: doğrusal benzetimler eşdeğer sonlu eleman yazılımlarına kıyasla daha yavaş çalışabilir ve FLAC3D'deki çözüm süresi, modellenen sistemdeki en uzun doğal sürenin en kısa doğal süreye oranından etkilenerek bazı durumlarda yetersizliklere yol açabilmektedir (Itasca, 2019).

FLAC3D, kaya mekaniğini çeşitli açılardan analiz etmek için değerli olsa da, sürekli bir yaklaşım olan FVM'yi kullanması, kaya kütleleri içindeki kırıkları doğrudan temsil edemediği anlamına gelmektedir. Kırık açılması ve tam blok ayrılması önemli olduğunda, süreksiz modelleme için DEM kullanan 3DEC gibi diğer yazılımlar gerekli hale gelmektedir.

#### **4.2.2. 3DEC ile Sayısal Modelleme**

3DEC, öncelikle eklemli kaya kütleleri gibi kırılmış veya süreksiz malzemelerin davranışını simüle etmek için kullanılan DEM temelli üç boyutlu bir modelleme



yazılımıdır. Bu malzemeleri ayırık bloklar olarak temsil etmekte ve statik veya dinamik yükleme koşullarına verdikleri tepkilerin analizine olanak tanımaktadır. Yazılım, blokların önemli ölçüde yerdeğiştirmesine ve dönmesine izin verirken blokların sabit kalma ya da deforme olması seçeneklerini de sunmaktadır. Deforme olabilen bloklar, önceden tanımlanmış gerilme-gerinim ilişkileri tarafından yönetilen yanıtlarla birlikte sonlu farklar zonlarına ayrılmaktadır. Bloklar arasındaki arayüzler, hem normal hem de makaslama hareketleri üzerinde kontrol ile yanal destek koşulları olarak ele alınmaktadır. 3DEC, hem sağlam bloklar hem de arayüzler için çeşitli bünye modelleri içerir ve süreksiz jeolojik malzemelerin gerçekçi benzetimlerini gerçekleştirmeyi sağlamaktadır. Lagrangian hesaplama şeması, bloklular sistemlere özgü büyük hareketleri ve örselenmeleri yakalamak için uygundur (Itasca, 2019).

Hem sürekli hem de süreksiz eklem desenleri istatistiksel olarak oluşturulabilmekte veya jeolojik haritalanmış veriler doğrudan modele dahil edilebilmektedir. Programın yüzlerce haritalanmış fayı, konum, dalma ve dalma yönlerini detaylandırarak 3DEC modelinde açıkça temsil etme kabiliyetine rağmen, bu süreç önemli bir emek gerektirmektedir. Alternatif olarak, 3DEC modeli, fayların stokastik temsilinin kullanılabilceği bir DFN'den de çıkarılabilmektedir. Bu yöntem, bir eklem kümesinin oluşturulduğu bir dizi istatistiksel parametrenin tanımlanmasını içermektedir. Haritalanmış eklemlerin doğrudan temsil edilmesi yaklaşımının aksine, DFN yönteminde eklemler belirli haritalanmış özelliklere karşılık gelmemektedir. Stokastik yöntemlerle üretilen eklem kümesi benzersiz değildir, yani çeşitli "gerçekleştirmeler" istatistiksel kriterleri karşılayabilmektedir. 3DEC'de bir DFN gerçekleştirilmesi, özellikleri DFN modelinin istatistiksel tanımına uyan kırıkları içermektedir. Bu gerçekleştirme, 3DEC modeli içindeki kırık boyutu, yönü ve konumu dağılımlarını özetleyen bir DFN şablonu ile bir yoğunluk terimi ve rastgele bir besleme kombinasyonu yoluyla oluşturulur. Okuyucuların, DFN modelleme yaklaşımı hakkında daha fazla bilgi edinmek için 3DEC kullanıcı kılavuzundaki "3dec'de ayırık kırık ağları" bölümünü okumaları önemle tavsiye edilmektedir.

3DEC ayrıca hem büyük yerdeğiştirme hem de dönüşleri barındıran ve zaman etki alanı hesaplamalarına izin veren açık bir çözüm algoritması kullanmaktadır. Yazılım, binlerce bloktan oluşan modellerin hızlı hesaplanması için optimize edilmiştir. Daha

hızlı kayan nokta işlemleri, çok çekirdekli işlemciler ve uygun fiyatlı RAM yükseltmeleri gibi hesaplama hızı ve donanım yeteneklerindeki gelişmelerle 3DEC giderek daha büyük sorunların üstesinden gelebilmektedir. Önceden tanımlanmış bir bellek sınırına sahip olan FLAC3D modelinin aksine, 3DEC'de bellek kullanımı yalnızca bilgisayarın mevcut belleği ile sınırlıdır. Örneğin, maksimum bükülmez ve deforme edilebilir blok sayısını (sırasıyla 100.000 ve 90.000) barındırmak için 3DEC yaklaşık 1 GB bilgisayar belleği gerektirmektedir. Bu nedenle, yönetilebilir hesaplama sınırları içinde kalmasını ve mevcut bellek kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmasını sağlamak için 3DEC'de modellenecek kaya kütesinin boyutunun dikkatlice değerlendirilmesi ve ayarlanması önerilmektedir.

#### **4.2.3. Entegre FLAC3D ve 3DEC modelleri**

Kaya kütesi yenilmesi çoğunlukla doğal olarak oluşan süreksizliklerden kaynaklandığından, özellikle de süreksizliklerin etkisi mesafe ile azaldığında, hem gevrek hem de makaslama süreçlerini araştırmak gereklidir (Priest, 1993). Sayısal modelleme yoluyla bu süreçlerin doğru bir şekilde simüle edilmesi, kırık davranışının daha gerçekçi bir tasvirini gerektirmektedir. Bunun için de kırık ağlarının gerçekçi bir şekilde simüle edilmesi ve temsil edilmesi gerekir; bu temsil tek tek oluşumlar olarak ya da kırık kümelerinden oluşan kolektif bir sistem olarak veya her ikisinin bir kombinasyonu olarak oluşturulabilir. Entegre bir FVM'yi FLAC3D'de ve DEM-DFN'yi 3DEC'de kullanarak, karmaşık kinematik mekanizmalar da dahil olmak üzere, kaya kütlelerinin hem süreksizlikler boyunca hem de kaya malzemesi köprüleri boyunca çekme ve sıkışma ile kırılmasını incelemek mümkündür (Elmo ve Stead, 2010). Entegre yöntem, FLAC3D'deki FVM veya FDM'nin büyük modellerin analizinde hesaplama verimliliği gibi avantajlarını, 3DEC'deki DEM-DFN'nin kaya kütesi yenilmesini ayrıntılı bir şekilde tasvir etmek için tam blok ayrılması da dahil olmak üzere önemli yerdeğiştirmelerle başa çıkma gibi avantajlarıyla birleştirmektedir (Eberhardt vd., 1997). Örneğin, kaya patlatmalarında, FLAC3D gibi sürekli yöntemlerde genellikle patlatma kaynaklı yenilme modellenmesine odaklanırken, 3DEC gibi süreksiz yöntemlerde patlatma kaynaklı kırık yayılımından kaynaklanan parçaların yerdeğiştirmesine odaklanmaktadır (An vd., 2017).

### 4.3. CP Analizlerinde Sayısal Yöntemler - Genel Bir Bakış

Son yıllarda, hesaplama kapasitesinin ilerlemesiyle birlikte, CP'nin performansı ile ilgili analizler de dahil olmak üzere görgül ve yapısal analiz / göçebilirlik değerlendirmesinden elde edilen tahminleri doğrulamak için sayısal tekniklerin kullanılmasına önem verilmektedir. Chen ve Mitri, (2021); Dintwe vd., (2022); Tewari vd., (2018); Yardımcı vd., (2016); Xu vd., (2019) ve diğer kişiler tarafından yürütülen çalışmalar da dahil olmak üzere, daha önce görgül ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi ile önerilen CP boyutlarını doğrulamak veya iyileştirmek için sayısal analiz kullanılmıştır. Çok sayıda araca rağmen, CP çevresindeki kaya göçükleri raporları belgelenmiştir. Örneğin, 2016 yılında Güney Afrika'daki Lily Madeni'nde, işletmedeki iki kat arasında yer alan CP çökerek madenin eski yer altı çalışmalarına doğru göçmüştür. Bunun neticesinde, yüzey altyapısının bir parçası olan lamba odası da çökmüş ve enkaz altında kalmıştır (Mudimu, 2021). Araştırma raporunda, bir makaslama zonu içinde, düşey doğrultuda ve dalma yönünde öngörülemez ve oldukça değişken bir cevher kütlesi jeolojisi; düşük kaya gerilmesi ortamı; cevher kütlesinin oldukça değişken doğası nedeniyle artan öngörülemez kaya kütlesi özellikleri; madencilik ilk aşamalarında ocak içindeki dolgu malzemesindeki yer altı suyunun etkileri; orijinal maden tasarımı ve düzenlemesi ve bunların sonraki madencilik operasyonları üzerinde yarattığı sonuçlar ve yer altı madenciliklerinin ilk başlamasından bu yana geçen uzun süre boyunca madencilik operasyonlarından kaynaklanan patlama nedeniyle oluşan yenilme gibi bazı nedenlerden bahsedilmiştir. Bu tezin yazarı, FLAC3D ve 3DEC gibi yetkin sayısal kodların uygulanmasıyla bu kazada bahsedilen faktörlerin önceden tahmin edilebileceği düşüncesindedir.

Sayısal yöntemlerin uygulanması, kaya kütlesi özellikleri bilgisine ve model doğrulama yoluyla elde edilen güven düzeyine bağlı olarak, yenilme mekanizmalarının araştırılmasından tasarım sonuçlarının tahmin edilmesine kadar uzanmaktadır. Örneğin, Kinross Gold Corporation-Kanada'da CP duraylılığıyla ilişkili yenilme mekanizmasını araştırmak için sığ, dar bir damar yatağının fizibilite çalışmasının bir parçası olarak FLAC3D kullanılmıştır (Chen ve Mitri, 2021). FLAC3D analizinden elde edilen bulgular yalnızca CP'nin kalınlığını doğrulamakla kalmamış, aynı zamanda yerinde gerilme ve fay sürtünme özelliklerine daha fazla

güvenerek dikkate alınabilecek alternatif kalınlıklar da önermiştir. Dintwe v.d., (2022) Moğolistan'daki Zuunsaagan Del florit madenindeki açık ocak-yer altı CP'sinin duraylılığını analiz etmek için benzer şekilde FLAC3D kullanmıştır. Bu analiz, eşik topuğunun duraylılığının, ocak şevinin yüksekliği ve açısı ile eşik topuğun dalma açısı gibi faktörlerden etkilendiğini ve ilgili jeomekanik özellikleri dikkate aldığını göstermektedir.

## 5. ÖRNEK ÇALIŞMA

Bu bölüm, Bauhinia Creek Madeni'nden alınan bir örnek çalışmaya odaklanmakta olup CP'nin tasarlanması ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılması sırasında karşılaşılan kaya duraylılığı sorunlarının analiz edilmesi için bir odak noktası olarak sunulmaktadır. Çalışma, hem sürekli hem de ayırık sayısal modelleme tekniklerini kullanarak, ölçeklendirilmiş açıklık yöntemiyle tahmin edilen CP kalınlığını analiz etmekte ve ardından gerilme kaynaklı örselenmeleri özenle değerlendiren FLAC3D modeli aracılığıyla çapraz doğrulama yapmaktadır. Ayrıca, çalışmada 3DEC modeli kullanılarak kaya kütlesi süreksizliklerinin örselenmeler üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu sayısal yöntemleri sahada yapılan gözlemlerle bütünleştiren bu bölüm, CP tasarımı ve cevher üretim aşamaları boyunca meydana gelen deformasyon ve yenilmelerin kapsamına ilişkin daha derin bir kavrayış sunarak konum, jeolojik özellikler, kaya kütlesi özellikleri, yerinde gerilmeleri tahmin etme metodolojisi ve entegre yaklaşımın ayrıntılı bir açıklaması dahil olmak üzere örnek çalışmanın canlı bir resmini çizmektedir. Bölüm ilerledikçe, CP cevheri çıkarıldıktan sonra sürdürülebilir bir ocak gölü oluşturmanın koşullarını tartışan altıncı bölüme yönelik zemin hazırlanmaktadır.

### 5.1. Genel Görünüm

Bauhinia Creek (BC) altın yatağı, on yılı aşkın bir süredir New Luika Altın Madeni'ndeki (NLGM) diğer cevherleşmiş yataklardan daha iyi performans göstermiştir. Shanta Gold Company'nin sahibi olduğu NLGM, Tanzanya'nın güneybatısındaki Songwe eyaletinde, Lupa Goldfield kuşağının bir parçası olarak yer almaktadır (bkz. Şekil 5.1). Tarihsel bilgiler, İngiliz sömürgesi döneminde 1935'ten 1959'a kadar bu yataktan yaklaşık 650.000 ons altın çıkarıldığını göstermektedir ve mevcut madencilik faaliyetleri sırasında gözlenen boşluklar da bunu kanıtlamaktadır.

NLGM'den alınan en son işletme verileri, yalnızca 2022 yılında 899.356 ton cevher çıkarıldığını ve ortalama tenörün 2,6 g/t olduğunu ortaya koymaktadır. BC yatağındaki açık ocak madenciliği 2012 yılında başlamış olup 10 m'lik basamaklar ve 3,0 m'lik kirişler içermektedir. Tasarlanan rampa genişliği ve eğimi sırasıyla 5,0 m ve %15'tir. Ocak şevinin duraylılığı büyük ölçüde granit ve granodiyorit kaya

kütlelerinin iyi nitelikleri tarafından sağlanmaktadır. Ancak, maden boyunca uzanan 4,5 m genişliğindeki bir fay zonu hem bitişik ocak hem de yer altı duvarlarının duraylılığını önemli ölçüde etkilemektedir. Ocak tabanından yüksek tenörlü cevher üretim çabaları, Şekil 5.2'deki A-A' ve B-B' kesitlerinde gösterildiği gibi, ocak boyunca yaklaşık 70°'lik dik eğimli şevlere ve yaklaşık 30°'lik daha yumuşak şevlerin oluşmasına yol açmıştır.

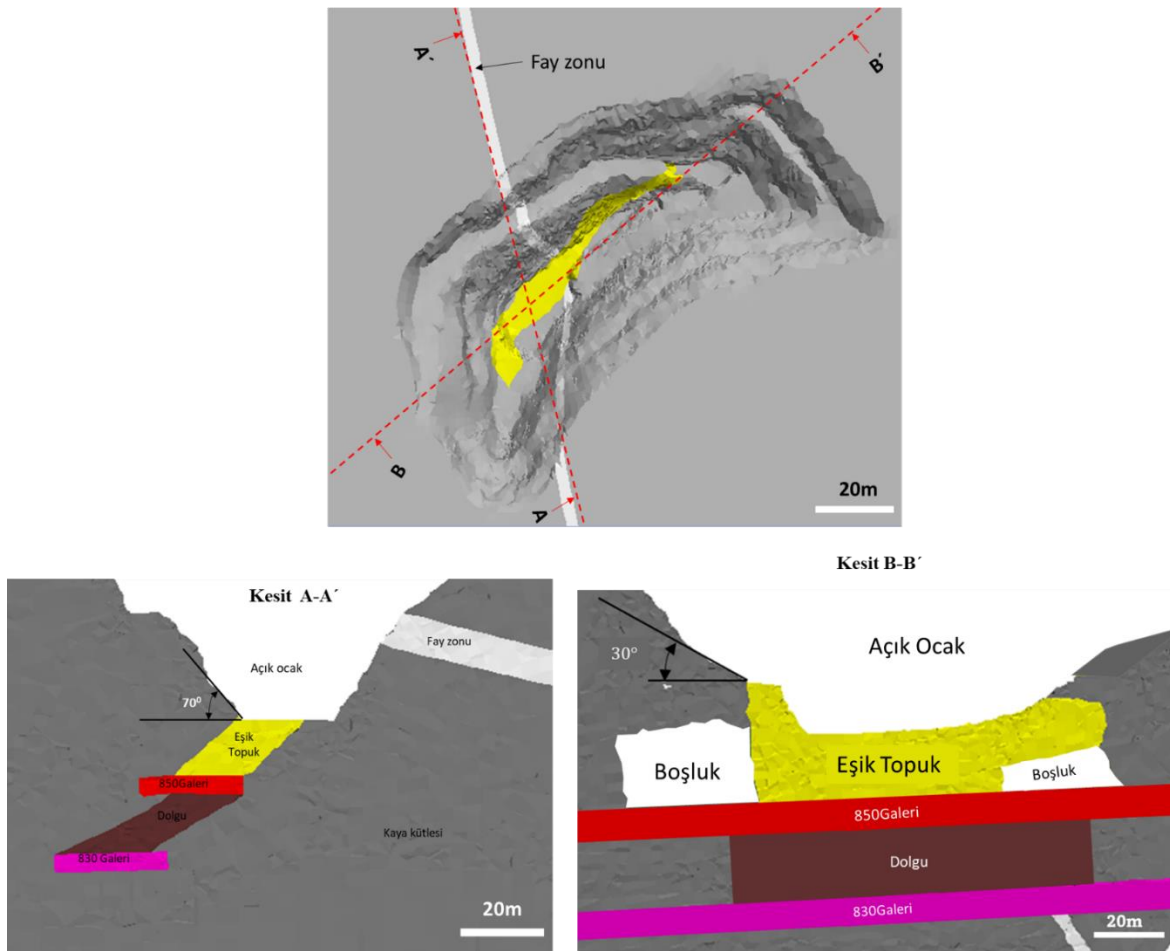


Şekil 5.1. New Luika Altın Madeni'nin (Shanta Altın Madeni) konumu

Maden 2016 yılında yer altı işletmeciliğine geçmiştir. 2002'de değiştirilen ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi kullanılarak 10 m'lik bir CP kalınlığı belirlenmiştir. Dolgulu arakatlı kazı birincil madencilik yöntemi olarak kullanılmış, arakatlı açık kazı ise özellikle sınır kazılarında az miktarda kullanılmıştır. Her bir seviyedeki üretim işlemi, çimentolu agrega dolgusu kullanılarak tavan taşı yönünde dolguların yapılması şeklinde ilerlemiştir.

### 5.1.1. Sahanın Jeolojik ve Jeoteknik Özellikler

NLGM'deki altın cevherleşmesi, ana makaslama zonları içindeki sülfür içeren kuvars damarlarında bulunmaktadır (Manya, 2014). Yaklaşık 2.600 kilometrekarelik bir bölgeye yayılan bu altın sahaları, güneydoğu ve güneybatıda Senozoik Doğu Afrika Rift (EAR) sistemi ile sınırlanan bir plato şekli oluşturmaktadır. BC madenindeki cevher kütlelerinin uzunluğu ocak tabanında yaklaşık 124 m'dir ve yer altı madenine indikçe daha da uzamaktadır. Şekil 5.2'de gösterilen boşluklar (B-B' bölümü), cevher kütlelerinin CP'nin batı ve doğu taraflarından çıkarılmasından sonra kalan kısımları göstermektedir.



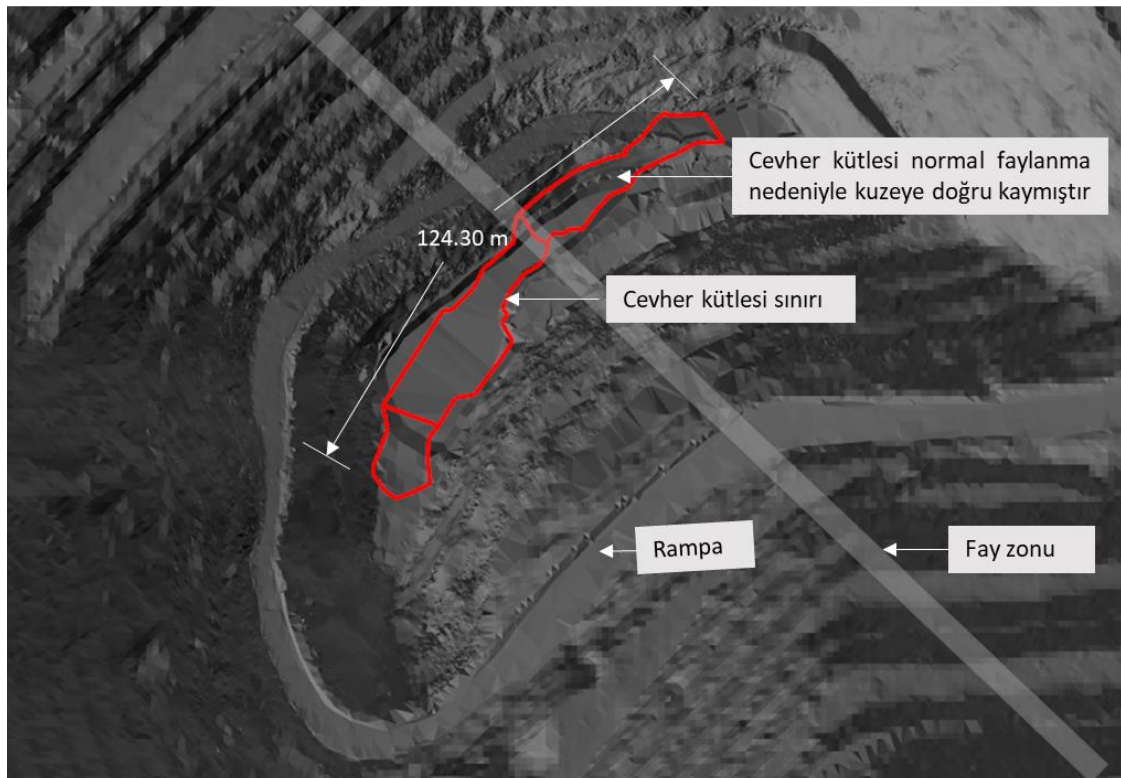
Şekil 5.2. BC madenindeki farklı alanları ve eğim açılarını gösteren kesit görünümleri (kesit A-A') ve ocak doğrultusu boyunca (kesit B-B')

Cevher kütlesi  $35^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında değişen açılarla kuzeye doğru eğimlidir. Dalma açısındaki değişim, Şekil 5.3'te gösterildiği gibi cevherleşmiş damarları kuzeye doğru kaydıran normal faylanmaya atfedilmektedir. Fayın kendisi  $67^\circ$ 'lik bir açıyla

dalmaktadır ve 80° kuzeydoğu yönündedir. Hem Şekil 5.2 hem de Şekil 5.3, 4,5 m genişliğinde (fay düzlem ve zonu) ve ayrılmış granit ile dolu olan fay zonunu göstermektedir. BC madeninde bulunan diğer litolojiler arasında granit, diyorit, granodiyorit ve pegmatit/apelit yer almaktadır ve bunlar cevher kütlesinin tavan ve tabanını oluşturmaktadır. Çizelge 5.1'de bu litolojilerden alınan kaya malzemelerinin laboratuvar testleriyle belirlenen ortalama mukavemet özellikleri listelenmektedir.

Çizelge 5.1. BC madeninde karşılaşılan farklı litolojilerin ortalama kaya malzemesi dayanım parametreleri

Kaya Türü	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Mukavemet (UCS) (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Granit	2640	287	62	0.28
Granodiyorit	2840	285	72	0.27
Diyorit	2830	162	71	0.26
Apelit	2610	229	68	0.30
Kuvars damar	2640	270	84	0.13
yıpranmış granit	2550	50	16	0.30



Şekil 5.3. Kuvars damarının (cevher kütlesi) ana hatlarını gösteren BC madeninin plan görünümü



### 5.1.2. Kaya Kütlesi Özellikleri

Granitik kaya kütlesi ve mineralize kuvars damarı için sırasıyla 70 ve 71 jeolojik dayanım indeksine (GSI) karşılık gelen 75 ve 76 Kaya Kütlesi Derecesi ( $RMR_{89}$ ) değerleri kaydedilmiştir. Fay zonu, 60 GSI ile kübik bloklardan oluşan iyi kenetlenmiş ve bozulmamış bir kaya kütesidir. Kohezyon ( $c$ ) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ), genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütünün gerekliliklerini karşılayacak şekilde belirlenmiştir. BC madenindeki çeşitli litolojiler için tahmin edilen kaya kütlesi özellikleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Genelleştirilmiş Hoek-Brown parametrelendirmesi ve BC madenindeki kaya kütesinin dayanım özellikleri

Özellik	Granit	Kuvars damar	Fay zonu (yıpranmış granit)
$E_h$ (GPa)	32	33	1.58
K (GPa)	28	15	26
G (GPa)	12	15	0.53
Çekme mukavemeti (MPa)	0.56	0.94	0
GSI	70	71	60
$\sigma_{cm}$ (MPa)	29	30	0.11
$c$ (MPa)	14	20	1.6
$\phi$ (derece)	45	35	20
$m_b$	5.48	3.56	0.22
$s$	0.01	0.01	0.00
$a$	0.50	0.50	0.52
$D$	0.80	0.80	1.00

$E_h$  = Deformasyon modülü

$\sigma_{cm}$  = Kaya kütesinin Tek Eksenli Basınç Dayanımı

K = Yığın modülü

$c$  = Kohezyon

G = Kayma modülü

$\phi$  = Sürtünme açısı

GSI = Jeolojik Dayanım Endeksi

$m_b$  = indirgenmiş malzeme sabiti

$s$  ve  $a$  = kaya kütle sabitleri

$D$  = Bozulma faktörü (yerinde bozulmamış kaya kütleleri için 0'dan çok bozulmuş kaya kütleleri için 1'e)

### 5.1.3. Arazi Gerilmeler

BC madeni, güneydoğu ve güneybatı yönlerinde Senozoik Doğu Afrika Rift (EAR) sistemi ile sınırlanan Lupa altın sahaları içinde yer almaktadır. Normalde rift sistemlerinde, bir rift vadisi sistemindeki düşey gerilme doğal olarak yatay gerilmeden daha büyüktür ve en düşük yatay gerilmenin yönü rifte diktir. Böyle bir ortamdaki volkan, yarığa paralel dayklar ve çatlaklar üretmelidir. Buna karşın, EAR'da, özellikle Tanzania'nın kuzey dağlık bölgelerinde yapılan yatay gerilme çalışmaları, ideal değerlere eğik sonuçlar üretme eğilimindedir (Wadge vd., 2016; Fontijn vd., 2010; Delvaux ve Barth, 2010). Örneğin, Wadge vd., (2016) 1800'lerden bu yana patlayan yirmi bir volkanı incelemiş ve sadece yedi patlamanın bu yargıya yakın olduğunu bulmuştur. Fontijn vd., (2010) KB-GD ve KKD-GGB yönünde tektonik hatlar gözlemlerken, Delvaux ve Barth, (2010) en düşük yatay gerilmenin KD-GB yönünde olduğunu öne sürmüştür. Yatay gerilme yönelimindeki bu değişkenlik maden içinde de yerel olarak belirgindir. Örneğin, hafifçe güneyde yer alan yataklardaki ölçümler Delvaux ve Barth, (2010) tarafından önerilen yönelimle uyuşurken, kuzeydeki ölçümler çoğunlukla uyuşmamaktadır.

Bu tez, madencilik sırasında cevher kütlesi çevresindeki yanıl gerilme seviyelerinin yükselme potansiyeli nedeniyle, cevher kütlelerine yarı dik olan KB-GD yönelimini en kötü durum gerilme alanı olarak önermektedir. Arazi gerilme büyüklüğü ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, sayısal analiz için yatay- düşey gerilme oranı (K-oranı) teorik yaklaşım (Brown ve Hoek, 1978; Sheorey, 1994; Sheorey vd., 2001; Seto vd., 2000; Brady ve Brown, 2006) kullanılarak belirlenmiştir. Bölgedeki önemli topografya göz önüne alındığında, sığ derinliklerdeki, özellikle de CP'deki düşey gerilmenin yatay gerilmeden daha az olduğı (K-oranı = 1.8) ve büyük yatay gerilmenin küçük yatay gerilmeye eşit olduğı ( $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ ) varsayılmaktadır.

### 5.1.4. Dolgu Malzemeleri

BC yer altı madeninde dolgu malzemesi atık kaya (çimentosuz), beton kaya dolgu (CRF) veya beton agrega dolgudan (CAF) oluşmaktadır. CRF, 150 mm üst parçacık boyutuna sahip atık kaya agregaları, %5 ila %10 çimento ve 0,7 ila 1,39 arasında değişen bir su-çimento oranından oluşmaktadır. Bu kombinasyon, %93,5 m katı kütle konsantrasyonu sağlamakta ve mukavemeti tehlikeye atabilecek su ve

çimento sızıntısını önlemek için işlenebilirlik ve kuruluk arasında bir denge kurmaktadır. CRF'nin istenen mukavemeti doldurulan boşluk genişliğine bağlıdır. Ortalama 8 m'lik bir açıklık için, 28 günlük kürün ardından yaklaşık 4,4 MPa'lık bir hedef CRF mukavemeti amaçlanmaktadır. Bu, %6,6'yı aşan bir çimento içeriği ve 1,0'ın altında bir su-çimento oranı ile elde edilebilir. Bu yer altı boşluklarının geri doldurulmasının yerel ve bölgesel duraylılığı artırarak çevredeki alanlarda daha güvenli ve verimli madencilik yapılmasını sağlaması beklenmektedir. Atık kaya veya CRF'nin kullanıldığı durumlarda, boşluğu tamamen doldurmak için bazen CAF eklenmektedir.

CAF, madencilik sürecinin yan ürünleri olan atık kaya agregası ve atıkları kullanarak atık kaya ve CRF'ye kıyasla daha yüksek mukavemet değerleri elde etmektedir. CAF, eşik topoğun altında kazılan cevherdeki boşlukları doldurmak için kullanılması nedeniyle bu çalışmada söz konusu durum daha fazla önem kazanmaktadır (bkz. Şekil 5.2). En az 78 MPa tek eksenli basınç dayanımına sahip olan atık kayalar yaklaşık -70 mm parçacık boyutuna kadar kırılmakta olup ayrılmış granit malzemeler kullanım için uygun değildir.

Çizelge 5.3. Dolgu özellikleriyle Açıklık değişimi: çimento bulamacı, atık kaya ve işleme tesisinden çıkan atıkların kütlesi

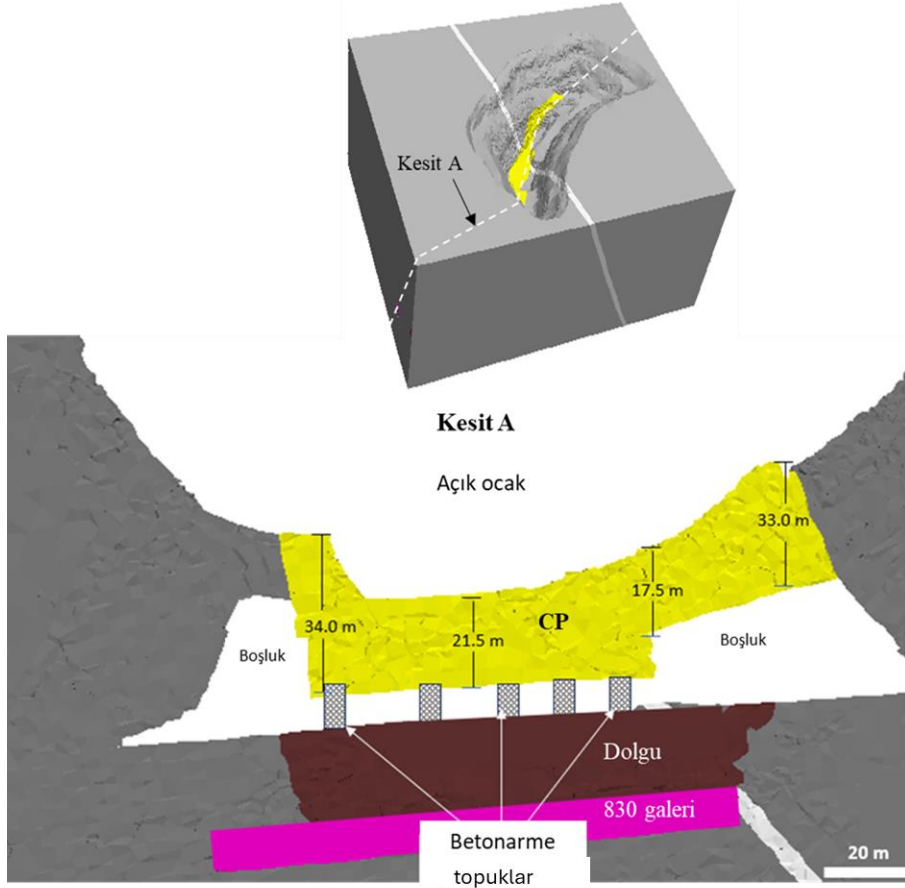
Açıklık (m)	Çimento Miktarı (%)	Su:Çimento	Atık kaya + işleme atıkları agregası (-70mm) (Tons)	Çimento ağırlığı (Tons)	Su ağırlığı (Tons)	Çimento Bulamacı ağırlığı (Tons)
6	0.04	1.7	20	0.86	0.04	0.89
8	0.05	1.4	20	1.01	0.05	1.06
10	0.06	1.3	20	1.16	0.06	1.23
12	0.06	1.1	20	1.37	0.09	1.46
14	0.08	0.9	20	1.76	0.14	1.91
16	0.1	0.7	20	2.1	0.2	2.3
18	0.1	0.7	20	2.22	0.22	2.44

CAF'taki agrega, işleme tesisinden gelen yaklaşık %5 atık ve %95 atık kaya malzemesinden oluşmaktadır. Çimento dozajı ve su-çimento oranı daha önce belirtildiği gibi Açıklık genişliğine göre belirlenmektedir. Çizelge 5.3, ilgili Açıklık genişliğine bağlı olarak 20,89 ila 22,44 tonluk bir CAF serisi üretmek için kullanılan

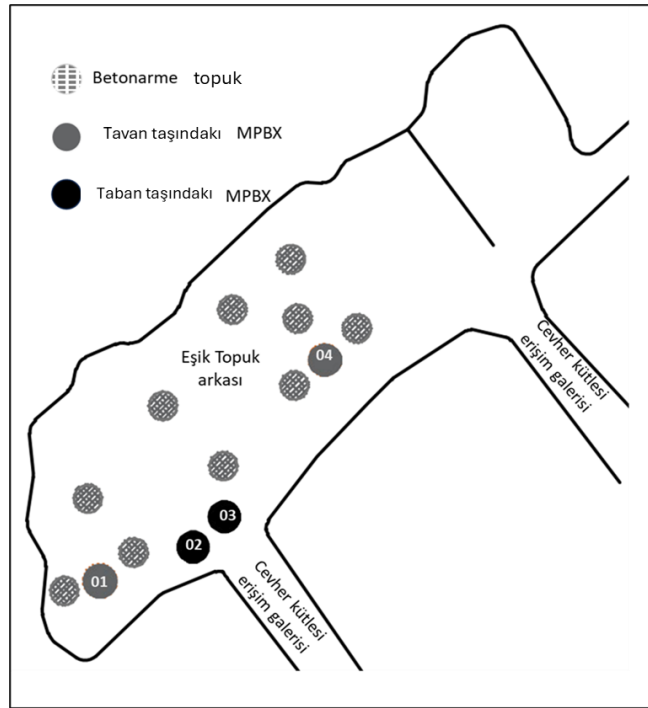
parametreleri özetlemektedir. CP'nin altındaki dolgu açıklığı genişliği, doğu ve batıda 6 m gibi dar bir genişlikten merkezde 16 m'nin üzerine kadar değişen genişliklerle damar uzunluğu boyunca önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Ortalama 8 m'lik bir açıklık genişliği için, hedef CAF sıkışma dayanımı 28 günlük kürün ardından yaklaşık 4,4 MPa'dır. Test edilen numunelerin tek eksenli basınç dayanımı, 0,20 ila 0,26 arasında bir Poisson oranı sergileyerek hedef dayanımı aşmıştır. Yığın yoğunluğu, çimento miktarı ve su-çimento oranına bağlı olarak 2800 ila 2900 arasında değişmektedir. CAF kalitesini artırmak için zaman zaman katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Sayısal modellemede, en az 15 m Açıklık genişliği varsayılmış ve dolgu özellikleri en kötü durum senaryosunu temsil edecek şekilde tahmin edilmiştir. Bu özellikler arasında sırasıyla 0,57GPa ve 0,34GPa'lık yığın ve kayma modülleri bulunmaktadır. Diğer özellikler arasında 2820kg/m<sup>3</sup> yoğunluk, 0,34MPa kohezyon, 35° sürtünme açısı ve 0,049MPa çekme mukavemeti yer almaktadır.

#### **5.1.5. BC Eşik Topuk Özellikleri**

CP'nin düşey kalınlığının açık ocak tabanından itibaren 10 m olduğu tahmin edilmiştir. Tipik olarak sığ ve yüksek eğimli cevher kütleleri için kullanılan modifiye Ölçeklendirilmiş Açıklık yöntemi, 10,5 Q-değeri, 15 m Açıklık ve 2,64 özgül ağırlık ile uygulanmıştır. Ancak, cevher kütlesi tam olarak açık ocağın dibinde değildir. Normal faylanma nedeniyle doğu tarafındaki cevher kütlesi kuzeye kaymıştır. Açık ocak tabanında güvenli bir şekilde kazıyı sürdürmek ve açık ocak içinde dik eğimlerden kaçınmak için, Şekil 5.3'te gösterilen kuzey açık ocak duvarındaki cevher kazılmadan bırakılmış ve CP'nin bir parçası olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, CP'nin kalınlığı dalma yönü boyunca 17,5 m ile 34 m arasında önemli ölçüde değişmektedir. Betonarme topuklar CP'yi arkadan destekleyerek 30 MPa'lık tek eksenli basınç dayanımı sağlamıştır. Tavan taşında (MPBX 01 ve 04) ve cevher taban taşı tarafına (MPBX 02 ve 03), dört adet çok noktalı ekstansometre (MPBX) yerleştirilmiştir. Bu kurulumlar, CP'nin altındaki boşlukların doldurulması ve çevredeki cevherin geri kazanılmasından sonra gerçekleştirilmiştir. MPBX 04, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi fay zonuna daha yakın konumlandırılmış, ardından MPBX 03, 02 ve 01 batıya doğru sistematik olmayan düzensiz mesafelerde yerleştirilmiştir.



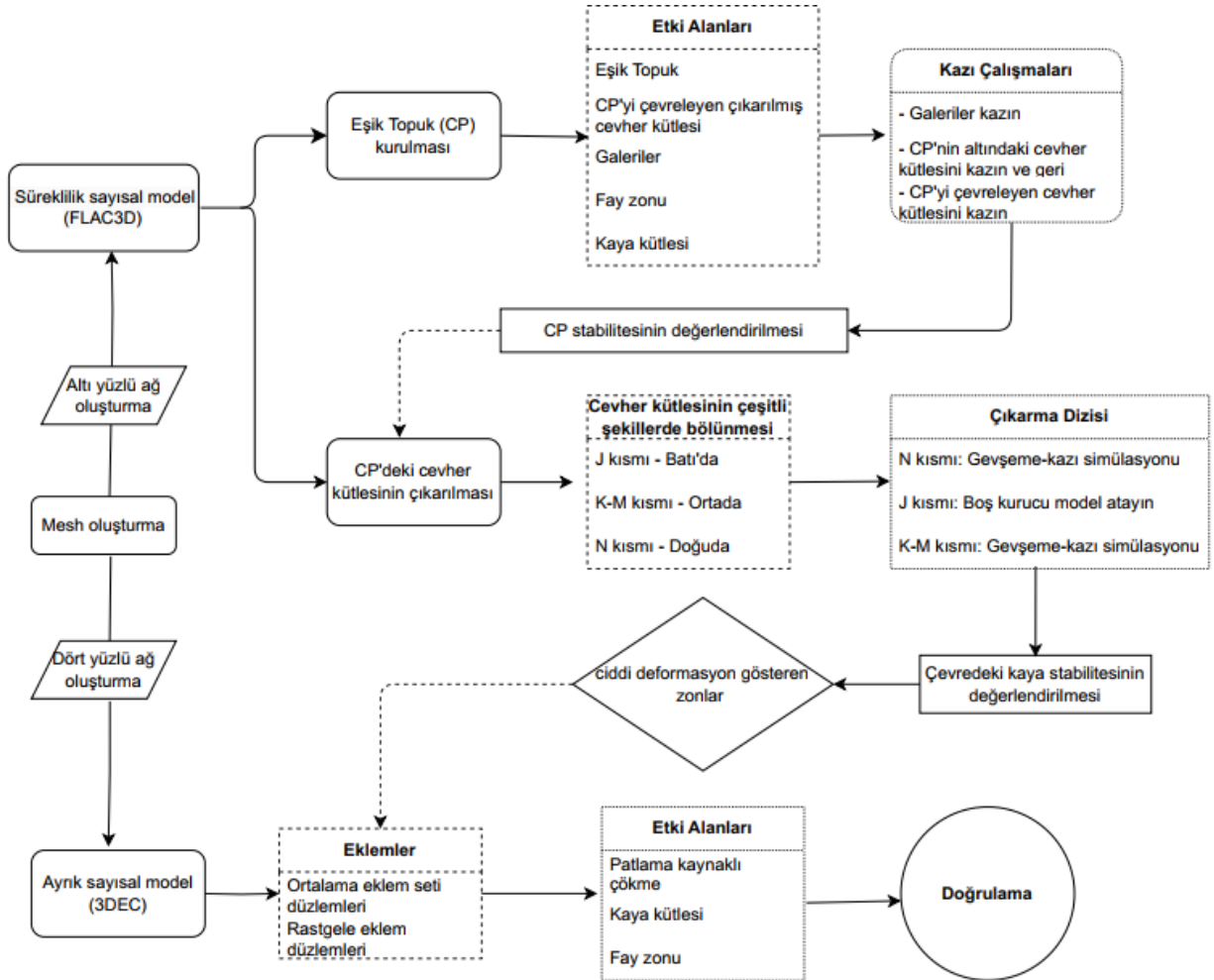
Şekil 5.4. BC madeninde cevher yatağı boyunca, çeşitli konumlardaki CP kalınlığını gösteren kesit görünümü



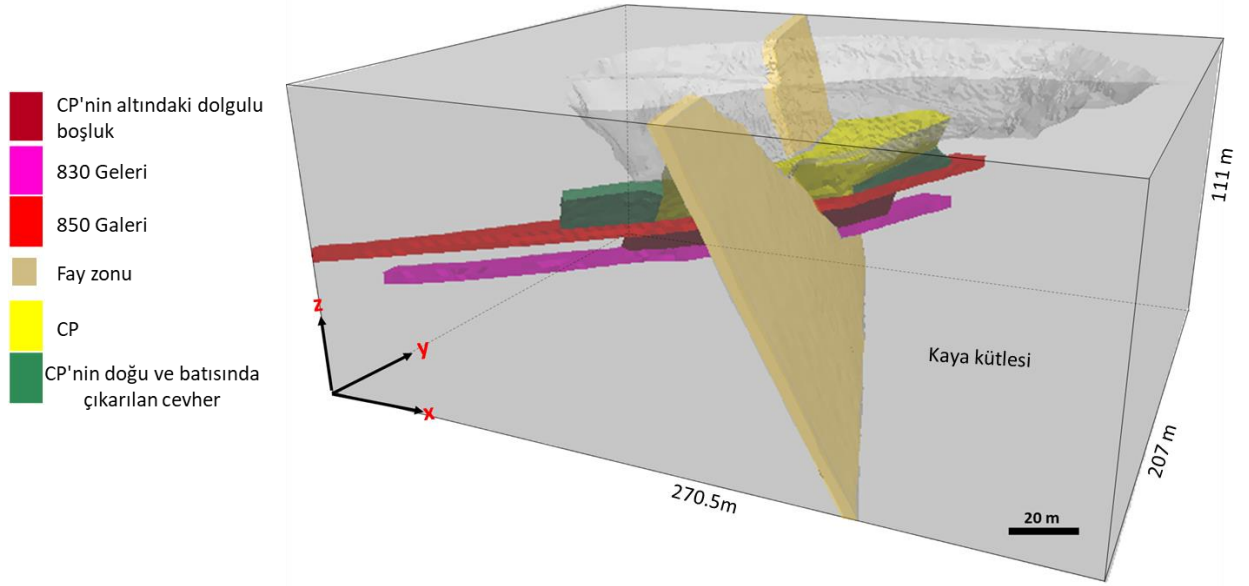
Şekil 5.5. CP arkasındaki MPBX'ler ve betonarme topuklar dağılımı

## 5.2. BC Sayısal Modelleme

Şekil 5.6'daki akış şemasında, sayısal modellerin oluşturulmasında ve CP kalınlık tahmini için analizlerin yürütülmesinde ve ayrıca içine sıkışmış yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasının benzetiminde yer alan genel adımlar gösterilmektedir. BC eşik topuğu oluşturan çeşitli alanları temsil eden yüzeyleri oluşturmak için Şekil 5.7'de gösterildiği gibi Rhinoceros 3D kullanılmıştır. Çevredeki kaya kütle ve kazı bölgeleri simetrik yüzeylerle sınırlandırılmış ve 270,5 m uzunluğunda, 207 m genişliğinde ve 111 m yüksekliğinde dikdörtgen bir kübit oluşturmuştur. Rhinoceros için bir eklenti olan Griddle™, yüzeylerden FLAC3D ve 3DEC için ağ elemanları üretmek için kullanılmıştır. İlgili elemanlardan üretilen ağ yapısı daha sonra FLAC3D ve 3DEC'e aktarılmış, burada yanal destek koşulları uygulanmıştır.



Şekil 5.6. BC madeni örnek çalışması için sayısal modelleme prosedürleri



Şekil 5.7. FLAC3D'de oluşturulan sayısal modelin izometrik görünümü

### 5.2.1. FLAC3D Modeli - Ağ Oluşturma ve Yanal destek koşulları

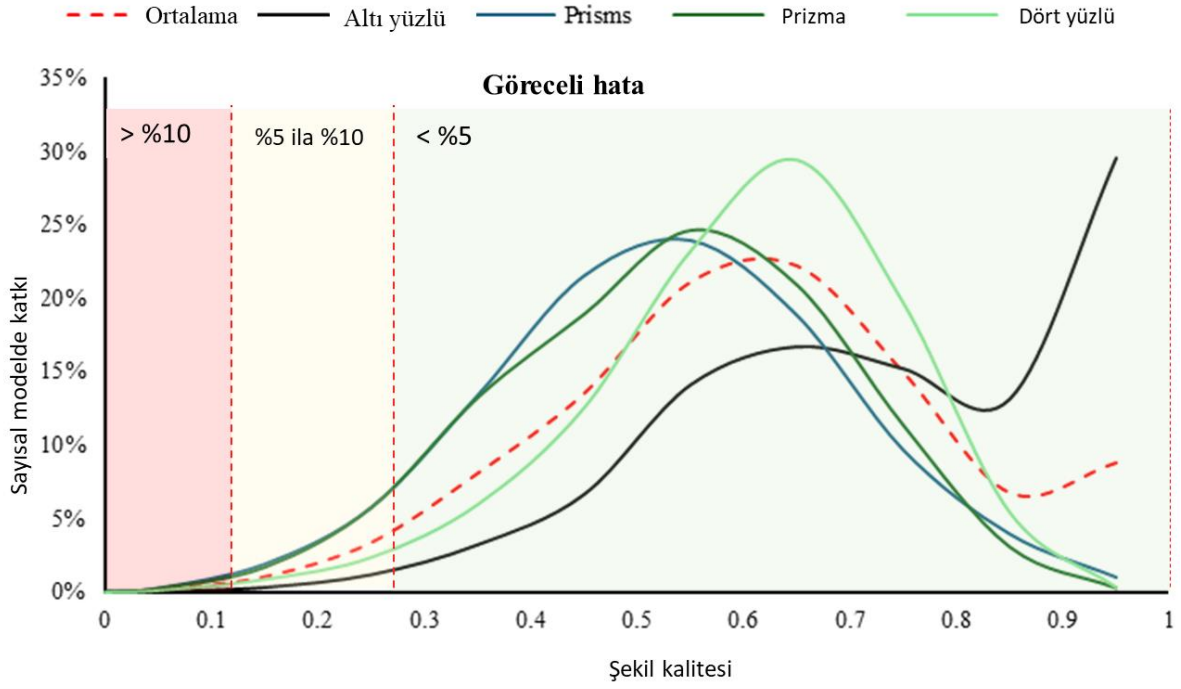
Açık ocak-yer altı madenlerinde bir CP'nin modellenmesi, kaya kütlesi ile çevrili cevher bacaları, yapılar, boşluklar, dolgu malzemesi ve açık ocak dahil olmak üzere birden fazla şeklin birleşimi nedeniyle doğal bir karmaşıklık içermektedir. Bu tür karmaşık yapıların 3B olarak işlenmesi, ayrıklaştırma hataları, yuvarlama yanlışlıkları, sınır koşulu özellikleri, yakınsama engelleri ve parametre hassasiyeti gibi sorunlar ortaya çıkarmaktadır (Börner, 2010; Shapka-Fels ve Elmo, 2022). Bu sorunların çoğunun ele alınması, ağ oluşturma ve yanar destek koşullarının tanımlanmasının ilk aşamalarında başlamaktadır. Sayısal bir modelde doğruluğu sağlamak için yüksek kaliteli ağlar gereklidir. Bunların kalitesi, en-boy oranı, ortogonalite (iç açı), yüz düzlemselliği, çarpıklık ve yapılandırılmış elemanların konikliği gibi faktörler dikkate alınarak değerlendirilebilmektedir (Knupp, 2007). Boy Oranı, bir elemanın en uzun kenarının en kısa kenarına oranını veya bir köşe noddan karşı kenara olan en kısa mesafeyi ifade eder. Şekil kalitesi ise ilgili elemanın en küçük açısının en büyük açısına oranı olarak tanımlanmaktadır. Abbasi v.d., (2013) tarafından yapılan duyarlılık analizleri, küçük en-boy oranları (1.0 ila 3.0) için bağıl hatanın düşük (%5'ten az) kaldığı, ancak daha büyük en-boy oranları için %10'un üzerine çıktığı sonucuna varmıştır. Benzer şekilde, şekil kalitesi 1.0 ila 0.28 (veya ağ yoğunluğuna bağlı olarak 0.18) arasındaki ortogonalite oranları için iyileşmekte ve bağıl hatalar %5'ten az olmaktadır.

Bu çalışmada, modelin yüzeyleri maden düzeninin ana hatlarını çizen DXF dosyaları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sayede sahadaki gözlemlerin kopyalanması ve belirlenen yerlerde kesin simülasyon sonuçlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. MPBX yerdeğiştirme kayıtları, CP üzerinde yenilme ihtimali görülen hassas konumları belirlemek için kullanılmıştır. Daha sonra, bu belirli konumdan CP genişliğinin on katı mesafede bir dış sınır düzlemi tanımlanmıştır. Daha sonra bu düzlemden dikdörtgen bir kübit şekillendirilerek hem CP hem de açık ocak için çevreleyen kaya kütlesi oluşturulmuştur (bkz. Şekil 5.7). Ağ oluşturma için Rhinoceros 3D (CAD yazılımı) için bir eklenti olan Griddle™ kullanılmıştır. Karma ayırıklaştırma tekniği, dört yüzlü gerinim oranı tensörünün ilk değişimini uygun şekilde ayarlayarak ağ elemanlarına daha fazla hacimsel esneklik sağlamak amacıyla ağ oluşturma için benimsenmiştir (Itasca, 2019). Bu teknik, üst üste binen iki çoklu dörtyüzlü gruptan bir eleman oluşturmayı içermektedir. Sonuç olarak, model dört ana ağ şeklinden oluşmaktadır: altı yüzlüler, prizmalar, piramitler ve dörtyüzlüler.

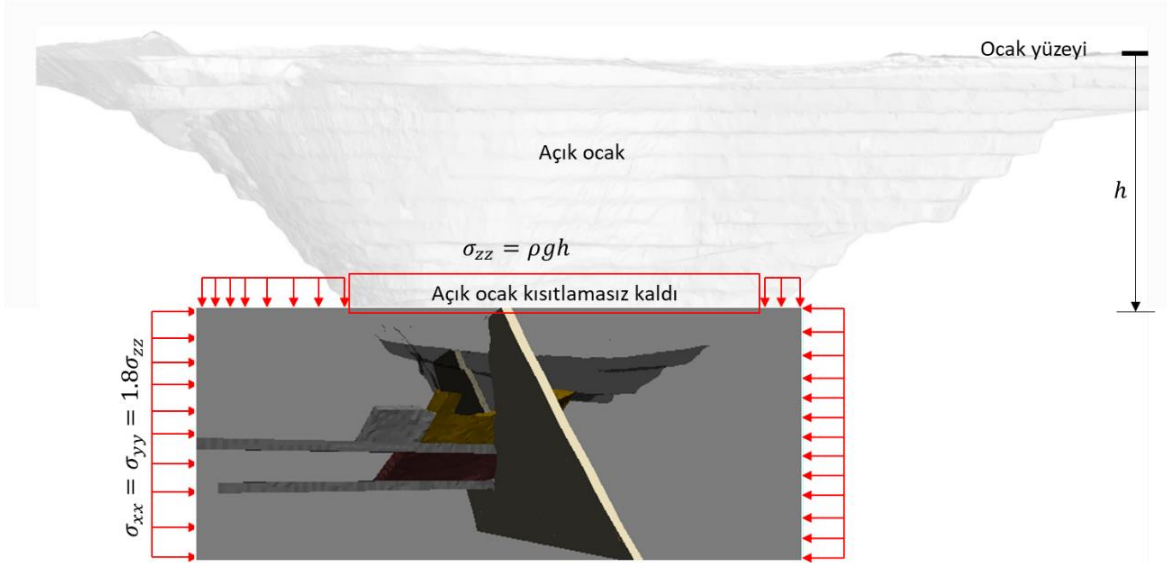
Hassasiyet analizleri, altı yüzlü elemanların en düşük mutlak hatayı sergilediğini, dört yüzlü elemanların ise en yüksek hatayı sergilediğini ortaya koymuştur. Prizmalar, piramit ağ şekillerine kıyasla biraz daha iyi performans göstermiştir (Itasca, 2019; Abbasi vd., 2013). Çevreleyen kaya kütlesindeki ağ boyutlarının kademeli değişimini kontrol etmek için maksimum 0,5 derecelendirme parametresi ayarlanarak tüm kazılara ve fay bölgesine ince ağ uygulanmıştır (Itasca, 2020). En boy oranlarıyla ilgili bağıl hatanın %5'in altında kalmasını sağlamak için ağ şekilleri maksimum 3 m kenar uzunluğu ile sınırlandırılmıştır.

Şekil 5.8, modeldeki belirli nitelikteki ağ şekillerinin dağılımını göstermektedir. Toplam şekil sayısının %5'i haricinde, diğer tüm şekillerin ağ kalitesi 0,28'i aşmakta ve ortalaması 0,65 olmaktadır. Bu dağılım, sayısal simülasyon sırasında şekil kalitesine atfedilebilecek çok düşük bir bağıl hata (yaklaşık %5) olacağı anlamına gelmektedir. Ayrıca, modellemede tipik olarak daha az elverişli olan tetrahedra ve piramitlerin çoğunluğu ortalamanın üzerinde kalite puanları sergilemekte ve bu da sonraki modelin olumlu sonuçlar verme potansiyeline işaret etmektedir.





Şekil 5.8. FLAC3D modelindeki çeşitli ağ elemanlarının ve niteliklerinin katkısıyla ilişkili göreceli hata



Şekil 5.9. BC madeninin modellenmiş kısmına yerinde gerilmelerin uygulaması

Sayısal modellemede anlamlı sonuçlar elde etmek için doğru yanal destek koşulları da çok önemlidir. Bu koşullar, modellenen fiziksel nesnelere, yapay sınırlar veya her ikisinin bir kombinasyonu şeklinde olabilmektedir (Itasca, 2019). Bu çalışmada, makaralar ve gerilmeler de dahil olmak üzere yapay sınırlar, x, y, z yerel eksenleri ile aynı hizada olacak şekilde küboidin dış sınırlarına uygulanmıştır. Makara sınırları

x, y-yerel eksenlerine ve alt simetriye uygulanmıştır. Yerçekimi bir bünye kuvveti olarak tanıtılmış ve ardından yerinde gerilmeler eklenmiştir. Doğal ortamda var olan gerilmeler, madde 5.1.3'te açıklandığı gibi, sınırsız bırakılan açık ocak hariç modeldeki tüm konfigürasyonlara uygulanmıştır (açıklama için bkz. Şekil 5.9).

### 5.2.2. Bünye Modeli Seçimi

FLAC3D, kullanıcılara çeşitli seçenekler arasından seçim yapma ve kendi modellerini oluşturma esnekliği sağlayan çok çeşitli bünye modelleri sunmaktadır (Itasca, 2019). Bu çalışmada bünye modelinin seçimi üç kritik faktör olan sahadaki gözlemler ve kaya kütlesi özellikleri, model analizinin özel hedefleri ve hesaplama etkinliği tarafından yönlendirilmiştir. BC madenindeki CP, yüzeyin yaklaşık 175 m altında, sığ bir derinlikte yer almaktadır. Fay bölgesindeki ayrılmış granit, cevherleşmiş bir kuvars damarı ve çevresindeki granitik kaya külesinden oluşur ve hepsi birbirine iyi şekilde kenetlenmiş kaya oluşumları sergilemektedir. Çevredeki granitik kaya külesindeki süreksizlikler, fay zonu ve kuvars damarında gözlenenlerden nispeten daha aralıklıdır.

Bu bölgelerden elde edilen kaya malzemelerinin mekanik özellikleri Çizelge 5.1'de listelenmiştir. Bu çalışmanın hedefi, CP'nin duraylılığını incelemek ve içinde sıkışmış olan yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasıyla birlikte çevresindeki kaya külesinin ne ölçüde deforme olacağını gözlemlemektir. Bünye modelinin, cevher üretim işleminden önce MPBX'lerle kaydedilen yerdeğiştirmeleri tekrarlaması ve CP cevher üretim işleminin benzetimini yaparken yenilme oluşumunu tahmin edebilmesi beklenmektedir. FLAC3D gerinim yumuşamasını hesaba katan modelleri desteklemekle birlikte, bu özelliğin dahil edilmesi, hesaplama süresinin artırılması da dahil olmak üzere analize karmaşıklık katmaktadır. Ayrıca, CP boşluğunun derhal geri doldurulması ve rehabilite edilmesi, gerilme yumuşaması gibi kaya külesi özelliklerinde üretim sonrası zamana bağlı önemli değişikliklerin azaltılmasına yardımcı olduğu için önemlidir (Wang vd., 2011).

Hem Mohr-Coulomb hem de Hoek-Brown bünye modelleri, malzeme özellikleri ve model analizinin belirli hedefi göz önüne alındığında, bu analiz için eşit derecede uygundur. Bununla birlikte, hesaplama verimliliği açısından, büyük ölçekli sayısal benzetimler için Mohr-Coulomb yenilme ölçütü tercih edilmektedir. Bunun nedeni,

Hoek-Brown ölçütünün özellikle doğrusal olmayan analizlerde yinelemeli yakınsama için daha fazla bellek ve ek hesaplama süresi gerektirmesidir (Itasca, 2019; Su vd., 2022). Çizelge 5.2'deki kaya kütlesi özellikleri Hoek vd., (2002), Brown, (2008) ve Hoek ve Brown, (2019) tarafından açıklandığı gibi Hoek-Brown ölçütünden türetilmiştir. Özellikle kohezyon ve sürtünme açısı değerleri, geri analiz sonuçlarını yöneten sınırlama gerilmesi aralığına bağlıdır. Ocak tabanına yakın dik çevrede yenilmenin yakın olduğu varsayılmıştır (Dintwe vd., 2022). Bu nedenle, eşdeğer Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown ölçütlerinin dikkate alındığı sınırlama gerilmesinin üst sınırı ( $\sigma_{3,max}$ ), Hoek ve diğerleri (2002) tarafından açıklanan denklem (47) kullanılarak tahmin edilmiştir. Daha sonra,  $\sigma_{3,max}$  tüm CP bölgeleri için kohezyon ve sürtünme açısı değerlerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Ancak, bu değerler analizde kullanıldığında, ortaya çıkan örselenme değerleri, ilgili konumlarında MPBX'lerle kaydedilenden önemli ölçüde daha az olmuştur. Dolayısıyla, kohezyon ve sürtünme açısı değerleri MPBX'lerinkine neredeyse benzer örselenmesine yol açana kadar Rafiei ve Martin'in (2020) çalışmasında açıklandığı gibi  $\sigma_{3,max}$  değerinden daha büyük değerlerle birkaç iterasyon gerçekleştirilmiştir.

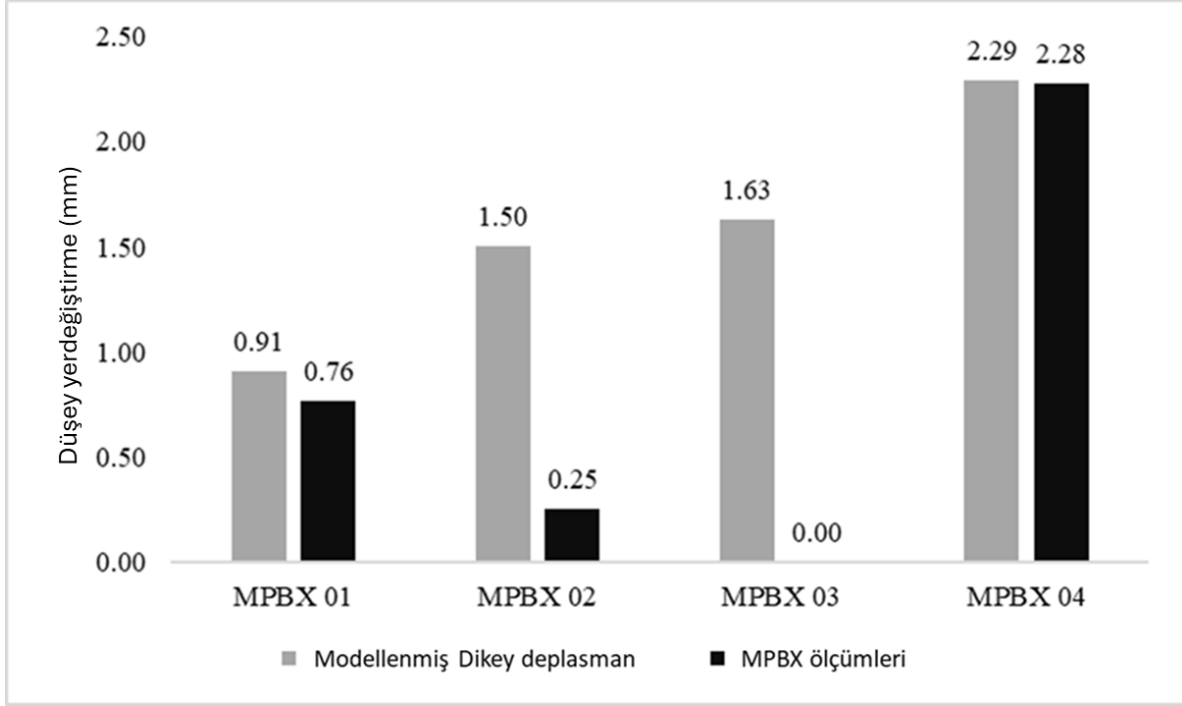
$$\sigma_{3,max} = 0.72\sigma_{cm} \left( \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad (47)$$

Burada  $H$  ve  $\gamma$  sırasıyla şevin yüksekliği ve kaya kütlesinin birim ağırlığıdır.

### 5.2.3. FLAC3D Model Doğrulaması

Ortalama kuvvet oranı 0.00001'e eşit olduğunda modelin dengeye ulaştığı varsayılmaktadır (Itasca, 2017). FLAC3D modelinin doğrulanması tamamen saha gözlemlerine, özellikle de MPBX'lerden elde edilen üç yıllık yerdeğiştirme kayıtlarına dayanmaktadır. Modeldeki düşey yerdeğiştirme kayıtları, MPBX ankrajlarının sahadaki konumuyla birebir aynı konumda kaydedilmektedir. Modelde MPBX kurulum zamanını temsil etmek için CP'nin altındaki bölgeleri kazmak üzere dengeye doğru birkaç adım atılarak yarı eylemsiz etkilerin göçmeyi abartmaması sağlanmaktadır. Bu adımlardan sonra, ilk dikey yerdeğiştirme verileri kaydedilmektedir. Daha sonra modelin dengeye gelmesine izin verilmekte ve nihai yerdeğiştirme verileri elde edilmektedir. Daha sonra her bir konumdaki göreceli dikey

yerdeştirme hesaplanıp Şekil 5.10'da gösterildiği gibi MPBX ile bir karşılaştırma gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.10. Modelinden elde edilen kayıtlar ve MPBX kayıtları için kümülatif görelilikte yerdeştirme

Şekil 5.10'da gösterildiği gibi, tavan taşı için modellenen düşey yerdeştirme kayıtları MPBX 01 ve 04'nkilerle neredeyse mükemmelen bir Şekilde uyuşmaktadır. Sahada yapılan gözlemlere göre MPBX 04'e yakın betonarme topuğun, büyük ihtimalle gerilme yüklemesinin etkisiyle büküldüğü tahmin edilmektedir (bkz. Şekil 5.11). Bununla birlikte, taban taşı düşey yerdeştirme kayıtları MPBX 02 ve 03 tarafından yakalanan kayıtlardan daha büyüktür. Bu farklılığa neden olan önemli bir faktör, Li v.d., (2023) tarafından yapılan çalışmada vurgulanan bir sorun olan yerdeştirme kaybıdır. Yerdeştirme kaybının doğru bir Şekilde llmesi, öncelikle MPBX kurulumunun zamanlamasını sayısal modelinkiyile uyumlu hale getirmenin karmaşıklığı nedeniyle zordur. Genel olarak, model CP'nin sayısal analizi için kullanılabilirlikte birlikte taban taşı davranışının benzetimi güvenilir olamayabilmektedir.



Şekil 5.11. MPBX 04 yakınındaki burkulmuş betonarme topuk

### 5.3. Eşik Topuğun Kalınlığının İncelenmesi

Geçerli CP'nin 10.5 Q-değeri ve 1.0 güvenlik faktörü ile ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi kullanılarak tahmin edilmiş olduğunu belirtmek önemlidir. Dolayısıyla, 15 m'lik bir açıklık için hesaplanmış kalınlık 10 m'dir. CP kalınlığını incelemek ve tahmin edilen kalınlığa bağlı duraylılık sorunlarını anlamak için FLAC3D modeli simüle edilmiş bir laboratuvar deneyimi şeklinde kullanılmaktadır. CP'yi çevreleyen her kazı için yenilme bölgelerinin yanı sıra düşey ve yatay yerdeğiştirmelerin bir değerlendirmesi yapılmaktadır. Kazılar, daha önce Şekil 5.7'de gösterildiği gibi CP'nin altındaki dolgu boşluğunun yanı sıra doğu ve batıdaki kazıları da içermektedir.

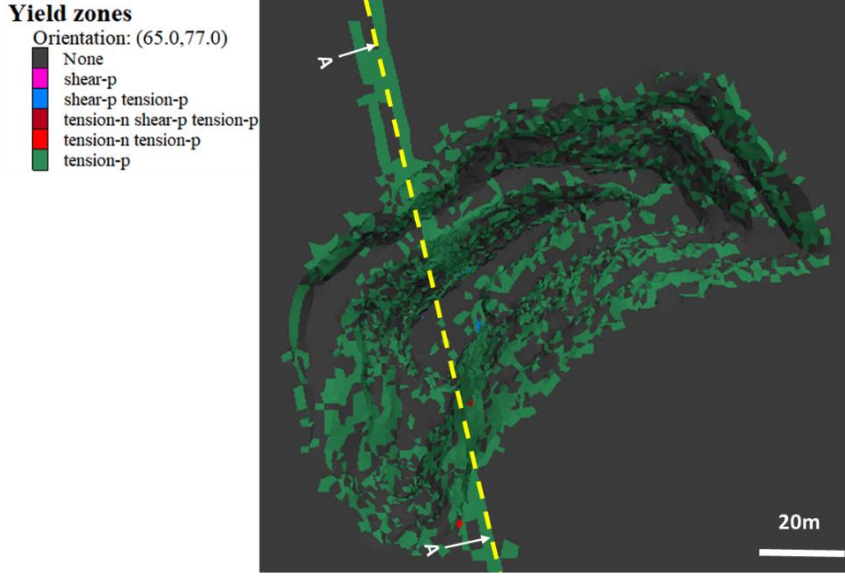
#### 5.3.1. Basınç altında ve Makaslanmış Bölgelerin Analizi

Kaya kütlelerinin plastik olarak deforme olabileceği bölgeleri gösteren yenilme bölgeleri modelde çok önemli bir rol oynamaktadır. Çekme veya makaslama gerilmelerinden kaynaklanmasına bakılmaksızın, plastik yenilmeyi anlamak da önemli örselenmeyi değerlendirmek için gereklidir. Her yenilme bölgesi kaya kütlesi

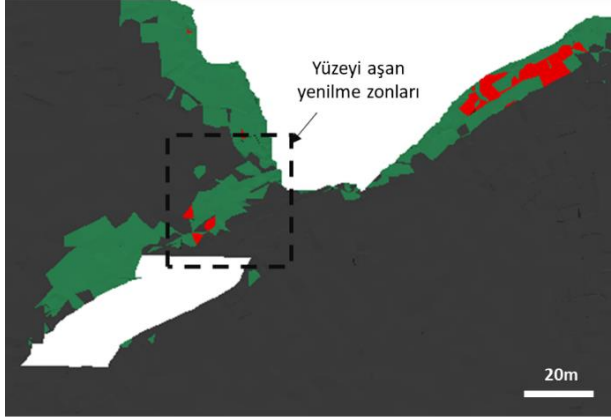
örselenmeye yol açmamaktadır. Kaya kütlesi yüzeyindeki bir bölge yenildiğinde, FLAC3D'nin doğal formülasyonu yüzeyden ayrılmasına izin vermemekte ve böylece Sinha ve Walton, (2019) ve Walton vd., (2016) tarafından gerinim sürekliliği olarak adlandırılan bir kavram olan elemanları arasında sürekli bir gerinim dağılımını korumaktadır. Bu durumun dolaysız bir sonucu, yüzeyde kalan zonların iç zonlar için bir sınır görevi görmesi nedeniyle kazı duvarından daha uzak zonlarda sıkışma oluşmasıdır (Sinha ve Walton, 2019). Örselenme, yenilme zonunun önemli ölçüde devamlılığı varsa doğrulanabilmektedir.

Şekil 5.12'de CP, açık ocak ve etrafındaki kaya kütlesinin plastiklik modeli gösterilmektedir. Ocak, birkaç zonun geçmişte gerilme (tension-p) ile ortaya çıktığını göstermektedir, ancak bu zonların önemli bir sürekliliği yoktur. Öte yandan, fay zonunun yakınındaki yenilme izi daha belirgindir. Şekil 5.12'de sarı çizgi ile işaretlenen A-A' kesiti, bu konumdan farklı üretim aşamalarında, biri CP'nin altındaki cevher çıkarıldığında ve diğeri oluşan boşluk geri doldurulduğunda ve doğu ve batıdaki cevher çıkarıldığında alınmıştır. Kesit, ocak şevinden yer altına doğru uzanan sürekli bir yenilme zonu modeline işaret etmektedir. Bu durum, topuğun altındaki kazılarla ilişkili gerilme yenilme olduğunun göstergesidir. A-A' kesiti ayrıca CP'nin altındaki boşluk doldurulduğunda ve batı ve doğudaki cevher çıkarıldığında aktif gerilme yenilme zonlarının (tension-n) genişlediğini ve devam ettiğini göstermektedir. Bu nedenle, CP'nin çekme yenilmesi sonucu deforme olma olasılığı yüksektir.

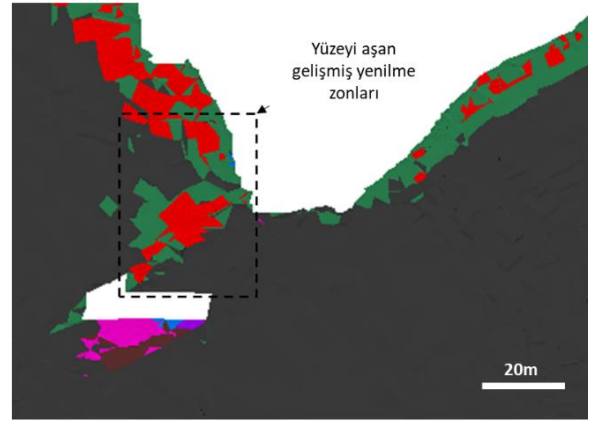
Hız vektörleri, gerilme dağılımı ve yerdeğiştirme konturları yenilme zonundaki potansiyel örselenme tipik göstergeleridir (Adam vd., 2005). CP'nin altındaki cevherin kazılıp çıkarılmasından kaynaklanan düşük gerilmeler yenilme zonu modeline uymaktadır (bkz. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13). Hız vektörleri, dik ocak şevinden CP'nin altındaki kazıya kadar yenilme başlangıcını göstermektedir. CP'nin altındaki müteakip boşluğun geri doldurulması, Şekil 5.13 (b)'de gösterildiği gibi gerilme dağılımında küçük değişiklikler meydana getirirse de düşük gerilmeler hala yer altı kazısından ocak şevlerine kadar uzanmaktadır. Aşağı doğru hizalanmış hız vektörlerine sahip bu düşük gerilmeli zonlar, yenilme zonundaki potansiyel örselenme tahminini güçlendirmektedir.



Kesit A-A'

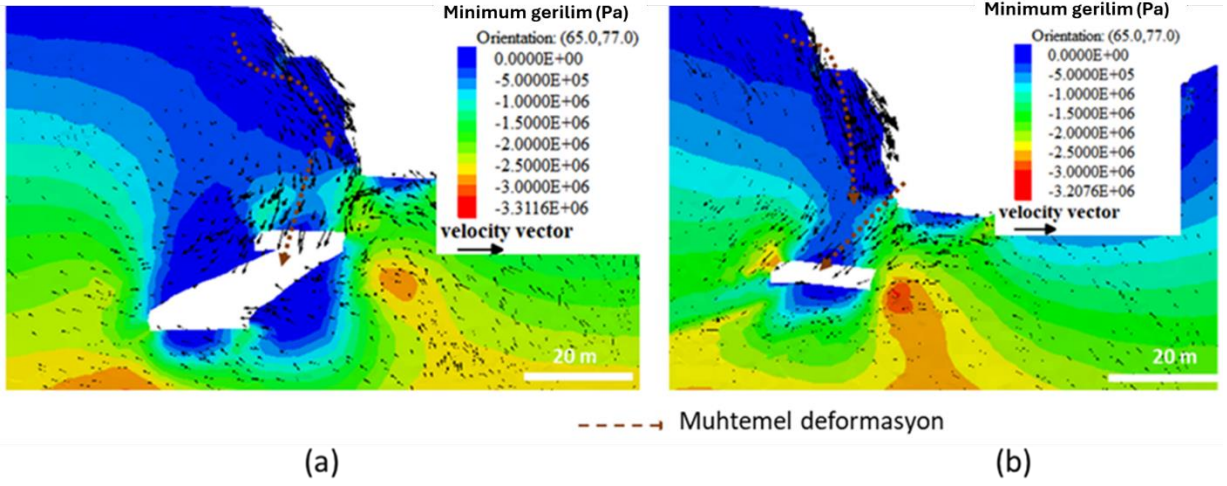


(a)

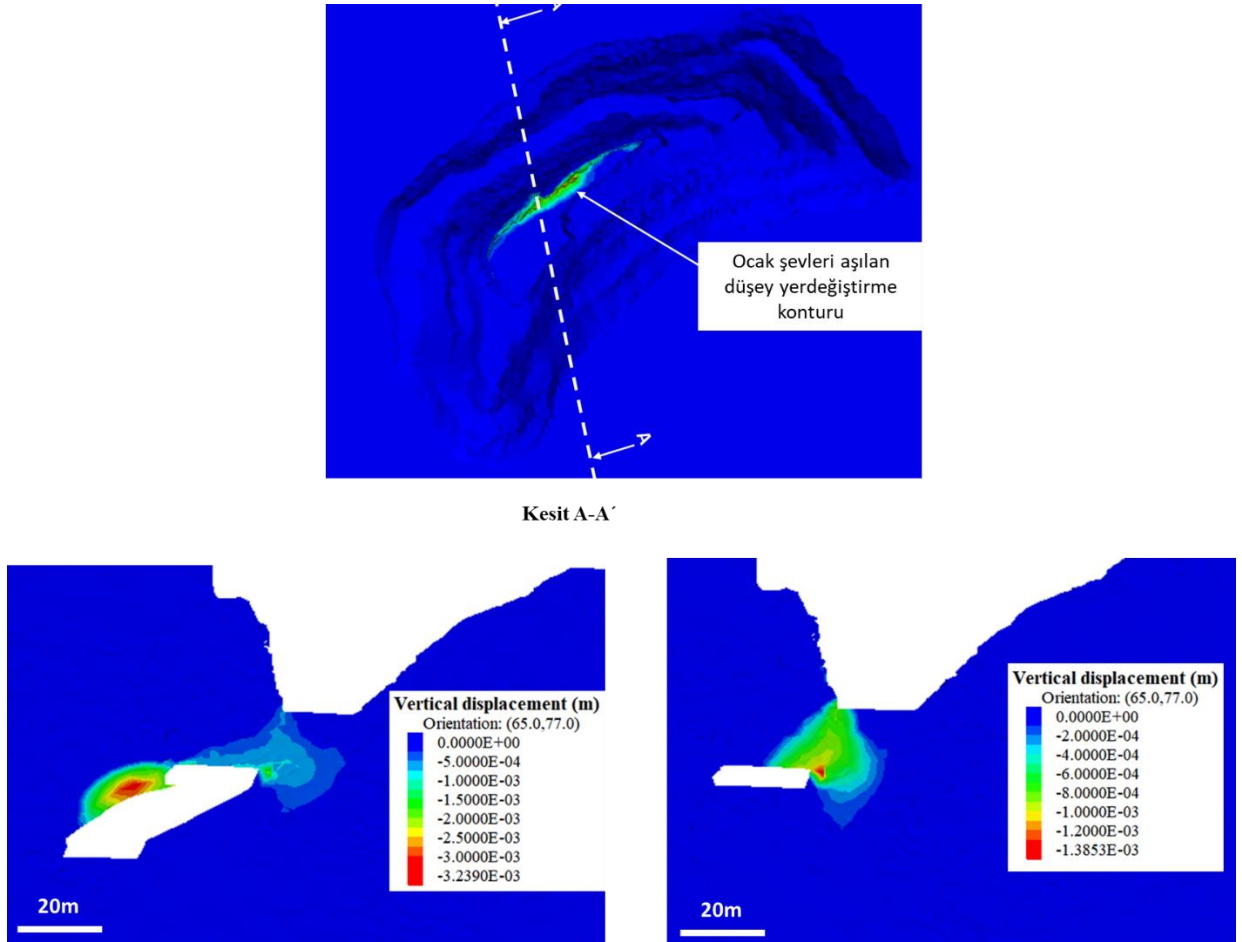


(b)

Şekil 5.12. BC madeninde (a) CP'nin altındaki cevher kütlesinin çıkarılmasından sonra ve (b) müteakip boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin doğusundaki ve batısındaki cevherin çıkarılmasından sonra ocak tabanından yer altına doğru yenilme zonlarının ilerlemesini gösteren kesit görünümü.



Şekil 5.13. A-A' kesitinde (a) CP'nin altındaki cevher kütlesinin çıkarılmasının etkilerini ve (b) ortaya çıkan boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin hem solunda hem de sağındaki cevher kütlesinin çıkarılmasından sonraki değişiklikleri gösteren gerilme konturu ve hız vektörü



Şekil 5.14. (a) CP'nin altındaki cevherin çıkarılmasının ardından ve (b) boşluğun geri doldurulmasından ve CP'nin doğu ve batısındaki cevher kütlesinin çıkarılmasından sonra düşey yerdeğiştirme konturunu gösteren A-A' kesiti



Şekil 5.14'teki düşey yerdeğiştirme konturları, CP'nin altındaki boşluk doldurulduğunda düşey yerdeğiştirmede hafif bir azalma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yüzeye doğru çıkan yerdeğiştirme konturlarının sürekliliği, CP'de bazı potansiyel duraysızlıkların olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak model, CP'nin örselenmeye uğraması halinde, ocak şevinin ocak tabanından yaklaşık 4 m uzaklıktaki bir bölümünün de deforme olabileceğini ima etmektedir (bkz. Şekil 5.14(b)).

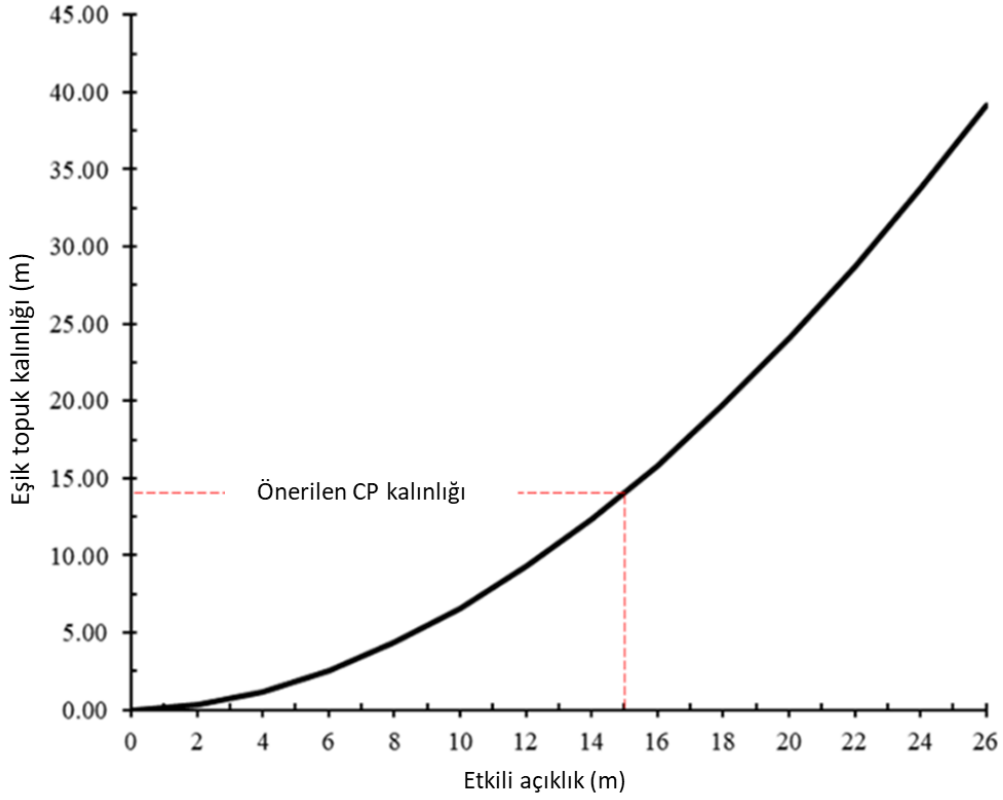
### 5.3.2. Ölçeklendirilmiş Açıklık Yönteminde Kullanılan Parametrelerin Analizi

Bölüm 5.1.5'te belirtildiği üzere, CP'nin kalınlığı 15 m olarak topuk açıklığı 10 m ve 10,5 Q-değeri için tahmin edilmiştir. Aynı zamanda Carter (2014), büyük bir zayıf zonun bir CP ile kesişmesi durumunda, uygun Q-değerlerinin atanması açısından zayıf zonun kontrol eden zayıflık olarak değerlendirilmesi gerektiğini öne sürmektedir. BC CP, fay zonundaki ayrılmış granitin Q-değerine, yani  $Q = 6,5$ 'e dayalı olarak tahmin edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, sığ dalımlı CP açıklığı (dalma açısı  $< 45^\circ$ ) durumunda, Carter vd., (2002) CP'nin "etkin açıklık" açısından tanımlanmasını önermiştir. Etkin açıklık, tavan taşının uzunluğu ( $L_H$ ), CP'nin dalma açısı ( $\theta$ ) ve olası yenilme açısı ( $\xi_L$ ) kullanılarak, denklem (43) ve (44)'te gösterildiği gibi matematiksel olarak hesaplanabilmektedir.

Fay zonuna yakın tavan taşının dalma uzunluğu,  $L_H = 21,5$  m, denklem (43)'te ikame edilerek hesaplanmıştır. Bu uzunluğun seçimi, bu bölgede önemli bir kırılma olasılığı olduğunu gösteren sayısal analize dayanmaktadır. Dolayısıyla, uygun özellikler ayrılmış granit fay zonunu, yani Q-değeri = 6,5, cevher kütlesi eğimi,  $\theta = 35$  dereceyi, sürtünme açısı,  $\phi = 45^\circ$  ve yenilme açısı,  $\xi_L = 81^\circ$ 'yi içermektedir. Etkin Açıklık  $S_{Eff} = 15$  m olarak tahmin edilmektedir. CP kalınlığı, CP açıklığı (S) etkin CP açıklığı ( $S_{Eff}$ ) ile değiştirilerek denklem (41) ve (42) kullanılarak tahmin edilebilmektedir. BC madenindeki CP'yi tahmin etmek için kullanılan güvenlik faktörünün aynısı varsayılır. Şekil 5.15'te BC madenindeki çeşitli etkin Açıklıklar için potansiyel CP kalınlığı gösterilmektedir ve yeni önerilen kalınlık 14 m'dir.

BC madenindeki CP kalınlığının başlangıçta düşük tahmin edildiği artık açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ek destek sağlamak için Şekil 5.4'te gösterilen betonarme direkler tepe noktasının altındaki galeriye yerleştirilmiştir. Şekil 5.11'de

gösterildiği gibi, bu betonarme direklerden birinde gözlemlenen burkulmanın nedeni gerilme yenilmesi nedeniyle oluşan yerdeğiştirmedir.

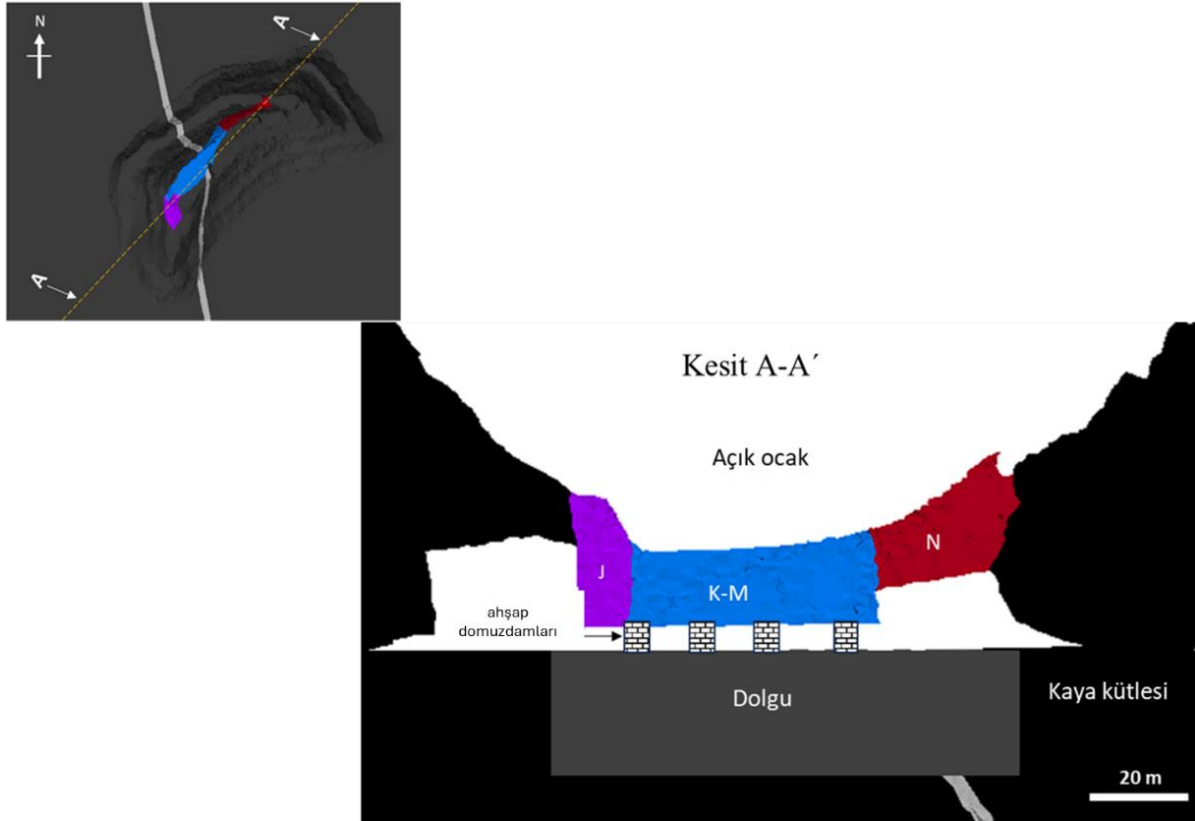


Şekil 5.15. BC madenindeki çeşitli etkili açıklıklar için tahmin edilen CP kalınlığı

#### 5.4. Eşik Topuğun Üretilmesi

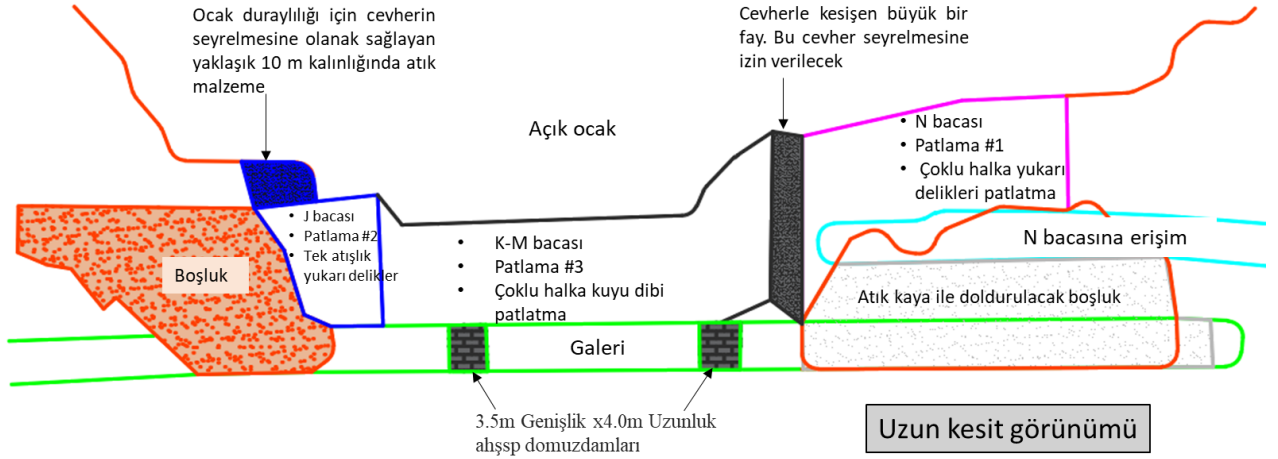
Bu çalışma sırasında CP yüksek tenörlü cevherinin üretilmesi ile ilgili tartışmalar devam etmekte olduğundan dolayı, bu durum CP cevherinin üretilmesinden sonra çevredeki kaya kütlelerinde oluşabilecek deformasyon veya yenilmenin boyutunun anlaşılmasının önem taşıdığını göstermektedir. BC madenindeki CP cevheri için üretim planı, üretim ve rehabilitasyonun ardından yer altı madencilik faaliyetlerinin yeniden başlatılması yönündeki olumlu beklentiden kaynaklanmıştır. Bu plan, (i) BC madeninde beklentilere kıyasla düşük tenörlü cevherin hayal kırıklığı yaratması ve (ii) üretim hedeflerini karşılarken NLGM'deki diğer yataklarda daha fazla gelişmeyi destekleme gerekliliğinden kaynaklanmıştır. CP, 8,4 g/t tenörlü yaklaşık 70.000 ton cevher içermektedir. Şekil 5.16'da bu üretim rakamlarını sağlayabilecek CP duraylı yapıları gösterilmektedir. CP cevher çıkarımı sırasında geçici duraylılığı korumak

için betonarme direkler ahşap domuzdamları ile değiştirilmiştir. CP, J, K-M ve N duraylı yapılar olmak üzere üç duraylı yapıya ayrılmıştır.



Şekil 5.16. CP'deki cevher kütlelerini birkaç kısma (duraylı yapılar) ayrılmış olarak gösteren kesit

Yenilmenin boyutunu doğru bir şekilde anlamak için, CP cevher üretiminin benzetimi sahada uygulanması planlanan sıralamayı tam olarak temsil etmelidir. Bu sıra, Şekil 5.17'de gösterildiği gibi, N bacası oluşturularak başlamakta, J bacasına doğru ilerlemekte ve K-M bacası ile sonuçlanmaktadır. Bu dizilim, uygunluğu ve güvenlik önceliği nedeniyle seçilmiştir. Örneğin, ocak şevinin bir kısmını içeren N'deki kazma işlemi, ocak tabanında delme ve patlatma işlemlerinin gerçekleştirilmesi halinde sorunlar yaratabilecektir. Ayrı bir yer altı galerisi oluşturularak, N'deki cevher diğerlerinden önce çıkarılabilmekte ve güvenlikten ödün vermeden yukarı delikli halka patlatma teknikleri kullanılabilir. Ocak tabanının engebeli ve eğimli olması nedeniyle J cevherinin çıkarılması için bir yer altı galerisi gerekmektedir. Personel ve ekipmanın potansiyel olarak duraysız K-M'ye maruz kalmasını en aza indirmek için tek patlatmalı kuyu içi madencilik tercih edilmektedir. Son olarak, K-M cevheri en son ocak tabanından kuyu içi halka patlatma yoluyla çıkarılmaktadır.



Şekil 5.17. CP cevher üretim planı

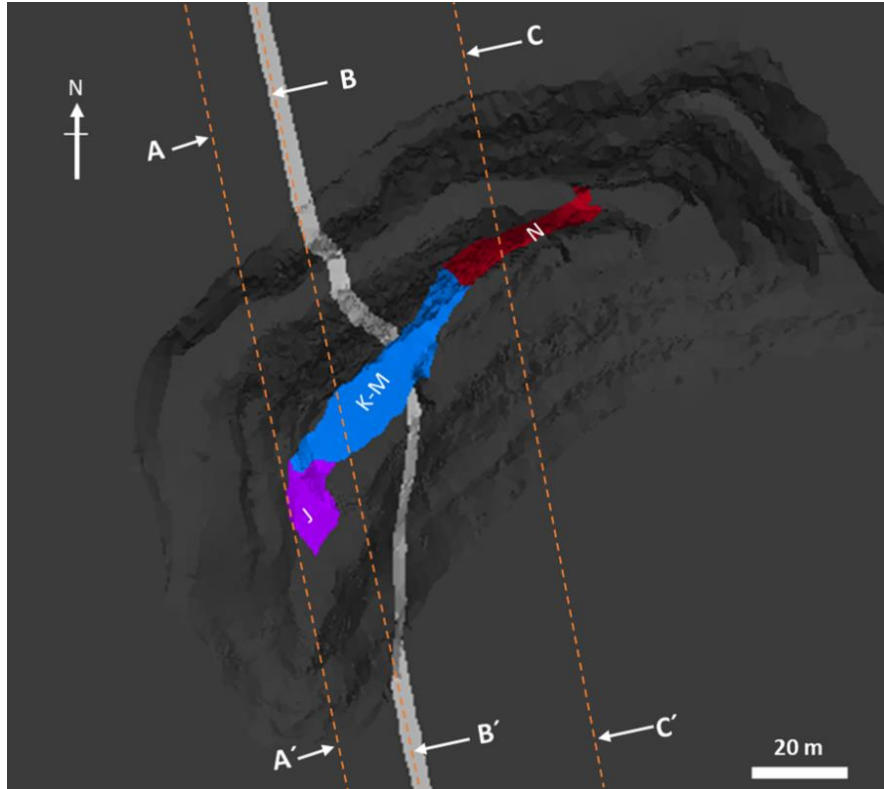
## 5.5. Eşik Topuk üretiminin Sayısal Benzetimi

BC madeninde CP cevherinin üretimine bağlı örselenme veya yenilme benzetiminde Şekil 5.6'da sunulan akım şemasında gösterildiği gibi iki yaklaşım kullanılmaktadır: süreklilik ve ayrık yöntemler. CP kalınlığını değerlendirmek için kullanılan aynı FLAC3D modeli, yine CP yüksek tenörlü cevher üretiminin sürekli benzetimi için de kullanılmaktadır. FLAC3D hem tek patlatma atışını hem de halka patlatmayı benzetimini yapabilmektedir. Tek patlatma atışının benzetimi, ilgili bölgeleri ortadan kaldırarak veya boş bir bünye modeli oluşturarak sağlanabilmektedir. Boş bünye modeli, ilgili zonların özelliklerini etkin bir şekilde sifira indirerek tek bir patlatma atışının etkisini yansıtmaktadır. Halka patlatma benzetimi yapılırken, kademeli cevher üretimi, zonların sertliği, gerilmeleri ve yoğunlukları azaltılarak gerçekleştirilir. Bu doktora tezinde, FLAC3D tarafından oluşturulan örselenme zonlarının (plastik zonlar, dikey yerdeğiştirme konturu, gerilme dağılımı ve hız vektörleri gözlemlenerek tahmin edilmektedir) anlaşılmasını geliştirmek için Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) kullanılmaktadır. Ayrık eleman modellemesi için DEM'e dayalı üç boyutlu bir sayısal program olan 3DEC, kırıkların ve süreksizliklerin etkisini anlamak için kullanılacaktır.

### 5.5.1. FLAC3D ile Süreklilik Analizi

CP'den oluşturulan her bir baca, modelde düşey yerdeğiştirme ile belirtildiği üzere, kalan kısımlardaki ve çevredeki kaya kütleindeki örselenmeyi arttırmaktadır. 3B model içindeki mekanizmaları kavramak için A-A', B-B' ve C-C' olmak üzere üç kesit

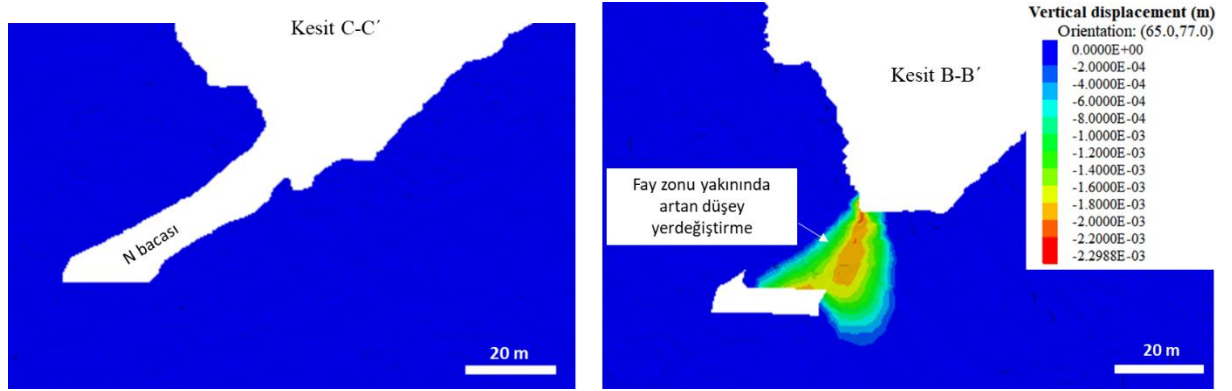
kullanılmıştır. Bu kesitler, Şekil 5.18'de gösterildiği gibi, modeli doğuda J bacası boyunca (A-A'), fay zonu boyunca ve K=M bacası boyunca (B-B') ve batıda N bacası boyunca (C-C') ayırmaktadır. Şekil 5.19'daki C-C' kesitinde gösterildiği gibi, doğudaki N bacasının oluşumu çevredeki kaya kütlelerinde önemli bir yerdeğiştirme ortaya çıkarmamaktadır. Bununla birlikte, B-B' kesitinde gösterildiği gibi, Şekil 5.14'teki önceki değerlerle karşılaştırıldığında, özellikle K-M yapısı içinde düşey yerdeğiştirmede kayda değer bir artış görülmektedir. Bu eğilim, Şekil 5.20'de gösterildiği üzere, J bacasının oluşturulmasıyla da devam etmektedir. Dolayısıyla, fay zonu içindeki yerdeğiştirme birikiminin ana kaynağının belirlenmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.



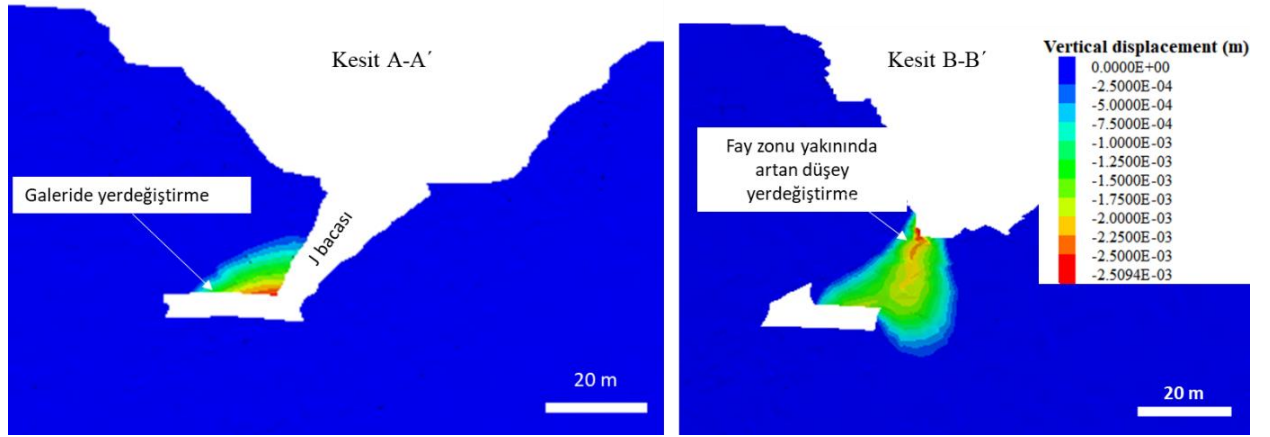
Şekil 5.18. Analiz için kullanılan kesitleri gösteren FLAC3D modelinin plan görünümü

Fay zonu yakınındaki artan yerdeğiştirme, CP cevher üretimi sırasında kaya kütlelerindeki ani gerilme salınımından etkilenmektedir. Şekil 5.13'teki cevher üretiminden önceki gerilme dağılımı ile J ve N bacaları oluşturulduktan sonraki durum karşılaştırıldığında (Şekil 5.21), tavan taşındaki ve ocak tabanına yakın ocak şevlerindeki gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Boşluklar geri doldurulmadığı ve

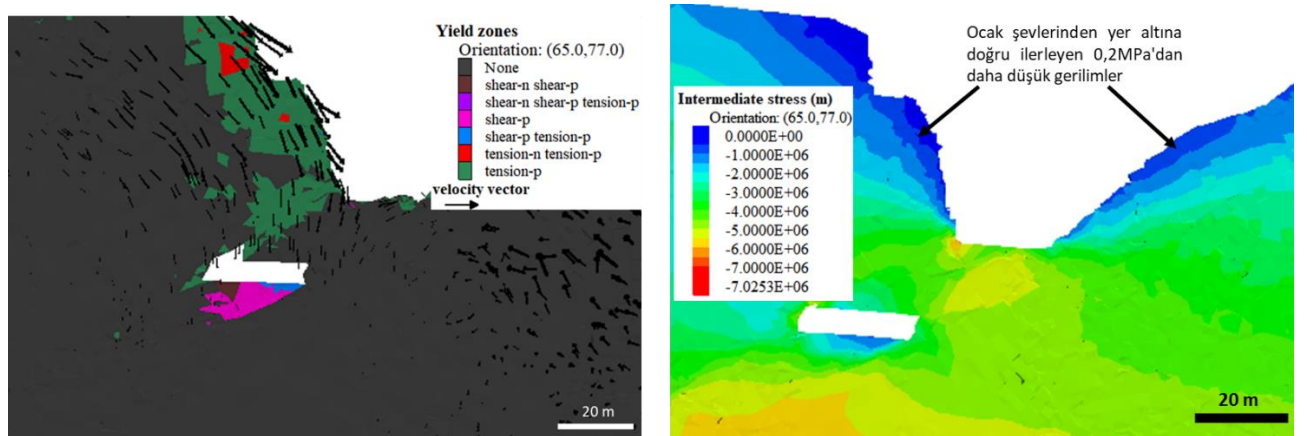
kaya kütlesi derhal rehabilite edilmediği takdirde gerilme gevşemesi meydana gelebilmektedir.



Şekil 5.19. C-C Kesiti: N bacasının oluşumunu takip eden sağlam duvarlar. Kesit B-B': N bacasının oluşumundan sonra fay zonu yakınında artan düşey yerdeğiştirme



Şekil 5.20. Kesit A-A': J bacasının oluşturulmasını takiben yer altı galerisinde artan yerdeğiştirme. Kesit B-B': J ve N bacalarının oluşumundan sonra fay zonu yakınında artan düşey yerdeğiştirme

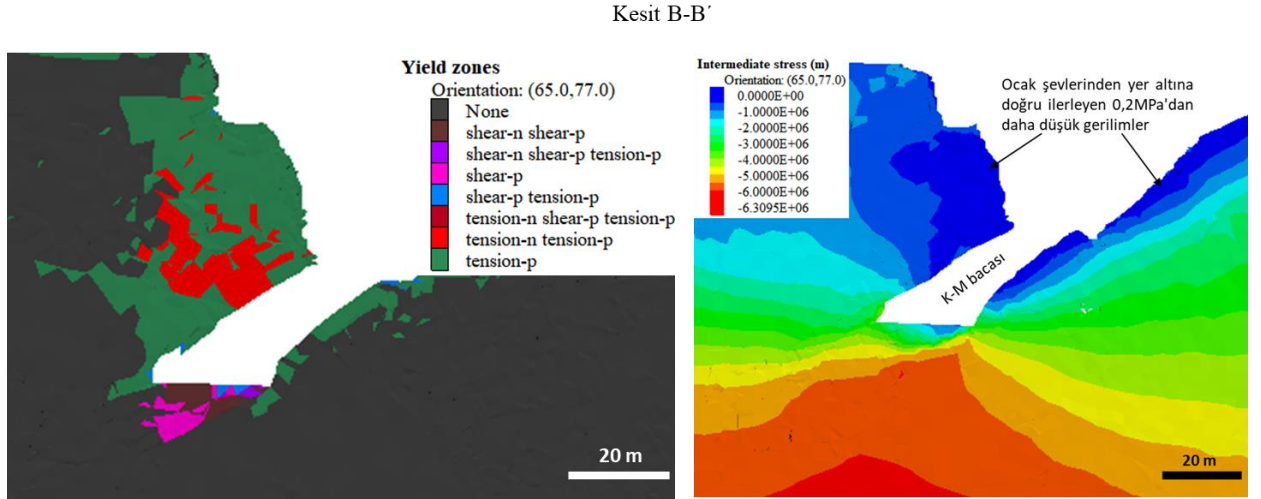


Şekil 5.21. N ve J bacalarının oluşumundan sonra gerilme dağılımını, hız vektörlerini ve yenilme zonlarını gösteren fay zonuna yakın bir kesit

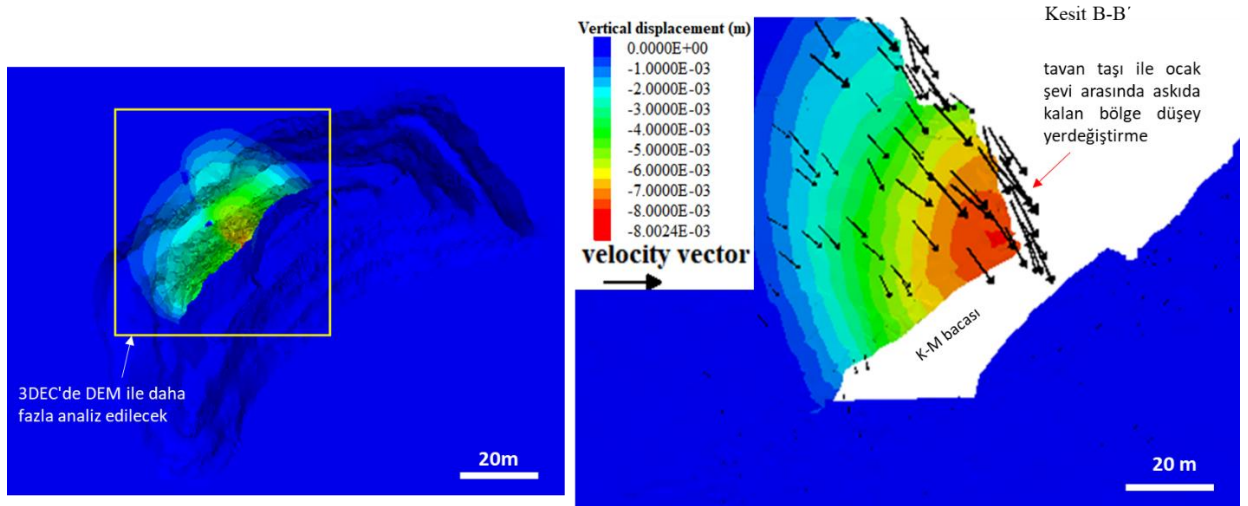
Mohr-Coulomb bünye modeli yalnızca sınırlı tahminler sunabildiğinden, gerilme gevşemesi fenomeni gibi yenilme sonrası örselenmenin doğru bir şekilde tahmin edilmesi zordur. Alternatif olarak, gerinim yumuşatma Mohr-Coulomb plastisite modelinin kullanılması, gerilme gevşemesinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlayabilecektir. Ayrıca, CP cevheri üretiminin çevresel hassasiyeti nedeniyle, müteakip boşluğun derhal geri doldurulması ve kaya kütlesi rehabilitasyonu şiddetle tavsiye edilmektedir. Buradaki gerilme gevşemesi Stewart ve Trueman, (2004) temel alınarak tahmin edilmiş olup en azından iki asal gerilme 0,2MPa'nın altında olduğunda tam gerilme gevşemesi beklenmektedir.

Şekil 5.21'de, yenilme zonu içindeki hız vektörleri açıkça aşağı doğru hizalanarak yerçekimi kaynaklı yenilme olduğunu göstermektedir. Bu hizalama, kaya kırıklarının ocak şevlerinden veya CP arkasından inebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, personel ve makinelerin bu oldukça duraysız kaya kütesine maruz kalmasını önlemek için kalan K-M bacasını ocak tabanından oluşturmak pratiktir. Ayrıca, ocak şevinin duraysız yapısı göz önünde bulundurulduğunda, ocak tabanında delme ve patlatma işlemleri çok dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmelidir.

K-M bacasının oluşumundan sonra, fay zonuna yakın yenilme zonunda önemli bir genişleme meydana gelmekte ve kazının genişliği neredeyse iki katına çıkmaktadır. Bu genişleme, Şekil 5.22'de gösterildiği gibi en çok tavan taşı tarafında belirgindir. Askıda kalan bölge, tavan taşı ile ocak şevinin arasında şekillenmektedir. Askıda kalan bölgedeki gerilme seviyeleri, Şekil 5.22'deki ara gerilme konturundan da anlaşılacağı üzere 0,2MPa'dan daha düşük değerlere inmektedir. Yenilme bölgesinin düzgün devamlılığı, aktif gerilmenin (tension-n) varlığı ve aynı bölgede indüklenen gerilmelerle birlikte, CP cevherinin üretiminin ocak şevi de dahil olmak üzere çevredeki kaya kütesinin yenilmesine yol açabileceğine dair ihtimali artırmaktadır. Tüm CP bacalarının oluşumundan sonraki düşey yerdeğiştirme konturu Şekil 5.23'te gösterilmektedir. Bir kez daha, en yüksek yerdeğiştirme fay zonunun çevresinde gözlenmektedir. Bu belirli bölgede, kaya bloklarının yerinden çıkarak ocak tabanına düşme veya hız vektörlerinde gösterildiği gibi eğimli fay zonu boyunca kayma riski bulunmaktadır (bkz. Şekil 5.23'teki B-B' bölümü).



Şekil 5.22. CP cevher üretimi sonrası fay zonuna yakın yenilme zonları ve gerilme dağılımı



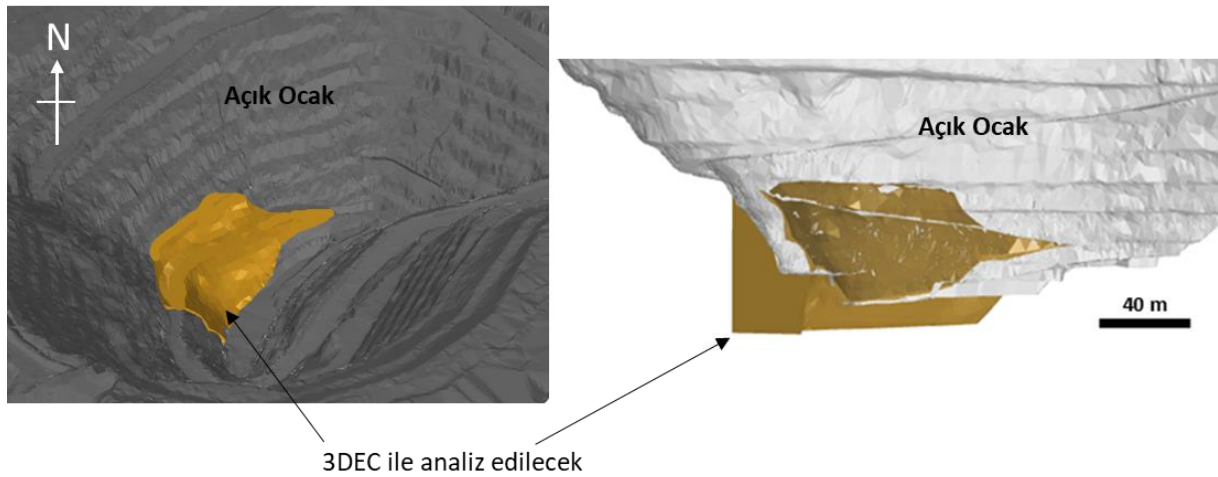
Şekil 5.23. Tüm bacaların oluşumundan sonra yerdeğiştirme konturunu gösteren fay zonuna yakın üstten görünüm ve kesit (B-B' kesiti)

## 5.6. 3DEC ile Sayısal Modelleme

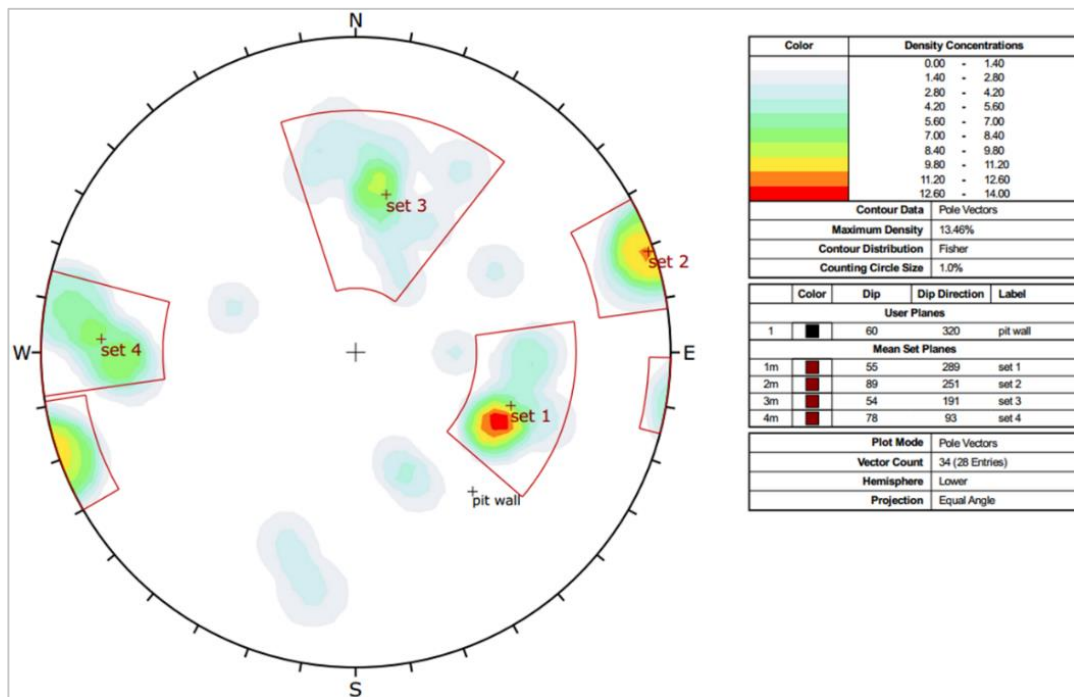
FLAC3D analizi, yenilme mekanizmalarının ortaya çıkışını etkileyebilecek önemli süreksizlikleri hesaba katmamaktadır. Dolayısıyla, FLAC3D modelinin Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te gösterilen deforme olmuş bölgeleri 3DEC'de daha fazla analize tabi tutulmaktadır. Yer altı madenin açık ocak ortamının bir devamı olduğu düşünüldüğünde, tabana yakın ocak şevinde gözlemlenen süreksizlikler CP bacalarının oluşumu sırasında kaya kütlelerinin duraylılığını etkileyebilmektedir. Bu süreksizlikler dikkatli bir şekilde haritalanmış ve 3DEC modeline entegre edilmiştir. 3DEC modeli üç farklı kaya bölgesinden oluşmaktadır: kaya kütlesi, patlatma



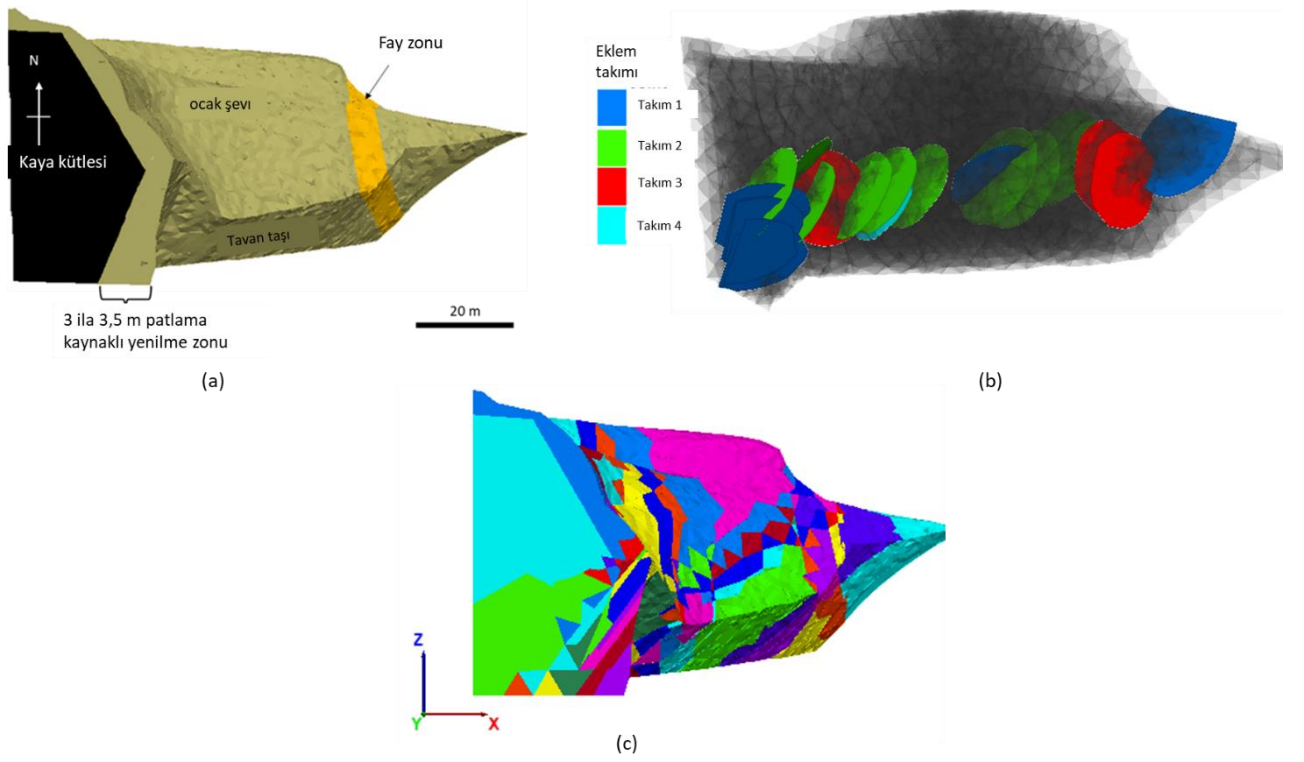
kaynaklı yenilme bölgesi ve Şekil 5.26 (a)'da gösterilen fay zonu. Ocak tabanı yakınında yürütülen jeoteknik araştırma, deforme olmuş bölgeyle ilişkili ana eklemlerin yönelimine ilişkin 28 veri noktası toplamıştır. Bu veriler, Şekil 5.25'te gösterilen bir stereonet kullanılarak dört eklem takımı halinde düzenlenmiştir. Eklem takımlarının yönelim verileriyle birlikte eklem orijin koordinatları, Şekil 5.26 (b)'de gösterilen DFN'yi oluşturmak için kullanılmaktadır. DFN modeli daha sonra 3DEC modelinde bloklar oluşturmak için kullanılarak Şekil 5.26 (c)'de gösterilen CP cevher üretiminden kaynaklanan örselenme benzetimini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 5.24. Açık ocağın ve tavan taşının arasında 3DEC modeline dahil edilen bölge



Şekil 5.25. Tabana yakın açık ocak çevresindeki tahmini eklem takımı sayısı



Şekil 5.26. (a) 3DEC model bölgeleri (b) 3DEC bölgelerini kesen ayırık kırılma ağı (DFN) (c) Eklem takımları ile kesildikten sonra 3DEC modeli

### 5.6.1. 3DEC Model Parametrelendirmesi

Mohr-Coulomb bünye modeli 3DEC bloklarında kullanılırken, eklemler için Coulomb kayma ile gevşeme modeli kullanılmıştır. Kaya kütlesi mukavemeti ve yerinde gerilmeler, kohezyon ve sürtünme açısı gibi blok modeli özellikleri ve yanal destek koşulları doğrudan FLAC3D'den seçilmektedir (bkz. alt bölüm 5.1.3 ve Çizelge 5.2).

Özellikle, patlatma kaynaklı yenilme bölgesi için, Hoek vd., (2002) tarafından önerildiği gibi, kaya kütlesi özelliklerini düşürmek için 0,5'lik bir bozulma faktörü (D) uygulanmıştır. Benzer şekilde, eklem örselenme davranışını karakterize etmek için Coulomb kayma modelinde 4,5 GPa/m'lik bir eklem normal ve makaslama sertliği uygulanmıştır. Bu sertlik değerleri, FLAC3D modelinde kaya malzemesi ve eklemlerin değerlendirmeleriyle desteklenen geri analiz yoluyla türetilmiştir. FLAC3D modeli fay zonunun yakınında en yüksek örselenmeye işaret ederken, Şekil 5.26 (b)'deki DFN modeli eklemlerin çoğunun değişen yüksekliklerde fay zonunda birleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, 3DEC modelinin FLAC3D

modeline benzer bir örselenme tepkisi sergilediği ve faylanmanın ayrılmış granitik fay zonu içerisinde tespit edilebileceği önerilmektedir. Bu bölge içerisinde, eklem normal ve makaslama sertliği değerleri denklem (48) ve (49) kullanılarak tahmin edilmiştir (Zhang vd., 2023; Jaeger vd., 2007). Denklem (48) ve (49)'daki ayrılmış granit modülleri uygulandığında, eklem aralığı (L) 10 cm ile 40 cm arasında değişirken, hem ortalama normal hem de makaslama sertliği değerleri yaklaşık 4,5GPa/m'dir. Bu değerler, denklem (50) ile tahmin edilen eklem sertliği değerleri için pratik üst sınırlar içinde yer almaktadır (Itasca, 2019).

$$K_n = \frac{E_{cm}E_h}{L(E_{cm} - E_h)} \quad (48)$$

$$K_s = \frac{G_{cm}G_h}{L(G_{cm} - G_h)} \quad (49)$$

Burada  $K_n$  = Eklem normal sertliği,  $K_s$  = Eklem kayma sertliği,  $E_{cm}$  = Kaya malzemesinin elastik modülü,  $G_{cm}$  = Kaya malzemesinin makaslama modülü,  $E_h$  = Deformasyon modülü,  $G_h$  = Kaya kütlelerinin makaslama modülü ve  $L$  = Eklem aralığı

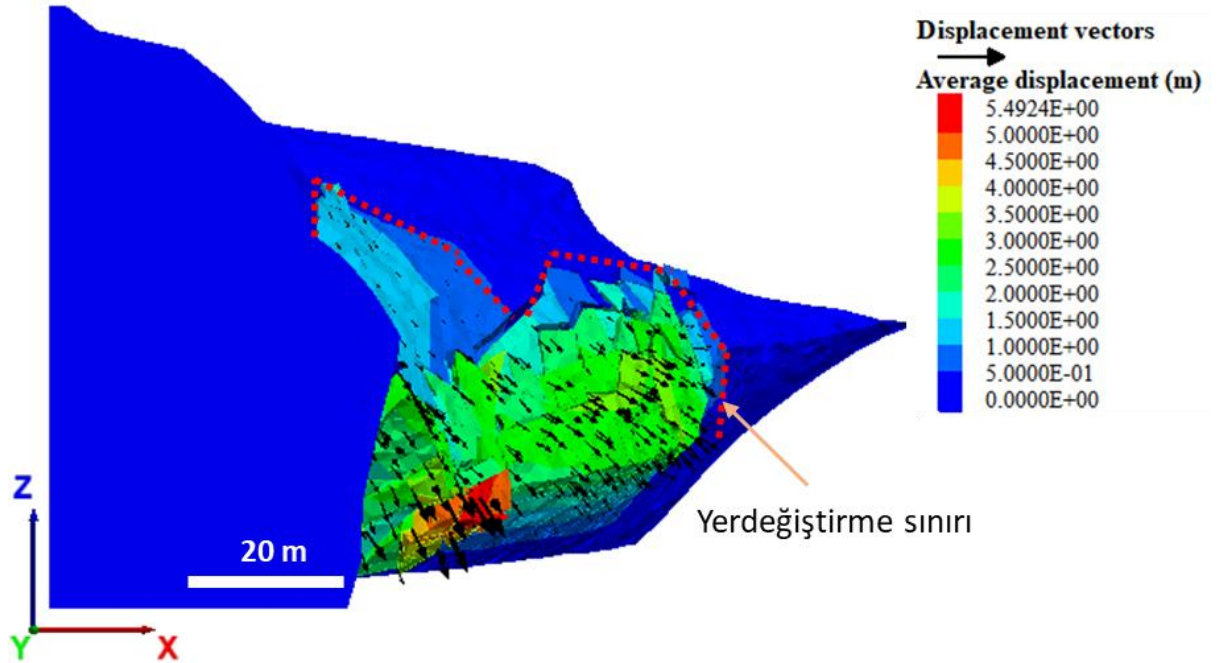
$$K_n < 10 \left[ \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{L_{min}} \right] \right] \quad (50)$$

Burada "K" ve "G" granitin yığın ve makaslama modülleridir ve  $L_{min}$  normal yönde bağlantıya bitişik bölgenin en küçük boyutudur.

### 5.7. 3DEC Model Sonuçları

3DEC'deki analiz, önceki FLAC3D ile gösterilen örselenmedeki süreksizliklerin etkisini etkili bir şekilde tanımlamaktadır. Fay zonunun yakınında ocak şevi ile taban taşı arasında askıda kalan bölgenin yenilme olasılığı daha yüksektir. Ocak şevinin en dik kısmı, fay zonunun sol tarafında, en yüksek yerdeğiştirmeye maruz kalmaktadır (Şekil 5.27). Şekil 5.27'deki bu yüksek yerdeğiştirme bölgesi Şekil 5.26 (b)'deki DFN modeliyle karşılaştırıldığında, bu bölgenin modelde en çok kırık olan zon olduğu da görülmektedir. Dolayısıyla örselenme hem süreksizlikler hem de yerçekimi tarafından tetiklendiğini varsaymak mantıklıdır.

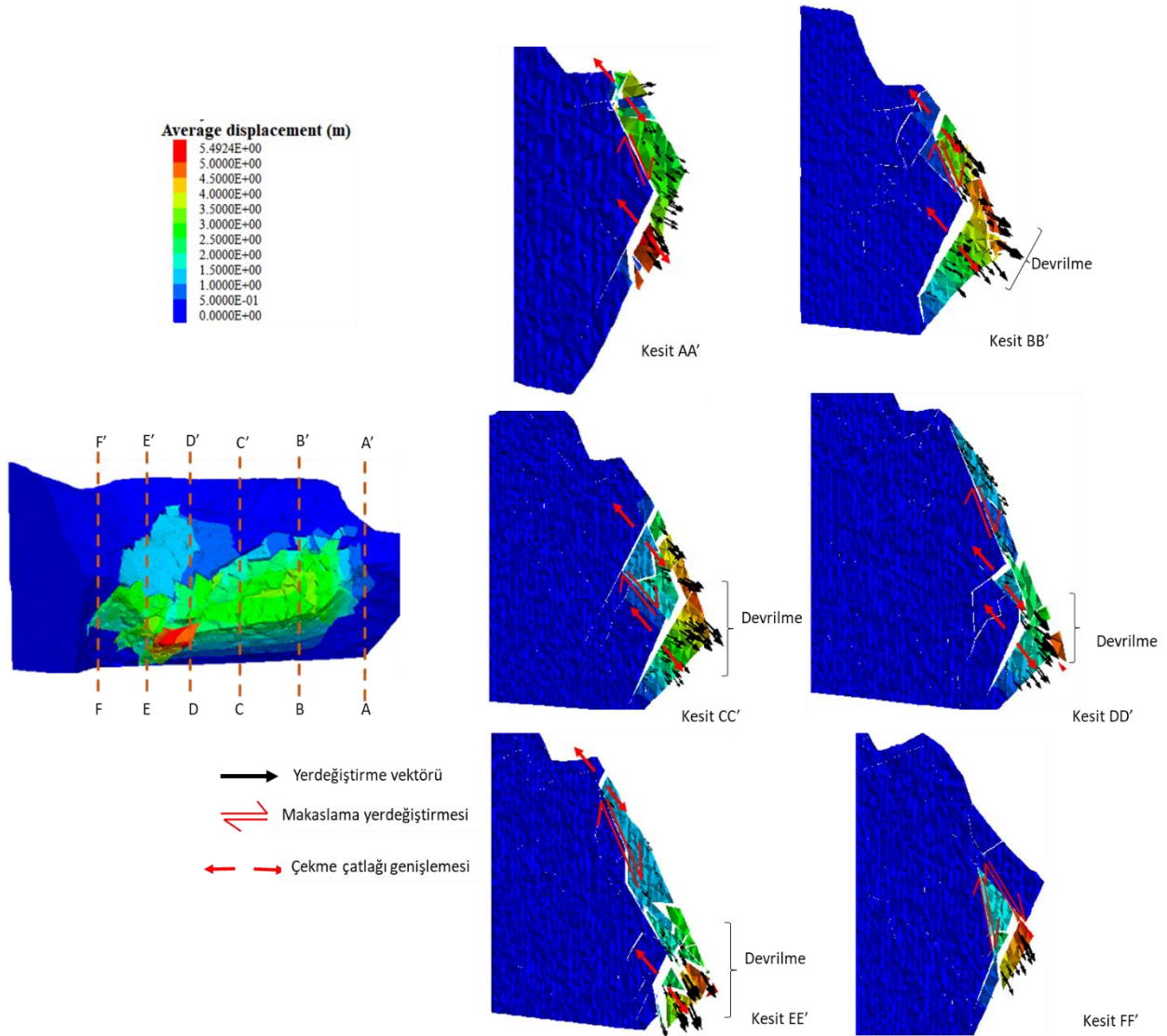
Şekil 5.28'deki yerdeğiştirme konturunun farklı kesitlerinde gösterildiği üzere yenilme hem çekme hem de makaslama modlarını içermektedir. Şekil 5.28'de belirtildiği gibi, en önemli çekme yerdeğiştirmesi, model hattı boyunca, alt-dikal eklemler doğrultusunda gözlenmektedir. Örneğin, ilk kesitte (A-A' kesiti), özellikle de ocak rampasının yakınında eklem genişlemesi (çekme çatlak) göz önünde bulundurulabilir. Çatlak genişmesi, eşik topuğun bacalarının oluşumu sırasında indüklenen gerilmelerle başlatılmıştır. Model dengeye ulaşmaya çalıştıkça çatlak genişlemeye devam etmektedir. Eklem çatlaklarının genişlemesi ne kadar büyük olursa, yerdeğiştirme büyüklüğü de o kadar belirgin hale gelmektedir. Çatlak genişlemesi sırasında, duraysız kaya kütlesi yerçekiminden kolayca etkilenerek çökmeye veya eklemler boyunca kaymaya neden olmaktadır. Çekme çatlakları nispeten yatay bir eklemlerle kesiştiğinde, sıkışan kaya eğik eklemlerden aşağı kayarak kama yenilmesine neden olmaktadır. Makaslama yenilmesiyle ilişkili örselenme de kama malzemesinin devrilmesini etkileyebilmekte. Bu nedenle, BC eşik topuğu cevher üretim süreci ile ilişkili olabilecek yenilme modları kama ve devrilme yenilmeleridir.



Şekil 5.27. 3DEC modelindeki ortalama yerdeğiştirme konturu

## 5.8. Sahada Gözlem ve Model Doğrulaması

Mevcut olarak BC eşik topuğu cevheri, ilk başta önerilen baca oluşum sırası takip edilerek başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu durum, gözlemlenen göçük ile FLAC3D ve 3DEC modellerindeki tahmini yenilme arasında uygun bir karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır.

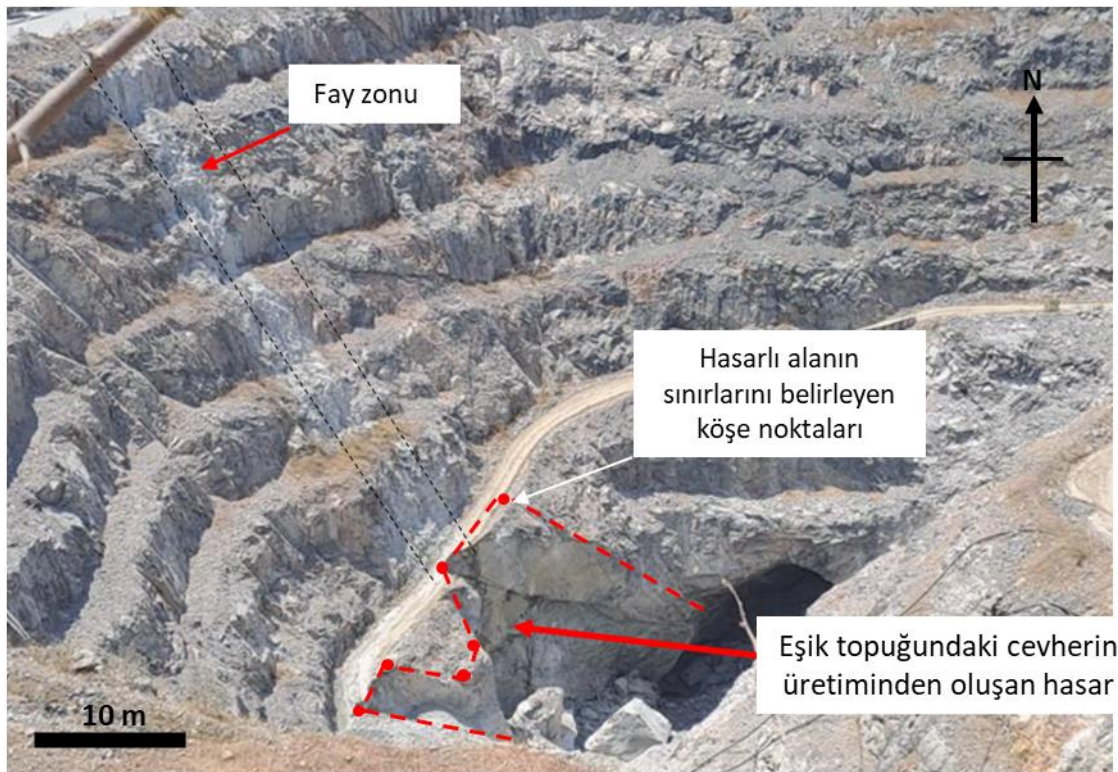


Şekil 5.28. Sayısal modelin çeşitli kesitlerinde gözlemlenen yerdeğiştirme büyüklüğü

Şekil 5.29 sahada gözlemlenmiş hasar durumunu göstermektedir. Hasarın boyutunu FLAC3D ve 3DEC sayısal modellerinde tahmin edilen örselenme ile karşılaştırmak için sahada altı köşe noktası işaretlenmiştir. Şekil 5.30'daki noktalar,

karşılaştırmanın sonuçlarını göstermek için görsel olarak tahmin edilmiştir. Şekil 5.30'daki saha gözlemlerine dayanarak, hasarın FLAC3D ve 3DEC modellerinde tahmin edildiği gibi yaklaşık olarak bulunduğu konumda meydana geldiği sonucuna varılabilir.

3DEC modeli yenilme kapsamının daha kesin bir tanımını sağlamaktadır. Bu durum, hasarın kaya kütledeki süreksizliklerden kaynaklanan gerilmelerden nispeten daha fazla etkilendiği görüşünü desteklemektedir. Buna karşılık, FLAC3D tarafından üretilen yenilme kestirimleri sahadaki gerçek hasarın abartılı bir temsili gibi görünmektedir. Bu farklılık, FLAC3D'de kullanılan, kaya kütleinin homojen olduğunu varsayan ve süreksizliklerin etkisini ihmal eden sonlu hacim yaklaşımına bağlanabilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 5.23'teki düşey yerdeğiştirme konturu daha yakından incelendiğinde, en yüksek yerdeğiştirmenin gözlemlenen hasarın civarında yoğunlaştığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.29. CP'de yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasından sonra sahada gözlemlenen deformasyon

Sonuç olarak, hem FLAC3D hem de 3DEC ile yapılan analizler, BC madeninde, temel olarak CP'den yüksek tenörlü cevher üretimi ile bağlantılı önemli ocak ve

tavan taşı yenilme olasılıkları ortaya çıkarmıştır. Bu bulgular, benzetimlerden elde edilen çeşitli temel gözlemlerle desteklenmektedir. FLAC3D modelinde, yenilme zonunun genişlediğine dair açık kanıtlar (bkz. Şekil 5.22) ve aynı zamanda yerdeğiştirme, yani, Şekil 5.23'te gösterildiği gibi, özellikle de ocak ile tavan taşı arasındaki askıda kalan bölge boyunca belirgin bir yerdeğiştirme söz konusudur. Ayrıca, ocak şevindeki gerilme seviyelerinde önemli bir azalma görülmektedir. Potansiyel yenilme mekanizmaları için daha fazla dayanak, kama ve devrilme yenilme senaryoları olasılığını öne süren 3DEC modeli tarafından sağlanmaktadır (bkz. Şekil 5.28). Ocakta ve tavan taşında 0,2 MPa'nın altında ölçülen gerilme seviyeleri ve kayda değer aktif çekme gerilme ('tension-n'), gerilme gevşemesi olarak adlandırılan sürekli gerilme koşulları altında zamana bağlı potansiyel bir gerilme azalmasına işaret etmektedir. Bu durum, etkilenen zonun derhal desteklenmediği takdirde zaman içinde gerilmeye kademeli bir azalmaya yol açarak duraysızlığı daha da kötüleştirebileceği anlamına gelmektedir. Bu kapsamlı analizler, gözlemlenen yenilmeye katkıda bulunan faktörlerin karmaşık etkileşiminin altını çizmekte ve riskleri azaltmak ve potansiyel ocak gölünün duraylılığını sağlamak için uygun destek tedbirlerinin uygulanmasına yönelik kritik ihtiyacı göstermektedir.



Şekil 5.30. Sahadaki deformasyonun boyutunun FLAC3D ve 3DEC'de tahmin edilen yenilme ile karşılaştırılması

## 6. SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR AÇIK OCAK GÖLÜ OLUŞTURMADA KARŞILAŞILAN ZORLULUKLAR

Sürdürülebilir bir ocak gölü yerel topluma turizm, rekreasyon, akvakültür ve sulama fırsatları da dahil olmak üzere çeşitli faydalar sağlayabilir (Blanchette ve Lund, 2016). Ancak, ocak suyu tutamazsa veya suyu özellikle AMD nedeniyle kirlenmişse bu avantajlar tehlikeye girebilir (Olfas vd., 2019). AMD, demir sülfür mineralleri, özellikle de piritler hava ve su ile reaksiyona girerek sülfürik asit ve çözünmüş demir oluşturmasıyla meydana gelmektedir (Nordstrom, 2015). Açık ocaklardaki AMD kaynakları arasında ocak şevlerindeki gevşek kayalar ve maden atıklarının dökülmesi yer almaktadır (Kuyucak, 2002). Yer altı işletmelerine geçiş yapan açık ocak madenlerindeki CP boşluğunda yüksek tenörlü cevherin çıkarılması, ocak şevi yenilmelerini ve geri dolgu için gereken atık kaya malzemesi miktarını önemli ölçüde artırabilmektedir. Bu tez, ocak gölleri ile ilgili çok sayıda akademik araştırmayı ve ocak şevlerinin ya da duvarlarının yenilmesine katkıda bulunan faktörler üzerine küresel araştırmaları incelemiştir. Ayrıca, Tanzanya'daki BC madeninde CP cevherinin üretiminin ardından karşılaşılan duraylılık koşullarını gösteren bir örnek çalışma sunulmuştur. Maden, özellikle CP cevherinin üretiminden sonra yenilme ve çatlak şevlere, dik ocak şevlerine ve düz olmayan ocak tabanına yol açan duraylılık koşullarıyla mücadele etmektedir. Bu sorunlar, sahanın başarılı bir şekilde rehabilite edilerek sürdürülebilir bir ocak gölü haline getirilmesinde potansiyel sorunlar teşkil etmektedir. FLAC3D modeli, ayrılmış granitten oluşan fay zonunun yakınında kayda değmeyen gerilme yenilmesi ile ocak tabanı yakınındaki örselenmesi vurgulamaktadır. Buna ek olarak, ocak şevindeki düşük ara gerilmeler, geri dolgunun gecikmesi halinde zaman içinde potansiyel bir yenilme olasılığına işaret etmektedir. Benzer şekilde, 3DEC modeli, sahadaki gözlemlerle uyumlu olarak, çatlak genişlemesinin alt dikey eklemler boyunca ve makaslamanın alt yatay eklemler boyunca başlattığı devrilme ve kama yenilme belirtilerini tanımlamaktadır.

Madenin kapanması sırasında bu duraylılık sorunlarının ele alınması, potansiyel ocak gölünden uzun vadeli fayda sağlanması açısından son derece önemlidir. Şevlerde duraysızlığa neden olacak kısımların düzeltilmesi gerekmektedir. Fay zonunun yakınında gözlemlenen artan duraysızlıklar ve tasarımla ilgili sorunları verimli bir şekilde açıklığa kavuşturmak için özellikle bu alan için basitleştirilmiş



FLAC3D modelleri oluşturulmuştur. Bu basitleştirilmiş modellerin arkasındaki temel neden hesaplama süresini azaltmaktır. Basitleştirilmesine rağmen, daha az zon ve değişken ocak-şev konfigürasyonlarına uyum sağlama esnekliği olsa da, daha önce incelenen modelin yenilme davranışını yansıtmaması beklenmektedir. Bunun sonucunda, güvenlik faktörü (FoS; Factor of safety) farklı ocak şev açıları için hızlı bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu bölümdeki tüm şekillerde yer alan dolgu malzemelerinin ocak dolumu prosedürlerini gösterme amaçlı olduğu belirtilmelidir. Yerdeğiştirme rakamları sadece bacaların oluşumu sırasında tahmin edilmektedir, dolgu malzemelerinin sunduğu sıkışma etkisi ile ilgili değildir.

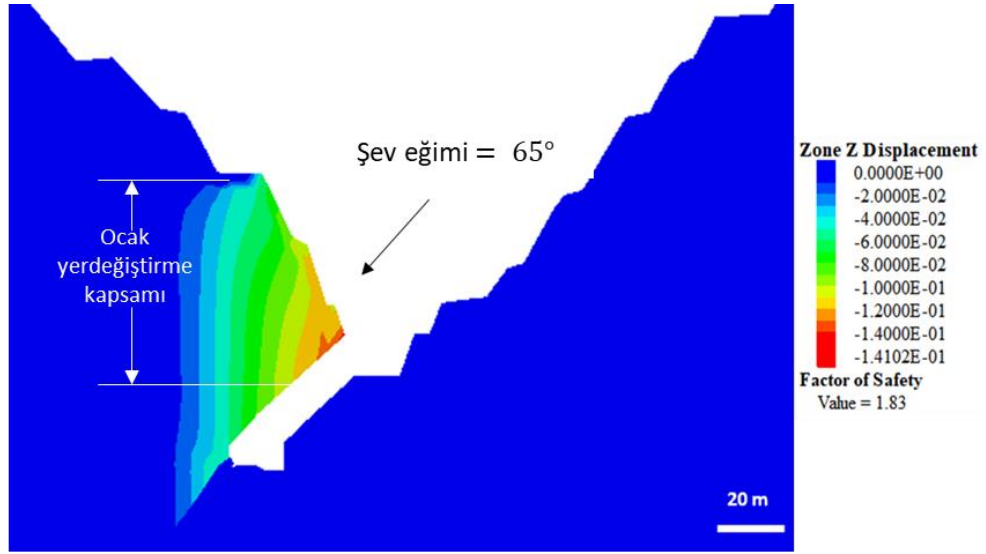
### **6.1. Şev Açısının Ocak Duraylılığı Üzerindeki Etkisi**

BC madeninde, ocak tabanının yakınında, şev açısı Şekil 5.2'de gösterildiği gibi yaklaşık 70°'dir. Yer altı işletmelerine geçiş yapan madenlerde, dik ocak şevlerinin hafif eğimli şevlere kıyasla genellikle duraylılık sorunları yarattığı kabul edilen bir gerçektir (Li vd., 2022). Sayısal analiz, CP cevher üretiminin ardından en önemli düşey yerdeğiştirmenin, hem Şekil 5.23 hem de Şekil 6.1 (a)'da gösterildiği üzere, ocak şevi ile tavan taşı arasındaki askıda kalan bölgede meydana geldiğini ortaya koymuştur. FLAC3D'de FoS her zaman kırık şevlerde duraylılığın tek belirleyicisi olmasa da, su gözenek basıncı veya ocak şev eğimi gibi belirli ölçüt değişikliklerini değerlendirmek için çok değerli olduğunu kanıtlamıştır (Wei vd., 2021). Şekil 6.1 (a)'da, ocak tabanına yakın dik bir şev için tahmin edilen FoS, CP cevher üretimi sonrasında 1,8'dir. Ancak, şev açısının 60°'nin altına düştüğü varsayımsal bir senaryoda, Şekil 6.1 (b)'de gösterildiği gibi, FoS potansiyel olarak 3,0'ın üzerine çıkabilmektedir. Şekil 6.1 (a) ve (b)'deki düşey yerdeğiştirme konturları karşılaştırıldığında, hafif eğimli bir şevin ocak tabanına yakın kaya kütleindeki yerdeğiştirmeyi önemli ölçüde azalttığı ve böylece potansiyel ocak gölünün duraylılığını sağladığı açıkça görülmektedir.

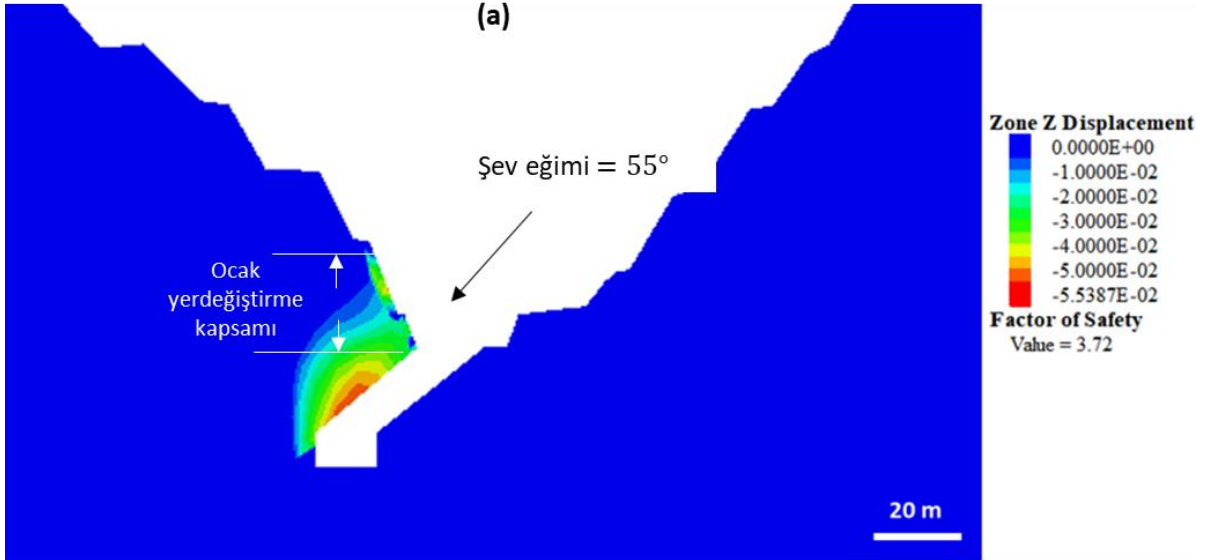
### **6.2. CP Tasarımının ve Cevher Üretiminin Etkileri**

CP cevherinin üretimini takiben ocakta gözlemlenen hasar, hem FLAC3D hem de 3DEC modellerindeki yerdeğiştirme konturlarıyla birlikte, kritik hasarın asıl olarak zayıf ayrılmış granit (Q değeri= 6,5) ile karakterize edilen bir bölge olan fay zonunun yakınında meydana geldiğini göstermektedir. CP'nin tava taşı dalma uzunluğu ( $L_H =$

21,5 m), cevher kütlesi dalması ( $\theta = 35^\circ$ ) ve sürtünme açısı ( $\phi = 45^\circ$ ) gibi geometrik özellikleri (43) ve (44) denklemlerinde kullanılarak etkin açıklık  $S_{Eff} = 15$  m olarak tahmin edilmiştir. Ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi kullanılarak ve 1,0 güvenlik faktörü varsayıldığında, CP kalınlığının 14 m olacağı tahmin edilmiştir. 5.1.5 ve 5.3.2 bölümlerinde daha önce belirtildiği gibi, BC madenindeki CP kalınlığı 10 m idi, bu da BC madeninde belirlenen kalınlığa kıyasla 4 m'lik bir farka işaret etmektedir. Böylece, Şekil 5.12'de gösterildiği gibi yenilme zonunun CP üzerindeki hakimiyeti açıklanmaktadır.



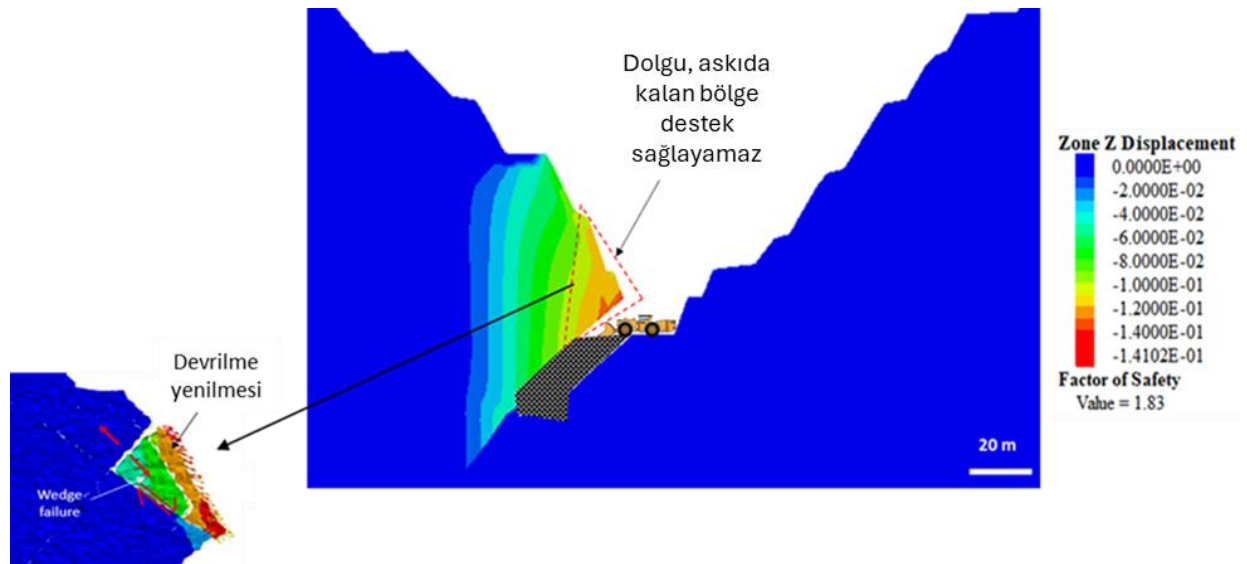
(a)



(b)

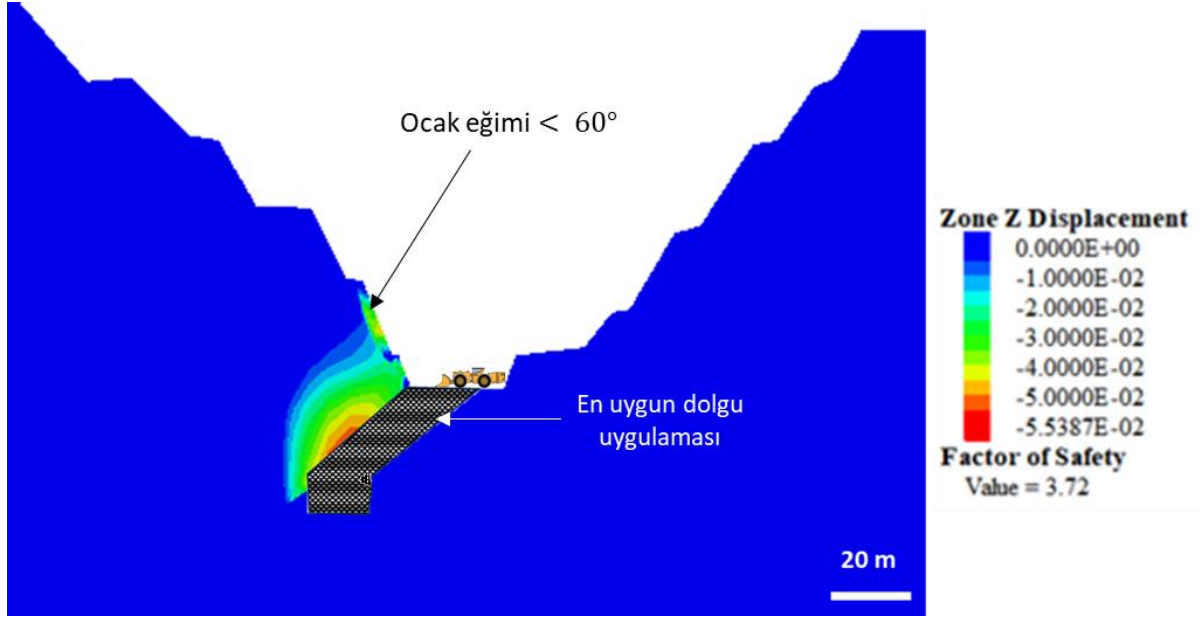
Şekil 6.1. (a) Şev açısı=65° (b) Şev açısı =55° için güvenlik faktörü

En yüksek yerdeğiştirme CP cevher üretiminden sonra oluşan askıda kalan bölgede kaydedilmiştir. Bunun nedeni, CP cevherinin kazınmasının açık ocak işletmesinde ocak şevinde bırakılan yüksek tenörlü cevherin bir kısmını içermesidir. CP cevheri çıkartıldıktan sonra oluşan boşluğun doldurulması durumunda, askıda kalan bölge Şekil 6.2'de gösterildiği üzere desteklenemeyecek hale gelmektedir. Aslında, makinelerin boşluğu tamamen doldurma konusundaki etkinliği askıda kalan bölge nedeniyle sınırlanacaktır. CP boşluğunun en uygun şekilde geri doldurulması, boşluğun düzgün ve düz bir ocak tabanına yerleştirilmesi durumunda elde edilebilmektedir. Daha açık bir ifadeyle, yüksek tenörlü cevher açık ocak madenciliği sırasında çıkarılamıyorsa ve ocak şevinin içinde kalıyorsa, bunun cevher kaybı olarak sınıflandırılması ve dokunulmadan bırakılması önerilmektedir.



Şekil 6.2. CP cevher üretiminden sonra oluşan ve CP boşluk dolgusu ile basitçe desteklenemeyen askıda kalan bölge

Aksi takdirde, CP cevheri ile birlikte cevheri üretme çabaları sonuçta duraysız bir şekilde askıda kalan bir bölgenin oluşmasına yol açabilmektedir. Örneğin, Şekil 6.3'teki bir ocak tasarımının teorik iki boyutlu gösterimini ele alalım. Tasarım, ocak tabanına yakın nispeten daha düşük eğimleri, 60°'den daha az açıları ve CP bacalarının tam olarak ocak tabanına yerleştirilmesini garanti etmektedir. Böylece düzgün bir geri dolgu elde edilmekte ve askıda kalan bir bölge oluşmamaktadır. Böyle bir durumda, ocak rehabilitasyonu basittir ve gerekli ocak dolgusunda önemli bir azalma görülmektedir.



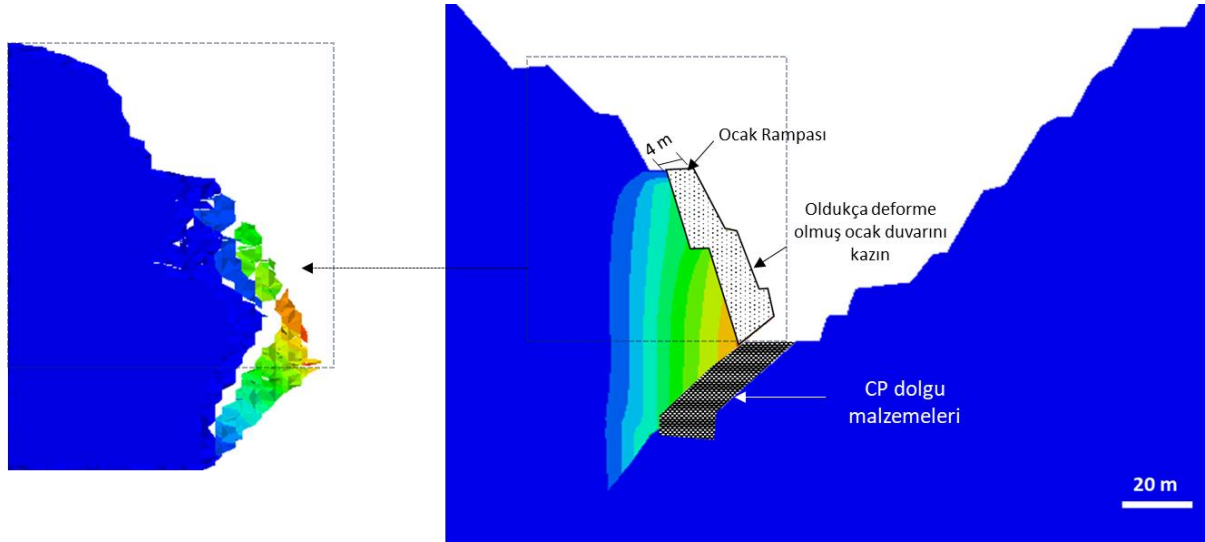
Şekil 6.3. İdeal CP tasarımı ve müteakip cevher üretim planı

### 6.3. Maden Kapanışına Doğru Öngörülen Rehabilitasyon

çık ocağın güvenliğini sağlamak için inşa edilecek bir duvarın, hayvanların ve diğer varlıkların ocağa kazara girmesini önlemek gibi önemli bir görevi de olmasına rağmen (De Bruyn vd., 2019) bu çalışma özellikle madenin kapanmasına yönelik bir rehabilitasyon yöntemi olarak, madende bir ocak gölü oluşturulmasının önerilmesi bağlamında ocağın duraylılığını değerlendirmeye odaklanmıştır. Analizler, potansiyel ocak gölünün şev duraylılığını ve su kalitesini etkileyen kritik sorunları ortaya koymuştur. Açık ocak rehabilitasyonu sırasında bu sorunların ele alınması ve açık ocağın çevredeki topluma ve ekosisteme olumlu faydalar sağlamasını temin edecek tedbirlerin uygulanması zorunlu hale gelmektedir.

Açık ocak şevindeki çatlak kaya CP boşluğu doldurulduktan hemen sonra kazılmalıdır. Şekil 6.4'te gösterildiği üzere, önemli bir yenilme veya yerdeğiştirme yaşamış ocak şevinin kazılması gerekmektedir. Patlatılmış kaya malzemesi, ocak dolgu işleminin ilk adımlarından biri olarak ocak tabanına stratejik olarak dağıtılabilmektedir (ayrıca bkz. Şekil 6.5 (a)). Özellikle, geniş ölçüde yerdeğiştirmiş ocak şevinin yatay olarak kaya kütesine doğru yaklaşık 4,0 m ve dikey olarak ocak tabanından rampaya doğru uzandığı görülmektedir (Şekil 6.4). Bu bölgenin kazılması, bölgenin yüksek duraysızlığı nedeniyle önemli güvenlik sorunları ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla, uygulama planı son derece titizlikle hazırlanmış

standartları içermeli ve titiz güvenlik kurallarına sıkı sıkıya bağlı kalmalıdır. Patlatma sonrasında ocak şevinin daha da dik olabileceği ve aşırı patlatmanın bölgedeki duraylılık sorunlarını daha da kötüleştirebileceği öngörülmelidir.



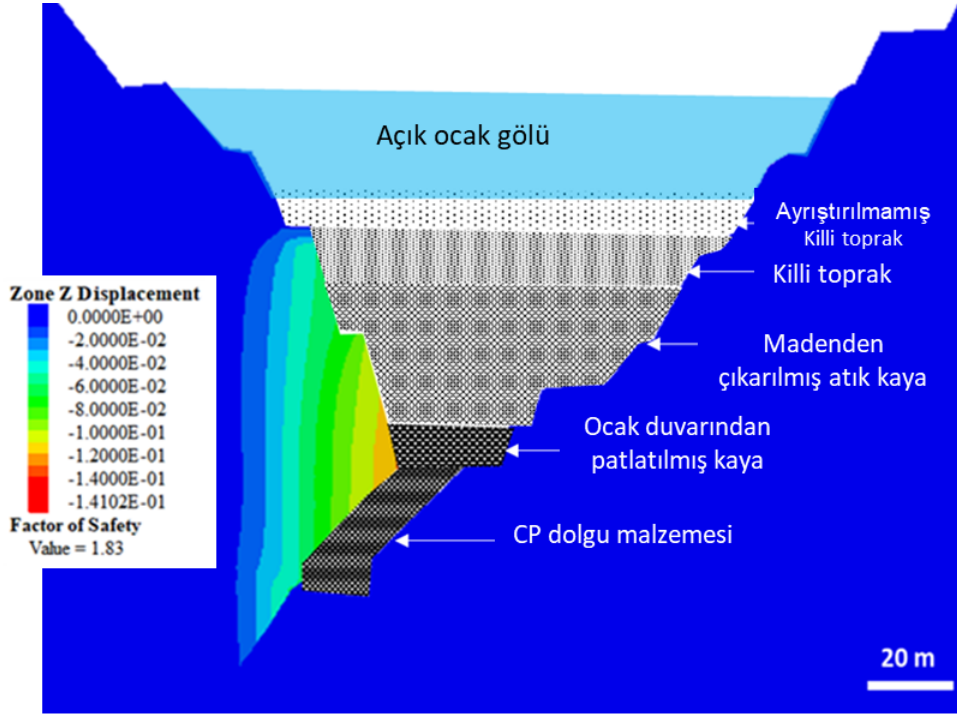
Şekil 6.4. Önemli bir yenilme (veya yerdeğiştirme) gösteren ocak şevinin kaldırılması gerekmektedir

### 6.3.1. Açık Ocak Dolgu Malzemesi

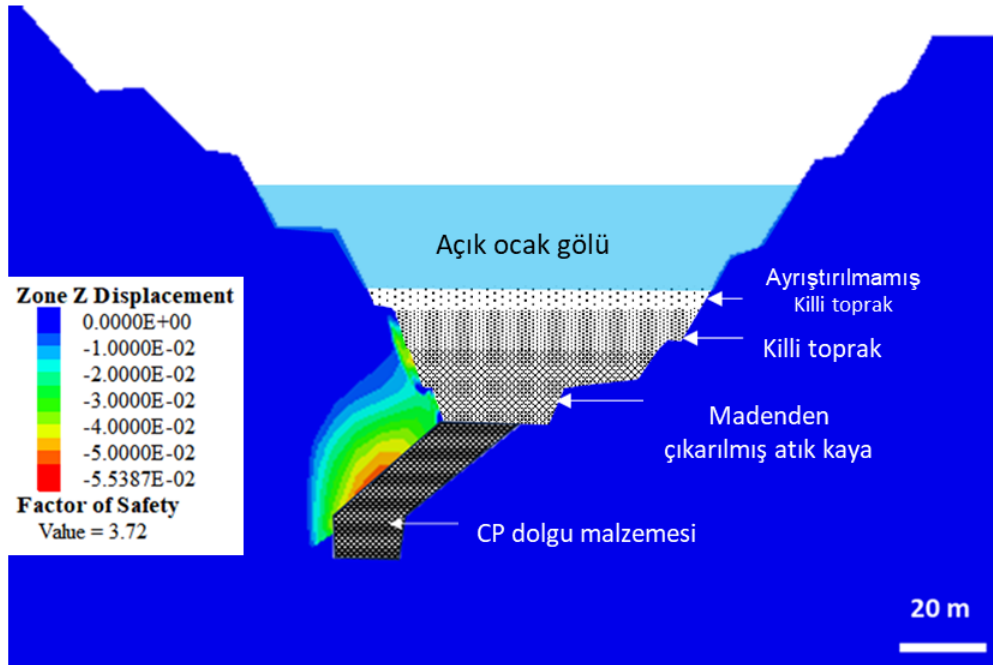
Dolgu malzemeleri asit maden drenajı (AMD) oluşumunu en aza indirecek şekilde seçilmeli ve kaya büyüklükleri zamanla ocak gölü suyunun yer altına süzülmesini engelleyecek şekilde düzenlenmelidir (Sahimi, 1993). Tüm bu faktörler çok önemli olmakla birlikte, dolgunun derinliği de ocak şevinin dayanıklılığına bağlıdır (Chen vd., 2023). Şekil 6.5 (a), BC açık ocağını, ocak şevinin duraylı olduğu noktaya kadar doldurmak için önerilen malzemeyi göstermektedir. Yine, Şekil 6.5'te yer alan dolgu malzemeleri dolgu prosedürünü göstermek için hazırlanmıştır. Şekildeki yerdeğiştirme miktarları dolgu malzemelerinin sağladığı sıkışma etkisi ile herhangi bir ilişki göstermemektedir.

CP'nin dolgusu, ister agrega ister beton agregası ile olsun, iyi bir şekilde sıkılaştırılmalı ve şevler ile dolgu arasında herhangi bir boşluk olmamasını sağlamak için dikkatle yapılmalıdır. Çalışmalar, agregaların sıkışma özelliklerinin öncelikle parçacık boyutuna bağlı olduğunu ve farklı boyutlardaki parçacıkların bileşiminin daha etkili olduğunu kanıtlamıştır (Xu vd., 2022). Geri dolgu işlemini engelleyen askıda kalan bölge, oldukça yerdeğiştirmiş ocak şeviyle birlikte

kazılmıştır. Kazıdan çıkan kaya malzemesini CP dolgusunun üzerine dağıtmak pratik olacaktır.



(a)



(b)

Şekil 6.5. (a) BC madeninde (b) teorik durumda açık ocak kapanma sürecinin yanı sıra bir ocak gölü oluşturmak için önerilen işlemler

Büyük kayaların boyutunu küçültmek için kaya kırıcılar kullanılabilir. Bunu takiben, yerdeğiştirmiş şevin düşey boyutunu kapsayacak şekilde kırılmış atık kaya veya agrega eklenebilir. Agregada tabakası, uzun vadede ocak şevinin duraylılığını sağlamak ve ocak göl suyunu hapsetmek gibi ikili bir amaca hizmet etmektedir. Ocağı istenilen derinliğe kadar doldurmak için gereken kaya malzemesi miktarı, ocak tabanından itibaren ocak şevinin yenilme durumuna bağlıdır. Eğer ocak şevi sağlamsa, gerekli atık kaya (agrega) miktarı önemli ölçüde azalabilir.

Örneğin, ocak şevinin nispeten duraylı olduğu ve CP'nin etkili bir şekilde geri doldurulabildiği Şekil 6.5 (b)'de gösterilen varsayımsal açık ocakta gerekli dolgu malzemesi miktarı Şekil 6.5 (a)'da gösterilen BC madenine göre önemli ölçüde daha azdır. Beklenti, kırılmış kayanın (agreganın) üzerindeki en üst iki tabakadan ince parçacıkların akan sudan gelen diğer parçacıklarla birleşerek sonunda ocak gölünün geçirimsiz tabakasını oluşturmasıdır. Bu beklentiye rağmen, en ince malzemeyi bu tabakanın üst kısmına dahil etmek daha pratiktir.

Son iki tabaka AMD oluşumunu en düşük değere indirmek için tasarlanmıştır. Bu tabakaların, atığa oksijen akışını azaltmak için atık kaya agregalarının üzerinde kompozit bir kuru örtü oluşturması beklenmektedir. Killi toprak sızdırmazlık tabakası olarak işlev görürken, ayrışmamış toprağın koruyucu bir tabaka olarak hizmet etmesi beklenmektedir. Bozkurt ve diğerleri (2001) gibi çalışmalar, killi toprağın alttaki atık tabakalarına oksijen yayılmasını önemli ölçüde engellediğini göstermektedir. Bu çalışma dolgu derinliğine ilişkin bir tahmin sunmamakla birlikte, daha kalın bir tabakanın tercih edilebileceğini önermektedir.

#### **6.4. Eşik Topuğundaki Cevher Üretilmeli mi?**

Bu tez, CP içindeki yüksek tenörlü cevher çıkarılmasının ocak tabanı yakınındaki önemli şev duraylılığı sorunlarını ortaya çıkardığını göstermiştir. Maden kapanma aşamasına yaklaştıkça bu sorunların ele alınması kaçınılmaz hale gelmektedir. Ocak tabanına yakın aşırı deforme olmuş veya kırılmış ocak şevinin kazılması gereklidir ve sürdürülebilir bir ocak gölü oluşturmak için gereken dolgu malzemesi miktarı, yenilme derinliği arttıkça artmaktadır. Tüm bu sorunlar ve önerilen önlemler

göz önünde bulundurulduğunda şu soruyu sormakta fayda vardır: CP içerisinde yüksek tenörlü cevherin çıkarılması bu çabayı haklı çıkarır mı? Bu soruya ilk yanıtı vermek için uygun zaman maden planlama ve tasarımının ilk aşamalarıdır. Bu aşamada, ocak tabanına yakın şev açısı ve CP kalınlığı gibi önemli kararlar alınmaktadır. Ancak kesin yanıt, cevher kütlesinin geometrisi, tenörü ve çevresindeki kaya kütlesinin kalitesi doğrulandıktan sonra, üretim sırasında verilmelidir.



## 7. UYGULAMADA KULLANILABİLİRLİK VE KISITLAMALAR ÜZERİNE TARTIŞMA

Kaya kütlesi duraylılık koşullarının değerlendirilmesi, madencilik faaliyetleri sona erdikten sonra toplum ve kamu algısı gibi faktörleri de içerecek şekilde maden tasarımı ve üretim aşamasının ötesine geçmelidir. Yenilme mekanizmalarının belirlenmesi, madencilik faaliyetleri sırasında ve sonrasında kaya kütlesi yenilmesini veya hasarını azaltabilecek etkili kaya destekleme ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesinde ilk adımdır. Bu doktora tezi, CP kalınlığını tahmin etmek ve içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılmasını simüle etmek için Ölçeklendirilmiş Açıklık yönteminin, sayısal tekniklerin ve saha gözlemlerinin entegrasyonunu teşvik etmektedir. Ayrıca tez, yerel toplumu ve çevredeki ekosistemi desteklemek için sürdürülebilir bir ocak gölü tasarlanmasını önermektedir. İşte bu yaklaşımın pratik uygulamaları ve sınırlamaları:

- Tez, ölçeklendirilmiş açıklık yönteminin en uygun CP kalınlığını tahmin etmek için oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, nispeten daha zayıf bir jeolojik bölgeye özgü Q-değerinin kullanılması tavsiye edilmektedir. Yöntemin öncüleri tarafından tavsiye edildiği üzere, CP açıklığı gibi geometrik özelliklerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi de önemlidir. FLAC3D gibi sürekli sayısal yaklaşımlar CP kalınlığının doğrulanmasında kullanılabilir. FLAC3D modeli ayrıca CP'nin ve çevresindeki kaya kütlesinin örselenme özelliklerini etkileyen üretim sırasını da benzetimini yapabilmektedir. FLAC3D modeli için Mohr-Coulomb modeli, öncelikle bu çalışmanın amacının ötesinde model karmaşıklığı ve hesaplama verimliliği hususları nedeniyle tercih edilmiştir. Beklenti, CP çıkarımından kaynaklanan boşluğun geri doldurulması ve açık ocak şevinin derhal rehabilite edilmesidir. Bu nedenle, üretim sonrası meydana gelen yenilme veya zamana bağlı örselenmeleri analiz edebilen malzeme yenilme ölçütlerinin gerekli olmadığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, bu tür gerilme gevşemesi gibi ölçütler, bu tez kapsamında tartışılan belirli hususlar için daha doğru bir tahmin sunabilmektedir.
- Sürekli ortam modellemeli sayısal yaklaşımlar, yenilme zonlarının genel bir anlamda belirlenmesini sağlamaktadır, ancak sahada süreksizlikler

olduğunda, yenilme modunun ve kapsamının daha kesin bir şekilde anlaşılması için DEM'in kullanılması tavsiye edilmektedir. 3DEC modeli, süreksizlik düzlemlerini ve ilgili deforme olabilen veya rijit blokları birleştirerek belirli bir lokasyondaki örselenme detaylı benzetimine olanak sağlamaktadır. Model, bağlantı düzlemleri boyunca potansiyel çekme çatlaklarını ve makaslama yerdeğiştirmesini gösterebilmektedir. Bir 3DEC modelinde kullanılacak en yüksek blok sayısı bir cihazın hesaplama kapasitesi ile sınırlı olduğundan, örselenmeye eğilimli zonları değerlendirmek üzere nispeten daha büyük modeller için FLAC3D kullanmak genellikle daha pratiktir. Örselenme ve sınırların doğru bir şekilde tanımlanmasının ardından 3DEC modeli etkin bir şekilde kullanılabilir.

- Rehabilitasyon yöntemini önermeden önce, çalışma alanının tüm jeoteknik özelliklerini, yenilme modları da dahil olmak üzere ayrıntılı olarak anlamak zorunludur. Bu çalışmanın hedeflerine ulaşmasının temel sebebi, gerçek ve modellenmiş sonuçların temel bir karşılaştırmasını sunan CP cevherinin üretimine paralel olarak yürütülmüş olmasıdır. Tercihen, bu gibi durumlarda sayısal analizi kullanmak için uygun zaman, CP içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarılması veya terk edilmesine ilişkin karar verme sürecidir. Bu çalışmanın zamanlaması itibarıyla maden tasarımı veya değerlendirmesinin ilk aşamalarında gözden kaçan veya yeterince dikkate alınmayan bir konuyu ele almaya odaklanmıştır.
- Bu çalışmada önerilen dolgu malzemeleri, ocak şevine sınırlama sağlamayı ve AMD oluşumunu azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak bu çalışma, suyun ocak gölünden yer altına süzülmesini belirleyen agrega boyutu, paketleme özellikleri ve dolgu derinliği gibi belirleyici faktörleri değerlendirmemektedir. Bu faktörleri ölçmek ve ocak gölünün sürdürülebilirliğini sağlamak için ek analizler gereklidir. Özellikle, düzenli biyojeokimyasal çalışmaların yapılması ve ocak suyunun toksisitesini düzenlemek için göl izleme programlarının uygulanması önemlidir.

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Tanzanya'daki New Luika Altın Madeni tarafından işletilen BC madenine özel olarak odaklanarak, CP tasarımı ve ardından içerisinde yapılan üretim ile ilişkili olarak kaya kütleli duraylılığı koşullarının kapsamlı bir analizini yapmıştır. Yerel toplum ve ekosistemin yararına sürdürülebilir bir ocak gölü oluşturulmasına vurgu yapılmıştır.

Çalışmada, CP tasarımı ve CP üretime ilişkin faydalı ayrıntıları anlamak için hem ölçeklendirilmiş açıklık yöntemi hem de FLAC3D ve 3DEC kullanılmıştır. Aşağıda temel bulgular yer almaktadır:

- CP kalınlığının kendisinin ve çevresindeki kaya kütleli duraylılığı üzerinde önemli bir etkisi vardır.
- Ölçeklendirilmiş açıklık yönteminde düşük eğime sahip ve sığ derinlikte bulunan cevher yatakları için uygun Q-değerlerinin ve etkili CP Açıklıklarının kullanılması vurgulanmıştır.
- FLAC3D ile yapılan analiz, yetersiz CP kalınlığının sadece CP yenilmesine değil aynı zamanda dik ocak şevlerinin yenilmesine de neden olabileceğini ortaya koyarak ölçeklendirilmiş açıklık yönteminin bulgularını desteklemiştir.
- FLAC3D ayrıca üretim sırasında CP bacalarının oluşumunu da simüle etmiş ve burada gerilme kaynaklı yenilmeye eğilimli yerdeğiştirmiş zonlar tespit edilmiştir. Yenileme modunun daha iyi anlaşılması için FLAC3D'deki yenilme zonlarının 3DEC kullanılarak analiz edilmesi önerilmiştir.
- 3DEC modeli, kaya kütleli yapısal özelliklerinden etkilenen kama ve devrilme yenilmesi potansiyelini ortaya koymuştur.
- Üretime bağlı olarak meydana gelen bütün tabaka hareketlerinin oluşmasından sonra yapılan saha gözlemleri, 3DEC modeli tarafından tahmin edilen yenilme zonunun daha kesin olduğunu ve gerçek hasarla yakından eşleştiğini göstermiştir.
- Yapılan analizler, özellikle ocak tabanına yakın bölgelerde, ocak şevindeki çatlak kayaların ve duraysız ocak şevlerinin zaman içinde potansiyel ocak gölüne doğru göçme riski taşıdığını ve bunun da AMD ile ilişkili risklere yol açtığını ortaya koymuştur.

- CP içindeki yüksek tenörlü cevherin çıkarımı yenilmenin giderek arttığını göstermiştir. Hem ocak şevinden hem de CP'den yüksek tenörlü cevherin aynı anda çıkartılmasıyla yenilme önemli ölçüde artmış ve bir askıda kalan bölgenin oluşmasına yol açmıştır.
- Askıda kalan bölge sadece duraysız olmakla kalmamış, aynı zamanda CP boşluğunun dolgu etkinliğini de tehlikeye atmıştır. Dolayısıyla, ocak şevinde ve CP'de yüksek tenörlü cevherin aynı anda çıkarılması tavsiye edilmemektedir.

Özetle, bu doktora tezi madencilik endüstrisinde güvenlik ve verimliliği artırmak için var olan araçların potansiyelini kullanmıştır. BC madeni bir ocak gölü oluşturulması amacıyla kapanma aşamasına yaklaşırken, belirtilen duraylılık koşullarına karşı önlemler önermek önemlidir. Bu çalışma, CP boşluğunun beton-agrega karışımı veya sadece agregaya ile doldurulmasını, ocak şevindeki çatlak kayaların kazınmasını ve ocak tabanı ile askıda kalan bölgenin yakınındaki duraysız ocak şevinin kazınmasını önermektedir. Patlatılmış atık kaya, atık kaya pasası, killi toprak ve ayrıştırılmamış toprak dahil olmak üzere birden fazla malzeme tabakası ocağa yerleştirilmelidir. Bu işlem, hem ocak şevlerini ve gölü sınırlandırma hem de AMD oluşumunu azaltma gibi ikili bir amaca hizmet etmektedir.

### **8.1. Gelecek Çalışmalar için Öneriler**

Yazar, CP'nin oluşturulması ve içinde bulunan yüksek tenörlü cevherin üretilmesiyle ilgili koşullara ışık tutmanın, sürdürülebilir bir ocak gölü oluşturma seçeneğiyle birleştiğinde literatüre önemli bir katkı sağlayacağına dair güçlü inancını korumaktadır. Ocak dolgu derinliği, geçirgenlik ve ocak gölünün biyojeokimyası gibi faktörler üzerine yapılacak ilave çalışmalar, bu tezin bulgularının uygulanabilir stratejilere dönüştürülmesi için gerekli adımlardır. Bu çalışmalar, dolgu ayarlarının ocak suyunu hapsetmedeki etkinliğini tespit etmeyi ve su kalitesini doğrulamayı amaçlamaktadır.

## 9. KAYNAKLAR

- Abbasi, B., Russell, D., Taghavi, R. in FLAC3D mesh and zone quality, Zhu, Detournay, Hart, and Nelson (Eds.), Proceedings of the 3rd International FLAC/DEM Symposium in Geomechanics. Itasca International Inc., Minneapolis, **2013**.
- Adam, J., Urai, J.L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., Van der Zee, W., Schmatz, J., Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques, *J Struct Geol*, 27 (**2005**) 283–301.
- Agung, P.A.M., Hasan, M.F.R., Susilo, A., Ahmad, M., Bin Ahmad, M.J., Abdurrahman, U.A., Sudjianto, A. T., Suryo, E. A., Compilation of Parameter Control for Mapping the Potential Landslide Areas, *Civil Engineering Journal*, 9 (**2023**) 974–989.
- Allaby, M., *A Dictionary of Geology and Earth Sciences*, **2020**.
- Alpay, S., Yavuz, M., Underground mining method selection by decision making tools, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24 (**2009**).
- Amadei, B., *Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements*, Lecture Notes in Engineering, **1983**.
- An, H.M., Liu, H.Y., Han, H., Zheng, X., Wang, X.G., Hybrid finite-discrete element modelling of dynamic fracture and resultant fragment casting and muck-piling by rock blast, *Comput Geotech*, 81 (**2017**) 322–345.
- Apostu, I.-M., Lazar, M., Faur, F., A Model to Evaluate the Flooding Opportunity and Sustainable Use of Former Open-Pits, *Sustainability*, 12 (**2020**) 9275.
- Bahrami, S., Doulati Ardejani, F., Baafi, E., Application of artificial neural network coupled with genetic algorithm and simulated annealing to solve groundwater inflow problem to an advancing open pit mine, *J Hydrol (Amst)*, 536 (**2016**) 471–484.

- Bakhtavar, E., Oraee, K., Shahriar, K., Determination of the optimum crown pillar thickness between open-pit and block caving, Proceedings - 29th International Conference on Ground Control in Mining, ICGCM (2010).
- Bar, N., Kostadinovski, M., Tucker, M., Byng, G., Rachmatullah, R., Maldonado, A., Pötsch, M., Gaich, A., McQuillan, A., Yacoub, T., Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models, Int J Min Sci Technol, 30 (2020) 651–658.
- Bar, N., Du Plessis, P., Nicoll, S., Welideniya, S., Ryan, C., McAllister, P., Risk management strategies for open pit mining through historic underground workings, ISRM International Symposium - 10th Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS, 2018.
- Barbour, S.L., Krahn, J., Numerical modelling - Prediction or process?, 2004.
- Barnett, W.P., Geological control on slope failure mechanisms in the open pit at the Venetia Mine, South African Journal of Geology, 106 (2003) 149–164.
- Barth, A., Delvaux, D., Wenzel, F., Tectonic stress field in rift systems – a comparison of Rhinegraben, Baikal Rift and East African Rift, ECGS Blue Book, proceedings of the 27th ECGS Workshop “Seismicity Patterns in the Euro-Med Region”, Luxembourg City, 2009.
- Barton, N., Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39 (2002) 185–216.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, 6 (1974).
- Barton, N., Løset, F., Lien, R., Lunde, J., Application of Q-System in Design Decisions Concerning Dimensions and Appropriate Support for Underground Installations, Subsurface Space: Environmental Protection Low-Cost Storage Energy Savings, 1981.
- Barton, N., Shen, B., Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9 (2017) 210–225.

- Benyoucef, A.A., Gadri, L., Hadji, R., Slimane, H., Mebrouk, F., Hamed, Y., Empirical graphical and numerical model for the schematization of underground mining operations in the heterogeneous rock masses, case of Boukhadra mine, NE Algeria, *Arabian Journal of Geosciences*, 16 (2023) 165.
- Besimbaeva, O.G., Khmyrova, E.N., Nizametdinov, F.K., Oleinikova, E.A., Assessment and Prediction of Slope Stability in the Kentobe Open Pit Mine, *Journal of Mining Science*, 54 (2018) 988–994.
- Bieniawski, Z.T., Determining rock mass deformability: experience from case histories, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15 (1978).
- Bird, F., The Practice of Mining and Inclusive Wealth Development in Developing Countries, *Journal of Business Ethics*, 135 (2016).
- Bishop, A.W., The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, *Géotechnique*, 5 (1955) 7–17.
- Blanchette, M.L., Lund, M.A., Pit lakes are a global legacy of mining: an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities, 2016.
- Bodnar, J.R., Student, J.J., Melt inclusions in plutonic rocks: Petrography and microthermometry, *Melt Inclusions in Plutonic Rocks*, 2006.
- Bond, C.J., Kirsch, P., Vulnerable populations affected by mining: Predicting and preventing outbreaks of physical violence, *Extractive Industries and Society*, 2 (2015).
- Börner, R.-U., Numerical Modelling in Geo-Electromagnetics: Advances and Challenges, *Surv Geophys*, 31 (2010) 225–245.
- Boukpeti, N., Drescher, A., Undrained biaxial response of Superior sand model, *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, 2020.
- Bozan, C., Slopeis, I., Cook, P.G., Dogramaci, S., Groundwater-level recovery following closure of open-pit mines, *Hydrogeol J*, 30 (2022) 1819–1832.

- Bozkurt, S., Sifvert, M., Moreno, L., Neretnieks, I., The long-term evolution of and transport processes in a self-sustained final cover on waste deposits, *Science of The Total Environment*, 271 (**2001**) 145–168.
- Brady, B.H.G., Brown, E.T., *Rock mechanics for underground mining: 3rd edn.*, **2006**.
- Brazier, R.A., Nyblade, A.A., Florentin, J., Focal mechanisms and the stress regime in NE and SW Tanzania, East Africa, *Geophys Res Lett*, 32 (**2005**).
- Brown, E., Estimating the Mechanical Properties of Rock Masses, *Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, **2008**, p. 3–22.
- Brown, E.T., Hoek, E., Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15 (**1978**).
- Brune, S., Evolution of stress and fault patterns in oblique rift systems: 3-D numerical lithospheric-scale experiments from rift to breakup, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15 (**2014**) 3392–3415.
- De Bruyn, I., Prado, D., Mylvaganam, J., Walker, D., Geotechnical considerations for the stability of open pit excavations at mine closure: some scenarios, *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, **2019**, p. 235–248.
- Caesarina, H.M., Hirsan, F.P., Danau Seran, a pit lake in an ex-mining area as an opportunity for sustainable tourism, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 413 (**2020**) 012026.
- Calais, E., Ebinger, C., Hartnady, C., Nocquet, J.M., Kinematics of the East African Rift from GPS and earthquake slip vector data, *Geological Society, London, Special Publications*, 259 (**2006**) 9–22.
- Carlà, T., Farina, P., Intrieri, E., Botsialas, K., Casagli, N., On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine, *Eng Geol*, 228 (**2017**) 71–81.



- Carlà, T., Farina, P., Intrieri, E., Ketizmen, H., Casagli, N., Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine, *Eng Geol*, 235 (**2018**) 39–52.
- Carlson, M.C., Koepke, J., Hanson, M.P., From Pits and Piles to Lakes and Landscapes: Rebuilding Minnesota's Industrial Landscape Using a Transdisciplinary Approach, *Landsc J*, 30 (**2011**) 35–52.
- Carter, Alcott, J., Castro, L.M., Extending applicability of the crown pillar Scaled Span Method to shallow dipping stopes, *Proc. 5th Nth. American Rock Mech. Symp*, **2002**, p. 1049–1059.
- Carter, T.G., A new approach to surface crown pillar design, *Proceedings of the 16th Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, May 1978*, **1992**.
- Carter, T.G., Guidelines for use of the Scaled Span Method for surface crown pillar stability assessment, *Rocscience*, **2014**.
- Carter, T.G., de Graaf, P.J.H., Dixon, J., Creighton, A., Macciotta, R., Silva-Tulla, F., Stacey, P., Transitioning from mine operations to closure: the dilemma of differing geotechnical design acceptance criteria perspectives, *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*, **2022**.
- Castendyk, D., Webster-Brown, J., Effects of mine expansion on geochemical predictions of pit lake water quality: an example from Martha Mine, Waihi, New Zealand, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 53 (**2010**) 143–151.
- Castendyk, D.N., Balistreri, L.S., Gammons, C., Tucci, N., Modeling and management of pit lake water chemistry 2: Case studies, *Applied Geochemistry*, 57 (**2015a**) 289–307.
- Castendyk, D.N., Eary, L.E., Balistreri, L.S., Modeling and management of pit lake water chemistry 1: Theory, *Applied Geochemistry*, 57 (**2015b**) 267–288.
- Castro, J.M., Moore, J.N., Pit lakes: Their characteristics and the potential for their remediation, *Environmental Geology*, 39 (**2000**).
- Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A., Shiomi, T., Zienkiewicz, O.C., *Computational Geomechanics Theory and Applications*, **2020**.

- Chapra, S.C., Canale, R.P., Numerical Methods for Engineers, Eighth Edition, **2021**.
- Chen, K., Zhang, Q., Tao, Y., Luo, K., Chen, Q., The Slope Safety, Heavy Metal Leaching, and Pollutant Diffusion Prediction Properties under the Influence of Unclassified Cemented Paste Backfill in an Open Pit, *Int J Environ Res Public Health*, 19 (**2022**).
- Chen, Q., Niu, Y., Xiao, C., Study on the Influence of Wet Backfilling in Open Pit on Slope Stability, *Sustainability*, 15 (**2023**) 12492.
- Chen, T., Mitri, H.S., Strategies for surface crown pillar design using numerical modelling – A case study, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138 (**2021**).
- Christiansson, R., Hudson, J.A., ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 4: Quality control of rock stress estimation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (**2003**) 1021–1025.
- Chung, J., Asad, M.W.A., Topal, E., Timing of transition from open-pit to underground mining: A simultaneous optimisation model for open-pit and underground mine production schedules, *Resources Policy*, 77 (**2022**).
- Conde, M., Le Billon, P., Why do some communities resist mining projects while others do not?, **2017**.
- Corti, G., Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System, *Tectonophysics*, 522–523 (**2012**) 1–33.
- Coulibaly, V., Sei, J., Koffi, L.K., Oyetola, S., Thomas, F., Sridhar, A. V., Shunmathi, M., Divahar, R., *Emerging Trends in Engineering Research and Technology*, Book Publisher International (a part of SCIENCEDOMAIN International), **2020**.
- Das, A.J., Mandal, P.K., Ghosh, N., Singh, A., Kumar, R., Tewari, S., Bhattacharjee, R., Evaluation of energy accumulation, strain burst potential and stability of rock mass during underground extraction of a highly stressed coal seam under massive strata-a field study, *Eng Geol*, 322 (**2023**) 107178.
- Das, R., Topal, E., Mardaneh, E., Improved optimised scheduling in stratified deposits in open pit mines – using in-pit dumping, *Int J Min Reclam Environ*, 36 (**2022**) 287–304.

- Dawson, E.M., Roth, W.H., Slope stability analysis with FLAC. FLAC and numerical modeling in geomechanics, Proceedings of the international FLAC symposium, Minneapolis, **1999**.
- Day, A., Seery, J., Monitoring of a Large Slope Failure at Tom Price Iron Ore Mine, Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, **2007**, p. 333–340.
- Delvaux and Hanon, Neotectonics of the Mbeya Area, SW Tanzania, Mus. roy. Afr. centr., 97 (**1993**).
- Delvaux, D., Barth, A., African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data, Tectonophysics, 482 (**2010**).
- Delvaux, D., Kervyn, F., Macheyeke, A.S., Temu, E.B., Geodynamic significance of the TRM segment in the East African Rift (W-Tanzania): Active tectonics and paleostress in the Ufipa plateau and Rukwa basin, J Struct Geol, 37 (**2012**) 161–180.
- Dershowitz, W., Pointe, P. La, Doe, T., Advances in discrete fracture network modeling. ... the US EPA/NGWA Fractured ..., **2004**.
- Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., Eberhardt, E., Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41 (**2004**) 785–812.
- Dintwe, T.K.M., Sasaoka, T., Shimada, H., Hamanaka, A., Moses, D., Peng, M., Fanfei, M., Liu, S., Ssebadduka, R., Onyango, J., Numerical simulation of crown pillar behaviour in transition from open pit to underground mining, Geotechnical and Geological Engineering, 40 (**2022**).
- DMP Guidelines for Preparing Mine Closure Plans, **2015**.
- Dong, L., Tong, X., Li, X., Zhou, J., Wang, S., Liu, B., Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines, **2019**.
- Dowling, J., Atkin, S., Beale, G., Alexander, G., Development of the Sleeper Pit Lake, Mine Water Environ, 23 (**2004**) 2–11.

- Duarte, C.A., Hamzeh, O.N., Liszka, T.J., Tworzydło, W.W., A generalized finite element method for the simulation of three-dimensional dynamic crack propagation, *Comput Methods Appl Mech Eng*, 190 (**2001**) 2227–2262.
- Dyson, A.P., Moghadam, M.S., Zad, A., Tolooiyan, A., The role of creep deformation in pit lake slope stability, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8 (**2022**) 138.
- Eberhardt, E., Stead, D., Reeves, M.J., Connors, C., Design of tabular excavations in foliated rock: an integrated numerical modelling approach, *Geotechnical and Geological Engineering*, 15 (**1997**) 47–85.
- Elmo, D., Rogers, S., Stead, D., Eberhardt, E., Discrete Fracture Network approach to characterise rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling, *Mining Technology*, 123 (**2014**) 149–161.
- Elmo, D., Stead, D., An Integrated Numerical Modelling–Discrete Fracture Network Approach Applied to the Characterisation of Rock Mass Strength of Naturally Fractured Pillars, *Rock Mech Rock Eng*, 43 (**2010**) 3–19.
- EPA Closure and Post-Closure Care Requirements for Hazardous Waste Treatment, Storage and Disposal Facilities, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2014-title40-vol26/xml/CFR-2014-title40-vol26-part264-subpartG.xml>.
- Fairhurst, C., Stress estimation in rock: a brief history and review, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (**2003**) 957–973.
- Fang, X., Yang, J., Zhang, X., Zhang, C., Wang, S., Xie, Y., Numerical modeling of open TBM tunnelling in stratified rock masses using a coupled FDM-DEM method, *Comput Geotech*, 156 (**2023**) 105251.
- Fernandes, R.M.S., Ambrosius, B.A.C., Noomen, R., Bastos, L., Combrinck, L., Miranda, J.M., Spakman, W., Angular velocities of Nubia and Somalia from continuous GPS data: implications on present-day relative kinematics, *Earth Planet Sci Lett*, 222 (**2004**) 197–208.
- Fontijn, K., Delvaux, D., Ernst, G.G.J., Kervyn, M., Mbede, E., Jacobs, P., Tectonic control over active volcanism at a range of scales: Case of the Rungwe

- Volcanic Province, SW Tanzania; and hazard implications, *Journal of African Earth Sciences*, 58 (2010).
- Fontijn, K., Williamson, D., Mbede, E., Ernst, G.G.J., The Rungwe Volcanic Province, Tanzania – A volcanological review, *Journal of African Earth Sciences*, 63 (2012) 12–31.
- Fu, W., Liao, Y., Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation, *Comput Geotech*, 37 (2010) 288–298.
- Gadeikis, S., Dundulis, K., Gadeikytė, S., Urbaitis, D., Gribulis, D., Geotechnical properties of compacted clays as buffer and backfill, *Baltica*, 27 (2014) 55–62.
- Garcia, D.H., Overview of International Mine Closure Guidelines, Meeting of the American Institute of Professional Geologists, 2008.
- Germanovich, L.N., Dyskin, A.V., Fracture mechanisms and instability of openings in compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (2000) 263–284.
- Goel, R.K., Singh, B., *Engineering Rock Mass Classification*, 2011.
- De Graaf, P.J.H., Desjardins, M., Tsheko, P., Geotechnical risk management for open pit mine closure: A sub-arctic and semi-arid case study, *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*, 2019.
- Grimstad, E., Barton, N., Updating the Q-system for NMT, 1993.
- Guggari, V.B., Kumar, H., Budi, G., Stability analysis of crown pillar under the zone of relaxation around sub-level open stopes using numerical modelling, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14 (2023).
- Haimson, B.C., Cornet, F.H., ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (2003) 1011–1020.
- Hall, S., The African Continent May Be Splitting Apart — But Geologists Can't Agree, <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/africas-big-break>, 2020.

- Hamman, E., du Plooy, K., Seery, J., Data management and geotechnical models, Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, **2017** p. 461–487.
- Hanelli, D., Barth, A., Volkmer, G., Köhler, M., Modelling of Acid Mine Drainage in Open Pit Lakes Using Sentinel-2 Time-Series: A Case Study from Lusatia, Germany, *Minerals*, 13 (**2023**) 271.
- Havaej, M., Stead, D., Investigating the role of kinematics and damage in the failure of rock slopes, *Comput Geotech*, 78 (**2016**) 181–193.
- He, Q., Li, Y., Xu, J., Zhang, C., Prediction of Mechanical Properties of Igneous Rocks Under Combined Compression and Shear Loading Through Statistical Analysis, *Rock Mech Rock Eng*, 53 (**2020**) 841–859.
- Herzsprung, P., Hertkorn, N., von Tümpling, W., Harir, M., Friese, K., Schmitt-Kopplin, P., Molecular formula assignment for dissolved organic matter (DOM) using high-field FT-ICR-MS: chemical perspective and validation of sulphur-rich organic components (CHOS) in pit lake samples, *Anal Bioanal Chem*, 408 (**2016**) 2461–2469.
- Hoek, E., The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update, *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp*, **1988**.
- Hoek, E., *Practical rock engineering*: RocScience, Available from the publisher at <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>, **2007**.
- Hoek, E., Brown, E.T., Empirical Strength Criterion for Rock Masses, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108 (**1982**) 672–673.
- Hoek, E., Brown, E.T., Practical estimates of rock mass strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (**1997**).
- Hoek, E., Brown, E.T., The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11 (**2019**).
- Hoek, E., Carranza, C., Corkum, B., *Hoek-brown failure criterion – 2002 edition*, Narms-Tac, **2002**.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., *Support of underground excavations in hard rock*, **2000**.

- Hoek, E., Wood, D., Shah, S., Modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30 (**1993**) 209–214.
- Hongyun, F., Liping, L., Guangqi, C., Hongliang, L., Jingyao, G., Changze, L., Xinyan, P., Shen, Z., Analysis method of the water inrush and collapse in jointed rock mass tunnels: A case study, *Eng Anal Bound Elem*, 146 (**2023**) 838–850.
- Hu, Y., Ren, F., Ding, H., Fu, Y., Tan, B., Study on the Process and Mechanism of Slope Failure Induced by Mining under Open Pit Slope: A Case Study from Yanqianshan Iron Mine, China, *Advances in Civil Engineering*, 2019 (**2019**) 1–26.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P., In situ stress, *Engineering Rock Mechanics*, Elsevier, **1997**, p. 41–69.
- Hughes, T., *The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, **1987**.
- Hutchinson, D.J., Phillips, C., Cascante, G., Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning, *Geotechnical and Geological Engineering*, 20 (**2002**) 41–64.
- Itasca Consulting Group, Inc., 3DEC - Three-Dimensional Distinct Element, **2019a**.
- Itasca Consulting Group, Inc., Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, **2019b**.
- Itasca Consulting Group, Inc., Griddle, **2020**.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., *Fundamentals of rock mechanics - 4th edn.*, **2007**.
- Jiang, S.-H., Chen, J.-D., Wang, Z.Z., Zheng, J., Huang, J., Lü, Q., Three-Dimensional Discrete Element Analysis of Jointed Rock Slope Stability Based on the Universal Elliptical Disc Model, *Rock Mech Rock Eng*, 57 (**2024**) 505–525.

- Jing, L., A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (**2003**) 283–353.
- Jing, L., Hudson, J.A., *Numerical methods in rock mechanics*, **2002**.
- Jing, L., Stephansson, O., *Constitutive Models of Rock Fractures and Rock Masses – The Basics*, **2007a**.
- Jing, L., Stephansson, O., *Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering - Theory and Applications, Developments in Geotechnical Engineering*, **2007b**.
- Johnson, B., Carroll, K.C., Waste rock backfill of open pits: Design, optimization, and modelling considerations, *Proceedings of the Mine Closure*, **2007**.
- Johnson, E.P., Castendyk, D.N., The INAP Pit Lakes Database: A Novel Tool for the Evaluation of Predicted Pit Lake Water Quality, 9th International Conference on Acid Rock Drainage, **2012**.
- Kalenchuk, K., Falmagne, V., Gelover, A., Montiel, I., Luzania, J., Risk Evaluation, Design, Implementation, Instrumentation, and Verification for Crown Pillar Extraction at Pinos Altos Mine, *Rock Mech Rock Eng*, 52 (**2019**).
- Kang, S.-S., Jang, B.-A., Kang, C.-W., Obara, Y., Kim, J.-M., Rock stress measurements and the state of stress at an open-pit limestone mine in Japan, *Eng Geol*, 67 (**2002**) 201–217.
- Karian, T., Shimada, H., Sasaoka, T., Wahyudi, S., Qian, D., Sulistianto, B., Countermeasure Method for Stope Instability in Crown Pillar Area of Cut and Fill Underground Mine, *International Journal of Geosciences*, 07 (**2016**).
- Khennane, A., *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus*, CRC Press, **2013**.
- Kirk Nordstrom, D., Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals, *Acid Sulfate Weathering*, **2015**, p. 37–56.
- Knupp, P., Remarks on Mesh Quality (No. SAND2007-8128C). 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. Sandia National Laboratories, Reno NV, **2007**.



- Kolapo, P., Ogunsola, N.O., Munemo, P., Alewi, D., Komolafe, K., Giwa-Bioku, A.,  
DFN: An Emerging Tool for Stochastic Modelling and Geomechanical Design,  
**2023**.
- Krause, R.D., Snyman, L.G., Rehabilitation and Mine Closure Liability: An  
Assessment of the Accountability of the System to Communities, Mine Closure  
2014: The 9th International Conference on Mine Closure, **2014**.
- Kusuma, G.J., Tuheteru, E.J., Badhurahman, A., Pranoto, K., Palinggi, Y., Wahyudi,  
H., Pratama, G., Gautama, R., Geochemical Characterization of Pit Slope  
Rocks: A Preliminary Step in Predicting the Water Quality of Pit Lake, IOP  
Conference Series: Earth and Environmental Science, **2023**.
- Kuyucak, N. Acid mine drainage prevention and control options. CIM bulletins,  
**2002**, p. 96–102
- Labuz, J.F., Zang, A., Mohr–Coulomb Failure Criterion, Rock Mech Rock Eng, 45  
(**2012**) 975–979.
- Lashgari, M., Ozturk, C.A., Slope failure and stability investigations for an open pit  
copper mine in Turkey, Environ Earth Sci, 81 (**2022**) 5.
- Laurence, D. Optimisation of the mine closure process, J Clean Prod, 14 (**2006**).
- Lee, Y.K., Bobet, A., Instantaneous Friction Angle and Cohesion of 2-D and 3-D  
Hoek–Brown Rock Failure Criteria in Terms of Stress Invariants, Rock Mech  
Rock Eng, 47 (**2014**) 371–385.
- Lei, Q., Latham, J.-P., Tsang, C.F., The use of discrete fracture networks for  
modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured  
rocks, Comput Geotech, 85 (**2017**) 151–176.
- Leveque, R., Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential  
Equations: Steady-State and Time-Dependent Problems (Classics in Applied  
Mathematics), Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM),  
Philadelphia, **2007**.
- Li, H., Chen, W., Tan, X. Displacement-based back analysis of mitigating the effects  
of displacement loss in underground engineering. Journal of Rock Mechanics  
and Geotechnical Engineering, (**2023a**).

- Li, S., Zhao, Z., Hu, B., Yin, T., Chen, G., Chen, G. Hazard Classification and Stability Analysis of High and Steep Slopes from Underground to Open-Pit Mining. *Int J Environ Res Public Health*, 19 (2022) 11679.
- Li, Y.-M., Zhao, G.-F., Jiao, Y., Yan, C., Wang, X., Shen, L., Yang, L., Liang, Z., Li, W., Zhou, X., Le, T., A benchmark study of different numerical methods for predicting rock failure, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 166 (2023b) 105381.
- Lin, P., Zhou, Y., Liu, H., Wang, C., Reinforcement design and stability analysis for large-span tailrace bifurcated tunnels with irregular geometry, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38 (2013) 189–204.
- Lisjak, A., Grasselli, G., A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (2014) 301–314.
- Litmanen, T., Jartti, T., Rantala, E., Refining the preconditions of a social licence to operate (SLO): reflections on citizens' attitudes towards mining in two Finnish regions, *Extractive Industries and Society*, 3 (2016).
- Liu, G.R., Quek, S.S., *Computational Modeling, The Finite Element Method*, Elsevier, 2014, p. 1–11.
- Liu, J., Wu, L., Yin, K., Song, C., Bian, X., Li, S., Methods for Solving Finite Element Mesh-Dependency Problems in Geotechnical Engineering - A Review, *Sustainability*, 14 (2022) 2982.
- Lopez, X.P.S., Blanchette, M.L., IMWA Insight: Understanding Public Perceptions of a New Pit Lake in As Pontes, Spain, *Mine Water Environ*, 39 (2020) 647–656.
- López-Vinielles, J., Ezquerro, P., Fernández-Merodo, J.A., Monserrat, O., Blanco, P., Filatov, A., Sarro, R., Mateos, R., Galve, J., Herrera, G., Remote analysis of an open-pit slope failure: Las Cruces case study, Spain, *Landslides*, 17 (2020) 2173–2188.
- Louloudis, G., Louloudis, E., Roumpos, C., Mertiri, E., Kasfikis, G., Chatzopoulos, K., Forecasting Development of Mine Pit Lake Water Surface Levels Based

- on Time Series Analysis and Neural Networks, *Mine Water Environ*, 41 (2022a) 458–474.
- Louloudis, G., Roumpos, C., Louloudis, E., Mertiri, E., Kasfikis, G. Repurposing of a Closed Surface Coal Mine with Respect to Pit Lake Development, *Water (Basel)*, 14 (2022b) 3558.
- Lu, M., Pit lakes from sulphide ore mining, geochemical and limnological characterization before treatment, after liming and sewage sludge treatments: cases studies, **2004**.
- Lu, W., Yang, J., Yan, P., Chen, M., Zhou, C., Luo, Y., Jin, L., Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53 (2012) 129–141.
- Lu, Y., Jin, C., Wang, Q., Han, T., Chen, L., Modeling Study on Cumulative Damage Effects and Safety Control Criterion of Open-Pit Final Slope Under Blasting, *Rock Mech Rock Eng*, **2023**.
- Lu, Y., Jin, C., Wang, Q., Li, G., Han, T., Deformation and failure characteristic of open-pit slope subjected to combined effects of mining blasting and rainfall infiltration, *Eng Geol*, 331 (2024) 107437.
- Lund, M., van Etten, E., Polifka, J., Vasquez, M., Ramessur, R., Yangzom, D., Blanchette, M., The Importance of Catchments to Mine-pit Lakes: Implications for Closure, *Mine Water Environ*, 39 (2020) 572–588.
- Lund, M.A., Blanchette, M.L., Closing pit lakes as aquatic ecosystems: Risk, reality, and future uses, *WIREs Water*, 10 (2023).
- Ma, G., Hu, X., Yin, Y., Luo, G., Pan, Y., Failure mechanisms and development of catastrophic rockslides triggered by precipitation and open-pit mining in Emei, Sichuan, China, *Landslides*, 15 (2018) 1401–1414.
- Manya, S., Geochemistry of the Palaeoproterozoic gabbros and granodiorites of the Saza area in the Lupa Goldfield, southwestern Tanzania, *Journal of African Earth Sciences*, 100 (2014).
- Marinos, P., Marinos, V., Hoek, E., Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses.

Underground Works under Special Conditions, Proceedings of the Workshop (W1) on Underground Works under Special Conditions, **2007**.

Matenco, L., Bertotti, G., Leever, K., Cloetingh, S., Schmid, S. M., Tărăpoancă, M., Dinu, C., Large-scale deformation in a locked collisional boundary: Interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithospheric structure in the late stage of the SE Carpathians evolution, *Tectonics*, 26 (**2007**).

Mattas, C., Karpouzou, D., Georgiou, P., Tsapanos, T., Two-Dimensional Modelling for Dam Break Analysis and Flood Hazard Mapping: A Case Study of Papadia Dam, Northern Greece, *Water (Basel)*, 15 (**2023**) 994.

Mawdesley, C., Trueman, R., Whiten, W.J., Extending the Mathews stability graph for open-stope design. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section A: Mining Technology, 110 (**2001**).

McCullough, C.D., Lund, M.A., Opportunities for Sustainable Mining Pit Lakes in Australia, *Mine Water Environ*, 25 (**2006**) 220–226.

McCullough, C.D., Vandenberg, J., Studying Mine Pit Lake Systems Across Multiple Scales, **2020**.

MERN, Guidelines for Preparing Mine Closure Plans in Québec., **2017**.

Molnar, P., Anderson, R.S., Anderson, S.P., Tectonics, fracturing of rock, and erosion, *J Geophys Res Earth Surf*, 112 (**2007**).

Monaghan, J.J., Kos, A., Scott Russell's wave generator, *Physics of Fluids*, 12 (**2000**) 622–630.

Moss, A., Diachenko, S., Townsend, P., Interaction between the block cave and the pit slopes at Palabora mine, *J South Afr Inst Min Metall*, 106 (**2006**) 479–484.

Motamedi, M.H., Weed, D.A., Foster, C.D., Numerical simulation of mixed mode (I and II) fracture behaviour of pre-cracked rock using the strong discontinuity approach, *Int J Solids Struct*, 85–86 (**2016**) 44–56.

Mudimu, G., Five years on and still searching for justice: What really happened at the Lily mine?, <https://law.uct.ac.za/mineral-law/articles>.

- Nagel, N., Sanchez-Nagel, M., Stress Shadowing and Micro seismic Events: A Numerical Evaluation, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, Colorado, **2011**.
- Nguyen, P.M. V., Widzyk-Capehart, E., Niedbalski, Z., Determination of the Crown Pillar Thickness Between Open Pit and Underground for Coal Mining, Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018, Springer International Publishing, Cham (**2019**), p. 393–404.
- Njinju, E.A., Stamps, D.S., Atekwana, E.A., Rooney, T.O., Rajaonarison, T.A., Instantaneous 3D tomography-based convection beneath the Rungwe Volcanic Province, East Africa: implications for melt generation, *Geophys J Int*, 235 (**2023**) 296–311.
- Nunoo, S., Lessons Learnt from Open Pit Slope Instabilities: Case Studies of BC Open Pit Hard Rock Mines, *Journal of Mining Science*, 54 (**2018**) 804–812.
- Oggeri, C., Vinai, R., Fenoglio, T.M., Godio, A., Large Scale Trials of Waste Mine Burden Backfilling in Pit Lakes: Impact on Sulphate Content and Suspended Solids in Water, *Sustainability*, 15 (**2023**) 7387.
- Olías, M., Cánovas, C.R., Basallote, M.D., Macías, F., Pérez-López, R., González, R., Millán-Becerro, R., Nieto, J., Causes and impacts of a mine water spill from an acidic pit lake (Iberian Pyrite Belt), *Environmental Pollution*, 250 (**2019**) 127–136.
- Oliver, J., Huespe, A.E., Sánchez, P.J., A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM, *Comput Methods Appl Mech Eng*, 195 (**2006**) 4732–4752.
- Omotoso, O., Prediction of fine tailings settlement in pit lakes using a population growth model, *Environmental Geotechnics*, **2023**, p. 1–12.
- Palmström, A., RMI - a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering, *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 1 (**1996**).
- Palmström, A., Singh, R., The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (**2001**) 115–131.

- Pathapati, N.V.L.S., Lokhande, R.D., Verma, C.P., Numerical simulation study on stability analysis of crown pillar—a case study, *Arabian Journal of Geosciences*, 16 (2023) 670.
- Priest, S.D., *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, 1993.
- Priest, S.D., Determination of Shear Strength and Three-dimensional Yield Strength for the Hoek-Brown Criterion, *Rock Mech Rock Eng*, 38 (2005) 299–327.
- PwC, Assuring your compliance to the new mine closure provisioning regulations, <https://www.pwc.co.za/en/assets/pdf/assuring-your-compliance-to-the-new-mine-closure-provisioning-regulations.pdf>, 2016.
- Rafiei Renani, H., Cai, M., Forty-Year Review of the Hoek–Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses, *Rock Mech Rock Eng*, 55 (2022) 439–461.
- Rafiei Renani, H., Martin, C.D., Slope Stability Analysis using Equivalent Mohr–Coulomb and Hoek–Brown criteria, *Rock Mech Rock Eng*, 53 (2020) 13–21.
- Ren, S., Tao, Z., He, M., Pang, S., Li, M., Xu, H., Stability analysis of open-pit gold mine slopes and optimization of mining scheme in Inner Mongolia, China, *J Mt Sci*, 17 (2020) 2997–3011.
- Renaud, V., Al Heib, M., Burda, J., 3D large-scale numerical model of open-pit lake slope stability - case study of Lake Most, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81 (2022) 282.
- Ring, U., The influence of preexisting structure on the evolution of the Cenozoic Malawi rift (East African rift system), *Tectonics*, 13 (1994) 313–326.
- Sahimi, M., Flow phenomena in rocks: from continuum models to fractals, percolation, cellular automata, and simulated annealing, *Rev Mod Phys*, 65 (1993) 1393–1534.
- Sánchez, L.E., Silva-Sánchez, S.S., Neri, A.C., *Guide for mine closure planning*, 2014.
- Schultze, M., Vandenberg, J., McCullough, C.D., Castendyk, D., The future direction of pit lakes: part 1, Research needs, *Mine Water Environ*, 41 (2022).

- Serafim, J.L., Pereira, J.P., Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski, International Symposium in Engineering Geology for Underground Construction, 1 (1983).
- Seto, M., Villaescusa, E., Baird, G., Stress measurements from cored rock, 4th North American Rock Mechanics Symposium, NARMS, 2000.
- Shaban, S.N., Kolawole, F., Scholz, C.A., The Deep Basin and Underlying Basement Structure of the Tanganyika Rift, Tectonics, 42 (2023).
- Shapka-Fels, T., Elmo, D., Numerical Modelling Challenges in Rock Engineering with Special Consideration of Open Pit to Underground Mine Interaction, Geosciences (Basel), 12 (2022) 199.
- She, Z., Wang, J., He, C., Jiang, Z., Pan, X., Wang, M., Ma, D., Shi, Q., Yue, Z., Molecular insights into the impacts of acid mine drainage on dissolved organic matter dynamics in pit lakes, Science of the Total Environment, 888 (2023).
- Shen, B., Duan, Y., Luo, X., Van de Werken, M., Dlamini, B., Chen, L., Vardar, O., Canbulat, I., Monitoring and modelling stress state near major geological structures in an underground coal mine for coal burst assessment, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 129 (2020) 104294.
- Shen, J., Priest, S.D., Karakus, M., Determination of Mohr–Coulomb Shear Strength Parameters from Generalized Hoek–Brown Criterion for Slope Stability Analysis, Rock Mech Rock Eng, 45 (2012) 123–129.
- Sheorey, P.R., A theory for In Situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock., International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and, 31 (1994).
- Sheorey, P.R., Murali Mohan, G., Sinha, A., Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38 (2001).
- Sinha, S., Walton, G., Understanding continuum and discontinuum models of rock-support interaction for excavations undergoing stress-induced spalling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 123 (2019) 104089.

- Sjöberg, J., Christiansson, R., Hudson, J.A., ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 2: overcoring methods, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (2003) 999–1010.
- Smith, G.D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*, Oxford University Press, New York , 1985.
- Söderholm, P., Svahn, N., Mining, regional development and benefit-sharing in developed countries, *Resources Policy*, 45 (2015).
- Stamps, D.S., Calais, E., Saria, E., Hartnady, C., Nocquet, J.M., Ebinger, C.J., Fernandes, R.M., A kinematic model for the East African Rift, *Geophys Res Lett*, 35 (2008).
- Stephansson, O., Zang, A., ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation—Part 5: Establishing a Model for the In Situ Stress at a Given Site, *Rock Mech Rock Eng*, 45 (2012) 955–969.
- Stevens, C.L., Fisher, T.S.R., Lawrence, G.A., Turbulent layering beneath the pycnocline in a strongly stratified pit lake, *Limnol Oceanogr*, 50 (2005) 197–206.
- Stewart, P.C., Trueman, R., Quantifying the effect of stress relaxation on excavation stability. *Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section A: Mining Technology*, 113 (2004).
- Strouboulis, T., Babuška, I., Copps, K., The design and analysis of the Generalized Finite Element Method, *Comput Methods Appl Mech Eng*, 181 (2000) 43–69.
- Strouboulis, T., Copps, K., Babuška, I., The generalized finite element method, *Comput Methods Appl Mech Eng*, 190 (2001) 4081–4193.
- Su, C., Cai, W., Zhu, H., Elastoplastic semi-analytical investigation on a deep circular tunnel incorporating generalized Zhang–Zhu rock mass strength, *Comput Geotech*, 150 (2022) 104926.
- Su, Y., Zhao, M., Zhang, Y., Numerical method of slope failure probability based on Bishop model, *Journal of Central South University of Technology*, 15 (2008) 100–105.



- Sullivan, P.J., Agardy, F.J., Clark, J., Water Pollution, The Environmental Science of Drinking Water, Elsevier, **2005**, p. 29–87.
- Swart, E., The South African legislative framework for mine closure, **2003**.
- Swift, G., Reddish, D., Stability problems associated with an abandoned ironstone mine, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 61 (**2002**) 227–239.
- Szwedzicki, T., Pre- and post-failure ground behaviour: Case studies of surface crown pillar collapse, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36 (**1999**).
- Szwedzicki, T., Geotechnical precursors to large-scale ground collapse in mines, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38 (**2001**).
- Tanyas, H., Ulusay, R., Assessment of structurally-controlled slope failure mechanisms and remedial design considerations at a feldspar open pit mine, Western Turkey, Eng Geol, 155 (**2013**) 54–68.
- Tavakoli, M., Underground metal mine crown pillar stability analysis, University of Wollongong, **1994**.
- Testa, S.M., Pompy, J.S., Backfilling of open-pit metallic mines, American Society of Mining and Reclamation - 24th National Meetings of the American Society of Mining and Reclamation 2007: 30 Years of SMCRA and Beyond, **2007**.
- Tewari, S., Kushwaha, A., Bhattacharjee, R., Porathur, J.L., Crown pillar design in highly dipping coal seam, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 103 (**2018**).
- Triantafyllidis, S., Psarraki, D., Implementation of geochemical modelling in post-mining land uses, the case of the abandoned open pit lake of the Kirki high sulfidation epithermal system, Thrace, NE Greece, Environ Earth Sci, 79 (**2020**) 518.
- Tsesarsky, M., Deformation mechanisms and stability analysis of undermined sedimentary rocks in the shallow subsurface, Eng Geol, 133–134 (**2012**) 16–29.

- Vandenberg, J., Schultze, M., McCullough, C.D., Castendyk, D., The Future Direction of Pit Lakes: Part 2, Corporate and Regulatory Closure Needs to Improve Management, *Mine Water Environ*, 41 (2022).
- Varas, F., Alonso, E., Alejano, L.R., Fdez.-Manín, G., Study of bifurcation in the problem of unloading a circular excavation in a strain-softening material, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20 (2005) 311–322.
- Villaescusa, E., *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*, 2014.
- Villaescusa, E., Seto, M., Baird, G., Stress measurements from oriented core, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (2002) 603–615.
- Villain, L., Alakangas, L., Öhlander, B., The effects of backfilling and sealing the waste rock on water quality at the Kimheden open-pit mine, northern Sweden, *J Geochem Explor*, 134 (2013).
- Villain, L., Sundström, N., Perttu, N., Alakangas, L., Öhlander, B., Evaluation of the effectiveness of backfilling and sealing at an open-pit mine using ground penetrating radar and geoelectrical surveys, Kimheden, northern Sweden, *Environ Earth Sci*, 73 (2015).
- Wadge, G., Biggs, J., Lloyd, R., Kendall, J.M., Historical volcanism and the state of stress in the east African rift system, *Front Earth Sci (Lausanne)*, 4 (2016).
- Walsh, B., van der Plank, S., Behrens, P., The effect of community consultation on perceptions of a proposed mine: A case study from southeast Australia, *Resources Policy*, 51 (2017).
- Walton, G., Diederichs, M., Punkkinen, A., Whitmore, J., Back analysis of a pillar monitoring experiment at 2.4 km depth in the Sudbury Basin, Canada, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85 (2016) 33–51.
- Wang, C., Liu, X., Song, D., Wang, E., Zhang, J., Elasto-plastic analysis of the surrounding rock mass in circular tunnel using a new numerical model based on generalized nonlinear unified strength theory, *Comput Geotech*, 154 (2023) 105163.

- Wang, H., Poulsen, B.A., Shen, B., Xue, S., Jiang, Y., The influence of roadway backfill on the coal pillar strength by numerical investigation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48 (2011) 443–450.
- Wang, W., Griffiths, D.V., Case study of slope failure during construction of an open pit mine in Indonesia, *Canadian Geotechnical Journal*, 56 (2019) 636–648.
- Wei, M., Dai, F., Ji, Y., Wu, W., Effect of fluid pressure gradient on the factor of safety in rock stability analysis, *Eng Geol*, 294 (2021) 106346.
- Wittke, W., *Rock Mechanics, Theory and Applications with case histories*, Springer-Verlag, New York , 1990.
- Worlanyo, A.S., Jiangfeng, L., Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review, 2021.
- Xia, K., Chen, C., Liu, X., Wang, Y., Liu, X., Yuan, J., Estimating shear strength of high-level pillars supported with cemented backfilling using the Hoek–Brown strength criterion, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16 (2024) 454–469.
- Xu, S., Suorineni, F.T., An, L., Li, Y.H., Jin, C.Y., Use of an artificial crown pillar in transition from open pit to underground mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 117 (2019).
- Xu, W., Zhang, K., Zhang, Y., Jiang, J., Packing Fraction, Tortuosity, and Permeability of Granular-Porous Media With Densely Packed Spheroidal Particles: Monodisperse and Polydisperse Systems, *Water Resour Res*, 58 (2022).
- Xue, L., Qin, S., Sun, Q., Wang, Y., Lee, L.M., Li, W., A Study on Crack Damage Stress Thresholds of Different Rock Types Based on Uniaxial Compression Tests, *Rock Mech Rock Eng*, 47 (2014) 1183–1195.
- Yardimci, A.G., Tutluoglu, L., Karpuz, C., Crown pillar optimization for surface to underground mine transition in Erzincan/Bizmisen iron mine. 50th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 2016.
- Zhang, L., *Engineering Properties of Rocks: Second Edition*, 2016.

- Zhang, L., Einstein, H.H., Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (2004) 337–341.
- Zhang, P., Yang, T., Yu, Q., Xu, T., Zhu, W., Liu, H., Zhou, J., Zhao, Y., Microseismicity Induced by Fault Activation During the Fracture Process of a Crown Pillar, *Rock Mech Rock Eng*, 48 (2015) 1673–1682.
- Zhang, S., Ma, X., How Does In Situ Stress Rotate Within a Fault Zone? Insights From Explicit Modeling of the Frictional, Fractured Rock Mass, *J Geophys Res Solid Earth*, 126 (2021).
- Zhang, X., Chen, Z., Liu, Y., Constitutive models. The material point method: a continuum-based particle method for extreme loading cases, Academic Press, 2016.
- Zhang, X., Sanderson, D., Numerical Modelling and Analysis of Fluid Flow and Deformation of Fractured Rock Masses, Elsevier Science Ltd., Oxford , 2002.
- Zhang, Z., Zhu, J., Deng, J., A comparative study for determining rock joint normal stiffness with destructive uniaxial compression and non-destructive ultrasonic wave testing, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15 (2023) 1700–1712.
- Zhou, L., Li, Z., Liu, W., Zhang, L., Zhong, L., Luo, X., Liang, H., Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation, *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (2015).
- Zhou, Y., Zhao, J., *Advances in rock dynamics and applications*, 2011.
- Zhu, Q., Li, D., Han, Z., Li, X., Zhou, Z., Mechanical properties and fracture evolution of sandstone specimens containing different inclusions under uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 115 (2019) 33–47.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Fox, D., *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics: Seventh Edition*, 2013.
- Zoback, M.L., First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project, *J Geophys Res Solid Earth*, 97 (1992) 11703–11728.

Zou, Z., Chen, H., Wang, Z., Long, X., Chen, Y., Improvement of the strength reduction method on the basis of FLAC3D in slope stability, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 9 (2016).