AVNİK (BİNGÖL) APATİTLİ DEMİR AÇIK OCAK İŞLETMESİNDEKİ ŞEV DURAYLILIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

OGÜN OZAN VAROL

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AVNİK (BİNGÖL) APATİTLİ DEMİR AÇIK OCAK İŞLETMESİNDEKİ ŞEV DURAYLILIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

OGÜN OZAN VAROL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

AVNİK (BİNGÖL) APATİTLİ DEMİR AÇIK OCAK İŞLETMESİNDEKİ ŞEV DURAYLILIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ogün Ozan VAROL tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ _____
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Prof. Dr. Mustafa AYHAN _____
Danışman, **Maden Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Mutluhan AKIN _____
İkinci Danışman, **Jeoloji Mühendisliği Bölümü,**
Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Ümit ÖZER **(*)** _____
Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa AYHAN **(**)** _____
Maden Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Askeri KARAKUŞ _____
Maden Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. M. Salih KESKİN _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail DİNÇER _____
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

ONAY

Tarih: *13/06/2022*

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Kızıma ve Eşime…

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Ogün Ozan VAROL

İmza:

TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Prof. Dr. Mustafa Ayhan'a ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Mutluhan Akın'a çalışmanın daha fikir aşamasından, örnekleme, deney setlerini oluşturma, analizlerin yorumlanması ve tez taslağındaki düzeltmeler konularına kadar gösterdikleri destek ve sabırdan dolayı teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesi Üyeleri Doç. Dr. M. Salih Keskin'e ve Prof. Dr. Askeri Karakuş'a, jüri üyeleri Prof. Dr. İsmail Dinçer ve Prof. Dr. Ümit Özer'e tezin daha nitelikli bir hale gelmesi için yaptıkları eleştiri ve önerileri için teşekkür ederim.

Yazar, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (DÜBAP), bu tez çalışması için sağladıkları finansal destek için (Proje No: MÜHENDİSLİK-20.0004) için teşekkürü bir borç bilir.

Yazar, Avnik demir açık ocak işletmesi sahasında çalışmamıza onay veren ve saha çalışmaları esnasında her türlü kolaylığı sağlayan Dimin A.Ş yöntemine, teknik ekibine ve tüm çalışanlarına teşekkürlerini sunar.

Tezin yazımı esnasında tezi okuyarak geri bildirimlerde bulunan aynı çalışma odasını paylaştığım Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanı Arş. Gör. Muhammed Coşkun Irmak'a teşekkür ederim.

En önemlisi, beni her zaman destekleyen ve yoğun çalışma tempoma sabreden kıymetli eşim Pınar'a, ona ayıracağım vakitten kısarak çalışmalarıma zaman ayırdığım için en büyük özürü dilemek istediğim, hayatımı güzelleştirip, anlamlı hale getiren biricik kızım Derin Neva'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ viii
TABLOLAR LİSTESİ xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xv
ÖZET xvi
ABSTRACT xvii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ 5
2.1 Şev ve Şev Duraylılığı 10
2.2 Şev Duraylılığına Etki Eden Faktörler 11
2.3 Kaya Şevlerinde Meydana Gelen Yenilme Türleri 12
2.3.1 Düzlemsel kayma 12
2.3.2 Kama tipi kayma 13
2.3.3 Devrilme yenilmesi 15
2.3.4 Dairesel yenilme 15
2.4 Şev Duraylılık Analiz Yöntemleri 16
2.4.1 Limit denge analizleri 16
2.4.2 3 boyutlu limit denge analizleri 24
2.4.3 Nümerik analizler 26
3. MALZEME VE YÖNTEM 29
3.1 Avnik (Bingöl) Açık Ocak Demir İşletmesi 29
3.1.1 Çalışma sahasının genel jeolojisi 31
3.1.2 Çalışma alanının depremselliği 34
3.1.3 Saha çalışmaları 35
3.1.2 Laboratuvar çalışmaları 38
3.2 Çalışma Alanının Mühendislik Jeolojisi 46

3.3 Kaya Kütle Makaslama Dayanım Parametrelerinin Geri Analizler ile Belirlenmesi 48
3.4 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri 51
3.5 Kinematik Analizler 57
3.6 İki Boyutlu (2D) ve Üç Boyutlu (3D) Limit Denge Analizleri 57
3.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Duraylılık Analizleri 57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 59
4.1 Laboratuvar Çalışmaları Sonucunda Elde Edilen Malzeme Özellikleri 59
4.2 Süreksizliklerin Makaslama Dayanımının Belirlenmesi 71
4.3 Kinematik Analizler 75
4.4 Kaya Kütle Özelliklerinin RMR Yöntemiyle Belirlenmesi 81
4.5 Kaya Kütle Özelliklerinin Q Yöntemiyle Belirlenmesi 85
4.6 Kaya Kütle Makaslama Dayanımının Geri Analizler ile Belirlenmesi 89
4.7 İki Boyutlu (2B) Limit Denge Analizleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Duraylılık Analizleri 93
4.8 Üç Boyutlu (3-B) Limit Denge Analizleri ile Şev Duraylılığının Dinamik ve Statik Koşullarda Belirlenmesi 100
4.9 Pseudostatik Duraylılık Analizleri 106
4.10 Boşluk Suyu Basıncının Değişimine Bağlı Olarak Gerçekleştirilen 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Limit Denge Analizleri 111
5. DEĞERLENDİRME 117
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 125
KAYNAKLAR 127
ÖZGEÇMİŞ 135

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Açık ocak maden işletmesinde bulunan şev termnolojisi (Wyllie ve Mah, 2004) 11
Şekil 2.2 Açık ocak maden işletmesinde şevlere etkiyen iç ve dış faktörler 12
Şekil 2.3 Düzlemsel kayma koşulu (Hoek ve Bray, 1977) 13
Şekil 2.4 Kama tipi kayma kesiti (Wyllie ve Mah, 2004)..... 14
Şekil 2.5 Kama tipi kayma (Stead ve Wolter, 2015)..... 14
Şekil 2.6 a) Tek blok devrilmesi, b) Eğilme blok devrilmesi (Alejano vd., 2010'dan değiştirilmiştir)..... 15
Şekil 2.7 Devrilme tipi yenilme sınıflandırması a) Blok devrilmesi, b) Eğilme devrilmesi, c) Blok-eğilme devrilmesi(Wyllie ve Mah, 2004) 15
Şekil 2.8 a) Tipik bir dairesel kayma kesiti, b) Dilimler üzerine etkiyen kuvvetler (Wyllie ve Mah, 2004) 16
Şekil 2.9 0 yöntemi şev ve kayma geometrisi örneği (Duncan vd., 2014) 17
Şekil 2.10 İsveç dilim yöntemi (Sağır, 2016) 18
Şekil 2.11 Basitleşitirlmiş Bishop yöntemi (Akbulut, 2012)..... 19
Şekil 2.12 Basitleştirilmiş Janbu yöntemi düzeltme faktörü f0 (Janbu vd., 1956) 20
Şekil 2.13 Spencer yönteminde bir dilime etki eden dilimler arası kuvvet ve kuvvetlerin bileşkesi..... 21
Şekil 2.14 Dilimler arası kuvvet fonksiyonu türleri (Ertuğrul, 2016)..... 22
Şekil 2.15 Kayan kütlenin kolonlara ayrıldığı tipik bir 3-boyutlu model örneği (Huang ve Tsai, 2000)..... 25
Şekil 2.16 1280 m derinliğe sahip açık ocak işletmesi (McQuillan vd., 2021) 26
Şekil 2.17 Sınır koşulları belirlenmiş ve ağlara ayrılmış 2 boyutlu model (Huvaj ve Oğuz, 2018)..... 27
Şekil 3.1 Çalışma sahası yer bulduru haritası 29
Şekil 3.2 Açık ocak işletmesinin derinliği 30
Şekil 3.3 Açık ocak işletmesinde bulunan basamakların şev açıları..... 30
Şekil 3.4 Güneydoğu Anadolu Bölgesi tektonik kuşakları (Erdoğan ve Dora, 1983)31
Şekil 3.5 Bitlis metamorfiklerinin Avnik yöresindeki genel stratigrafik kesiti (Erdoğan ve Dora, 1983'ten değiştirilmiştir)..... 32
Şekil 3.6 Avnik bölgesinin jeolojik haritası (Erdoğan ve Dora, 1983; Helvacı, 1984) 33

Şekil 3.7 Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2021)..... 35
Şekil 3.8 Çalışma sahasının sektörlere ayrılmış hali..... 36
Şekil 3.9 Süreksizlik hat etüdü yapılan şev (mikaşist)..... 37
Şekil 3.10 Çalışma sahasında mostra yüzeyinde yapılan süreksizlik hat etüdü..... 38
Şekil 3.11 Laboratuvar deneyleri için hazırlanan örnekler..... 39
Şekil 3.12 (a) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi öncesi, (b) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonrası..... 41
Şekil 3.13 Dolaylı çekme dayanımı için kullanılan numune (fillit)..... 42
Şekil 3.14 Tilt deneyi şematik görünümü (Alejano vd., 2018)..... 43
Şekil 3.15 Tilt deneyinde kullanılan farklı geometriye sahip numuneler ve farklı diziliş şekilleri (Alejano vd., 2018)..... 43
Şekil 3.16 Tilt deneyinde temel sürtünme açısı belirlenen numune (mikaşist)..... 44
Şekil 3.17 L tipi Schmidt çekici..... 44
Şekil 3.18 Nokta yükleme deneyi için gerekli numune boyutları a) çapsal, b) eksenel, c) blok, d) düzensiz örnek (ISRM, 2007)..... 45
Şekil 3.19 Nokta yükleme deneyi aleti ve aksamları..... 45
Şekil 3.20 Çalışma sahası mühendislik jeolojisi haritası..... 47
Şekil 3.21 S1'de meydana gelen kayma..... 49
Şekil 3.22 S3'te meydana gelen kayma..... 49
Şekil 3.23 S1 yenilme öncesi şev geometrisi..... 50
Şekil 3.24 S3 yenilme öncesi şev geometrisi..... 50
Şekil 3.25 Kaya kalitesi (RQD) puanı..... 52
Şekil 3.26 Eklem takım sayısı (Jn)..... 52
Şekil 3.27 Eklem pürüzlülük sayısı (Jr)..... 52
Şekil 3.28 Eklem alterasyon sayısı (Ja)..... 53
Şekil 3.29 Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw)..... 53
Şekil 3.30 Eklem indirgeme faktörü (SRF)..... 54
Şekil 3.31 Q puanı ve Q puanına karşılık gelen kaya kütlesi sınıfları..... 55
Şekil 3.32 RMR sınıflama sistemi parametreleri ve puan tablosu (Bieniawski, 1989)..... 56
Şekil 4.1 Mikaşist birimi kuru birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)..... 59
Şekil 4.2 Mikaşist birimi doygun birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)..... 60
Şekil 4.3 Mikaşist birimi kütlece su emme (%)..... 60

Şekil 4.4 Mikaşist birimi gözeneklilik (%) 61
Şekil 4.5 Fillit birimi kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)..... 61
Şekil 4.6 Fillit birimi doygun birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)..... 62
Şekil 4.7 Fillit birimi kütlece su emme (%) 62
Şekil 4.8 Fillit birimi gözeneklilik (%) 62
Şekil 4.9 Gnays birimi kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3) 63
Şekil 4.10 Gnays birimi doygun birim hacim ağırlığı (kN/m^3) 63
Şekil 4.11 Gnays birimi kütlece su emme (%)..... 63
Şekil 4.12 Gnays birimi gözeneklilik (%)..... 64
Şekil 4.13 Mikaşist birimi nokta yük dayanımı (MPa) 64
Şekil 4.14 Fillit birimi nokta yük dayanımı (MPa) 64
Şekil 4.15 Mikaşist birimi gözeneklilik ve su emme arasındaki ilişki..... 65
Şekil 4.16 Fillit birimi gözeneklilik ve su emme arasındaki ilişki..... 65
Şekil 4.17 Gnays birimi gözeneklilik ve tek eksenli basınç dayanımı – tek eksenli basınç dayanımı ve su emme arasındaki ilişki 65
Şekil 4.18 Süreksizlik pürüzlülük katsayısının belirlenmesinde kullanılan süreksizlik profilleri (Barton ve Choubey, 1977)..... 72
Şekil 4.19 Mikaşist ve fillit birimleri için Schmidt geri sıçrama sertlik değeri ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Deere ve Miller, 1966)..... 73
Şekil 4.20 Mikaşist, fillit ve gnays için Barton ve Bandis görgül yenilme ölçütüne göre hazırlanmış süreksizlik yenilme zarfları 74
Şekil 4.21 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S1) 75
Şekil 4.22 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S2) 76
Şekil 4.23 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S5) 76
Şekil 4.24 S1 için düzlemsel kayma kinematik analizi..... 77
Şekil 4.25 S2 için düzlemsel kayma kinematik analizi..... 77
Şekil 4.26 S5 için düzlemsel kayma kinematik analizi..... 78
Şekil 4.27 S1 için kama tipi kaymanın kinematik analizi..... 78
Şekil 4.28 S2 için kama tipi kaymanın kinematik analizi..... 79
Şekil 4.29 S5 için kama tipi kaymanın kinematik analizi..... 79

Şekil 4.30 S1 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi 80
Şekil 4.31 S2 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi 80
Şekil 4.32 S5 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi 81
Şekil 4.33 Süreksizlik aralığı – RQD ilişkisi 82
Şekil 4.34 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin RQD değerleri için hesaplanan RMR puanları 83
Şekil 4.35 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri için hesaplanan RMR puanları 83
Şekil 4.36 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin süreksizlik aralığı değerleri için hesaplanan RMR puanları 84
Şekil 4.37 Kaya kalitesinin (RQD) puanlanması 86
Şekil 4.38 Birimlerin eklem takım sayısının (Jn) puanlanması 86
Şekil 4.39 Birimlerin eklem pürüzlülük sayısı (Jr) 86
Şekil 4.40 Birimlerin eklem alterasyon sayısının (Ja) puanlanması 87
Şekil 4.41 Birimlerin eklem eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) puanlanması 87
Şekil 4.42 Birimlerin eklem eklem indirgeme indirgeme faktörü (SRF) puanlanması 88
Şekil 4.43 Birimlerin Q sistemine göre değerlendirilmesi ve β genel şev açılarının grafik üzerinde gösterilmesi 89
Şekil 4.44 Mikaşist, fillit ve gnays birimleri için arazi verileri neticesinde kantitatif GSI abağı ile belirlenen GSI değerleri (Sonmez ve Ulusay, 2002) 90
Şekil 4.45 Geri analizler neticesinde fillit birimi için elde edilen $GSI_{(s)}$ – $GSI_{(m)}$ grafiği 91
Şekil 4.46 Geri analizler neticesinde mikaşist birimi için elde edilen $GSI_{(s)}$ – $GSI_{(m)}$ grafiği 91
Şekil 4.47 Fillit birimi için çizilen Hoek – Brown yenilme zarfı 92
Şekil 4.48 Mikaşist birimi için çizilen Hoek – Brown yenilme zarfı 92
Şekil 4.49 Limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yönteminde kullanılan kesitler 95
Şekil 4.50 1-1’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları 96
Şekil 4.51 2-2’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları 96

Şekil 4.52 3-3’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları 97
Şekil 4.53 4-4’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları 97
Şekil 4.54 1-1’ kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı 98
Şekil 4.55 2-2’ kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı 98
Şekil 4.56 3-3’ kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı 99
Şekil 4.57 4-4’ kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı 99
Şekil 4.58 İHA nokta bulutundan oluşturulan 3-boyutlu arazi modeli 101
Şekil 4.59 Statik koşullarda Bishop analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi 102
Şekil 4.60 Statik koşullarda Janbu analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi 103
Şekil 4.61 Statik koşullarda Morgenstern-Price analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi 103
Şekil 4.62 Statik koşullarda Spencer analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi 104
Şekil 4.63 0,307 g deprem yükü altında Bishop analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi 104
Şekil 4.64 0,307 g deprem yükü altında Janbu analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi 105
Şekil 4.65 0,307 g deprem yükü altında Morgenstren-Price analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi 105
Şekil 4.66 0,307 g deprem yükü altında Spencer analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi 106
Şekil 4.67 Limit denge analizi ve sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen güvenlik katsayıları ile 3 boyutlu limit denge analizi neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarının karşılaştırılması 106

Şekil 4.68 1-1’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi 107
Şekil 4.69 2-2’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi 108
Şekil 4.70 3-3’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi 108
Şekil 4.71 4-4’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi 109
Şekil 4.72 1-1’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi 109
Şekil 4.73 2-2’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi 110
Şekil 4.74 3-3’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi 110
Şekil 4.75 4-4’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi 111
Şekil 4.76 1-1’ ve 4-4’ kesitleri üzerinde Bishop yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik 113
Şekil 4.77 1-1’ ve 4-4’ kesitleri üzerinde Morgenstern-Price yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik 113
Şekil 4.78 1-1’ ve 4-4’ kesitleri üzerinde Spencer yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik 114
Şekil 4.79 1-1’ ve 4-4’ kesitleri üzerinde Janbu yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik 114
Şekil 4.80 Üç boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen boşluk suyu basıncının değişimine bağlı olarak güvenlik katsayının değişimi..... 115
Şekil 4.81 2-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları 116
Şekil 4.82 3-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları 116

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Limit denge analiz yöntemlerinin kullandığı statik denge koşulları (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005) 24
Tablo 3.1 Sektörlere ayrılan açık ocak işletmesini oluşturan birimler ve şev duraysızlıkları 36
Tablo 4.1 Mikaşist birimi fiziko-mekanik özellikleri 66
Tablo 4.2 Fillit birimi fiziko-mekanik özellikleri 67
Tablo 4.3 Gnays birimi fiziko-mekanik özellikleri 68
Tablo 4.4 Literatürde benzer birimlerde yapılan çalışmalar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması 69
Tablo 4.5 Fillit, mikaşist ve gnays birimlerinin RMR puanları ve kaya sınıfları 85
Tablo 4.6 Birimlerin Q değeri ve β genel şev açıları 88
Tablo 4.7 Fillit birimi arazi verileri ve geri analiz yöntemiyle hesaplanan kaya kütlesi dayanım parametreleri 93
Tablo 4.8 Mikaşist birimi arazi verileri ve geri analiz yöntemiyle hesaplanan kaya kütlesi dayanım parametreleri 93
Tablo 4.9 Kesitler üzerinde yapılan limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları 100
Tablo 4.10 3- Boyutlu model üzerinde statik ve deprem etkisi altında elde edilen minimum güvenlik katsayısı değerleri 101
Tablo 4.11 Kesitler üzerinde 0,307 g deprem etkisi altında yapılan limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları 111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
σ_{ci}	Tek Eksenli Basınç Dayanımı
γk	Kuru Birim Hacim Ağırlık
γd	Doygun Birim Hacim Ağırlık
g	Yerçekimi Ivmesi
Is	Düzeltilmiş Nokta Yükleme Dayanımı
D_e	Eşdeğer Karot Çapı
mb	Kaya Malzeme Sabiti
s	Hoek – Brown Parametresi

Kısaltma	Açıklama
RMR	Kaya Kütle Sınıflaması
RQD	Kaya Kalite Göstergesi
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
JRC	Eklem Pürüzlülük Katsayısı
JCS	Eklem Yüzey Dayanımı
SCR	Süreksizlik Yüzey Koşulu
SR	Yapısal Özellik Puanı

ÖZET

AVNİK (BİNGÖL) APATİTLİ DEMİR AÇIK OCAK İŞLETMESİNDEKİ ŞEV DURAYLILIĞININ FARKLI YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Varol, Ogün O.
Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü
Danışman: Prof. Dr. Mustafa AYHAN
İkinci Danışman: Prof. Dr. Mutluhan AKIN
Haziran 2022, 154 sayfa

İşletilmesi ekonomik olarak uygun bulunan maden yataklarının yüzeye yakın olanlarının doğrudan kazılarak, derinlerde bulunan maden yataklarının ise üzerini kaplayan örtü tabakasının kaldırılmasının ardından üretilmesi şeklinde yapılan maden işletme yöntemi açık işletme yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Sanayinin artan hammadde ihtiyacı ile birlikte yüzeye yakın maden yatakları azalmaktadır. Fakat gelişen teknoloji sayesinde derinlerde yer alan maden yatakları ekonomik olarak işletilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, öncelikle şev duraylılığı kavramı hakkında ve kaya şevlerinde meydana gelebilecek duraysızlıklar hakkında genel bilgiler verilmiş ve ardından şev duraylılık analizlerine değinilmiştir. Çalışma sahası olan Bingöl (Avnik)'de bulunan apatitli demir açık ocak işletmesi 2008 yılından beri Dimin Madencilik A.Ş tarafından işletilmekte olup ülkemizin en önemli demir açık ocak işletmeleri arasında yer almaktadır. Açık ocak işletmesinin jeolojisi ve depremsellik durumu hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. Yapılacak olan şev duraylılığı analizlerinin mevcut durumu yansıtması için öncelikli olarak mevcut şevler üzerinde süreksizlik hat etütleri yapılarak kaya kütlesini oluşturan süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri tespit edilmiştir. Doğrultusu ve eğimleri tespit edilen süreksizliklerin makaslama dayanım parametleri belirlenmiş ve açık ocak işletmesinde meydana gelebilecek duraysızlık türünün saptanabilmesi için kinematik analizler yapılmıştır. Açık ocak işletmesinde şevleri oluşturan kaya kütlesinden laboratuvarda kaya malzemesinin belirlenmesi amacıyla temsili blok numuneleri alınmıştır. Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak açık ocak işletmesinde bulunan mevcut şevler üzerinde iki boyutlu ve üç boyutlu limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile duraylılık analizleri yapılarak şevlerin güvenlik katsayıları depremli ve statik koşullarda ortaya konmuştur. Açık ocak işletmesinde gözlenen şev duraysızlıkları dikkate alınarak geri analizler yapılmış ve analizler neticesinde de kaya kütlesinin makaslama dayanım parametreleri de belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan 2 boyutlu ve 3 boyutlu limit denge analizleri sonuçları incelendiğinde, 3 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarının 2 boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarından %13 daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaya mekaniği, Şev duraylılığı, Limit denge analizi, Sonlu elemanlar analizi, Açık ocak demir madeni.

ABSTRACT

EVALUATION OF SLOPE STABILITY IN AVNIK (BINGOL) APATITE IRON OPEN PIT BY DIFFERENT METHODS

Varol, Ogün O.
Doctor of Philosophy Department of Mining Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa AYHAN
Co-Supervisor: Prof. Dr. Mutluhan AKIN
June 2022, 154 pages

The mining operation method, which is the found economically suitable mine deposits to be operated directly excavated and production of deep mineral deposits produced after the stripping, is called the open mining method. With the increasing raw material need of the industry, mineral deposits near the surface are decreasing. However, thanks to the developing technology, deep mineral deposits can be operated economically. In this study, first of all, general information about the concept of slope stability and instability that may occur in rock slopes is given, and then slope stability analysis is mentioned. The apatite iron open pit located in Bingol (Avnik), which is the study area, has been operated by Dimin Madencilik A.Ş since 2008 and is among the most important iron open pit enterprises of our country. Information was given about the geology and seismicity of the open pit mine. In order for the slope stability analyzes to be made to reflect the current situation, discontinuity line studies were made on the existing slopes and the direction and slopes of the discontinuities forming the rock mass were determined. The shear strength parameters of the discontinuities, whose direction and slopes were determined, were determined and kinematic analyzes were carried out to determine the type of instability that may occur in the open pit operation. Representative block samples were taken from the rock mass forming the slopes in the open pit mine in order to determine the rock material in the laboratory. By using the physical and mechanical properties of the rock material, two-dimensional and three-dimensional limit equilibrium analyzes on the existing slopes in the open pit operation and stability analyzes with the finite element method were performed, and the safety coefficients of the slopes were revealed under seismic and static conditions. Considering the slope instability observed in the open pit pit, back analyzes were made and shear strength parameters of the rock mass were determined as a result of the analyses. When the comparison of 2d and 3d results, the results show that 3d limit equilibrium method analysis results 13% higher than 2d limit equilibrium analysis results.

Keywords: Rock mechanics, Slope stability, Limit equilibrium analyses, Finite element method, Open pit iron mining.

1. GİRİŞ

İşletilmesi ekonomik olarak uygun bulunan maden yataklarının, yüzeye yakın olanlarının doğrudan kazılarak derinlerde yer alan maden rezervlerinin ise üzerini kaplayan örtü tabakasının kaldırması ve sonrasında cevherin üretilmesi şeklinde yapılan maden işletme yöntemi açık işletme yöntemi olarak adlandırılmaktadır (Eskikaya vd., 2005). Gelişen teknoloji ve sanayinin artan hammadde talebinden dolayı yüzeye yakın maden yatakları son yıllarda giderek azalmaktadır. Açık işletme yönteminin avantajlarından olan güçlü ve kapasiteli ekipman kullanım olanağından dolayı ve amonyum nitratın (ANFO) maden üretim faaliyetlerinde kullanılması ile yer kürenin derinlerinde olan maden yataklarının işletilmesine olanak sağlanmaktadır. Ayrıca gelişen teknoloji ile beraber işletilemeyen düşük tenörlü maden yataklarının da işletilmesine olanak sağlanmaktadır. Açık ocak maden işletmeciliğinde şev geometrisinin ocağın jeolojisine göre tasarlanması hem ocak güvenliği açısından hem de üretim maliyeti açısından oldukça önemlidir. Şevlerin dike yakın açılarda seçilmesi dekapaj maliyetlerini azaltırken şev duraylılığı açısından olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Şev açılarının çok düşük seçilmesi ise dekapaj maliyetini arttırabilmektedir (Özdoğan ve Deliormanlı, 2015). Madenciliğin ekonomik ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için derinliği binlerce metreyi geçen açık ocak maden işletmelerinde şev tasarımı en önemli konuların başında gelmektedir (Ertuğrul, 2016).

Açık ocak maden işletmelerinde şev duraylılığını etkileyen unsurları iç ve dış faktörler olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. İç faktörler sahanın jeolojik ve hidrolojik yapısı ile şevi oluşturan kaya kütlesinin mekanik özelliklerini temsil ederken dış faktörler sahanın projelendirilmesi aşamasında yapılan şev açısı, şev geometrisi, yer altı su drenajı gibi etmenleri temsil etmektedir (Keskin, 2008). Bu etmenler her işletmede farklı olacağından dolayı bir şevin duraylı olmasını sağlayan koşulları belirleyen genel kurallar koymak çok zordur. Şev duraylılık çalışmaları uzmanlık isteyen çoğu zaman sayısal hesap ağırlıklı işlemlerdir. Jeolojik verilerin toplanması ve bunların değerlendirilmesi, kinematik analizlerin yapılması ve süreksizliklerin dayanım parametrelerinin belirlenmesi, duraylılık analizlerinin yapılması ve şevlerde gelişebilecek duraysızlıklar durumunda alınacak önlemlerin belirlenmesi gibi uzman bilgi ve deneyimi gerektiren bir çok aşamayı içerir (Eskikaya vd., 2005).

Derin açık ocak işletmelerinde, sahayı yansıtabilecek duraylılık analizi yapabilmek için, ilk olarak çalışma sahasının jeolojik, hidrojeolojik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sahada jeolojik çalışmalar yapılmalıdır. Jeolojik çalışmalar, açık ocak çukurunu oluşturan birimlerin tanımlanması ile başlar ve bu birimleri oluşturan kaya kütlelerinin jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi ile devam eder. Kaya kütlesinin jeoteknik özellikleri, kaya malzemesinin laboratuvarda belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri ile kaya kütlesinin içerdiği süreksizliklerinin tanımlanması ve bu süreksizliklerin davranışları ve dayanım özelliklerini kapsamaktadır. Kaya kütlelerinin davranışlarını belirlemek amacıyla kaya kütlelerinden kaya malzemesi örnekleri alınmakta ve bu örneklerin davranışlarını ve özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvarlarda birçok deney gerçekleştirilmektedir. Arazi ve laboratuvarda yapılan başlıca çalışmalar şunlardır;

- Kaya birimlerinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin arazi çalışmaları ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenmesi.
- Süreksizlik hat etütleri kapsamında, süreksizliklerinin geometrisinin, eğim ve eğim yönlerinin, süreksizliklerin içerdikleri dolgu türü ve dolgu miktarı ile su içeriğinin tespit edilmesi.
- Açık ocak işletmesinde bulunan basamakların hangi kotta yer altı suyu ile karşılaşıldığının tespit edilmesi.
- Açık ocak işletmesinin bulunduğu bölgenin tektonik özelliklerinin tespit edilmesi.

Şev duraylılık analizlerine geçmeden önce analizler için gerekli olan tüm verilerin arazi ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilmesi ve daha sonra analizlere geçilmesi gerekmektedir.

Şev duraylılık analizlerinin arazi yansıtan bir biçimde yapılmaması veya hiçbir şekilde şev duraylılık analizlerinin yapılmadan işletmeye geçilmesi açık ocak işletmesinin derinleşmeye başlaması ile şevlerde duraysızlıklar meydana gelmeye başlayabilir ve bu duraysızlıklar geriye dönülemez sonuçlar doğurabilir. Şevlerde meydana gelebilecek duraysızlıklar neticesinde büyük hacimlerde malzeme bir anda yer değiştirebilir ve bunun neticesinde tüm üretim bir anda durabilir ve işletmede can kayıpları meydana gelebilir. Bugüne kadar gerek açık ocak işletmelerinde gerekse de diğer mühendislik yapılarında bulunan şevlerde duraysızlıklar meydana gelmiş ve

kaymaların yönüne göre yerleşim yerlerinde zararlar meydana gelmiş ve can kayıpları yaşanmıştır.

Geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalar ışığında edinilen tecrübeler neticesinde bir maden işletmeye alınmadan önce arazi çalışmalarının yapılması ve çalışma sahasını oluşturan birimlerin mühendislik özelliklerinin saptanarak şev duraylılık analizlerinin yapılması ileride meydana gelebilecek şev duraysızlıklarını ve bu duraysızlıklara bağlı olarak meydana gelmesi muhtemel can ve mal kayıplarının önüne geçilmesini sağlayacaktır.

Şevlerin duraylılığı limit denge yönteminde güvenlik katsayısı denilen birimsiz bir değer ile ifade edilmektedir. Bu değer; kaymayı engelleyen faktörlerin kaymaya neden olan faktörlere oranı ile belirlenmektedir (Chen ve Cheng, 2017; McCombie ve Wilkinson, 2002; Yang ve Yin, 2004; Zhu vd., 2003).

Terzgahi vd. (1996) tarafından farklı amaçlarla kazılan şevler için güvenlik katsayıları önerilmiştir. Açık ocak maden işletmelerinde güvenlik katsayıları genellikle 1,2 ile 1,4 arasında değişmektedir (Wyllie ve Mah, 2004).

Açık ocak işletmelerinde meydana gelen şev duraylılık problemlerinin değerlendirilmesi açık ocak işletmeciliğinde en önemli, zorlu ve ilgi çekici alanlardan biridir. Bu alanda yıllardan beri süregelen çalışmalar, kaya ve zemin malzemlerin karmaşık davranışlarının daha iyi anlaşılması ve gerek arazi gerekse de laboratuvar çalışmalarında var olan belirsizliklerin ortadan kaldırılması ve analizlerin daha kolay yapılabilmesi için devam etmektedir.

Gelişen bilgisayar programları ile geçmişte uzun zaman alan hesaplamalar artık kolaylıkla yapılabilmektedir. Ayrıca elektronik şev izleme sistemlerinin geliştirilmesi ile birlikte şevlerde gelişen her hareket uzaktan çok kolay bir şekilde algılanabilmektedir.

Bütün bu gelişmelere rağmen madenciliğin doğasında olan berlirsizlikler nedeniyle şev duraylılığı analizleri hala karmaşık ve zorlu problemler olma özelliğini korumaktadırlar.

Şev duraylılığı analizlerine yönelik günümüzde de en sık kullanılan yöntemler limit denge analiz yöntemleri ve nümerik yöntemlerdir.

Bu çalışma kapsamında, öncelikle şev duraylılığı kavramı hakkında ve kaya şevlerinde meydana gelebilecek duraysızlıklar hakkında genel bilgiler verilmiş ve ardından şev duraylılık analizlerine değinilmiştir. Çalışma sahası olan Bingöl

(Avnik)'de bulunan apatitli demir açık ocak işletmesi 2008 yılından beri Dimin Madencilik A.Ş tarafından işletilmekte olup ülkemizin en önemli demir açık ocak işletmeleri arasında yer almaktadır. Ardından açık ocak işletmesinin jeolojisi ve depremsellik durumu hakkında bilgilendirmeler yapılmıştır. Yapılacak olan şev duraylılığı analizlerinin mevcut durumu yansıtması için öncelikli olarak mevcut şevler üzerinde süreksizlik hat etütleri yapılarak kaya kütlesini oluşturan süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri tespit edilmiştir. Doğrultusu ve eğimleri tespit edilen süreksizliklerin makaslama dayanım parametleri belirlenmiş ve açık ocak işletmesinde meydana gelebilecek duraysızlık türünün saptanabilmesi için kinematik analizler yapılmıştır. Açık ocak işletmesinde şevleri oluşturan kaya kütlesinden laboratuvarda kaya malzemesinin belirlenmesi amacıyla temsili blok numuneleri alınmıştır. Kaya malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri kullanılarak açık ocak işletmesinde bulunan mevcut şevler üzerinde iki boyutlu ve üç boyutlu limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile duraylılık analizleri yapılarak şevlerin güvenlik katsayıları depremli ve statik koşullarda ortaya konmuştur. Açık ocak işletmesinde gözlenen şev duraysızlıkları dikkate alınarak geri analizler yapılmış ve analizler neticesinde de kaya kütlesinin makaslama dayanım parametreleri de belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Birçok araştırmacı şevlerin duraylılığını belirlemek ve şev duraylılık analiz yöntemlerini kıyaslamak için çeşitli yazılımlar kullanmışlardır. Bu çalışmalar genel olarak limit denge analizleri ve nümerik analizler neticesinde elde edilen güvenlik katsayını kıyaslamakta ve iki farklı yöntem kullanılarak yenilme düzlemleri karşılaştırılmaktadır. Zeminlerde yapılan çalışmaların birçoğunda yenilme kriteri olarak Mohr – Coulomb yenilme kriteri kullanılmaktadır (Ahmad, 2012; Akbas ve Huvaj, 2015; Aryal, 2006; Kadakci Koca ve Koca, 2020; Moudabel, 2013). Yapılan bu çalışmalar limit denge analizlerinin ve nümerik analizlerin, sismik koşullar altında (Aryal, 2006; Rabie, 2014), farklı şev açılarında (Ghazaly vd., 2016) ve farklı yer altı su seviyelerinde (Akbas ve Huvaj, 2015; Aryal, 2006; Kadakci Koca ve Koca, 2020; Rabie, 2014) karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu bölümde kaya şev mühendisliği ile ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalar hakkında kısa bilgiler sunulacaktır.

Erdoğan ve Dora (1983) yaptıkları çalışmada Bitlis Masifi apatitli demir yataklarının oluşumunu ve jeolojisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, çalışma neticesinde Avnik bölgesinde yer alan apatitli demir yataklarının volkanosedimenter kökenli olduğunu ve metavolkanit - metaçörtlerle birlikte bulunduğunu ortaya koymuşlardır.

Helvacı (1984) yaptığı çalışmada Avnik (Bingöl) bölgesinde yer alan zengin demir yataklarının oluşumunu ve jeolojisini incelemiştir. Araştırmacı, yaptığı çalışmada apatitçe zengin demir cevherlerinin başlangıçta volkanik ortamda oluştuğunu ve yüksek düzeyde bölümleşme geçiren magmadan ayrılan sıvılardan oluştuğu sonucuna varmıştır.

Erçıkdı vd. (2006), Araklı - Taşönü kireçtaşı sahasında heyelan sonrası oluşan yeni şevin duraylılığını incelemişlerdir. Düzlemsel kayma türü duraysızlığın gözlemlendiği kireçtaşı sahasında değişen durumlar için iki farklı modele göre güvenlik katsayısı hesaplamaları yapmışlardır. Araştırmacılar, yaptıkları analizler neticesinde güvenlik katsayısı değerlerinin genel itibari ile şevlerin uzun dönemde duraylı kalması için güvenlik sınırı olarak kabul edilen 1,2 limit değerinin genelde altında olduğu, heyelan sonucu oluşan yeni şevin uzun dönemde duraylılığını koruyamayacağı ve çevresel açıdan risk taşıdığı sonucuna varmışlardır.

Özşen ve Özcan (2013), Konya'nın Ilgın ilçesinde bulunan TKİ-GLİ Ilgın linyit açık ocağında dekapaj ve kömür üretimi sonrasında batı şevlerinde oluşan

gerilim çatlaklarının hareketlerinin kurulan istasyonlar yardımı ile belirli aralıklarla ölçülerek şev hareketliliğinin izlenmesini amaçlamışlardır. Araştırmacılar, bu ölçümler neticesinde elde edilen verilerin matematiksel modellemesi ve bu verilerin gerçek veriler ile karşılaştırmışlardır.

Aliyazıcıoğlu vd. (2015), Taşönü (Trabzon-Araklı) kireçtaşı ocağında 2005-2007 yılları arasında üç büyük ölçekli düzlemsel yenilme meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yenilme sonrasında, yenilme bölgesinin arkasında gerilme çatlakları oluşmuştur. Araştırmacılar, bu yenilmelerin 110 cm'ye varan killi seviyelerden olduğunu düşünmektedirler. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada, kil tabakasının mevcut durumunu gözlemleyerek ve potansiyel yenilme zonlarını araştırmak amacıyla 193 m 5 adet araştırma sondajı yapmıştırlar. Sondaj verilerini Surpac 6.2 programı ile modelleyen araştırmacılar, üç boyutlu modellemenin ve araştırma sondajlarının şev duraylılığı değerlendirmesinde ki önemini vurgulamışlardır.

Özdoğan ve Deliormanlı (2015), açık ocak maden işletmeciliğinde ekonomikliği etkileyen en önemli faktörün örtü kazı oranı olduğunu vurgulamışlardır. Örtü kazı oranını belirleyen parametrelerden biri olan şev açısının, ekonomiklik açısından en yüksek, iş güvenliği açısından ise duraylılığı sağlayabilecek kadar düşük olması gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Şevlerde oluşan hareketlerin geleneksel olarak kazıkların ölçümü ve inklometre ölçümleri gibi ölçümlerle yapılmakta olduğunu belirten araştırmacılar, çalışmalarında gelişen teknoloji ile beraber mühendislik uygulamalarına yeni bir boyut kazandıran lazer tarayıcılar vasıtasıyla Eti Maden İşletmeleri Bigadiç Simav Açık Ocağında bulunan şevlerde meydana gelen duraysızlık sorunlarını incelemişlerdir.

Sağır (2016), homojen sonlu şevlerde topuk kayması esas alınarak Genelleştirilmiş Janbu Yönteminin değiştirilmesi ile yeni bir yöntem geliştirmiştir. Araştırmacı tarafından geliştirilen bu yöntemde, her çeşit kırılma yüzeyi (komposit) olasılıklarını göz önüne alabilmektedir. Bu yöntemde en kritik kırılma yüzeyi, minimum güvenlik sayısını verecek şekilde MATLAB kullanarak hazırlanmış optimizasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Araştırmacı, elde ettiği en kritik kırılma yüzeyi için ardışık işlemlerle güvenlik katsayısı analizleri yaparak nihai güvenlik katsayısını hesaplamıştır. Daha sonra, farklı kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerine sahip homojen şevlerde duraylılık analizleri yaparak farklı kırılma yüzeyleri ve güvenlik katsayıları elde etmiştir. Çalışma neticesinde, araştırmacı

geliştirdiği yöntemle yapılan analizlerin sonucunda, elde edilen şev kırılma yüzeylerinin dairesel yüzeyden farklı olarak değişik eğri tiplerinin oluşturduğu komposit yapıda olduğunu belirlemiştir. Analizlerini dairesel kırılma yüzeyleri kabulüyle yapan yöntemlere kıyasla, araştırmacı yaptığı çalışmada geliştirdiği yöntemin tüm kırılma yüzey olasılıklarını içerdiği için yapılan analizler sonucunda daha düşük güvenlik katsayıları elde ettiğini belirtmiştir.

Çağlan vd. (2016) Balıkesir-Şamlı Doğu Açık Ocağı'nda haritalanan hornfelsler içerisinde gelişmiş dolgu içermeyen süreksizliklerin Barton görgül yenilme ölçütünü kullanarak, makaslama dayanım parametrelerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, süreksizliklerin konumları ve makaslama dayanım parametreleri kullanılarak yapılan kinematik analizlerde, şevlerin kayma potansiyellerini ortaya koymuşlardır. Belirlenen yenilme tiplerine göre duraylılık analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Deliveris vd. (2016), bir açık ocak linyit madeninin şev duraylığını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. Bu kapsamda, araştırmacılar çalışmalarında üç farklı program (Phase2, Flac, Plaxis) kullanmışlardır. Düzlemsel deformasyon analizleri, Mohr - Coulomb yenilme ölçütü kullanılarak, kuru (drained) koşullarda ve makaslama dayanımı azaltılması tekniğine göre yapılmıştır. Çalışma neticesinde, her üç programında güvenli bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kezer (2019), ilk olarak sonlu elemanlar yöntemi ile katı atık depolama sahalarında şev duraylılığını etkileyecek içsel sürtünme açısı, kohezyon, dilatasyon açısı, elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlık ve şev açısı parametrelerini incelemiş ve bu parametrelerin farklı değerleri için Plaxis v.8 paket programını kullanmıştır. Araştırmacı daha sonra, limit denge yöntemi ile şev duraylılığını etkileyebilecek parametreleri göz önüne almış ve bu parametrelerin farklı değerleri için analizlerini Geostudio 2012 yazılımı kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışma neticesinde, sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile yapılan analizlerde içsel sürtüne açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve şev açısının katı atık dolgu şevinin duraylığı üzerinde etkili olduğu, donatılı arazilerde geogrid kullanılması durumunda duraylığının önemli miktarda arttırılabileceğini saptamıştır. Çalışma neticesinde ayrıca limit denge yöntemi kullanılarak elde edilen güvenlik katsayılarının daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Büyükağnıcı ve Işık (2019) yaptıkları çalışmada limit denge yöntemleri, Eurocode 7 ve BS 8006 standartlarını baz alarak hesaplanan şev duraylılıklarının başarı oranlarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, geleneksel limit denge analizleri kullanılarak yapılan şev duraylılığı analizleri daha tutucu sonuçlar vermiştir. Topakarne duvarlar ve güçlendirilmiş şevler de ise BS 8006 standardı diğer yöntemlere nazaran daha güvenilir sonuçlar vermiştir.

Zhang vd. (2019), Çin'de bulunan Fushun açık ocağının, güney şevlerinin jeolojik olarak oldukça kompleks ve dik olduğuna dikkat çekmişlerdir. Son yıllarda, güney şevlerde oldukça büyük deformasyonlar olduğuna değinen araştırmacılar, 300 m^3 üzerinde kayma ihtimali bulunan kaya kütlesinin varlığından söz etmektedirler. Blokların doğu ve güney sınırları farklı izleme teknikleri kullanılarak tanımlanabilirken, batı sınırı yeterince tanımlanamamıştır. Bu durum güvenli madencilik yapabilmek adına önemli bir sorun oluşturmaktadır. Araştırmacılar, yaptıkları çalışmada mikrosismik teknoloji (DInSAR) tekniği kullanarak kayma riski oluşturan blokları sayısal olarak modellemişlerdir. Çalışma neticesinde, izleme sistemlerinin sayısal modellemelerle beraber kullanımının kayma yüzeylerinin belirlenmesinde önemli bir faktör olduğu ortaya koyulmuştur.

Ganjeh vd. (2019), dinamik etkilerin açık ocak maden işletmelerindeki şevlerin duraylılığı üzerine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, açık ocak maden üretim faaliyetlerinin ayrılmaz bir parçası olan delme – patlatma operasyonların neticesinde ortaya çıkan titreşimlerin şevler üzerinde olan etkisinin ocak şevlerinin planlanırken göz ardı edilmemesine dikkat çekmişlerdir. Bu amaçla çalışmalarında 0,55 g ve 0,75 g değerleri kullanarak duraylılık analizleri yapmışlardır. Çalışma neticesinde, meydana gelebilecek büyük şiddette bir depremin şevlerin duraylılığı üzerinde büyük etkiler oluşturabileceği sonucuna varmışlardır.

Fredj vd. (2019), üç farklı paket program (Flac 2D, Plaxis 2D ve Phase2) kullanarak karşılaştırmalı olarak şev duraylılık analizi yapmışlardır. Yazarlar çalışmada, açık ocak fosfat madeninin şev duraylılığını sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışma neticesinde, üç farklı program kullanılarak yapılan şev duraylılık analizlerinin farklılık ve benzerlikleri ortaya konmuştur.

Kadakçı Koca ve Kadakçı (2020), farklı genel şev açıları, farklı GSI değerleri ve farklı yer altı su seviyeleri kullanarak limit denge analizleri ve sonlu elemanlar

yöntemi ile güvenlik katsayıları belirlemişlerdir. Araştırmacılar, yenilme kriteri olarak Genelleştirilmiş Hoek – Brown Yenilme Kriterini kullanmışlardır. Çalışma kapsamında limit denge analizleri Bishop, Fellenius, Morgenstern – Price ve Spencer teknikleri kullanılarak yapılmıştır. 431 vaka incelenmiş ve neticede elde edilen güvenlik katsayılarının istatistiksel olarak tutarlı olduğu ortaya konulmuştur. Fakat sismik ivme değerinin 0,1 g'den büyük olduğu ve şev açısının 34^0'den büyük olduğu doygun şevlerde en anlamlı güvenlik katsayısının Morgenstern – Price analiz yöntemi kullanılarak elde edildiğini ortaya koymuşlardır.

Clayton vd. (2020), Kanada'da bir kömür ocağında meydana gelen şev duraysızlığını incelemişlerdir. Çalışma sahasında 9 Temmuz 2017 ve 5 Ağustos 2017 tarihlerinde şev duraysızlıkları meydana gelmiştir. İlk duraysızlık yaşandıktan sonra açık ocak işletmesine kurulan radar sistemi sayesinde ikinci duraysızlık yaşanmadan önce tespit edilmiş ve gerekli önlemler alınarak can ve mal kaybının önüne geçilmiştir. Araştırmacılar, yapmış oldukları saha çalışmasında duraysızlık meydana gelen şevlerde meydana gelen yenilme türünün devrilme tipi yenilme olduğunu ve şev açılarının yaklaşık 65 – 70^0 olduğunu saptamışlardır. Çalışma kapsamında RockFall ve RS2 yazılımları kullanılarak kaya düşmesi ve nümerik analizler yapılarak açık ocak işletmesinin yeniden şevlendirme çalışmaları yapılmıştır.

Ullah vd. (2020), şev duraylılığı analizlerinde kullanılan yöntemleri limit denge analizleri, nümerik yöntemler, yapay zeka yöntemleri ve vektör yöntemler olarak beş kısma ayırmışlardır. Çalışma kapsamında, şev duraylılık yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

Rachmad vd. (2020)**,** 10.000 m^2 alana yayılan yaklaşık 47.000 m^3'lük şev duraysızlığını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında geri analizler yapılarak kaymanın meydana geldiği kaya kütlesinin makaslama dayanım parametreleri ortaya konulmuştur.

Sun vd. (2021), 24 Kasım 2019 tarihinde Anqian demir açık ocak işletmesinde aşırı yağmurdan dolayı meydana gelen şev duraysızlığını incelemişlerdir. Araştırmacılar, şev duraysızlık analizlerini gerilme çatlaklarının bulunduğu bölge, kaymanın olduğu bölge ve ayrışmış kaya - yüzey killerinden oluşan kolüvyon bölge olmak üzere üç aşamaya bölerek gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, analizlerini 2-boyutlu ve 3-boyutlu modeller kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde 2-boyutlu ve 3-boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarının

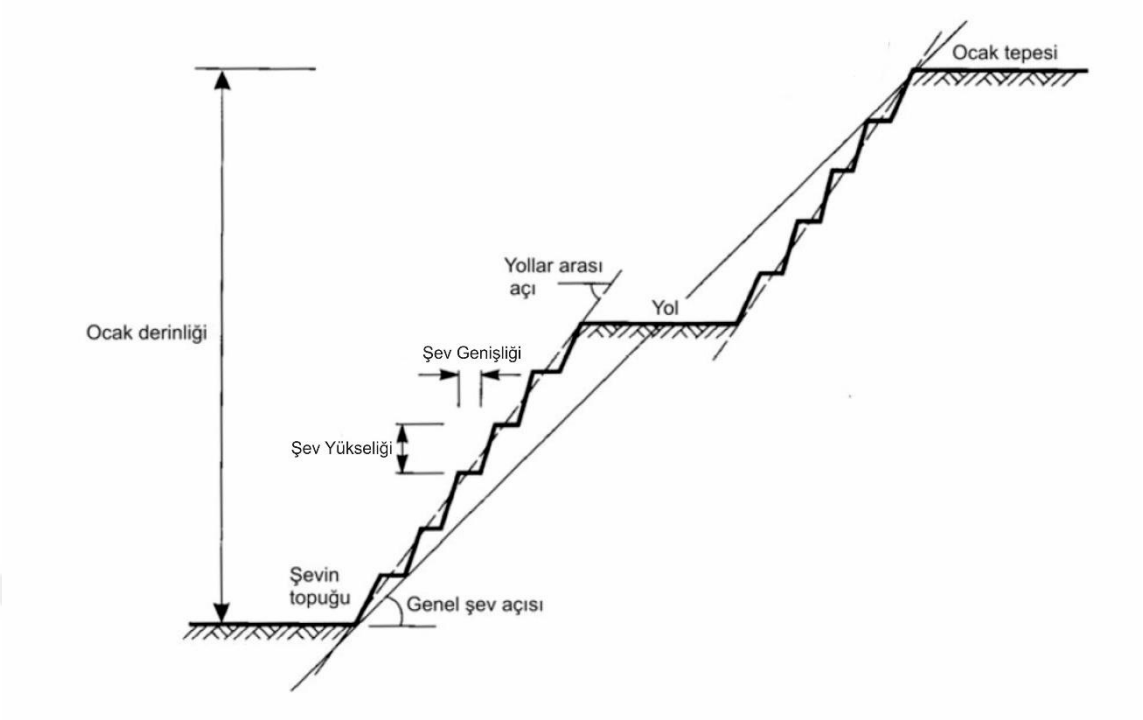
(1,04 – 1,09) oldukça yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar yaptıkları analizler neticesinde, orijinal şevin duraylı bir durumda olduğuna ve şev duraysızlığının yaşanmasındaki etkenin aşırı yağış olduğu sonucuna varmışlardır.

McQuillan vd. (2021), tabakalı kayaçlardan oluşan bir açık ocak işletmesini hem 2-boyutlu hem de 3-boyutlu modelleyerek şev duraylılığı analizleri yapmışlar ve bu analizler neticesinde elde ettikleri güvenlik katsayılarını kıyaslamışlardır. 2-boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarının 3-boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarından %30 daha düşük olduğu saptanmıştır. Araştırmacılar, 3-boyutlu analizlerin 2-boyutlu analizlere kıyasla daha doğru modeller ortaya koyabildiği ve gerçeğe daha yakın güvenlik katsayısı değeri verebildiği sonucuna varmışlardır.

Taherynia vd. (2021), geleneksel geri analiz yöntemi ile ileri sürdükleri yeni geri analiz yöntemini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar yöntemlerinin kullanılabilir olduğu göstermek için İran'da bulunan bir otoyolda meydana gelen şev duraysızlığını hem geleneksel geri analiz yöntemi ile hem de kendi geliştirdikleri geri analiz yöntemi ile 2-boyutlu olarak modellemişlerdir. Sonuç olarak, yeni geliştirilen geri analiz yönteminde elde edilen parametrelerin daha doğru tahmin edilebildiği ortaya konmuştur.

2.1 Şev ve Şev Duraylılığı

Doğal olarak bulunan eğimli yüzeylere yamaç, sonradan oluşturulan eğimli yapılara şev ise denilmektedir. Tipik bir açık ocak maden işletmesinde bulunan şevlerde üç ana unsur söz konusudur (Şekil 2.1). Bunlardan birincisi, şev tepe noktası ile şev topuk noktasının hayali bir çizgi ile birleştirilmesi sonucu çizginin yatay ile yaptığı açı genel şev açısı olarak isimlendirilir. İkinci unsur, her bir rampa arasında bulunan şevler ve üçüncü unsur ise oluşabilecek küçük çaplı kaya düşmelerinin ve şev kaymalarının etkisini azaltmayı amaçlayan güvenlik basamaklarıdır (Wyllie ve Mah, 2004).



Şekil 2.1 Açık ocak maden işletmesinde bulunan şev termnolojisi (Wyllie ve Mah, 2004)

Açık ocak maden işletmelerinde, ocak projelendirme işleminde üzerinde durulması gereken en önemli konu açık ocakta bulunan şevlerin duraylılığının sağlanması olmalıdır. Açık ocakta genel şev açısı ne kadar dike yakın seçilirse dekapaj maliyetleri düşecek olsa da şevlerin duraylılığı üzerinde olumsuz etkileri olabileceği hiçbir zaman göz ardı edilmemelidir. Şevlerde oluşabilecek duraylılık sorunları işletmeleri zaman, ekonomik, iş sağlığı ve güvenliği açısından olumsuz durumlara itebilmektedir. Can ve mal kayıplarının önüne geçmek, açık ocaklarda süren üretimleri sekteye uğratmamak için daha ocak planlaması yapılırken şevlerin jeolojik birimlere uygun olarak dizayn edilmesi dikkat edilmesi gereken en önemli hususların başında gelmektedir (Akbas ve Huvaj, 2015; Ertuğrul, 2016; Zebarjadi Dana vd., 2018; Zhang vd., 2019).

2.2 Şev Duraylılığına Etki Eden Faktörler

Şev duraylılığına etki eden faktörleri genel olarak içsel faktörler ve dışsal faktörler olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür (Kılıç, 1996). İçsel faktörler kontrol edilmesi mümkün olmayan faktörlerdir. Dışsal faktörler ise herhangi bir açık işletme sahasında kontrol edilmesi mümkün olan faktörleri içermektedir (Şekil 2.2). Açık ocak maden işletmesinde şevleri genel olarak iki kısma ayırmak mümkündür. Bunlardan birincisi üretimin yapıldığı ve duraylılığın kısa süre sağlanmasının yeterli

olduğu üretim şevleridir. Bu şevlerde üretim işlemleri bittikten sonra delme – patlatma ve kazı operasyonları ile şevler sürekli öteleneceğinden dolayı bu şevlerde kısa süreli duraylılık yeterli olmaktadır. Açık işletme sahasında bulunan diğer şevler ise duraylılığın maden ömrü boyunca korunması gereken şevlerdir. Bu şevlerde üretim yapılan şevlere nazaran daha yüksek güvenlik katsayıları kullanılarak şevlerde yaşanabilecek duraylılık sorunlarının önüne geçilmesi gerekmektedir (Çetin ve Erzin, 2016; Ertuğrul, 2016; Gökoğlu, 2015).

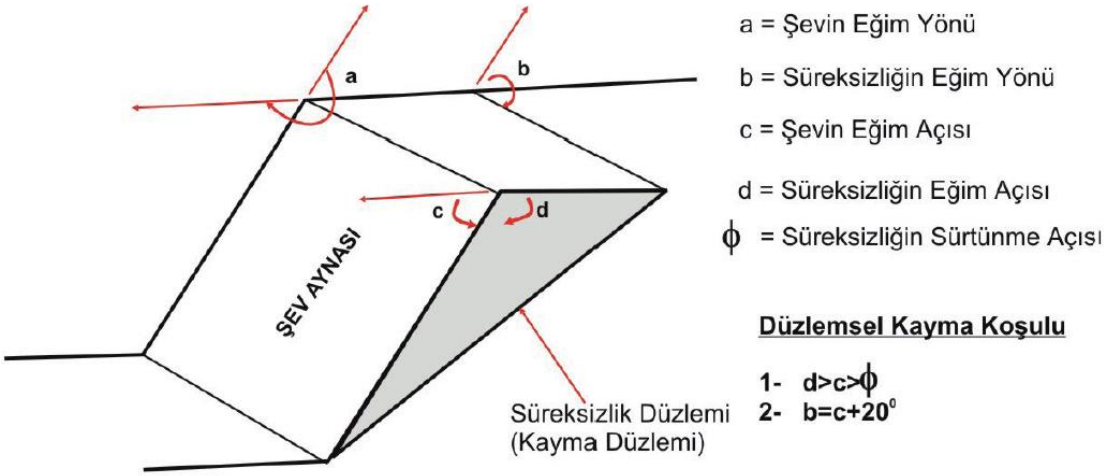


Şekil 2.2 Açık ocak maden işletmesinde şevlere etkiyen iç ve dış faktörler

2.3 Kaya Şevlerinde Meydana Gelen Yenilme Türleri

2.3.1 Düzlemsel kayma

Düzlemsel kayma, Cruden ve Varnes (1996) tarafından kaya kütlesinin bir düzlem boyunca kayması olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Düzlemsel kayma koşulu (Hoek ve Bray, 1977)

Düzlemsel kaymanın olabilmesi için gerçekleşmesi gereken geometrik koşullar sıklıkla bir araya gelmediği için bu tip yenilmeler ile karşılaşmak oldukça enderdir (Keskin, 2008; Wyllie ve Mah, 2004). Düzlemsel kaymalar daha çok depremin yarattığı ivme neticesinde oluşmaktadır (Li ve Mo, 2019). Tipik bir düzlemsel kaymanın oluşabilmesi sağlanması gereken geometrik koşullar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

(a) Kaymanın gerçekleştiği düzlem ile şev yüzeyi birbirine paralel ($\pm 20^0$) olmalıdır.

(b) Şev düzleminin eğimi (Ψ_f), kayma düzleminin eğiminden (Ψ_p), büyük olmalıdır. Yani, kayma düzlemi şevi kesmelidir.

(c) Kayma düzleminin eğimi (Ψ_p), kayma düzleminin sürtünme açısından (ϕ) büyük olmalıdır.

(d) Kayma yüzeyinin üst noktası şevin taç noktasını veya bir gerilme çatlağını kesmelidir.

(e) Süreksizlik yüzeyleri gün ışığı görmelidir.

(f) Kaymayı aktif hale getirecek serbest yüzey olmalıdır (Ertuğrul, 2016; Hoek ve Bray, 1981; Karaman, 2011; Keskin, 2008; Piteau ve Martin, 1982; Wyllie ve Mah, 2004).

2.3.2 Kama tipi kayma

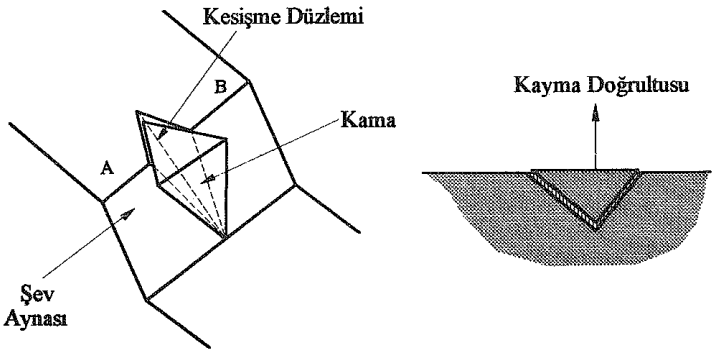
Şevlerde meydana gelen yenilmeler süreksizlik kontrollü yenilmeler ve süreksizlik kontrollü olmayan yenilmeler olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu sebeple şev duraylılık analizleri yapılırken ilk olarak süreksizliklerin doğrultu ve

eğimleri belirlenerek meydana gelebilecek yenilme tipi hakkında bilgi sahibi olunur. Şevlerde meydana gelebilecek yenilme türüne karar vermek için stereonetler kullanılır. Stereonet kullanılarak yapılan bu değerlendirme işlemine ise kinematik analiz denir (Park ve West, 2001; Piteau ve Peckover, 1978). Kama tipi yenilmenin oluşabilmesi için Norrish ve Wyllie (1996) tarafından aşağıda sıralanan üç durumun oluşması gerekmektedir. Şekil 2.4'te kama tipi kaymanın kesiti Şekil 2.5'te ise tipik bir kama tipi yenilme gösterilmiştir.

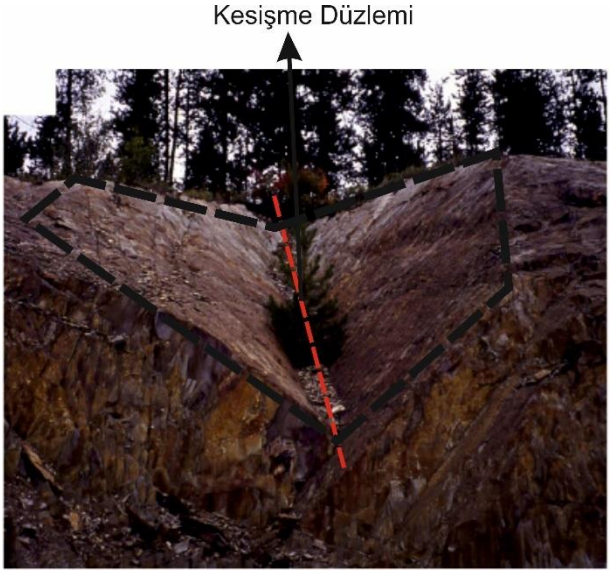
(a) Kesişme çizgisinin eğim / eğim yönü ile şev yüzeyinin eğim / eğim yönü aynı olmalıdır.

(b) Ara kesit çizgisinin dalımı şevin eğiminden daha küçük olmalıdır.

(c) Ara kesit çizgisinin dalımı süreksizliklerin içsel sürtünme açısından daha büyük olmalıdır.



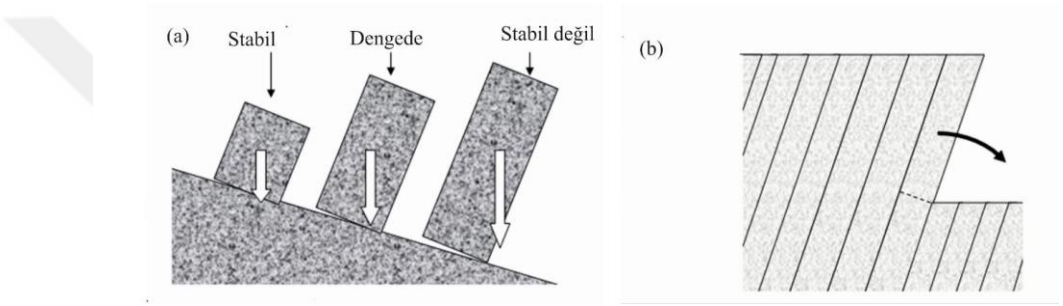
Şekil 2.4 Kama tipi kayma kesiti (Wyllie ve Mah, 2004)



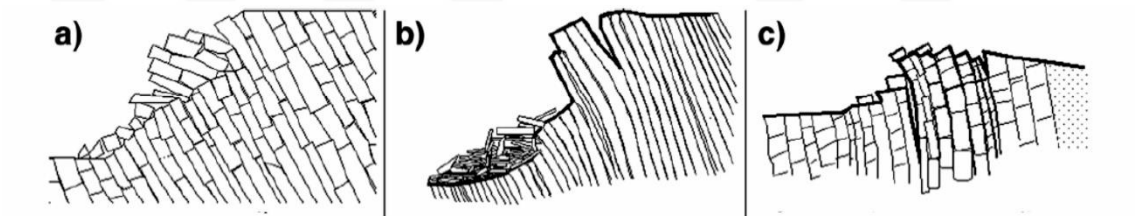
Şekil 2.5 Kama tipi kayma (Stead ve Wolter, 2015)

2.3.3 Devrilme yenilmesi

Devrilme tipi yenilme, sütunların veya kaya bloklarının sabit bir taban etrafında dönmesiyle oluşur. Yenilmenin karmaşıklığına bağlı olarak kullanılan iki farklı analiz türü vardır (Alejano vd., 2010). Devrilme tipi yenilme mekanizmasında tek bir bloğun etkilendiği varsayılabilir. Bu tip yenilmelerde analiz yapmak nispeten daha kolay olmasına rağmen Şekil 2.6'da gösterildiği üzere yenilmenin kaya kütlesinden ayrılan blok tarafından harekete geçirildiği veya bükülme türü devrilme olduğu bilinmelidir (Alejano vd., 2010; Hoek ve Bray, 1981; Sagaseta, 1986). Goodman (1976)'da en sık görülen devrilme tipi yenilmeleri blok devrilmesi, eğilme ve blok - eğilme olarak sınıflandırmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.6 a) Tek blok devrilmesi, b) Eğilme blok devrilmesi (Alejano vd., 2010'dan değiştirilmiştir)

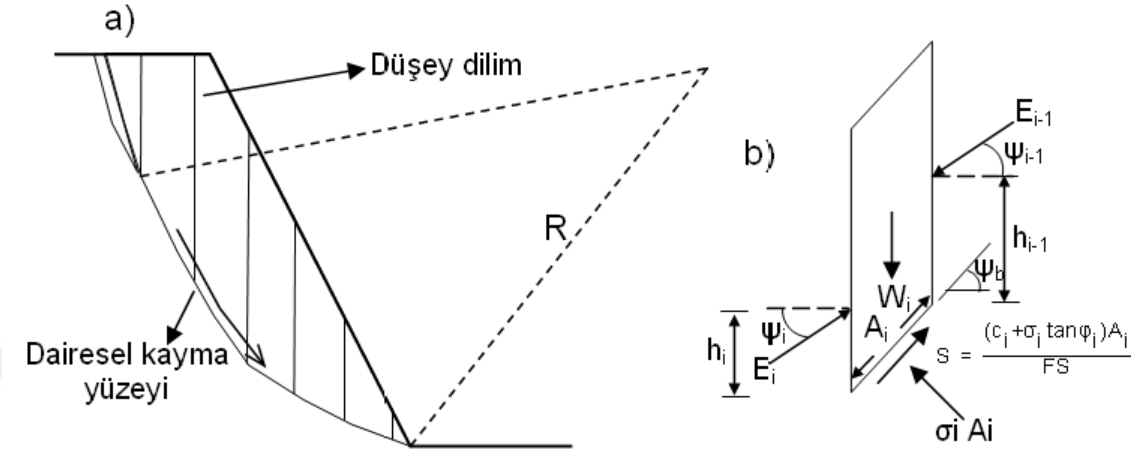


Şekil 2.7 Devrilme tipi yenilme sınıflandırması a) Blok devrilmesi, b) Eğilme devrilmesi, c) Blok-eğilme devrilmesi(Wyllie ve Mah, 2004)

2.3.4 Dairesel yenilme

Toprak zemin, aşırı kırıklı çatlaklı ve ileri derecede ayrışmış kaya kütlelerinde döküm harmanı gibi zayıf zeminlerde kayma yüzeyi dairesel şekilli olabilir (Karpuz ve Hindistan, 2006). Jeolojik koşullar, dairesel kaymanın şeklinin nasıl olacağı üzerinde etkilidir. Zayıf ya da ayrışmaya maruz kalmış kaya kütlelerinde meydana gelen yenilme şevin tepe noktasının arkasında oluşan gerilme çatlağından, şev topuğuna kadar uzanan sığ ve yarıçapı büyük bir yüzey olması olasıdır. Şevin açıldığı kaya ya da zemini oluşturan jeolojik birim çok fazla metemorfizmaya uğramış bir kaya kütlesinden oluşuyorsa genellikle zemin gibi hareket eder ve büyük çaplı dairesel kaymalar meydana gelebilir. Bu tip yerlerde projelendirme işlemleri yapılırken

dairesel kayma varsayımları dikkate alınarak şev açma işlemleri yapılmalıdır (Wyllie ve Mah, 2004) (Şekil 2.8). Kayma, kayan kütlenin ağırlığından meydana gelen kaymaya neden olan kuvvetlerin, kaymaya karşı olan kuvvetlerden büyük olması neticesinde ortaya çıkar (Kızıl ve Köse, 1995).



Şekil 2.8 a) Tipik bir dairesel kayma kesiti, b) Dilimler üzerine etkiyen kuvvetler (Wyllie ve Mah, 2004)

2.4 Şev Duraylılık Analiz Yöntemleri

Şevlerde meydana gelebilecek duraylılık sorunlarının önüne geçebilmek için duraylılık analizleri yapılmaktadır. Bu analizler, gelişen teknoloji ve günümüzde kullanılan gelişmiş bilgisayarlar sayesinde hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında şev duraylılığı analiz yöntemleri, limit denge analizleri ve nümerik yöntemler olarak iki başlık altında incelenmiştir.

2.4.1 Limit denge analizleri

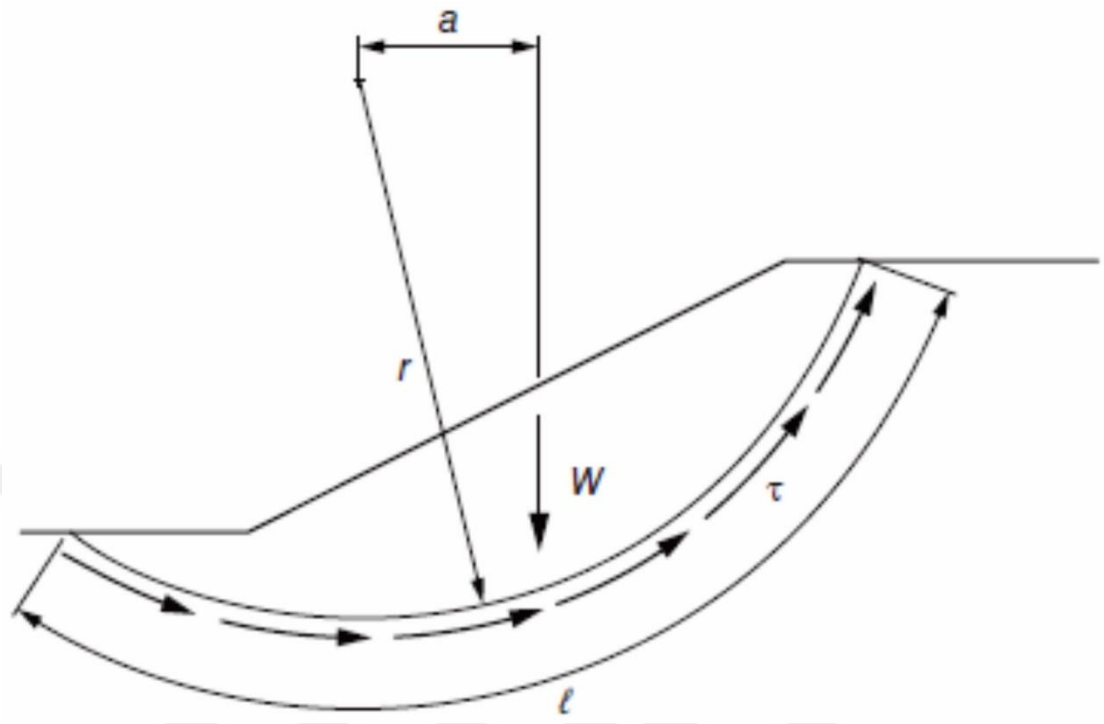
ϕu = 0 yöntemi

Bu yöntem, kayma yüzeyinin dairesel bir yay olduğu kabulüne dayanan ve güvenlik katsayısını kayma dairesinin merkezine etkiyen kuvvetlerin moment dengesi esasına dayanarak (Şekil 2.9) hesaplayan bir yöntemdir. Yöntem ilk olarak Petterson (1955) tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntemde, şevi oluşturan malzemelerin içsel sürtünme açıları sıfır olarak kabul edilir. Makaslama dayanım parametrelerinin tek bileşeni kohezyon olacak şekilde hesaplamalar yapılır. Yarıçapı r olan bir dairesel bir kayma düzlemi için güvenlik katsayısı eşitlik 2.1'de gösterildiği üzere hesaplanabilir.

$$F = cLr / Wa \qquad (2.1)$$

Burada;

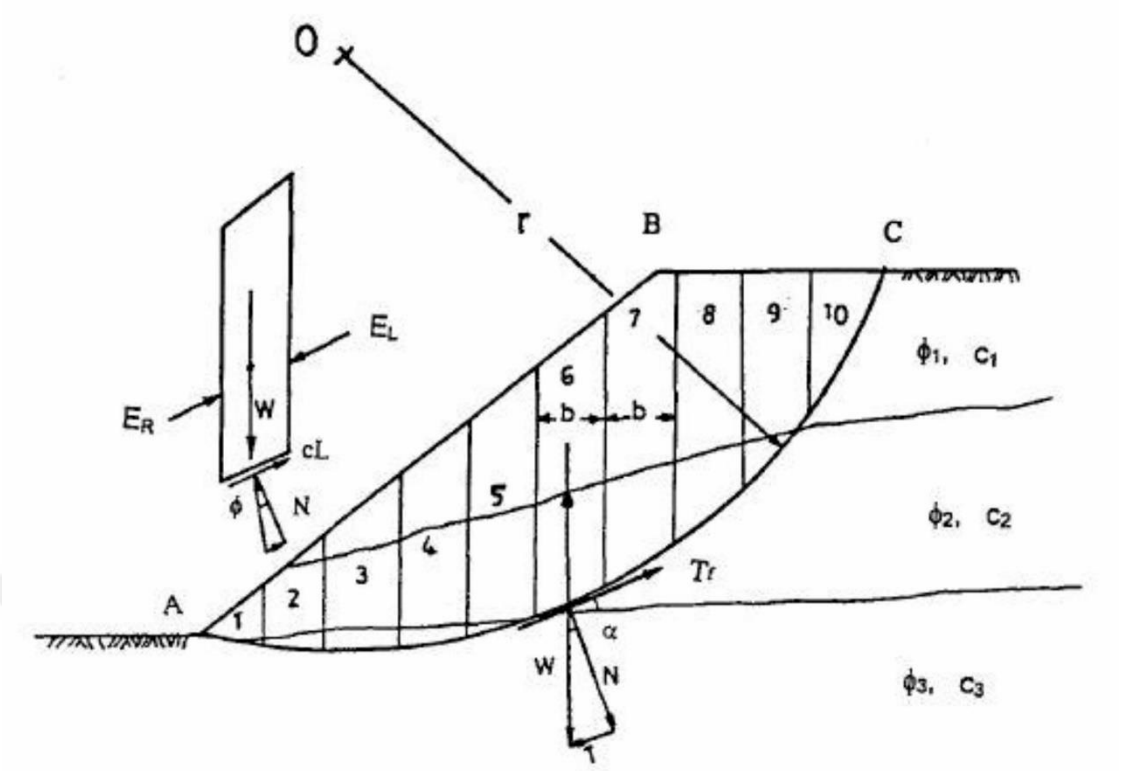
"W" kayan kütlenin ağırlığı; "*a*" moment kolu; "*L*" dairesel yayın uzunluğu; *"r"* dairenin yarıçapı; "*c"* kayma yüzeyi boyunca drenajsız kohezyondur.



Şekil 2.9 0 yöntemi şev ve kayma geometrisi örneği (Duncan vd., 2014)

İsveç dilim yöntemi

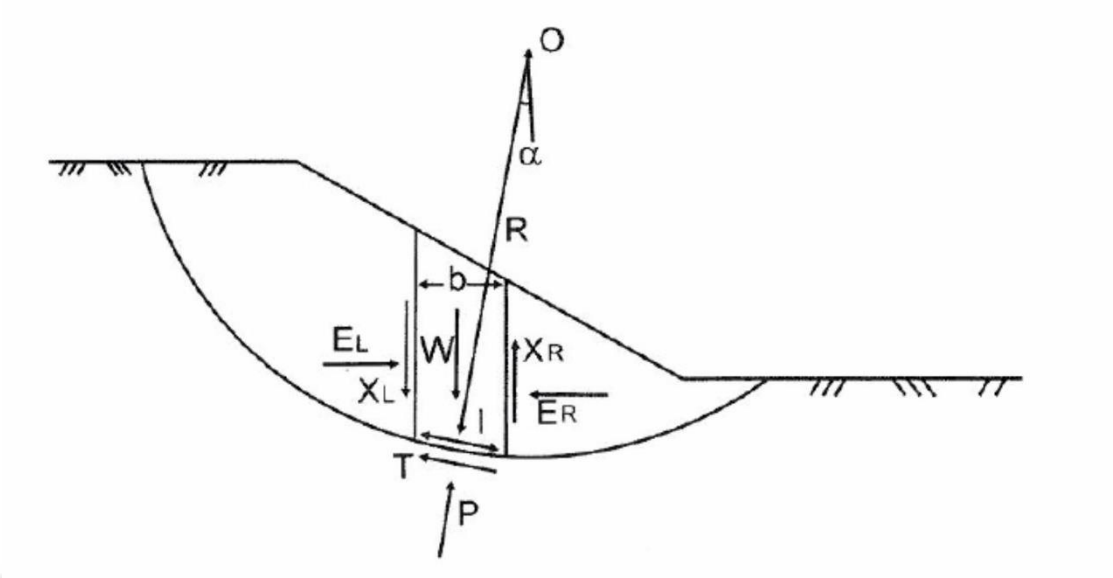
Fellenius (1936) tarafından geliştirilen bu yöntem, dairesel kayma yüzeyinin dilimlere bölünerek her bir dilime etkiyen kuvvetleri esas alma temelinde oluşturulmuştur. Bu yöntemde şevin kaymasını engelleyen ve şevin kaymasına neden olan kuvvetlerin momentleri, dairesel kayma yüzeyine ait merkez nokta temel alınarak hesaplanır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 İsveç dilim yöntemi (Sağır, 2016)

Basitleştirilmiş Bishop yöntemi

Bishop (1955) öne sürdüğü yöntemde dilimin kenarlarına etkiyen kuvvetin sadece yatay olduğunu varsaymıştır. Bu yöntemde, normal kuvvet ve ağırlığın dilim tabanının ortasına etki ettiği kabulü ile hesaplamalar yapılır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi O merkezli dairesel bir kayma yüzeyi üzerindeki bloğun güvenlik katsayısı için moment denge çözümlemesi yapılır. Bu hesaplamalarda dilimler arası kuvvetlerin yatay olduğu kabul edilir. Duncan ve Wright (1980) Basitleştirilmiş Bishop ile elde edilen güvenlik katsayının, gelişmiş yöntemler kullanılarak elde edilen güvenlik katsayıları ile uyum içerisinde olduğunu ortaya koymuştur.

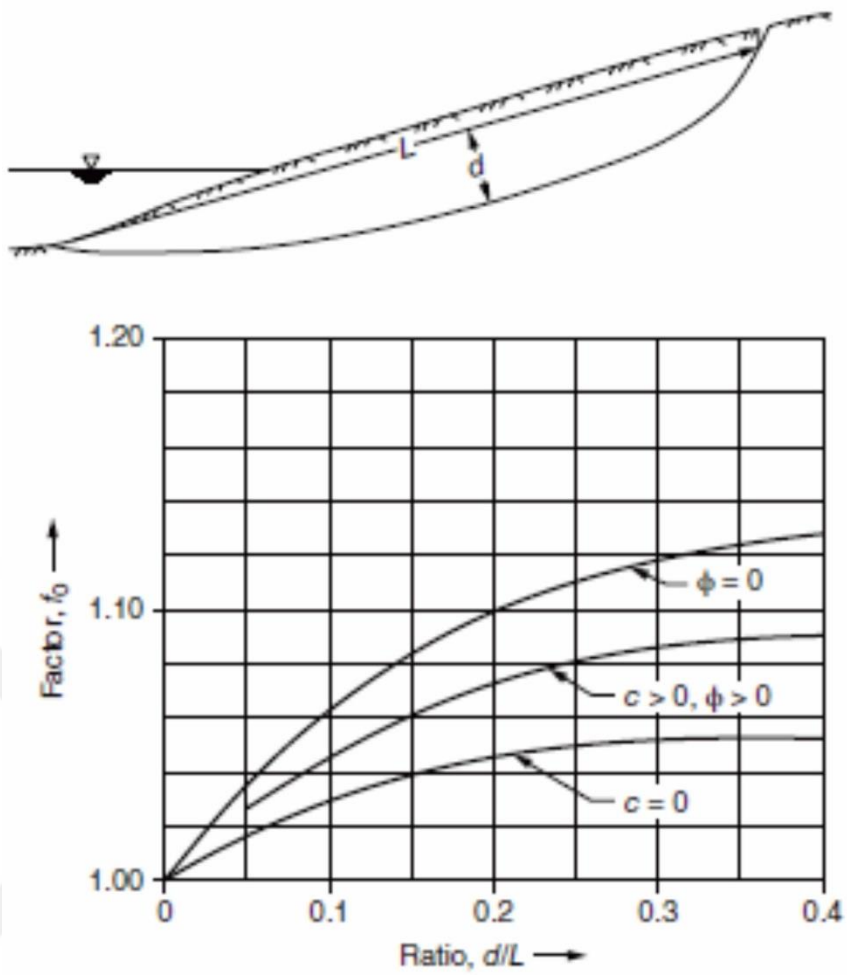


Şekil 2.11 Basitleşitirlmiş Bishop yöntemi (Akbulut, 2012)

Basitleştirilmiş Janbu yöntemi

Janbu (1954) tarafından dairesel olmayan kayma yüzeylerini hesaplayabilmek için ortaya konulmuş bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde dilimler arası makaslama gerilmesi sıfır olarak kabul edilir. Böylece her bir dilimin tabanına etkiyen toplam normal kuvvet hesaplanır. Basitleştirilmiş Janbu yönteminde yalnızca kuvvet denge eşitliği sağlanmakta, moment denge eşitlikleri sağlanmamaktadır. Bu nedenle Basitleştirilmiş Janbu yöntemi kullanılarak elde edilen güvenlik katsayısı değeri diğer yöntemlerden elde edilen güvenlik katsayısına kıyasla daha düşüktür. Diğer analiz yöntemleri ile arasındaki uyuşmazlığı düzeltmek için Janbu vd. (1956) bir düzeltme faktörü önermiştir (eşitlik 2.2). Şekil 2.12'de gösterildiği üzere şevin uzunluğu (L) ve kayma dairesinin derinliğine (d) bağlı olarak uygulan bu düzeltme faktörü farklı malzeme tipleri için farklı abaklar sunmaktadır.

$$F = f_0 \cdot F_0 \qquad (2.2)$$



Şekil 2.12 Basitleştirilmiş Janbu yöntemi düzeltme faktörü f0 (Janbu vd., 1956)

Şekil 2.11'de gösterilen f_0 için oluşturulan eğrilerin matematiksel ifadeleri eşitlik 2.3'te sunulmuştur.

$$f_0 = 1.0 + b_1 [(d/L) – (1.4(d/L)^2)] \quad (2.3)$$

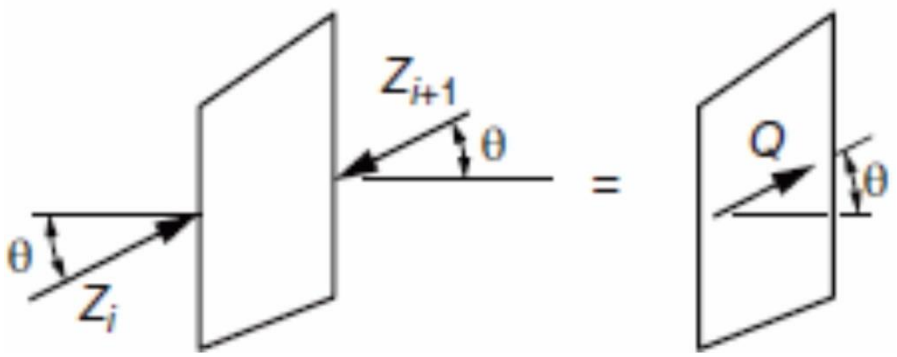
Φ= 0 eğrisi için b_1 = 0,31

c= 0 eğrisi için b_1 = 0,69

c > 0, Φ= 0 eğrisi için b_1 = 0,50'dir.

Spencer yöntemi

Spencer (1967) hem moment hem de kuvvet dengesini sağlayan bir yöntem ortaya koymuştur. Bu yöntem, dilimler arası kuvvet ve dilimler arası kayma kuvvetleri arasında var olan ilişkiyi sabit kabul etmektedir. Spencer yöntemine göre bir dilime etki eden dilimler arası kuvvetler ve bu kuvvetlerin bileşkesi Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Bu analiz yöntemi ilk olarak dairesel olmayan yüzeyleri için önerilse de Spencer (1973)'de dairesel kaymalar için de bu yöntemi kullanılabilir hale getirmiştir.



Şekil 2.13 Spencer yönteminde bir dilime etki eden dilimler arası kuvvet ve kuvvetlerin bileşkesi

Morgenstern – Price yöntemi

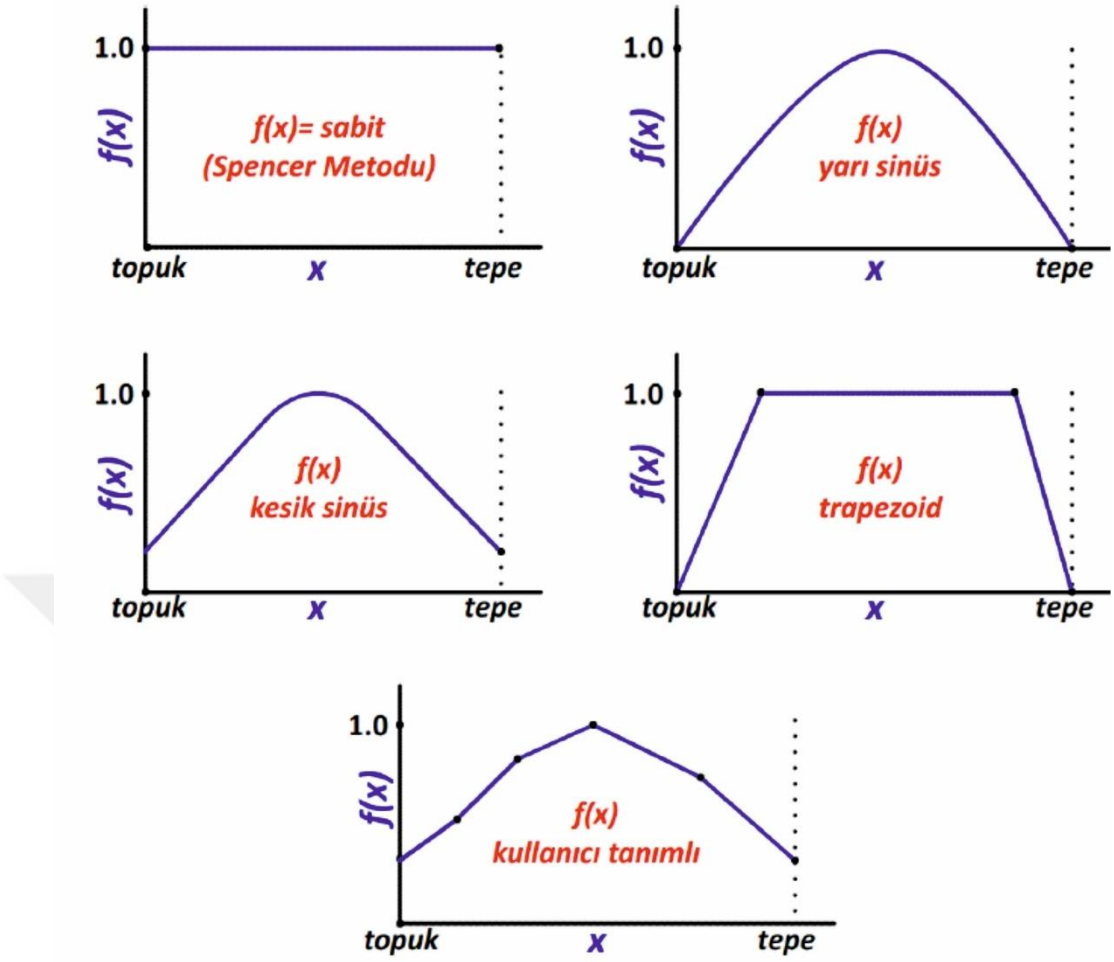
Morgenstern ve Price (1965) tarafından geliştirilen bu yöntem hem dairesel hem de dairesel olmayan kayma yüzeylerinin analizinde kullanılabilmektedir. Morgenstern – Price yöntemi kabulleri bakımından Spencer yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde dilimler arası makaslama kuvvetleri ile normal kuvvetler arasındaki ilişki eşitlik 2.4'te verilmiştir.

$$X = \lambda f(x) E \tag{2.4}$$

Burada;

*"X"*dilimler arası düşey kuvvetler; "*E"* dilimler arası yatay kuvvetler; "*λ"* ölçeklendirme faktörü; *"f(x)*" dilim sınırlarında kurallarla belirlenmiş fonksiyondur.

Bu yöntem, Şekil 2.14'te gösterildiği gibi dilimler arasındaki kuvvetin; sabit, yarım sinüs, kesilmiş sinüs ve trapezoid ve kullanıcı tanımlı gibi fonksiyonlara göre hesaplanmasını mümkün kılmaktadır (Ertuğrul, 2016).



Şekil 2.14 Dilimler arası kuvvet fonksiyonu türleri (Ertuğrul, 2016)

Sarma yöntemi

Sarma (1973) tarafından hem dairesel hem de dairesel olmayan kayma yüzeylerinin analizleri için ortaya konmuştur. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en belirgin özelliği diğer yöntemlerde dilimler düşey olarak bölünürken sarma yönteminde dilimler birbirine paralel olmak zorunda değildir. Bu yöntemin bir diğer özelliği ise analiz başlangıcında bir sismik katsayı kullanmasıdır. Şev geometrisinin ve boşluk suyu basıncının karmaşıklaştığı durumlarda Sarma yöntemini uygulamak zor bir hale gelmektedir. Bunun yanı sıra Sarma yöntemi ile dilimler arası kohezyonun çok düşük veya sıfır olduğu durumlarda analizler yapılabilmektedir. Bunun nedeni ise kohezyon değeri büyüdükçe dilimler arası makaslama kuvvetinin, dilimler arası normal kuvvetten daha fazla bağımsız hale gelmesi ve çözümde limit dengeye ulaşmanın zor olmasıdır (Akbulut, 2012).

Limit denge analiz yöntemlerinin karşılaştırılması

Limit denge yöntemleri şevlerin güvenlik katsayılarını olabildiğince doğru bir şekilde hesaplayabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Temelde tüm yöntemler güvenlik katsayısını hesaplayabilmek için statik denge denklemlerini kullanmaktadırlar. Bazı yöntemler statik denge denklemlerinin tümünü kullanırken bazı yöntemler bu denklemlerin tümünü kullanmamaktadır. Limit denge analiz yöntemleri arasında oluşan farklar statik denge denklemlerini kullanırken yaptıkları kabullerden ileri gelmektedir. Limit denge analiz yöntemleri arasındaki diğer bir fark ise bazı analiz yöntemleri dairesel kayma yüzeyleri için analizler yaparken bazıları düzlemsel kayma yüzeyleri analizler yapmakta bazı analiz yöntemleri ise hem dairesel hem de düzlemsel kayma yüzeyleri için analizler gerçekleştirebilmektedir (Akbulut, 2012). Tüm bu analiz yöntemlerinin kullandığı statik denge koşulları özet olarak Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Fellinus (1936) tarafından geliştirilen İsveç dilim yöntemi veya Basit dilim yöntemi olarak adlandırılan bu yöntem, dairesel kayma yüzeylerini analiz etmek için kullanılır. Bu analiz yöntemiyle güvenlik katsayısını hesaplarken moment denge denklemleri kullanılır. İsveç dilim yöntemi elle hesap yapmaya uygun olmasına rağmen boşluk suyu basıncının yüksek olduğu durumlarda güvenilir sonuçlar vermemektedir.

Janbu (1954) tarafından ortaya konulan analiz yönteminde, dilimler arası normal kuvveti dikkate almaktadır. Bu analiz yönteminde güvenlik katsayısı hesaplanırken moment denge denklemleri kullanılmaktadır.

Morgernstern –Price (1965), Spencer (1967), Sarma (1973) analiz yöntemleri hem dairesel hem de düzlemsel kayma yüzeylerinin analizinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile güvenlik katsayısı hesaplanırken statik denge koşullarından faydalanılmaktadır.

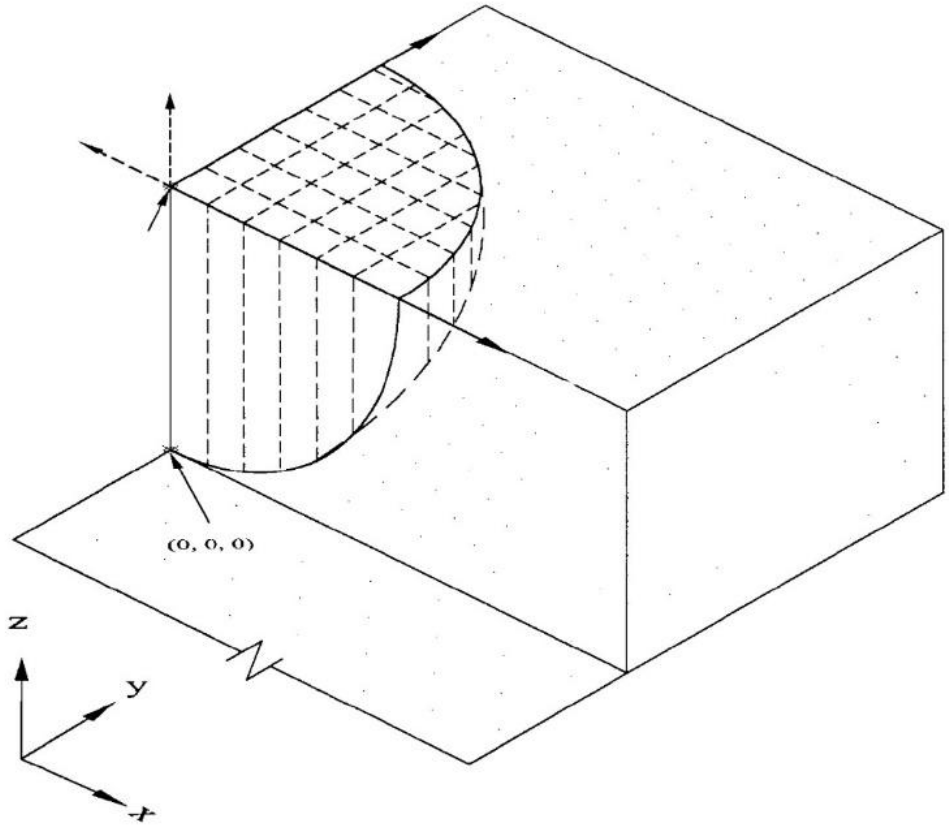
Tablo 2.1 Limit denge analiz yöntemlerinin kullandığı statik denge koşulları (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

Analiz Yöntemi	Kuvvet Dengesi ∑X	Kuvvet Dengesi ∑Y	Moment Dengesi
İsveç Dilim	-	-	+
Basitleştirilmiş Bishop	+	-	+
Basitleştirilmiş Janbu	+	+	-
Spencer	+	+	+
Morgenstern - Price	+	+	+
Sarma	+	+	+

2.4.2 3 boyutlu limit denge analizleri

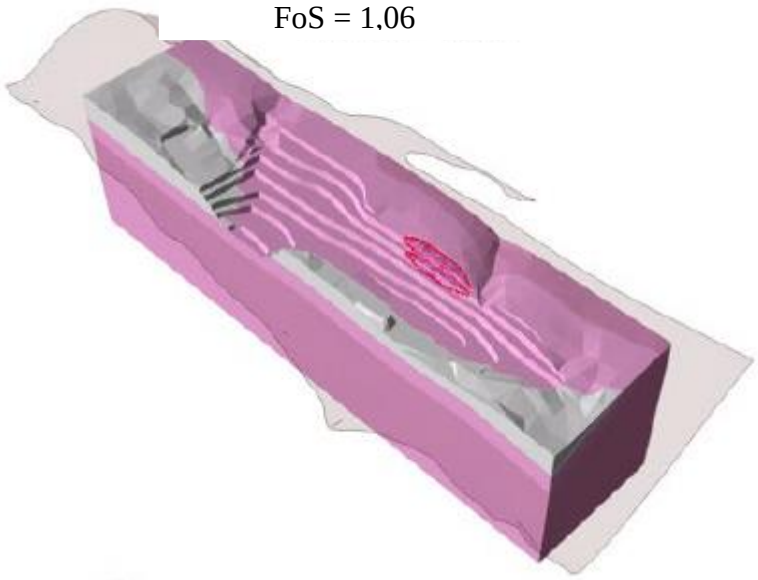
İki boyutlu limit denge analizlerinde genellikle düzlemsel gerinim varsayımları dikkate alınarak şev duraylılık analizleri gerçekleştirilmektedir (Fırıncıoğlu, 2018). Oysaki açık ocak işletmelerinde meydana gelen duraylılık problemleri üç boyutlu olarak gerçekleşmektedir. Başka bir deyişle, açık ocak işletmesinde bulunan şevlerde meydana gelen yenilmeler açık ocağın içinde ve etrafında oluşan gerilmelerin, açık ocağın hem altında hem de çevresinde serbest şekilde akması şeklinde olmaktadır. Bu yüzden yapılan üç boyutlu duraylılık analizleri gerçek durumu yansıtmaya daha yakın sonuçlar sunmaktadır (Keskin, 2008).

2000'li yılların başından itibaren güçlü bilgisayarlar sayesinde üç boyutlu yazılımlar ile yapılan duraylılık analizleri hız kazanmıştır. İlk olarak basit geometrilere sahip zeminlerde yapılan analizler zamanla Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer gibi iki boyutlu analizlerde kullanılan yöntemlerin de üç boyutlu analizlerde kullanılmaya başlanmasıyla kaya ve zemin özellikleri gösteren tüm formasyonlarda başarıyla kullanılmaya başlanmıştır (Fırıncıoğlu, 2018). İki boyutlu analizlerde kayma yüzeyi dilimlere bölünürken üç boyutlu analizlerde kayma yüzeyi kolonlara bölünerek analizler yapılmaktadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Kayan kütlenin kolonlara ayrıldığı tipik bir 3-boyutlu model örneği (Huang ve Tsai, 2000)

Literatürde çok sayıda iki boyutlu ve üç boyutlu limit denge analizlerinin karşılaştırıldığı çalışmaları bulmak mümkündür. Bu çalışmalardan biri de McQuillan vd. (2021) yaptığı çalışmadır (McQuillan vd., 2021). Araştırmacılar, çalışmalarında Şekil 2.16'da modeli sunulan 1280 m derinliğe sahip demir açık ocak işletmesinde doğrusal (Mohr-Coulomb) ve doğrusal olmayan (Hoek-Brown) yenilme ölçütlerini kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde doğrusal yenilme ölçütü kullanılarak yapılan üç boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı değeri 1,10, doğrusal olmayan yenilme ölçütü kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı 0,90 olmuştur. İki boyutlu analiz sonuçlarına bakıldığında ise doğrusal yenilme ölçütü kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı 0,84, doğrusal olmayan yenilme ölçütü kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen güvenlik katsayısı 0,73 olmuştur. Çalışmada üç boyutlu analizler neticesinde elde edilen güvenlik katsayısı değerleri iki boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarından daha büyük çıkmıştır. Bu durumun sebebi, üç boyutlu analizlerde kayma yüzeylerinin daha doğru olarak belirlenebilmesidir (McQuillan vd., 2021).



Şekil 2.16 1280 m derinliğe sahip açık ocak işletmesi (McQuillan vd., 2021)

2.4.3 Nümerik analizler

Analitik yolla yapılması çok zaman alan mühendislik problemlerinin çözümünde nümerik yöntemler sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Gelişen bilgisayar teknolojileri sayesinde tüm mühendislik dallarında nümerik yöntemler ile yapılan analizlere rastlamak mümkündür. Literatürde kaya mühendisliği kapsamında nümerik yöntemlerle yapılan çalışmalar kendine geniş bir yer bulmaktadır (Köse ve Kahraman, 1999).

Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1956 yılında ortaya konulmuştur (Turner vd., 1956). Bu yöntemde Makaslama Dayanımı Azaltımı (SSR) tekniğinin güvenlik katsayısı ile eşdeğer olarak kullanımı ise 1975 yılına dayanmaktadır (Zienkiewicz vd., 1975). Sonlu elemanlar yönteminde şev alt elemanlara ayrılır ve bu alt elemanlar ağ olarak isimlendirilir (Şekil 2.17). Sonlu elemanlar yöntemi ile limit denge yöntemi arasındaki temel fark literatürde birçok araştırmacı tarafından açıklanmıştır (2019; Hammah vd., 2010; Kadakci Koca ve Koca, 2020; Nasvi ve Krishnya, 2019; Rabie, 2014). Sonlu elamalar yöntemi ile şev duraylılığı analiz yaparken limit denge yönteminden farklı olarak herhangi bir kayma yüzeyine ihtiyaç duyulmamakta ve bu yöntemde şevlerde meydana gelen deformasyon miktarı saptanabilmektedir. Son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan şev duraylılık çalışmaları

artmaktadır. Makaslama dayanım azaltılması tekniği en sık kullanılan şev duraylılığı analiz yöntemidir (Griffiths ve Lane, 1999; Hammah vd., 2005).

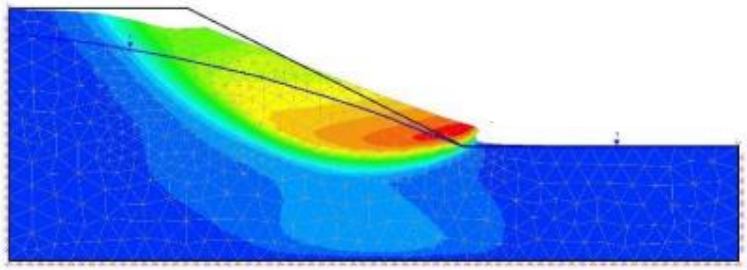
Makaslama dayanımı azaltılması tekniğinde, malzeme özellikleri elasto-plastik olarak varsayılır ve yenilme gerçekleşene kadar makaslama dayanım parametreleri kademeli olarak azaltılır (Rocscince Inc, 2004).

Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılarak makaslama dayanımı azaltımı tekniğine göre güvenlik katsayısı eşitlik 2.5 kullanılarak hesaplanabilir (Rocscince Inc, 2004).

$$= \frac{c'}{F} + \frac{tan\phi}{F} \tag{2.5}$$

Makaslama dayanımı azaltımı tekniğinde kullanılan algoritma aşağıda adım adım sıralanmıştır;

1. Sonlu eleman modeli geliştirilir ve şevde meydana gelen maksimum deformasyon belirlenir.
2. Malzeme özellikleri belirlenir ve eşitlik 2.5 kullanılarak malzemenin makaslama dayanım parametreleri programa tanıtılır.
3. Şevde yenilme meydana gelene kadar ikinci adım tekrarlanır ve güvenlik katsayısı değeri elde edilir (Tanrıseven, 2012).



Şekil 2.17 Sınır koşulları belirlenmiş ve ağlara ayrılmış 2 boyutlu model (Huvaj ve Oğuz, 2018)

Sonlu elemanlar yöntemi şev duraylılılık analizlerinin yanı sıra matematik, fizik gibi birçok alanda da başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Sonlu elamanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir;

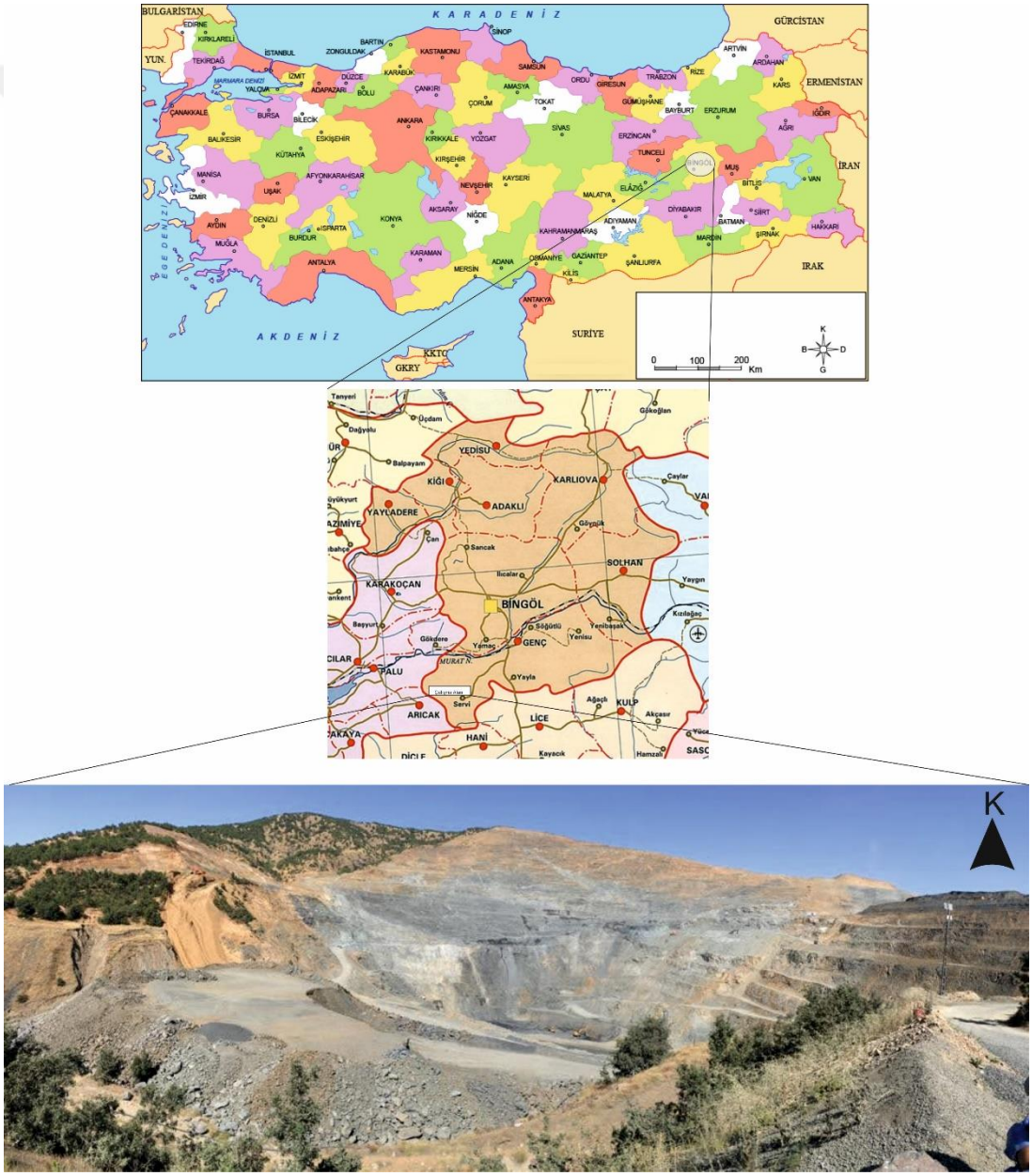
- Sonlu elemanlar yöntemi birçok bilim dalında uygulanabilir bir analiz yöntemidir.

- Komşu elemanların materyal özellikleri aynı olmadığından çok çeşitli uygulamaları vardır.
- Düzensiz şekilli sınırlar, düz kenarlı elemanlar kullanılarak yaklaştırılabilir olduğundan sınırların şekli önemsizdir.
- Elemanlarının boyutlarının değişebilir olması nedeniyle eleman ağı ihtiyaç duyuldukça genişletilebilecek niteliktedir.
- Bu yöntemde ağ değişkenleri program tarafından otomatik olarak seçilebilmektedir.
- Sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilmesi için bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Çözüm sadece düğüm noktalarındadır.

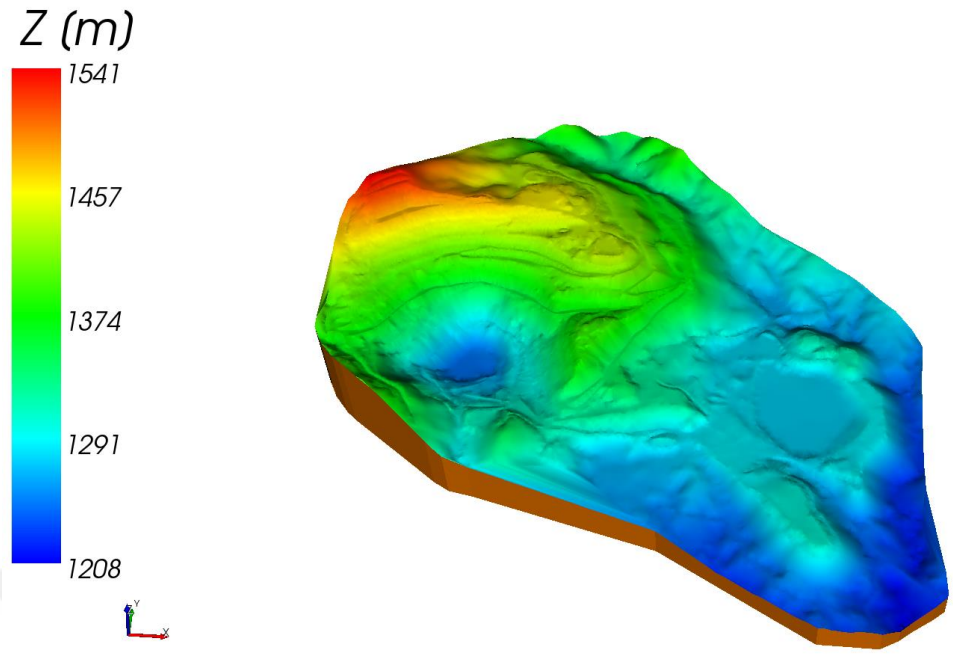
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Avnik (Bingöl) Açık Ocak Demir İşletmesi

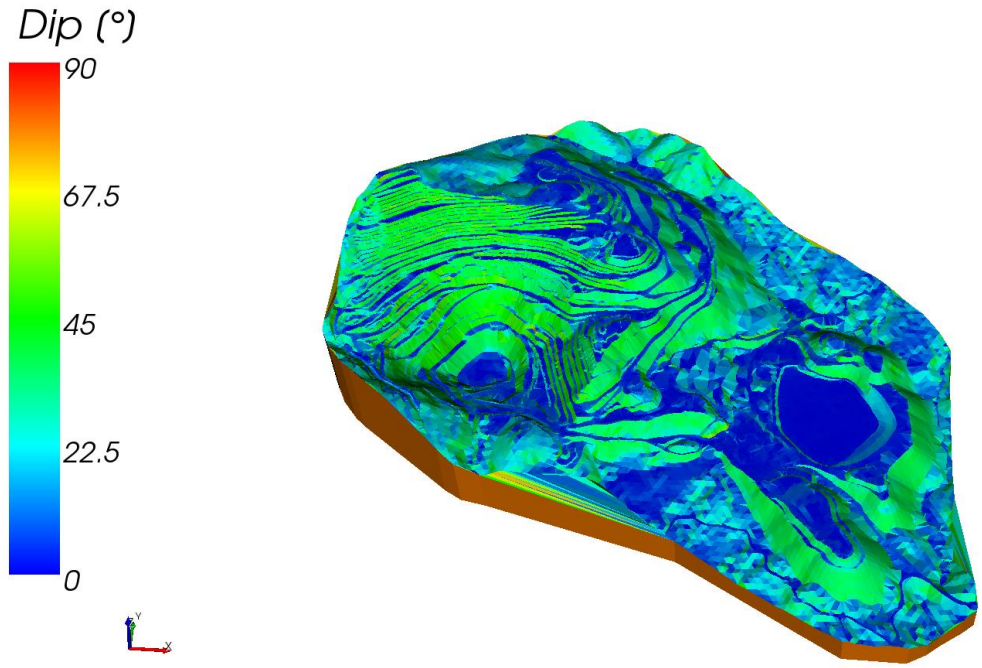
Avnik (Bingöl) demir işletmesi, 2008 yılından itibaren Dimin Madencilik tarafından işletilmektedir. Avnik demir işletmeleri, Bingöl'e 40 km, Genç ilçesine ise 30 km mesafede bulunmaktadır (Şekil 3.1). Avnik demir işletmesi bünyesinde yaklaşık 450 çalışanı ile ülkemizin önemli demir işletmeleri arasında yer almaktadır. Çalışmanın yürütüldüğü esnada açık ocak işletmesinin en üst kotu 1541 m, en alt kotu ise 1208 m, ocak derinliği ise 333 m'dir (Şekil 3.2). Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin şev açıları yaklaşık 45°'dir (Şekil 3.3).



Şekil 3.1 Çalışma sahası yer bulduru haritası



Şekil 3.2 Açık ocak işletmesinin derinliği

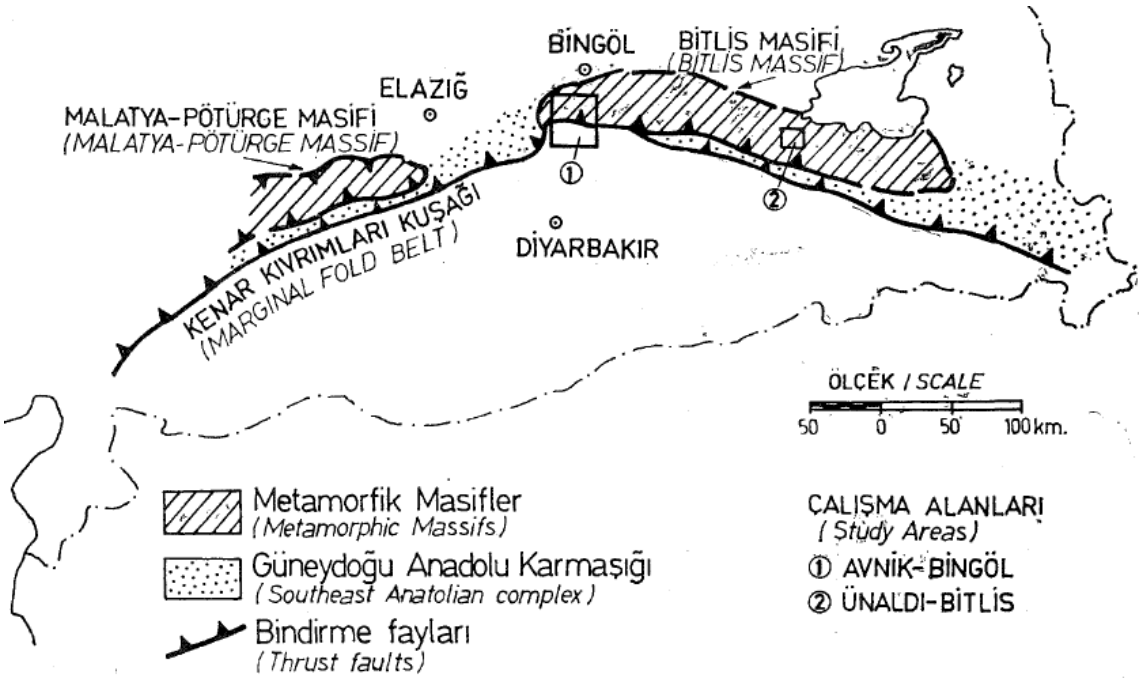


Şekil 3.3 Açık ocak işletmesinde bulunan basamakların şev açıları

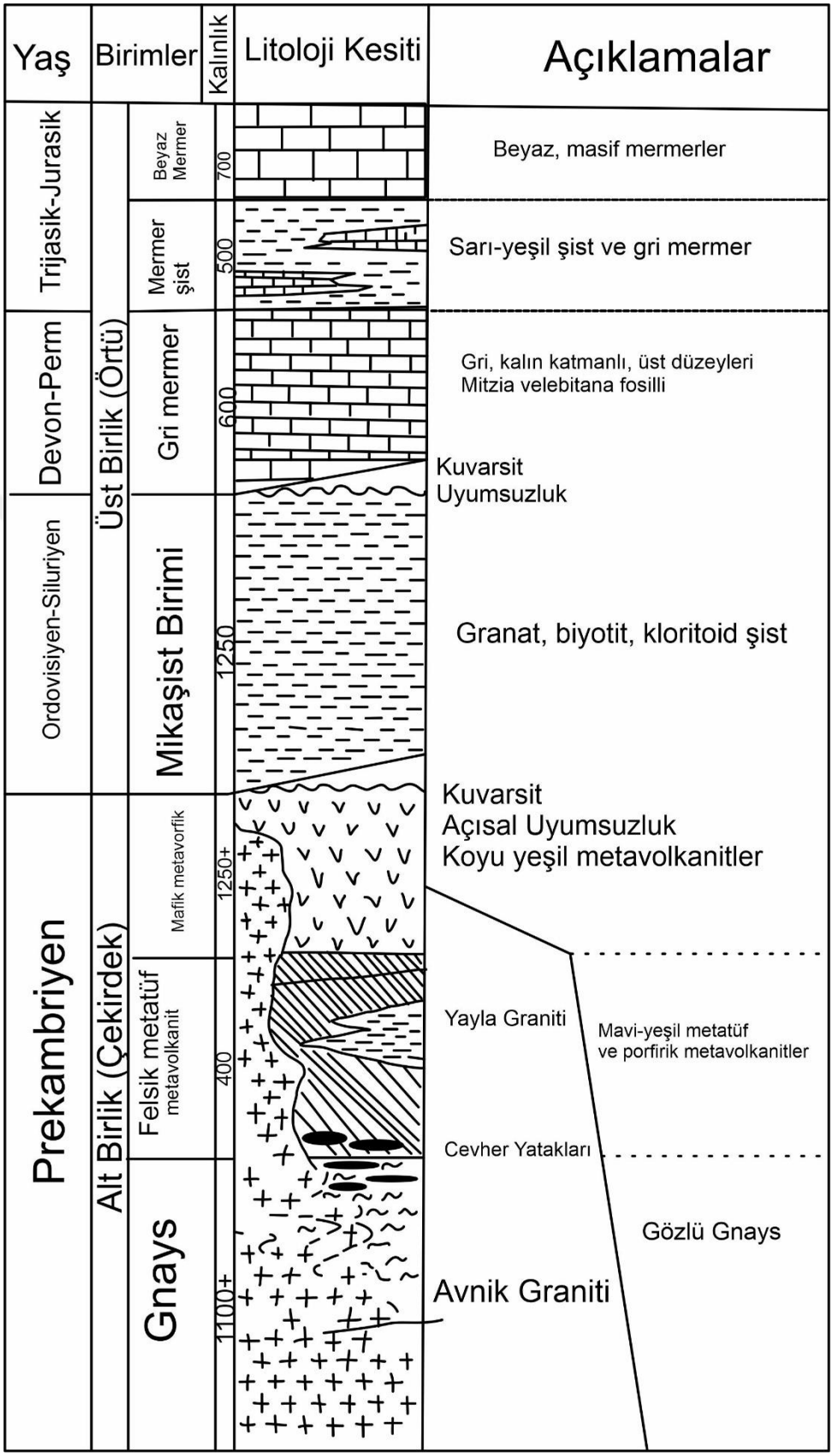
3.1.1 Çalışma sahasının genel jeolojisi

Miyosen tektoniği neticesinde Güneydoğu Anadolu'da bindirme fayları boyunca bugünkü halini almış olan üç kuşak bulunmaktadır (Şekil 3.4). Bu üç kuşaktan en kuzeyde bulunanı batıda Malatya – Pötürge, doğuda ise Bitlis Masifi olarak adlandırılan metamorfikler oluşturmaktadır. Metamorfik masiflerin güneyinde Güneydoğu Anadolu ofiyolit kuşağı, bu kuşağın güneyinde ise yerli kenar kavrımları kuşağı yer almaktadır (Erdoğan ve Dora, 1983).

Bitlis metamorfikleri alt birlik ve üst birlik olmak üzere aralarında açısal uyumsuzluk bulunan iki kaya grubundan oluşmaktadır (Şekil 3.4). Daha yaşlı olan alt birlik birimleri granit kütleleri tarafından kesilmiş ve daha sonra daha genç olan üst birlik tarafından örtülmüştür. Bitlis Masifinde Cacas adı verilen bölgede çalışmalar yürüten araştırmacılar tarafından gnays, leptinit ve amfibollerden oluşan yaşlı kayaları eski temel olarak isimlendirmişlerdir. Bu birimler Avnik bölgesinde bulunan ve alt birim olarak adlandırılan grupla eşleşmektedir (Yılmaz, 1975; Yilmaz, 1971). Yılmaz (1975; 1971) bölgede yürüttüğü çalışmalar neticesinde eski temel üzerine uyumsuzluklar ile mermer ve şistlerden oluşan yapının geldiğini belirtmiştir. Bu yapıya epimetamorfik örtü ismi verilmiştir. Bu örtü Avnik yöresinin Şekil 3.5'te verilen statigrafik kesitinin de eşdeğeridir.

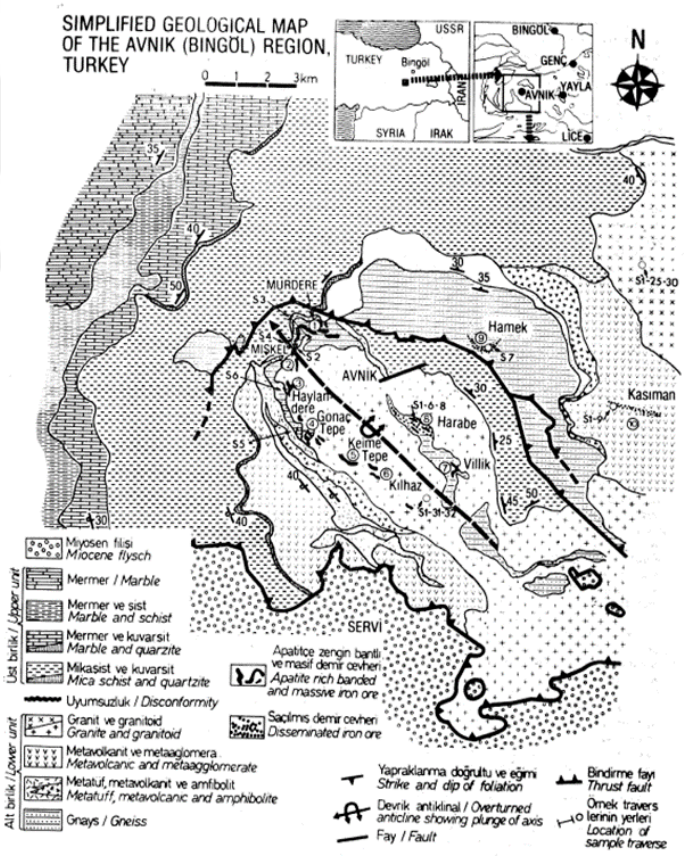


Şekil 3.4 Güneydoğu Anadolu Bölgesi tektonik kuşakları (Erdoğan ve Dora, 1983)



Şekil 3.5 Bitlis metamorfiklerinin Avnik yöresindeki genel stratigrafik kesiti (Erdoğan ve Dora, 1983'ten değiştirilmiştir)

Avnik yöresinde alt birlik olarak adlandırılan yaşlı birim, birbiriyle düşey ve yanal yönde geçişler gösteren ve aşağıdan yukarıya doğru gnays, felsik, metatüf – metavolkanit ve mafik metavolkanitler olarak sıralanan üç kaya biriminden oluşmaktadır. Alt birlik birimleri Avnik ve Yayla granitleri tarafından kesilmektedir (Erdoğan ve Dora, 1983). Alt birliğin en alt birimini oluşturan gnayslar gri renkli ve yer yer boşluklu, biyotitli, granatlı feldispat – kuvars gnayslar ve yeşil renkli, magnetit ve amfibolce zengin gnayslı yapılardır. Felsik metatüf – metavolkanit birimi ise ilksel porfiritik yapısını koruyan metalavlar ve bu metalavlar ile ardışıklı yer alan mavi ve yeşil renge sahip metatüflerden oluşmaktadır. Bu metatüfler bazı yerlerde koyu reşil renkte ve iri feldispat porfirobastları içeren benekli amfibolit özelliği göstermektedir. Amfiboller içinde saçılmış türde bulunan magnetitce zengin zonlar Anvik yöresinde yanal devamlı kuşalar oluşturmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Avnik bölgesinin jeolojik haritası (Erdoğan ve Dora, 1983; Helvacı, 1984)

Mafik metavolkanitler alt birliğin en üst birimini oluşturmaktadırlar. Bu birim, granat içeren koyu yeşil renkli ortaç ve mafik yapıda metaaglomeralar ile porfiritik dokuda metalav yapılıdır.

Alt birlik birimlerini kesen Avnik graniti, açık renkli, ince ve orta kristalli, mafik mineral yönünden zengin olmayan eş taneli kütledir. Bozunma nedeniyle oluşan foliasyon mikro ve makro ölçüde gözlenebilmektedir. Streckeisen (1976) sınıflamasına göre, Avnik graniti, granit ve alkali feldispat granitidir (Erdoğan, 1982). Avnik granitinin dokanağı 1 – 1,5 km genişlikte magmatik geçişli bir zondur. Bu zon boyunca çevre kayalardan koparılmış olan değişik boyutlarda paleozomlar da granit kütlesi içerisinde yer almaktadır. Granit kütlesi alt birimleri ile oldukça iyi derecede kaynaştığından dolayı dokanak ilişkisi ancak çevre kayalarla saptanabilmektedir. Avnik granitinin alt birlik kayalarıyla olan ilişkisi Küçük Gonaç tepenin güneybatı yamacı boyunca açıkça görülebilmektedir (Erdoğan ve Dora, 1983).

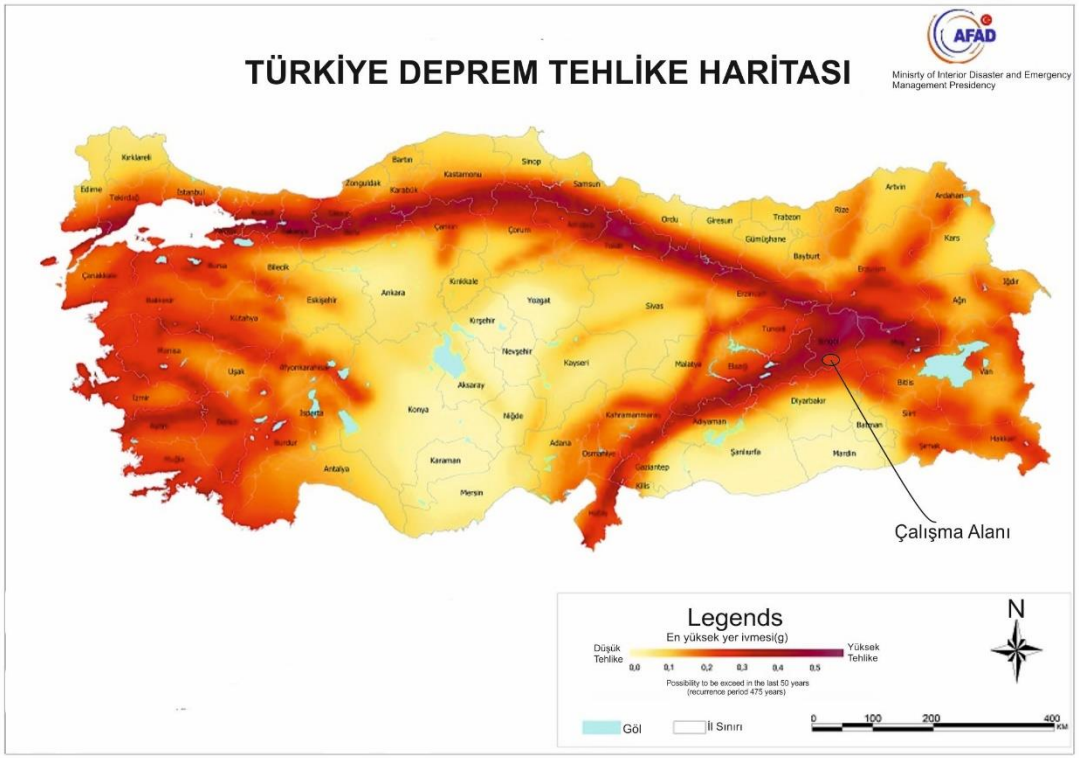
Avnik yöresindeki üst birlik mermer ve mikaşistlerden oluşmuştur. Mikaşist birimi üst birliğin en alt birimidir. Mikaşist birimi alt birlik üzerine açısal bir uyumsuzluk yüzeyi boyunca ince ve devamsız bir kuvarsit düzeyiyle oturmaktadır. Bu birim granat ve kloritoid içeren muskovit – biyotit şistlerden oluşmuştur. Mikaşist birimi üzerine tabanından devamsız bir kuvarsit düzeyiyle gir mermer birimi gelmektedir. Gri mermer biriminin alt kesimlerinde fosil bulunmamaktadır fakat üst kesimlerinde Mizzia velebitana ve kötü durumda olan Gastropoda fosilleri bulunmaktadır. Bu fosiller gir mermer biriminin üst kısımlarının Permiyen yaşında olduğuna işaret etmektedir. Gri mermer birimi üst kısımlara doğru geçişli dokanaklar ile mermer – şist ardalanmasından oluşan birime geçmektedir ve bu birimin üzerinde keskin bir dokanak ile beyaz mermerler oturmaktadır. (Erdoğan ve Dora, 1983).

3.1.2 Çalışma alanının depremselliği

Avnik yöresinde alt birlik ile üst birlik arasındaki düzey çok önemli bir açısal uyumsuzluk sınırıdır (Erdoğan, 1982). Mikaşistler üst birliğin en yaşlı birimidir ve bu birim hem aşınmış olan alt birliğin değişik birimleri hem de bu birimleri kesen granit biriminin üzerine oturmaktadır. Üst birliğin çökelmesinin ardından bölge Geç Kretase sırasında yeniden kıvrımlanmış ve metamorfizmaya uğraşmıştır. Bu deformasyon sırasında Avnik yöresinde KB – GD eksen uzanımlı ve GB'ya devrik Gonaç Antiknali oluşmuştur (Şekil 3.6). Bitlis metamorfikleri, Miyosen sonunda makaslama yüzeylerine ters gelen bindirme fayları boyunca kesilmiş Lice formasyonu üzerine itilmiştir. Bu tektonizma metamorfik kayalarda mikro ölçeklere kadar inen kataklastik parçalanmalara yol açmıştır. Hem kataklastik Miyosen bindirmelerinden dolayı hem

de daha yaşlı en az iki farklı metamorfizma ve kıvrılmadan dolayı cevher yatakları oldukça karmaşık bir iç yapı kazanmıştır (Erdoğan ve Dora, 1983).

Depremler ve açık ocak işletmelerinde yapılan delme – patlatma operasyonları neticesinde ortaya çıkan dinamik yükler şevlerin duraylılığı üzerine etki etmektedir. Çalışma sahasının bulunduğu Bingöl bölgesinde 1900 yılından 2020 yılına kadar en büyüğü 7,9 olmak üzere 489 adet deprem meydana gelmiştir (AFAD, 2020). Bingöl ilinin deprem haritası ve maksimum ivme değerleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Deprem yer hareket düzeyi DD-2 ve zemin sınıfı ay ayrışmış – orta sağlam kayalar (ZB) olarak kabul edilmiştir. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak çalışma sahasının en büyük yer ivmesi (PGA) 0,614 g, en büyük yer hızı (PGV) ise 37,568 cm/sn olarak elde edilmiştir (TDTH, 2021).



Şekil 3.7 Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD, 2021)

3.1.3 Saha çalışmaları

Yapılan saha çalışmaları kapsamında, açık ocak şev duraylılığının incelenmesi ve süreksizlik hat etütlerinin yapılması amacıyla çalışma sahasındaki litolojik değişimler ve sahada meydana gelen şev duraysızlıkları göz önüne alınarak açık ocak işletmesi beş sektöre ayrılmıştır (Şekil 3.8). Sektörleri oluşturan birimler Tablo 3.1'de

verilmiştir. Saha çalışmalarında, kaya malzemesinin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek için her sektörden temsili numuneler alınıp laboratuvara getirilmiştir.



Şekil 3.8 Çalışma sahasının sektörlere ayrılmış hali

Tablo 3.1 Sektörlere ayrılan açık ocak işletmesini oluşturan birimler ve şev duraysızlıkları

Sektör	Birim
S1	Fillit - Mikaşist
S2	Mikaşist - Şev duraysızlığı
S3	Şev duraysızlığı - Mikaşist
S4	Mikaşist
S5	Gnays

Süreksizlik hat etütleri

Kaya kütlesini oluşturan süreksizliklerin, dolayısıyla kaya kütlesinin özelliklerini belirlemek amacıyla Şekil 3.9'da gösterildiği üzere sektörlere ayrılan açık ocak işletmesinde süreksizlik hat etütleri yapılmıştır. Süreksizlik hat etütlerinin başlıca amacı;

- Süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi,
- Jeolojik yapının araştırılması ve ortaya konulması,
- Kaya kütle sınıflandırmasının yapılmasıdır (Ulusay, 2001).

Süreksizliklerin özellikleri hakkında veri toplanmasında istatistiksel anlamda en doğru sonuçları veren yöntem süreksizlik hat etüdü yöntemidir. Geniş bir alanda kaya kütlesinin incelenmesine ve süreksizliklerden direkt olarak ölçüm alınmasına olanak sağlayan bu yöntemde pusula ve çelik şerit metre kullanılır (Emir, 2017).



Şekil 3.9 Süreksizlik hat etüdü yapılan şev (mikaşist)

Hat etüdü metodu uygulanırken aşağıda belirtilen yol izlenmiştir;

(a) Süreksizlik aralığına ve devamlılığına bağlı olarak mostra yüzeyinde 10 metrelik bir hat seçilmiştir.

(b) Seçilen mostra yüzeyinin döküntülerden arındırılmış temiz bir yüzey olmasına dikkat edilmelidir. Seçilen mostra yüzeyinde 150 – 350 arasında değişen süreksizlik ölçülebilmelidir.

(c) Şerit metre ölçüm yapılacak yüzeye serilir ve hat başlangıç ve bitiş noktaları işaretlenir.

(d) Jeolog pusulası yardımıyla süreksizliklerin doğrultu ve eğimleri kaydedilir.

(e) Süreksizlik hakkındaki bilgiler süreksizlik veri formuna işlenir (Emir, 2017).

Çalışma sahasında yapılan süreksizlik hat etüdü çalışması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Çalışma sahasında mostra yüzeyinde yapılan süreksizlik hat etüdü

3.1.2 Laboratuvar çalışmaları

Açık ocak işletmesinin şevlerini oluşturan mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çalışma sahasından temsili numuneler alınmıştır. Alınan bu numuneler Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarı ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya ve Zemin Mekaniği Laboratuvarına getirilerek Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) (2007) önerileri doğrultusunda numuneler hazırlanmış ve hazırlanan numuneler üzerinde;

- Kütlece su emme deneyi,
- Gözeneklilik (porozite),
- Doygun ve kuru birim hacim ağırlık deneyi,
- Tek eksenli basınç dayanım deneyi,
- Dolaylı çekme dayanımı (Brazilian) deneyi,
- Tilt deneyi,
- Schmidt çekici deneyi
- Nokta yük dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Kütlece su emme deneyi

Bu deney, belirli bir geometriye sahip örneklerin kütlelerine ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarını belirlemek amacıyla yapılır. ISRM (2007) tarafından önerilen koşullar esas alınarak kütlece su emme deneyi yapılmıştır. Deneyde numunelerin boy ve çapları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Hacimleri hesaplanan örnekler, saf su doldurulmuş kapta 12 saat bekletilmiştir. 12 saat sonunda örnekler saf sudan çıkartılarak suya doygun yüzeyleri kurulandıktan sonra tartılmış ve tartım sonucu not edilmiştir (Şekil 3.11). Suya doygun kütlesi bulunan numuneler 105 ^{0}C'ye ayarlanmış etüve yerleştirimiş ve 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Etüvden çıkartılan numunelerin kütleleri hassas terazide tartılır ve tartım sonuçları kaydedilmiştir. Tüm işlemler bittikten sonra eşitlik 3.1 kullanılarak numunelerin kütlece su emme oranları belirlenmiştir.

$$Ma = \frac{Md - Mk}{Mk} \times 100 \tag{3.1}$$

Burada;

"Ma" kütlece su emme (%); "*Mk"* etüvde kurutulan numunelerin kütlesi (gr); *"Md"* numunelerin suya doygun kütlesidir (gr).



Şekil 3.11 Laboratuvar deneyleri için hazırlanan örnekler

Gözeneklilik (porozite)

Gözeneklilik, kayaç içerisinde bulunan boşluk hacminin, tüm kayaç hacmine oranı olarak ifade edilir. Kayaç gözenekliliğinin artması kayacın basınç dayanımını düşürmekte ve atmosferik şartlara olan dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Özkan 2018). ISRM (2007) tarafından önerilen koşullar esas alınarak yapılan deneyde, 105 ^{0}C etüvde 12 saat kurutulan numuneler hava nemini almadan soğuması için 30 dakika desikatöre bırakılmıştır. Daha sonra numune kütleleri tartılarak kaydedilmiştir. Numuneler su dolu bir kabın içerisinde 48 saat bekletilerek doygun

hale getirilmiştir. Doygun hale gelen numune tartılarak kütlesi kaydedilmiştir. Deney sonucunda,
eşitlik 3.2 ve eşitlik 3.3 kullanılarak numunelerin gözeneklilik oranları belirlenmiştir.

$$n = \frac{Vb}{Vt} \times 100 \tag{3.2}$$

$$Vb = \frac{Md - Mk}{dw} \tag{3.3}$$

Burada;

"dw" suyun yoğunluğu (gr/cm^3); "*n"* porozite (%); "*Vb"* boşluk hacmi (cm^3); *"Vt"* toplam hacim (cm^3); "*Md"* Doygun haldeki kütle (gr); "*Mk" k*uru haldeki kütledir (gr).

Birim hacim ağırlık

ISRM (2007)'e göre yapılan birim hacim ağırlık deneyinde, düzenli bir geometriye sahip olan numunelerin boy (L) ve çap (D) uzunlukları kumpas ile ölçülür. Boy ve çapları ölçülen numunelerin hacimleri hesaplanır. Kuru birim hacim ağırlıkları belirlenecek olan örnekler içerisinde bulunan su ve nemi atması için 24 saat boyunca 105 ^{0}C'ye ayarlanmış etüv içerisinde kurumaya bırakılır. Daha sonra etüvden alınan numuneler desikatörde 30 dakika boyunca soğutulur ve tartılır. Doygun birim hacim ağırlığın belirlenmesi için ise, numuneler 24 saat boyunca suya doyurulur. Suya doygun hale gelen numuneler tartılarak doygun kütleleri kaydedilir. Numunelerin kuru ve doygun haldeki birim hacim ağırlıklarını hesaplamak için (3.4) ve (3.5) numaralı eşitliklerden yararlanılır.

$$\gamma k = \frac{Mk \times g}{Vt} \tag{3.4}$$

$$\gamma d = \frac{Md \times g}{Vt} \tag{3.5}$$

Burada;

"γk" kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3); "*γd"* doygun birim hacim ağırlık (kN/m^3); "*Vt"* toplam hacim (cm^3); "*g"* yerçekimi ivmesi (m/sn^2); "*Md"* doygun haldeki kütle (gr); "*Mk"* kuru haldeki kütledir (gr).

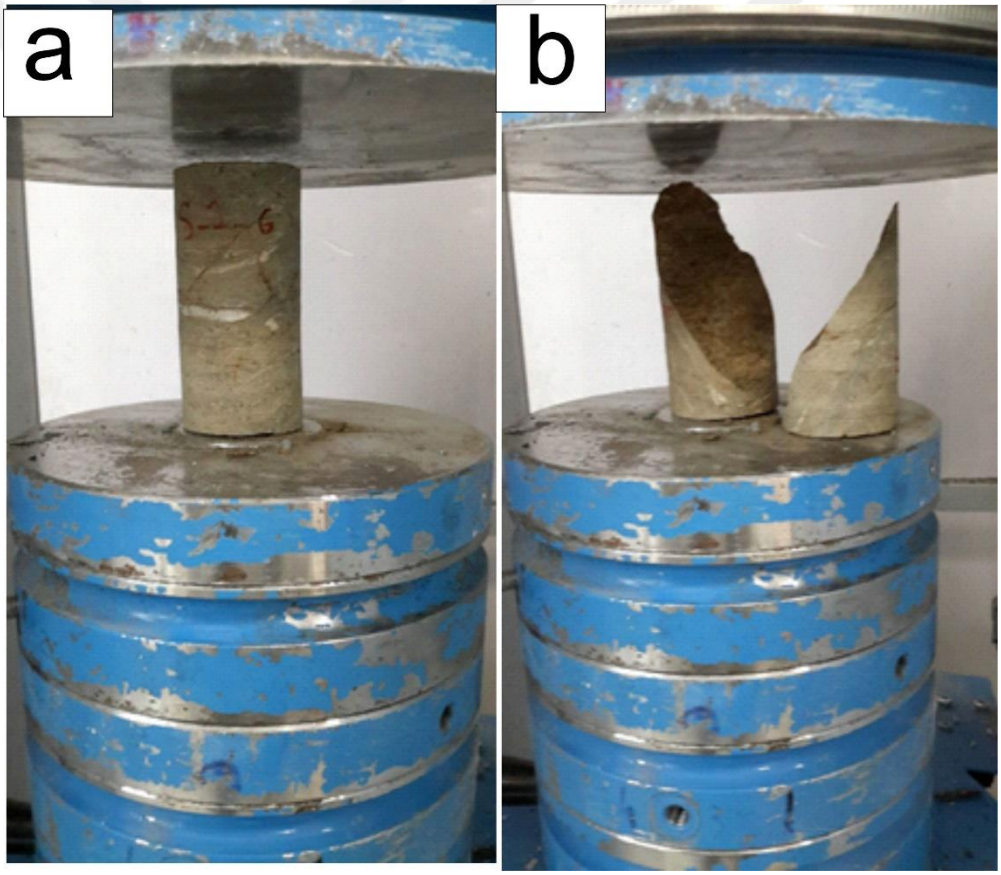
Tek eksenli basınç dayanımı

ISRM (2007)'ye göre gerçekleştirilen deney kapsamında, boy/çap oranı 2-2,5 olan silindirik örnekler kullanılmıştır (Şekil 3.12). Yük, basınç gerilmesi saniyede 0,50 kN/s olacak şekilde deney numunesi kırılıncaya kadar uygulanır. Pres göstergesinden numune üzerine etkiyen yük okunur. Numunelerin tek eksenli basınç dayanımları σ_{ci} (3.6) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma ci = \frac{F}{A} \tag{3.6}$$

Burada;

"σ_{ci}" tek eksenli basınç dayanımı (MPa); "*F"* yenilme anında kaydedilen yük (kN); "*A"* silindirik örneğin kesit alanıdır (cm^2).



Şekil 3.12 (a) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi öncesi, (b) Tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonrası

Dolaylı (Brazilian) çekme dayanımı

Çalışma sahası apatitli demir sahası olduğundan çok fazla tektonizmaya maruz kalmıştır. Tektonizmaya uğramış arazilerden tek eksenli basınç dayanımı belirlenmesi için uygun karotlar almak oldukça zor bir durumdur. Bu yüzden kayanın mekanik

özellikleri belirlenirken dolaylı yöntemlere başvurulmaktadır. Dolaylı yöntemlerden biride Brazilian çekme dayanım deneyidir. ISRM (2007)'ye göre yapılan deneyde boy/çap oranı 0,5-1 arasında olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Dolaylı çekme dayanım deneyi sonrası (3.7) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplamalar yapılabilmektedir. Deneyde kullanılan numune Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

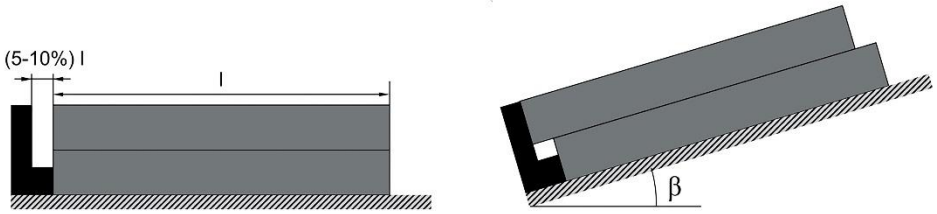
$$\sigma_t = 0.6366 \times F_c / D \times L \quad (3.7)$$



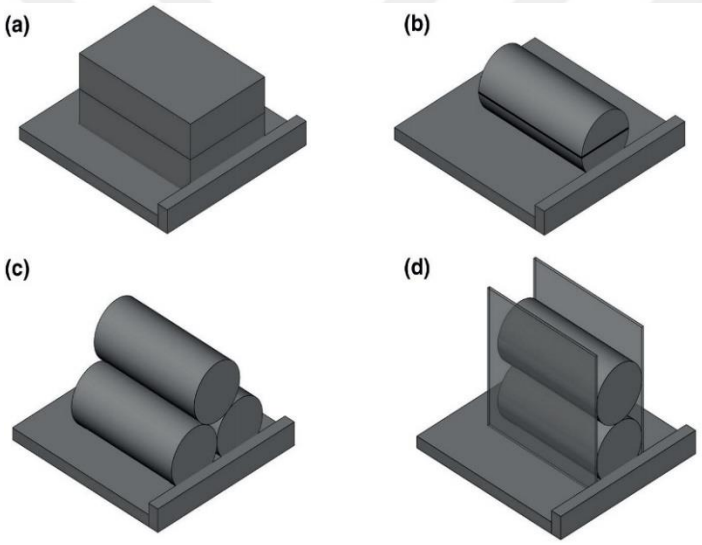
Şekil 3.13 Dolaylı çekme dayanımı için kullanılan numune (fillit)

Tilt deneyi

Temel sürtünme açısı (ϕ_b) süreksizliklerin kayma dayanımının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Temel sürtünme açısı taze yüzeyleri karakterize etmekte kullanılmaktadır. Literatürde temel sürtünme açısı farklı kaya tipleri için incelenmiş ve sedimanter kayaçlar için $25^0 - 30^0$, magmatik ve metamorfik kayaçlar için $30^0 - 35^0$ arasında değerler almaktadır. Temel sürtünme açısı laboratuvarda tilt (eğimlendirme) deneyi (Şekil 3.14) ve doğrudan makaslama kutusu deneyleri yapılarak hesaplanabilmektedir (Alejano vd., 2018). Tilt deneyi farklı geometrik şekillerdeki numuneler üzerinde ve farklı numune dizilimleri oluşturularak yapılabilmektedir (Şekil 3.15). Tilt deneyinde eğimlendirilen yüzey üzerinde numune kaydığı andaki (Şekil 3.16) yüzey eğim açısı (β) belirlenmekte ve bu açı yardımıyla temel sürtünme açısı eşitlikler yardımıyla temel sürtünme açısı eşitlikler yardımıyla belirlenmektedir.



Şekil 3.14 Tilt deneyi şematik görünümü (Alejano vd., 2018)



Şekil 3.15 Tilt deneyinde kullanılan farklı geometriye sahip numuneler ve farklı diziliş şekilleri (Alejano vd., 2018)



Şekil 3.16 Tilt deneyinde temel sürtünme açısı belirlenen numune (mikaşist)

Schmidt çekici sertlik deneyi

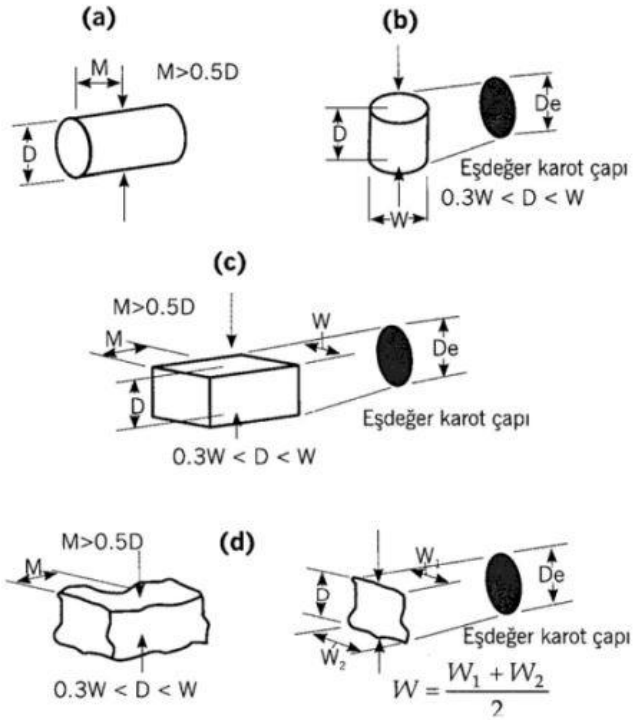
ISRM (2007)'de belirtilen esaslar dikkate alınarak yapılmıştır. Deney kapsamında L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır (Şekil 3.17). Okunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak Schmidt çekici sertlik deneyi yapılan numunelere ait değerler hesaplanmıştır.



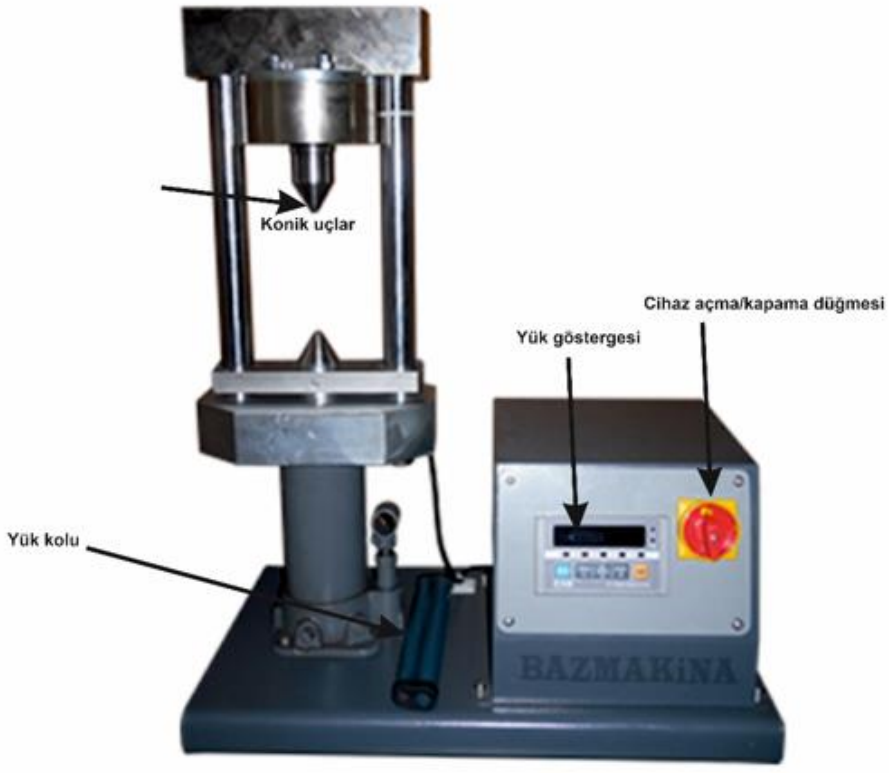
Şekil 3.17 L tipi Schmidt çekici

Nokta yük dayanım deneyi

Nokta yük dayanımı deneyinde karot örnekler, düzensiz şekilli örnekler veya kesilmiş küp örnekler kullanılabilmektedir. Örnek şekillerine göre gerekli olan örnek boyutları Şekil 3.18'de sunulmuştur. Nokta yük dayanım deneyinde kullanılan deney aleti Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Nokta yükleme deneyi için gerekli numune boyutları a) çapsal, b) eksenel, c) blok, d) düzensiz örnek (ISRM, 2007)



Şekil 3.19 Nokta yükleme deneyi aleti ve aksamları

Nokta yük deneyinden elde edilen "*P"* yükü ve örnek boyutları (D, W) kullanılarak ilk olarak eşitlik 3.8 kullanılarak düzeltilmiş nokta yükleme dayanımı (Is) hesaplanır.

$$Is = P / D_e^2 \quad (3.8)$$

"*D_e"*, eşdeğer karot çapı olarak adlandırılmaktadır ve çapsal demeyler için D_e^2, D^2'ye eşittir.

Eksenel deneyler, blok veya düzensiz boyutlu örneklerde eşdeğer karot çapını hesaplamak için, eşitlik 3.9'da verilen eşitlik kullanılır.

$$D_e = 4A / \pi \quad (3.9)$$

Is değeri, çapsal deneylerde D_e^2'nin diğer deney türlerinde ise D_e'nin bir fonksiyonudur. Bu sebeple, Is değerinin çapı 0,5 cm olan bir karot çapına uyarlanması gerekmektedir. Düzeltişmiş nokta yük dayanım indeksi $Is_{(50)}$ eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Is_{(50)} = F \times Is \quad (3.10)$$

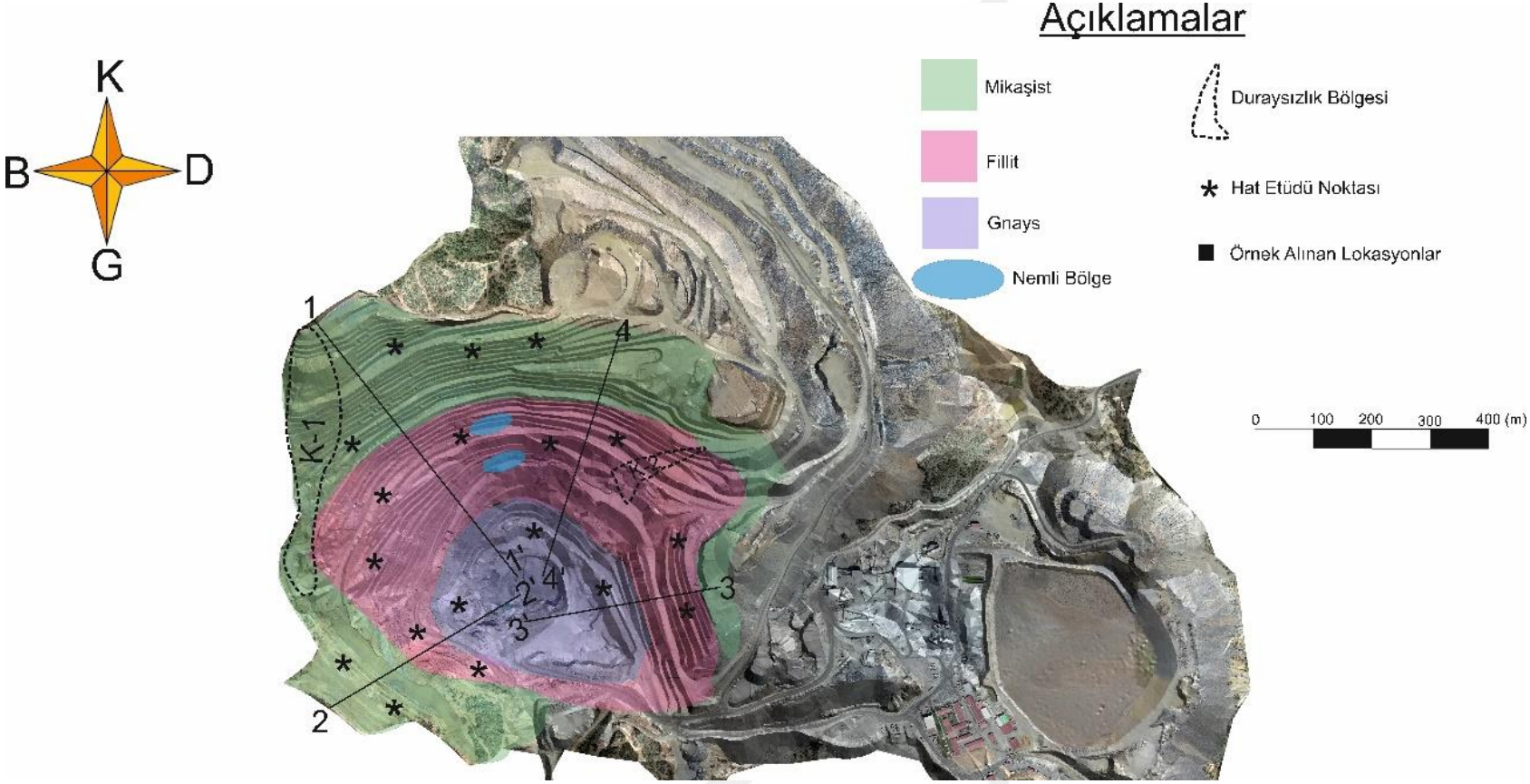
Boyut düzeltme faktörü olarak adlandıran "*F"*, eşitlik 3.11 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$F = (D_e/50)^{0.45} \quad (3.11)$$

3.2 Çalışma Alanının Mühendislik Jeolojisi

Sahada yapılan incelemeler sonucunda sahanın üst birimi mikaşist ile başlayıp alt şevlerde fillite ve ocak tabanında demir cevherine doğru yönelen bir litolojik yapı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma alanında geçmişte meydana gelen şev duraysızlıkları mühendislik jeolojisi açısından incelenmiştir. Açık ocak işletmesinin doğu bölgesinde ve kuzey batı bölgesinde iki ayrı şev duraysızlığı tespit edilmiştir. Sahanın kuzey batı bölgesinde meydana gelen şev duraysızlığı K1, sahanın doğu bölgesinde meydana gelen şev duraysızlığı ise K2 olarak adlandırılmıştır. Çalışma sahasında şevlerde genel olarak suya rastlanmamış, nemli bölgeler harita üzerinde gösterilmiştir. Sahada yapılan süreksizlik hat etüdü noktaları ve numune temin edilen noktalar harita üzerinde gösterilmiştir.

Arazi çalışmaları kapsamında yapılan gözlem ve değerlendirmeler neticesinde mühendislik jeolojisi haritası (Şekil 3.20) hazırlanmıştır.



Şekil 3.20 Çalışma sahası mühendislik jeolojisi haritası

3.3 Kaya Kütle Makaslama Dayanım Parametrelerinin Geri Analizler ile Belirlenmesi

Arazi çalışmaları neticesinde açık ocakta taç noktası 1523 m, topuk noktası 1359 m (Şekil 3.21) ve taç noktası 1428,50 m, topuk noktası 1384 m kotlarında (Şekil 3.22) olan iki şev duraysızlığı gözlenmiştir. Çalışma kapsamında limit denge analiz yöntemi ile geri analizler yapılmıştır. Limit denge analizlerinde Rocscience Slide2 (Rocscience Inc., 2020a) programı kullanılmıştır. Yenilme öncesi şev geometrisi S1 (fillit) Şekil 3.23'te, S3 (mikaşist) Şekil 3.24'te gösterilmiştir.

Geleneksel geri analiz yönteminde, güvenlik katsayısını (FoS) 1 yapan içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri tahmin edilmekte ve böylece diğer parametreler hesaplanmaktadır (Akın, 2013). Bu geri analiz yöntemi toprak şevlerde uygulanmasına rağmen benzer yöntem kullanılarak zayıf kayaçlarda, altere olan kayaçlarda da doğru sonuçlar verdiği araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Akın, 2013; Cai vd., 2007; Sharifzadeh vd., 2010). Son yıllarda Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri kaya kütlesinin makaslama parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Cai vd., 2007; Hong vd., 2017; Morales vd., 2004).

Kayma yüzeylerinin makaslama dayanım parametreleri belirlenirken normal gerilme (σ_n) değeri kullanılarak Hoek – Brown yenilme ölçütünde bulunan materyal sabiti (m ve s) Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) veya Kaya Kütle Sınıflaması'nın (RMR) bir fonkisyonu olarak hesaplanır (Akın, 2013). Homojen ve izotropik kaya kütleleri için Hoek – Brown yenilme ölçütü eşitlik 3.12'de verilmiştir.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} . [m_b . (\sigma_3' / \sigma_{ci}) + s]^{0.5} \quad (3.12)$$

Eşitlikte verilen; "σ_1'" ve "σ_3'" kayma yüzeyinin maksimum ve minimum efektif gerilmeleri; "σ_{ci} "sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı; "m_b" ve "s" materyal sabitidir.

m_b ve s değerleri ise eşitlik 3.13 ve eşitlik 3.14 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$m_b = m_i . \exp[(GSI – 100) / (28 – 14D)] \quad (3.13)$$

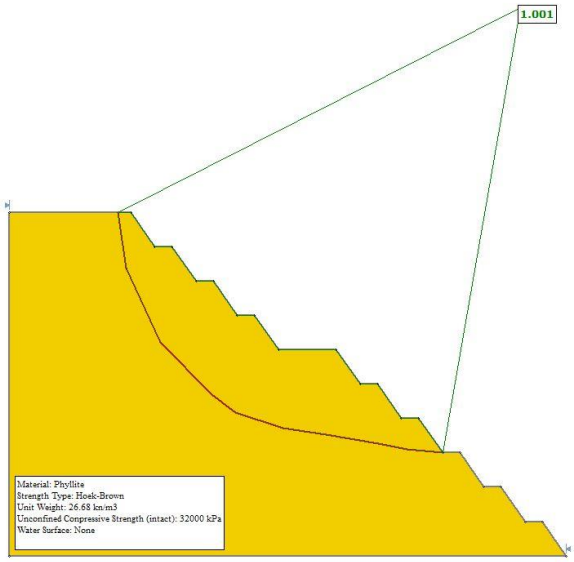
$$s = \exp[(GSI – 100) / (9 – 3D)] \quad (3.14)$$



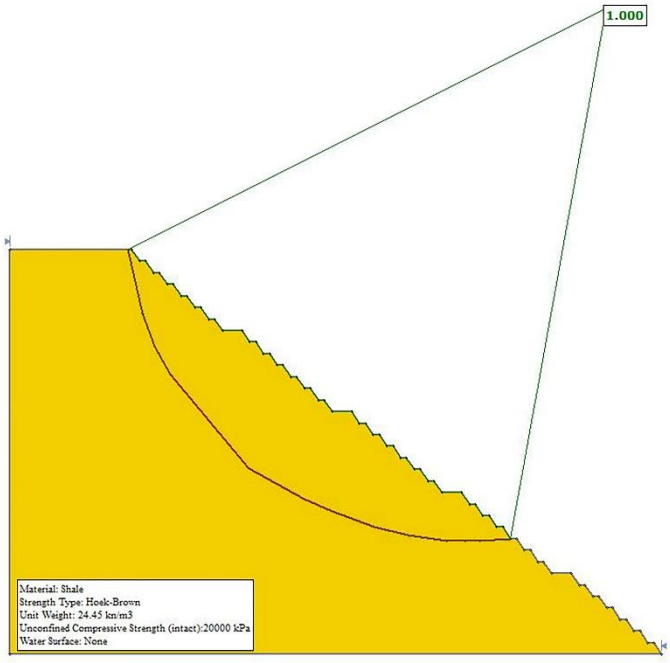
Şekil 3.21 S1'de meydana gelen kayma



Şekil 3.22 S3'te meydana gelen kayma



Şekil 3.23 S1 yenilme öncesi şev geometrisi



Şekil 3.24 S3 yenilme öncesi şev geometrisi

Şist, şeyl, fillit gibi oldukça ayrışmış metamorfik kayaçlardan laboratuvar testleri için standartlara uygun karot numuneler almak oldukça zor olduğu için bu gibi durumlarda kaya kütlesinin GSI değerine in-situ testlerle karar verilebilmektedir. Hoek – Brown yenilme ölçütü kullanılarak yapılan geri analizlerde m_b ve s değerlerinin seçilmesinde yaşanabilecek gerçeği yansıtmayan durumların önüne geçebilmek için araştırmacılar tarafından farklı yöntemler geliştirilmiştir (Akın, 2013;

Sonmez vd., 1998; Ünal vd., 1992). İlk olarak Sönmez vd. (1998) tarafından uygulanan, yenilen şevlerin geri analizinde kullanılan GSI sistemi aşağıda sıralanan yöntem kullanılarak deneme-yanılma yoluyla tayin edilebilir.

(a) Eşitlik (3.14) kullanılarak farklı GSI değerleri için materyal sabiti s değerleri hesaplanır. GSI değeri $GSI_{(s)}$ olarak adlandırılır.

(b) Limit denge analiz programında Hoek-Brown yenilme ölçütü kullanılarak şev geometrisi ve kayma yüzeyine göre güvenlik katsayısını (FOS) 1 yapan materyal sabiti m_b eşitlik 3.12'den hesaplanır.

(c) Hesaplanan materyal sabiti m_b, eşitlik 3.13'de yerine konulur ve ikinci GSI değeri olan $GSI_{(m)}$ hesaplanır.

(d) Farklı $GSI_{(s)}$ değerlerine göre çeşitli $GSI_{(s)}$ ve $GSI_{(m)}$ çiftleri hesaplanır.

(e) $GSI_{(s)} - GSI_{(m)}$ grafiğine orijinden geçecek şekilde 45^0 açıyla bir doğru çizilir. Doğru ve grafiğin kesiştiği noktadan elde edilen değer GSI değeri olarak kullanılır ve GSI_{RM} olarak adlandırılır.

3.4 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri

Kaya kütlerinin davranışları ve özelliklerini belirleyebilmek için kaya mühendisleri tarafından uzun yıllar araştırmalar yapılmıştır. Araştırmacılar, bu amaçla birçok kaya sınıflama sistemi geliştirmiştir. Özellikle zayıf kayalarda çalışmak ve doğru sonuçlar üretmek oldukça zor ve karmaşık bir konudur. Günümüzde en sık kullanılan kaya sınıflandırma sistemleri ise; RMR (Bieniawski, 1989), Q (Barton, 2002), GSI (Hoek ve Brown, 1988) olarak sayılabilir.

Q sistemi Barton vd. (1974) tarafından tünellerde kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistem uzun yıllar kullanıldıktan sonra, Q sisteminin tahkimat sistemleri seçimine yönelik kısmı Barton ve Grimstad (1995) tarafından yeniden düzenlenmiştir. Q sisteminde, RQD, boyu 10 cm'den uzun karotların boylarının toplam karot boyu uzunluğuna oranının yüzdesi, Jn, süreksizlik takım sayısı, Jr, süreksizlik setleri ve süreksizliklerin pürüzlülük katsayısı, Ja, süreksizlik setleri ayrışma katsayısı, Jw, süreksizlik dolgularındaki su geliri ve su basınca ilişkin katsayı, SRF ise dayanım gerilme oranı için kullanılan puanlardır (Barton, 2002). Q değeri hesaplanırken kullanılan puanlama değerleri RQD için Şekil 3.25'te, eklem takım sayısı Jn için Şekil 3.26'da, eklem pürüzlülük sayısı Jr için Şekil 3.27'de, eklem alterasyon sayısı Ja için Şekil 3.28'de, eklem suyu indirgeme faktörü Jw için Şekil 3.29'da, eklem indirgeme faktörü SRF için ise Şekil 3.30'da verilmiştir. Tüm bu

tablolardan oluşan nihai Q puanı ve bu puana karşılık gelen kaya kütlesi sınıfı Şekil 3.31'de gösterilmiştir.

	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Çok kötü	0-25	*Q hesaplanırken RQD≤10 ise (0 dahil) 10 alınır. *RQD 5 ve katları olarak alınır
B	Kötü	26-50	
C	Orta	51-75	
D	İyi	76-90	
E	Mükemmel	91-100	

Şekil 3.25 Kaya kalitesi (RQD) puanı

	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1	*Kesişme yerlerinde (3xJn) *Giriş ve çıkışlarda ağızlarında (2xJn) kullanılmalıdır
B	Bir eklem takımı	2	
C	Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3	
D	İki eklem takımı	4	
E	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6	
F	Üç eklem takımı	9	
G	Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	12	
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok sayıda eklemler, küp şeker görünümünde	15	
J	Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20	

Şekil 3.26 Eklem takım sayısı (Jn)

	Tanım	Değerlendirme	Not
	a) Kaya duvar kontağı, b) 10 cm lik kesmeden önce kaya duvar kontağı		*İlgili eklem takımlarının ortalama ara mesafesi 3 metreden büyükse 1.0 ilave edilir. *Lineasyon içeren düzlemsel fay aynalı eklemler için, lineasyonların uygun olması koşulu ile Jr=0.5 alınabilir. *B den G ye kadar olanlar küçük, diğerleri büyük yapılardır
A	Süreksiz eklemler	4	
B	Pürüzlü ya da düzensiz dalgalı	3	
C	Düz, dalgalı	2	
D	Sürtünme izli (slikensided) dalgalı	1.5	
E	Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1.5	
F	Düz, düzlemsel	1	
G	Sürtünme izli, düzlemsel	0.5	
	c)Kesmeden sonra kaya duvar kontağı yok		
H	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kil mineralleri içeren zon	1	
J	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kumlu, çakıllı, ezilmiş zon	1	

Şekil 3.27 Eklem pürüzlülük sayısı (Jr)

	Tanım	Değerlendirme		Not
Kaya duvar kontağı		Değer	~ϕ_r	
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu (öğneğin kuvars veya epidot)	0.75	-	*ϕ_r değerleri, eğer varsa alterasyon ürünlerinin mineralojik özelliklerini yaklaşık olarak göstermek için verilmiştir.
B	Altere olmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanma	1	25°-35°	
C	Hafif altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	2	25°-35°	
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı (yumuşamayan)	3	20°-25°	
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı (kaolinit, mika gibi). Ayrıcaklorit, talk, jips, grafit ve az miktarda şişen killer (1-2 mm veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar	4	8°-16°	
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25°-30°	
G	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az)	6	16°-24°	
H	Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az)	8	12°-16°	
J	Şişen kil dolgulu (örn. montmorillonit) (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az). Ja'nın değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir	8-12	6°-12°	
b)Kaya duvar kontağı yok				
K	Dağılmış veya ezilmiş kaya ve kil zonları veya bantları	6, 8 veya 8-12	6°-24°	
L	Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil parçaları (yumuşamayan)	5	-	
M	Sürekli, kalın kil zonları veya bantları (kilin tanımı için G,H, J şıklarına bakınız)	10, 13 veya 13-20	6°-24°	

Şekil 3.28 Eklem alterasyon sayısı (Ja)

	Tanım	Değerlendirme		Not
		Değer	Su basıncı (kg/cm²)	
A	Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dk dan az	1	<1.0	*C den F ye kadar olan parametreler kaba tahminlerdir. Drenaj yapıldığında Jw arttırılmalıdır. *Buz içeren tabakalar olduğunda farklı problemlerle karşılaşılabilir ve burada göz önüne alınmamıştır.
B	Orta derece su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması (5 lt/dk yerel)	0.66	1-2.5	
C	Dolgusuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10.0	
D	Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10.0	
E	Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0.2-0.1	>10.0	
F	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10.0	

Şekil 3.29 Eklem suyu indirgeme faktörü (Jw)

	Tanım			Değerlendirme	Not
a) Kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlesinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları					*Kazıyı etkileyen fakat kesmeyen zayıflık zonu varsa SRF değerlerini % 25-50 azaltınız.
A	Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			10.0	
B	Kil ve kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği ≤50 m)			5.0	
C	Kil ve kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği >50 m)			2.5	
D	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			7.5	
E	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği ≤50m)			5.0	
F	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği >50m)			2.5	
G	Gevşek, açık eklemler, çok fazla eklemli veya küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5.0	
b) Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1		
H	Yüzeye yakın düşük gerilme	>200	>13	2.5	
J	Orta gerilme	200-10	13-0.66	1.0	
K	Yüksek gerilme (çok sıkı yapı)	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0	
L	Orta şid. (masif) kaya patlaması	5-2.5	0.33-0.16	5-10	
M	Yüksek şid. (masif) kaya patlaması	<2.5	<0.16	10-20	
c)Sıkışan kaya,yüksek basınç altında sağlam olmaya kayanın plastik akışı					*Kazı derinliğinin kazı genişliğinden az olduğu durumlarda SRF yi 2.5 ten 5 e çıkartınız.
N	Orta miktarda sıkışan kaya basıncı			5-10	
O	Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı			10-20	
d) Şişen kaya; Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme					
P	Orta miktarda şişen kaya basıncı			5-10	
R	Yüksek miktarda şişen kaya basıncı			10-15	

Şekil 3.30 Eklem indirgeme faktörü (SRF)

Q DEĞERİNE BAĞLI KAYA KÜTLESİ SINIFLAMASI

Q değeri	Kaya kütlesi sınıfı
1000 - 400	Son derece iyi
400 - 100	Pek çok iyi
100 - 40	Çok iyi
40 - 10	İyi
10 - 4	Orta
4 - 1	Zayıf
1 - 0,1	Çok zayıf
0,1 - 0,01	Çok fazla zayıf
0,01 - 0,001	Son derece zayıf

Şekil 3.31 Q puanı ve Q puanına karşılık gelen kaya kütlesi sınıfları

RMR sınıflama sistemi Bieniawski (1989) tarafından geliştirilen bir kaya kütlesi puanlama sistemidir. Bu sistemde kaya kütlesi puanlanırken; kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı, RQD değeri, süreksizlik durumu ve aralığı, yer altı suyu gibi beş farklı parametre kullanılır. RMR kaya kütlesi puanlama sisteminde kullanılan beş parametre beş alt değer aralığına ayrılmıştır ve bu puanlar ne kadar yüksek olursa kayanın o kadar kaliteli olacağına işaret etmektedir. RMR sistemi ile kaya kütlesi puanlanırken kullanılan parametreler ve bu parametrelere ilişkin puanlamalar Şekil 3.32'de verilmiştir.

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ ve PUANLAMALARI									
Parametre			Değer aralığı						
1.	Sağlam kaya dayanımı	Nokta yük dayanım indeksi (MPa)	>10	10-4	4-2	1-2	Düşük tek eksenli basınç dayanım değerleri		
		Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	Puanlama		15	12	7	4	2	1	0
2.	Kaya Kalitesi Tanımı (RQD) (%)		100-90	90-75	75-50	50-25	<25		
	Puanlama		20	17	13	8	3		
3.	Süreksizlik aralığı (m)		>2	2-0.6	0.6-0.2	0.2-0.06	<0.06		
	Puanlama		20	15	10	8	5		
4.	Süreksizliklerin durumu		Çok pürüzlü yüzeyler. Devamlı değil. Ayrılma yok. Ayrışmamış yüzey	Pürüzlü yüzeyler. Ayrılma< 1mm. az ayrışmış yüzey	Pürüzlü yüzeyler. Ayrılma< 1mm. çok ayrışmış yüzey	Dalgalı yüzey veya dolgu kalınlığı <5 mm veya ayrılma 1-5 mm. devamlı	Yumuşak dolgu kalınlığı >5 mm veya Ayrılma > 5 mm. devamlı		
	Puanlama		30	25	20	10	0		
5.	Yeraltı suyu	Tünelin 10 m'lik kısmından gelen su (lt/m)	Yok	<10	10-25	25-125	>125		
		Süreksizlikteki su basıncı/ana asal gerilme oranı	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Genel koşullar	Tamamen kuru	Nemli	Islak	Damlama	Su akışı		
	Puanlama		15	10	7	4	0		
B. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME									
Süreksizliklerin doğrultu ve eğim yönelimi			Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil		
Puanlama	Tüneller ve madenler		0	-2	-5	-10	-12		
	Temeller		0	-2	-7	-15	-25		
	Şevler		0	-5	-25	-50	-60		
C. TOPLAM PUANLAMADAN BELİRLENEN KAYA KÜTLESİ SINIFLARI									
Puanlama			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤20		
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Açıklama			Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya		
D. KAYA SINIFLARININ ÖZELLİKLERİ									
Sınıf numarası			I	II	III	IV	V		
Ortalama desteksiz kalabilme süresi			15 m'lik açıklık için 20 yıl	10 m'lik açıklık için 1 yıl	5 m'lik açıklık için 1 hafta	2.5 m'lik açıklık için 10 saat	1 m'lik açıklık için 30 dakika		
Kaya kütlesinin kohezyonu (kPa)			>400	400-300	300-200	200-100	<100		
Kaya kütlesinin içsel sürtünme açısı			>45	45-35	35-25	25-15	<15		
E. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM VE EĞİM YÖNÜNÜN ETKİSİ									
Doğrultu tünel eksenine dik					Doğrultu tünel eksenine paralel				Doğrultuya bakılmaksızın 0-20°
Eğim yönünde ilerleme		Eğime ters yönde ilerleme							
Eğim 45-90°	Eğim 20-45°	Eğim 45-90°	Eğim 20-45°		Eğim 45-90°		Eğim 20-45°		
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil		Hiç uygun değil		Orta		Orta

Şekil 3.32 RMR sınıflama sistemi parametreleri ve puan tablosu (Bieniawski, 1989)

Jeolojik dayanım indeksi (GSI) kavramı, Hoek ve Brown (1980, 1988) tarafından geliştirilen yenilme kriterinde girdi parametresi olarak kullanılan malzeme sabitlerinin belirlenmesinde RMR puanı yerine GSI değeri kullanılması için önerilmiştir (Hoek vd., 1995). Özellikle süreksizlik içeren kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde kullanılacak olan kaya kütlesi sabitlerinin direkt deneysel yöntemlerle tespit edilmesi çok zor bir durdumdur. Kaya kütlesinin GSI

değeri belirlenirken, kaya kütlesinin yapısı ve süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük, bozunma ve dolgu durumlarına bağlı geliştirilen abak kullanılmaktadır (Hoek, 1999).

3.5 Kinematik Analizler

Şev duraylılığının incelemesinde ve şev tasarımında ilk olarak şevde gelişebilmesi muhtemel yenilme modelleri ortaya konulmalıdır. Eklemli kaya kütlelerinde süreksizlik kontrollü yenilme meydana gelme olasılığı, sağlam kayada gelişebilecek bir yenilme riskine göre daha fazladır. Bu nedenle bu tür ortamlarda duraysızlıkları kontrol eden faktörlerin başında süreksizliklerin yönelimi ve şev aynası ile olan konumsal ilişkileri gelmektedir. Araziden derlenen yönelim verileri stereografik izdüşüm yönelimi ile değerlendirilerek süreksizlikler için karakteristik yönelimler belirlenmektedir. Şev duraylılığının incelenmesine dair analitik – nümerik yöntemlere geçilmeden önce kinematik analizlerin yapılması yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem dahilinde, kohezyon, gözenek suyu basıncı, dış yükler vb. etkenler göz önüne alınmadan sadece süreksizliklerin ve şevin yönelimi ile süreksizliklerin içsel sürtünme açısı girdi parametresi olarak kullanılır (Ulusay, 2001).

Arazi çalışmaları neticesinde ortaya konan süreksizliklerin şev ile olan ilişkilerine göre Rocscience Dips (Rocscience Inc., 2020c) yazılımı ile kinematik analizler yapılmıştır.

3.6 İki Boyutlu (2D) ve Üç Boyutlu (3D) Limit Denge Analizleri

Çalışma kapsamında yapılan 2-boyutlu ve 3-boyutlu limit denge analizleri Slide2 (Rocscience Inc., 2020a) ve Slide3 (Rocscience Inc., 2020b) yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Yapılan limit denge analizlerinde formasyonu oluşturan tüm birimler için Hoek – Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır. Limit denge analizleri neticesinde Minimum FoS değeri elde edilirken, Basitleştirilmiş Bishop yöntemi (Bishop, 1955), Basitleştirilmiş Janbu yöntemi (Janbu, 1973), Morgernstern – Price yöntemi (Morgenstern ve Price, 1965) ve Spencer yöntemi (Spencer, 1967) uygulanmıştır. 2 boyutlu limit denge analizlerinde çalışma sahası kesitlere ayrılır ve kayma yüzeyi parçalara bölünürken, 3 boyutlu limit denge analizlerinde kesitlere ihtiyaç duyulmadan limit denge analizleri yapılabilmektedir (Azizi vd., 2018).

3.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Duraylılık Analizleri

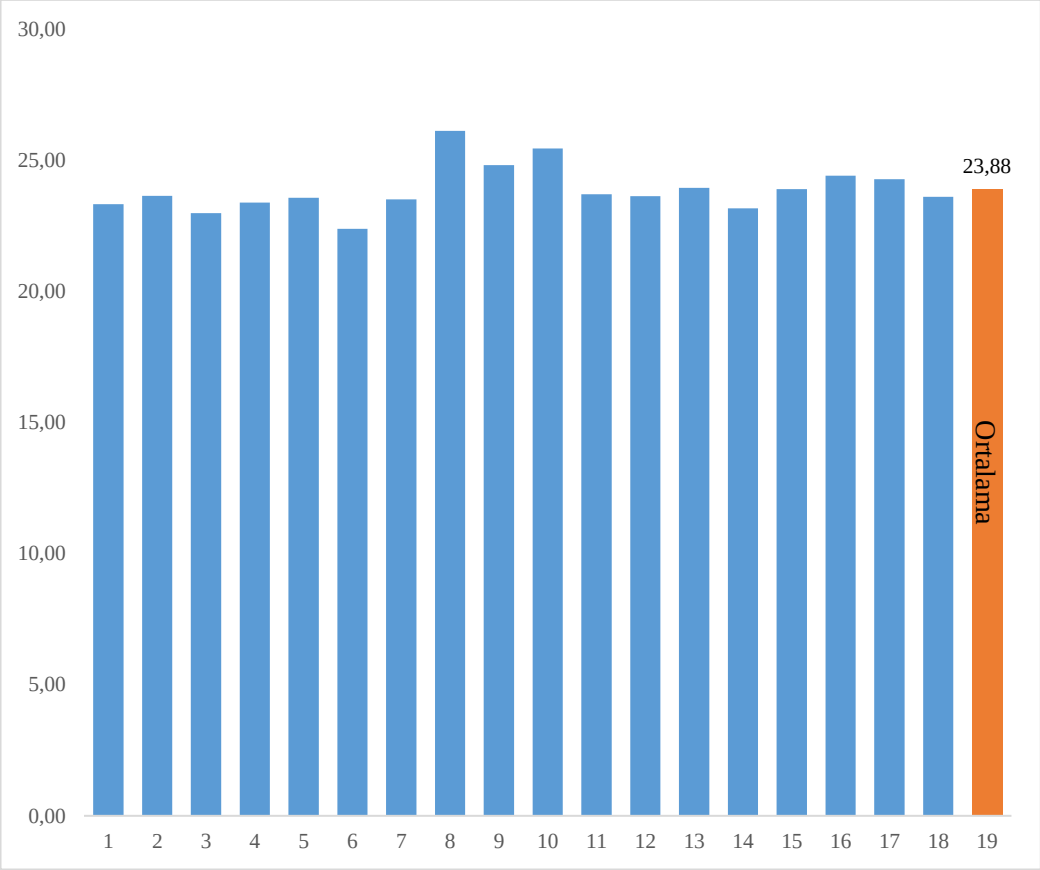
Son yıllarda şev duraylılık analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi çok sık kullanılmaktadır. Makaslama dayanım azaltımı yöntemi ise en popüler şev duraylılığı

analiz yöntemidir (Griffiths ve Lane, 1999; Hammah vd., 2005). Çalışma kapsamında yapılan sonlu elemanlar ile şev duraylılığı analizlerinde RS2 yazılımı kullanılmıştır (Rocscience Inc., 2020d). Sonlu elemanlar analizlerinde kayma yüzeyi alt elemanlara ayrılır ve bu alt alt elemanlara ağ adı verilir. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde RS2 yazılımına şev geometrisi tanıtılmış ve daha sonra olasılıksal analizler yapılmıştır. Analizlerin başlangıç ve sınır koşullarında Hoek – Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır. Analizler kapsamında çok kırıklı – çatlaklı kaya davranışı olan elastik – mükemmel plastik kaya davranışı kullanılmıştır.

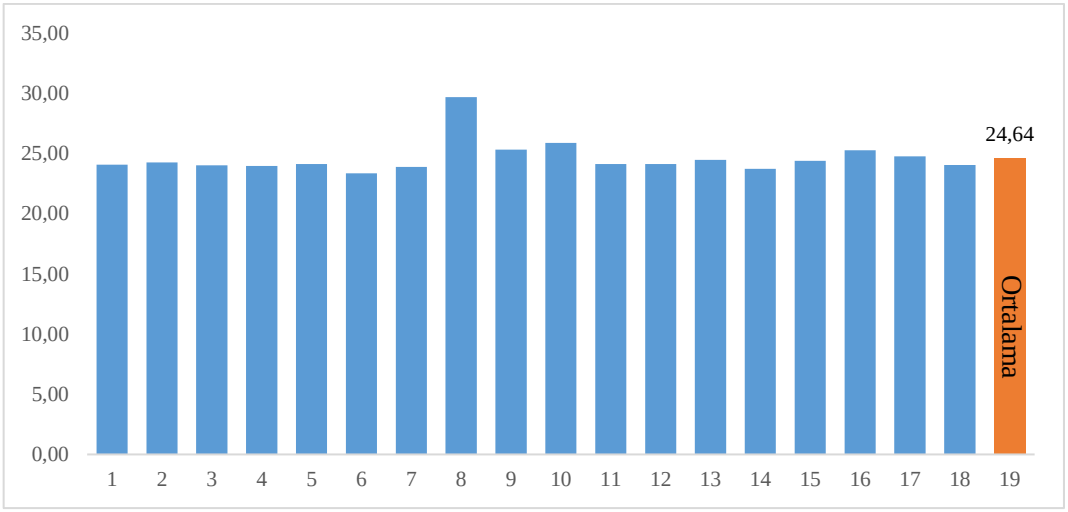
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Laboratuvar Çalışmaları Sonucunda Elde Edilen Malzeme Özellikleri

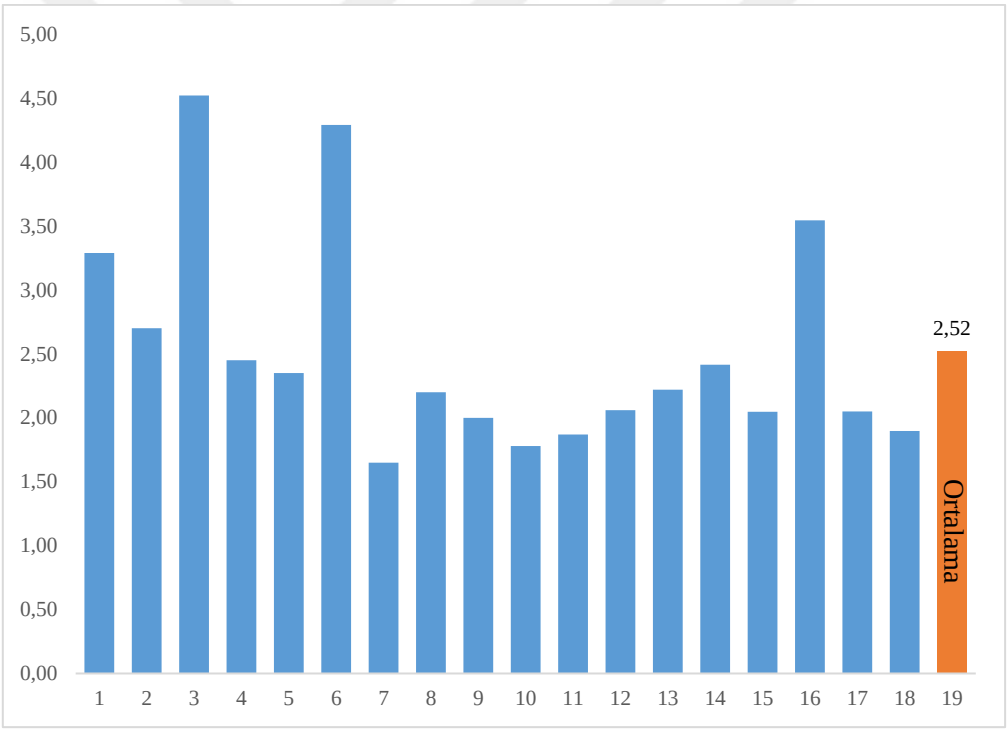
Açık ocak maden sahasını oluşturan birimlerin fiziko-mekanik özeliklerinin tespit edilmesi için çalışma sahasından alınan örnekler üzerinde ISRM (2007) önerileri doğrultusunda laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucundan elde edilen bulgular Şekil 4.1 ile Şekil 4.14 arasında sunulmuştur. Deneyler sonucunda birimlerin mekanik ve fiziksel özelliklerine ait bulgular ise Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te sunulmuştur.



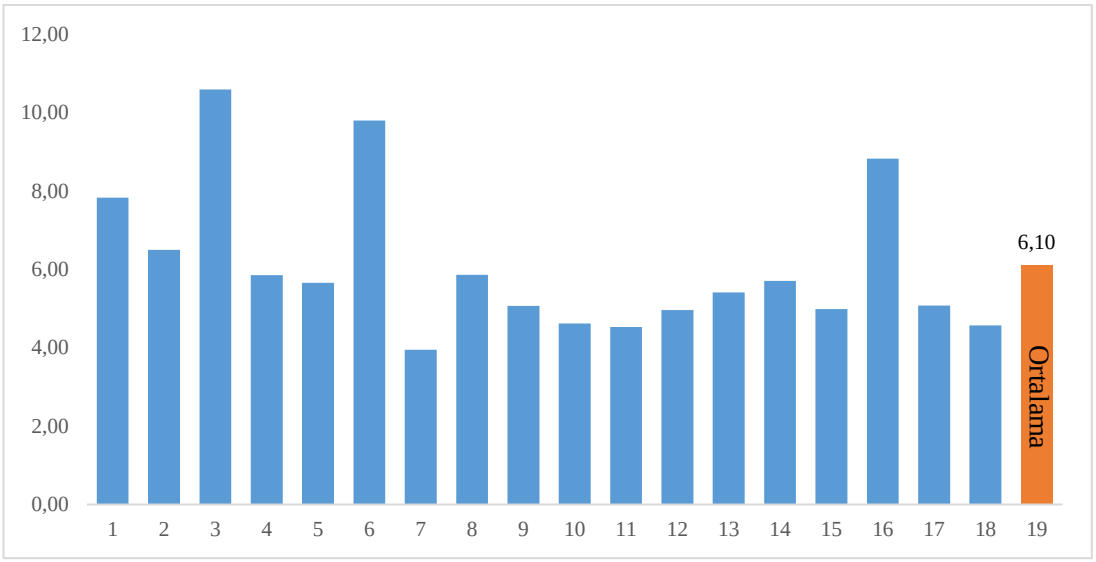
Şekil 4.1 Mikaşist birimi kuru birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)



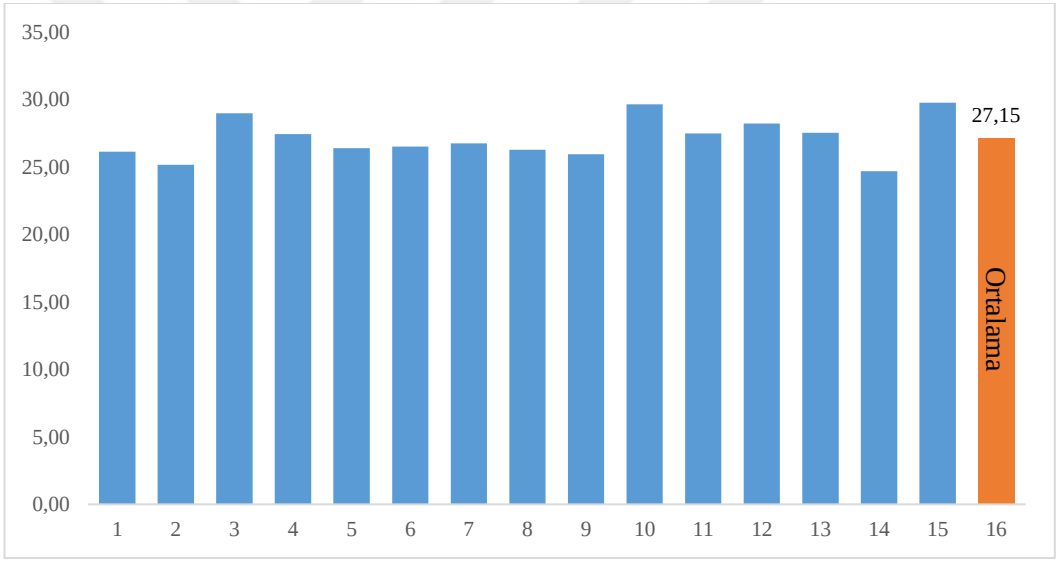
Şekil 4.2 Mikaşist birimi doygun birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)



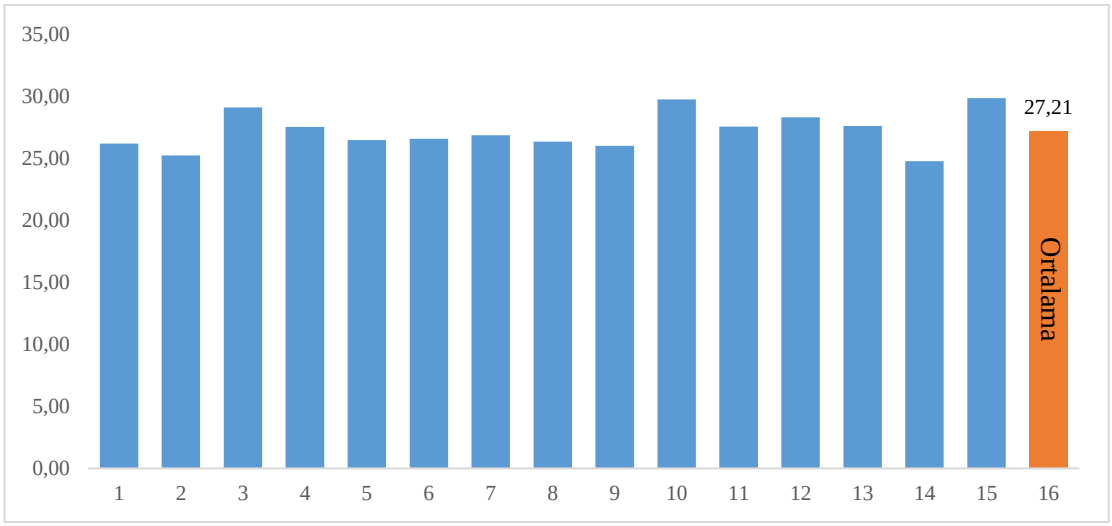
Şekil 4.3 Mikaşist birimi kütlece su emme (%)



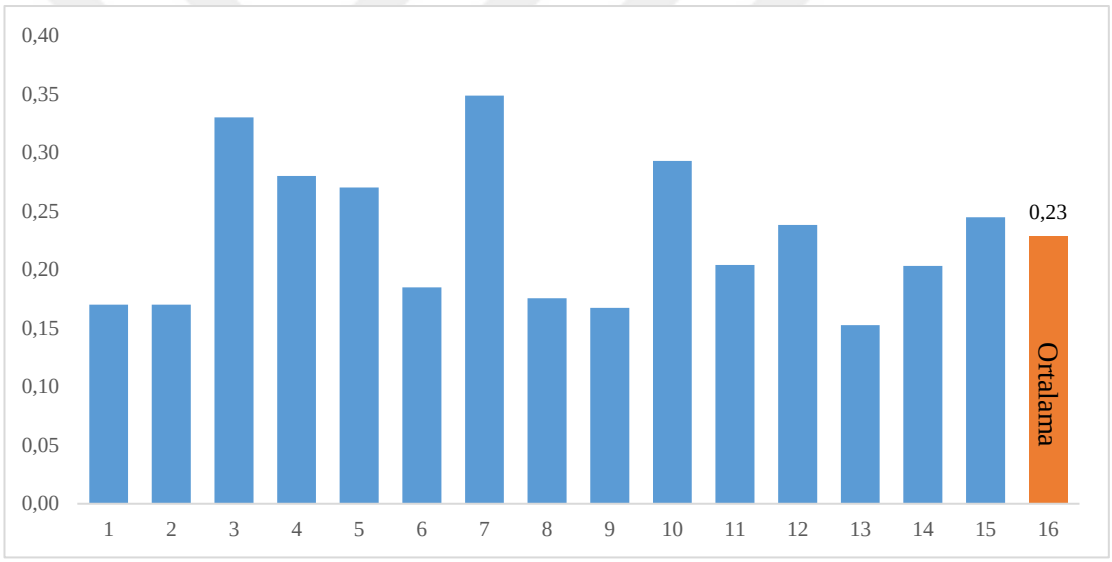
Şekil 4.4 Mikaşist birimi gözeneklilik (%)



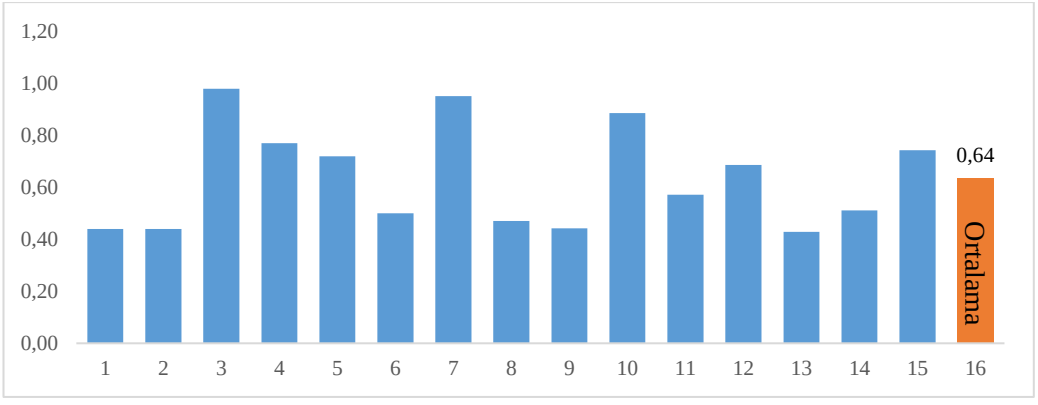
Şekil 4.5 Fillit birimi kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)



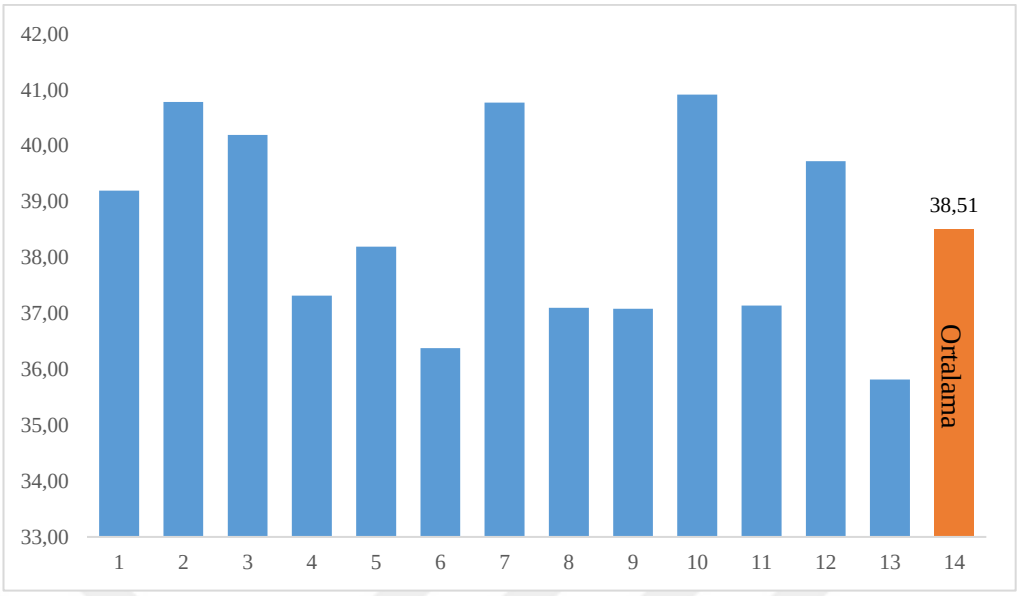
Şekil 4.6 Fillit birimi doygun birim hacim ağırlıkları (kN/m^3)



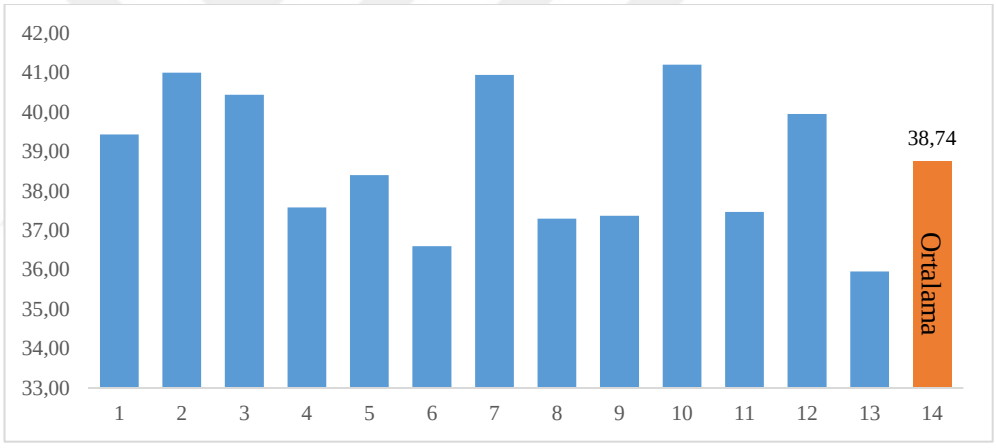
Şekil 4.7 Fillit birimi kütlece su emme (%)



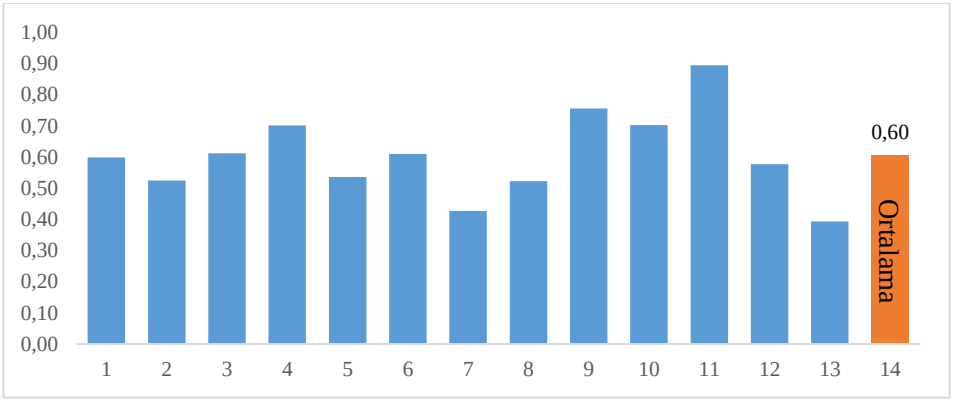
Şekil 4.8 Fillit birimi gözeneklilik (%)



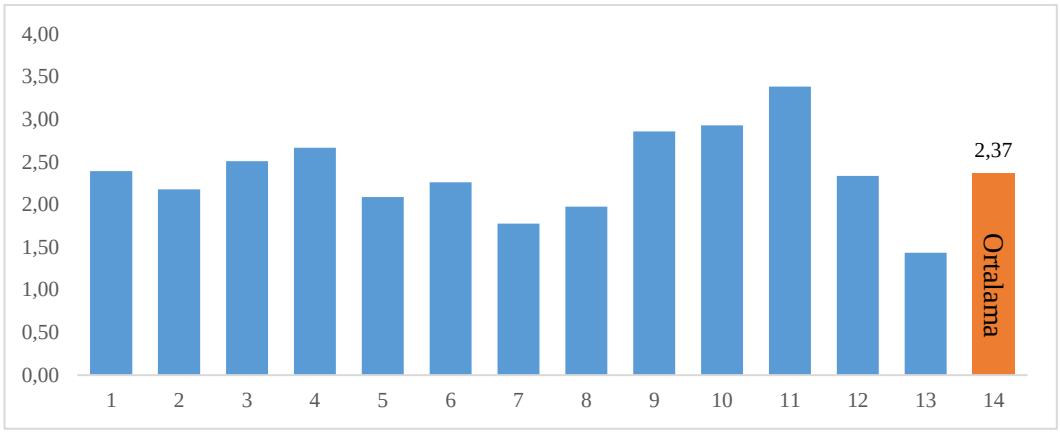
Şekil 4.9 Gnays birimi kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)



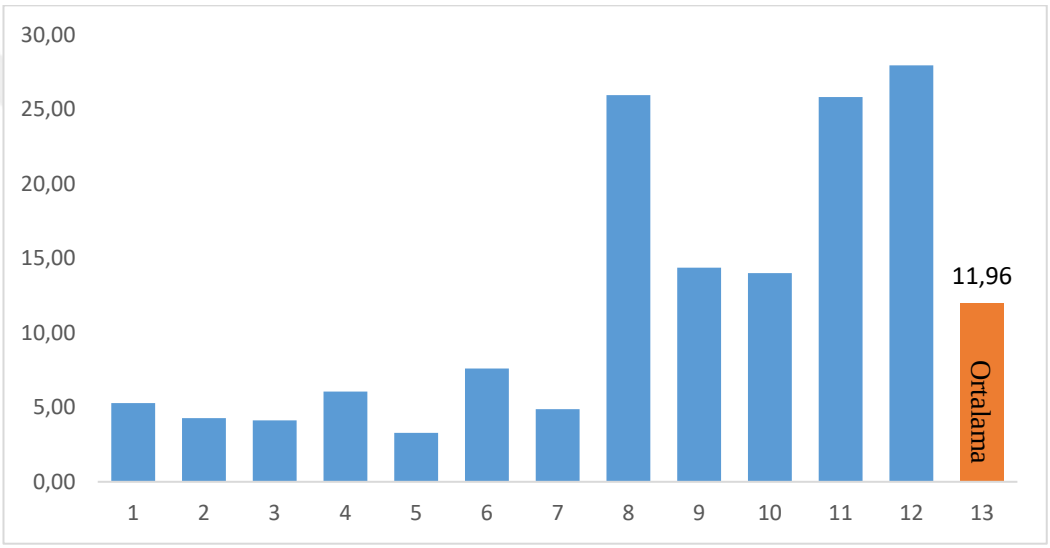
Şekil 4.10 Gnays birimi doygun birim hacim ağırlığı (kN/m^3)



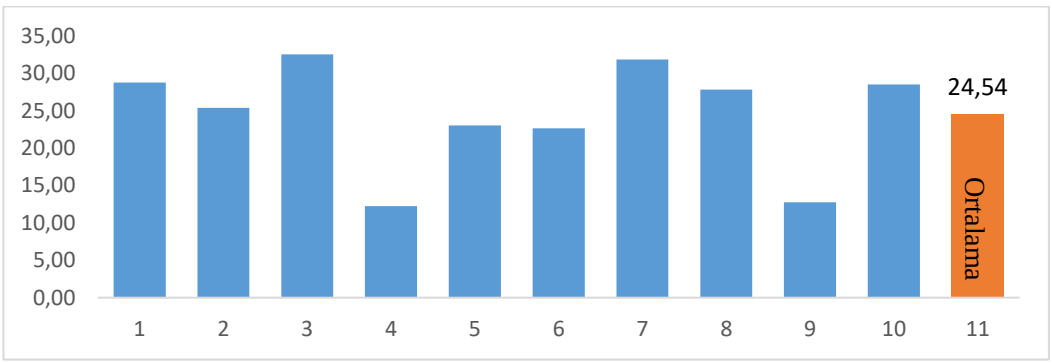
Şekil 4.11 Gnays birimi kütlece su emme (%)



Şekil 4.12 Gnays birimi gözeneklilik (%)



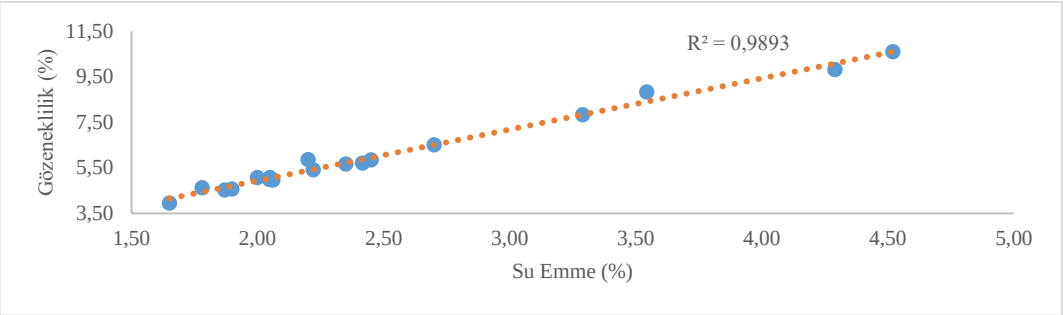
Şekil 4.13 Mikaşist birimi nokta yük dayanımı (MPa)



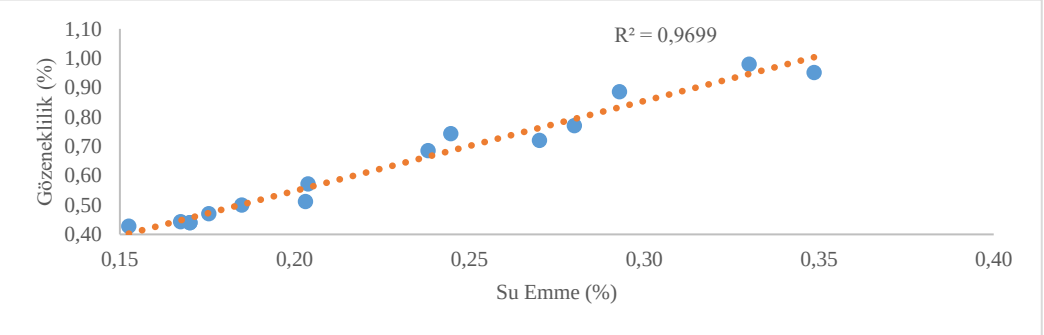
Şekil 4.14 Fillit birimi nokta yük dayanımı (MPa)

Elde edilen bulgular ışığında mikaşist ve fillit biriminin gözeneklilik – su emme arasındaki ilişki, gnays biriminin ise gözeneklilik – su emme ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da

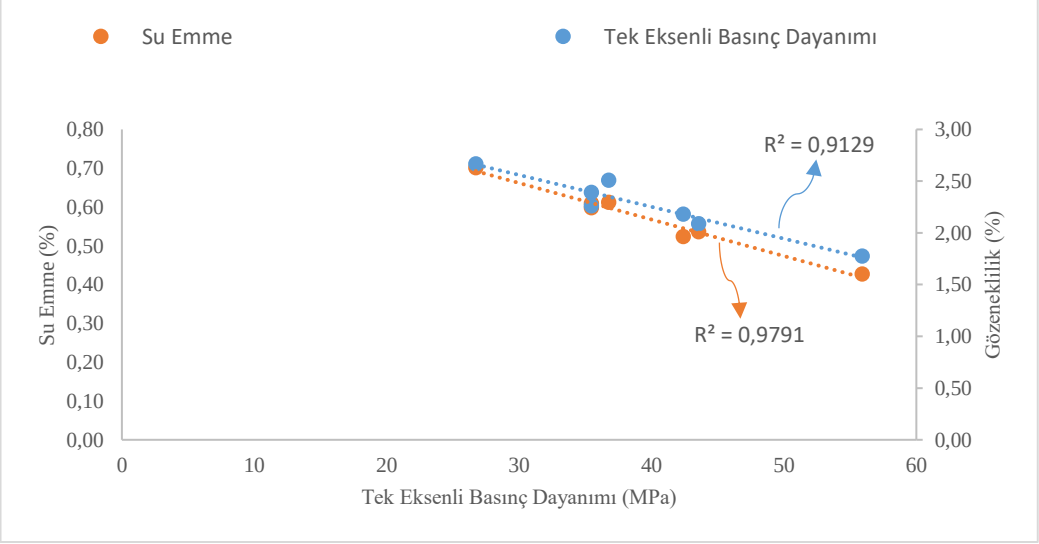
görüldüğü üzere numunelerin gözeneklilik oranları arttıkça doğru orantılı bir şekilde su emme oranları da artmaktadır. Numunelerin tek eksenli basınç dayanımı ise numunenin su emme oranı ve gözeneklilik oranı arttıkça ters orantılı bir şekilde düşmektedir (Şekil 4.17).



Şekil 4.15 Mikaşist birimi gözeneklilik ve su emme arasındaki ilişki



Şekil 4.16 Fillit birimi gözeneklilik ve su emme arasındaki ilişki



Şekil 4.17 Gnays birimi gözeneklilik ve tek eksenli basınç dayanımı – tek eksenli basınç dayanımı ve su emme arasındaki ilişki

Tablo 4.1 Mikaşist birimi fiziko-mekanik özellikleri

Örnek İsmi	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Doygun Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Kütlece su emme oranı (%)	Gözeneklilik (%)	Nokta Yük Dayanım (MPa)
1	23,32	24,08	3,29	7,83	5,29
2	23,64	24,27	2,70	6,50	4,27
3	22,99	24,03	4,52	10,59	4,13
4	23,39	23,96	2,45	5,85	6,06
5	23,57	24,13	2,35	5,66	3,28
6	22,39	23,35	4,29	9,80	7,60
7	23,51	23,89	1,65	3,95	4,87
8	26,12	29,70	2,20	5,86	25,95
9	24,82	25,32	2,00	5,07	14,38
10	25,45	25,90	1,78	4,62	13,99
11	23,70	24,14	1,87	4,53	25,82
12	23,63	24,12	2,06	4,96	27,94
13	23,95	24,48	2,22	5,41	
14	23,16	23,72	2,42	5,71	
15	23,90	24,39	2,05	4,99	
16	24,42	25,28	3,54	8,82	
17	24,28	24,78	2,05	5,07	
18	23,61	24,05	1,90	4,57	
Ortalama	23,88	24,64	2,52	6,10	11,96
Standart Sapma	0,89	1,41	0,84	1,90	9,52
En Büyük Değer	26,12	29,70	4,52	10,59	27,94
En Küçük Değer	22,39	23,35	1,65	3,95	3,28

Tablo 4.2 Fillit birimi fiziko-mekanik özellikleri

Örnek İsmi	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Doygun Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Kütlece su emme oranı (%)	Gözeneklilik (%)	Nokta Yük Dayanımı (MPa)
1	26,14	26,19	0,17	0,44	28,73
2	25,18	25,22	0,17	0,44	25,36
3	29,00	29,10	0,33	0,98	32,51
4	27,45	27,52	0,28	0,77	12,26
5	26,41	26,48	0,27	0,72	23,00
6	26,53	26,58	0,18	0,50	22,63
7	26,76	26,85	0,35	0,95	31,85
8	26,29	26,34	0,18	0,47	27,82
9	25,96	26,00	0,17	0,44	12,77
10	29,66	29,75	0,29	0,89	28,48
11	27,50	27,56	0,20	0,57	
12	28,24	28,31	0,24	0,69	
13	27,56	27,60	0,15	0,43	
14	24,71	24,76	0,20	0,51	
15	29,79	29,86	0,24	0,74	
Ortalama	27,15	27,21	0,23	0,64	24,54
Standart Sapma	1,52	1,53	0,06	0,20	7,12
En Büyük Değer	29,79	29,86	0,35	0,98	32,51
En Küçük Değer	24,71	24,76	0,15	0,43	12,26

Tablo 4.3 Gnays birimi fiziko-mekanik özellikleri

Örnek İsmi	Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Doygun Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)	Kütlece su emme oranı (%)	Gözeneklilik (%)	Tek Eksenli Basınç Dayanım MPa)
1	39,20	39,44	0,60	2,39	35,45
2	40,79	41,00	0,52	2,18	42,38
3	40,20	40,44	0,61	2,51	36,76
4	37,32	37,58	0,70	2,67	26,72
5	38,19	38,40	0,54	2,09	43,54
6	36,38	36,60	0,61	2,26	35,45
7	40,77	40,95	0,43	1,78	55,90
8	37,10	37,30	0,52	1,98	
9	37,09	37,37	0,76	2,86	
10	40,92	41,21	0,70	2,93	
11	37,14	37,47	0,89	3,39	
12	39,73	39,95	0,58	2,34	
13	35,82	35,96	0,39	1,44	
Ortalama	38,51	38,74	0,60	2,37	39,46
Standart Sapma	1,83	1,83	0,14	0,52	9,10
En Büyük Değer	40,92	41,21	0,89	3,39	55,90
En Küçük Değer	35,82	35,96	0,39	1,44	26,72

Deneysel çalışmalar elde edilen kaya ve kaya kütlelerinin fiziko-mekanik özellikleri literatürde benzer birimlerde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 4.4). Yapılan çalışmada elde edilen malzeme

özellikleri ile literatürde yapılan çalışmaların sonuçlarının uyum içerisinde olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.4 Literatürde benzer birimlerde yapılan çalışmalar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Parametre	Referans	Mikaşist	Fillit	Gnays
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	Kadakçı Koca ve Kadakçı (2020)			26
	Kabuya vd. (2020)			28,3
	Ren vd. (2020)	28,45		
	Hu vd. (2019)		26	
	Yiming vd. (2019)	28,50		26,50
	Zhang vd . (2019)			28
	Panthee vd. (2016)	27,40	26,82	
	Singh vd. (2014)		27,40	
	Akın (2013)	17,3		
	Bu çalışma	24,45	27,21	38,74
Kohezyon (MPa)	Ren vd. (2020)	0,0263		
	Yiming vd. (2019)	0,2		0,3
	Panthee vd. (2016)	0,032	0,027	

Tablo 4.4 (Devam)

İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)	Ren vd. (2020)	56,9		
	Hu vd. (2019)		32	
	Yiming vd. (2019)	30		47
	Panthee vd. (2016)	26	26	
	Xu vd. (2016)		21	
	Singhe vd. (2014)		24	
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	Kadakçı Koca ve Koca (2020)			27,34
	Kabuya vd. (2020)			56
	Hu vd. (2019)		28,2	
	Yiming vd. (2019)	30		100
	Xu vd. (2016)		43,5	
	Singh vd. (2014)		28	
	Akın (2013)	15,3		
	Bu çalışma	20	32	39,46

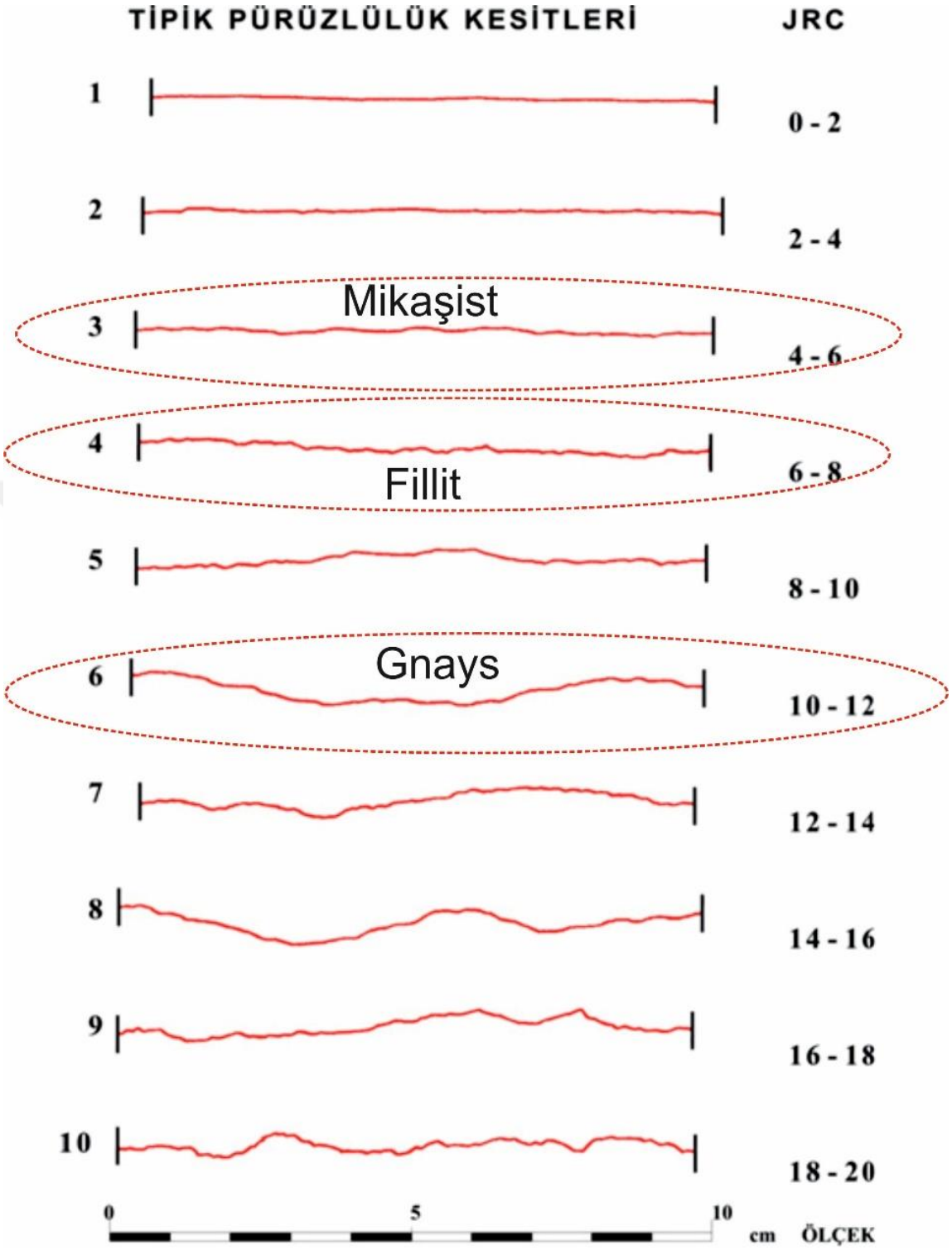
4.2 Süreksizliklerin Makaslama Dayanımının Belirlenmesi

Şevlerde bulunan eklemlerin yüzeylerinde var olan dalgalılık, pürüzlülük süreksizliklerin makaslama dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Akın vd., 2019). Pürüzlü yüzeyler genellikle makaslama dayanımını arttırmakta ve bu durum kayanın duraylılığı bakımından oldukça önemli bir durumdur (Barton vd., 1974). Barton (1973, 1976) doğal kaya eklemlerinin davranışları üzerine çalışmalar yürütmüş ve eşitlik 4.1'de verilen yenilme ölçütünü önermiştir.

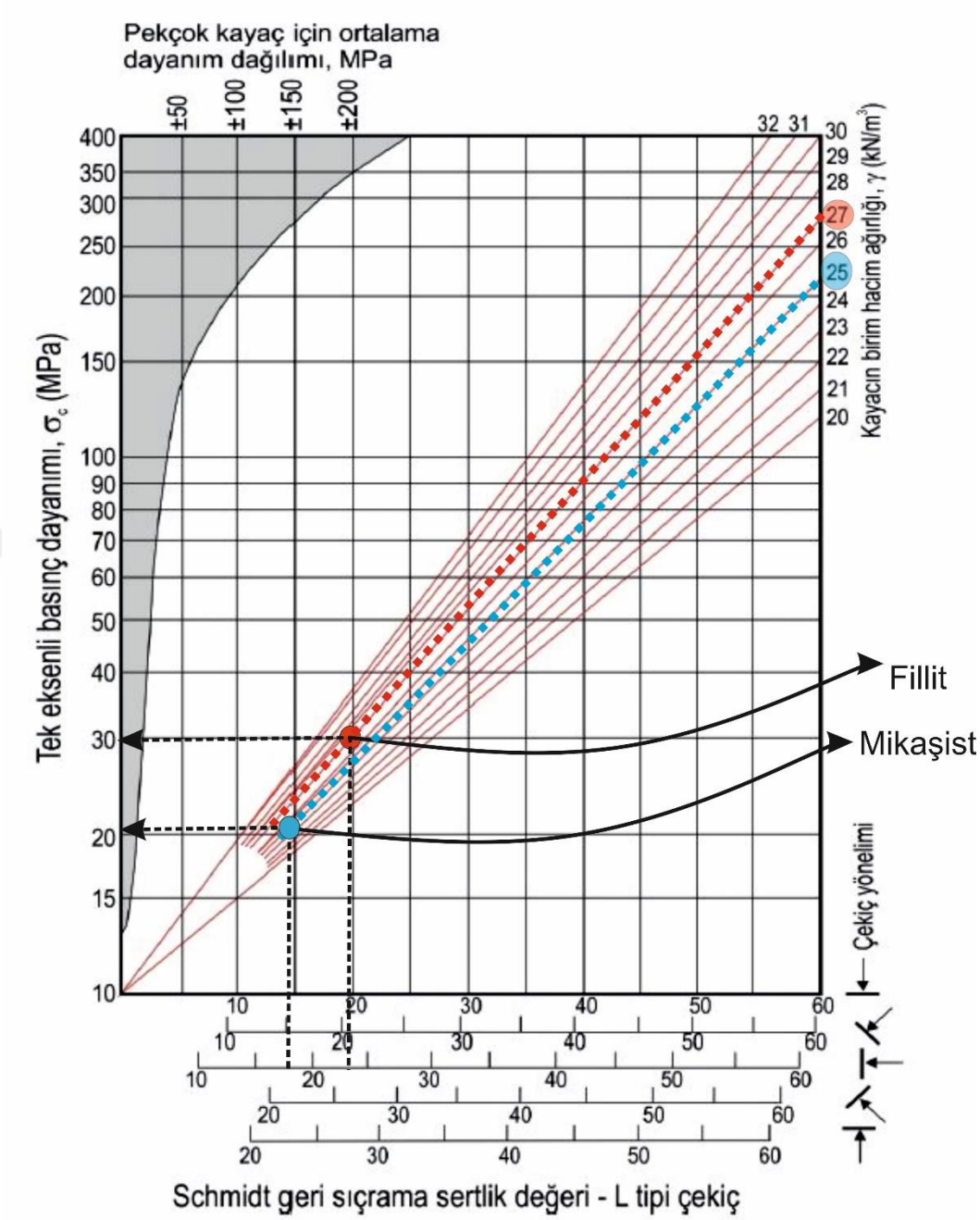
$$\tau = \sigma_n \tan [\phi b + JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n)] \quad (4.1)$$

Burada; "*JRC"* eklem pürüzlülük katsayısı; "*JCS"* eklem yüzey dayanımıdır.

JRC değerinin belirlenebilmesi için şevlerde profilometre ölçümleri yapılmış ve yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.18'de verilen Barton ve Choubey (1977) tarafından pürüzlülük kesitleri ile çakıştırılmıştır. Yapılan profilometre ölçümlerine göre eklem pürüzlülük katsayıları mikaşist için 4-6 fillit için ise 6-8, gnays için 10-12 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.18). Süreksizlik yüzey dayanımı JCS'nin belirlenmesinde kullanılan en pratik yöntem Schmidt sertlik çekici deneyidir. Arazide yapılan Schmidt sertlik çekici deneyleri ISRM (2007) tarafından önerilen şekilde yapılmıştır. Schmidt geri tepme sayısı ile yüzey dayanımı arasındaki ilişki ise Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen abak ile belirlenmiştir (Şekil 4.19). Ulusay (2010) çalışmasından Schmidt sertlik çekici deneyinin JCS değeri 20 – 300 MPa arasında değişen süreksizliklerde uygulanabilir olduğunu belirtmiştir.



Şekil 4.18 Süreksizlik pürüzlülük katsayısının belirlenmesinde kullanılan süreksizlik profilleri (Barton ve Choubey, 1977)



Şekil 4.19 Mikaşist ve fillit birimleri için Schmidt geri sıçrama sertlik değeri ve tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişki (Deere ve Miller, 1966)

Barton ve Choubey (1977) kayaçlardaki eklem yüzeylerine ait 130 doğrudan makaslama kutusu deney sonuçlarını kullanarak eşitlik 4.1'de verilmiş olan ayrışmış yüzeyler için makaslama dayanım formülünü eşitlik 4.2'de verildiği gibi revize etmişlerdir.

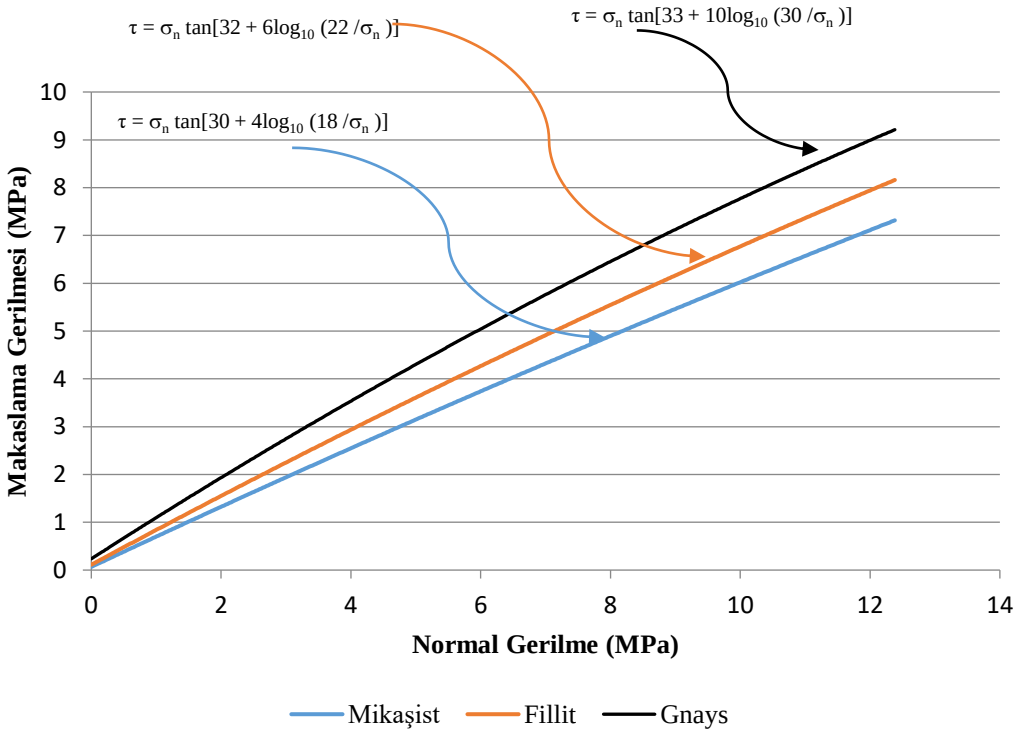
$$\tau = \sigma_n \tan [\phi_r + JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n)] \quad (4.2)$$

Burada; "ϕr "artık sürtünme açısıdır. Barton ve Choubey (1977) artık sürtünme açısının eşitlik 4.3'te verilen formülle tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (4.3)$$

Burada; "*r"* ayrışma yüzeyinin veya ıslak yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeri; "*R"* ise ayrışmamış yüzeyin Schmidt geri sıçrama değeridir.

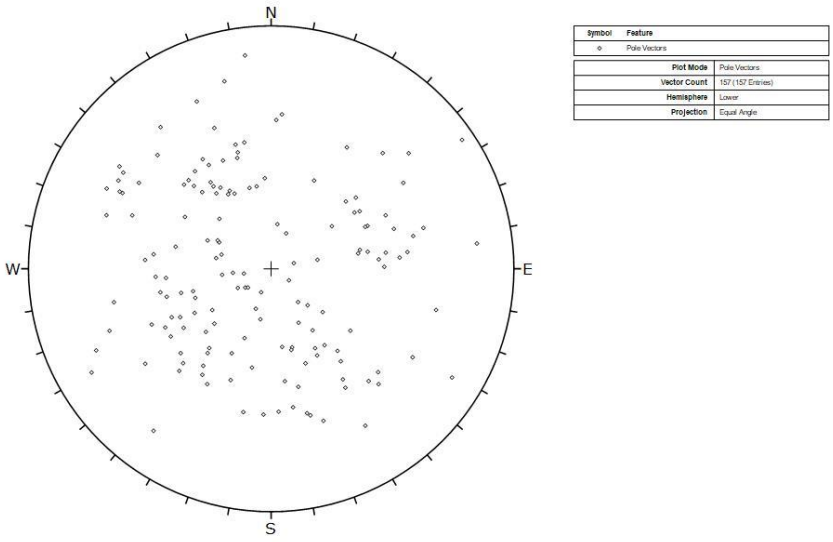
Tilt deneyi ile en güncel yöntem Alejano vd. (2018) yaptığı çalışmada önermiştir. Bu öneriler doğrultusunda çalışma kapsamında tilt deneyleri yapılmış ve mikaşist için temel sürtünme açısı ϕ_b temel sürtünme açısı; mikaşist için 30^0, fillit için 32^0, gnays için ise 33^0 bulunmuştur. Şekil 4.20'de iki farklı süreksizlik yüzeyi için Barton ve Choubey (1977) görgül yenilme ölçütüne göre çizilmiş yenilme zarfları verilmiştir. Buna göre JRC değeri mikaşist için 4, fillit için 6, gnays için 10 kabul edilmiştir. JCS değeri ise mikaşist için 18, fillit için 22, gnays için ise 30 MPa bulunmuştur. Rezidüel sürtünme açısı mikaşist için 30^0, fillit için 32^0, gnays için 33^0 alınmıştır. Çizilen yenilme zarflarından normal gerilme seviyelerine bağlı olarak süreksizlik yüzeyinin sürtünme açısı belirlenebilmektedir.



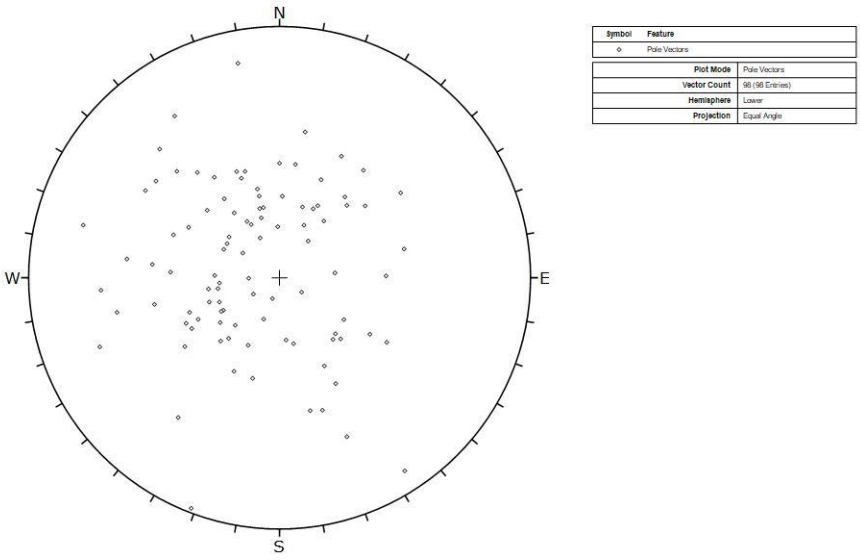
Şekil 4.20 Mikaşist, fillit ve gnays için Barton ve Bandis görgül yenilme ölçütüne göre hazırlanmış süreksizlik yenilme zarfları

4.3 Kinematik Analizler

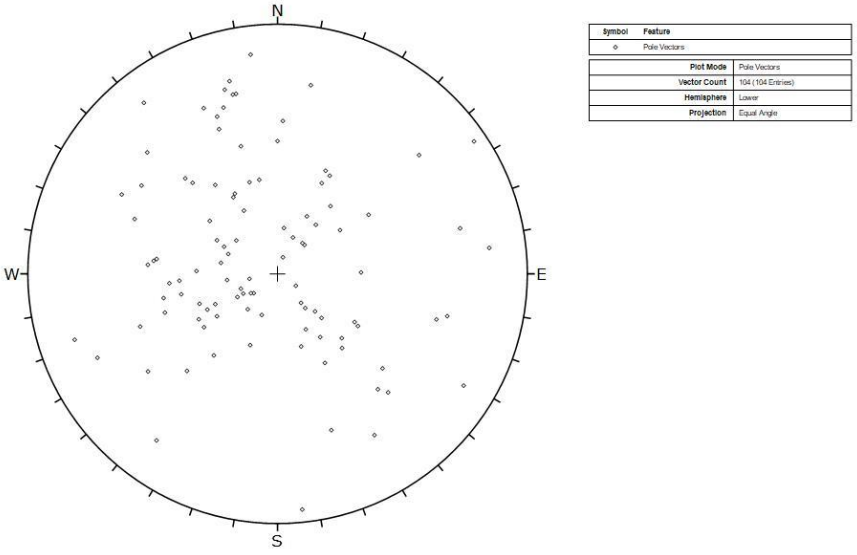
Arazi çalışmalarının neticesinde elde edilen süreksizlerin eğim ve eğim yönleri Dips (Rocscience Inc., 2020c) yazılımı kullanılarak kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, düzlemsel kayma, kama tipi yenilme, devrilme tipi yenilme için yapılmıştır. S1 için yapılan kinematik analiz kapsamında, 157 süreksizliğin kutup noktaları analiz edilmiştir (Şekil 4.21). Aynı şekilde S2 ve S5 için de kinematik analizler yapılmıştır. S2 bölgesi için arazi çalışmaları neticesinde elde edilen süreksizliklerin eğim/eğim yönleri Şekil 4.22'de, S5 için ise Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Şekil 4.24'te görüldüğü üzere 157 süreksizlikten sadece 3 tanesi (%1,91) kritik bölgeye girmektedir Şekil 4.25'te görüldüğü gibi S2 bölgesinde yapılan kinematik analizlerde 98 süreksizlikten 4 tanesi (%4,08), S5 yapılan kinematik analizlerde ise 104 süreksizlikten düzlemsel kayma açısından duraysızlık oluşturacak bir süreksizlik kutup noktası saptanmamıştır (Şekil 4.26). Sektörlere ayrılan açık ocak işletmesinde yapılan kinematik analizler neticesinde düzlemsel kayma açısından bir duraysızlık sorununu beklenmemektedir.



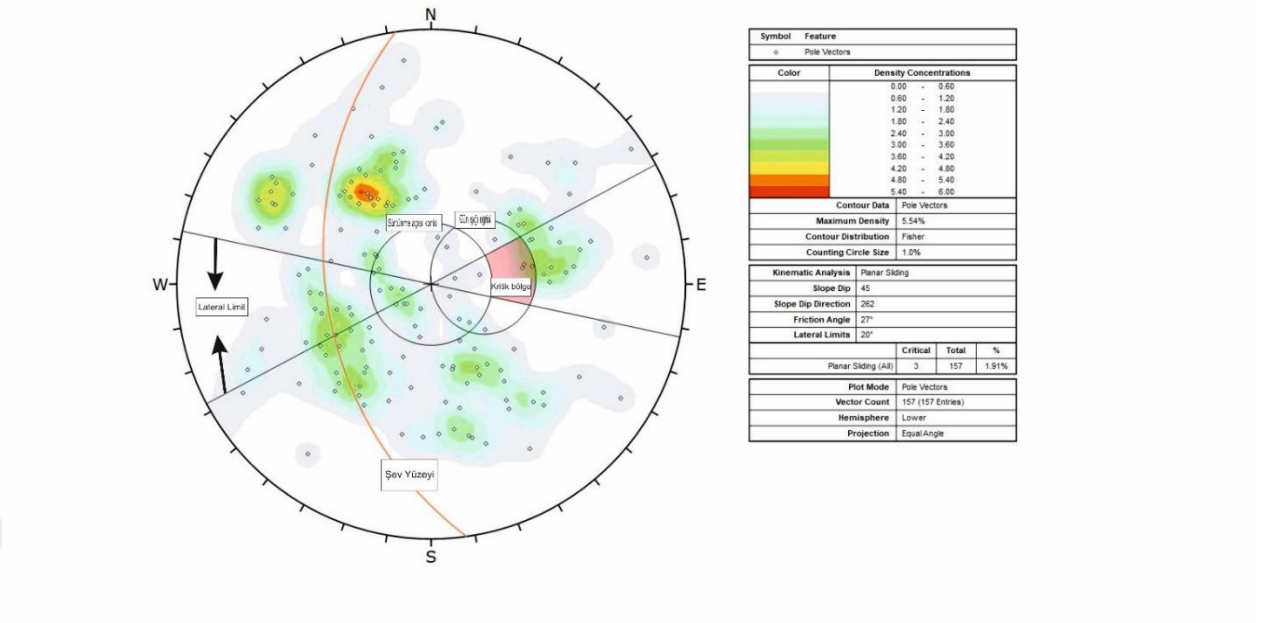
Şekil 4.21 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S1)



Şekil 4.22 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S2)



Şekil 4.23 Arazi çalışmaları sırasında pusula ile ölçülen süreksizliklerin eğim/eğim yönlerinin stereonet üzerinde gösterimi (S5)



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

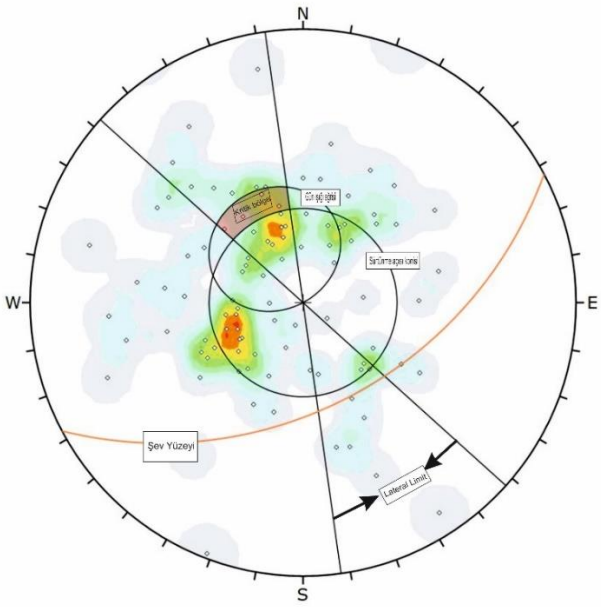
Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.60
	0.60 - 1.20
	1.20 - 1.80
	1.80 - 2.40
	2.40 - 3.00
	3.00 - 3.60
	3.60 - 4.20
	4.20 - 4.80
	4.80 - 5.40
	5.40 - 6.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	5.54%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	45		
Slope Dip Direction	262		
Friction Angle	27°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	3	157	1.91%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	157 (157 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Şekil 4.24 S1 için düzlemsel kayma kinematik analizi



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

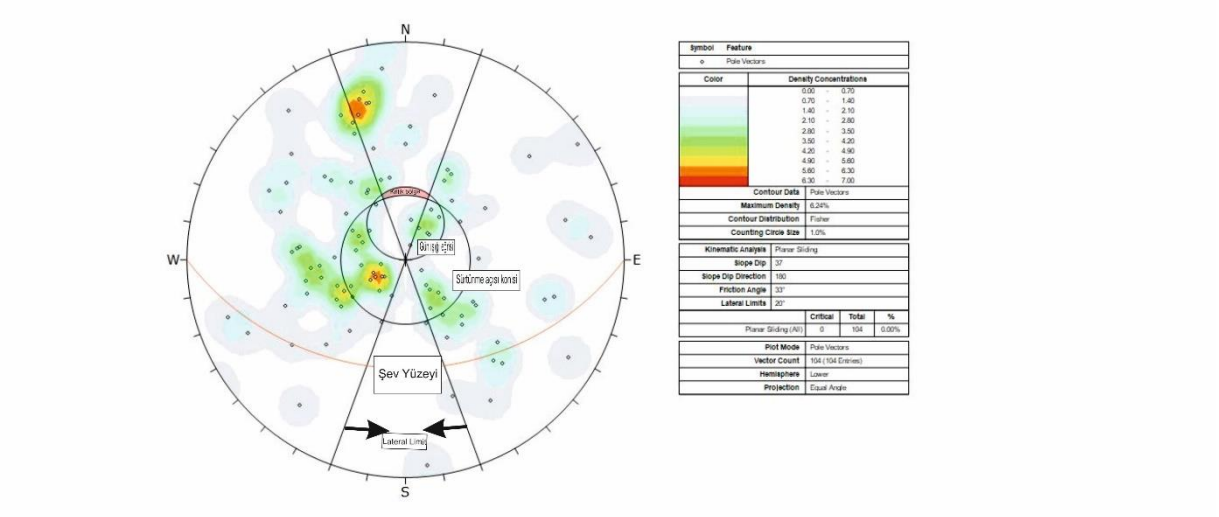
Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.70
	0.70 - 1.40
	1.40 - 2.10
	2.10 - 2.80
	2.80 - 3.50
	3.50 - 4.20
	4.20 - 4.90
	4.90 - 5.60
	5.60 - 6.30
	6.30 - 7.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	6.52%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding		
Slope Dip	48		
Slope Dip Direction	152		
Friction Angle	38°		
Lateral Limits	20°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	4	98	4.08%

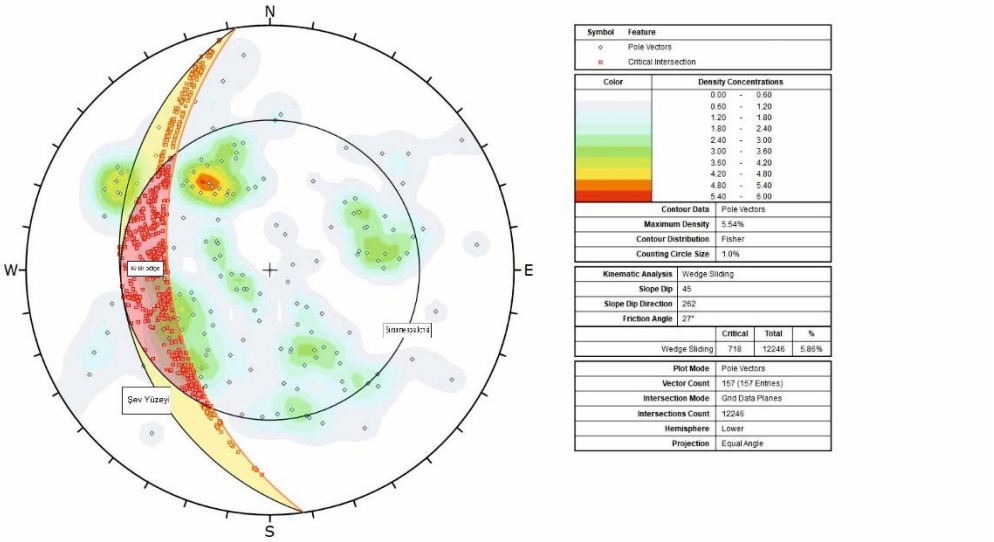
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	98 (98 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Şekil 4.25 S2 için düzlemsel kayma kinematik analizi

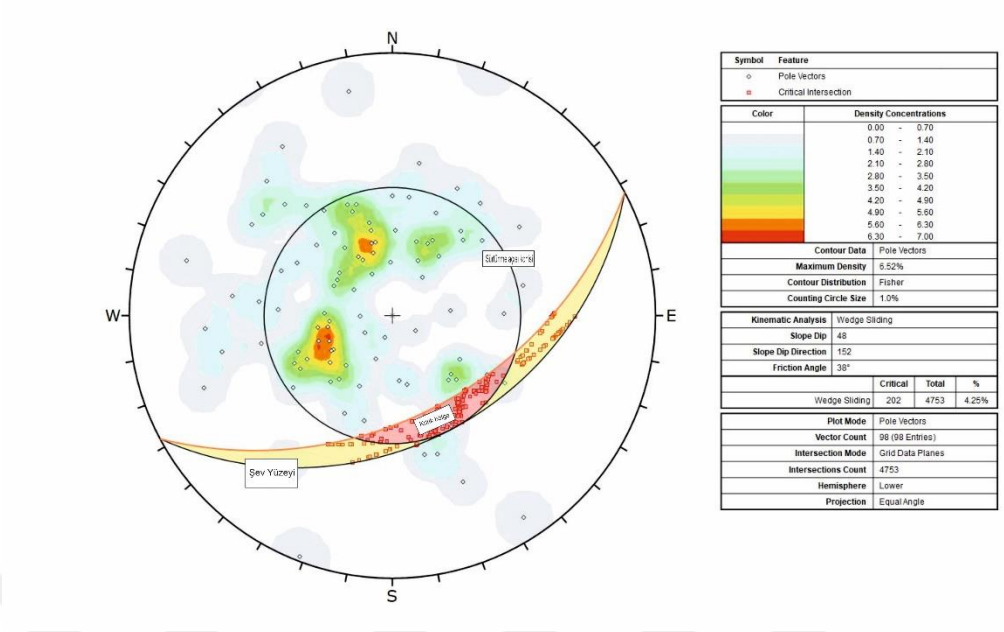


Şekil 4.26 S5 için düzlemsel kayma kinematik analizi

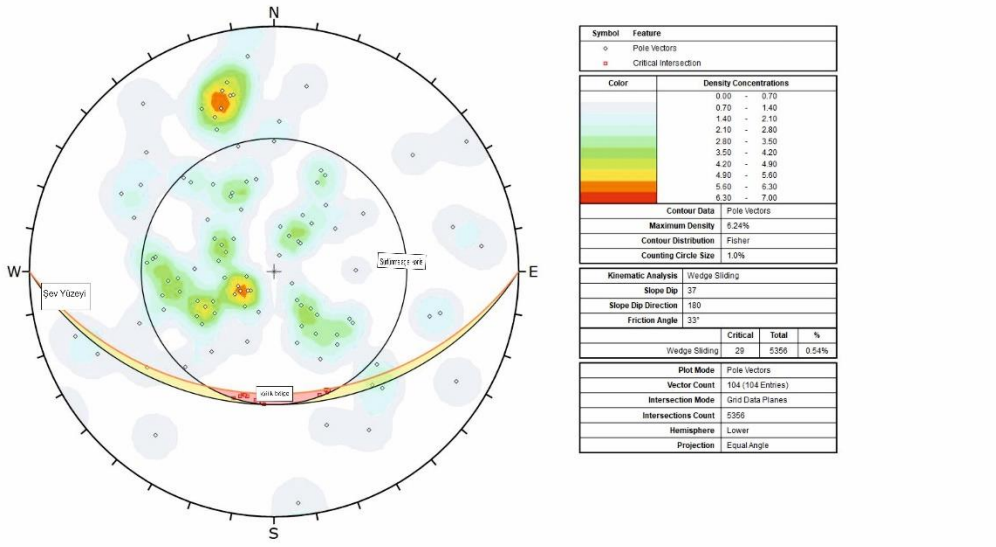
S1 için yapılan kama tipi kaymanın kinematik analizinde (Şekil 4.27) kesişen 12246 noktanın 718'i kritik bölgeye girmektedir (%5,86). Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da gösterilen S2 ve S5 için yapılan kama tipi kaymanın kinematik analizlerinde ise sırasıyla, 4753 noktanın 202'si (%4,25), 5356 noktanın 29'u (%0,54) kritik bölgeye girmektedir. Yapılan kama tipi kaymanın kinematik analizlerine göre açık ocak işletmesindeki mevcut şevlerde kama tipi duraysızlık beklenmemektedir.



Şekil 4.27 S1 için kama tipi kaymanın kinematik analizi

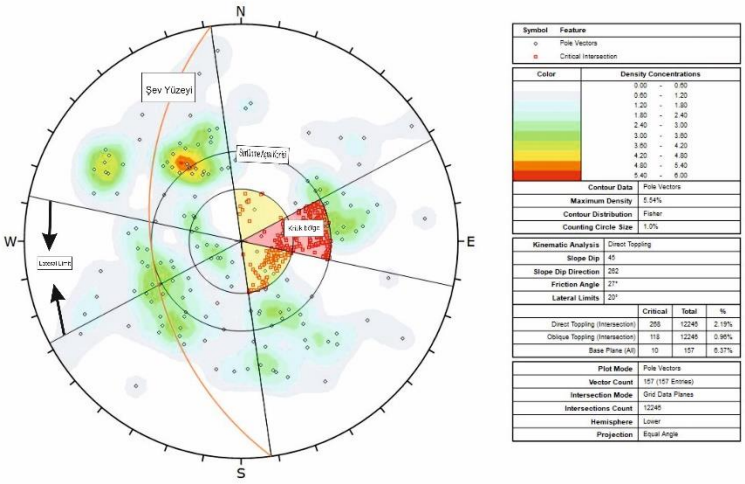


Şekil 4.28 S2 için kama tipi kaymanın kinematik analizi

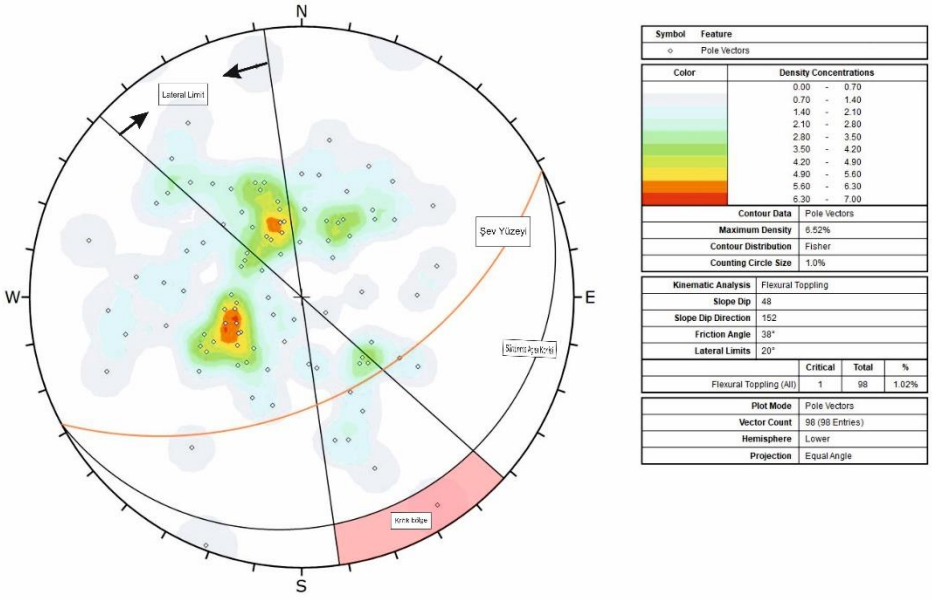


Şekil 4.29 S5 için kama tipi kaymanın kinematik analizi

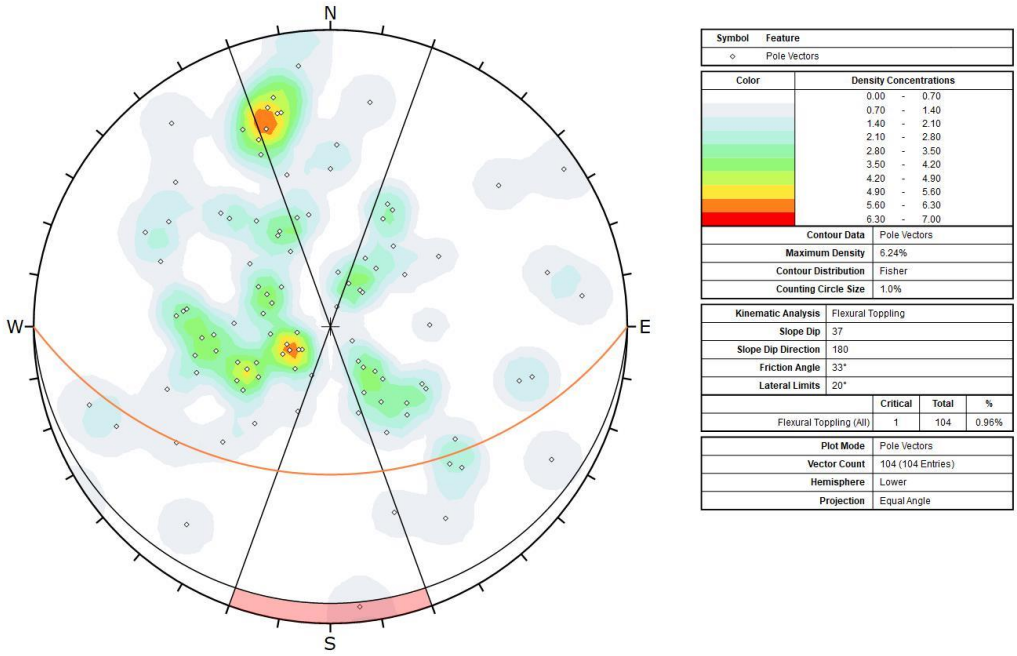
S1, S2 ve S5 sektörlerinde yapılan kinematik analizlerin sonuçlarına göre açık ocak mevcut şevlerinde devrilme türü duraysızlık beklenmemektedir (Şekil 4.30 – Şekil 4.31 – Şekil 4.32).



Şekil 4.30 S1 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi



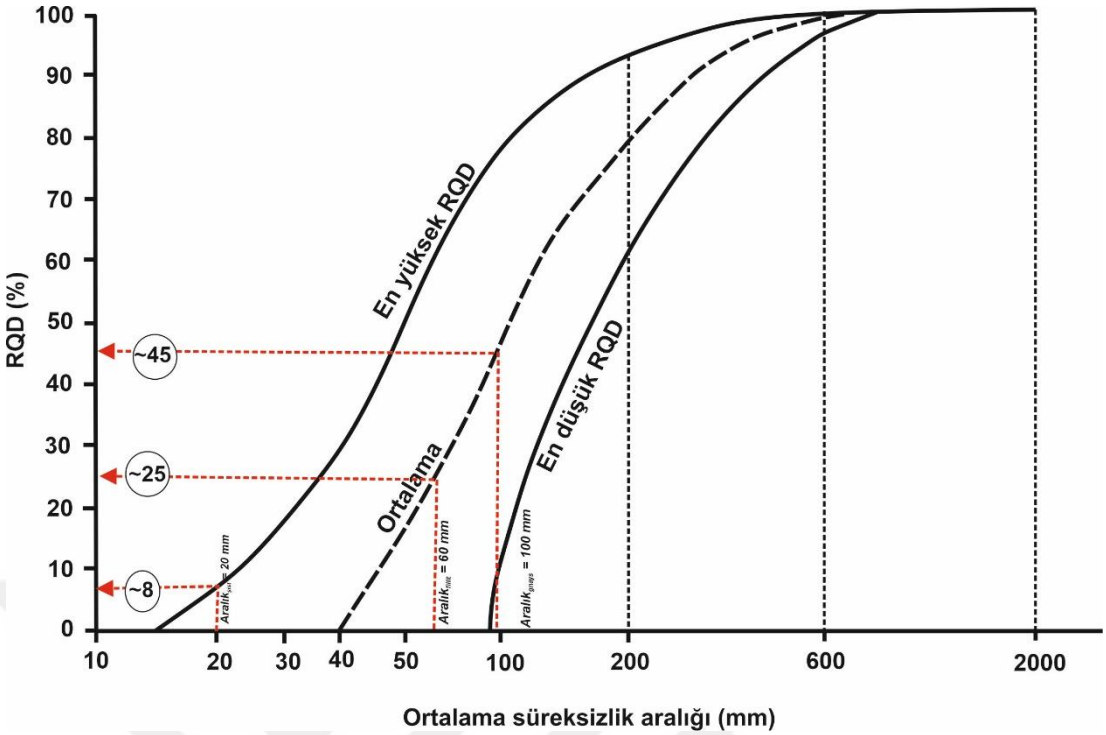
Şekil 4.31 S2 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi



Şekil 4.32 S5 için devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi

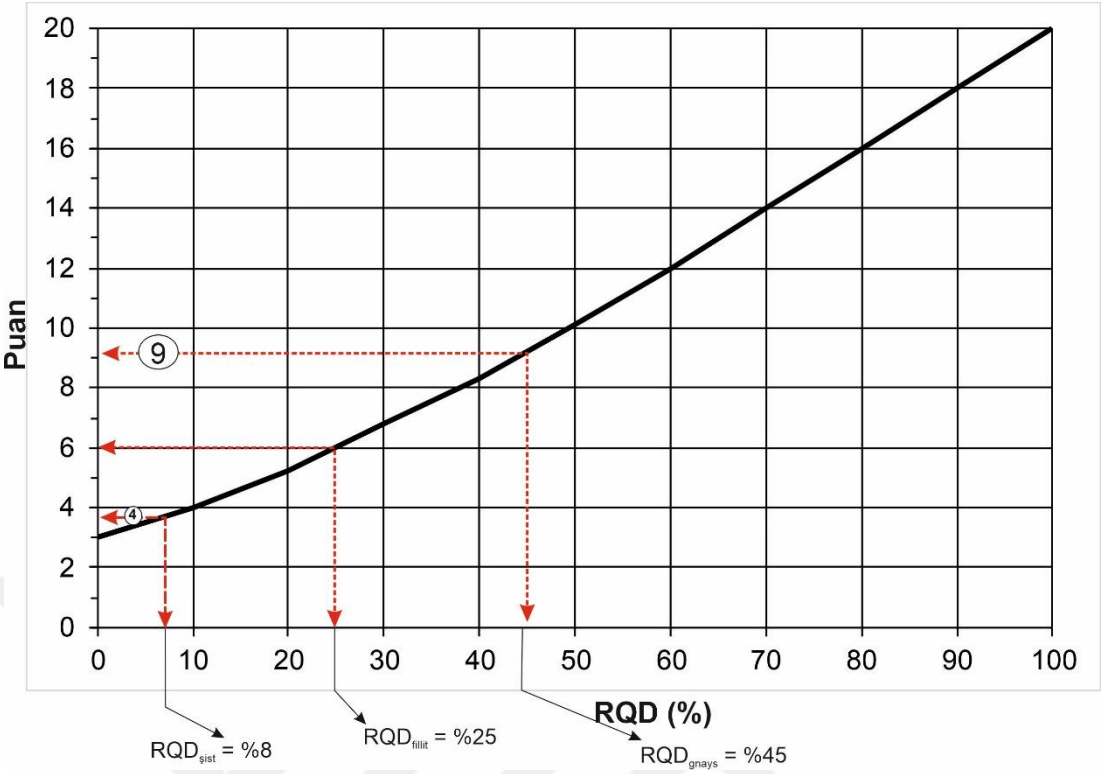
4.4 Kaya Kütle Özelliklerinin RMR Yöntemiyle Belirlenmesi

Çalışma sahasını oluşturan fillit, mikaşist ve gnays birimleri çok fazla metamorfizmaya uğradığından bu birimlerden RQD belirlemek için standartlara uygun karotlar almak mümkün olmamıştır. Bu birimlerin RQD değerini belirlemek için arazi çalışmaları sırasında belirlenen süreksizlik aralığı değerleri referans alınmıştır. Başka bir değişle, mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin RQD değerini belirlemek için süreksizlik hat etütleri çalışmaları sonuçlarından faydalanılmıştır (Şekil 4.33).

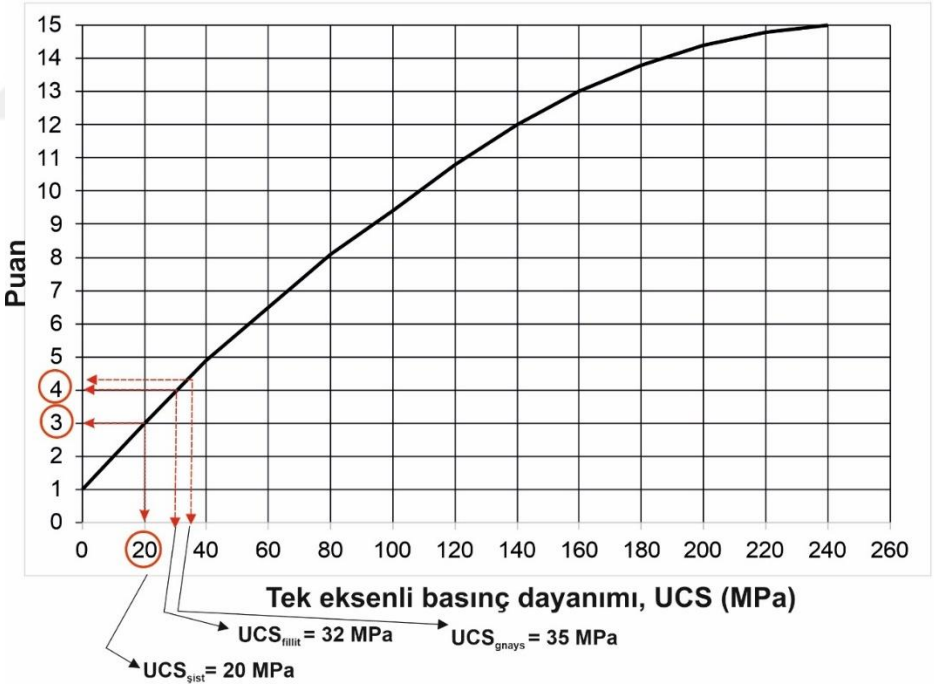


Şekil 4.33 Süreksizlik aralığı – RQD ilişkisi

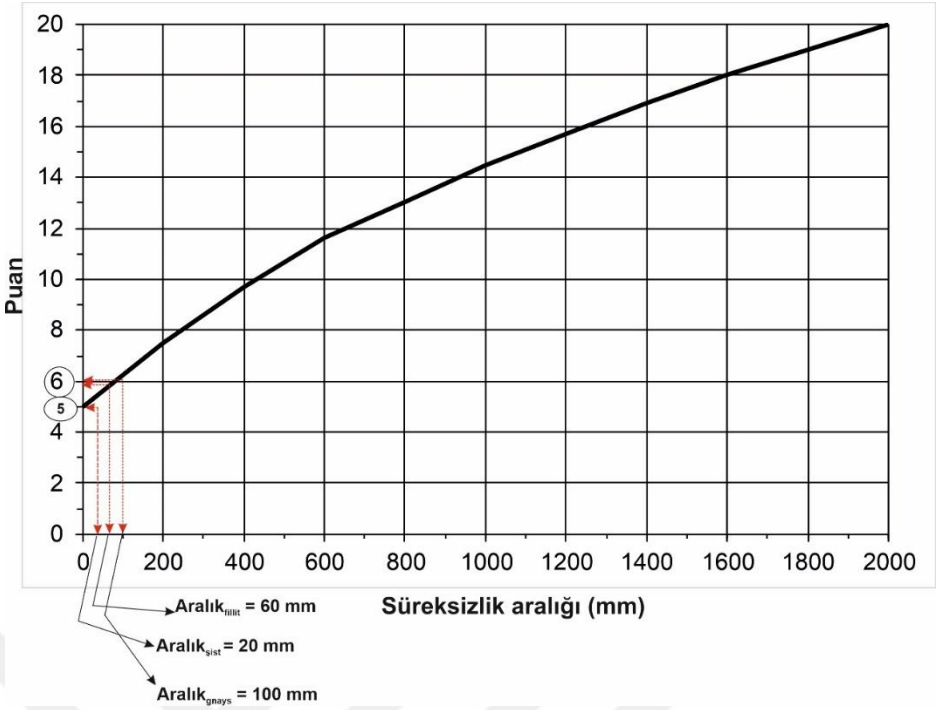
Fillit, mikaşişt ve gnays birimleri için grafik üzerinde RQD değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler için belirlenen RMR puanı ve yapılan puanlama Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı ve süreksizlik aralığı ölçümlerinin RMR puanları Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Yapılan RMR puanlamaları neticesinde fillit ve mikaşist birimlerinin nihai RMR değerleri ve kaya sınıflaması Tablo 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.34 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin RQD değerleri için hesaplanan RMR puanları



Şekil 4.35 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin tek eksenli basınç dayanımı değerleri için hesaplanan RMR puanları



Şekil 4.36 Mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin süreksizlik aralığı değerleri için hesaplanan RMR puanları

Yapılan RMR puanlaması neticesinde Tablo 4.5'te sunulduğu üzere, inceleme sahasında bulunan fillit, mikaşist ve gnays birimlerinin RMR puanları sırasıyla 45, 40 ve 52 olarak tespit edilmiştir. Bu puanlama sonucuna göre fillit ve gnays birimlerinin orta kaya kalitesinde, mikaşist biriminin ise zayıf kaya kalitesinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.5 Fillit, mikaşist ve gnays birimlerinin RMR puanları ve kaya sınıfları

		Fillit		**Mikaşist**		**Gnays**	
		Değer	RMR Puanı	Değer	RMR Puanı	Değer	RMR Puanı
	Kaya malzemesi dayanımı (MPa)	32	4	20	3	35	4
	Kayaç kalite göstergesi (RQD) (%)	25	6	8	4	45	9
	Süreksizlik aralığı (mm)	60	6	20	5	100	6
Süreksizlik Özellikleri	Devamlılık (m)	>20	0	>20	0	>20	0
	Açıklık (mm)	0,1-1.0	4	0,1-1.0	4	0,1-1.0	4
	Pürüzlülük	Az Pürüzlü	3	Az Pürüzlü	3	Az Pürüzlü	3
	Dolgu	Yok	6	Yok	6	Yok	6
	Bozunma	Az bozunmuş	5	Az bozunmuş	5	Az bozunmuş	5
	Yeraltısuyu durumu	Kuru	15	Kuru	15	Kuru	15
		Temel RMR puanı	45		40		52
		Kaya Sınıfı	Orta Kaya		Zayıf Kaya		Orta Kaya

4.5 Kaya Kütle Özelliklerinin Q Yöntemiyle Belirlenmesi

Çalışma sahasını oluşturan mikaşist, fillit ve gnays birimleri için Q sistemi kullanılarak kaya kütlelerinin özellikleri belirlenmiştir. Kaya kütlelerinin Q sistemine göre puanlamalarının yapılabilmesi için birimlerin; RQD değerleri (Şekil 4.37), eklem takım sayısı Jn (Şekil 4.38), eklem pürüzlülük sayısı Jr (Şekil 4.39), eklem alterasyon sayısı (Şekil 4.40), eklem suyu indirgeme faktörü Jw (Şekil 4.41), eklem indirgeme faktörü SRF (Şekil 4.42) kullanılmıştır. Çalışması sahası çok fazla tektonizmaya uğradığı için birimlerin RQD değeri %10'un üzerinde tespit edilememiştir ve yapılan Q puanlamalarında Şekil 4.37'de belirtildiği üzere puan olarak 10 puan alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler neticesinde mikaşist, fillit ve gnays için Q değerleri ve her bir birim için güvenli genel şev açısı (β) belirlenmiştir. Belirlenen Q değerleri sırasıyla; 0,033; 0,104 ve 0,208, β açıları ise sırasıyla; 35,45^{o}; 45,35^{o}; 51,37^{o}'dir. (Tablo 4.6). Birimlerin Q sistemine göre değerlendirilmesi ve β genel şev açıları Şekil 4.43'te sunulmuştur.

	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Çok kötü	0-25	*Q hesaplanırken RQD≤10 ise (0 dahil) 10 alınır. *RQD 5 ve katları olarak alınır
B	Kötü	26-50	
C	Orta	51-75	
D	İyi	76-90	
E	Mükemmel	91-100	

Şekil 4.37 Kaya kalitesinin (RQD) puanlanması

	Tanım	Değerlendirme	Not
	a) Kaya duvar kontağı, b) 10 cm lik kesmeden önce kaya duvar kontağı		*İlgili eklem takımlarının ortalama ara mesafesi 3 metreden büyükse 1.0 ilave edilir. *Lineasyon içeren düzlemsel fay aynalı eklemler için, lineasyonların uygun olması koşulu ile Jr=0.5 alınabilir. *B den G ye kadar olanlar küçük, diğerleri büyük yapılardır
A	Süreksiz eklemler	4	
B	Pürüzlü ya da düzensiz dalgalı	3	
C	Düz, dalgalı	2	
D	Sürtünme izli (slikensided) dalgalı	1.5	
E	Pürüzlü veya düzensiz düzlemsel	1.5	
F	Düz, düzlemsel (Mikaşist, Fillit, Gnays)	1	
G	Sürtünme izli, düzlemsel	0.5	
	c)Kesmeden sonra kaya duvar kontağı yok		
H	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kil mineralleri içeren zon	1	
J	Kaya duvar kontağını önleyebilecek kalınlıktaki kumlu, çakıllı, ezilmiş zon	1	

Şekil 4.38 Birimlerin eklem takım sayısının (Jn) puanlanması

	Tanım	Değerlendirme	Not
A	Masif, eklem çok az veya hiç yok	0.5-1	*Kesişme yerlerinde (3xJn) *Giriş ve çıkışlarda ağızlarında (2xJn) kullanılmalıdır
B	Bir eklem takımı	2	
C	Bir eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	3	
D	İki eklem takımı	4	
E	İki eklem takımı ve gelişigüzel eklemler	6	
F	Üç eklem takımı	9	
G	Üç eklem takımı ve gelişigüzel eklemler (Fillit, Gnays)	12	
H	Dört veya daha fazla eklem takımı, gelişigüzel çok sayıda eklemler, küp şeker görünümünde	15 (Mikaşist)	
J	Parçalanmış kaya, toprak görünümünde	20	

Şekil 4.39 Birimlerin eklem pürüzlülük sayısı (Jr)

	Tanım	Değerlendirme		Not
Kaya duvar kontağı		Değer	~ϕ_r	
A	Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz, geçirimsiz dolgu (öğneğin kuvars veya epidot)	0.75	-	*ϕ_r değerleri, eğer varsa alterasyon ürünlerinin mineralojik özelliklerini yaklaşık olarak göstermek için verilmiştir.
B	Altere olmamış eklem yüzeyleri, sadece yüzeysel paslanma	1	25°-35°	
C	Hafif altere olmuş eklem yüzeyleri, yumuşamayan mineral kaplamaları	2	25°-35°	
D	Siltli veya kumlu kil kaplamaları, düşük kil oranı (yumuşamayan)	3	20°-25°	
E	Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı (kaolinit, mika gibi). Ayrıcaklorit, talk, jips, grafit ve az miktarda şişen killer (1-2 mm veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar	4	8°-16°	
F	Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25°-30°	(Mikaşist, Fillit, Gnays)
G	Aşırı konsolide olmuş yumuşamayan kil mineral dolguları (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az)	6	16°-24°	
H	Orta ve yüksek derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az)	8	12°-16°	
J	Şişen kil dolgulu (örn. montmorillonit) (kesiksiz, kalınlık 5 mm'den az). Ja'nın değeri şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir	8-12	6°-12°	
b)Kaya duvar kontağı yok				
K	Dağılmış veya ezilmiş kaya ve kil zonları veya bantları	6, 8 veya 8-12	6°-24°	
L	Siltli veya kumlu kil zonları veya bantları, küçük kil parçaları (yumuşamayan)	5	-	
M	Sürekli, kalın kil zonları veya bantları (kilin tanımı için G,H, J şıklarına bakınız)	10, 13 veya 13-20	6°-24°	

Şekil 4.40 Birimlerin eklem alterasyon sayısının (Ja) puanlanması

	Tanım	Değerlendirme		Not
		Değer	Su basıncı (kg/cm²)	
A	Kuru kazılar veya su gelişi 5 lt/dk dan az (Mikaşist, Fillit, Gnays)	1	<1.0	*C den F ye kadar olan parametreler kaba tahminlerdir. Drenaj yapıldığında Jw arttırılmalıdır. *Buz içeren tabakalar olduğunda farklı problemlerle karşılaşılabilir ve burada göz önüne alınmamıştır.
B	Orta derece su gelişi veya basıncı, genellikle eklem dolgularının yıkanması (5 lt/dk yerel)	0.66	1-2.5	
C	Dolgusuz, dayanımlı ve eklemli kayada çok su gelişi veya yüksek su basıncı	0.5	2.5-10.0	
D	Çok miktarda su gelişi veya yüksek su basıncı ile eklem dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2.5-10.0	
E	Patlatma ile çok fazla su gelişi, zamanla azalma	0.2-0.1	>10.0	
F	Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya basıncı	0.1-0.05	>10.0	

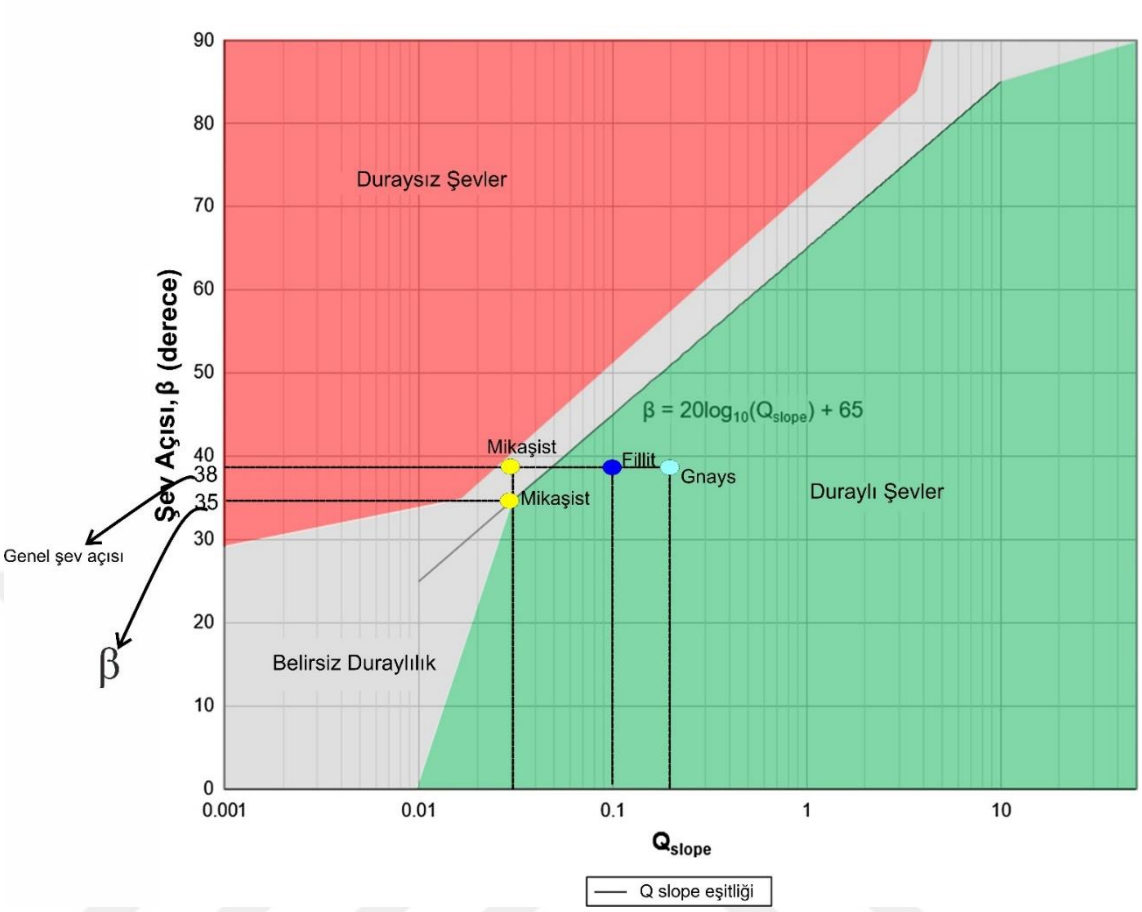
Şekil 4.41 Birimlerin eklem eklem suyu indirgeme faktörü (Jw) puanlanması

	Tanım			Değerlendirme	Not
a) Kazıyı kesen ve tünel kazılırken kaya kütlesinin gevşemesine neden olabilecek zayıflık zonları					*Kazıyı etkileyen fakat kesmeyen zayıflık zonu varsa SRF değerlerini % 25-50 azaltınız.
A	Kil veya kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık zonu, çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			10.0	
B	Kil ve kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği ≤50 m)			5.0	
C	Kil ve kimyasal olarak ayrışmış kaya kapsayan tek bir zayıflık zonu (kazı derinliği >50 m)			2.5	
D	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre kaya çok gevşek (herhangi bir derinlikte)			7.5	
E	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği ≤50m) (Mikaşist, Fillit, Gnays)			5.0	
F	Sağlam kayada çoklu makaslama zonları (kil yok), çevre (kazı derinliği >50m)			2.5	
G	Gevşek, açık eklemler, çok fazla eklemli veya küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)			5.0	
b) Sağlam kaya, kaya gerilme problemleri		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1		
H	Yüzeye yakın düşük gerilme	>200	>13	2.5	
J	Orta gerilme	200-10	13-0.66	1.0	
K	Yüksek gerilme (çok sıkı yapı)	10-5	0.66-0.33	0.5-2.0	
L	Orta şid. (masif) kaya patlaması	5-2.5	0.33-0.16	5-10	
M	Yüksek şid. (masif) kaya patlaması	<2.5	<0.16	10-20	
c)Sıkışan kaya,yüksek basınç altında sağlam olmaya kayanın plastik akışı					*Kazı derinliğinin kazı genişliğinden az olduğu durumlarda SRF yi 2.5 ten 5 e çıkartınız.
N	Orta miktarda sıkışan kaya basıncı			5-10	
O	Yüksek miktarda sıkışan kaya basıncı			10-20	
d) Şişen kaya; Suyun varlığına bağlı kimyasal şişme					
P	Orta miktarda şişen kaya basıncı			5-10	
R	Yüksek miktarda şişen kaya basıncı			10-15	

Şekil 4.42 Birimlerin eklem eklem indirgeme indirgeme faktörü (SRF) puanlanması

Tablo 4.6 Birimlerin Q değeri ve β genel şev açıları

	Mikaşist	**Fillit**	**Gnays**
RQD	10	25	50
J_n	15	12	12
J_r	1	1	1
J_a	4	4	4
J_w	1	1	1
SRF	5	5	5
Q değeri $Q = (RQD / J_n) * (J_r / J_a) * (J_w / SRF)$	0,033	0,104	0,208
$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65$	35,45°	45,35°	51,37°



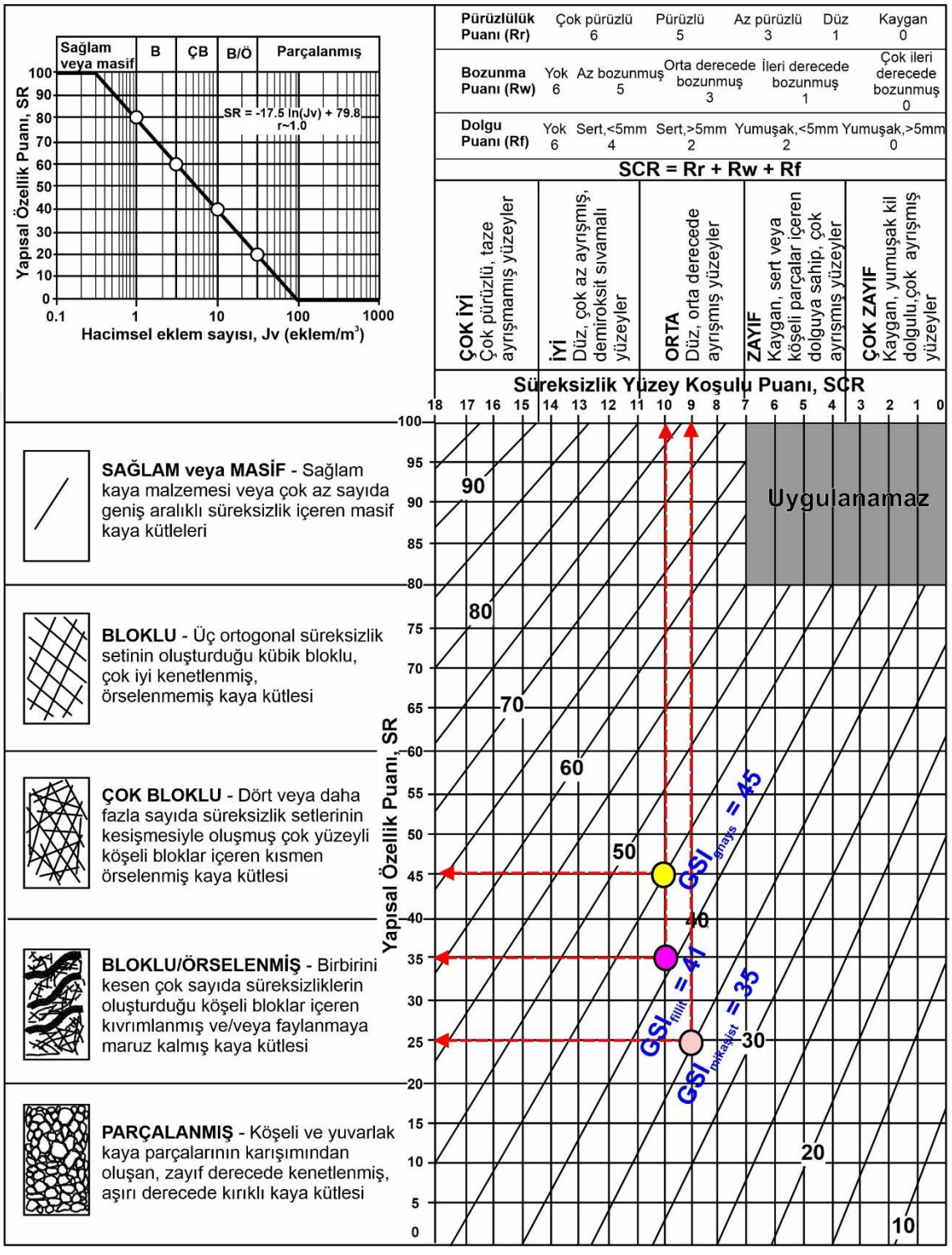
Şekil 4.43 Birimlerin Q sistemine göre değerlendirilmesi ve β genel şev açılarının grafik üzerinde gösterilmesi

4.6 Kaya Kütle Makaslama Dayanımının Geri Analizler ile Belirlenmesi

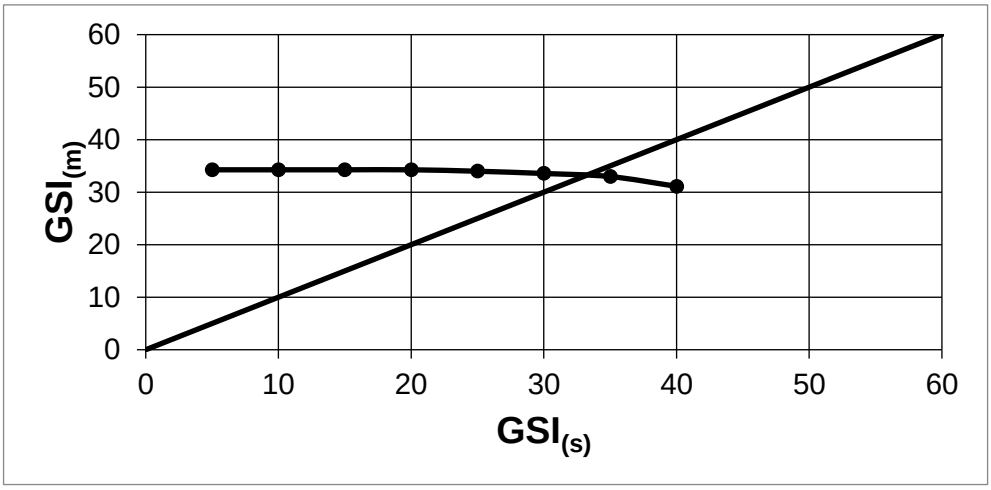
Yapılan süreksizlik hat etütleri neticesinde elde edilen arazi verileri ve Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı kullanılarak arazi GSI değerleri belirlenmiştir. GSI değerleri belirlenirken süreksizlik yüzey koşulu (SCR) ve yapısal özellik puanı (SR) değerlerinden yararlanılmıştır. Yapısal özellik puanı (SR) hacimsel eklem sayısı (Jv) ile belirlenirken, süreksizlik yüzey koşulu (SCR) ise profilometre ölçümleri neticesinde elde edilen yüzey pürüzlülük derecesi, bozunma puanı ve dolgu puanlarının toplamı olarak belirlenmektedir.

SR ve SCR hesaplamaları sonucunda, fillit, mikaşist ve gnyas için hesaplanan GSI değerleri sırasıyla 41, 35, 45 olmuştur (Şekil 4.44). Yapılan geri analizler kapsamında mi değerleri Hoek vd. (2000) tarafından fillit için önerilen 8, mikaşist için önerilen 10, gnays için önerilen 28 seçilmiştir. Örselenme faktörü (D) ise 0.9 olarak seçilmiştir. Yapılan geri analizler sonucunda Şekil 4.45'de sunulduğu üzere fillit

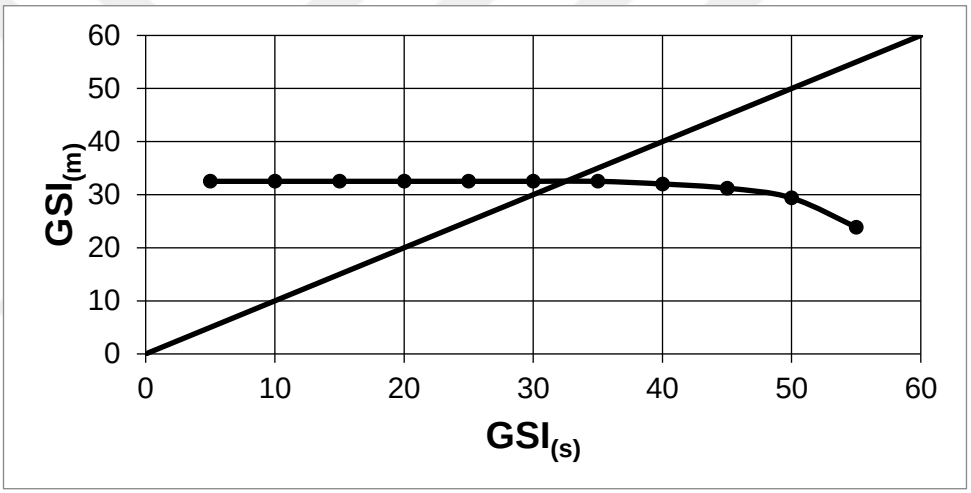
biriminin GSI_{RM} değeri 35, mikaşist biriminin GSI_{RM} değeri 32 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.46)



Şekil 4.44 Mikaşist, fillit ve gnays birimleri için arazi verileri neticesinde kantitatif GSI abağı ile belirlenen GSI değerleri (Sonmez ve Ulusay, 2002)



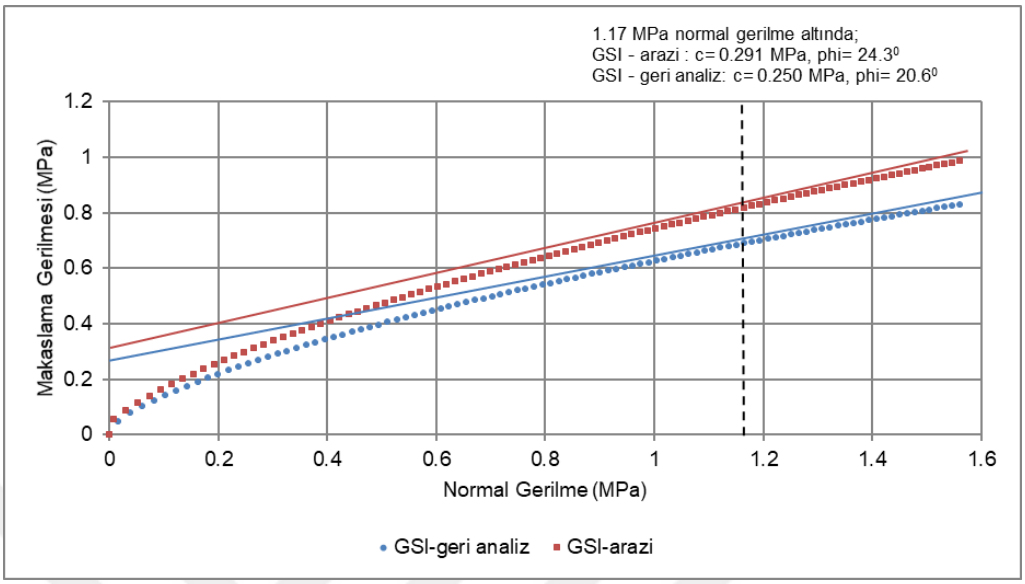
Şekil 4.45 Geri analizler neticesinde fillit birimi için elde edilen $GSI_{(s)}$ – $GSI_{(m)}$ grafiği



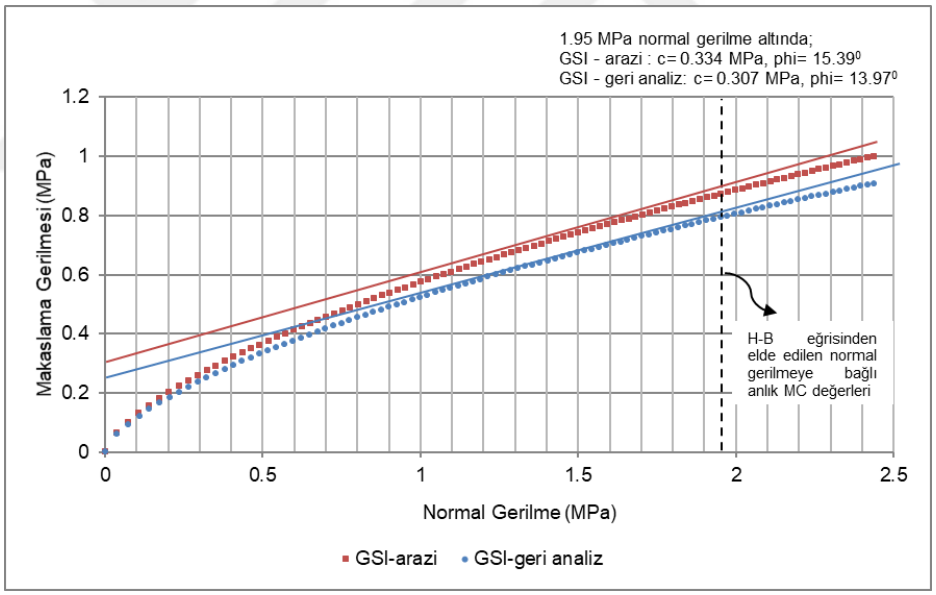
Şekil 4.46 Geri analizler neticesinde mikaşist birimi için elde edilen $GSI_{(s)}$ – $GSI_{(m)}$ grafiği

Fillit biriminde yenilme yüzeyine etkiyen normal gerilme altında, arazi değerlendirmeleri sonucunda elde edilen GSI (41) değerine göre ve geri analizler neticesinde elde edilen GSI (35) değerine göre eşitlik 3.8 ve eşitlik 3.9'da verilen formüller kullanılarak materyal sabitleri hesaplanmıştır (Tablo 4.8). Şist biriminde ise normal gerilme koşulları altında arazi GSI değeri (35) ve geri analizlerden elde edilen GSI (32) değerine göre eşitlik 3.8 ve eşitlik 3.9 kullanılarak materyal sabitleri belirlenmiştir (Tablo 4.9). Yenilme yüzeyine etkiyen normal gerilme değerleri 1,17 MPa (fillit) ve 1,95 MPa (şist) olarak hesaplanmıştır. Normal gerilme değerleri, yenilme yüzeyi üzerindeki kaya kütlesinin kalınlığına ve kaya malzemesinin birim hacim ağırlığına göre belirlenmiştir. Arazi ve geri analiz GSI değerlerine göre iki farklı kaya birimi için çizilen Hoek – Brown yenilme zarfları Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de

gösterilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere arazi çalışmaları ile geri analiz verileri sonucunda elde edilen makaslama dayanımları yakın değerler sunmaktadır.



Şekil 4.47 Fillit birimi için çizilen Hoek – Brown yenilme zarfı



Şekil 4.48 Mikaşist birimi için çizilen Hoek – Brown yenilme zarfı

Tablo 4.7 Fillit birimi arazi verileri ve geri analiz yöntemiyle hesaplanan kaya kütlesi dayanım parametreleri

Arazi Verilerine Göre Belirlenen Dayanım Parametreleri		**Geri Analiz Yöntemiyle Belirlenen Dayanım Parametreleri**	
GSI	41	GSI	35
m_b	0,173	m_b	0,121
s	8.566e-005	s	2.053e-005
a	0,511	a	0,520
c	0,291 MPa	c	0,250 MPa
ϕ	24,3^o	ϕ	20,6^o

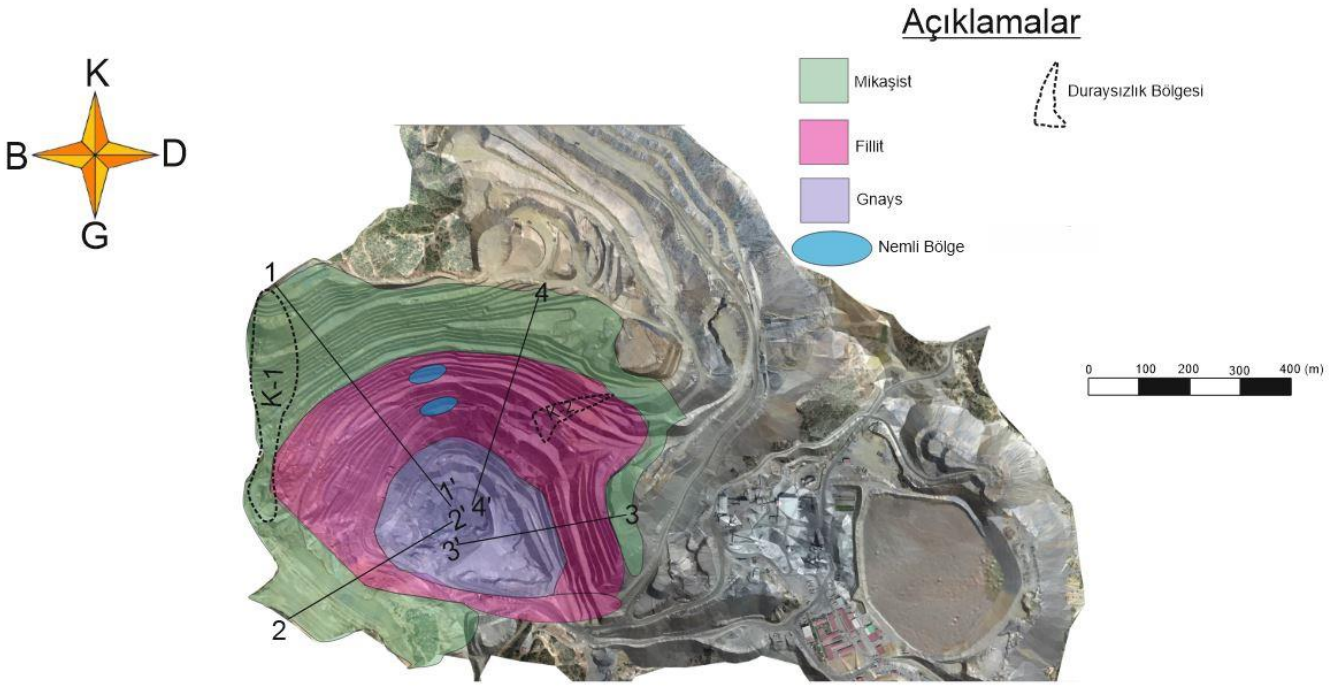
Tablo 4.8 Mikaşist birimi arazi verileri ve geri analiz yöntemiyle hesaplanan kaya kütlesi dayanım parametreleri

Arazi Verilerine Göre Belirlenen Dayanım Parametreleri		**Geri Analiz Yöntemiyle Belirlenen Dayanım Parametreleri**	
GSI	35	GSI	32
m_b	0,147	m_b	0,117
s	3.305e-005	s	3.305e-005
a	0,516	a	0,515
c	0,334 MPa	c	0,307 MPa
ϕ	15,39^o	ϕ	13,97^o

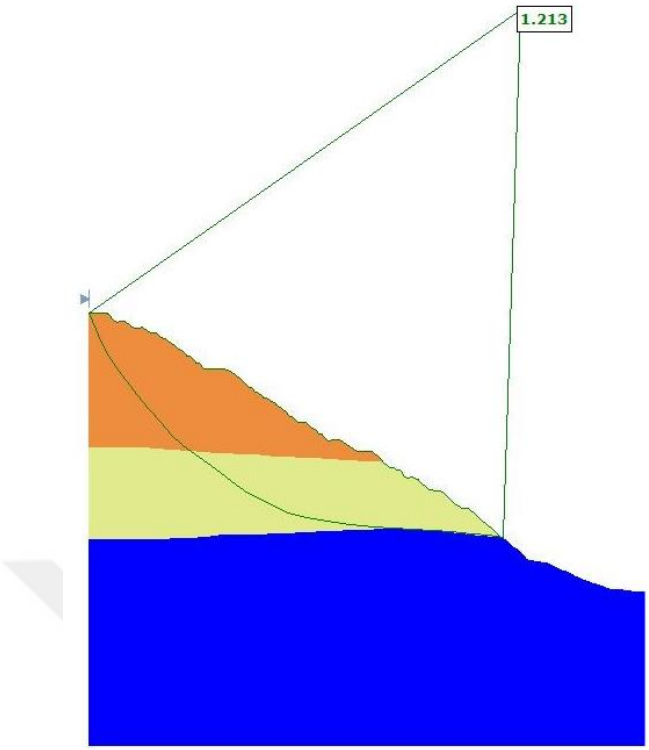
4.7 İki Boyutlu (2B) Limit Denge Analizleri ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Duraylılık Analizleri

Çalışmanın yürütüldüğü esnada Avnik (Bingöl) açık ocak demir işletmesinin mevcut derinliği 333 metredir. Açık ocak işletmesinde şev genişlikleri 3 m, şev yükseklikleri ise 6 m'dir. Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerden Şekil 4.49'da gösterilen kesitler alınmış ve bu kesitler üzerinde Slide 2 (Rocscience Inc., 2020a) ve RS 2 (Rocscience Inc., 2020d) yazılımları kullanılarak limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile şev duraylılık analizleri yapılmıştır.

Limit denge analizlerinde, geri analizler kapsamında elde edilen kaya kütlelerinin makaslama dayanım parametreleri kullanılmıştır. Limit denge analizlerinde her bir kesit için Bishop (1955), basitleştirilmiş Janbu (1973), Morgenstern – Price (1965) ve Spencer (1967) yöntemi kullanılarak minimum güvenlik katsayıları elde edilmiştir (Şekil 4.50 – Şekil 4.53).

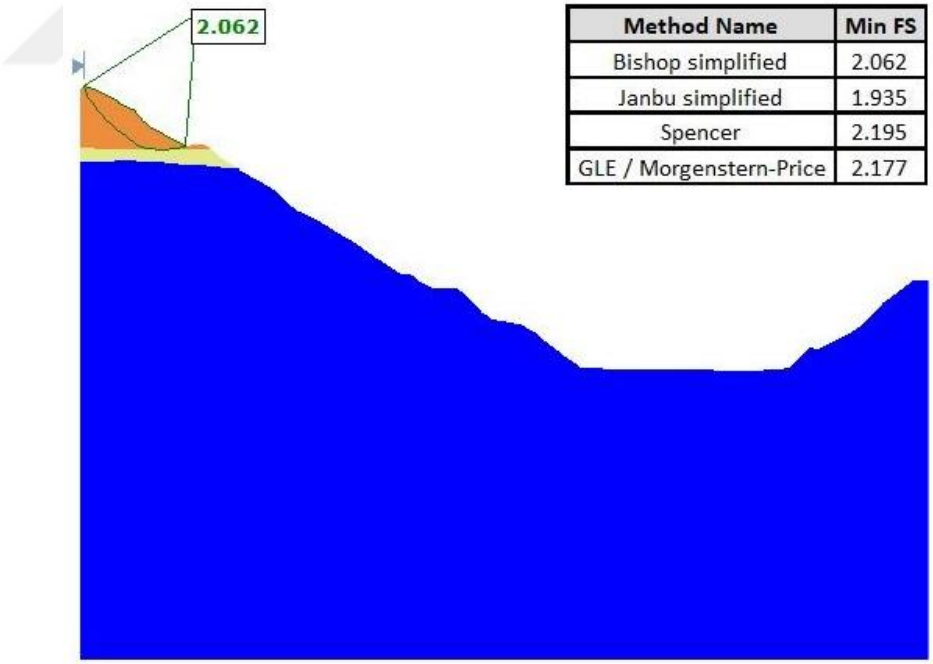


Şekil 4.49 Limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yönteminde kullanılan kesitler



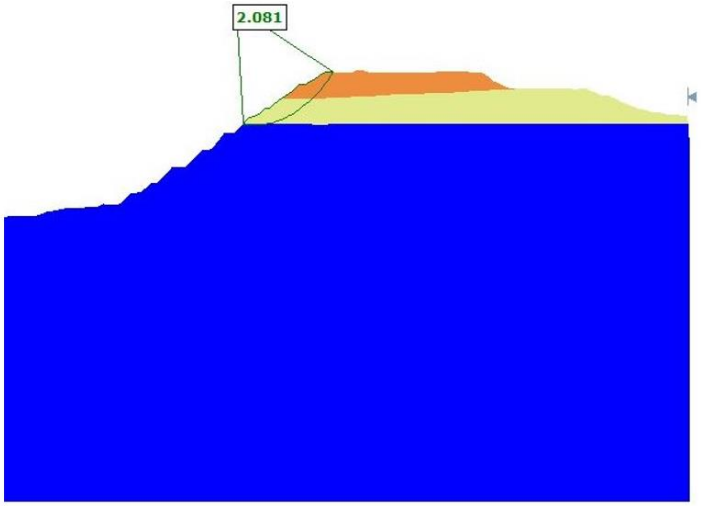
Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.213
Janbu simplified	1.139
Spencer	1.225
GLE / Morgenstern-Price	1.222

Şekil 4.50 1-1’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları



Method Name	Min FS
Bishop simplified	2.062
Janbu simplified	1.935
Spencer	2.195
GLE / Morgenstern-Price	2.177

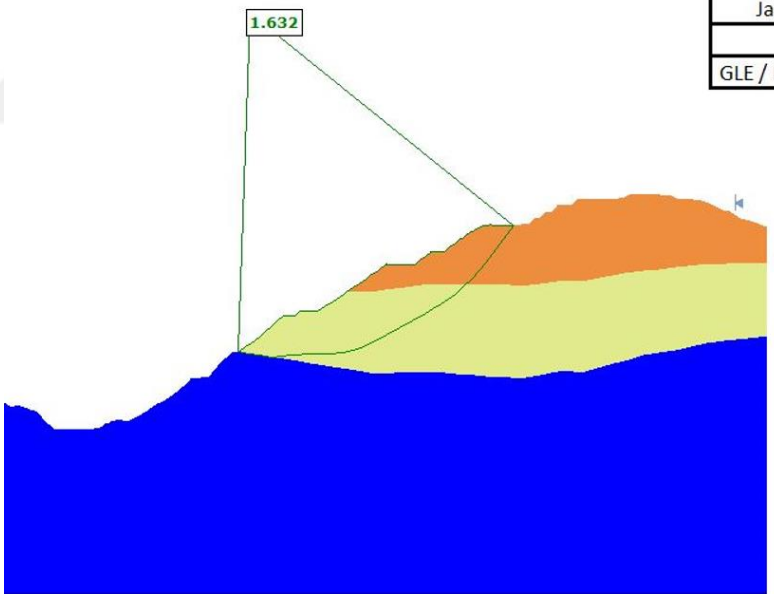
Şekil 4.51 2-2’ kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları



Method Name	Min FS
Bishop simplified	2.081
Janbu simplified	1.964
Spencer	2.114
GLE / Morgenstern-Price	2.108

Şekil 4.52 3-3' kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları

Method Name	Min FS
Bishop simplified	1.632
Janbu simplified	1.539
Spencer	1.663
GLE / Morgenstern-Price	1.645

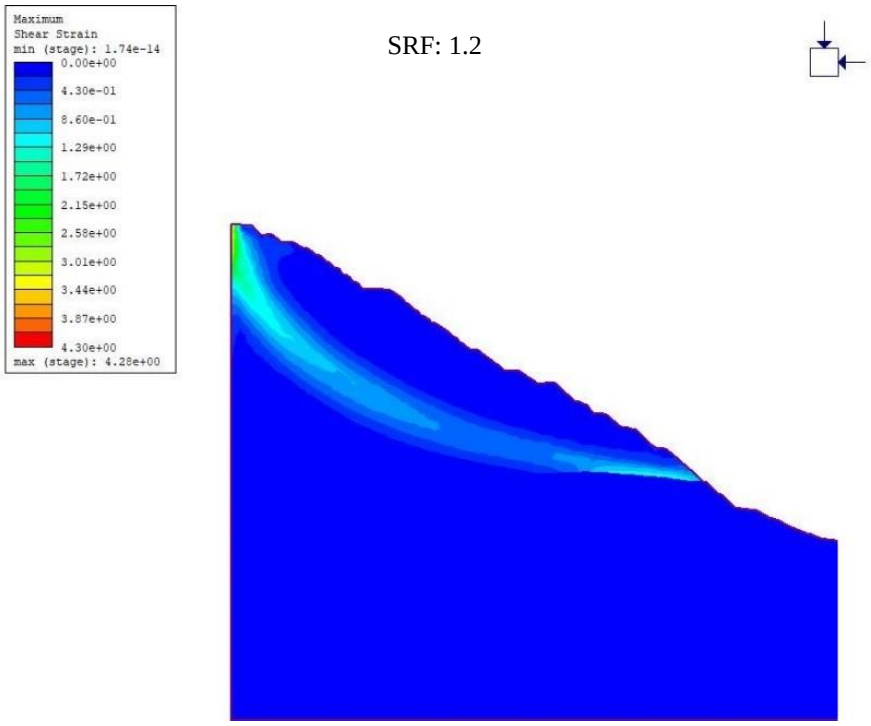


Şekil 4.53 4-4' kesiti üzerinde limit denge analizi sonucunda elde edilen minimum güvenlik katsayıları

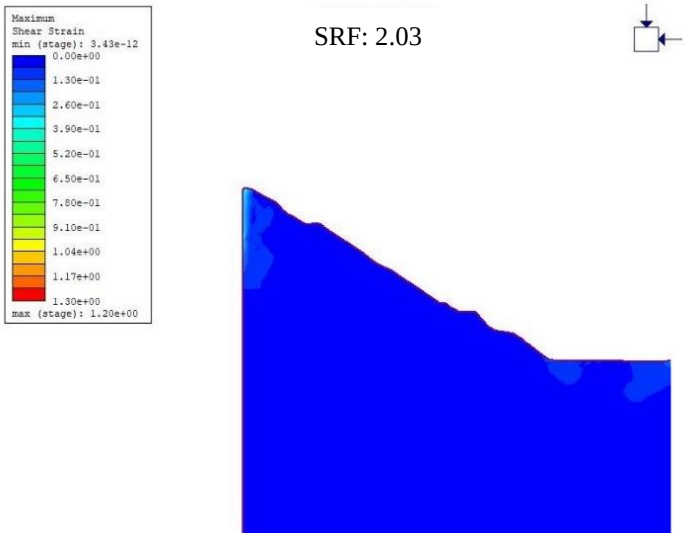
Kesitler üzerinde yapılan analizler incelendiğinde basitleştirilmiş Janbu yöntemi ile yapılan analizlerde düşük güvenlik katsayıları elde edilirken Spencer yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde daha yüksek güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Birçok araştırmacı da bu konuda çalışmalar yürütmüş ve neticede Morgenstern – Price ve Spencer yöntemi kullanılarak yapılan analizlerin gerçeğe daha

yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır (Hammouri vd., 2008; Kadakci Koca ve Koca, 2020; Nasvi ve Krishnya, 2019).

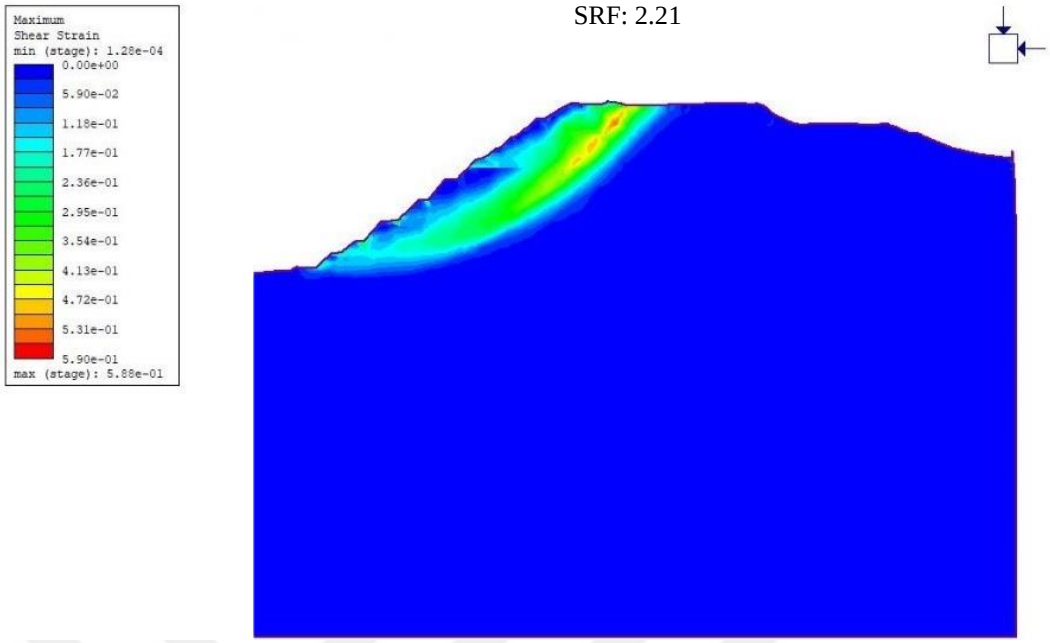
Sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge analizleri ile kesitler üzerinde gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen minimum güvenlik katsayıları ve SRF değerleri Tablo 4.9'da sunulmuştur. Tablo 4.9'da da görüldüğü üzere sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen değerler ile limit denge analizleri ile elde edilen değerler uyum içerisindedir.



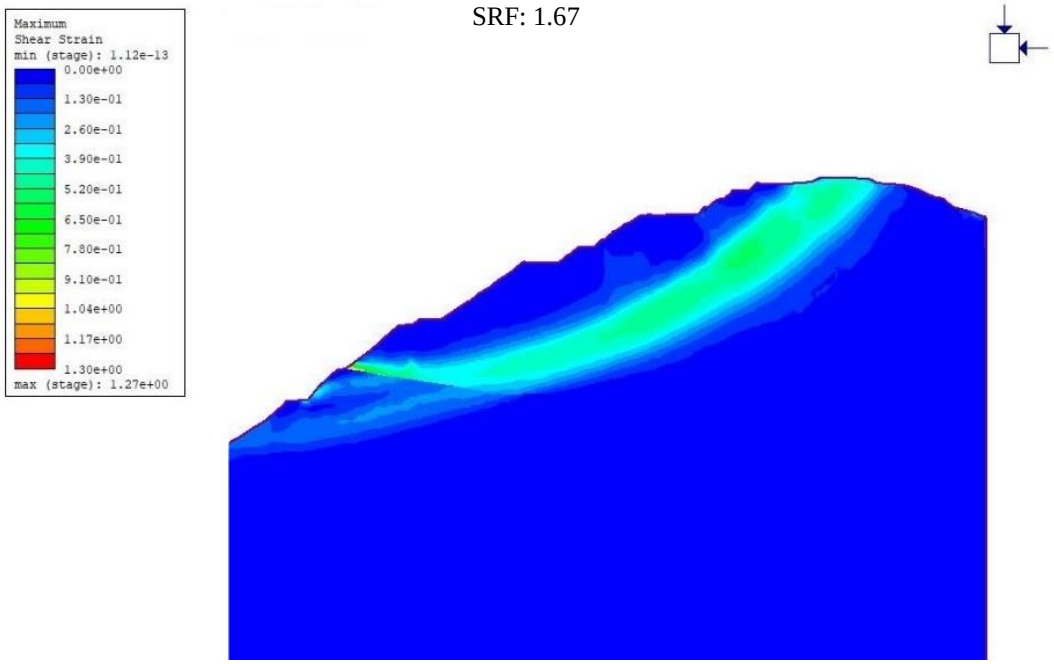
Şekil 4.54 1-1' kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı



Şekil 4.55 2-2' kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı



Şekil 4.56 3-3' kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı



Şekil 4.57 4-4' kesiti üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayısı

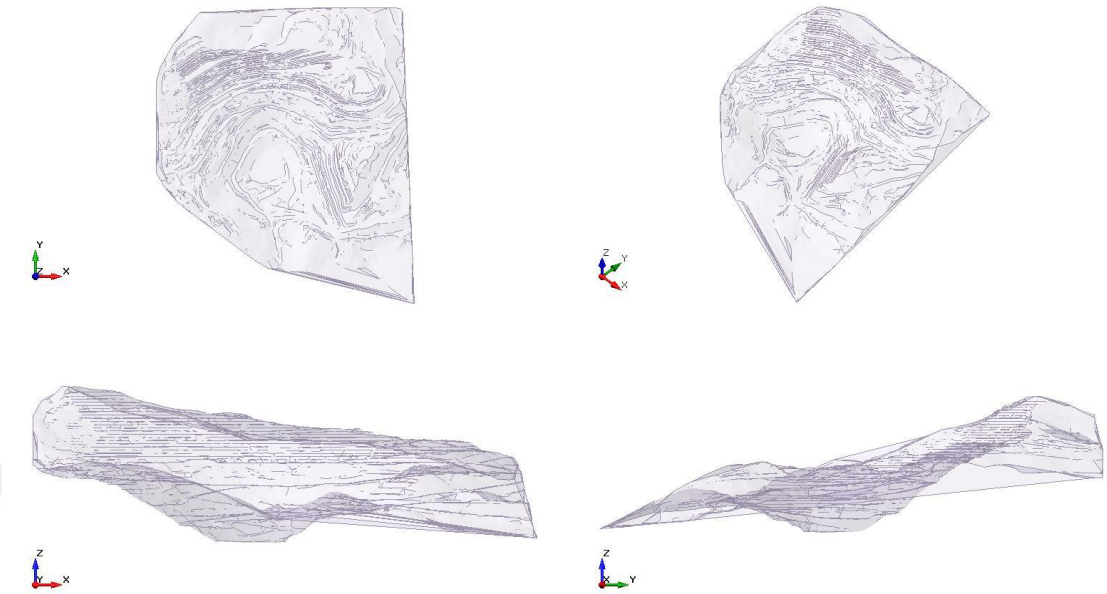
Tablo 4.9 Kesitler üzerinde yapılan limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları

Analiz Yöntemi	1-1' Kesiti	2-2' Kesiti	3-3' Kesiti	4-4' Kesiti
Bishop	1,213	2,062	2,081	1,632
GLE / Morgenstern-Price	1,222	2,177	2,108	1,645
Janbu	1,139	1,935	1,964	1,539
Spencer	1,225	2,195	2,114	1,665
SRF	1,2	2,03	2,21	1,67

4.8 Üç Boyutlu (3-B) Limit Denge Analizleri ile Şev Duraylılığının Dinamik ve Statik Koşullarda Belirlenmesi

Gelişen teknoloji ve bilgisayar yazılımları ile limit denge analizleri 3-boyutta yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında Avnik (Bingöl) açık ocak işletmesinin insansız hava aracı (İHA) ile alınan nokta bulutundan arazi sayısal modeli 3-boyutlu olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.58). Oluşturulan arazi modeli üzerine birimler atanmış ve hem statik hem de dinamik koşullarda 3-boyutlu limit denge analizleri yapılmıştır (Şekil 4.59 - Şekil 4.66). Yapılan 3-boyutlu analiz sonuçlarına göre elde edilen güvenlik katsayıları ile 2-boyutlu analizler (sonlu elemanlar ve limit denge analizleri) neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.67). 3 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayısı değerleri Tablo 4.10'da sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre en düşük güvenlik katsayısı değeri Janbu yöntemi ile elde edilirken en yüksek güvenlik katsayısı değeri Spencer yöntemi ile elde edilmiştir. Tablo 4.10'da sunulan 0,307 g deprem yükü etkisi altında yapılan analizlerde görüleceği üzere dinamik yüklerin etkisi altında açık ocak işletmesinde bulunan şevlerde duraylılık sorunları meydana gelecektir. 2 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları genellikle 3 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarından ortalama olarak %25 düşük olmaktadır (McQuillan vd., 2021). Çalışma kapsamında yapılan 2 boyutlu ve 3 boyutlu limit denge analizleri sonuçları incelendiğinde, 2 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarının 3 boyutlu analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarından %13 daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu değerin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. 2 boyutlu ve 3 boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları arasındaki fark kaya kütlesi anizotropik olduğunda ve şevi sınırlayan geometriler içerdiğinde daha da artmaktadır. Bu durum

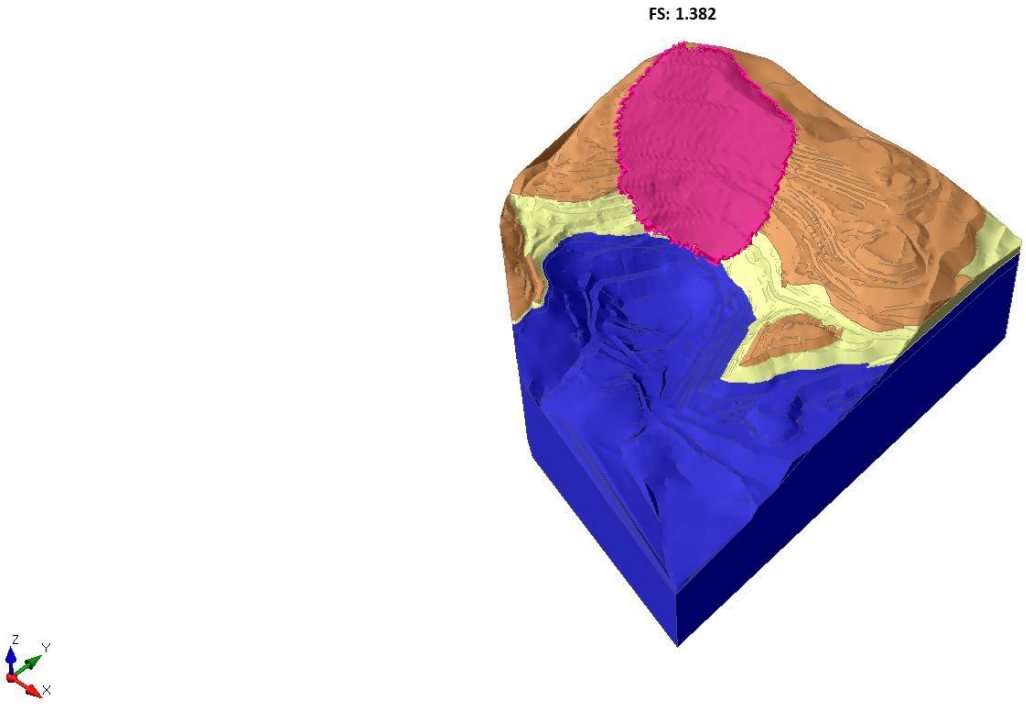
3 boyutlu analizler ile daha gerçekçi bir kayma yüzeyinin ortaya konulmasını sağlamaktadır (Bar ve McQuillan, 2018; Bar ve Weekes, 2017; McQuillan vd., 2021).



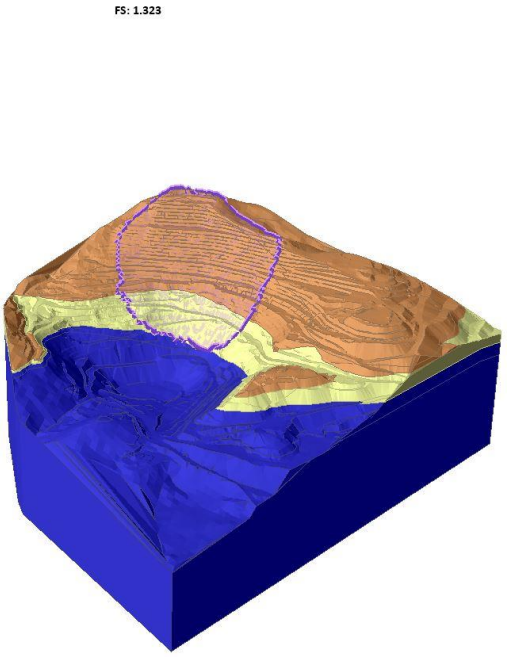
Şekil 4.58 İHA nokta bulutundan oluşturulan 3-boyutlu arazi modeli

Tablo 4.10 3- Boyutlu model üzerinde statik ve deprem etkisi altında elde edilen minimum güvenlik katsayısı değerleri

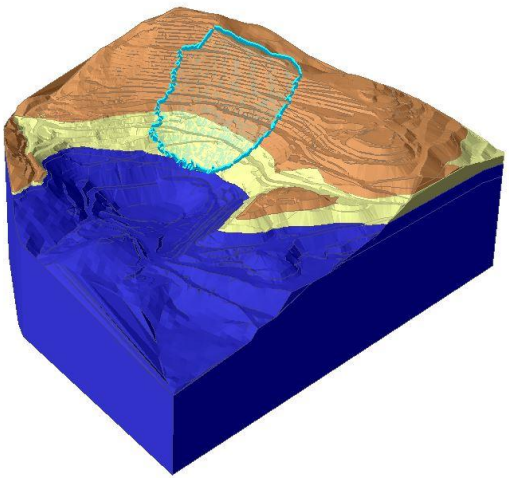
Analiz Yöntemi	**Güvenlik Katsayısı (Statik Durum)**	**Güvenlik Katsayısı (0.307 g deprem etkisi altında)**
Bishop	1,382	0,799
GLE / Morgenstern-Price	1,402	0,814
Janbu	1,323	0,752
Spencer	1,423	0,835



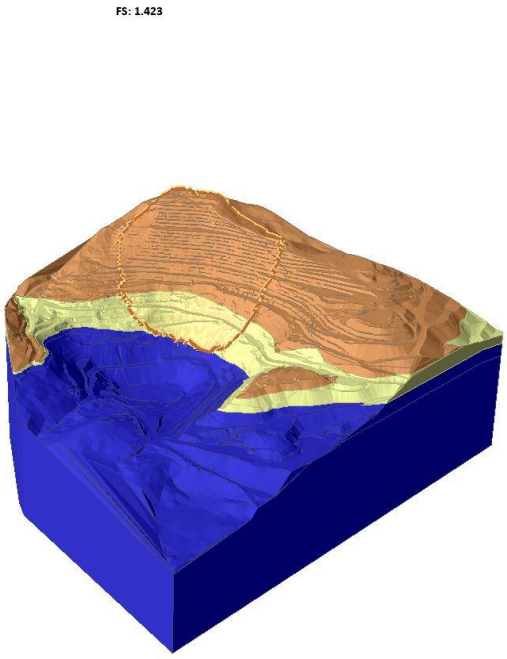
Şekil 4.59 Statik koşullarda Bishop analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi



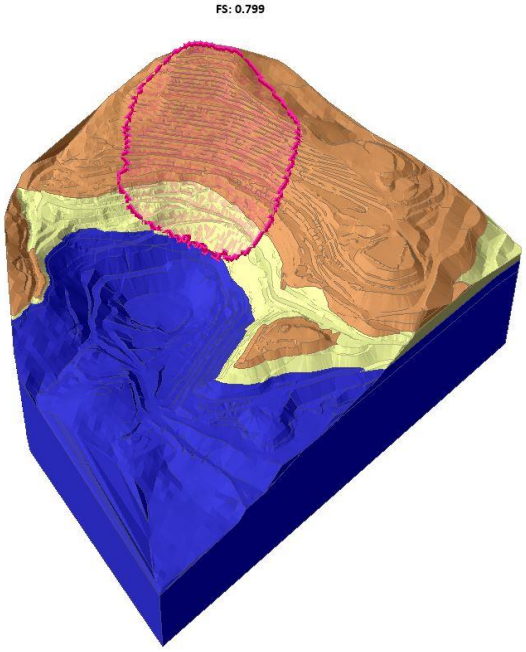
Şekil 4.60 Statik koşullarda Janbu analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi



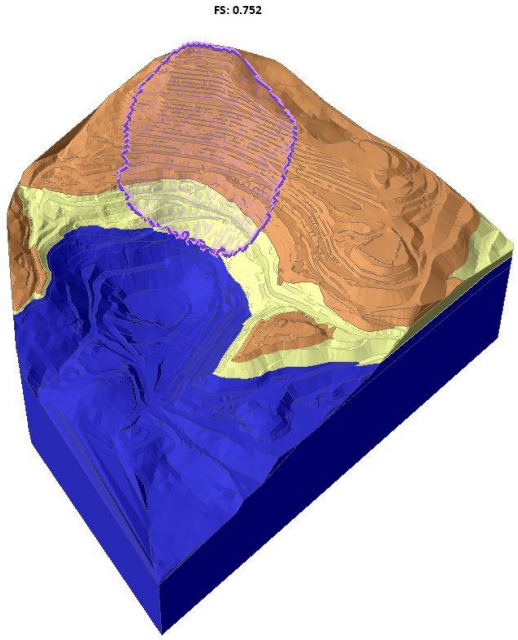
Şekil 4.61 Statik koşullarda Morgenstern-Price analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi



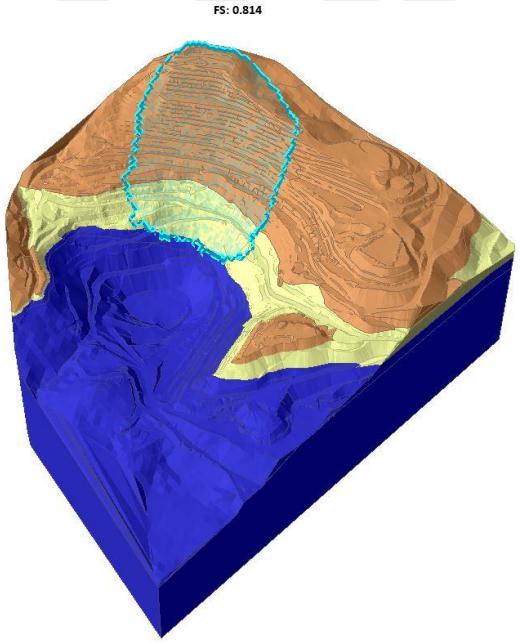
Şekil 4.62 Statik koşullarda Spencer analiz yöntemiyle gerçekleştirilen 3-boyutlu limit denge analizi



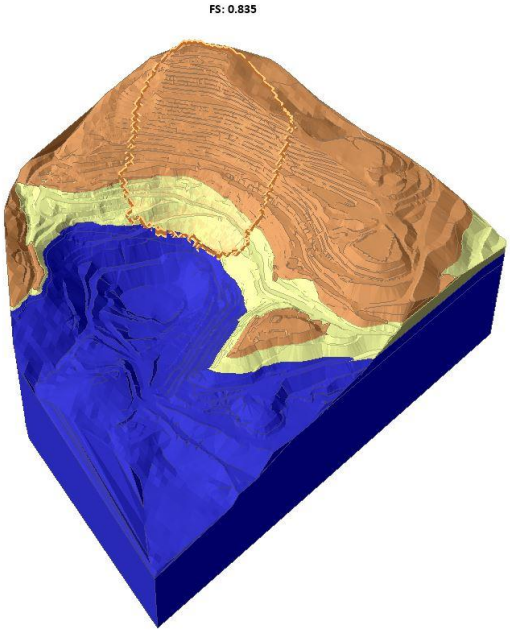
Şekil 4.63 0,307 g deprem yükü altında Bishop analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi



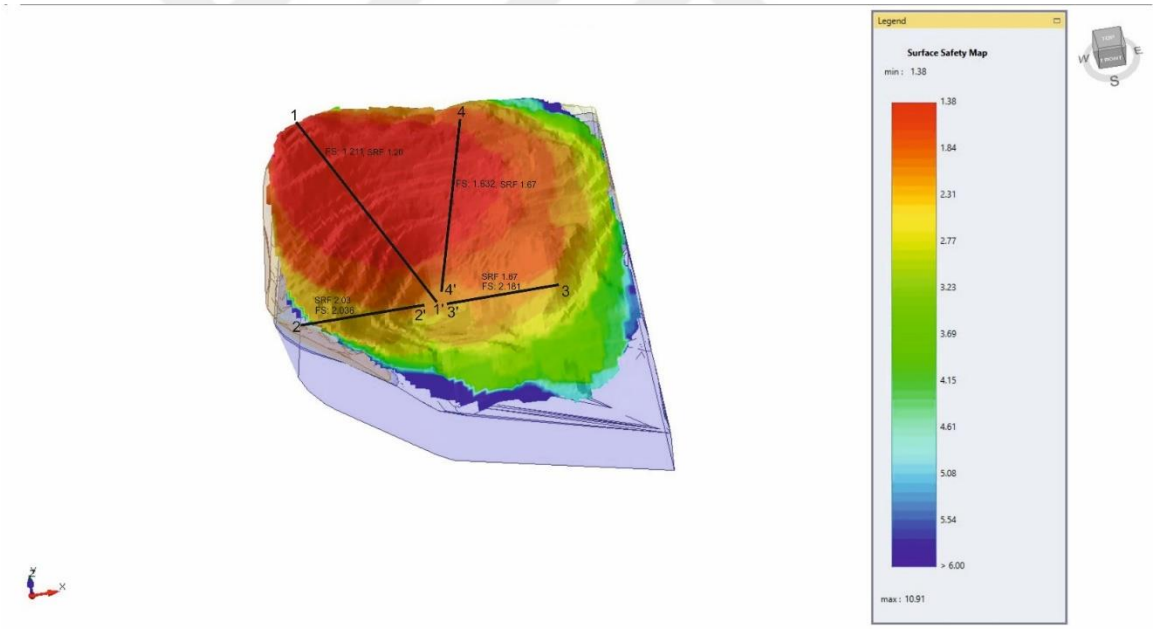
Şekil 4.64 0,307 g deprem yükü altında Janbu analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi



Şekil 4.65 0,307 g deprem yükü altında Morgenstren-Price analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi



Şekil 4.66 0,307 g deprem yükü altında Spencer analiz yöntemi ile yapılan limit denge analizi

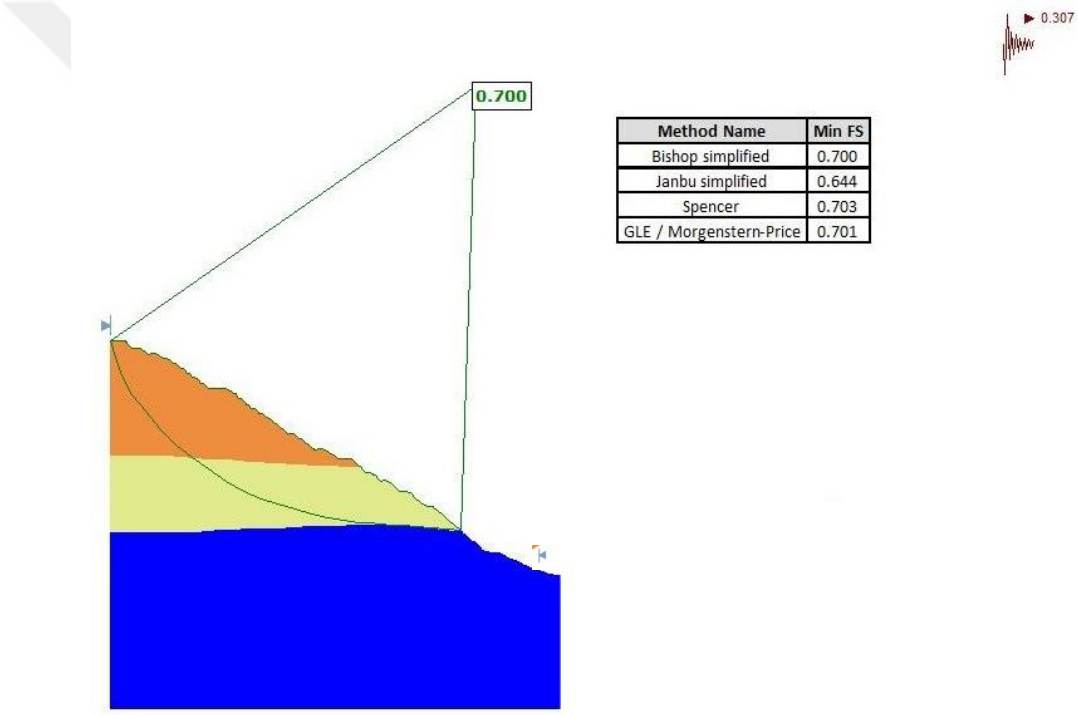


Şekil 4.67 Limit denge analizi ve sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen güvenlik katsayıları ile 3 boyutlu limit denge analizi neticesinde elde edilen güvenlik katsayılarının karşılaştırılması

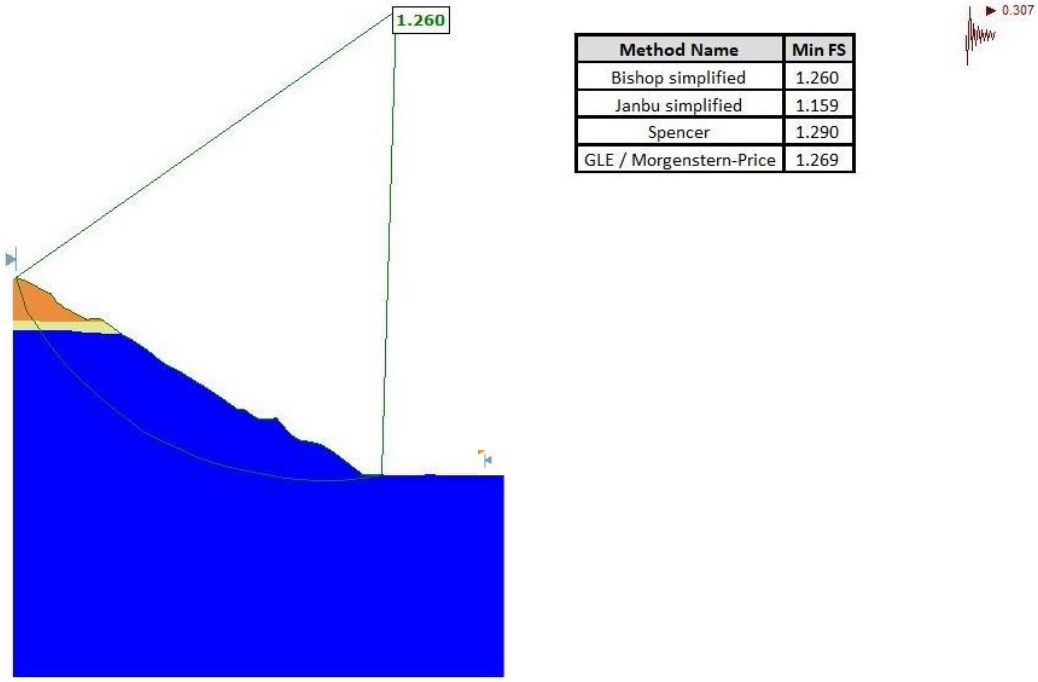
4.9 Pseudostatik Duraylılık Analizleri

Çalışma alanını oluşturan Bingöl (Avnik) açık ocak demir işletmesi sismik olarak oldukça aktif olan Doğu Anadolu Fay Hattı ve Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde bulunmaktadır. Bu sebeple işletmede bulunan şevlerin duraylılık durumlarının depremli durumda incelenmesi önem arz etmektedir. Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerden alınan kesitler üzerinde hem sonlu elemanlar yöntemi

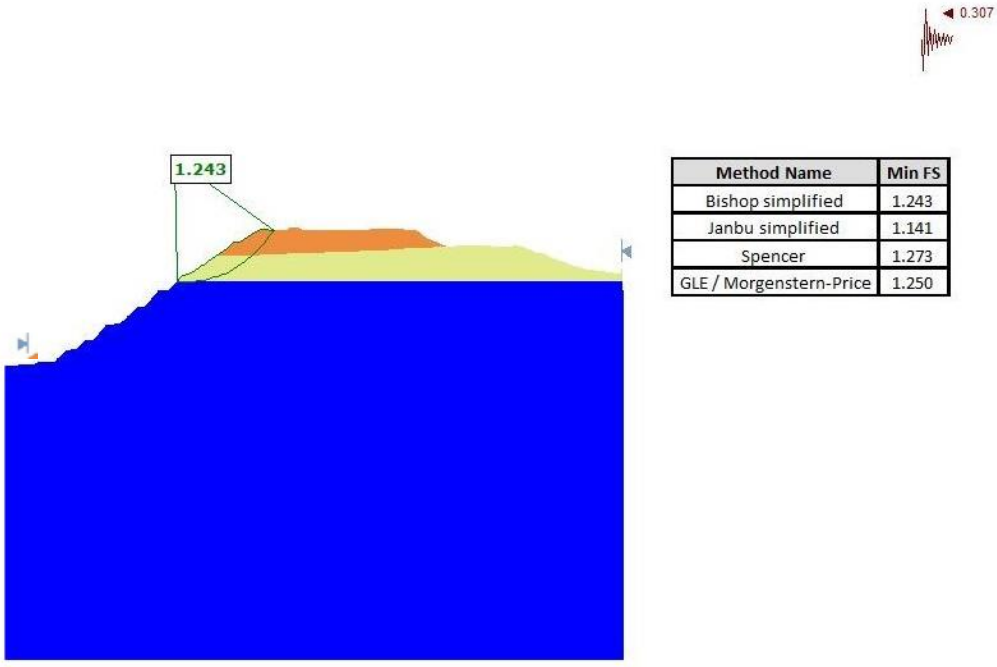
ile hem de limit denge analiz yöntemiyle pseudostatik analizler yapılmıştır. Pseudostatik analizler Hynes – Griffin ve Franklin (1984) tarafından önerilen maksimum yatay ivmenin (0,614 g) yarısı (0,307 g) seçilerek yapılmıştır (Hynes-Griffin ve Franklin, 1984). Kesitler üzerinde yapılan limit denge analizleri Şekil 4.68 - Şekil 4.71 arasında, kesitler üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler ise Şekil 4.72 – Şekil 4.75 arasında gösterilmiştir. Kesitlerden elde edilen güvenlik katsayıları Tablo 4.11'de sunulmuştur. Hem limit denge yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analiz sonuçlarına göre şevlerde oluşabilecek 0,307 g bir etki şevlerin duraylılığını önemli derecede etkileyecektir.



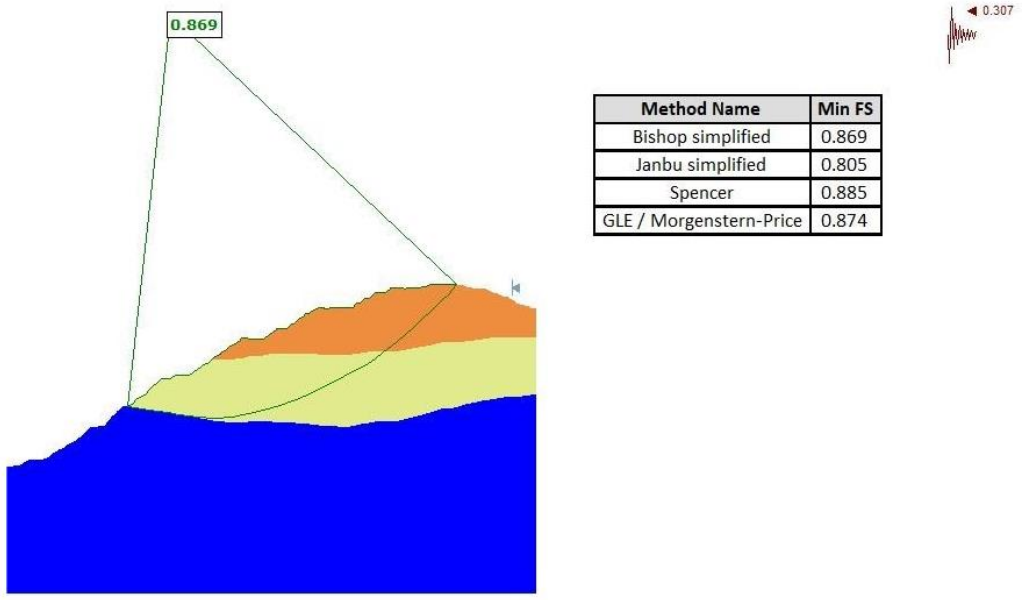
Şekil 4.68 1-1' kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi



Şekil 4.69 2-2' kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi

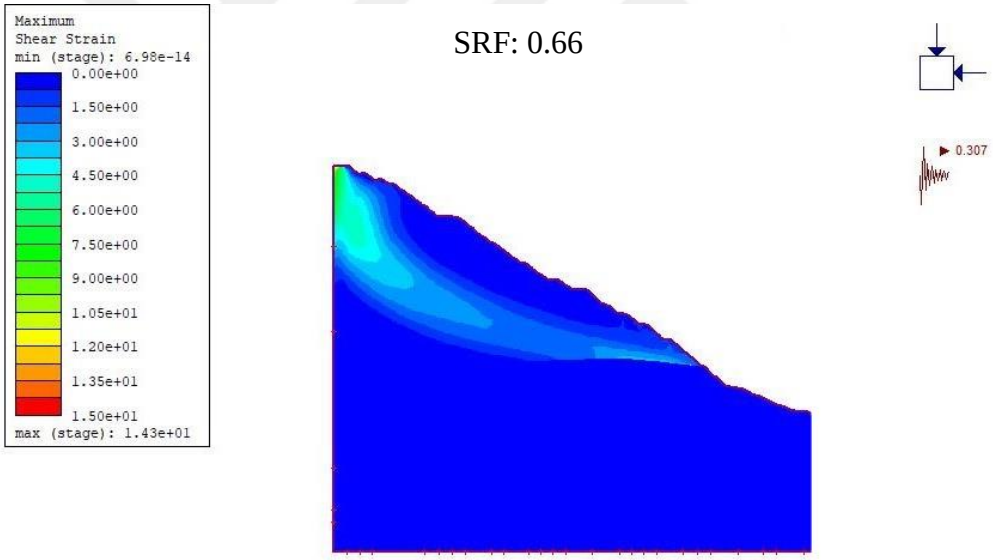


Şekil 4.70 3-3' kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi

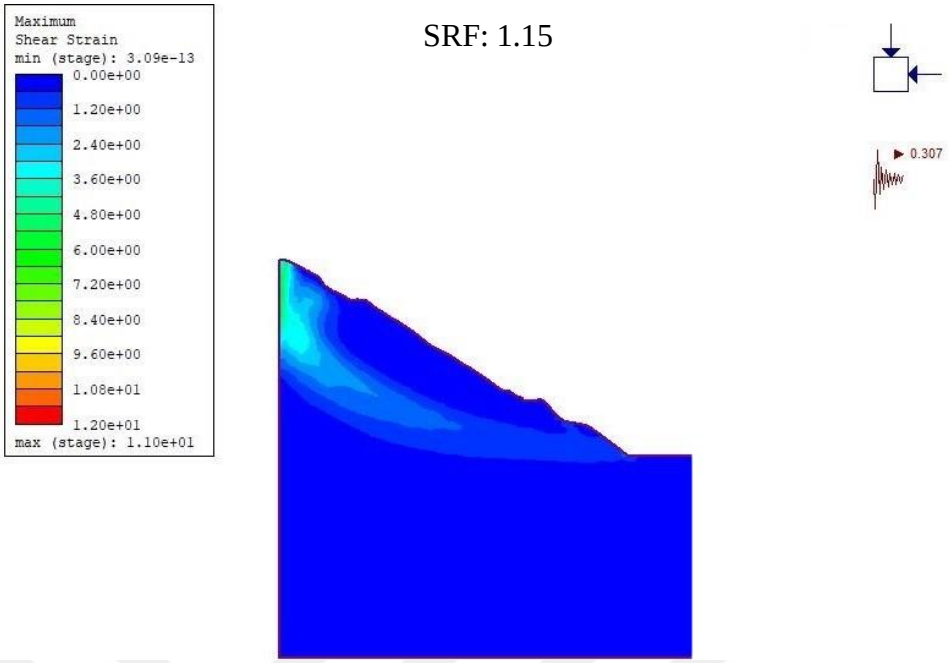


Method Name	Min FS
Bishop simplified	0.869
Janbu simplified	0.805
Spencer	0.885
GLE / Morgenstern-Price	0.874

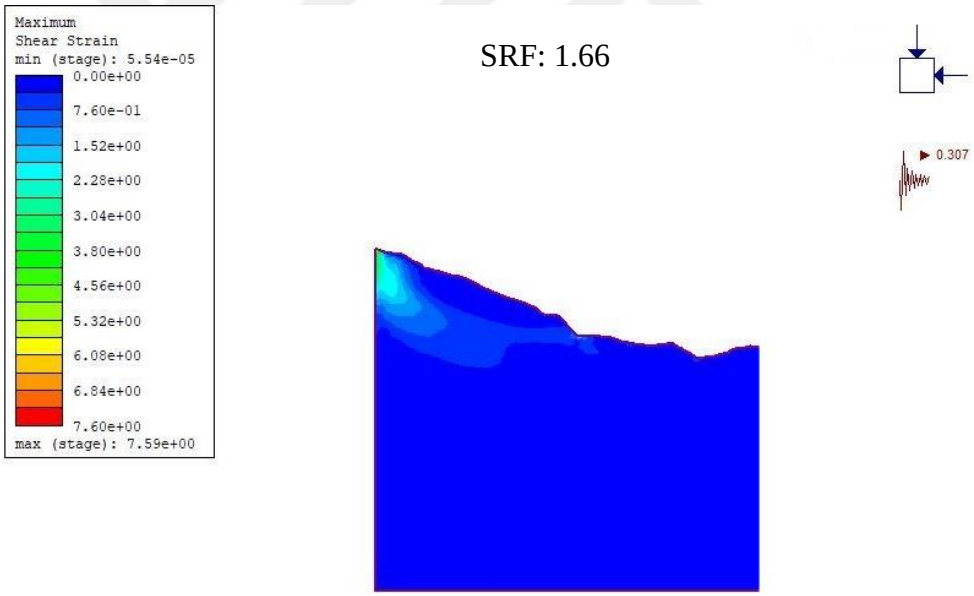
Şekil 4.71 4-4’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan limit denge analizi



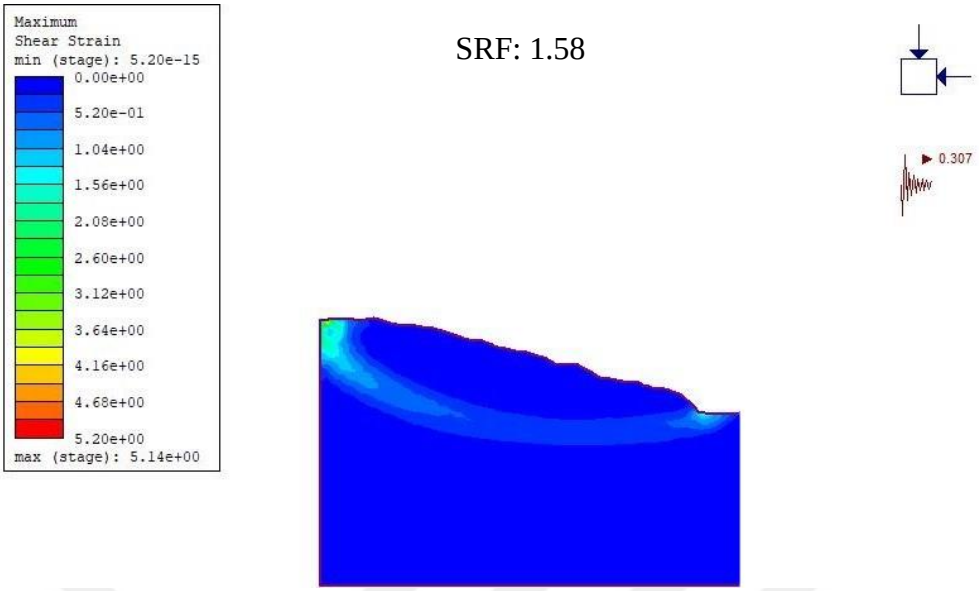
Şekil 4.72 1-1’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi



Şekil 4.73 2-2’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi



Şekil 4.74 3-3’ kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi



Şekil 4.75 4-4' kesiti üzerinde 0,307 g yatay yük altında yapılan sonlu elamalar analizi

Tablo 4.11 Kesitler üzerinde 0,307 g deprem etkisi altında yapılan limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizleri ile hesaplanan minimum güvenlik katsayıları

Analiz Yöntemi	**1-1' Kesiti**	**2-2' Kesiti**	**3-3' Kesiti**	**4-4' Kesiti**
Bishop	0,700	1,260	1,243	0,869
GLE / Morgenstern-Price	0,701	1,269	1,141	0,805
Janbu	0,644	1,259	1,141	0,805
Spencer	0,703	1,290	1,273	0,885
SRF	0,66	1,15	1,66	1,58

4.10 Boşluk Suyu Basıncının Değişimine Bağlı Olarak Gerçekleştirilen 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Limit Denge Analizleri

Boşluk suyu basıncı yeraltı su tablasının altında efektif gerilmeyi azaltarak kayma yüzeyi boyunca makaslama dayanımının azalmasına neden olur. Bu nedenle boşluk suyu basıncı arttıkça şevlerde duraylılık problemleri ortaya çıkmaktadır. Bir şevdeki boşluk suyu basıncı yıllık yağış ve buharlaşma miktarına, şevi oluşturan malzemelerin gözeneklilik ve su emme kapasitesine bağlı olarak değişmektedir (Gündoğdu, 2011).

r_u olarak ifade edilen boşluk suyu basıncının formülasyonu eşitlik 4.4'te verilmiştir.

$$r_u = \frac{u}{\gamma * h} \tag{4.4}$$

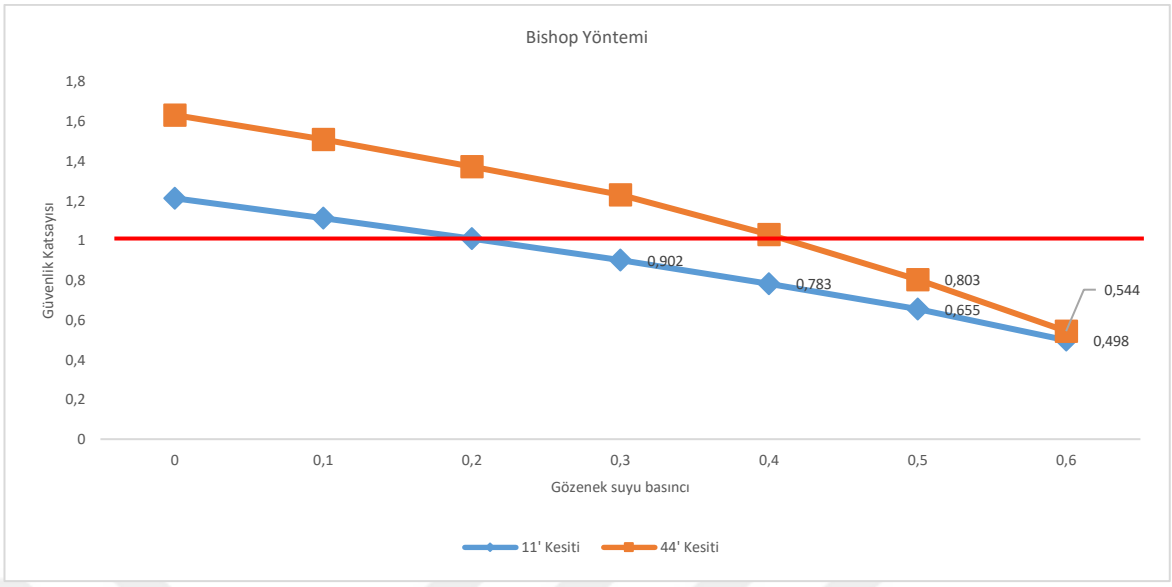
Burada;

"γ" birim hacim ağırlık; "*u"* gözenek basıncı; "*h"* kayma yüzeyinin yüzeye olan mesafesidir.

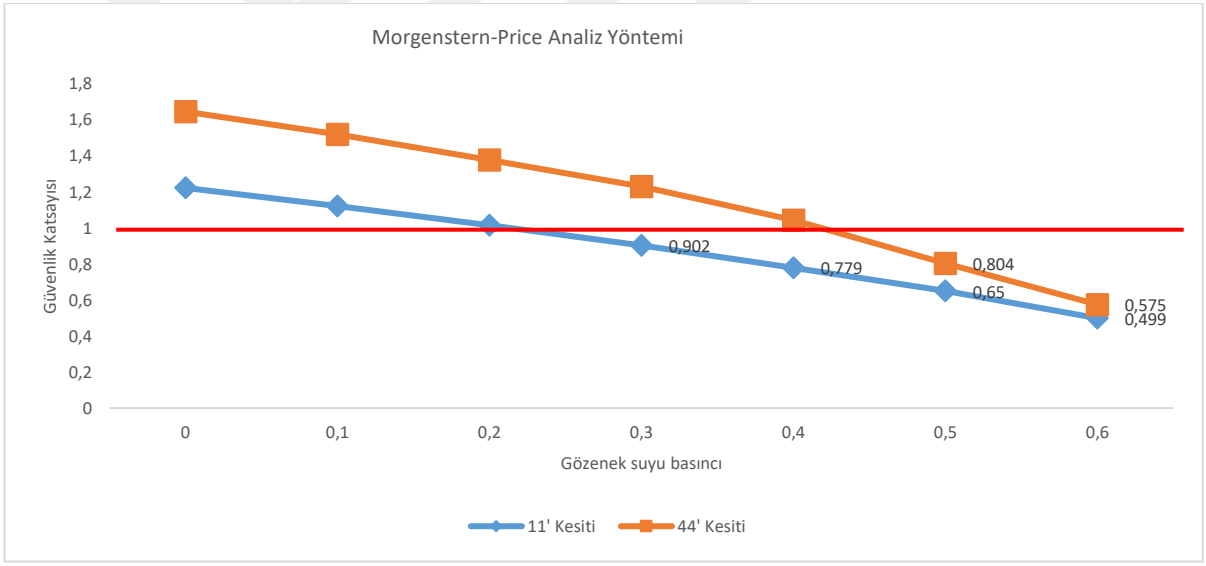
Şevlerde boşluk suyu basıncının belirlenmesinde yaygın olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en kapsamlı olanı akış analizi yapılarak şev duraylılık analizlerinde bileşke boşluk suyu basıncının kullanılmasıdır. Bir diğer yöntem ise piyezometrik ölçümlerle su tablasının belirlenmesi şeklindedir (Keskin, 2008).

Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerde gözenek suyu basıncının değişimine bağlı olarak güvenlik katsayısının değişimi incelemek amacıyla sahada yapılan gözlemsel analizler neticesinde şevlerde bulunan nemli bölgelere yakın olan şevlerden kesitler alınarak gözenek suyu basıncının 0 ile 0,6 arasında değiştiği durumlarda iki boyutlu ve üç boyutlu duraylılık analizleri yapılmıştır. Kesitler üzerinde yapılan iki boyutlu analizlerde 1-1' kesitinde Bishop (Şekil 4.76), Morgenstern-Price (Şekil 4.77) ve Spencer (Şekil 4.78) yöntemleri ile yapılan analizlerde boşluk suyu basıncının 0,3 olduğu durumlarda şevler duraysız hale gelmektedir. 1-1' kesitinde Janbu ile yapılan analizlerde ise boşluk suyu basıncının 0,2 olduğu durumlarda şevler duraysız hale gelmektedir (Şekil 4.79).

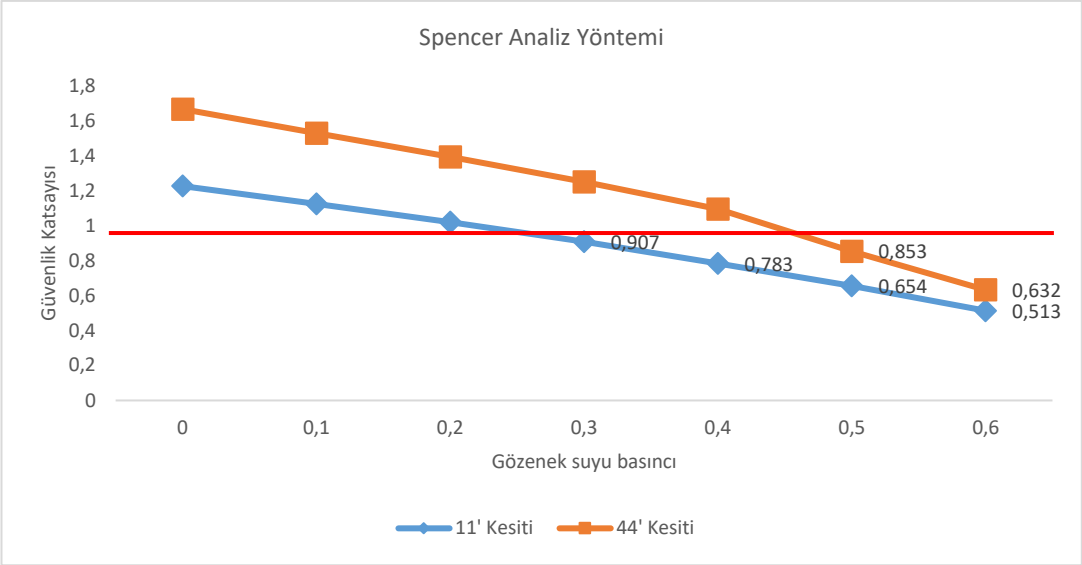
Şekil 4.79'da görüldüğü üzere 4-4' kesiti üzerinde Janbu yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde boşluk suyu basıncının 0,4 olduğu durumda şevler duraysız duruma gelmektedir. 4-4' kesiti üzerinde Morgenstern-Price, Spencer ve Bishop yöntemleri kullanılarak yapılan analizlerde ise boşluk suyu basıncının 0,5 olduğu durumlarda şevler duraysız hale gelmektedir.



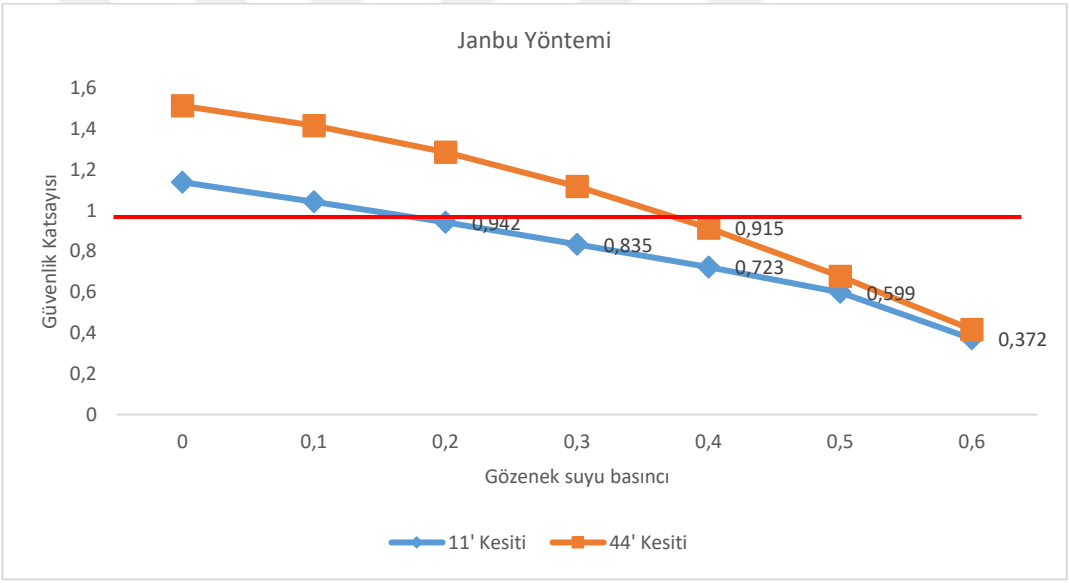
Şekil 4.76 1-1' ve 4-4' kesitleri üzerinde Bishop yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik



Şekil 4.77 1-1' ve 4-4' kesitleri üzerinde Morgenstern-Price yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik

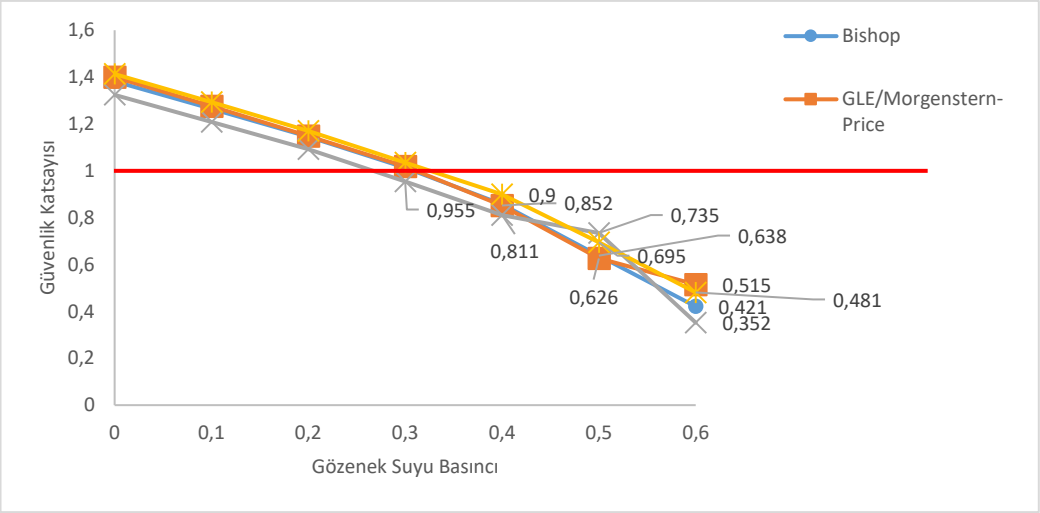


Şekil 4.78 1-1' ve 4-4' kesitleri üzerinde Spencer yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik



Şekil 4.79 1-1' ve 4-4' kesitleri üzerinde Janbu yöntemi kullanılarak yapılan boşluk suyu basıncı değişimi ile güvenlik katsayısı değişimini gösteren grafik

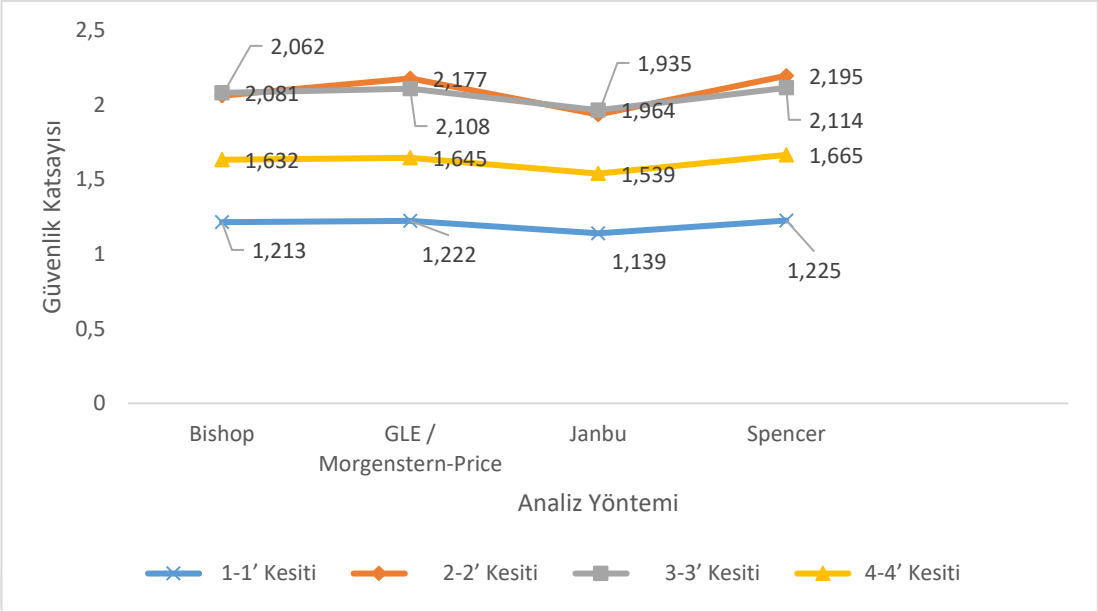
Boşluk suyu basıncının değişimine bağlı olarak şevlerde meydana gelebilecek duraysızlıkların incelendiği üç boyutlu limit denge analizlerinde ise boşluk suyu basıncının 0,3 olduğu durumlarda Janbu yöntemi kullanılarak yapılan analizler şevlerde duraylılık problemlerinin var olduğunu gösterirken, boşluk suyu basıncının 0,4 olduğu durumdan itibaren tüm analiz yöntemlerinin şevlerde duraylılık sorunları ortaya çıkacağını işaret etmektedir (Şekil 4.80).



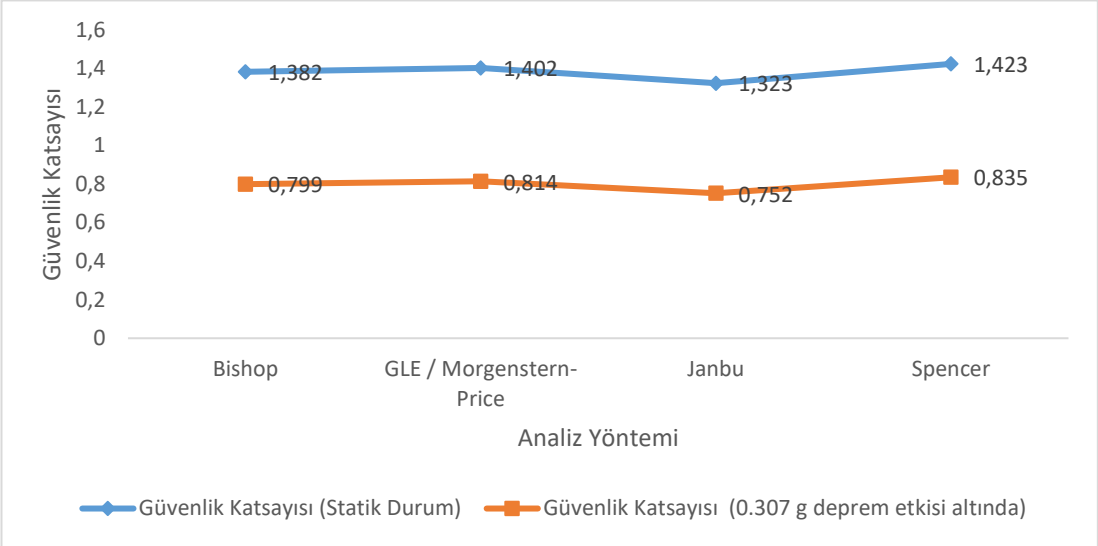
Şekil 4.80 Üç boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen boşluk suyu basıncının değişimine bağlı olarak güvenlik katsayının değişimi

Yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçlarından da görüleceği üzere boşluk suyu basıncının şevlerin duraylılığı üzerindeki etkisi azımsanmayacak derecede büyüktür. Bu yüzden yapılacak olan çalışmalarda özellikle su çıkışlarının gözlendiği bölgelerde boşluk suyu basıncını dikkate alarak analizler yapmakta fayda vardır.

Statik koşullarda gerçekleştirilen 2-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenllik katsayıları Şekil 4.81'de, 3-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları Şekil 4.82'de gösterilmiştir.



Şekil 4.81 2-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları



Şekil 4.82 3-boyutlu limit denge analizleri neticesinde elde edilen güvenlik katsayıları

5. DEĞERLENDİRME

İnceleme sahası olarak Dimin A.Ş.'ye bağlı Avnik (Bingöl)'de bulunan demir açık ocak maden işletmesi seçilmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü esnada açık ocak işletmesinin derinliği 333 m, basamakların şev açıları 45^{o}, genel şev açısı ise 38^{o}'dir.

Açık ocak işletmesi jeolojik olarak incelendiğinde, üst birlik ve alt birlik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Üst birliği; mikaşist birimi oluştururken alt birlik mafik metamorfik, felsik metatüf metavolkanit ve gnays birimlerinden oluşmaktadır. Cevherleşme, felsik metatüf metavolkanit biriminin alt kısımları ile gnays biriminde gözlenmektedir.

Avnik yöresinde alt birlik ile üst birlik arasında çok önemli düzeyde açısal uyumsuzluk mevcuttur. Üst birliğin en yaşlı birimi olan mikaşistler çok fazla aşınmış durumdadır. Avnik yöresi Doğu Anadolu Fay Hattı ile Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın kesişme noktasında yer almaktadır. Bu durum çalışma sahasında yer alan birimlerin ileri derecede metamorfizmaya maruz kalmasına neden olmuştur. Ülkemizde bulunan iki büyük ve önemli fay hatları arasında yer alan açık ocak işletmesinde şev duraylılık analizleri yapılırken deprem etkisini çalışma kapsamında yapılan şev duraylılık analizlerine katmak oldukça önemli bir noktadır.

Yapılan saha çalışmaları ile açık ocak işletmesindeki litolojik değişimler ve şev duraysızlıkları göz önüne alınarak saha farklı sektörlere ayrılmış ve bu sektörlerde hem süreksizlik hat etütleri yapılmış hem de laboratuvar çalışmaları için örnekler alınmıştır. Sahadan alınan numuneler üzerinde Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Maden İşletme Laboratuvarında ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü Kaya ve Zemin Mekaniği Laboratuvarında kaya malzemesinin özelliklerini belirlemek amacıyla fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde; mikaşistin kuru ve doygun birim hacim ağırlıkları sırasıyla 23,88 kN/m^3; 24,64 kN/m^3, kütlece su emmesi %2,52; gözenekliliği %6,10; nokta yük dayanımı 11,96 MPa olarak tespit edilmiştir. Fillitin kuru ve doygun birim hacim ağırlıkları sırasıyla 27,15 kN/m^3; 27,21 kN/m^3; kütlece su emmesi %0,23; gözenekliliği %0,64; nokta yük dayanımı 24,54 MPa olarak tespit edilmiştir. Gnays numunesinin kuru ve doygun birim hacim ağırlıkları sırasıyla 38,51 kN/m^3; 38,74 kN/m^3; kütlece su emmesi %0,60; gözenekliliği %2,37; tek eksenli basınç dayanımı 39,46 MPa olarak tespit edilmiştir. Gnays numunesinin kuru ve doygun birim hacim ağırlıklarının yüksek çıkmasının sebebi cevherleşmenin gnays

biriminde olmasından kaynaklanmaktadır. Bu birim mikaşist ve fillit birimlerine göre şev duraylılığı açısından daha duraylı bir birimdir.

Arazi çalışmaları kapsamında yapılan bir diğer çalışma ise süreksizliklerin makaslama dayanımının belirlenmesi olmuştur. Süreksizliklerin dalgalılık, pürüzlülük durumu şev duraylılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Süreksizliliğin pürüzlülük seviyesi arttıkça genellikle makaslama dayanımı da artmakta ve daha duraylı hale gelmektedir. Bu bakımdan süreksizlikler üzerinde profilometre ile ölçümler yapılarak eklem pürüzlülük katsayısı (JRC) mikaşist için 4-6, fillit için 6-8, gnays için 10-12 olarak belirlenmiştir. Süreksizliklerin yüzey dayanımın belirlenmesi için ise Schmidt sertlik çekici deneyi uygulanmış ve süreksizlik yüzey dayanımı (JCS) mikaşist için 18, fillit için 22, gnays için ise 30 MPa olarak tespit edilmiştir. Süreksizliklerin makaslama dayanımı belirlenirken Barton ve Choubey (1977) tarafından önerilen görgül eşitlik kullanılmıştır. Barton ve Choubey (1977) eşitliğinde yer alan ve artık sürtünme açısını temsil eden ϕr değerinin hesaplanabilmesi için tilt deneyleri gerçekleştirilmiştir ve mikaşist için 30^0, fillit için 32^0, gnays için 33^0 rezidüel sürtünme açıları hesaplanmıştır.

Süreksizlik hat etütleri neticesinde sektörlerde yer alan süreksizliklerin eğim/eğim yönleri belirlenmiş ve Dips (Rocscience Inc., 2020c) yazılımı kullanılarak stereonet üzerinde süreksizliklerin dağılımları gözlenmiştir. Stereonet üzerinde kutup noktaları ile gösterilen süreksizliklerin ileri derecede metamorfizmaya uğrayan kaya kütlelerinde belirli bir yönde yoğunlaşmadığı ve dağınık bir şekilde yer aldığı gözlenmiştir. İncelenen şevlerdeki süreksizliklerin aralığının oldukça yakın olması durumu da göz önüne alındığında, incelenen şevlerde meydana gelebilecek olası duraysızlıkların çoğunlukla süreksizlik kontrollü olmayacağını işaret etmektedir. Buna rağmen açık ocak işletmesi şevlerindeki olası küçük boyutlu süreksizlik kontrollü yenilme türlerinin ortaya konması için Dips yazılımı ile sektörlerde kinematik analizler yapılmıştır. S1 için yapılan kinematik analizler kapsamında 157 süreksizlik dikkate alınmıştır. Yapılan düzlemsel kayma analizinde 3 süreksizlik kutup noktasının tehlikeli bölgeye düştüğü saptanmıştır ve bu oran incelenen süreksizliklerin %1,91'e denk gelmektedir. Kama tipi kayma için yapılan analizlerde ise kesişen 12246 noktanın 718'inin tehlikeli bölgeye düştüğü bu oranın %5,86'ya tekabül ettiği saptanmıştır. S1 için yapılan bir diğer kinematik analiz olan devrilme tipi yenilmenin analizinde ise yenilme olasılığı yaklaşık %1 seviyelerinde çıkmıştır. S2 için yapılan düzlemsel kaymanın kinematik analizinde 98 süreksizliğin kutup noktasından 4

tanesinin tehlikeli bölgede yer aldığı görülmüştür. Kama tipi kaymanın kinematik analizinde ise 4753 noktanın 202'sinin (%4,25) kritik bölgede yer aldığı görülmüştür. S2 bölgesi için de yapılan devrilme tipi yenilmenin kinematik analizi sonuçlarında devrilme tipi yenilme açısında herhangi bir sorun tespit edilmemiştir. S5 bölgesine bakıldığında; düzlemsel kayma için yapılan kinematik analiz sonuçlarında 104 süreksizliğin kutup noktasından hiçbirinin tehlikeye bölgeye düşmediği, kama tipi kaymanın kinematik analiz sonuçlarına göre ise 5356 noktanın 29'u (%0,54) kritik bölgede yer aldığı saptanmıştır. Yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre incelenen açık ocak işletmesinde yer alan şevlerde süreksizlik kontrollü yenilme olasılığı oldukça düşüktür. Açık ocak işletmesindeki şevleri oluşturan kaya kütlesinin ileri derecede metamorfizmaya maruz kalması sebebiyle özellikle mikaşist birimi oldukça kırıklı ve parçalanmış bir yapı göstermektedir. Geçmişte açık ocak işletmesinde meydana gelen şev duraysızlıkları incelendiğinde meydana gelen duraysızlıkların mikaşist birimi içerisinde geliştiği görülmüştür.

Çalışma sahasında bulunan kaya kütlelerinin özellikleri belirlenirken RMR, Q-Slope ve GSI kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden yararlanılmıştır. Çalışma sahasında yer alan birimler ileri derecede metamorfizmaya uğradığından bu birimler aşırı kırıklı ve parçalanmış bir yapı sergilemektedir. İşletme sahasında planlama ve projelendirme aşamasında cevher yayılımını belirlemeye yönelik sondajlar yapılmasına rağmen, bu sondajlarda kaya kütle özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle kaya kütle sınıflama sistemlerinde kullanılmak üzere, şevleri oluşturan kaya kütlelerinin RQD değerlerinin tahmin edilebilmesi için arazi çalışmaları sırasında yapılan süreksizlik hat etütleri kapsamında belirlenen süreksizlik aralığı değerleri referans alınmış ve mikaşist, fillit ve gnays için RQD değerleri sırasıyla 8, 25 ve 35 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde inceleme sahasında bulunan mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin RMR puanları sırasıyla 40, 45 ve 51 olarak belirlenmiştir. Bienawski (1989) tarafından önerilen RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre fillit ve gnays birimlerinin orta kaya kalitesinde, mikaşist birimi ise zayıf kaya kalitesinde olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan Q-Slope sistemine göre yapılan değerlendirmede, çalışma sahası ileri derecede tektonizma etkisi altında kaldığından RQD değeri birimler için %10'un altında kabul edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde çalışma sahasını oluşturan birimler için Q değerleri ve güvenli şev açısı (β) değerleri

tespit edilmiştir. Mikaşist, fillit ve gnays için tespit edilen Q değerleri sırasıyla; 0,033; 0,104 ve 0,208, β açıları ise; 35,45º; 45,35º; 51,37º'dir. Q sınıflama sistemine göre mikaşist birimi çok fazla zayıf kaya sınıfında yer alırken, fillit ve gnays birimleri çok zayıf kaya sınıfında yer almaktadır.

Yapılan değerlendirmeler neticesinde RMR yöntemiyle yapılan kaya kütle sınıflandırması ve Q yöntemi kullanılarak yapılan kaya kütle sınıflandırma sonuçlarının uyum içerisinde çıktığı gözlenmiştir. Çalışma sahasını oluşturan kaya kütlelerinin özelliklerini belirlemek ve özellikle derinleşen açık ocak işletmelerinde çalışırken yaşanması muhtemel şev duraysızlıklarının önüne geçebilmek adına açık ocak işletmesinin basamaklarını oluşturan kaya kütlelerini iyi tanımak ve şev açılarına ve ocağın geometrisini kaya kütle özelliklerini dikkate alarak karar vermek gerekmektedir.

Süreksizlik hat etütleri kapsamında arazide yapılan çalışmalar neticesinde hacimsel eklem sayısı (Jv) ve süreksizlik yüzey koşulu (SCR) değerleri kullanılarak Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından önerilen kantitatif GSI abağı üzerinde birimlerin GSI değerleri belirlenmiştir. Kantitatif GSI abağı kullanılarak yapılan değerlendirme neticesinde mikaşist, fillit ve gnays birimlerinin arazi çalışmaları neticesinde belirlenen GSI değerleri sırasıyla; 35, 41 ve 45'dir. Arazi çalışmaları neticesinde belirlenen GSI değerleri kullanılarak mikaşist ve fillit birimlerinde meydana gelmiş olan iki ayrı şev duraysızlıkları için geri analizler yapılmıştır. Geri analizler, Sönmez vd. (1998) tarafından önerilen ve literatürde ileri derecede eklemli kaya kütlelerindeki duraysızlıkların geliştiği şevlerde GSI sistemi kullanılarak deneme-yanılma yoluyla belirlenmiştir. Çalışma sahasında meydana gelen duraysızlıkların kayma dairesinin yaklaşık konumunun tahmin edilmesi için şevlerin yenilmeden önceki durumları göz önüne alınarak RS2 (Rocscience Inc., 2020d) yazılımı ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve yenilen kütleninkayma düzlemi ortaya konmuştur. Belirlenen kayma dairesi referans alınarak mikaşist ve fillit birimleri için geri analizler gerçekleştirilmiş ve geri analizlerden GSI değerleri elde edilmiştir. Yapılan geri analizler neticesinde mikaşist ve fillit için elde edilen GSI değerleri sırasıyla; 35 ve 32 olmuştur. Hem arazi çalışmaları neticesinde elde edilen GSI değerleri hem de geri analizler neticesinde elde edilen GSI değerleri karşılaştırıldığında birimler için belirlenen GSI değerlerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında yapılan iki boyutlu limit denge analizleri Slide2 (Rocscience Inc., 2020a) yazılımı, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler RS2 (Rocscience Inc., 2020d) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin çalışma sahasının mevcut durumu yansıtması için İHA ile alınan nokta bulutundan arazi sayısal yüzey modeli oluşturulmuş ve açık ocak işletmesini oluşturan birimler sayısal yüzey modeli üzerine tanıtılmıştır. Daha sonra model üzerinden dört farklı kesit alınarak kesitler üzerinde statik koşullarda ve dinamik koşullarda limit denge analizleri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler gerçekleştirilirken girdi parametresi olarak laboratuvar çalışmaları ve arazi çalışmaları neticesinde elde edilen birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, ayrıca geri analizler neticesinde elde edilen kaya kütlelerinin makaslama dayanım parametrelerinden faydalanılmıştır. Analizler kapsamında yenilme ölçütü olarak çok kırıklı – çatlaklı homojen ve izotrop kaya kütleleri için geliştirilen Genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü kullanılmıştır. Limit denge analizlerinde her bir kesit için Bishop, Basitleşitirlmiş Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemi kullanılarak minimum güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Yapılan limit denge analizleri neticesinde Bishop yöntemi ile elde edilen minimum güvenlik katsayıları; 1-1’ kesitinde 1,21; 2-2’ kesitinde 2,06; 3-3’ kesitinde 2,08; 4-4’ kesitinde 1,63 olarak elde edilirken Janbu analiz yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde, 1-1’ kesitinde 1,14; 2-2’ kesitinde 1,96; 3-3’ kesitinde 1,97; 4-4’ kesitinde 1,54 olarak hesaplanmıştır. Morgenstern-Price analiz yöntemi kullanılarak yürütülen şev duraylılık analizleri neticesinde 1-1’ kesitinde 1,22; 2-2’ kesitinde 2,18; 3-3’ kesitinde 2,19; 4-4’ kesitinde 1,65 olarak elde edilmiştir. Spencer analiz yönteminde ise 1-1’ kesitinde 1,23; 2-2’ kesitinde 2,20; 3-3’ kesitinde 2,11; 4-4’ kesitinde 1,67 mininum güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Kesitler için elde edilen mininum güvenlik katsayıları incelendiğinde Janbu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde en düşük güvenlik katsayıları elde edilirken; Spencer yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde daha yüksek güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında Morgenstern-Price ve Spencer yöntemi ile yapılan analizler gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Bu durumun sebebi Morgenstern-Price ve Spencer yöntemi ile yapılan analizlerde kuvvet dengesi ve moment dengesinin bir arada kullanılmasıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde her bir kesit için makaslama dayanımı azaltımı yöntemi (SSR) kullanılarak güvenlik katsayıları hesaplanmıştır.

Yapılan analizler neticesinde 1-1’ kesiti için 1,2; 2-2’ kesiti için 2,03; 3-3’ kesiti için 2,21 4-4’ kesiti için 1,67 güvenlik katsayıları belirlenmiştir. Hem limit denge analizleri hem de sonlu elemanları yöntemi ile statik koşullarda yapılan analizlere bakıldığında elde edilen güvenlik katsayılarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir. 1-1’ kesiti ile 4-4’ kesitleri hem açık ocak işletmesinin en tepe noktasından en dip noktasına kadar olan alanı kapsadığından hem de geçmişte yaşanan şev duraysızlıklarına ve şevlerde nemlenmelere olan noktalara yakınlığı nedeniyle hassas kesitlerdir. Limit denge analizleri ve sonlu elamanlar yöntemi ile yapılan analiz sonuçları da bu kesitlerde yer alan şevlerin duraysızlığa hassas olduğunu ve dikkat edilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Çalışma sahası ülkemizi kesen iki önemli fay hattı olan Doğu Anadolu Fay Hattı ile Kuzey Anadolu Fay Hattı’nın kesişme noktasında sismik olarak oldukça aktif bir alanda yer almaktadır. Aynı zamanda açık ocak sahasında yapılan üretim faaliyetlerinin delme – patlatma yöntemiyle yapıldığı göz önüne alındığında açık işletmede mevcut bulunan şevlerin üzerinde dinamik yüklerin duraylılık üzerindeki etkisinin araştırılması önemli bir husustur. Çalışma kapsamında deprem yer hareket düzeyi DD-2 ve zemin sınıfı az ayrışmış – orta sağlam kayalar olarak kabul edilerek Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak çalışma sahasının en büyük yer ivmesi (PGA) 0,614 g olarak, en büyük yer hızı (PGV) ise 37,568 cm/sn olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda kesitler üzerinde hem limit denge analizleri hem de sonlu elemanlar yöntemi ile Hynes – Griffin ve Franklin (1984) tarafından önerildiği şekilde maksimum yer ivmesinin şev üzerinde etkili olan yatay bileşeni, maksimum yatay ivmenin yarısı ($a_{max}/2$) olacak şekilde 0,307 g olarak seçilmiştir. Yapılan limit denge analizleri neticesinde 0,307 g dinamik yük altında Bishop analiz yöntemi kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen güvenlik katsayılarına göre; 1-1’ kesiti için 0,70; 2-2’ kesiti için 1,21; 3-3’ kesiti için 1,24; 4-4’ kesiti için 0,87 değerleri elde edilmiştir. Janbu yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde ise; 1-1’ kesiti için 0,64; 2-2’ kesiti için 1,26; 3-3’ kesiti için 1,14; 4-4’ kesiti için 0,81 minimum güvenlik katsayıları elde edilmiştir. Morgenstern-Price yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde 1-1’ kesiti için 0,70; 2-2’ kesiti için 1,27; 3-3’ kesiti için 1,14; 4-4’ kesiti için 0,81 değerleri elde edilmiştir. Spencer yönteminde ise 1-1’ kesiti için 0,70; 2-2’ kesiti için 1,29; 3-3’ kesiti için 1,27; 4-4’kesiti için 0,89 minimum güvenlik katsayısı değerleri elde edilmiştir. Kesitler üzerinde sonlu

elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan ve dinamik yüklerinin etkisinin incelendiği analiz sonuçlarına göre 1-1' kesiti için 0,66; 2-2' kesiti için 1,15; 3-3' kesiti için 1,66; 4-4' kesiti için 1,58 değerleri elde edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde özellikle 1-1' kesiti ve 4-4' kesiti dinamik yüklerin etkisi altında duraysız duruma gelirken diğer kesitlerinde limit dengeye yaklaştığı görülmektedir. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar özellikle 1-1' ve 4-4' nolu hassas kesitlere yakın bölgelerde yapılacak delme – patlatma operasyonlarının şevleri çok fazla örselemeden kontrollü bir şekilde yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Gelişen teknoloji ve bilgisayar yazılımları sayesinde şev duraylılık analizleri artık 3-boyutlu bilgisayar yazılımları ile hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Özellikle insansız hava araçlarının madencilik sektöründe kullanımının yaygınlaşması ile beraber 3-boyutlu modeller kolaylıkla oluşturulabilmekte ve model üzerine farklı jeolojik birimler tanımlanarak şev duraylılık analizleri yapılabilmektedir. Bu yöntemin avantajlarından biri ise nokta bulutundan elde edilen arazi sayısal yüzey modeli çalışma sahasını tam olarak yansıtmakta ve oluşturulan model üzerinden istenilen kısımlardan kesitler alınıp iki boyutlu kesite geçilebilmekte ve iki boyutlu model üzerinde limit denge analizleri yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında da 3-boyutlu model üzerinde Slide 3 (Rocscience Inc., 2020b) yazılımı ile statik - dinamik koşullarda ve boşluk suyu basıncının 0 ile 0,6 arasında değiştiği koşullarda limit denge analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ile iki boyutlu kesitler üzerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Statik koşul ve dinamik yüklerin altında yapılan analizler neticesinde; Bishop yöntemiyle yapılan analizlerde statik koşulda ve dinamik yükler altında elde edilen minimum güvenlik katsayıları sırasıyla, 1,38; 0,80, Janbu yöntemiyle yapılan analizlerde statik ve dinamik koşulda elde edilen minimum güvenlik katsayıları sırasıyla, 1,32; 0,75, Morgenstern-Price yöntemiyle yapılan analizlerde statik ve dinamik yükler altında elde edilen minimum güvenlik katsayıları sırasıyla, 1,402; 0,814, Spencer yöntemiyle yapılan analizlerde statik ve dinamik koşulda elde edilen minimum güvenlik katsayıları sırasıyla, 1,42; 0,84'dir. 3-boyutlu limit denge analiz sonuçlarından da görüleceği üzere çalışma sahasında bulunan şevler dinamik yüklerin etkisi altında duraysız bir hale gelmektedir. Hem 3-boyutlu limit denge analizlerinden elde edilen sonuçlar hem de 2-boyutlu limit denge analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirleri ile uyum içerisindedirler.

Çalışma alanında yapılan incelemeler neticesinde bazı şevlerde nemlenmeler olduğu görülmüştür. Bu durum çalışma kapsamında boşluk suyu basıncının da değerlendirilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Boşluk suyu basınçları efektif gerilmeyi azaltarak makaslama dayanımının azalmasına neden olmaktadır. Çalışma sahasında piyezometrik ölçümler ile su tablası belirlenmediği için çalışma sahsında yapılan gözlemsel çalışmalar neticesinde saptanan durumlara uygun olarak hem şevlerden alınan kesitler üzerinde hem de 3-boyutlu analizler ile boşluk suyu basınç oranlarının (ru) 0 ile 0,6 arasında değiştiği durumlarda şevlerin oluşan güvenlik katsayısını belirlemek amacıyla olasılıksal duraylılık analizleri yürütülmüştür. 1-1' kesiti üzerinde yapılan iki boyutlu limit denge analizi neticesinde Bishop, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleri ile yapılan hesaplamalarda boşluk suyu basınç oranının 0,3 olduğu durumlarda güvenlik katsayısı limit dengenin altına düşmektedir. Janbu yöntemi ile yapılan hesaplamalarda ise boşluk suyu basınç oranının 0,2 olması halinde şevlerde duraysızlıklar gelişebilmektedir. 4-4' kesitinde ise Janbu yöntemiyle yapılan hesaplamalarda boşluk suyu basınç oranının 0,4 olduğu durumda yenilmeler gerçekleşebilecek iken, Bishop, Spencer ve Morgenstern-Price analiz yöntemleri yapılan hesaplamalarda boşluk suyu basınç oranının 0,5 olduğu durumlarda güvenlik katsayısı 1'in altına düşmektedir. Boşluk suyu basınç oranının değişiminin açık ocak şevlerindede oluşturacağı olumsuzluğun araştırıldığı 3-boyutlu limit denge analizlerinde ise boşluk suyu basınç oranının 0,3 olduğu durumlarda Janbu yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçlarına göre şevlerde duraysızlıklar meydana gelebilmektedir. Boşluk suyu basınç oranının şev duraylılığı üzerine etkisinin araştırıldığı 2-boyutlu ve 3-boyutlu limit denge analiz sonuçları açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin boşluk suyu basıncına karşı hassas olduklarını ve çalışma sahasında yer alan mevcut şevlerde suya karşı drenaj önlemleri alınması ve yüzey sularının şev içerisine sızmanının engellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışması kapsamında Avnik (Bingöl) yöresinde bulunan demir açık ocak işletmesinin iki - üç boyutlu limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile şev duraylılık analizleri yapılmıştır. Şev duraylılık analizleri yapılırken statik durum, deprem etkisi ve yer altı su basıncının etkisi dikkate alınmıştır.

Gelişen teknoloji ve artan hammadde ihtiyacı ile birlikte günümüzde işletilen açık ocak işletmeleri günden güne derinleşmektedir. Derinleşen açık ocak işletmelerde karşılaşılan en büyük sorun ise şev duraylılığı konusu olmaktadır. Bu sebepten ötürü maden mühendisliği alanında yapılan şev duraylılık çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Yapılan bu çalışma kapsamında süreksizlik hat etüdü çalışmaları kapsamında elde edilen süreksizlikliklerin eğim/eğim yönlerinden faydalanılarak meydana gelebilecek yenilme türlerinin belirlenmesi amacıyla Dips yazılımından faydalanılmıştır. Açık ocak işletmesinin mevcut şevlerinin iki boyutlu limit denge analizleri Slide 2 yazılımı ile, üç boyutlu limit denge analizleri Slide 3 yazılımı ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde ise RS 2 yazılımı kullanılmıştır.

Yapılan kinematik analizler neticesinde açık ocak işletmesinde süreksizlik kontrollü yenilme olasılığının çok düşük olduğu, meydana gelebilecek yenilme türlerinin daha çok dairesel yenilmeye yakın olduğu saptanmıştır.

Arazi çalışmaları kapsamında açık ocak işletmesinin kuzey batı bölgesinde mikaşist birimde ve açık ocak işletmesinin doğu bölgesinde fillit biriminde iki ayrı şev duraysızlığı olduğu gözlenmiştir. Bu duraysızlık bölgelerinde Hoek – Brown yenilme kriteri kullanılarak geri analizler gerçekleştirilmiş ve kaya kütlelerinin makaslama dayanım parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu makaslama dayanım parametreleri, çalışmanın ileriki aşamalarında gerçekleştirilen detaylı şev duraylılık analizlerinde yol gösterici olmuştur.

Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin güvenlik katsayılarının belirlenmesi için statik koşullarda iki boyutlu limit denge analizleri, deprem ivmesinin oluşturacağı etkiyi belirlemek için dinamik durum analizleri ve boşluk suyu basıncının şevler üzerinde oluşturacağı etkiyi belirlemek için boşluk suyu basıncının analizlere katarak limit denge analizleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapılmıştır. Analizler

neticesinde özellikle açık ocak işletmesinin kuzey bölgesinde yer alan şevlerin depreme ve boşluk suyuna karşı hassas olduğu saptanmıştır.

Açık ocak işletmesinde bulunan şevlerin 3-boyutlu limit denge analizlerinde de 2-boyutlu analizler de olduğu gibi statik durum, dinamik durum ve boşluk suyu basıncının olduğu durumlar için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde iki boyutlu analizlerle benzer sonuçlar elde edilmiş ve açık ocak işletmesinin kuzey bölgesinde yer alan şevlerin hassas şevler olduğu saptanmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan hem arazi çalışmaları hem de iki ve üç boyutlu analizler açık ocak işletmesinin depreme ve boşluk suyu basıncına karşı hassas olduğunu göstermektedir. Çalışma sahasının yer aldığı lokasyon da göz önününde bulundurulduğunda şevlerde çalışma yapılırken ve şevlendirme işlemleri yapılırken şevlerin dike yakın açılarda olmasına izin verilmemelidir.

Derinleşen açık ocak işletmelerinde sıklıkla uygulanan ve gelişen teknoloji ile yaygınlaşan radar sistemleri kulanılarak özellikle kuzey bölgesinde yer alan şevler uzaktan izleme sistemleri ile taranmalı ve olası kaymalara karşı önlemler alınmalıdır.

Açık ocak işletmesinde üretim faaliyetleri delme – patlatma işlemleri ile gerçekleştirilmektedir. Patlatma işlemlerinin şevlerde oluşturduğu sismik etki göz önünde bulundurularak patlatma yapılan birime uygun olarak patlayıcı miktarları belirlenmelidir. Patlatma işlemleri yapılırken sismograflar ile ölçümler alınmalı ve patlatma öncesi ve sonrası şev duraylılık analizleri yapılarak yapılan patlatma işleminin şevler üzerinde bir etki oluşturup oluşturmadığı gözlenmelidir. Bu sayede hem delme – patlatma işlemlerinin verimi artacak hem de şev duraylılığı korunmuş olacaktır.

Açık ocak işletmesinin tabanında su birikmesine izin verilmemelidir. Özellikle yağışlı geçen mevsimlerde drenaj sistemleri aktif bir şekilde kullanılarak su ocak tabanından tahliye edilmelidir.

Açık ocak işletmesinin dinamik bir işletme olduğu ve üretim faaliyetlerinin devam ettiği göz önünde bulundurulduğunda ocağın günden güne derinleştiği bir gerçektir. Derinleşen açık ocak işletmelerinde şev duraylılığı konusuna hassasiyetle yaklaşılmalıdır. Bu sebeple şevler için düzenli aralıklarla şev duraylılık analizleri yapılarak ocağın derinleşmesine göre şevlerin güvenlik katsayıları belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

AFAD. (2020). *14 Haziran 2020 Karlıova (Bingöl) Mw 5.7 Depremine ilişkin Ön Değerlendirme Raporu*.

AFAD. (2021). *Türkiye Deprem Haritası*. https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritası.

Ahmad, I. S. (2012). *Limit equilibrium method and finite element method in slope stability analysis*. Universiti Teknologi Malaysia.

Akbas, Burak., ve Huvaj, Nejan. (2015). Probabilistic Slope Stability Analyses Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods. *Geotechnical Safety and Risk V, 2003*, 716-721. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-580-7-716

Akbulut, İ. (2012). *Slope Stability* (2012). General Directorate of Mineral Exploration.

Akın, M. (2013). Slope stability problems and back analysis in heavily jointed rock mass: A Case study from Manisa, Turkey. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *46*(2), 359-371. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0262-x

Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A., Orhan, A., Akın, M., ve Topal, T. (2019). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Muhendisligi Dergisi*, 211-231. https://doi.org/10.24232/jmd.655005

Alejano, L. R., Gómez-Márquez, I., ve Martínez-Alegría, R. (2010). Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, *114*(1-2), 93-104.

Alejano, Muralha, J., Ulusay, R., Li, C., Pérez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P., ve Aydan, Ö. (2018). ISRM suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *51*(12), 3853-3859.

Aliyazıcıoğlu, Ş., Karaman, K., Kesimal, A., Cihangir, F., ve Erçıkdı, B. (2015). Bir kireçtaşı ocağında (Araklı-Trabzon) sondajların 3 boyutlu analizi yoluyla kaya şev duraylılığı değerlendirmesi. *Türkiye*, *24*, 14-17.

Arıoğlu, E., ve Tokgöz, N. (2005). *Çözümlü problemlerle şev stabilite analizi*. Evrim Yayınevi.

Aryal, K. P. (2006). *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods*.

Azizi, M. A., Marwanza, I., Amala, S. A., ve Hartanti, N. A. (2018). Three dimensional slope stability analysis of open pit limestone mine in Rembang District, Central Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012035

Bar, N., ve McQuillan, A. (2018). 3D limit equilibrium slope stability analysis for anisotropic and faulted rock masses in Australian coal and iron ore mines. *ISRM International Symposium-10th Asian Rock Mechanics Symposium*.

Bar, N., ve Weekes, G. (2017). Directional shear strength models in 2D and 3D limit equilibrium analyses to assess the stability of anisotropic rock slopes in the Pilbara Region of Western Australia. *Australian Geomechanics Journal*, *52*(4), 91-104.

Barton. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering geology*, *7*(4), 287-332.

Barton, ve Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, *10*(1), 1-54.

Barton, Lien, R., ve Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, *6*(4), 189-236.

Barton, N. (1976). *The shear strength of rock and rock joints*. *13*(9), 255-279.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, *39*(2), 185-216.

Barton, N., ve Grimstad, E. (1995). *The Q-system following twenty years of application in NMT support selection*. *5*(32), 232A.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley ve Sons.

Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, *5*(1), 7-17.

Büyükağnıcı, C. Z., ve Işık, N. S. (2019). Şev Duraylılığı Analizlerinde Limit Denge Yöntemleri, Eurocode 7 ve BS 8006 Sstandartlarıyla Hesaplanan Başarı Oranlarının Karşılaştırılması. *TÜBAV Bilim Dergisi*, *12*(2), 18-29.

Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., ve Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *44*(2), 247-265. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.005

Chen, S.-Loong., ve Cheng, C.-Pang. (2017). Influence of failure probability due to parameter and anchor variance of a freeway dip slope slide—A case study in Taiwan. *Entropy*, *19*(8), 431.

Chen, X., Zhang, L., Chen, L., Li, X., ve Liu, D. (2019). Slope stability analysis based on the Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *78*(6), 4451-4463. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1413-4

Clayton, C., Jackson, A., Price, J., Bidwell, A., ve Elmo, D. (2020). Case study: Analysis of a highwall toppling failure and development of a successful mine re-entry plan using RS2, RocFall and Dan-W at a coal mine in Canada. *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, 383-398.

Cruden, D. M., ve Varnes, D. J. (1996). Landslides: İnvestigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. *Transportation research board special report*, *247*.

Çağlan, D., Tosun, L., AVCI, S. O., TURUNÇ, O., ve KANAAT, G. (2016). Şamlı (Balıkesir) Demir Madeni Doğu Ocağı Batı Şevlerini Oluşturan Kaya Kütlelerinin Duraylılık Değerlendirmesi. *Geological Engineering Journal/Jeoloji Mühendisligi Dergisi*, *40*(1).

Çetin, T., ve Erzin, Y. (2016). Developing a Computer Program for Slope Stability Analysis. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *12*(3), 569-577.

Deere, D. U., ve Miller, R. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering.

Deliveris, A. V, Zevgolis, I. E., ve Koukouzas, N. C. (2016). Numerical modelling of slope stability in open pit lignite mines: A comparative study. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, *50*(2), 671-680.

Duncan, J. M., ve Wright, S. G. (1980). The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Engineering geology*, *16*(1-2), 5-17.

Duncan, Wright, S. G., ve Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley ve Sons.

Emir, E. (2017). *Kaya Mekaniği Ders Notları*.

Erçıkdı, B., Cihangir, F., ve Kesimal, A. (2006). Düzlemsel kaymanın oluştuğu bir kireçtaşı ocağında güvenlik katsayılarının belirlenmesi: Örnek bir uygulama. *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, *19*(2), 121-129.

Erdoğan, B. (1982). Bitlis Masifi'nin Avnik (Bingöl) Yöresinde Jeolojisi ve Yapısal Özellikleri. *EÜ Yerbilimleri Fakültesi, Doçentlik Tezi*.

Erdoğan, B., ve Dora, O. Ö. (1983). Geology and Genesis of the Apatite—Bearing Iron Deposits of the Bitlis Massif. *Bulletin of Geological Society of Turkey*, *26*, 133-144.

Ertuğrul, B. (2016). *Konya Ilgın Linyit Sahası Şev Stabilite Analizi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eskikaya, Ş., Karpuz, C., Hindistan, M. A., ve Tamzok, N. (2005). Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı. *Basım, TMMOB-Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara*, 4-5.

Fellenius, W. (1936). Calculation of stability of earth dam. *Transactions. 2nd Congress Large Dams, Washington, DC, 1936*, *4*, 445-462.

Fırıncıoğlu, B. S. (2018). *An investigation on the application of two and three dimensional limit equilibrium analyses in slope stability* [Yüksek Lisans Tezi]. Hacettepe Üniversitesi.

Fredj, M., Hafsaoui, A., Boukarm, R., Nakache, R., ve Saadoun, A. (2019). Numerical Modelling of Slope Stability in Open Pit Phosphate Mines, Algeria: A Comparative Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *221*, 12020.

Ghazaly, Z., Abdul Rahim, M., Chee Jee, K. A., Isa, N. F., ve Sofri, L. A. (2016). Landslide simulation using limit equilibrium and finite element method. *Materials Science Forum*, *857*, 555-559.

Goodman, R. E. (1976). Toppling of rock slopes. *Proc. Speciality Conference on Rock Engineering for Foundation and Slopes*, 201-234.

Gökoğlu, Ö. (2015). *Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Griffiths, D. V, ve Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, *49*(3), 387-403.

Gündoğdu, B. (2011). *Relations Between Pore Water Pressure, Stability and Movements in Reactivated Landslides* [Master of Science]. Middle East Technical University.

Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B., ve Curran, J. (2010). *A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation*.

Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B., ve Curran, J. H. (2005). *The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Brown criterion*.

Hammouri, N. A., Malkawi, A. I. H., ve Yamin, M. M. A. (2008). Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *67*(4), 471-478.

Helvacı, C. (1984). Bitlis Masifi Avnik (Bingöl) Yöresindeki Zengin Demir Yataklarının Oluşumu. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, *8*(1), 11-15.

Hoek, ve Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, *106*(9), 1013-1035. https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90766-x

Hoek, E. (1999). Putting numbers to geology—An engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *32*(1), 1-19.

Hoek, E., ve Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.

Hoek, E., ve Bray, J. W. (1977). Rock Slope Engineering, 2nd. *Edn., The Institute of Mining and Metallurgy, London*, *527*.

Hoek, E., ve Brown, E. T. (1988). *The Hoek-Brown failure criterion–a 1988 update*. Toronto, Canada: Proc. 15th Can. Rock Mech. Symp.

Hoek, E., Kaiser, P., ve Bawden, W. (1995). Strength of rock and rock masses, Chap 8. *Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam*, 84-98.

Hoek, E., Kaiser, P. K., ve Bawden, W. F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*. CRC Press.

Hong, K., Han, E., ve Kang, K. (2017). Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *9*(4), 702-708. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.05.001

Hu, Y., Ren, F., Ding, H., Fu, Y., ve Tan, B. (2019). 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*.

Huang, C.-C., ve Tsai, C.-C. (2000). New Method for 3D and Asymmetrical Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *126*(10), 917-927. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:10(917)

Huvaj, N., ve Oğuz, E. A. (2018). Probabilistic Slope Stability Analysis: A Case Study. *Sakarya University Journal of Science*, 1-1. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.430032

Hynes-Griffin, M. E., ve Franklin, A. G. (1984). *Rationalizing the seismic coefficient method*. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab.

ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), Testing and Monitoring:974-2006. *Testing and Monitoring*, 628-628.

Janbu, N. (1954). Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden, 1954*, *3*, 43-49.

Janbu, N. (1973). Slope stability computations. *Publication of: Wiley (John) and Sons, Incorporated*.

Janbu, N., Bjerrum, L., ve Kjaernsli, B. (1956). *Soil mechanics applied to some engineering problems*. Norwegian Geotechnical Institute.

Kabuya, J. M., Simon, R., Carvalho, J., ve Haviland, D. (2020). *Numerical back-analysis of highwall instability in an open pit: A case study*. 937-952. https://doi.org/10.36487/acg_repo/2025_62

Kadakci Koca, T., ve Koca, M. Y. (2020). Comparative analyses of finite element and limit-equilibrium methods for heavily fractured rock slopes. *Journal of Earth System Science*, *129*(1). https://doi.org/10.1007/s12040-019-1314-3

Karaman, K. (2011). Taşönü (Trabzon-Araklı) Kalker Ocağındaki Şevlerin Duraylılık Açısından İncelenmesi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.

Karpuz, C., ve Hindistan, M. A. (2006). *Kaya mekaniği: İlkeleri, uygulamaları*. TMMOB Maden Mühendisler Odası.

Keskin, M. Ö. (2008). Çukurova yöresi kuvarsit işletmelerinde bilgisayar destekli şev dizaynı ve şev stabilite analizleri. *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi*, *256*.

Kezer, S. (2019). *Katı atık sahalarında şev stabilitesi*. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kılıç, R. (1996). *Kaya mekaniği ders notları*. Ankara: Ankara Üniversitesi.

Kızıl, M. S., ve Köse, H. (1995). Açık İşletmelerde Şev Stabilitesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, 254*.

Köse, H., ve Kahraman, B. (1999). *Kaya Mekaniği, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 3*. Baskı.

Li, Y., ve Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology*, *340*, 67-83.

McCombie, P., ve Wilkinson, P. (2002). The use of the simple genetic algorithm in finding the critical factor of safety in slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, *29*(8), 699-714.

McQuillan, A., Bar, N., ve Yacoub, T. (2021). *On the comparison of 2D and 3D stability analyses of an anisotropic slope*. The Evolution of Geotech:25 Years of Innovation.

Morales, T., Uribe-Etxebarria, G., Uriarte, J. A., ve de Valderrama, I. F. (2004). Geomechanical characterisation of rock masses in Alpine regions: The Basque Arc (Basque-Cantabrian basin, Northern Spain). *Engineering Geology*, *71*(3-4), 343-362. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00160-1

Morgenstern, N. R. u, ve Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, *15*(1), 79-93.

Moudabel, O. A. M. (2013). *Slope stability case study by limit equilibrium and numerical methods*. Oklahoma State University.

Nasvi, M. C. M., ve Krishnya, S. (2019). Stability Analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) Using Finite Element and Limit Equilibrium Methods. *Indian Geotechnical Journal*. https://doi.org/10.1007/s40098-019-00357-7

Norrish, N. I., ve Wyllie, D. C. (1996). Rock slope stability analysis. *Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board Special Report, 247*, 391-425.

Özdoğan, M. V., ve Deliormanlı, A. H. (2015). *Açık Maden Ocaklarında Oluşan Şev Duraysızlıklarının İzlenmesinde Yersel Lazer Tarama Tekniklerinin (TLS-LiDAR) Kullanımı*.

Özkan, F. S. (2018). Ünlüpınar (Kelkit-Gümüşhane) Yöresindeki Kireçtaşlarının Doğal Yapı Taşı olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *MT Bilimsel, 13*(13), 37-62.

Özşen, H., ve Özkan, İ. (2013). *TKİ-GLİ Ilgın Linyit Açık Ocağı batı şevlerinde oluşan gerilim çatlaklarında oluşan deformasyonların izlenmesi ve zamana bağlı matematiksel modellenmesi*.

Panthee, S., Singh, P. K., Kainthola, A., ve Singh, T. N. (2016). Control of rock joint parameters on deformation of tunnel opening. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *8*(4), 489-498.

Park, H., ve West, T. R. (2001). Development of a probabilistic approach for rock wedge failure. *Engineering Geology*, *59*(3-4), 233-251.

Petterson, K. E. (1955). The early history of circular sliding surfaces. *Geotechnique*, *5*(4), 275-296.

Piteau, D. R., ve Martin, D. C. (1982). Mechanics of rock slope failure. *Third Int. Conf. on Stability in Surface Mining. Brawner CO Ed., Vancouver*, 113-171.

Piteau, D. R., ve Peckover, F. L. (1978). Engineering of rock slopes. *Landslides analysis and control*, *176*, 192-228.

Rabie, M. (2014). Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *HBRC Journal*. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.10.002

Rachmad, L., Aryanda, D., ve Daroji, M. (2020). Back-analysis of in-pit dump slope failure and remediation results at Bara Anugrah Sejahtera open pit coal mine, Indonesia. *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, 1059-1068.

Ren, S., Tao, Z., He, M., Pang, S., Li, M., ve Xu, H. (2020). Stability analysis of open-pit gold mine slopes and optimization of mining scheme in Inner Mongolia, China. *Journal of Mountain Science*, *17*(12), 2997-3011.

Rocscience Inc. (2020a). *2D Limit equilibrium slope stabilty analysis* (9.01). Rocscience.

Rocscience Inc. (2020b). *3D Limit equilibrium slope stability analysis* (3.008). Rocscience.

Rocscience Inc. (2020c). *Graphical and statistical analysis of orientation data.* (8.009).

Rocscience Inc. (2020d). *RS2 Finite Element Analysis for Excavations and Slopes* (v 11.005).

Rocscince Inc. (2004). *A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique*. RocNews.

Sagaseta, C. (1986). On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *19*(4), 261-266.

Sağır, E. (2016). *Homojen sonlu şevlerde topuk kayması durumunda kırılma yüzeylerinin optimizasyonu*. Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sarma, S. K. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, *23*(3), 423-433.

Shafiei Ganjeh, R., Memarian, H., Khosravi, M. H., ve Mojarab, M. (2019). A comparison between effects of earthquake and blasting on stability of mine slopes: A case study of Chadormalu open-pit mine. *Journal of mining and Environment*, *10*(1), 223-240.

Sharifzadeh, M., Sharifi, M., ve Delbari, S. M. (2010). Back analysis of an excavated slope failure in highly fractured rock mass: The case study of Kargar slope failure (Iran). *Environmental Earth Sciences*, *60*(1), 183-192. https://doi.org/10.1007/s12665-009-0178-2

Singh, R., Umrao, R. K., ve Singh, T. N. (2014). Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: Conventional and numerical approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *73*(3), 845-857.

Sonmez, H., ve Ulusay, R. (2002). A discussion on the Hoek-Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri*, *26*(1), 77-99.

Sonmez, H., Ulusay, R., ve Gokceoglu, C. (1998). A practical procedure for the back analysis of slope failures in closely jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(97)00335-5

Spencer. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, *17*(1), 11-26.

Spencer, E. (1973). Thrust line criterion in embankment stability analysis. *Geotechnique*, *23*(1), 85-100.

Stead, D., ve Wolter, A. (2015). A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002

Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*, *12*(1), 1-33.

Sun, S., Pang, B., Hu, J., Yang, Z., ve Zhong, X. (2021). Characteristics and mechanism of a landslide at Anqian iron mine, China. *Landslides*, 1-15.

Taherynia, M. H., Koopialipoor, M., Azizzadeh, A., Fahimifar, A., ve Ghyasvand, S. (2021). Investigation of Failed Slopes Based on a New Method of Back Analysis in Rock Masses: A Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-15.

Tanrıseven, E. N. (2012). *Stability investigation of Eti Copper Mine tailings dam using finite element analysis*. https://open.metu.edu.tr/handle/11511/21933

TDTH Web Arayüzü. (2021, Ekim 30). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml

Terzaghi, K., Peck, R. B., ve Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley ve Sons.

Turner, M. J., Clough, R. W., Martın, H. C., ve Topp, L. J. (1956). Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. https://doi.org/10.2514/8.3664

Ullah, S., Khan, M. U., ve Rehman, G. (2020). A Brief Review of the Slope Stability Analysis Methods. *Geological Behavior (GBR)*, *4*(2), 73-77Volume.

Ulusay, R. (2001). Jeoteknik Etütler için Veri Toplama ve Değerlendirme Teknikleri. İçinde *Konulu Eğitim Seminerinin Kaynak Yayına Ek Notlar, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Vakfı, Ankara*.

Ulusay, R. (2010). Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler (Practical Information for Geotechnical Applications-Updated-Expanded 5th Edition). *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş ve Genişletilmiş*, *5*.

Ünal, E., Özkan, İ., ve Ulusay, R. (1992). Characterization of weak, stratified and clay-bearing rock masses. *Rock Characterization: ISRM Symposium, Eurock'92, Chester, UK, 14–17 September 1992*, 330-335.

Wyllie, D. C., ve Mah, C. (2004). *Rock slope engineering*. CRC Press.

Xu, N., Zhang, J., Tian, H., Mei, G., ve Ge, Q. (2016). Discrete element modeling of strata and surface movement induced by mining under open-pit final slope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *88*, 61-76.

Yang, X.-L., ve Yin, J.-H. (2004). Slope Stability Analysis with Nonlinear Failure Criterion. *Journal of Engineering Mechanics*. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2004)130:3(267)

Yılmaz, O. (1975). Cacas bölgesi (Bitlis masifi) kayaçlarının petrografik ve stratigrafik incelenmesi: Türkiye Jeol. *Kur. Bült*, *18*(1), 33-40.

Yilmaz, O. (1971). *Etude pétrographique et géochronologique de la région de Cacas (partie méridionale du massif de Bitlis, Turquie)-Anatolie*.

Yiming, W., Siame, T., ve Bowa, V. M. (2019). Slope stability of the middle stack of an open pit. *International Journal of Scientific ve Technology Research*, *8*(04).

Zebarjadi Dana, H., Khaloo Kakaie, R., ve Rafiee, R. (2018). Effects of geometrical and geomechanical properties on slope stability of open-pit mines using 2D and 3D finite difference methods. *Journal of Mining and Environment*, *9*(4), 941-957. https://doi.org/10.22044/jme.2018.7149.1562

Zhang, F., Yang, T., Li, L., Wang, Z., ve Xiao, P. (2019). Cooperative monitoring and numerical investigation on the stability of the south slope of the Fushun west open-pit mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *78*(4), 2409-2429. https://doi.org/10.1007/s10064-018-1248-z

Zhu, D. Y., Lee, C. F., ve Jiang, H. D. (2003). Generalised framework of limit equilibrium methods for slope stability analysis. *Geotechnique*, *53*(4), 377-395.

Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., ve Lewis, R. W. (1975). Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*. https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.671

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler / **Personal Information**	
Soyad, Ad / **Surname, Name**	Varol, Ogün Ozan
Web sayfası / **Web Page** (Research Gate, Academia, etc.)	

Eğitim Bilgileri / **Education**

Derece / **Degree**	Kurum / **Institution**	Mezuniyet Yılı / **Year of Graduation**
Yüksek Lisans / **MS**	Dicle Üniversitesi	2018
Lisans / **BS**	Dicle Üniversitesi	2013
Lise / **High School**	Mili Piyango Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi / **Work Experience**

Dönem (Yıl) / **Period (Year)**	Şirket, Kurum/ **Company, Institution**	Görev / **Enrollment**
2016-Devam Ediyor	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil / **Foreign Languages**

İngilizce

Yayınlar / **Publications**

1.Guler, S., Türkmenoğlu, Z. F., ve **Varol, O. O.** (2021). Thermal shock and freeze-thaw resistance of different types of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 137*, 104545.

2.**Varol, O. O**., Ayhan, M. ve Akın, M. (2021). Kaya kütle makaslama dayanımının geri analiz yöntemi ile belirlenmesi: Bir vaka analizi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 60 (3), 137-145. DOI: 10.30797/madencilik.890586

3.Türkmenoğlu, Z. F., Özvan, A., Erdeve Özvan, E., Türkmenoğlu, M., Akkaya, İ., **Varol, O. O.**, Tapan, M. ve Kahraman, E. (2020). Yüksek Sıcaklığın Doğal Taşların Petrografik, Parlaklık ve Pürüzlülük Özelliklerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35 (4), 937-948. DOI: 10.21605/cukurovaummfd.868785

4.**Varol, O. O.**, Ayhan, M. ve Oyan, V. (2018). Van İli Kuzeyinde Yer Alan Ortaç Volkanik Agregalarda ASR Etkilerinin İncelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9 (2), 817-827.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Ogün Ozan VAROL		
Öğrenci No	18807501		
Ana Bilim Dalı	Maden Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☐	Doktora ☒
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Prof. Dr. Mustafa AYHAN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Prof. Dr. Mutluhan AKIN		
Tez Başlığı	Avnik (Bingöl) Apatitli Demir Açık Ocak İşletmesindeki Şev Duraylılığının Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	154		
Raporlama Tarihi	14/06/2022		
Benzerlik Oranı (%)	%16		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 154 sayfalık kısmına ilişkin, 14/06/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından TURNİTİN isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☐Kaynaklar hariç

☐Alıntılar hariç/dâhil

☒(Her şey dahil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir,
gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ogün Ozan VAROL
Tarih:16/06/2022
İmza

Danışman Adı, Soyadı: Prof. Dr. Mustafa AYHAN İmza:
Tarih:16/06/2022

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Mustafa AYHAN İmza:
Tarih:16/06/2022