



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



UZUNAYAK TABANYOLU GALERİSİ
TAVAN TABAKA KONTROLÜNDE
KULLANILAN KAYA SAPLAMA VE DEMİR
BAĞ DAVRANIŞLARININ SAYISAL
ANALİZLER İLE BELİRLENMESİ

Mehmet MESUTOĞLU

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Mesutoğlu tarafından hazırlanan “Uzunayak Tabanyolu Galerisi Tavan Tabaka Kontrolünde Kullanılan Kaya Saplama ve Demir Bağ Davranışlarının Sayısal Analizler ile Belirlenmesi” adlı tez çalışması 02/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Melih GENİŞ

Danışman

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Üye

Prof. Dr. Alparslan TURANBOY

Üye

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Üye

Doç. Dr. Bilgehan KEKEÇ

İmza


.....

.....

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez alışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından 116M698 nolu 1001 projesi ile ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (SÜ-BAP) tarafından 161009 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.


Mehmet MESUTOĞLU
Tarih: 02.09.2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

UZUNAYAK TABANYOLU GALERİSİ TAVAN TABAKA KONTROLÜNDE KULLANILAN KAYA SAPLAMA VE DEMİR BAĞ DAVRANIŞLARININ SAYISAL ANALİZLER İLE BELİRLENMESİ

Mehmet MESUTOĞLU

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

2019, 286 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN
Prof. Dr. Melih GENİŞ
Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY
Prof. Dr. Alparslan TURANBOY
Doç. Dr. Bilgehan KEKEÇ

Kaya saplama tahkimat teknolojisi, dünyanın birçok bölgesindeki yeraltı kömür madenciliği endüstrisinde birincil tahkimat sistemi haline gelmiştir. Bu çalışma, Türkiye Kömür İşletmeleri-Garp Linyitleri İşletmesi-Ömerler Yeraltı Ocağı-A6 uzunayak panosu tabanyolları için kaya saplama tahkimat sisteminin tasarımından oluşmaktadır. Genel olarak üç aşamadan oluşan bu çalışmanın birinci aşamasında, kömür ve çevre kayalar için kütle ve malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik saha ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, elde edilen veri tabanı yardımıyla, görgül tahkimat tasarımı yaklaşımları ve Phase2 (v6.0) programı ile iki boyutlu sayısal modelleme çalışmaları yapılarak, kaya saplama tahkimat sisteminin ön tasarımı gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise, ön tasarım sonuçları kullanılarak FLAC 3D (v6.0) programı ile nihai modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Model çalışmaları, uzunayak taban yollarının kazısı ve ayak ilerlemesi olmak üzere iki farklı durum için oluşturulmuştur. Her iki durum için de demir bağ tahkimat ve 3 farklı tipte seçilen kaya saplama tahkimatı için modeller oluşturulmuş ve model sonuçları analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, Ömerler yeraltı kömür madeninde kullanılan demir bağ tahkimat sisteminin, kaya saplama tahkimat sistemine göre daha fazla deformasyonlara ve tavan tabakalarından kaynaklanan gerilmelere maruz kaldığı belirlenmiştir. Trapez kesitli galeriler için yapılan sayısal çözümlerinde Swellex, Reçineli ve Kablo lu kaya saplama yöntemlerinin tabanyolu ve topukta duraylılık açısından oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak Ömerler yeraltı kömür maden sahasına uygun kaya saplama tahkimat tasarımı önerisinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Demir bağ, FLAC 3D programı, kaya saplama, sayısal modelleme, uzunayak yöntemi, yeraltı kömür madenciliği, yeraltı tahkimat sistemleri.

ABSTRACT

PhD THESIS

DETERMINATION OF ROCK BOLT AND STEEL SET BEHAVIORS USED IN CONTROL OF LONGWALL TAILGATE ROOF STRATA BY NUMERICAL ANALYSIS

Mehmet MESUTOĞLU

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering

Advisor: Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

2019, 286 Pages

Jury

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Prof. Dr. Melih GENİŞ

Prof. Dr. M. Kemal GÖKAY

Prof. Dr. Alparslan TURANBOY

Assoc. Prof. Dr. Bilgehan KEKEÇ

Rock bolting has become the primary support system in the underground coal mining industry in many regions around the world. This study consists of the design of rock bolt support system for the tailgates of Turkey Coal Enterprises - Garp Lignite Enterprise-Ömerler underground coal mines-A6 longwall panel. In the first phase of this study, which consists of three stages, in-situ and laboratory studies were carried out to determine the rock mass and material properties of coal and wall rocks. In the second stage, with the help of the obtained database, empirical support design approaches and Phase2 (v6.0) program which two dimensional numerical modeling studies were carried out for the determine of preliminary design of the rock bolt support system. In the last stage, final modeling studies were performed with FLAC 3D (v6.0) program by using preliminary design results. The model studies were created for two different situations: excavation of longwall tailgates and coal face advancement. In both cases, models were created for the steel set support and 3 different types of rock bolt support, and the model results were analyzed. As a result of these analyzes, it was determined that the steel set support system used in Ömerler underground coal mine was exposed to more deformations and stresses caused by roof stratas than the rock bolt support system. In the numerical analysis for trapezoidal roadway, it was found that Swellex, Resin and Cable rock bolts were quite successful in terms of stability in pillars and tailgates. As a result of the studies, a rock bolt support design was proposed for Ömerler underground coal mine site.

Keywords: Steel set, FLAC 3D software, rock bolts, numerical modeling, longwall, underground coal mining, underground support systems.

ÖNSÖZ

Bu doktora tez çalışmasının tespitinde ve oluşumunda bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen, çalışmaların tüm aşamalarında bana ışık olup yol gösteren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İhsan ÖZKAN'a sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmalarım süresince, değerli katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Melih GENİŞ (BEÜ) ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Kemal GÖKAY'a teşekkür ederim.

Doktora tez savunma sınavıma jüri olarak katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Alparslan TURANBOY (NEÜ) ve Sayın Doç. Dr. Bilgehan KEKEÇ'e değerli görüşleri ve yapıcı eleştirilerinden dolayı teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 116M698 nolu 1001 projesi (Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı) ile doktora tezimde gerçekleştirdiğim çalışmaları desteklediği için teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) 2214/A-Yurtdışı Doktora Araştırma Bursu Programı kapsamında 7 ay süre ile İspanya-Politeknik Katalunya Üniversitesi'nde gerçekleştirdiğim, doktora tezi ile ilgili araştırma çalışmalarımı desteklediği için teşekkür ederim.

Doktora tez projesi kapsamında, 161009 numaralı doktora tez projesi programı ile verdiği destek için Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) teşekkür ederim.

Politeknik Katalunya Üniversitesi'nde (Barselona/İspanya) gerçekleştirdiğim doktora tezi ile ilgili araştırma çalışmalarında, değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, özellikle kaya mekaniğinde sayısal modelleme konusunda kendimi geliştirmeme önemli katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Alfonso Rodriguez DONO'ya teşekkür ederim.

Barselona Üniversitesi'nde görev yapan Sayın Prof. Dr. Gloria Furdada BELLAVISTA'ya doktora tez çalışmalarına değerli katkılarından ötürü teşekkür ederim.

Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Genel Müdürü Sayın Ömer BAYRAK'a, müdür yardımcıları ve kurumun diğer çalışanlarına, TKİ-Garp Linyitleri İşletmesi'nin genel müdürü Sayın Ercan İPEK'e ve müdür yardımcılarına, saha çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve bu çalışmaların her anında, destekleriyle katkıda bulunan işletme mühendisleri Sayın Ahmet SANCAK ve Sayın Hakan BOZKURT'a, ayrıca adını saymadığım, işletmenin diğer mühendisleri ve çalışanlarına sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Maden Mühendisi Sayın Meriç KAYA'ya ve bölümümüzde görev yapan laboratuvar teknikeri Sayın İbrahim KÜÇÜK ve tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her anında, aldığım kararlarda ve yaptığım işlerde, destekçim olan maddi ve manevi her zorluğu memnuniyetle göğüsleyen değerli ailem, babam Ahmet MESUTOĞLU, annem Fazilet MESUTOĞLU ve kardeşlerim Betül GÜL, Belgin KAVUKÇU ve Miraç MESUTOĞLU'na sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen, hayat arkadaşım, yoldaşım ve meslektaşım Özgül Çimen MESUTOĞLU'na sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet MESUTOĞLU
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Problemin Tanımı..... | 1 |
| 1.2. Çalışmanın Amacı..... | 2 |
| 1.3. Çalışmanın İçeriği | 3 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 4 |
| 2.1. Kaya Saplamları Hakkında Genel Bilgiler ve Tarihçe..... | 4 |
| 2.2. Kaya Saplamlarının Sınıflandırılması | 6 |
| 2.2.1. Mekanik kaya saplamları | 7 |
| 2.2.1.1. Kama-yarık başlıklı kaya saplamları..... | 8 |
| 2.2.1.2. Genişleme başlıklı kaya saplamları..... | 9 |
| 2.2.2. Dolgulu kaya saplamları | 10 |
| 2.2.2.1. Çimento dolgulu kaya saplamları | 10 |
| 2.2.2.2. Reçine dolgulu Kaya Saplamları..... | 11 |
| 2.2.3. Sürtünmeli kaya saplamları..... | 12 |
| 2.2.3.1. Split-set kaya saplamları | 12 |
| 2.2.3.2. Swellex kaya saplamları..... | 14 |
| 2.2.4. Birleşik tip kaya saplamları..... | 15 |
| 2.2.5. Kablolü kaya saplamları..... | 16 |
| 2.2.6. Kendinden matkaplı (delici bitli) kaya saplamları | 19 |
| 2.2.7. Fiberglas kaya saplamları..... | 20 |
| 2.2.8. Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamları | 21 |
| 2.2.8.1. Konik kaya saplamları | 23 |
| 2.2.8.2. D-Bolt kaya saplamları | 24 |
| 2.2.8.3. Garford kaya saplaması | 24 |
| 2.2.8.4. Roofex kaya saplaması | 25 |
| 2.3. Kaya Saplamlarının Yardımcı Donanımları | 26 |
| 2.3.1. Plakalar | 27 |
| 2.3.2. Somun ve rondelalar | 28 |
| 2.3.3. Tavan bağı ve çelik kuşaklar | 28 |
| 2.3.4. Çelik hasırlar | 28 |
| 2.3.5. Püskürtme beton | 29 |
| 2.4. Kaya Saplamları Tahkimat İlkeleri | 30 |
| 2.4.1. Doğal arazi kemeri ve tavan kemeri oluşturma ilkesi..... | 34 |
| 2.4.2. Askıya alma ilkesi..... | 35 |
| 2.4.3. Kiriş oluşturma ilkesi..... | 35 |
| 2.4.4. Kilitleme (anahtarlama) ilkesi | 36 |
| 2.4.5. Sürtünme etkisi ilkesi..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.6. Sıkıştırma etkisi ilkesi..... | 37 |
| 2.4.7. Radyal yönde açıklık yüzeyine içsel basınç verme ilkesi..... | 37 |
| 2.5. Kaya Saplamları ile Tahkimat Tasarım Yaklaşımları..... | 38 |
| 2.5.1. Ampirik (görgül) yaklaşımlar | 38 |
| 2.5.1.1. Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı | 39 |
| 2.5.1.2. Panek tasarımı yaklaşımı | 41 |
| 2.5.1.3. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımı..... | 43 |
| 2.5.1.4. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı | 45 |
| 2.5.1.5. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1983,1986)..... | 47 |
| 2.5.1.6. RMR sistemine bağlı Venkateswarlu tasarımı yaklaşımı (1986) | 50 |
| 2.5.1.7. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1990)..... | 51 |
| 2.5.1.8. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995)..... | 62 |
| 2.5.1.9. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımı (2013)..... | 63 |
| 2.5.2. Arazi ölçümlerine dayalı tasarım yaklaşımları | 67 |
| 2.5.2.1. Kısa kapsüllü çekme testleri | 68 |
| 2.5.2.2. Gerilme ölçerli kaya saplamları | 71 |
| 2.5.2.3. Sonik ekstensometreler ve Sırtutmazlar (telltale)..... | 72 |
| 2.5.3. Analitik yaklaşımlar..... | 73 |
| 2.5.3.1. Teorik yaklaşımlar | 74 |
| 2.5.3.2. Fiziksel modelleme | 75 |
| 2.5.3.3. Sayısal (nümerik) modelleme | 76 |
| 2.6. Kaya Saplamları ile İlgili Önceki Çalışmalara Ait Özet Bilgiler..... | 83 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 96 |
| 3.1. Genel..... | 96 |
| 3.2. TKİ-Garp Linyitleri İşletmesi Hakkında Genel Bilgiler..... | 96 |
| 3.2.1. Kuruluş ve tarihçe | 96 |
| 3.2.2. Coğrafi konum | 96 |
| 3.2.3. İklim ve bitki örtüsü..... | 97 |
| 3.2.4. Genel jeoloji ve stratigrafi | 98 |
| 3.2.4.1. Stratigrafik jeoloji | 98 |
| 3.2.4.2. Yapısal jeoloji | 99 |
| 3.2.4.3. Tektonizma | 100 |
| 3.2.5. Kömürün yapısı ve kömür damarını çevreleyen kayaçların jeoteknik özellikleri | 100 |
| 3.2.6. Ömerler yeraltı işletmesi ve üretim yöntemi | 101 |
| 3.2.7. Ömerler yeraltı ocağında kullanılan tahkimat sistemleri ve özellikleri | 103 |
| 3.2.8. Ömerler yeraltı işletmesi panolarında üretim şekli | 106 |
| 3.3. Kaya Kütle ve Malzeme Özelliklerini Belirleme Çalışmaları | 107 |
| 3.3.1. Yeraltı sondaj çalışmaları | 108 |
| 3.3.2. Kömür arınından blok alma çalışmaları..... | 110 |
| 3.3.3. Schmidt çekici ile kaya sertliği belirleme çalışmaları | 114 |
| 3.3.4. Nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri..... | 117 |
| 3.3.5. Konverjans ve taban kabarması ölçümleri..... | 119 |
| 3.3.6. Plaka yükleme deneyleri | 122 |
| 3.3.7. Kaya kütle sınıflama çalışmaları..... | 124 |
| 3.3.8. Birincil arazi gerilmeleri belirleme çalışmaları | 129 |
| 3.3.9. Kömür bloklarından laboratuvar deney örneklerinin hazırlanması | 130 |

| | |
|--|------------|
| 3.3.10. Kaya malzemesinin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler .. | 135 |
| 3.3.11. Suda dağılma dayanımı belirleme deneyleri..... | 135 |
| 3.3.12. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı belirleme deneyleri..... | 136 |
| 3.3.13. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri..... | 137 |
| 3.3.14. Tek eksenli deformabilite özelliklerini belirleme deneyleri..... | 138 |
| 3.3.15. Direkt makaslama dayanımı deneyleri | 140 |
| 3.4. Kaya Saplama Tahkimat Sistemi Ön Tasarım Çalışmaları..... | 142 |
| 3.4.1. Görgül tasarım yaklaşımları ile yapılan ön tasarım çalışmaları | 145 |
| 3.4.2. Sayısal modelleme çalışmaları ile yapılan ön tasarım çalışmaları | 145 |
| 3.4.2.1. İki boyutlu model geometrisi ve model ağının oluşturulması | 146 |
| 3.4.2.2. Model davranışı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi | 147 |
| 3.4.2.3. Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi ve modelleme aşamaları | 150 |
| 3.4.2.4. Yük dağılımının belirlenmesi ve tahkimatın oluşturulması..... | 150 |
| 3.5. FLAC 3D Programı ile Modelleme Çalışmaları..... | 151 |
| 3.5.1. Model geometrisi ve ağının oluşturulması..... | 152 |
| 3.5.2. Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi..... | 154 |
| 3.5.3. Model davranışı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi | 154 |
| 3.5.4. Göçük malzemesinin özelliklerinin ve davranışının belirlenmesi..... | 155 |
| 3.5.5. Modelin çalıştırılması ve tahkimat ünitelerinin modele tanıtılması | 157 |
| 3.5.5.1. Demir bağ tahkimat sisteminin modelde tanıtılması | 159 |
| 3.5.5.2. Kaya saplama tahkimat sisteminin modelde tanıtılması | 159 |
| 3.5.5.3. Ayak içi tahkimat ünitelerinin modelde tanıtılması..... | 161 |
| 3.5.6. Model geometrisinde izleme bölgelerinin yer tespiti ve tanımlanması | 161 |
| 3.5.7. Modelde yapılan varsayımlar ve kısıtlamalar | 164 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA | 165 |
| 4.1. Arazi çalışmaları ile elde edilen bulgular | 165 |
| 4.1.1.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri belirleme çalışmaları..... | 165 |
| 4.1.1.2. Schmidt Çekici ile kaya sertliği belirleme çalışmaları | 168 |
| 4.1.1.3. Nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri..... | 170 |
| 4.1.1.4. Birincil arazi gerilmelerini belirleme çalışmalarına ait bulgular | 172 |
| 4.1.1.5. Konverjans ve taban kabarması ölçümleri..... | 176 |
| 4.1.1.6. Plaka yükleme deneyleri | 179 |
| 4.1.2. Laboratuvar çalışmalarına ait bulgular | 180 |
| 4.1.2.1. Yoğunluk-birim hacim ağırlık-doğal nem içeriği-gözeneklilik (boşluk oranı) ve ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri..... | 180 |
| 4.1.2.2. Suda dağılma dayanımı belirleme deneyleri..... | 182 |
| 4.1.2.3. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri..... | 182 |
| 4.1.2.4. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı belirleme deneyleri..... | 184 |
| 4.1.2.5. Tek eksenli basma dayanımı belirleme deneyleri..... | 184 |
| 4.1.2.6. Tek eksenli deformabilite özelliklerini belirleme deneyleri | 190 |
| 4.1.2.7. Direkt makaslama deneyleri | 191 |
| 4.2. Kaya Saplama Tahkimatı Ön Tasarım Çalışmalarına Ait Bulgular..... | 193 |
| 4.2.1. Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen kaya saplama tahkimat ön tasarımına ait bulgular | 194 |
| 4.2.1.1. Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımına bağlı görgül çözümler | 195 |
| 4.2.1.2. Panek tasarım yaklaşımına bağlı görgül çözümler..... | 196 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.1.3. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımına ait görgül zmler... | 198 |
| 4.2.1.4. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımına ait görgül zmler..... | 199 |
| 4.2.1.5. RMR sistemine bağlı nal tasarım yaklaşımına ait görgül zmler | 199 |
| 4.2.1.6. RMR Sistemine Bağlı Vantekaswarlu Tasarım Yaklaşımına ait zmler | 201 |
| 4.2.1.7. RMR sistemine bağlı nal Tasarım yaklaşımına ait zmler.... | 202 |
| 4.2.1.8. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımına ait zmler..... | 204 |
| 4.2.1.9. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımına ait zmler..... | 205 |
| 4.2.2. 2 Boyutlu sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen kaya saplaması tahkimat n tasarımına ait bulgular | 207 |
| 4.2.3. n tasarım sonuçlarına ait genel değerlendirme..... | 208 |
| 4.3. FLAC 3D Programı ile Gerçekleştirilen Sayısal Analiz Sonuçları | 213 |
| 4.3.1. Demir bağ tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları..... | 214 |
| 4.3.1.1. Demir bağ tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları..... | 214 |
| 4.3.1.2. Demir bağ tahkimatlı taban yollarında uzunayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 222 |
| 4.3.2. Reçineli kaya saplaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları | 230 |
| 4.3.2.1. Reçineli kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 230 |
| 4.3.2.2. Reçineli kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 236 |
| 4.3.3. Swellex kaya saplaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları..... | 242 |
| 4.3.3.1. Swellex kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 242 |
| 4.3.3.2. Swellex kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 247 |
| 4.3.4. Kablolu kaya saplaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları..... | 254 |
| 4.3.4.1. Kablolu kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 254 |
| 4.3.4.2. Kablolu kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları | 259 |
| 4.3.5. Genel Değerlendirme | 264 |
| 4.3.5.1. Tünel şeklindeki durum için genel değerlendirme | 264 |
| 4.3.5.2. Uzunayak kazısı durum için değerlendirme | 268 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 274 |
| 5.1. Sonuçlar | 274 |
| 5.2. neriler | 277 |
| KAYNAKLAR | 278 |
| ÖZGEÇMİŞ | 286 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|-------------|--|
| A_{gt} | : Çeliğin birim uzama miktarı |
| B | : Galeri açıklığı |
| b | : Sıkışma faktörü |
| c | : Kohezyon |
| C_b | : Kaya saplaması ankraj kapasitesi |
| C_P' | : Maden direği yük taşıma kapasitesi |
| D | : Çap |
| D_e | : Eşdeğer kazı açıklığı |
| E | : Elastisite modülü |
| E_i | : Kaya malzeme elastisite modülü |
| E_m | : Kaya kütle elastisite modülü |
| E_0 | : Sekant elastisite modülü |
| E_t | : Tanjant elastisite modülü |
| G | : Makaslama modülü |
| H | : Galeri açıklığı üzerindeki örtü tabakası kalınlığı |
| h_t | : Kaya yükü yüksekliği |
| h_b | : Kaya saplaması üzerine gelen kaya yükü yüksekliği |
| h_f | : Yenilme yüksekliği |
| h_{im} | : Yalancı tavan yüksekliği |
| h_{im} | : Yalancı tavan yüksekliği |
| $I_{a(50)}$ | : Anizotropi indeksi |
| $I_{s(50)}$ | : Nokta yükü dayanım indeksi |
| I_{d1} | : I. döngü sonunda suda dağılmaya karşı dayanım indeksi |
| I_{d2} | : II. döngü sonunda suda dağılmaya karşı dayanım indeksi |
| JS | : Süreksizlikler arası mesafe |
| J_v | : Hacimsel eklem sayısı |
| K | : Yığın modülü |
| L_b | : Kaya saplaması uzunluğu |
| L'_f | : Saplama ankraj yenilme yükü |
| L'_y | : Saplama çeliği yenilme yükü |
| n | : Süreksizlik takım sayısı |
| Pa | : Pascal |
| P_x | : Yatay birincil gerilme |
| P_y | : Yatay birincil gerilme |
| P_z | : Düşey birincil gerilme |
| P_x' | : Yatay ikincil gerilme |
| P_y' | : Yatay ikincil gerilme |
| P_z' | : Düşey ikincil gerilmesi |
| S_b | : Kaya saplaması aralığı |
| S_r | : Kaya saplaması setleri arası mesafe |
| S_x | : x yönündeki ortalama süreksizlik aralığı |
| S_x | : y yönündeki ortalama süreksizlik aralığı |
| S_x | : z yönündeki ortalama süreksizlik aralığı |
| X_i | : Sondaj karotu boyu |
| σ | : Gerilme |
| σ_h | : Yatay gerilme |

| | |
|-----------------|--|
| σ_v | : Düşey gerilme |
| σ_w | : Su basıncı |
| σ_c | : Tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_{ci} | : Kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_{cm} | : Kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı |
| σ_e | : Çeliğin akma dayanımı |
| σ_m | : Çeliğin kesme dayanımı |
| σ_t | : Çekme dayanımı |
| τ | : Kesme gerilmesi |
| ν | : Poisson oranı |
| ε | : Birim deformasyon |
| ε_m | : İzin verilen en yüksek birim deformasyon |
| ρ | : Yoğunluk |
| γ | : Birim hacim ağırlık |
| ϕ | : İçsel sürtünme açısı |
| ν | : Poisson oranı |
| Φ_b | : Saplama çeliği çapı |

Kısaltmalar

| | |
|---------|--|
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri |
| ASTM | : Amerika Test ve Materyal Topluluğu |
| BF | : Bağ Faktörü |
| ESR | : Kazı Tahkimat Oranı |
| FLAC 3D | : Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions |
| FISH | : FLAC programlama dili |
| GLİ | : Garp Linyitleri İşletmesi |
| GSI | : Jeolojik Dayanım İndeksi |
| ISRM | : Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu |
| KBS | : Kömür Blok Alma Sahası |
| LVDT | : Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü |
| M-RMR | : Yeniden Düzenlenmiş Kaya Kütle Puanı |
| RF | : Tahkimat Faktörü |
| RMR | : Kaya Kütle Puanı |
| RQD | : Kaya Kalite Göstergesi |
| SCR | : Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı |
| SEPT | : Kısa Kapsüllü Çekme Testi |
| SR | : Yapısal Özellik Puanı |
| TKİ | : Türkiye Kömür İşletmeleri |
| TL | : Türk Lirası |
| TTK | : Türkiye Taşkömürü Kurumu |
| TUBİTAK | : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu |
| UCS | : Tek Eksenli Basınç Dayanımı |

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

İnsanoğlunun çağdaş yaşamında elektrik enerjisi büyük bir öneme sahiptir. Kömür bu konuda alternatif bir enerji kaynağıdır ve ülkemizin birçok yerinde yeraltı ve yerüstü üretim şekilleriyle kömür rezervlerinden üretim yapılmaktadır. Yapılan bu üretim çalışmalarında, birinci öncelik olan çalışma alanının duraylılığı ile birlikte üretim çalışmalarının hızlı ve verimli olması da oldukça önem arz etmektedir.

Son yıllarda yeraltı kömür maden ocaklarında, özellikle uzunayak üretim yönteminde uygulanan mekanize kazı sistemi, yüksek tonajlarda kömür üretimine olanak sağlamaktadır. Ancak bu durum, çok sayıda maden galerisinin hazırlanmasına neden olmaktadır. Bu galerilerin klasik tahkimat sistemi olan demir bağlar ile tahkim edilmesi, galerilerin günlük ilerleme hızlarını (m/gün), birim maliyetleri (TL/m) ve emniyetlerini özellikle çok zayıf, zayıf ve orta sağlamlıktaki kaya kütle ortamlarında olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Yeraltı kömür madeni ocaklarında açılan galerilerin ilerleme hızlarının (m/gün) artırılmasına, birim maliyetlerinin (TL/m) azaltılmasına ve aktif tahkimat yeteneği ile emniyetlerinin artırılmasına olanak sağlayan kaya saptamaları tahkimat sistemi, dünyanın birçok bölgesindeki yeraltı kömür madenlerinde ana tahkimat elemanı olarak başarıyla uygulanmaktadır. Ülkemizde genel olarak yeraltı metal madenlerinde ve tünel çalışmalarında kullanım alanı olan kaya saptamaları tahkimat aracı, yeraltı kömür maden galerilerinde dikkate alınacak bir ölçekte kullanılmamaktadır.

İlk uygulamaları 1930'lu yıllara dayanan kaya saptamaları, son 50 yıldır dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif tahkimat sistemi olarak tanımlanan kaya saptamaları, pasif tahkimat sistemi olarak bilinen demir bağlara nazaran daha hızlı kurulmakta, kaya kütlesi ile daha hızlı etkileşime girerek tahkimat görevine başlamakta, daha az deformasyonlara izin vermekte ve güvenli bir şekilde daha hızlı galeri sürülmesine izin vermektedir. Bütün bu üstünlüklerine rağmen ülkemizdeki yeraltı kömür madeni ocaklarında kullanılmamasının yaygın sebepleri; uygulama sistematığı üzerinde yeteri kadar çalışılmamış olması ve kaya saptamalarının fiziksel olarak kaya içerisine yerleştirilmesinden dolayı, galeri içerisinde demir bağların yarattığı gibi emniyet açısından görsel bir psikolojik etki yaratamamasıdır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Kaya saplaması tahkimat aracının ülkemiz yeraltı kömür madeni galerilerinde kullanılabilirliğini ortaya koymak ve konu hakkında bilgi birikimi oluşturmak, bu doktora tez çalışmasının temel amacını oluşturmaktadır. Bu amaç çerçevesinde, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) kurumunun Kütahya ili, Tavşanlı ilçesinde yer alan Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ) bünyesinde bulunan Ömerler Yeraltı İşletmesi, çalışma sahası olarak belirlenmiştir.

Kalın kömür damarına sahip olan Ömerler Yeraltı Maden Ocağında kömür üretimi mekanize üretim yöntemleri ile devam etmektedir. Üretim yöntemi olarak arkadan göçertmeli ve geri dönümlü uzunayak yöntemi ile çalışan işletmede, üretim çalışmalarının gerçekleştiği ayak içerisinde hidrolik yürüyen tahkimat sistemi kullanılırken ana nakliye galerilerinde ve panolara ait taban yollarında demir bağ tahkimat sistemi kullanılmaktadır.

Doktora tez çalışmaları kapsamında, Ömerler Yeraltı Maden Ocağı A6 uzunayak panosuna ait taban yollarında, gelecekte uygulanması planlanan kaya saplaması tahkimat sisteminin ampirik (görgül) yaklaşımlarla tasarlanması, tasarım sonuçlarının 2 boyutlu Phase2 programında modele dönüştürülmesi, elde edilen ön tahkimat tasarımı sonuçlarının 3 boyutlu FLAC 3D programında nihai modele dönüştürülmesi ve analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca Ömerler yeraltı maden ocağında taban yollarında kullanılan demir bağ tahkimat sisteminin de FLAC 3D programında modellenerek kaya saplamaları ile arasında bir performans analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, arazi ve laboratuvar ortamında sahaya ait kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirlemek için kaya mekaniği çalışmaları yapılmış ve bu çalışmalardan elde edilen kaya malzeme verileri, kaya kütle verilerine dönüştürülüp sayısal modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ömerler yeraltı ocağına ait uzunayak panolarının taban yolları at nalı galeri kesiti ile açılmıştır. Panolarda gerçekleştirilen üretim çalışmalarında özellikle ayak başlarında kullanılan tahkimat ünitelerinin ilerletilmesi işlemlerinde at nalı galeri kesiti ocak çalışanları için problem olmakta ve yine taban yollarında önemli ölçüde yer işgal eden birçok materyal (makine kontrol ekipmanları, hava, su boruları vb.) nedeniyle galeri kesitinin faydalı kesit alanı işletme çalışanları ve yetkililerince tatminkâr bulunmamaktadır. Bu nedenle, taban yollarına ait galeri kesitinin at nalı kesitten trapez kesite dönüştürülmesi planlanmaktadır. Bu sebep doğrultusunda, Ömerler yeraltı ocağı

A6 uzunayak panosunun FLAC 3D programı ile sayısal modellenmesi çalışmaları panonun taban yollarının trapez kesitte açılması durumu için gerçekleştirilmiştir.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Doktora tez çalışmasının giriş bölümünde, tez çalışmasına konu olan problemin tanımı, çalışmanın amacı ve içeriği hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Kaynak araştırması bölümünde, kaya saplamalarına ait detaylı bilgiler sunulmuş ve kaya saplamalarının tahkimat prensipleri açıklanmıştır. Yine bu bölümde, kaya mekaniği alanında sayısal modelleme çalışmaları ile ilgili genel bilgiler sunulmuş, tez çalışmasında kullanılan Phase2 ve FLAC 3D programları ile ilgili ön bilgiler verilmiştir. Son olarak, doktora tez çalışması ile ilgili, geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar hakkında özet bilgiler sunulmuştur.

Materyal ve yöntem bölümünde, çalışma sahası olan Ömerler yeraltı maden ocağı hakkında genel bilgiler ile ocağın üretim yöntemi ve tahkimat sistemi hakkında bilgiler verilmiştir. Sahada ve laboratuvar ortamında yapılan kaya mekaniği çalışmaları ile ilgili izlenen yöntem ve kullanılan materyaller hakkındaki detaylı bilgilere bu bölüm içeriğinde yer verilmiştir. Kaya saplaması tahkimat sisteminin Ömerler yeraltı maden ocağı A6 uzunayak panosu için sayısal modelleme yöntemi ile tasarlanması çalışmalarında, Phase2 ve FLAC 3D programlarıyla gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarında izlenen yöntem ve modelleme aşamalarına ait bilgiler de bu bölümde yer almaktadır.

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde, sahada ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen, Ömerler yeraltı kömür maden ocağındaki kayaçların, kütle ve malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalara ait bulgular sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmalardan elde edilen veri tabanı yardımı ile görgül tasarım yaklaşımları ve 2 boyutlu Phase2 programından elde edilen kaya saplaması tahkimat sistemi ön tasarım sonuçları da bu bölümde yer almaktadır. Ön tasarım sonuçlarının FLAC 3D programında modele dönüştürülmesi ile elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ait analizler yine bu bölümde sunulmuştur.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde, doktora tez çalışmaları boyunca gerçekleştirilen kaya saplaması tahkimat tasarım sonuçlarına ait bilgiler demir bağ ile kaya saplamalarının Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosu için performanslarının karşılaştırılması ve tez sonucunda yapılan öneri ve değerlendirmeler belirtilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaya Saplamları Hakkında Genel Bilgiler ve Tarihçe

Yeraltı kazılarının tasarımında önemli bir bileşen olan ve geçen yüzyılın ortasından bu yana ana zemin iyileştirme elemanı olarak kullanılan kaya saplamları, istatistiklere göre maden ve inşaat mühendisliği alanlarında kullanılan en yaygın tahkimat metotlarından biridir. Kaya saplamları ile tahkimat, tüm madencilik tarihinde zemin kontrolü alanındaki en önemli teknolojik gelişmelerden biri olarak gösterilebilir. Farklı jeolojik koşullar altında uygulanabilir olması ve sadece maliyeti düşürmede değil, sürekli gelişen teknolojik şartlara da uyum sağlaması kaya saplamlarını özellikle madencilik ve inşaat alanlarında önemli bir yere getirmektedir (Agioutantis ve ark., 2001).

Kaya saplaması, en basit anlamıyla içi dolu veya boş şekilli çelik çubuktan üretilen, kaya kütlesi içerisine gerdirmeli, gerdirmesiz veya ön gerdirmeli olarak yerleştirilen bir kaya sağlamlaştırma elemanıdır. Genel olarak madencilik ve inşaat mühendisliği çalışma alanlarında özellikle ana nakliyat yolları ve tünellerde üretim ve kazı boşluklarında, şev duraylılığının sağlanmasında, sağlamlaştırma ve tahkimat elemanı olarak uzun yıllardır etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Kaya saplamları, eklem ve çatlakların genişlemesini engellemek ve kaya kütlelerinin kendi kendini destekleme yeteneğini artırmak suretiyle sağlamlaştırma ve tahkimat işlevlerini yerine getirmektedir (Kaiser ve ark., 1992).

Kaya saplamlarının tarihçesi incelendiğinde, bilinen ilk saplama türlerinin ilkel ağaç saplama şeklinde olduğu ve bu ağaç saplamların Romalılar tarafından şehrin altındaki tünellerde kullanıldığı sanılmaktadır (Scott, 1983). 18. yüzyılda İngiltere’de ve Kuzey Galler’deki maden ocaklarında, askıda kalan kaya kütlelerinin göçmesini engellemek amacıyla çelik saplamların kullanıldığı bilinmektedir. 1918 yılında, Polonya’da bulunan bir kömür ocağı için anayol tahkimatında kullanılan kaya saplamları ile ilgili ilk yazılı rapor hazırlanmıştır (Yücel, 2007).

1925-1930 yılları arasında ABD’de kurşun cevheri üreten bir yeraltı metal madeninde ilk sistematik uygulama gerçekleştirilmiştir. (Şerifoğlu, 1985). 1930’lu yılların sonunda, Güney Dakota’da bulunan bir madencilik şirketi, ocak bacasının tavanını desteklemek için kaya saplamlarını tavana açılan deliklere çimentolu harçla birlikte yerleştirmişlerdir (Ataman, 1978). Önceki yıllarda belirli bir sistematik yöntem

ile uygulanmayan kaya saplamaları, planlı ve düzenli bir şekilde ilk defa 1936 yılında kullanılmaya başlamıştır (Panek ve McCormick, 1973).

1938 yılında, ABD'nin Montana eyaletine bağlı bir kasabadaki yeraltı bakır ocaklarında havalandırma galerilerinde tahkimat elemanı olarak kaya saplamaları kullanılmıştır (Yaralı, 1991). 1944 yılında, Güney Galler'de bulunan bir kömür ocağında, yaklaşık 18 metre uzunluktaki bir anayol tavanı sistematik olarak kamalı tip kaya saplamalarla tahkim edilmiştir (Ataman, 1978).

2. Dünya Savaşına kadar kaya saplamaları, dünyanın birçok bölgesinde denenmiş ve basit bir şekilde uygulanmıştır. Ancak madencilikte literatür anlamında ilk kez duyurulması 1943 yılında olmuştur. Wiegel adlı bir araştırmacının "Tavan Kontrolünde U Demiri" başlıklı makalesi "Engineering and Mining" adlı dergide yayınlanmış ve bu makale geniş ilgi görmüştür. Ancak 2. Dünya Savaşının ülkelerde yaratmış olduğu çelik sıkıntısı, kaya saplaması uygulamalarını 1947 yılına kadar geciktirmiştir (Yücel, 2007). Bu tarihten sonra ABD Maden Dairesi'nin bu konu ile ilgilenerek gerek teorik, gerekse uygulamalı araştırmalar yapmaya başlamış olması nedeniyle, kaya saplamaları uygulamalarında büyük gelişmeler olmuştur (Ataman, 1978). 1950-1960 yılları arasında, yeni bir saplama türü olan reçineli saplamalar geliştirilmiştir. 1967'de reçineli saplamalar, genişleyebilen başlıklı tiplerle beraber kullanılmış, 1969'da çift ankrajlı ve 1970'de de pompalanabilir harçlı saplamalar bunu izlemiştir (Ünal, 1977).

1970'li yıllardan sonra birçok araştırmacı, farklı kayaç birimlerine yerleştirilen kaya saplamaları hakkında araştırmalar yapmışlardır. Bu yıllardan sonra ülkemizde de kaya saplamasına olan ilgi artmış olup, ilk uygulamaları Uludağ Volfram maden ocağında başlatılmıştır. Son 20 yıldır özellikle karayolu inşaatlarında ve yeraltı metal madeni galerilerinde, kaya saplaması uygulamaları artmıştır. Yeraltı kömür madeni ocaklarındaki uygulamaları ise günümüzde maalesef istenen düzeyde değildir. Dünyanın birçok bölgesinde, yeraltı kömür madenlerinde yaygın bir şekilde kullanılan kaya saplamalarının, ülkemizde az kullanımının en önemli nedenleri arasında; yeraltı açıklıklarına yerleştirilen kaya saplamalarının fiziksel olarak görülememesinin çalışanlar üzerinde yarattığı olumsuz etki ve yeterince tanınmaması sayılabilir (Özkan, 2010).

Kaya saplamalarının dünya genelinde yaygın olarak kullanılmasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Ünal ve Ergür, 1990);

- i. Her türlü kazı geometrisinde kolaylıkla kullanılabilir.
- ii. Diğer tahkimat türlerine göre uygulaması daha kolaydır.
- iii. Maliyeti göreceli olarak diğer tahkimat sistemlerine nazaran daha ucuzdur.

- iv. Uygulama tamamen sistematik olarak mekanize edilebilir.
- v. Diğer tahkimat sistemleri ile uyumlu olarak kullanılabilir.
- vi. Geçici veya kalıcı tahkimat amacıyla kullanılabilir.
- vii. Yeni kazılan açıklıktaki tahkimatsız bölgeye işçi girmeden tahkimat hızla yapılabilir.
- viii. Açıklık emniyeti kısa zamanda sağlandığı için kazı çalışmalarına hız verilebilir.
- ix. Kazı, kesit alanını daraltmaz. Bu durum, havalandırma ve nakliye sistemleri için önemlidir.
- x. Tahkimat, ocak yangınlarından ve nemden etkilenmez.
- xi. Kaya saptamalarının teknolojisi sürekli gelişmelere açıktır.

2.2. Kaya Saptamalarının Sınıflandırılması

Yeraltında yapılan kazı işlemleri, kaya kütlelerinin kendi içerisinde barındırdıkları doğal gerilmeleri değişime uğratmaktadır. Bunun sonucu olarak doğal gerilmeler, tabakaların uğradıkları deformasyonlara göre yeni bir dağılım sergilemektedirler. Bu deformasyonlara tepki olarak kaya kütleleri yükleri meydana gelmektedir. Demir bağ veya ağaç tahkimat uygulamaları ile gerçekleştirilen madencilik faaliyetlerinde, kaya kütlelerinin yüküne karşı bir direnç oluşturmak ve bu yükü dengelemek amaçlanmaktadır.

Kaya saptamaları ile tahkimatta ise durum daha farklıdır. Kaya saptamaları kullanılarak, tavan sağlamlaştırılmakta ve tabakalarının kendi kendini tutabilme yeteneğine katkı yapılmaktadır. Kaya saptamaları kaya kütlelerinin bir parçasıymış gibi davranarak, kaya kütlelerinin zaten var olan direncini harekete geçirir ve onu sağlamlaştırır. Bunun yanında, püskürtme beton ve çelik iksa gibi destekleme elemanları da kaya kütlelerinde oluşacak hareketleri sınırlandırarak kaya saptamalarına yardımcı olur (Yücel, 2007). Zayıf, karmaşık kaya ortamlarında açılan kazı boşluklarının sağlamlaştırılmasında, genellikle uygulanabilen tek sistem kaya saptamalarıyla sağlamlaştırma sistemidir (Reed ve ark., 1993).

Kaya saptamaları literatürde yaygın olarak adlandırıldıkları şekilde, yapılmış oldukları malzemelere (çelik, ağaç ve fiberglas vb.), çalışma prensiplerine (aktif ve pasif etkileşim), delik içerisinde tutturulma esaslarına (nokta, kısmi ve tüm ankraj) ve delik içerisine yerleştirilme şekline (gerdirmeli, gerdirmesiz ve ön gerdirmeli) göre

sınıflandırılmaktadır. Kaya saptamaları, kaya kütlesi ile arasındaki etkileşim mekanizmasına ve işlevlerine göre aşağıda belirtilen tiplere ayrılır.

- Mekanik kaya saptamaları;
 - Kama-yarık başlıklı kaya saptamaları
 - Genişleme başlıklı kaya saptamaları
- Dolgulu kaya saptamaları;
 - Çimento dolgulu kaya saptamaları
 - Reçine dolgulu kaya saptamaları
- Sürtünmeli kaya saptamaları;
 - Split-Set kaya saptamaları
 - Swellex kaya saptamaları
- Birleşik tip kaya saptamaları
- Kablolü kaya saptamaları
- Kendinden matkaplı (delici bitli) kaya saptamaları
- Fiberglas kaya saptamaları
- Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saptamaları
 - Konik kaya saptamaları
 - D-Bolt kaya saptamaları
 - Garford kaya saptamaları
 - Roofex kaya saptamaları

Her bir saptama tipinin kendine özgü amaçları, avantajları ve dezavantajları vardır. Uygulanacağı yeraltı açıklığındaki birçok faktör, seçilecek olan kaya saptaması tipini belirleyen faktörlerdir. Yukarıda sunulan kaya saptaması türlerine ait detaylı açıklamalar devam eden bölümlerde sunulmuştur.

2.2.1. Mekanik kaya saptamaları

Mekanik kaya saptamaları, hızlı kurulumları nedeniyle birçok yeraltı maden ocağında, geçici tahkimat amacı ile kullanılan en eski saptama türüdür. Bu saptamalar, uygulama esnasında saptamanın ucu ile kaya arasında mekanik kilitleme yoluyla bir sondaj deliğine sabitlenirler. Mekanik bir kaya saptamasının teknik verileri, akma yükü, yenilme yükü ve nihai uzama miktarı olarak sayılabilir. Çizelge 2.1'de mekanik kaya saptamaları için kullanılan en yaygın teknik veriler ve saptama çapları belirtilmiştir (Li,

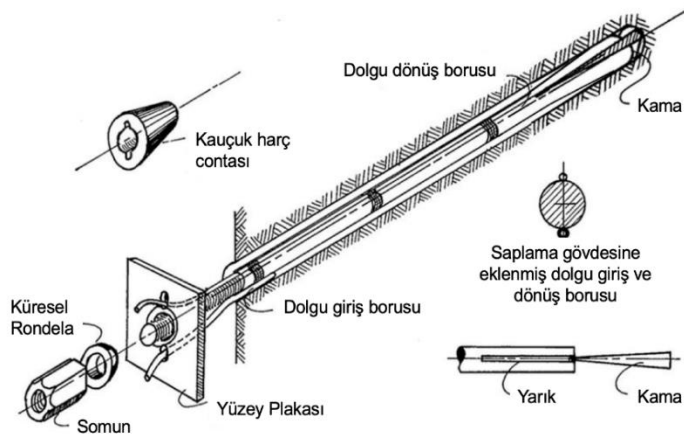
2017a). Mekanik kaya saplamaları, kama-yarık başlıklı ve genişleme başlıklı olmak üzere iki türe ayrılmaktadır.

Çizelge 2.1. Mekanik kaya saplamalarının tipik teknik verileri (Li, 2017a)

| | |
|---|----------------|
| Temsili Saplama çapları | 16-19-20-22 mm |
| Çelik özellikleri | |
| Akma dayanımı (R_e) | 300-690 MPa |
| Çekme dayanımı (R_m) | 500-895 MPa |
| Birim uzama (A_{gt}) | % 2-% 10 |
| 20 mm çaplı saplamanın teknik özellikleri | |
| Akma yükü | 94-217 kN |
| Yenilme yükü | 157-281 kN |

2.2.1.1. Kama-yarık başlıklı kaya saplamaları

Kama-yarık başlıklı kaya saplamaları, kaya kütlesi içerisine yerleştirilmesi aşamasında, Şekil 2.1’de görülen saplama gövdesinin ucunda yer alan kama delik tabanına temas edinceye kadar saplama sondaj deliğine itilir (Şekil 2.1). Daha sonra saplama ucuna bir darbe uygulanır. Böylelikle saplamanın uzak ucundaki kama, deliğin çeperini genişletmeye zorlar. Saplama gövdesinin ucundaki kamanın deliğin dibine temas edebilmesi için, açılan deliğin saplamanın uzunluğundan daha kısa olması gerekmektedir. Uygulamanın sonunda, saplamanın ucu, kaya ve saplama ucu arasındaki sürtünme direnci vasıtasıyla deliğe kilitlenir (Li, 2017a).



Şekil 2.1. Kama-yarık başlıklı kaya saplaması (Hoek ve Brown, 1980)

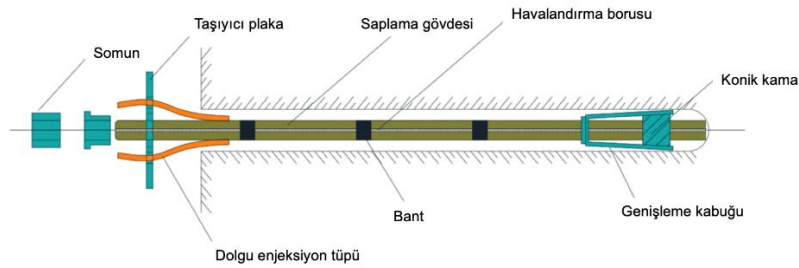
Kama-yarık başlıklı kaya saplamalarının yük taşıma kapasiteleri oldukça düşüktür. 20 mm çapında bir nervürlü saplama çeliği için maksimum 30-50 kN arasında

yük taşıma kapasitesi mevcuttur (Li, 2017a). Düşük yük taşıma kapasitesi ve güvenilir olmayan ankraj sistemi nedeniyle günümüzde kullanımı yaygın değildir.

2.2.1.2. Genişleme başlıklı kaya saptamaları

Mekanik saptamaların en yaygın olarak kullanılan türü, genişleme başlıklı kaya saptamasıdır. Kama-yarık başlıklı saptamalara göre daha detaylı ve karmaşık olduğu söylenebilir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi plaka ve somun, saptama çubuğu ve genişleme başlığı olmak üzere üç parçadan oluşurlar (Song ve ark., 2017). Ayrıca genişleme başlığı, destek somun, başlık kabuğu ve konik kama olmak üzere üç parçadan oluşur. Bu tür saptamaların pek çok türü vardır. Bu türler arasındaki farklar, sadece genişleme başlığının boyu, kabuk yaprakları üzerindeki pürüzlülüklerin şekli ve derinliği, kesik koninin koniklik açısı ve kabuk yapraklarının sayısı gibi değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Uysal, 2001).

Genişleme başlıklı kaya saptamaları, orta sert ve sert kaya özelliklerine sahip kaya kütlelerinde başarı ile kullanılabilir. Bunun dışında, zayıf kayalarda kullanılabilen özel türleri olduğu gibi, başlık kısmı plastik birleşimli olan türleri de mevcuttur (Yücel, 2007). Bir ucu kancalı olan özel tipleri ise havalandırma borusu veya buna benzer sistemlerin tavana asılmasında kullanılırlar (Uysal, 2001).



Şekil 2.2. Genişleme başlıklı kaya saptaması (Song ve ark., 2017)

Genişleme başlıklı kaya saptamalarının kurulum aşamalarında, saptama gövdesi döndürülerek, konik kama sondaj deliğinin başına doğru çekilir bu sırada genişleme kabuğu yaprakları genişletilir ve delik içi cidarına doğru baskı uygulanır. Böylece genişleme kabuğu ile delik içi cidar arasında bir temas gerilimi oluşturulur. Saptamanın performansı, genişleme kabuğu ile kaya ara yüzeyinde oluşan temas gerilimi ile doğru orantılıdır. Özellikle sert kayalarda ankraj, saptama çubuğuna yeterince yüksek bir tork

uyguladığı sürece başarılı olabilir. Bununla birlikte, zayıf kayalarda, tork çok yüksek olduğunda, genişleme kabuğun temas ettiği kayanın ezilme riski vardır. Böyle bir durumda saplamanın ankrajı önemli ölçüde azalacaktır. Bu yüzden, özellikle zayıf kayalarda saplama gövdesine uygulanan torka önemli ölçüde dikkat gösterilmelidir (Li, 2017a).

2.2.2. Dolgulu kaya saplamları

Dolgulu kaya saplama, bir sondaj deliği içerisine, saplama çubuğu uzunluğu boyunca çimento veya reçine ile kapsüllenmiş, tamamen dolgulu, nervürlü bir kaya saplama temsil etmektedir. Genellikle zayıf veya yüksek basınç altındaki kaya ortamlarında açılan kazı boşluklarının uzun süreli olarak tahkim edilmesine kullanılan saplamalardır (Li, 2017a). Reçine dolgular, daha çok ön gerdirmeli olarak yerleştirilirken, çimento dolgulu saplama ise ön gerdirmesiz olarak yerleştirilen saplamalardır. Her iki dolgu türü ile uygulanan saplama hem geçici hem de nihai sağlamlaştırma önlemleri sayesinde her türlü kaya ortamlarında kullanılabilirler (Kılıç, 1997).

Dolgulu kaya saplama; farklı kalitelerde nervürlü çeliklerden imal edilir. Bu nedenle, farklı tedarikçilerden alınan dolgulu kaya saplama dayanım ve deformasyon kapasitesi açısından farklılıklar gösterebilir. Dünya üzerinde kullanılan tipik dolgulu kaya saplama teknik verileri ve nervürlü saplama demiri çapları Çizelge 2.2’de özetlenmiştir (Li, 2017a).

Çizelge 2.2. Dolgulu kaya saplama teknik verileri (Li, 2017a)

| | |
|---|----------------------|
| Temsili Saplama çapları | 16-20-22-24-25-32 mm |
| Çelik özellikleri | |
| Akma dayanımı (R_e) | 380-500 MPa |
| Çekme dayanımı (R_m) | 540-620 MPa |
| Birim uzama (A_{gt}) | %9 %13 |
| 20 mm çaplı saplamanın teknik özellikleri | |
| Akma yükü | 119-157 kN |
| Yenilme yükü | 170-196 kN |

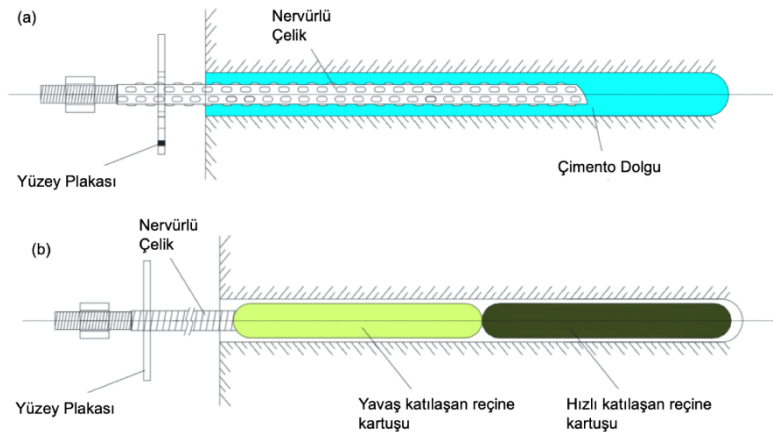
2.2.2.1. Çimento dolgulu kaya saplamları

Çimento dolgulu kaya saplama, zayıf ve çatlaklı kaya içerisinde açılan boşlukların duraylılığının sağlanmasında başarıyla kullanılmaktadır (Şekil 2.3a). Üretimi basit ve ucuz olan çimento harcının uygulamasında kullanılan yöntemler; Perfo yöntemi, Injecto yöntemi, Bergjet yöntemi ve çimento-harç kartuşu olarak sıralanabilir (Peng ve

Tang, 1984). Çimento dolgulu kaya saplamaları, genellikle kurulumdan hemen sonra gerdirilmezler. İstenirse, çimento kürlendikten sonra, örneğin kurulumdan bir hafta sonra ön gerdirme uygulanabilir. Erken ön gerdirme uygulanırsa saplama ile dolgu arasındaki bağın zarar görme riski vardır (Li, 2017a).

2.2.2.2. Reçine dolgulu Kaya Saplamaları

Reçine dolgulu saplamalar, 1960'lı yılların ortalarında Avrupa ve ABD'de kullanılmaya başlanılmıştır (Peng ve Tang, 1984). Mekanik ankrajlı kaya saplamalarının yetersiz kaldığı zayıf kayalar için tutucu ve bağlayıcı özelliği taşıyan polyester reçinelerin geliştirilmesi ile bu tür kaya saplamaları kullanım alanı bulmuştur. Reçine dolgulu kaya saplamalarında ankraj, saplama çubuğu ile delik duvarı arasına konan reçine tarafından sağlanan bağlayıcı etki ile elde edilir (Şekil 2.3b)



Şekil 2.3. (a) Çimento dolgulu kaya saplaması ve (b) reçine dolgulu kaya saplaması (Song ve ark., 2017)

Reçine dolgulu kaya saplamaları üç değişik şekilde uygulanabilir. Bunlar nokta ankrajlı, kısmen ve tam dolgulu reçineli saplamalardır (Özkan, 2010). Bu tür kaya saplamalarının üstünlükleri; ankraj kapasitelerinin yüksek olması, saplama çubuğunun yerleştirilmesi esnasında uygulanan yüksek sıkıştırma yüklerine dayanıklı olması ve kayanın dayanımına uygun özel reçine üretiminin yapılabilmesi olarak sıralanabilir. Reçine dolgulu saplamalar, kurulumlarından hemen sonra gerdirebilirler. Bunun nedeni, saplama ile kaya ara yüzeyindeki bağ, reçine karışımından kısa bir süre sonra (10-20 sn.) yeterince güçlü bir hale gelmesidir (Li, 2017a).

Sistemin en önemli dezavantajı, reçinelerin çok pahalı olması ve sıcak bölgelerde ömürlerinin sınırlı olmasıdır (Cardy ve Brown, 1993). Ayrıca reçine ve katalizör

karıştırılma işleminin dikkatli yapılması ve reçinelerin yeraltı şartlarına uygunluğunun tam olarak bilinmesi gerekmektedir.

2.2.3. Sürtünmeli kaya saptamaları

Kaya saptamaları ile tahkimat uygulamalarında, Split-set ve Swellex ticari isimlerine sahip, sürtünmeli tip kaya saptamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Her iki saptama tipinde de delik içerisine yerleştirilen saptama çubuğu, kaya bünyesinde oluşacak kesme gerilmesini önleyecek sürtünme direncini ve delik cidarına karşı uygulanan radyal kuvvetleri oluştururlar. Böylece beklenen tahkimat işlevi yerine getirilmiş olurlar (Li, 2017a).

Sürtünmeli kaya saptamaları, çimento dolgulu kaya saptamalarından daha zayıf olmalarına rağmen, çabuk yerleştirilmeleri ve dolguya ihtiyaç göstermemeleri nedeniyle büyük avantajlara sahiptirler (Kılıç, 1997). Ancak bu tip kaya saptamalarının, imal edildikleri borunun ince olması ve nemli kaya koşullarında korozyona uğramaları gibi bazı dezavantajları mevcuttur (Franklin ve Dusseault, 1989; Yaralı, 1991).

2.2.3.1. Split-set kaya saptamaları

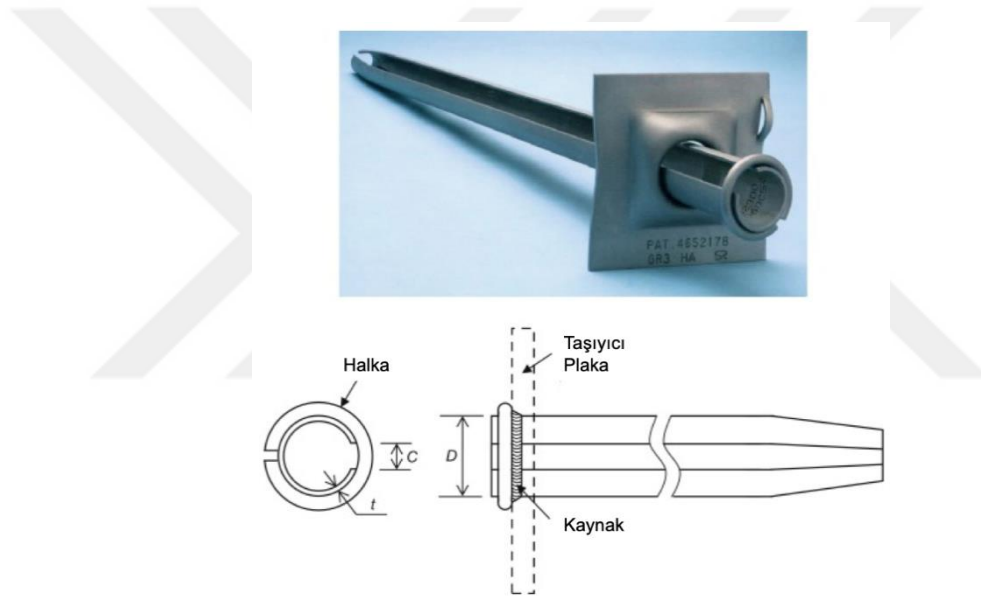
Split-set kaya saptamaları, yüksek dayanımlı çelikten ve saptama ucundaki kaynaklı halka ile kapatılmış olan katlanmış çelik sacdan yapılmıştır. Bu tür saptamalar, kendi eksenini boyunca ortadan yarılmış bir boru ve plaka olmak üzere iki parçadan oluşmaktadırlar (Şekil 2.4). Split set saptamalar, uygulama esnasında darbeli sondaj donanımı kullanılarak, saptama çapından 1-5 mm kadar daha küçük olan deliğe çakılmak suretiyle yerleştirilirler. Çakma işlemine, plaka yüzeye temas edene kadar devam edilir. Boru deliğe gönderilirken, tam uzunluktaki delik daralır ve boru tüm temas uzunluğu boyunca kaya yüzeyine karşı radyal basınç uygular. Tahkimat, saptama ile kaya yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme kuvveti ile sağlanır (Li, 2017a).

Bu tip saptamalar, zayıf, orta sağlam ve sağlam kaya yapılarında başarı ile uygulanmaktadır. Yük taşıma kapasiteleri 50 kN ile 100 kN arasındadır. Yeraltı metal madenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kömür ocaklarında ise genellikle, destekleyici tahkimat elemanları olan çelik hasır ya da çelik kuşak ile birlikte kullanılmaktadırlar. Ayrıca bu tip saptamalar, tünel ve kuyuların tahkimat işlerinde kullanılmaktadırlar.

Piyasada yer alan ve tipik Split set saplamalar olan FS33, FS39 ve FS46 kodlu Split set saplamaların boyutları ve teknik özellikleri Çizelge 2.3’de özetlenmiştir (Li, 2017a).

Çizelge 2.3. Split set kaya saplamalarının tipik teknik verileri (Li, 2017a)

| | F33 | F39 | F46 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Boyutları | | | |
| Saplama çapı, D (mm) | 33 | 39 | 46 |
| Çelik kalınlığı, t (mm) | 2.5 | 2.5 | 3 |
| Yarık genişliği, C (mm) | 13 | 16 | 22 |
| Teknik özellikleri | | | |
| Önerilen delici uç boyutu (mm) | 31-33 | 35-38 | 43-45 |
| Tipik kopma yükü (kN) | 107 | 124 | 178 |
| Nihai uzama | %16 | %16 | %16 |



Şekil 2.4. Split-set kaya saplaması (Li, 2017a)

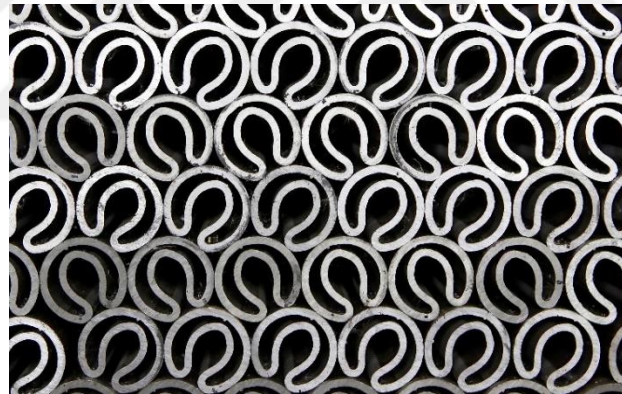
Split-set kaya saplamaları sıcaklıktan etkilenmezler, depolanmasında özel koşul istemezler, patlatmadan etkilenmezler, zamanla kaya kütleindeki hareketler ile ankraj kapasiteleri artar, yatay tabaka hareketlerine uygun deforme olurlar ve radyal gerilmeyi yaratan sürtünme kuvvetlerinde bir azalma olmaz, böylelikle tahkimat görevlerine devam ederler (Özkan, 2010).

Split-set saplamaların delik içerisindeki ankraj kapasiteleri, zamana bağlı olarak artar. Bunun nedeni; delik yüzeyinin zamana bağlı deformasyonu, süreksizlik düzlemleri boyunca oluşan makaslama kuvvetlerinden etkilenen delik yüzeyinin saplamayı sıkıştırması veya çeliğin sürtünme katsayısının korozyon ile yükselmesi şeklinde açıklanabilir (Scott, 1977).

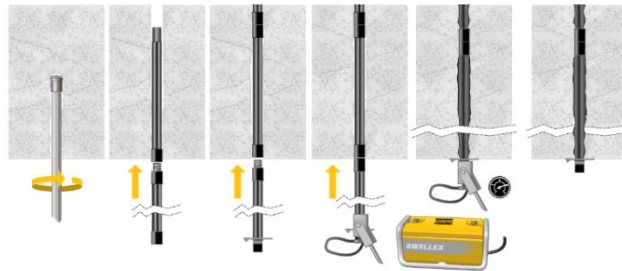
2.2.3.2. Swellex kaya saptlamaları

Şişirilebilir ya da genişletilebilir kaya saptlamaları, piyasada Swellex kaya saptlamaları adıyla tanınmaktadır. Swellex kaya saptlamaları, yüksek dayanımlı bir çelik tüp ve saptlama plakasından oluşur.

Swellex kaya saptlamaları meydana getirilirken, 2 mm kalınlığına sahip özel çelik, 41 mm çaplı tüp haline getirilir. Daha sonra hazırlanan çelik tüpe dış çapı 25.5 mm olan omega şekli (Ω) verilir (Şekil 2.5a). Saptlama, her iki ucuna kaynaklanmış olan çelik kovanlar ile kuvvetlendirilmiştir. Uygulamada saptlama için açılan delik çapı 35-40 mm olup yaklaşık 26 mm çaplı saptlama tüpü delik içerisine yerleştirilir. Delik çapından daha küçük olan saptlama tüpü basınçlı su ile şişirilir ve böylece saptlama tüpü delik cidarını sıkıca sarmış olur (Şekil 2.5b). Bu işlem yaklaşık 2 dakika sürmektedir. Saptlamanın şişirilmesi işleminde kullanılan suyun basıncı kayanın basma dayanımına bağlı olarak belirlenir (Li, 2017a).



a-Swellex kaya saptlaması kesit yüzeyi



1. Delik delinir.
2. Swellex saptlama yüklemesine başlanılır.
3. Şişirme bölümü ile yüzey plakası birlikte yüklenir.
4. Şişirme pompası bağlanır ve ekleme işi tamamlanır.
5. Tavelye edilen şişirme basıncına (300 bar) gelene kadar saptlama şişirilir.
6. Swellex saptlama yüklemesi tamamlanır.

b-Swellex kaya saptlamasının yerleştirilmesi

Şekil 2.5. Swellex kaya saptlamasının enine kesiti (a) ve yerleştirilmesi işlemi (b) (Atlas Copco., 2012)

Swellex saplamalar, delik içerisinde genişlerken, deliğin alt kısmında az miktarda boy kısalması olur. Bu durum saplamanın dışarıda kalan kısmındaki plakanın iyice tavana temasını sağlar. Saplamanın çok çatlaklı kaya kütlesi içerisinde kullanımı sonucunda oluşan radyal gerilmeler blokları birbirine kilitlerken, kil ve ayrışma zonlarında uygulanması sonucunda yine radyal gerilmeler sıkıştırma işlemi yaratarak tahkimat görevini yerine getirir (Özkan, 2010).

Son yıllarda piyasada, Swellex kaya saplamaları ile hemen hemen aynı çalışma prensiplerine sahip şişirilebilir farklı kaya saplamaları göze çarpmaktadır. Omega (Player ve ark., 2009; Li, 2017a), PEX300 (Bjurholt, 2007; Sandvik., 2015), Expanbol (Mansour., 2015) ve Python (Jennmar., 2015) bu kaya saplamalarının piyasadaki isimleridir. Swellex saplamalar ile piyasada yeni tanınan diğer tüm şişirilebilir kaya saplamaları benzer boyut ve teknik özelliklere sahiptirler Çizelge 2.4'te tipik olarak verilen 3 adet şişirilebilir kaya saplamasının boyutları ve teknik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 2.4. Tipik olarak verilen üç şişirilebilir kaya saplamasının teknik verileri (Dywidag Systems., 2015)

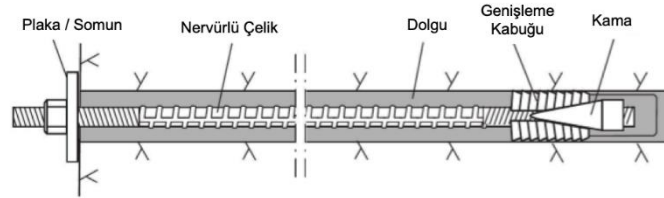
| Boyutları/Teknik Özellikleri | Saplama-1 | Saplama-2 | Saplama-3 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Saplama borusu kalınlığı, (mm) | 2 | 2 | 3 |
| Saplama çapı, (mm) | 28 | 38 | 38 |
| Orijinal çap, (mm) | 41 | 54 | 54 |
| Önerilen delici uç boyutu (mm) | 32-39 | 43-52 | 43-52 |
| Tipik kopma yükü (kN) | 110 | 160 | 240 |
| Uzama | % 10-%20 | % 10-%20 | % 10-%20 |
| Şişme basıncı, (bar) | 300 | 240 | 300 |

2.2.4. Birleşik tip kaya saplamaları

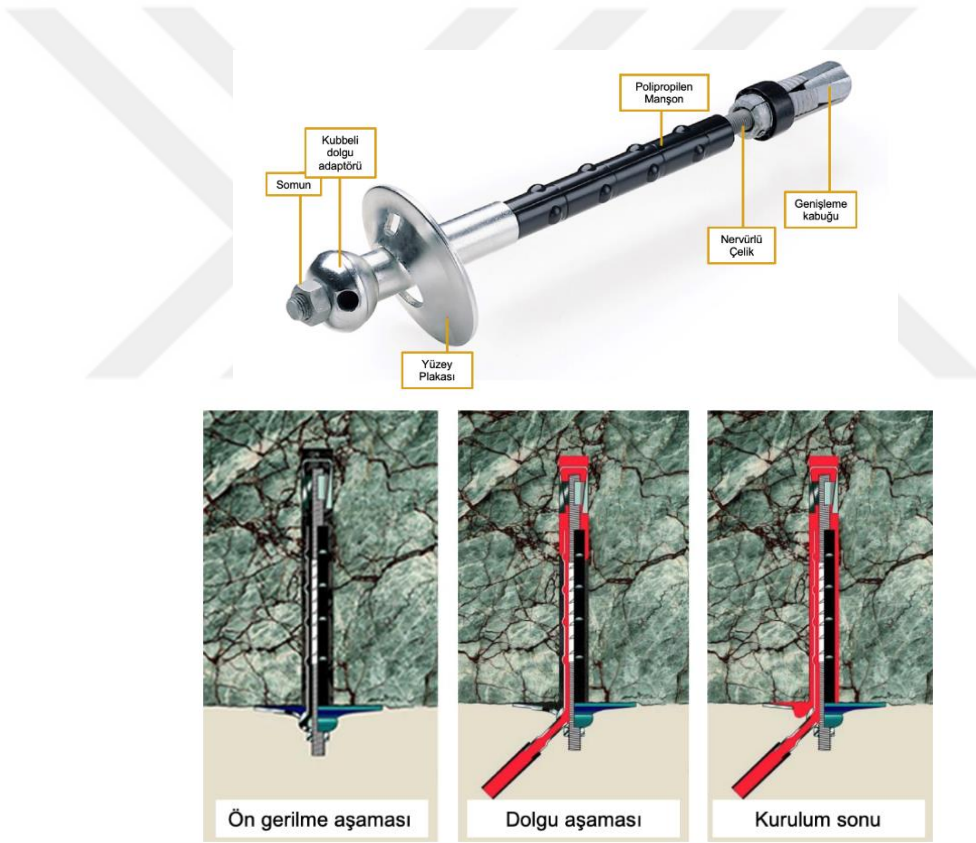
Çimento dolgulu bir kaya saplamasının, dolgu sertleşinceye kadar ön gerdirmeye tabii tutulamayacağı ilgili bölümde belirtilmişti (Bknz. Bölüm 2.2.2.1). Ancak bazı durumlarda çimento dolgulu bir kaya saplamasının ön gerdirilmesi gerekebilir. Bu durumda saplamanın nervürlü demirinin ucuna bir genişleme başlığı eklenebilir (Şekil 2.6) Bu birleşik tip kaya saplaması, kurulumdan hemen sonra ön gerdirmeye izin veren mekanik bir saplama, dolgu malzemesi sertleştirdikten sonra ise tüm uzunluğu boyunca kaya kütlesine bağlı dolgulu bir saplama işlevi görür (Li, 2017a).

Kurulumları sırasında, saplama deliğe sokulduktan sonra, saplamayı deliğe kilitlemek için genişleme kabuğu genişletilir. Ön gerdirildikten sonra çimentolu dolgu malzemesi delikten içeri pompalanır. Bu prensip ile çalışan bir birleşik tip kaya saplaması olan CT-Saplama ve bu saplamanın kurulum aşamaları, Şekil 2.7'de sunulmuştur.

CT-Saplamanın gövdesi Polipropilen manşon ile kaplanmış nervürlü çeliktir. Manşonun ana işlevi, saplama gövdesini korozyona karşı korumaktır. Manşon ayrıca, dolgunun enjeksiyonu için kanal olarak da kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Genişleme başlıklı ve çimento dolgululu kaya saplama birleşiminin bir örneği (Li, 2017a)



Şekil 2.7. CT-Saplama ve kurulum aşamaları (Dywidag Systems., 2015)

2.2.5. Kablolü kaya saplamaları

Kablolu kaya saplamaları, onlarca metreye kadar esnek uzunluklarda ve çok sayıda çelik lifler ve teller ile farklı çaplarda üretilir (Şekil 2.8). Bu tür saplama çimento veya reçine kartuşları vasıtasıyla, dolgululu bir şekilde, kaya kütlesi içerisine sabitlenirler.

Tek, çift ya da çoklu tellerden yapılmış kablolu kaya saplamaları, genellikle çimento dolgulu kapsüller ile uygulanmaktadırlar. Reçine kartuşları ise genellikle kablo uzunluğunun kısa olacağı uygulamalarda kullanılmaktadır. Kablolu saplamaların uzun olduğu durumlarda reçine kartuşların kullanımı zor olmaktadır (Li, 2017a).



Şekil 2.8. Kablolu kaya saplaması (Dywidag Systems., 2015)

Kablolu kaya saplamalarında kullanılan tel ve kablolar paslanmaz çelik veya karbon çelikten üretilmişlerdir. Kablolu saplamalar, genellikle daha ucuz olan karbon çelikten üretilirler. Paslanmaz çelik kablolar, iyi bir korozyon direncine sahiptir. Ancak maliyeti, karbon çelikten üretilen saplamalara göre daha yüksektir. Korozif ortamlarda galvanizli karbon çelikten yapılmış kablolu kaya saplamaları kullanılabilir. Galvanizli kablolarda kullanılan teller, ayrı ayrı korozyona karşı iyi koruma sağlayan bir çinko tabakası ile kaplanmıştır. Bu şekilde özel bir işlem görmemiş kablolu kaya saplamalarına düz kablolu kaya saplaması denir (Li, 2017a).

Kablolu kaya saplamalarında, eksenel taşıma kapasitesini artırmak için, teller radyal olarak genişletilebilir veya kablo uzunluğu boyunca düzenli olarak düğmelerle tutturulabilir. Kaya mühendisliği uygulamalarında kullanılan kablolu kaya saplamaları genellikle tek telli ya da yedi telli kablolardan oluşmaktadır. Çok telli kablolardaki teller, aralarındaki yük dağılımını geliştirmek için genellikle ara parçalar ile ayrılırlar. Kablolu kaya saplamaları için bahsedilen bu yapılandırmalar Şekil 2.9’da sunulmuştur.

Yeraltında en yaygın kullanılan kablolu kaya saplamaları, tek telli ve yedi kablolu örgü tipi üretilmiş kablolu kaya saplamalarıdır. Bu saplamaların kablo çapları genel

olarak, 12.8, 15.2, 17.8 ve 22.9 mm kadardır. Bu tip kablolu kaya saptlamalarına örnek teknik veriler Çizelge 2.5'te sunulmuştur.

| Cinsi | Boyuna Kesit | Enine Kesit |
|--|--------------|-------------|
| Çok telli lif (Clifford, 1974) | | |
| Kafes tipi çok telli lif (Jirovec, 1978) | | |
| Tek tel örgü Hunt ve Askow, 1977) | | |
| Kaplanmış tek tel örgü (Dorsten ve ark., 1984) | | |
| Tel örgü üzerinde kama ve beşik tipi çengel (Matthews ve ark., 1983) | | |
| Tel örgü üzerinde bombeli ankraj (Schmuck, 1979) | | |
| Yüksek kapasiteli kesme dübel (Matthews ve ark., 1986) | | |
| Kafes tel örgü (Hutchins ve ark., 1990) | | |
| Soğan biçiminde tel örgü (Garford, 1990) | | |
| Yüzük biçiminde tel örgü (Windsor, 1990) | | |

Şekil 2.9. Kablolu kaya saptlaması farklı konfigürasyonları (Windsor, 1992)

Kablolu kaya saptlamalarının uzunlukları, yeraltı kazıları için 5 ila 30 m arasında değişmektedir. Ancak açık ocak uygulamalarında bu uzunluk 100 m'ye kadar değişebilmektedir. Kablolu kaya saptlamaları, yüksek yük taşıma kapasitesine ve ön gerilme uygulanabilme imkânlarına sahiptirler. Ayrıca bu tip kaya saptlamaları her uzunlukta kesilebilirler, tek olarak veya çoklu şekilde, eğilmez sert tahkimat

elemanlarının kullanımının kısıtlı olduğu küçük açıklık ve tünellere yerleştirilebilirler (Uysal, 2001).

Çizelge 2.5'te görüldüğü gibi, 15.2 mm çaplı bir kablolu kaya saplaması 261 kN yük taşıyabilmektedir. Ayrıca kablolu kaya saplamaları, bir tambur etrafına sarılıp taşındıklarından dolayı taşıma işlemleri de kolaydır. Kablolu kaya saplamalarının bir dezavantajı, soğuk çekme imalat işlemlerinden dolayı kablolu saplamaların deforme olabilirliğinin düşük olmasıdır. Bir kablonun deforme olabilirliği, sıcak haddelenmiş kaya saplamalarından daha küçüktür. Kablo tellerinin nihai uzaması % 3 ile % 5 aralığındadır (Li, 2017a).

Çizelge 2.5. Yeraltı maden ocaklarında kullanılan kablolu kaya saplamalarının teknik verileri (Dywidag Systems., 2015)

| | | | | |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| Kablo Çapı (mm) | 12.7 | 15.2 | 17.8 | 22.9 |
| Çelik Çekme Dayanımı (MPa) | 1860 | 1860 | 1860 | 1860 |
| Nihai yük, (kN) | 184 | 261 | 339 | 560 |
| Nihai Uzama (minimum), (mm) | %3.5 | %3.5 | %3.5 | %3.5 |

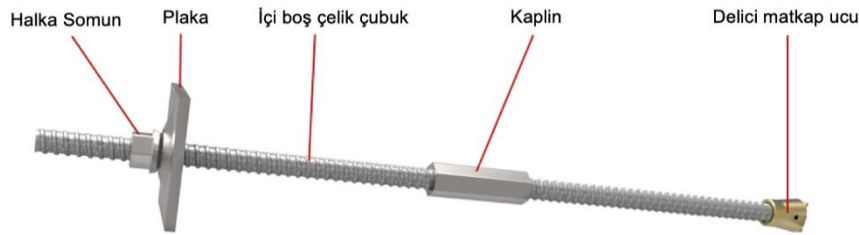
2.2.6. Kendinden matkaplı (delici bitli) kaya saplamaları

Çimento dolgulu bir kaya saplamasının genel kurulum şekli, bir sondaj deliği açmak, çimento esaslı harcı deliğe pompalamak ve son olarak saplamayı deliğe yerleştirmektir. Zayıf ya da gevrek kaya koşullarında, sondaj deliği, delme sırasında veya hemen sonrasında kısmen veya tamamen çökebilir, bu da harcı pompalamayı ve saplamayı deliğe sokmayı zorlaştırır veya imkânsız hale getirir. Böyle durumlarda kendinden matkaplı kaya saplamalarını kullanmak daha uygun bir seçenektir (Peng ve Tang, 1984).

Kendinden matkaplı kaya saplamalarının yerleştirilmesinde, diğer saplama türlerindeki işlem sırası izlenmez. Bu durum delik delme ve saplama yerleştirme için geçen ölü zamanları ortadan kaldırarak verimi arttırmıştır. Ayrıca işçilerin yapacakları hata oranını da azaltıp güvenliği arttırmıştır. Bu tür kaya saplamaları, yaylı, reçineli ve yarık-kamalı olmak üzere üçe ayrılırlar (Yaralı, 1991). Şekil 2.10'da bu tip saplamalara ve bileşenlerine ait bir örnek belirtilmiştir. Kendinden matkaplı kaya saplamalarına ait teknik özellikler tipik olarak Çizelge 2.6'da belirtilmiştir (Li, 2017a).

Bu tür kaya saplamalarının kurulumları sırasında saplamanın delici ucu tabakaların içine doğru delik açarak gönderilir ve delme işleminin sonunda saplama delikte bırakılır. Dolgu malzemesi, saplama çubuğunun deliğinden, sondaj deliğine

pompalanır. Bu dolgu malzemesi, çubuk ve sondaj deliği arasındaki halkadaki delikten dışarı akarken pompalama durdurulur. Delme işlemi esnasında saplama çubuğu, bir sondaj matkabı işlevindedir. Bu nedenle saplama çubuğu ve delici ucu delici delme torkuna dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Saplama çubuğunun uzunluğu, gerekli bileşenlerin kaplinlerle (bağlayıcı) bağlanması yardımıyla uzatılabilir (Li, 2017a).



Şekil 2.10. Kendinden matkaplı kaya saplama ve bileşenleri (Dywidag Systems., 2015)

Çizelge 2.6. Yeraltı maden ocaklarında kullanılan kablolu kaya saplama ve teknik verileri (Dywidag Systems., 2015; Minova Orica., 2015)

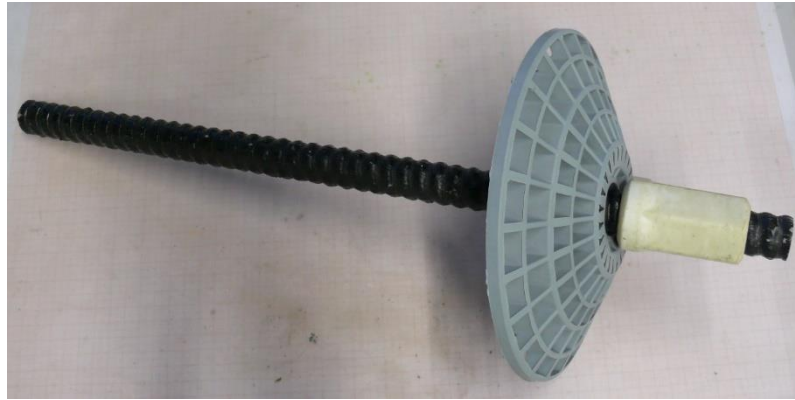
| Saplama Tipi | Saplama dış çapı (mm) | Saplama iç çapı (mm) | Yenilme Yüğü (kN) | Maksimum Çekme Yüğü (kN) |
|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|
| R25N | 25 | 14 | 150 | 200 |
| R32L | 32 | 21.5 | 160 | 210 |
| R32N | 32 | 18.5 | 230 | 280 |
| R32S | 32 | 15 | 280 | 360 |
| R38N | 38 | 19 | 400 | 500 |
| R51L | 51 | 36 | 450 | 550 |
| R51N | 51 | 33 | 630 | 800 |
| T76N | 76 | 51 | 1200 | 1600 |
| T76S | 76 | 45 | 1500 | 1900 |

2.2.7. Fiberglas kaya saplama ve teknik verileri

Fiberglas kaya saplama ve teknik verileri, geleneksel çelik saplama ve teknik verileri olarak üretilmiştir. Bazı kaynaklarda polimer kompozit tipi saplama ve teknik verileri arasında sınıflandırılmaktadırlar. 1 GPa'a kadar yüksek çekme dayanımına sahip olan bu tip saplama ve teknik verileri korozyona karşı oldukça dirençlidir (Li, 2017a).

Ağırlığının düşük, taşıma kapasitesinin yüksek olması, kolay kesilebilirliği gibi avantajlarından dolayı uygulama alanı gelişmiştir. Bu tip saplama ve teknik verileri genellikle, ayakta arının, galeride ise yanal blokların akmasını önlemek için kullanılır (Şekil 2.11) (Yaralı, 1991). Fiberglas kaya saplama ve teknik verileri, özellikle son yıllarda geliştirilen teknolojisi sayesinde,

uygulanması esnasında, delik dışında kalan uçlarına bağlanan enjeksiyon adaptörleri ile dolgulu olarak uygulanabilmektedir.



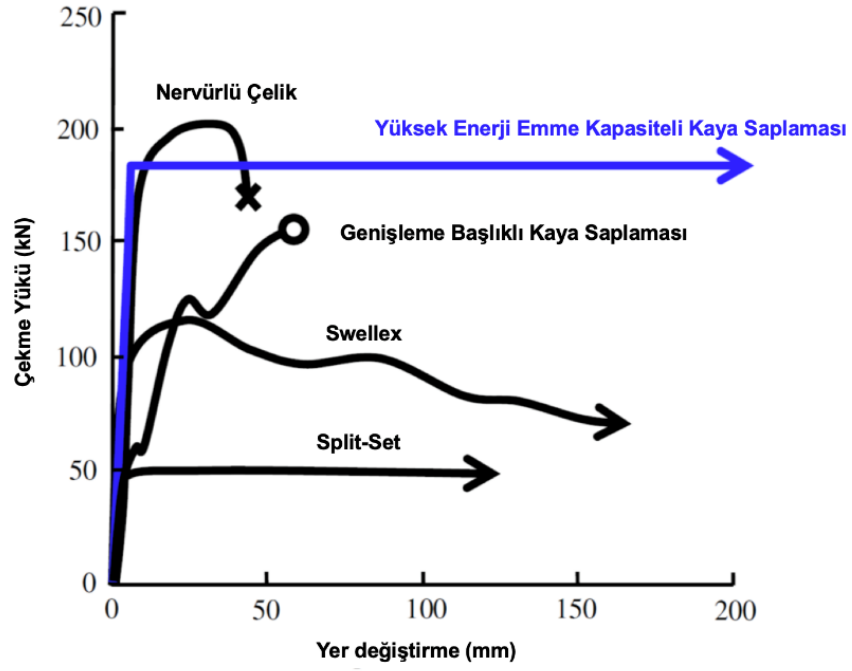
Şekil 2.11. Fiberglas kaya saplamları (Dywidag Systems., 2015)

2.2.8. Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamları

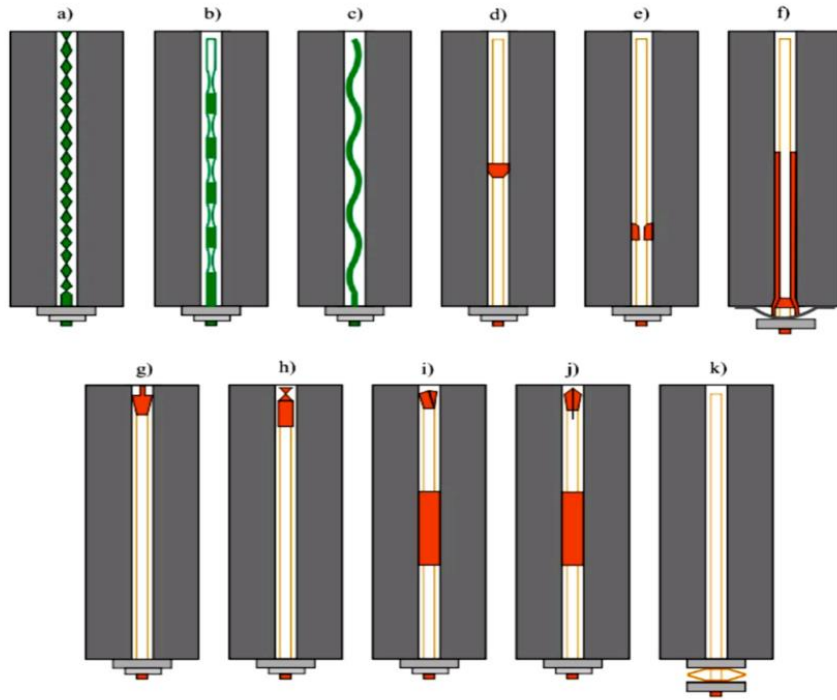
Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamları, özellikle kaya patlaması eğilimi olan yeraltı boşluklarında, yüksek enerji emme kapasitesiyle tercih edilen saplamlardır. Özel enerji emiciler ve izleme elemanları ile birlikte özel bir çelik kayar mekanizma, kaya kütlelerini sabit tutarak kontrollü kaya kütleleri deformasyonu ve enerji salınımı sağlar. Klasik kaya saplamlarının emme enerjileri sadece birkaç kJ (1-5 kJ) seviyesindedir, enerji emici kaya saplamları ise 25 kJ ila 50 kJ arasında emebilir (Li, 2017a). (Şekil 2.12).

Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamları, yüksek dayanımları (100 kN-300 kN), yüksek gerinimleri (500 mm'ye kadar) ile günümüzde yeraltı açıklıklarında kullanımı oldukça yaygınlaşmış kaya saplamlarıdır. Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamlarının geliştirilen ve halen geliştirilmekte olan birçok tipi mevcuttur. Şekil 2.13'te bu tip kaya saplamlarından daha yüksek verim almak amacı ile geliştirilmiş tiplerinin, delik içerisine yerleştirilme şekilleri tipik olarak sunulmuştur (Skrzypkowski, 2018).

Genel olarak benzer çalışma prensiplerine sahip ancak piyasada farklı ticari isimlerle adlandırılan yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplama tiplerine ait detaylı bilgiler, takip eden başlıklarda belirtilmiştir.



Şekil 2.12. Klasik kaya saptmalarına kıyasla yüksek enerji emme kapasiteli kaya saptmalarının gerilme-deformasyon eğrileri (Li ve ark., 2014)



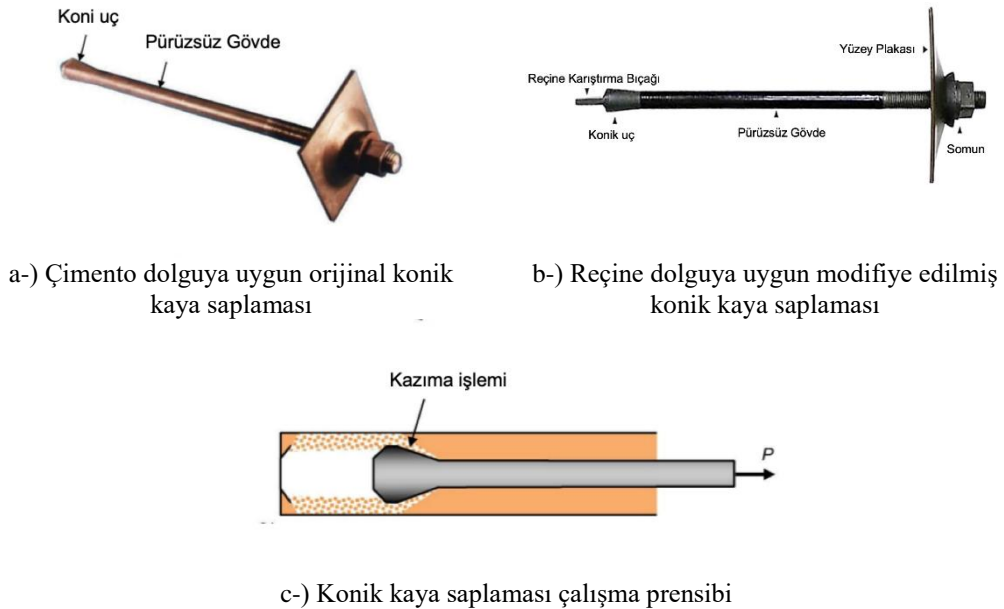
Şekil 2.13. Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saptmalarının farklı mekanizmaları; a) "CTw", b) "D", c) "Durabar", d) "Roofex", e) "Garford", f) "He", g) "Konik saptlama", h) "Dynatork" i) "DAP", j) "NMX", k) "Deforme olabilen bileşen" (Skrzypkowski, 2018)

2.2.8.1. Konik kaya saplamaları

Konik kaya saplamaları 1990'lı yıllarda Güney Afrika'da derin maden ocaklarında kaya patlamalarıyla mücadele için geliştirilmiştir (Jager, 1992; Ortlepp, 1992; Li, 2017a). Bu tip saplamalar pürüzsüz bir çelik çubuk ve saplamanın ucunda yassılaştırılmış dışa doğru açılan konik bir malzemeden oluşmaktadır. Saplamanın orijinal hali çimento dolgu için tasarlanmış (Şekil 2.14a) ancak sonraki yıllarda reçine dolgular için de revize edilmiştir (Şekil 2.14b). Saplamanın yenilenmiş halinde reçine dolgunun karışması amacı ile konik saplamanın ucuna bir bıçak eklenmiştir.

Konik saplamalar bir deliğe dolgulu bir şekilde yerleştirildiklerinde, kaya kütledeki tabaka genişlemeleri, yüzey plakası üzerinde bir yüke neden olur. Bu yük önce saplama gövdesine ardından saplamanın konik ucuna iletilir. Konik uçtaki sertleşmiş olan dolgu, bu yükün altında ezilir ve konik uç, harcı kazıyarak içerisine girer (Şekil 2.14c). Bu kazıma yükü aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Eşitlik 2.1) (Li, 2017a).

$$P = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) k \sigma_c \quad (2.1)$$



Şekil 2.14. Konik kaya saplamaları bileşenleri ve çalışma prensibi (Li, 2017a)

Eşitlik 2.1'de P; maksimum kazıma yükünü, D; saplamanın konik ucunun çapını, d; saplama gövdesinin çapını ve σ_c ; sertleşmiş dolgu malzemesinin tek eksenli basma

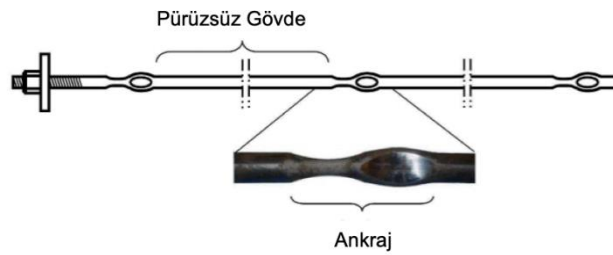
dayanımını ifade etmektedir. Eşitlikteki k ifadesi ise dolgu malzemesinin basit kesme yenilmesi yerine konik ucun etkisi altında ezildiğini dikkate alan tek eksenli basma dayanımı ölçek faktörüdür (Li, 2017a).

2.2.8.2. D-Bolt kaya saplamaları

Norveç'te geliştirilen D-Bolt ticari ismine sahip kaya saplamaları pürüzsüz bir çelik gövde ve bu gövde boyunca bütünleşmiş bir dizi bağlantı içermektedir (Şekil 2.15). Bu saplamalar delik içerisine çimento veya reçine dolgu ile enjekte edilebilirler. D-bolt saplamalar dolgu ile birlikte deliğe sıkıca sabitlenirken, bağlantılar arasındaki segmentler kaya kütle tabakalarının birbirlerinden ayrılmaya başlaması ile birlikte uzamaktadırlar. Bu saplamalar, saplama gövdesinin deformasyon kapasitesi ve mukavemeti sayesinde enerjiyi emerler. D-bolt'un nihai yükü basit olarak çeliğin çekme dayanımı ile ilgilidir (Li, 2017a) (Eşitlik 2.2).

$$P = \frac{\pi}{4} k d^2 \sigma_t \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'de σ_t ; saplama çeliğinin çekme dayanımını ifade ederken, k ; çeliğin sertliğini dikkate alan bir katsayıdır. Bu katsayı, sıcak haddelenmiş çelikler için 0.9 olarak alınır (Li, 2017a).



Şekil 2.15. D-Bolt kaya saplama ve bileşenleri (Li, 2017a)

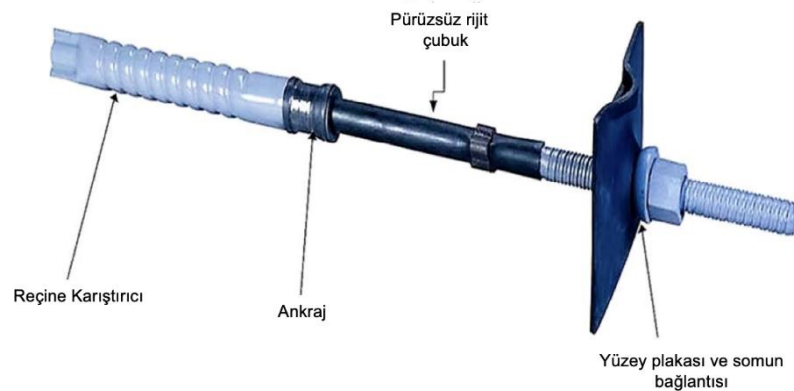
2.2.8.3. Garford kaya saplama

Avustralya'da geliştirilen Garford kaya saplama, pürüzsüz rijit bir çelik gövde, bir ankraj ve ucunda kalın dişli bir manşondan oluşmaktadır (Şekil 2.16). Bu saplamaların iç çapları, rijit saplama çubuğunun çapından daha küçüktür (Li, 2017a).

Garford saplamalar, kurulum aşamasında, reçine kartuşları ile doldurulmuş olan sondaj deliğinin içerisine döndürülerek yerleştirilirler. Reçine dişli manşonla karıştırılır. Burada ankraj, kurulum aşamasından sonra deliğin içerisinde kapsüllenmiş reçinedir. Kaya kütlesi tabakaları birbirinden ayrılmaya başladığında, çekme yükü, ankraj deliğinden geçirilecek olan rijit çubuğu zorlar. Yenilme yükü, rijit çubuk ile ankraj deliği arasındaki çap farkı ile belirlenir. Garford kaya saplamasının yenilme yükü Eşitlik 2.3'te belirtilen parametreler ile ilişkilidir (Li, 2017a).

$$P = \frac{\pi}{2} kd\Delta d\sigma_s \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3'te belirtilen parametreler arasında d ; saplama gövdesinin çapını, Δd ; saplama çubuğu ve ankraj deliği arasındaki çap farkını, σ_s ; saplama çeliğinin yenilme dayanımını ve k ; çelik çekme için bir katsayıyı ifade etmektedir (Li, 2017a).



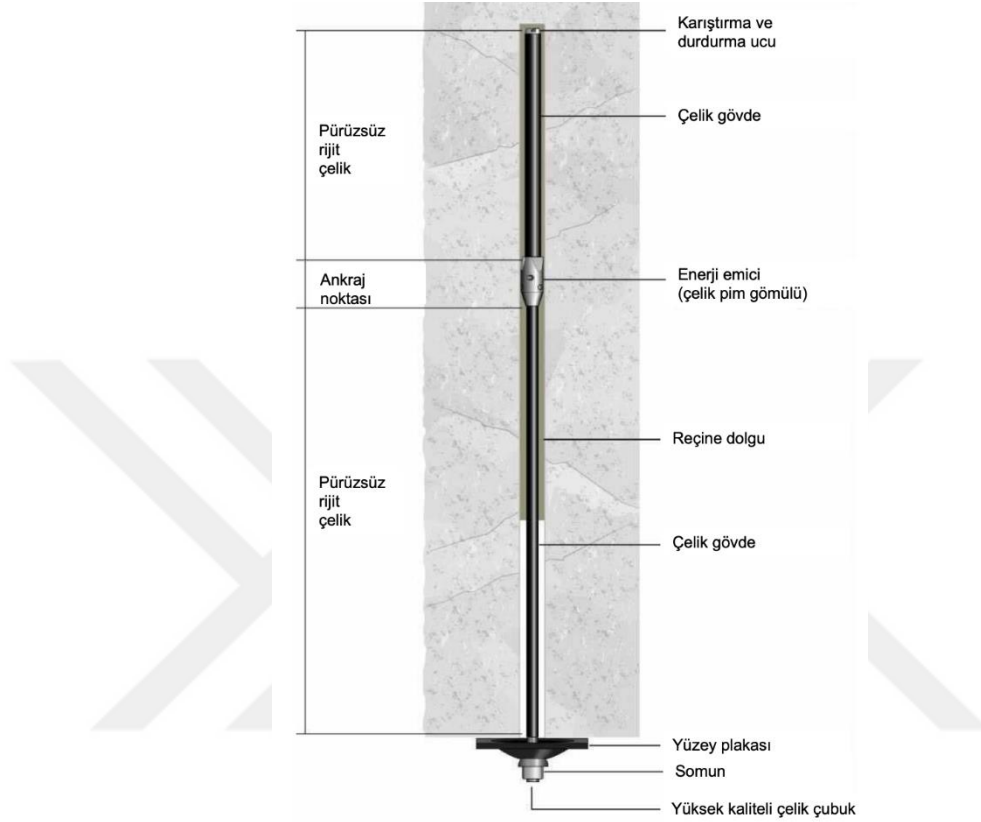
Şekil 2.16. Garford kaya saplaması ve bileşenleri (Li, 2017a).

2.2.8.4. Roofex kaya saplaması

Roofex kaya saplamaları, özel olarak tasarlanmış bir saplamadır. Pürüzsüz rijit bir ankraj çubuğuna sahiptir (Şekil 2.17). Çalışma prensibi Garford kaya saplamaları ile benzerlik göstermektedir. Yani pürüzsüz rijit çelik çubuk önceden tasarlanan yenilme yükünde ankraj deliğine doğru sıkılır.

Roofex kaya saplaması, kurulum aşamasında, reçine kartuşlarıyla dolu bir sondaj deliğinde döndürülür ve saplamanın ucundaki reçine karıştırıcısı reçineyi karıştırır. Pürüzsüz çelik çubuk kaya kütlelerinin yer değiştirmesine müsaade etmek ve enerjiyi dağıtmak için saplama boyunca delik içinde kayar.

Roofex kaya saplamasının mekaniği, Eşitlik 2.3'te sunulan Garford kaya saplamasının mekanik eşitliğine benzer. Ancak eşitlikteki k faktörü, saplamanın farklı şekli nedeniyle Roofex için farklı bir değere sahiptir.



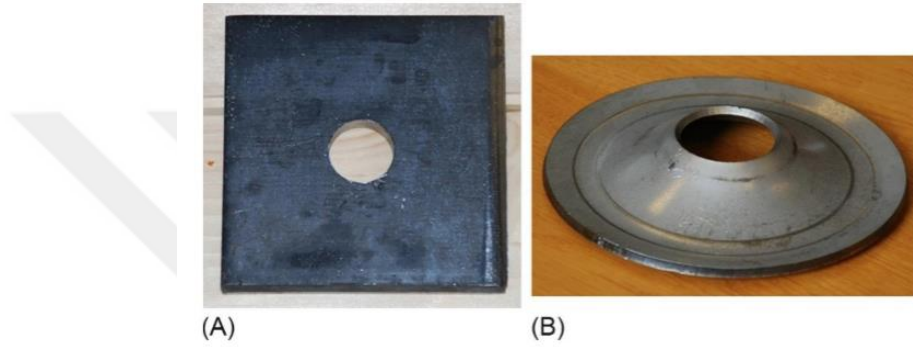
Şekil 2.17. Roofex yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplaması (Villaescusa ve ark., 2015)

2.3. Kaya Saplamalarının Yardımcı Donanımları

Kaya saplamaları, tahkimat görevlerini yerine getirirken bazı yardımcı donanımlara ihtiyaç duyarlar. Bu donanımlar temel olarak; plakalar, somunlar ve rondelalar (contalar), tavan bağı ve çelik kuşak, çelik hasır ve püskürtme beton olarak sayılabilir. Tüm bu donanımlar kaya saplaması ile kaya kütlesi arasında etkileşim kurmaya yardımcı olurlar. Kaya saplamalarının yük taşıma kapasitelerini en iyi şekilde kullanabilmek için bu donanımlarında saplamanın tipine göre en uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Temel yardımcı donanımlar ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur (Özkan, 2010).

2.3.1. Plakalar

Kaya saptaması plakaları, genellikle çelik sacdan imal edilen, merkezinde bir delik bulunan donanımlardır. Kaya saptamalarının alt ucunda (delik ağzı) oluşan yükü çevredeki kaya içerisine düzgün olarak dağıtmak için kullanılmaktadır (Li, 2017a). Kaya saptamalarının tahkimat görevlerini tamamlayıcı nitelik taşıyan taşıma plakalarının seçimi oldukça önem arz etmektedir (Özkan, 2010). Şekilsel olarak temelde düz şekilli, kubbe şekilli ya da bu iki şeklin farklı birleşimi ile şekillendirilmiş olabilirler (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Kaya saptaması plakaları; (A): Düz plaka, (B): Kubbe plaka (Li, 2017a)

Düz ve kubbe şekilli plakalar karşılaştırıldığında, düz plakalar, kaya tabakalarının birbirinden ayrılması durumunda kolaylıkla işlevini kaybedebilirler ve plaka deliğinin kaya yüzeyine bakan tarafı genişleyerek saptamanın yönünü saptırabilir böylelikle yük taşıma kapasitesini kaybedebilirler (Şekil 2.19). Kubbe plakaların delikleri, somun ve rondelalar ile birlikte yüklendiğinde, deliğin merkezine doğru daralma eğilimindedirler ve düz plakalara göre daha fazla deformasyon kapasitesine sahiptirler (Li, 2017a).



Şekil 2.19. İşlevini kaybetmiş taşıyıcı düz plaka (Li, 2017a)

2.3.2. Somun ve rondelalar

Kaya saplamalarının kurulumunda kullanılan somunlar, standart ya da uzatılmış olarak kullanılabilirler (Şekil 2.20a ve 2.20b). Uzatılmış somunlar, standart somunlara göre daha dayanıklıdır. Somun seçiminde temel prensip, kullanılan somunun çekme dayanımının, saplama yivlerinin çekme dayanımından daha yüksek olması gerektiğidir.

Rondelaların kullanımı, somunlardan plakaya aktarılan yükü önemli ölçüde artırır. Kaya saplamaları, plaka ve saplama çeliğinin uygun şekilde yüklenmesi için dik bir şekilde monte edilmelidir. Bununla birlikte çoğu zaman, sondaj delikleri normal hatlarından kaya yüzeyine doğru biraz sapmaktadır. Bu tür bir deliğe monte edilen kaya saplaması plakası üzerindeki yük bir tarafta yoğunlaşacaktır, bu yüzden saplama çubuğunun başı plastik olarak bükülebilir ve plaka simetrik olmayan yükleme nedeniyle zamanından önce yenilebilir. Böyle bir durumla karşılaşmamak için küresel rondelaların kullanımı oldukça önem arz etmektedir (Li, 2017a) (Şekil 2.20c).



Şekil 2.20. Kaya saplaması kurulumunda kullanılan somun ve rondela, (a): normal somun, (b): uzatılmış somun, (c): rondela (Li, 2017a)

2.3.3. Tavan bağı ve çelik kuşaklar

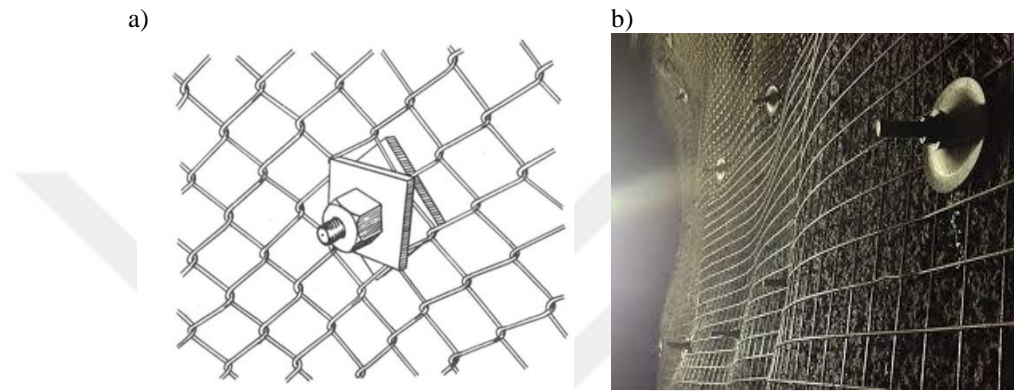
Tavan bağlarının ana amacı, iki yandan saplamalar yardımıyla tutturularak kaya bloklarını askıya almaktır. Çelik kuşak ise 6 mm kalınlığında, 100 mm eninde ve değişik uzunluklarda imal edilen çelik bantlardır ve ince kaya tabakalarını desteklemede yalnız ya da saplama ile birlikte kullanılırlar (Teymen, 2012).

2.3.4. Çelik hasırlar

Kaya saplamalarıyla birlikte yaygın olarak kullanılan iki tip çelik hasır vardır. Bunlar, örgülü çelik hasır ve kaynaklı çelik hasır tipleridir. Örgülü çelik hasır tipi, esnek ve sağlamdır (Şekil 2.21a). Küçük kaya parçacıklarının veya kavlak düşmesi sonucu işçinin yaralanmasını ve donanımların hasar görmesini önlemek için doğrudan kaya

yüzeyine yerleştirilirler. Rulo halindeki hasır, kaya yüzeyine 1-1.5 m genişlikte yerleştirilir (Teymen, 2012).

Örgülü çelik hasır, kırılğan kayacın yükünün büyük bir kısmını taşıyabilir. Tavandan kavlak düşmelerini önlemek amacıyla saplama uygulanan bölgeye çelik hasır yayılır. Hasır, saplama plakaları yardımıyla tavana tutturulur. (Teymen, 2012). Kaynaklı çelik hasırda, çelik tellerden kare veya dikdörtgen şeklinde motifler oluşturulur ve kesişme noktalarından kaynakla birleştirilir (Şekil 2.21b).



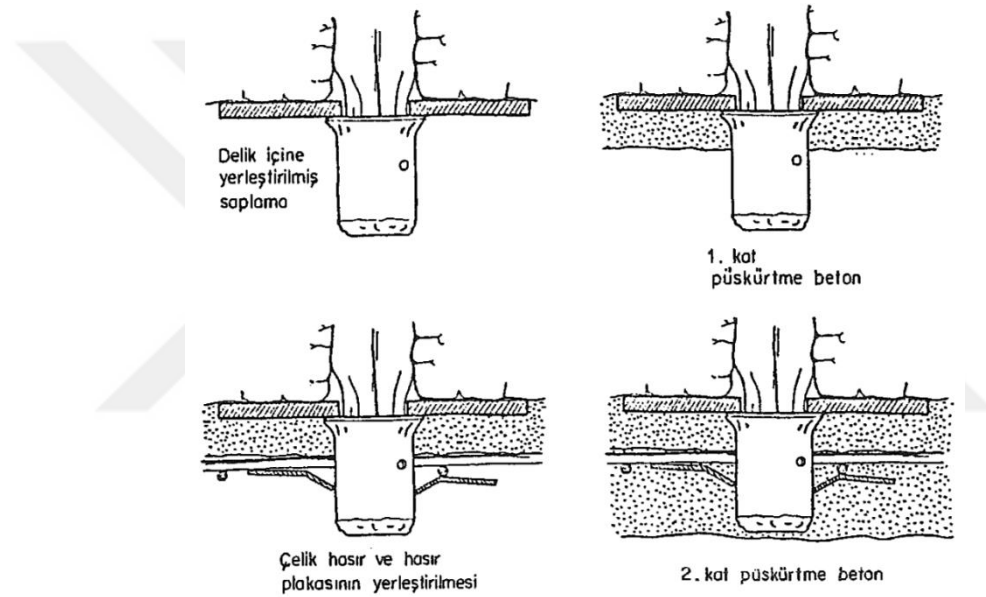
Şekil 2.21. Kaya saptamaları ile birlikte kullanılan çelik hasırlar; a) Örgülü çelik hasır, b) Kaynaklı çelik hasır (Teymen, 2012)

Püskürtme betonun tahkimi için kaynaklı çelik hasırla birlikte kullanımı, örgülü tipe göre daha uygundur. Tipik özellikleri 2-4 cm çapında telli, 100 mm aralıklı setler şeklinde püskürtme beton tahkiminde kullanılmalarıdır (Stillborg, 1986).

2.3.5. Püskürtme beton

Püskürtme beton, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında, kaya saptamalarıyla birlikte kullanımı giderek artmasına rağmen, madencilik alanındaki kullanımı fazla yaygınlaşmamıştır (Ünal ve Ergür, 1990). Püskürtme betonun oldukça etkili bir tahkimat sistemi olduğu kabul edilmektedir. Püskürtme beton, çelik hasır gibi davranarak, küçük kaya parçalarının ve kavlakların kazı yüzeyinden düşmesini ve bunun sonucunda süreksizlik düzlemlerinde oluşacak büyük hareketleri önlemektedir. Diğer bir ifadeyle, püskürtme beton, süreksizlik düzlemleri, kama ve blokların kaya kütlesi içine kilitlenmesini sağlamak ve bu yapının kendi kendini taşıma özeliğinin korunmasına yardımcı olmaktadır (Teymen, 2012).

Püskürtme betonunun uygulamasında, beton karışımı, kalitesi, beton kalitesinin sabit tutulması, püskürtme basıncı, su hacmi, kesintisiz uygulama için hava miktarı ve malzeme miktarının kontrolü oldukça önemlidir. Operatör bu hususları dikkate alarak, kazı yüzeyine püskürtülen beton malzemesinin sıçrayıp yere dökülmesini önlemelidir. Betonun püskürtülmesinde hortuma bağlı pompa tabancası kazı yüzeyinden 1 m geride olmalı ve yüzeye dik tutulmalıdır. Püskürtme beton kalınlığı tasarım öngörülerine göre belirlenir. Beton kalınlığı 100-500 mm arasında ise tek seferde uygulama tamamlanır. Eğer daha kalınsa bu iki ya da üç uygulama ile kazı yüzeyi betonla kaplanır (Şekil 2.22) (Özkan, 2010).

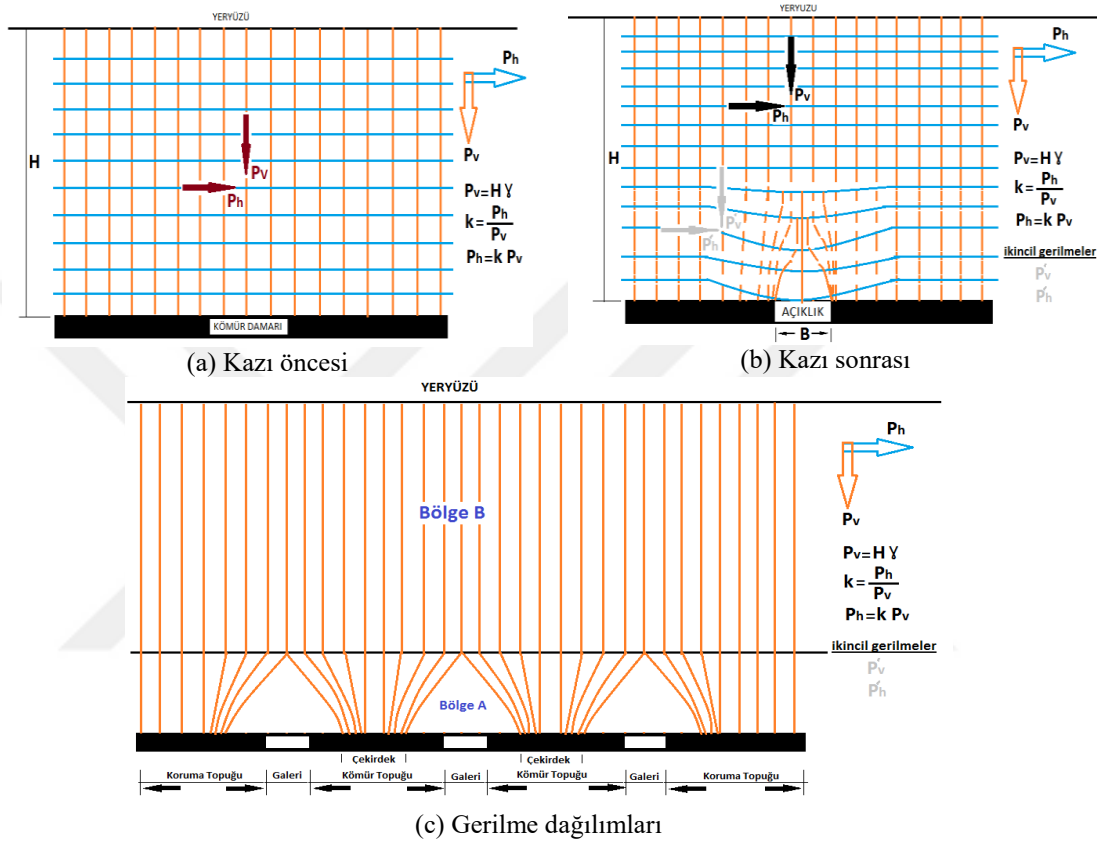


Şekil 2.22. Kaya saplamları ile püskürtme beton uygulaması (Ünal ve Ergür, 1990)

2.4. Kaya Saplamları Tahkimat İlkeleri

Yeraltında bir bölgede gerçekleştirilen kazı işlemi uygulamalarında, kazı öncesi denge halinde olan birincil yatay (P_x ve P_y) ve düşey (P_h) arazi gerilmeleri (Şekil 2.23a), kazı sonucu oluşan boşluk nedeniyle açıklık civarındaki bozulmakta ve tekrar denge halini almak istemektedir. Kaya kütlelerinin sahip olduğu arazi gerilmelerinde gerçekleşen bu denge bozukluğunun büyüklüğü, oluşturulan açıklığın geometrisine ve kaya kütlelerinin mekanik özelliklerine bağlıdır. Açıklığın her iki yanındaki kaya kütle bölgesinde, bir gerilme yığılması söz konusu olur (Şekil 2.23b). Böyle bir ortamda, açıklık etrafındaki kaya kütleleri topuk görevi görerek, normal denge durumunun dışına çıkan arazi

gerilmelerini tekrar dengeleme eğilimine girer. (Şekil 2.23c). Bozulan bu arazi gerilmelerine ikincil gerileme (P_x' , P_y' , P_h') tanımı yapılmaktadır. Kaya kütleindeki ikincil arazi gerilmeleri nedeniyle özellikle açıklık tavanında basma, çekme ve makaslama türünden özel gerilmeler (Şekil 2.24a), bu gerilmeler nedeniyle ise tabaka hareketleri oluşmaktadır (Şekil 2.24b) (Özkan, 2010).

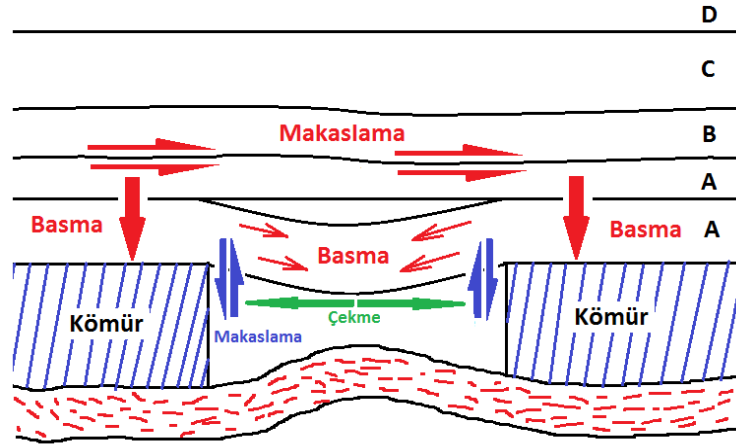


Şekil 2.23. Yeraltında kazı öncesi ve sonrası yatay ve düşey arazi gerilmeleri dağılımı (Özkan, 2010).

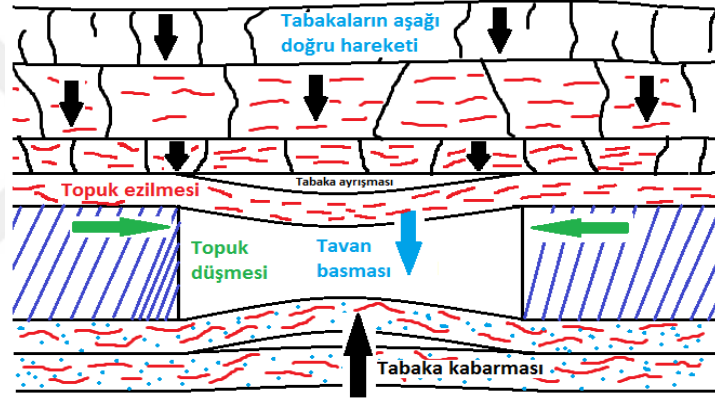
Bir kaya kütlesi, içerisinde açılan boşluğa ve böylelikle denge halinin dışına çıkan gerilme koşullarına rağmen, tahkimatsız olarak uzun bir dönemde aşırı tabaka hareketlerine, kaymalara, kırılmalara ve göçmelere maruz kalmıyorsa, yani yenilmeden durabiliyorsa bu kaya kütlelerine kendi kendini tutabilen kaya kütlesi adı verilir (Şekil 2.25). Bu durumda açıklık civarındaki kaya kütlelerinin oluşturduğu topukların bozulan birincil arazi gerilmelerini dengelemede yeterli olduğu söylenebilir. Başka bir ifade ile böyle bir ortamdaki kaya kütlelerinin denge durumu için tahkimat gereksinimi duyulmaz (Özkan, 2010).

Buna karşılık kazı sonrasında açılan yeraltı boşluğu civarında, aniden ya da belirli bir zaman sonra aşırı tabaka hareketleri, tabaka ayrışmaları ve buna bağlı tavan kemerinde

kırılmalar, kavlak düşmesi ve göçmeler oluyorsa bu tür kaya kütlelerine kendi kendini tutamayan kaya kütlesi denir (Şekil 2.25).



a) Gerilme Türleri



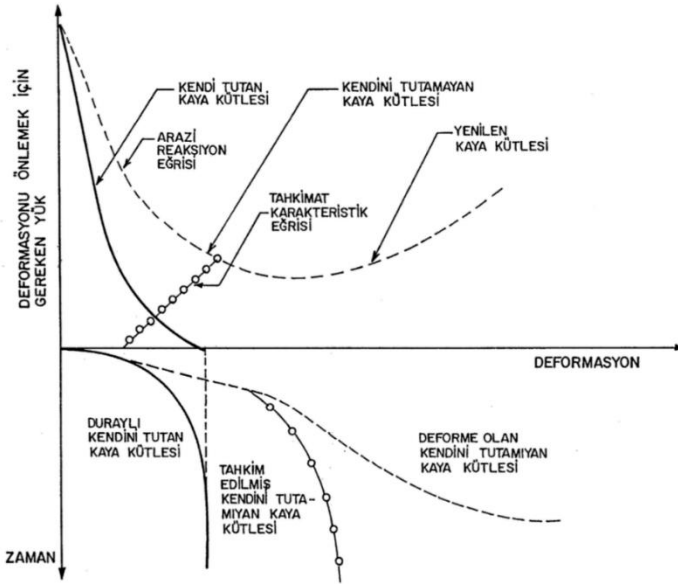
b) Tabaka Hareketleri

Şekil 2.24. Yeraltında açılan bir galeri etrafında oluşan, a) gerilme türleri ve b) tabaka hareketleri (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

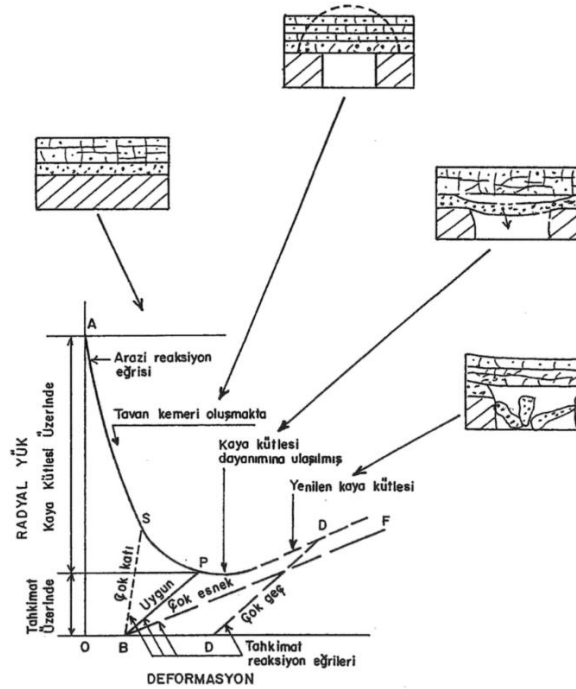
Kendi kendini tutamayan kaya kütlesi içerisinde açılan açıklıkların duraylılığının sağlanması için uygun bir tahkimat sistemi kullanılarak etkin bir denetim sağlanmalıdır. Şekil 2.26'da tipik bir kaya kütlesi-tahkimat etkileşim davranışı sunulmuştur. Bu eğri üzerinde farklı tahkimat türlerinin tahkimat yeterlikleri görülmektedir. Açıklık etrafındaki kaya kütlesinde kazı sonrası bozulan arazi gerilmelerinin deformasyona dönüşmesini olabildiğince erken önleyen ve böylece bu gerilmelerin hızla dengeye gelmesini sağlayan tahkimat sistemi, en uygun tahkimat yöntemi olacaktır (Şekil 2.26).

Tahkimat sistemleri arasında kaya saplamalarının tahkimat mekanizmasını açıklayan yedi farklı yaklaşım söz konusu olup uygulamada bunların biri ya da birkaçı birden tahkimat mekanizmasını açıklayabilir. Saplamalar ile ilgili önerilen tahkimat

mekanizmaları sırasıyla; doğal arazi kemeri ve tavan kemeri oluşturma, askıya alma, kiriş oluşturma ile kuvvetlendirme, anahtarlama sağlamlaştırma, sürtünme etkisi, sıkıştırma etkisi, radyal yönde açıklık yüzeyine içsel basınç verme şeklinde sıralanabilir (Özkan, 2010). Devam eden bölümlerde sırasıyla kaya saplamaları ile ilgili önerilen tahkimat ilkeleri ve açıklamaları sunulmuştur.



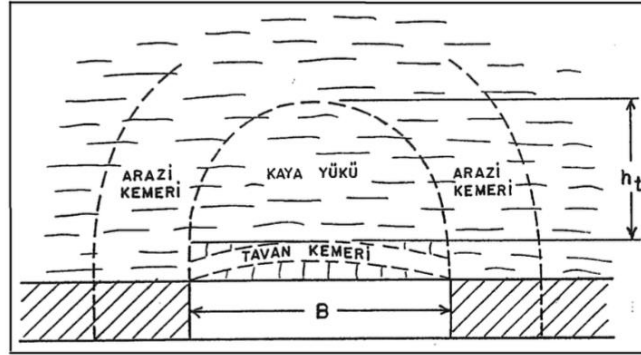
Şekil 2.25. Tahkimatsız ve tahkimat yerleştirilmiş kaya kütesinin davranışı (Ünal ve Ergür, 1990)



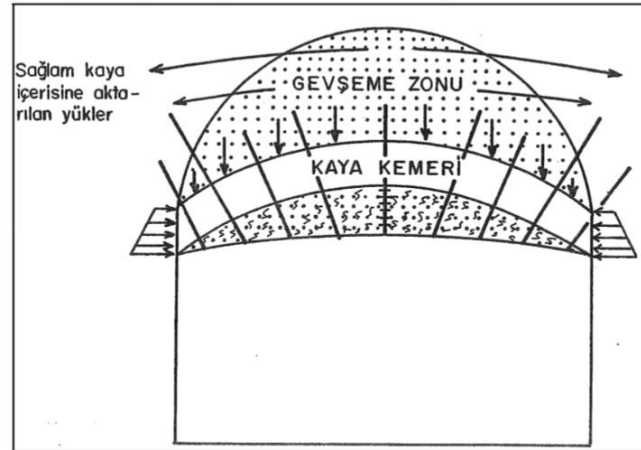
Şekil 2.26. Arazi reaksiyon eğrisi ile kaya kütesinin tahkimat etkileşim eğrileri (Ünal ve Ergür, 1990)

2.4.1. Doğal arazi kemeri ve tavan kemeri oluşturma ilkesi

Eklem ve tabakalar gibi süreksizlik düzlemleri ihtiva eden bir kaya kütlesi içerisinde açılan bir boşlukta, açıklığın genişliğine bağlı olarak tavanda doğal arazi kemeri ve bunun altında tavan kemeri oluşmaktadır. Şekil 2.27a’da görüldüğü üzere doğal arazi kemeri, arazi gerilmelerini açıklık etrafındaki topuklara aktarırken, doğal arazi kemerinin altında kalan örselenmiş kaya kendini tutamayarak boşluğa doğru hareket etmek ister. Burada oluşan tavan kemeri, korunduğu takdirde, boşluğa doğru hareket etmeye çalışan kaya yükünü tutabilmektedir. Tavan kemeri altında kalan bu bölgeye yalancı tavan tanımı yapılmaktadır (Özkan, 2010).



(a) açıklık genişliğine bağlı olarak oluşan doğal arazi ve tavan kemeri



(b) Kaya saplamları yardımıyla tavan kemerinin ve altındaki yalancı tavanın sıkıştırılması

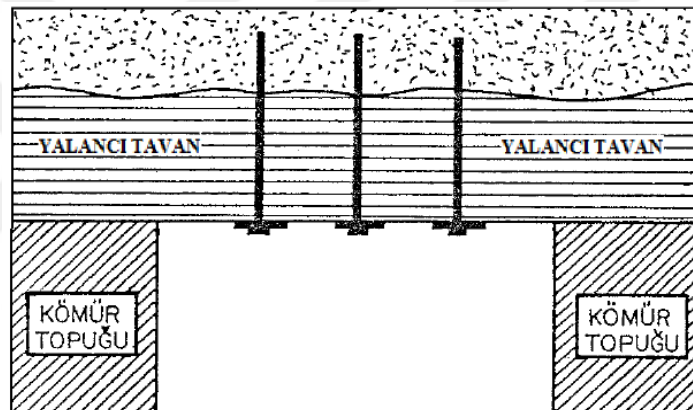
Şekil 2.27. Doğal arazi ve tavan kemeri oluşturma ilkesi (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

Kaya saplamlarının böyle bir yerde uygulanmasında tavan kemerinin korunması amaçlanmaktadır. Açıklık tavanına yerleştirilen kaya saplamları, öncelikle tavan kemerini ve gevşemiş yalancı tavanı yatay ve düşey yönde sıkıştırarak doğal arazi kemeri altında kalan kaya bölgesine kilitler daha sonra askıya aldığı tavan kemerinin üzerinde

kalan gerilmeleri açıklık etrafındaki topuklara aktarılmasını sağlar (Şekil 2.27b) (Özkan, 2010).

2.4.2. Askıya alma ilkesi

Zayıf karakterde yatay tabakalaşma düzlemlerine sahip kaya kütlesi içerisinde açılan bir açıklıkta, tavanda oluşan yalancı tavanın üzerinde daha sağlam, kendini taşıyabilen ana kaya tabakası bulunmaktadır. Kaya saplamaları yardımıyla yalancı tavan, ana kaya tabakasına tutturularak askıya alınır (Şekil 2.28). Askıya alma ilkesinde, kaya saplamalarının sağlam ana tavan taşı içine uzanması gerektiğinden saplamanın boyunun yeterli olması büyük önem taşımaktadır. Genelde saplama boyu için, yalancı tavan kalınlığının 0.3 m fazlası alınarak belirlenir (Özkan, 2010).



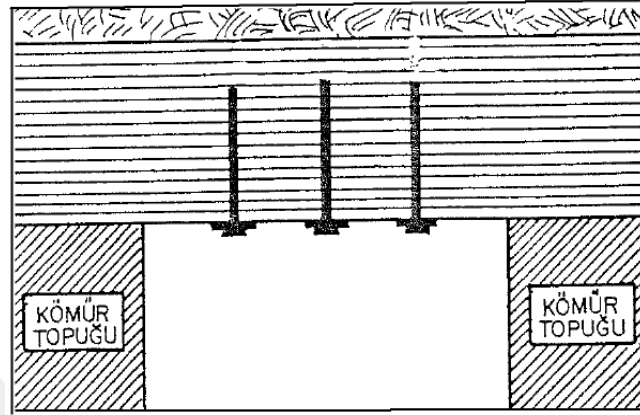
Şekil 2.28. Askıya alma ilkesi (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

2.4.3. Kiriş oluşturma ilkesi

Yeraltı boşluğu açılması planlanan kaya kütlesi, açıklık tavanına paralel konuma sahip zayıf süreksizlik düzlemleri içerebilir. Açıklık oluşturulduktan sonra oluşan yalancı tavanı oluşturan bölgenin kalınlığı Şekil 2.29'daki gibi kalın olabilir. Böyle bir durumda kaya saplaması yalancı tavanı ana kayaya bağlamada yetersiz kalabilir. Bir başka ifadeyle, yalancı tavanı askıya alamaz. Bu durumda kaya saplaması yalancı tavandaki ince kalınlığa sahip zayıf karakterli tabakaları sıkıştırarak tek bir kalın tabaka (kiriş) gibi davranmaya zorlar (Özkan, 2010).

Kaya saplamaları, ince tabaka düzlemlerini birbirine sıkıştırarak ve yatay süreksizlik düzlemlerindeki sürtünmeyi artırarak tabakaların yatay ve düşey yöndeki hareketini zorlaştırmakta aynı zamanda eğilme ve makaslama gerilmelerini düşük

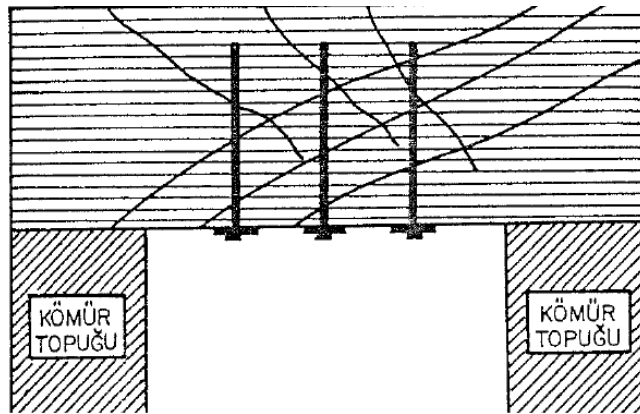
seviyelerde tutmaktadır. Kalın bir kiriş olan yalancı tavanı, aslında eğilme ve makaslama gerilmeleri azaltıldığı için kayada çekme dayanımı değerlerinin altına inilmiş olmaktadır. Aynı zamanda kalın kirişteki yatay ve düşey hareketler engellendiği için açıklık tavanında oluşması beklenen tavan basması oluşmamaktadır (Özkan, 2010).



Şekil 2.29. Kiriş oluşturma ilkesi (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

2.4.4. Kilitleme (anahtarlama) ilkesi

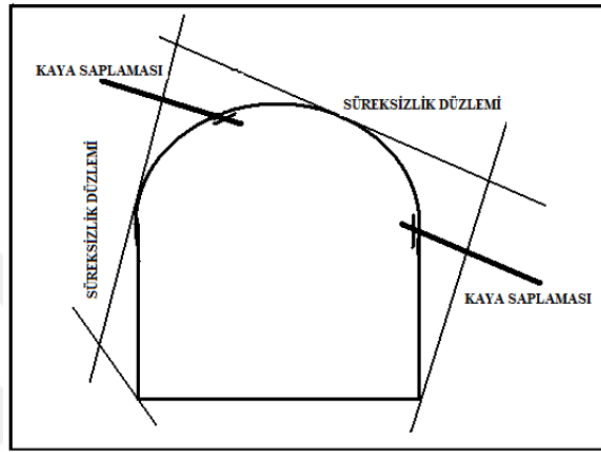
Bir yeraltı açıklığının etrafında yatay süreksizlikler haricinde bazen farklı dalım açılara sahip süreksizliklerde olabilmektedir. Süreksizlik düzlemlerinin kesişmesi ile açıklık etrafında kama şeklinde bloklaşmalar olabilir. Kaya saplamaları ile oluşan bloklar sıkıştırılır ve böylece sürtünme etkisi artırılan bloklar birbirleriyle kilitlenerek askıya alınır (Şekil 2.30). Kaya saplamaları tavan hattına veya süreksizlik düzlemlerine dik olarak yerleştirilmektedirler. Kilitleme ilkesinde, kaya saplamalarının boyları ve saplama aralıkları iyi belirlenmelidir (Özkan, 2010).



Şekil 2.30. Kilitleme (anahtarlama) ilkesi (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

2.4.5. Sürtünme etkisi ilkesi

Bir yeraltı açıklığı etrafında birbirini dik kesen süreksizlik düzlemleri büyük kama şeklinde bloklar oluşturabilmektedir. Kaya saplamaları süreksizlik düzlemlerine dik olarak yerleştirilir. Bloklar arasında kalan süreksizlik yüzeyleri birbirlerine yaklaştırılarak sürtünme etkisi artırılır böylece süreksizlik yüzeyi boyunca blokların birbirleri üzerinde kayması engellenir (Şekil 2.31) (Özkan, 2010).



Şekil 2.31. Sürtünme etkisi ilkesi (Ünal ve Ergür, 1990; Özkan, 2010)

2.4.6. Sıkıştırma etkisi ilkesi

Yeraltı açıklıklarında, birbirini farklı açılarda kesen süreksizlik düzlemlerinin sık olduğu kaya kütleleri gevşek bir yapı sergiler. Bu tür kaya yapılarında kullanılan kaya saplaması, kaya kütlelerini sıkıştırarak dayanımını ve deformasyon özelliklerini yüksek kaya haline getirmektedir (Özkan, 2010).

2.4.7. Radyal yönde açıklık yüzeyine içsel basınç verme etkisi ilkesi

Radyal yönde açıklık yüzeyine içsel basınç verme etkisi kavramı şu şekilde tanımlanabilir. Bir yeraltı açıklığında, kazı yüzeyine uygulanan kaya saplaması üzerinde gerdirme uygulandığı zaman, saplama plakası yardımıyla kaya yüzeyinde radyal yönde bir iç basınç yaratılmış olur, bu basınç, kaya yüzeyindeki plaka ile saplama boyunca etkileşimde olan kaya yapısını birbirine sıkıştırmayı sağlamaktadır (Özkan, 2010).

2.5. Kaya Saplamları ile Tahkimat Tasarım Yaklaşımları

Bir yeraltı açıklığının duraylılığı, emniyet gereksinimlerini ekonomik sınırlar içerisinde sağlayan bir tahkimat sistemi ile sağlanabilir (Özkan, 2010). Tahkimat sisteminin en iyi şekilde tasarlanabilmesi için, yeraltı açıklığın şekli ve boyutları, kaya kütlelerinin ve süreksizliklerin özelliklerini ve açıklığın neden olduğu gerilmelerin büyüklüğünü ve dağılımı, en doğru şekilde tespit edilmelidir. Diğer tüm tahkimat sistemlerinde olduğu gibi kaya saplaması tahkimat sistemi de belirtilen bu parametrelere bağlı olarak tasarlanmalıdır. Eksiksiz ve uygun bir kaya saplama sistemi tasarımı için aşağıdaki parametrelerin de en doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. (Canbulat, 2008).

- Saplamanın tipi,
- Saplama uzunluğu,
- Saplamaların düzeni ve aralığı,
- Ön gerdirmenin uygulanıp, uygulanmayacağı,
- Ön gerdirme uygulanmışsa, gerilmenin büyüklüğü.

Tüm bu parametrelerin doğru bir biçimde belirlenebilmesi, kaya kütlesi ile kaya saplaması etkileşiminin tam olarak anlaşılmasıyla mümkün olabilmektedir. Bu etkileşimin anlaşılması için bir takım tasarım metotları vardır. Bu tasarım metodolojileri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- i. Ampirik (görgül) yaklaşımlar
- ii. Arazi ölçümlerine dayalı tasarım yaklaşımları
- iii. Analitik yaklaşımlar
 - Teorik yaklaşımlar
 - Fiziksel modelleme
 - Sayısal (nümerik) modelleme

2.5.1. Ampirik (görgül) yaklaşımlar

Gözlem, ölçüm, deneyim ve mühendislik sezgilerine bağlı olarak elde edilen bulguların birleştirilmesiyle niceliksel (sayısal) olarak kaya kütle özelliklerini tanımlayan kaya kütle sınıflama sistemleri, görgül yaklaşım olarak bilinmektedir. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, tahkimat gereksinimlerini ön tasarım safhasında belirlemek için kullanılırlar (Özkan, 2010). Bu sınıflandırma sistemlerinin ilki, tünel tahkimatı tasarımı

için demir bağlar ile taşınan kaya yüklerinin tanımlayıcı bir sınıflandırma temelinde tahmin edildiği Terzaghi kaya yükü sınıflamasıdır.

Terzaghi (1946) kaya yükü sınıflamasından bu yana, birçok kaya kütle sınıflama yöntemi geliştirilmiştir. Bu sınıflama yöntemleri arasında kaya saplamalarının tahkimatında kullanılan ampirik (görgül) tasarım yaklaşımlarından en yaygın kullanılan sınıflama sistemleri RMR (Bieniawski, 1973; 1989) ve Q (Barton ve ark., 1974) sınıflama sistemleridir. Kaya saplamalarına ait geliştirilen tahkimat tasarım yaklaşımlarında sıklıkla bu sınıflama sistemleri kullanılmaktadır. Kaya kütlelerini sayısal olarak tanımlayan kaya kütle sınıflamaları yanında, kaya saplamalarının tasarımında, süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimlerini dikkate alan yaklaşımlarda mevcuttur (Özkan, 2010).

Görgül yaklaşımlara dayalı kaya saplamaları tahkimat tasarımında, literatürde karşılaşılan tahkimat tasarım öngörülleri aşağıda sıralanmıştır (Özkan, 2010).

- i. Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı
- ii. Panek tasarım yaklaşımı (1964)
- iii. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (1970, 1972)
- iv. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı (1973)
- v. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1983, 1986)
- vi. RMR sistemine bağlı Venkateswarlu tasarım yaklaşımı (1986)
- vii. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1990)
- viii. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995)
- ix. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımı (2013)

2.5.1.1. Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı

Yeraltında açılan açıklığın genişliği, açıklık etrafındaki süreksizlik takım sayıları (n) ve eğimlerini (ϕ) dikkate alan bu tasarım yaklaşımında, genel olarak açıklık genişliği (B) 15 m'den küçük ya da büyük olmak üzere iki sınıfta değerlendirme yapılmaktadır. Tasarım yaklaşımı aşağıda sunulmuştur (Özkan, 2010).

- 1) Açıklık genişliği (B) <15 m olduğu durumlarda;
 - a) $n \leq 2$ ve $\phi = 0^\circ-45^\circ$ koşulunda (Şekil 2.32a);

$$L \text{ (saplama boyu)} = 0.3B$$

$$S \text{ (saplama aralığı)} = 0.5L$$

Uygulama önerileri:

- i. Saplamlar mümkün olduğunca süreksizliklere dik yerleştirilmelidir.
- ii. Kavlaklanmayı önlemek için çelik hasır kullanılmalıdır.
- iii. Zayıf nitelikli kaya yapılarında saplamada ön gerilme uygulanmalıdır.
- iv. Saplamlar yük taşıyıcı bir kiriş oluşturur.
- v. Süreksizlik düzlemlerinde kaymaya karşı direnci artırır.

b) $n \leq 2$ ve $\phi = 45^\circ - 90^\circ$ koşulunda (Şekil 2.32b);

Açıklık tavanında;

L (saplama boyu) = $0.3B$

S (saplama aralığı) = $0.5L$

Yan duvarda;

Süreksizliğe dik konumda L (saplama boyu) $> h \cos\phi$

Kazı yüzeyine dik konumda L' (saplama boyu) $> h'/\tan\phi$

Uygulama önerileri:

- i. Saplama aralığı (S) süreksizlik düzleminde kayma ya da devrilmeyi önleyecek ankrajı sağlayacak şekilde olmalıdır.
- ii. Yan duvarda süreksizlik boyunca düzlemsel kaymayı önlemek için saplama yerleştirilmelidir.
- iii. Süreksizlik düzleminde kaymayı önlemek için saplamada ön gerilme uygulanmalıdır.

c) $n \geq 3$ koşulunda (Şekil 2.32c);

L (saplama boyu) = $2S$

S (saplama aralığı) = $(3-4) \times \text{Blok Boyutu}$

Uygulama önerileri:

- i. Kaya saplamları açıklıktaki kazı yüzeyine dik konulmalıdır.
- ii. Kavlaklanmayı önlemek için çelik hasır kullanılmalıdır.
- iii. Kaya saplamları kazıyı hemen takip eden zamanda gevşemeyi önlemek için yerleştirilmelidir.
- iv. Radyal tahkimat basıncını oluşturmak için saplamada ön gerilme uygulanmalıdır.

2) Açıklık Genişliği (B) >15 m olduğu durumlarda;

a) $n \leq 2$ koşulunda (Şekil 2.32d);

Birincil kaya saptamaları L1 (saplama boyu) = 0.3B

S1 (saplama aralığı) = 0.5L1

İkincil kaya saptamaları L2 (saplama boyu) = 0.3S

S2 (saplama aralığı) = 0.5L2

Üçüncül kaya saptamaları L1 (saplama boyu) = 0.3S2

S3 (saplama aralığı) = 0.5L3

Uygulama önerileri:

- i. Saptamalar açıklıktaki kazı yüzeyine dik yerleştirilmelidir.
- ii. Kavlaklanmayı önlemek için çelik hasır kullanılmalıdır.
- iii. İkincil ve üçüncül saptamalar birincil saptamaları tamamlayıcı olarak kullanılır.

b) $n \geq 3$ koşulunda;

Birincil kaya saptamaları L1 (saplama boyu) = 0.3B

S1 (saplama aralığı) = 0.5L1

İkincil kaya saptamaları L2 (saplama boyu) = 2S2

S2 (saplama aralığı) = (3-4) x Blok Boyutu

Uygulama önerileri:

- i. Saptamalar açıklıktaki kazı yüzeyine dik yerleştirilmelidir.
- ii. Kavlaklanmayı önlemek için çelik hasır kullanılmalıdır.
- iii. Birincil saptamalar süreksizliklerin kesişimi ile oluşan büyük blokların hareketini önleyebilecek teknik özelliklere sahip saptamalardan oluşmalıdır.

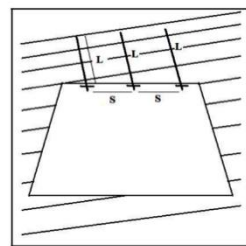
2.5.1.2. Panek tasarımı yaklaşımı

İnce tabakalanmış kaya yapılarında geçerli olduğu varsayılan kiriş oluşturma ilkesi yaklaşımını dikkate alan Panek (1964), gerdirmeli kaya saptamalarına ait bir tasarım yaklaşımı geliştirmiştir. Şekil 2.33'te Panek (1964) tarafından önerilen yaklaşıma ait bir nomogram görülmektedir. Sunulan nomogramın kullanımda aşağıdaki aşamalar ile gerçekleştirilmelidir (Özkan, 2010).

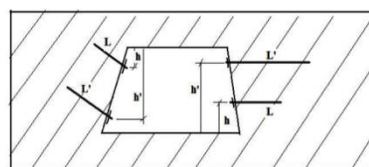
- Aşama 1: Yeraltı açıklığının hemen üzerinde oluşan yalancı tavandaki ince tabakaların ortalama kalınlığı (t) belirlenir.

- Aşama 2: Yalancı tavan içerisinde iyi bir ankraj sağlayabilmek için ince tabakaları birbirine bağlayarak kiriş etkisi yaratacak uzunlukta saplama boyu seçilmelidir.
- Aşama 3: Kaya saplamaına uygulanacak olan ön gerdirmeye miktarı, saplama kapasitenin %60'ını geçmemelidir.
- Aşama 4: Yeraltı açıklığının genişliği boyunca, saplama aralıklarının belirlenmesi için süreksizlikler arası mesafenin (JS) belirlenmesi gerekir.
- Aşama 5: Saplama aralıkları belirlenirken $S \leq 3 \times JS$ ölçütü dikkate alınmalıdır, açıklık boyunca kaya saplamaalarının aralıkları genel olarak aşama 4 ile aynı alınır.
- Aşama 6: Yukarıda sunulan aşamalar yardımıyla açıklığın genişliği dikkate alınarak kuvvetlendirme katsayısı belirlenir.

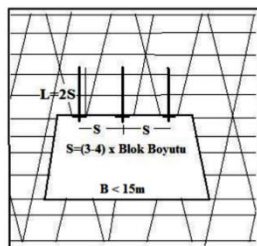
Panek 'in (1964) sunduğu bu tasarım yaklaşımında, nomogramın kullanımında, ilk olarak, rastgele kaya saplama boyu, her setteki saplama sayısı ve saplama setleri arasındaki aralık değerleri belirlenir. Daha sonra nomogramın x ekseninde, açıklık tavanındaki kaya tabaka kalınlığı (t) değerinden hareketle, A-B-C-D-E-F-G hattını takip ederek tahkimat faktörü (RF) belirlenir. Bu faktör emniyet katsayısı olarak değerlendirilmemektedir. Nomogramdan bulunan RF değeri eğer 2'ye eşit ve büyükse bu durumda tasarlanan kaya saplamaasının açıklıkta duraylılığı sağlayacağı anlaşılmaktadır (Özkan, 2010).



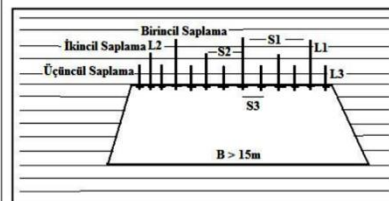
(a) $B < 15$ m, $n \leq 2$ ve $\phi = 0^\circ-45^\circ$ koşulunda kaya saplama tasarımı öngörüsü



(b) $B < 15$ m, $n \leq 2$ ve $\phi = 45^\circ-90^\circ$ koşulunda kaya saplama tasarımı öngörüsü

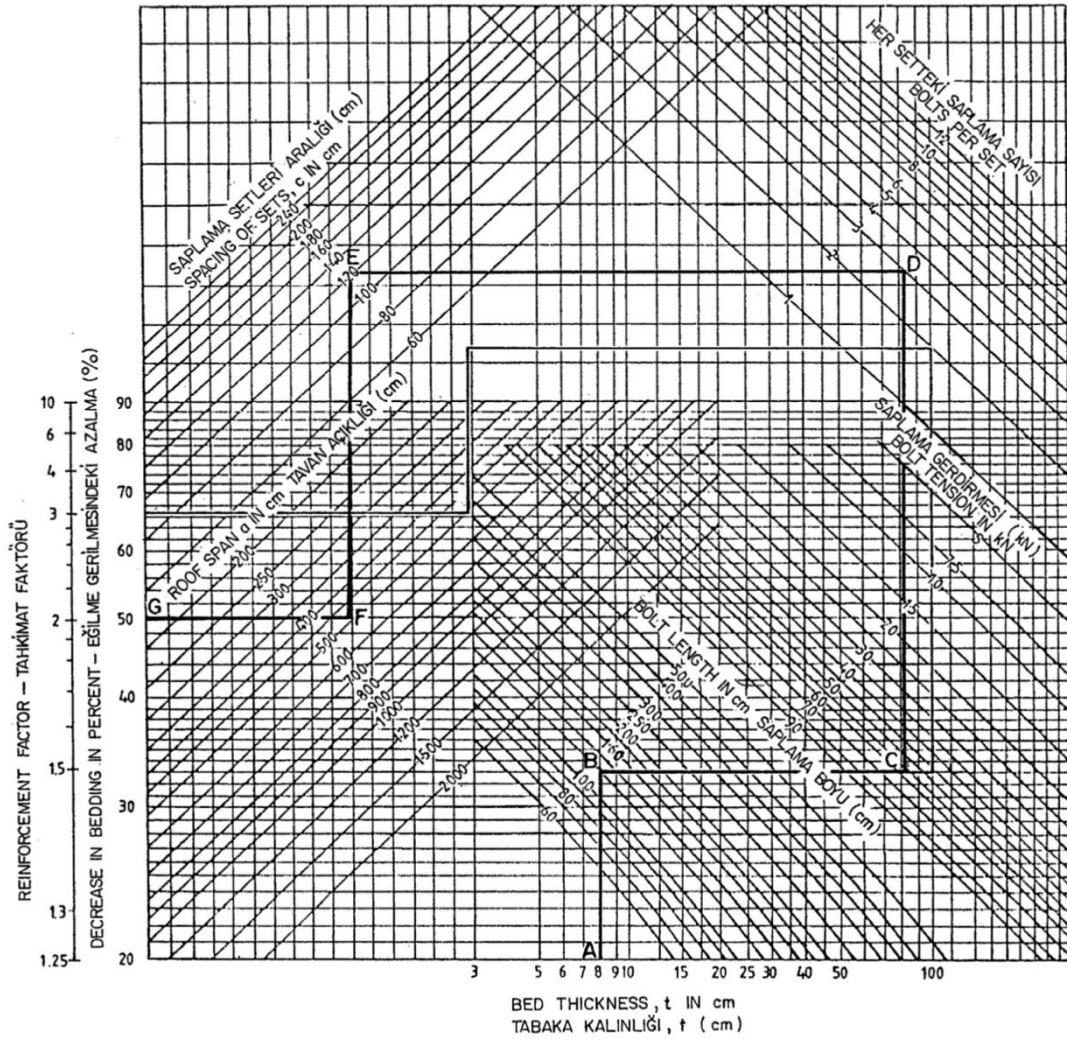


(c) $B < 15$ m ve $n \geq 3$ koşulunda kaya saplama tasarımı öngörüsü



(d) $B > 15$ m ve $n \leq 2$ koşulunda kaya saplama tasarımı öngörüsü

Şekil 2.32. Süreksizlik takımı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı etkisi ilkesi, (Özkan, 2010)



Şekil 2.33. Panek tarafından önerilen kaya saplamları tasarım yaklaşımı nomogramı (Panek, 1964)

2.5.1.3. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımı

Deere ve arkadaşları tarafından 1967 yılında önerilen ve kaya kütlelerini tanımlama çalışmalarında kullanılan Kaya Kalite Göstergesi (RQD-Rock Quality Designation) indeksi, her bir sondaj manevra boyunu (L) ve karot boyunu (X_i) dikkate alarak aşağıda belirtilen eşitlikteki gibi 0-100 aralığında tanımlanmaktadır. Deere (1968), indeks değerlerini beş aralığa bölerek her bir aralığa giren kaya kütlelerini niteliksel olarak tanımlamıştır (Çizelge 2.7 ve Eşitlik 2.4). Tahkimat önerisi Deere ve arkadaşları (1970) ve Merritt (1972) tarafından verilmiştir (Çizelge 2.8 ve Şekil 2.34).

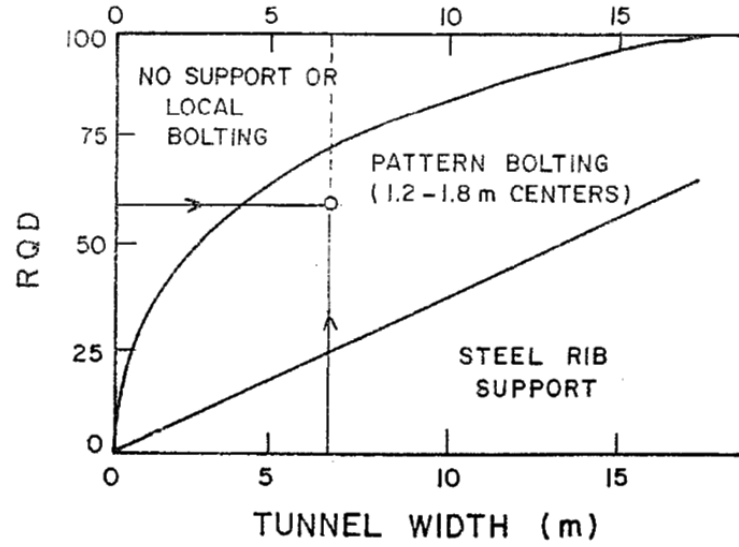
$$RQD (\%) = \left\{ \frac{\sum X_i (X_i \geq 10 \text{ cm})}{L} \right\} \times 100 \quad (2.4)$$

Çizelge 2.7. RQD indeks değerlerine bağlı kayanın mühendislik kalitesi (Deere, 1968)

| RQD (%) | Kaya Kalitesi |
|---------|---------------|
| <25 | Çok zayıf |
| 25-50 | Zayıf |
| 50-75 | Vasat |
| 75-90 | İyi |
| 90-100 | Çok iyi |

Çizelge 2.8. RQD indeks değerlerine bağlı kayanın mühendislik kalitesi (Deere, 1968)

| RQD (%) | Tünel açma metodu | Çelik bağ | Kaya Saplaması | Püskürtme Beton |
|---|-------------------|---------------------------------|----------------------|---|
| 90-100 (Çok iyi) | TBM | Gerek yok | Gerek yok | Gerek yok |
| | Delme-Patlatma | Gerek yok | Gerek yok | Gerek yok (Bölgesel ihtiyaç varsa 50-75mm) |
| 75-90 (İyi) | TBM | 1.5-2m aralıklarla hafif | 1.5-2m aralıklarla | Gerek yok (Bölgesel ihtiyaç varsa 50-75mm) |
| | Delme-Patlatma | 1.5-2m aralıklarla hafif | 1.5-2m aralıklarla | 50-75mm |
| 50-75 (Vasat) | TBM | 1.5-2m aralıklarla hafif/orta | 1.5-2m aralıklarla | 50-100mm tavanda |
| | Delme-Patlatma | 1.2-1.5m aralıklarla hafif/orta | 0.9-1.5m aralıklarla | 100mm ve üstü tavan ve yan duvarda |
| 25-50 (Zayıf) | TBM | 0.9-1.2m aralıklarla orta | 0.9-1.5m aralıklarla | 100-150mm tavan ve yan duvarda, kaya saptamaları ile birlikte |
| | Delme-Patlatma | 0.6-1.2m aralıklarla orta/ağır | 0.6-1.2m aralıklarla | 150mm ya da daha fazla, tavan ve yan duvarda, kaya saptamaları ile birlikte |
| 0-25 (Çok zayıf) (Aşırı miktarda şişen ve sıkışan kaya) | TBM | 0.6m aralıklarla orta/ağır | 0.6-1.2m aralıklarla | 150mm ya da daha fazla, bütün kazı yüzeyinde, orta ağır çelik bağlar ile birlikte |
| | Delme-Patlatma | 0.6m aralıklarla ağır | 0.9m aralıklarla | 150mm ya da daha fazla, bütün kazı yüzeyinde |
| 0-25 (Çok zayıf) (Şişen ve sıkışan kaya) | TBM | 0.6m aralıklarla çok ağır | 0.6-0.9m aralıklarla | 150mm ya da daha fazla, bütün kazı yüzeyinde, ağır çelik bağlar ile birlikte |
| | Delme-Patlatma | 0.6m aralıklarla çok ağır | 0.6-0.9m aralıklarla | 150mm ya da daha fazla, bütün kazı yüzeyinde ağır çelik bağlar ile birlikte |



Şekil 2.34. Merritt (1972) tarafından önerilen RQD indeksine bağlı tahkimat öngörüsü (Merritt, 1972)

2.5.1.4. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı

1973 yılında Bieniawski'nin ortaya attığı RMR (Rock Mass Rating-Kaya Kütle İndeksi) kaya kütle sınıflama sisteminde; kaya kütlelerini tanımlamak amacıyla altı temel parametre (dayanım, RQD, süreksizlikler arası mesafe, süreksizlikler arası durum, yer altı su durumu ve süreksizlik konumu) dikkate alınmakta ve bu parametreler sayısal olarak tanımlanmaktadır. Sistem, ilgilenilen kaya kütlelerini sayısal olarak tanımladıktan sonra kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin (E_m , c , ϕ gibi) belirlenmesinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda tahkimatsız ya da tahkimatlı en büyük açıklık değerlerini, projede önerilen boyutlardaki açıklığın tahkimatsız olarak ne kadar durabileceği, kazı çalışmalarının nasıl yürütüleceği ve tahkimat öngörülerinde bulunmaktadır (Özkan, 2010).

Sistemin öngörüsü olan tahkimat yaklaşımında demir bağlar, kaya saplamaları ve beton kaplama boyutları hakkında tasarım çıktıları verebilmektedir. Ancak bu yaklaşım tahkimat ile ilgili detay bilgiler sunamamaktadır. Bieniawski (1973) tarafından öngörülen tahkimat çıktısı Çizelge 2.9'da sunulmuştur. Uygulayıcı mühendis, ilgilendiği kaya kütlelerinin RMR değerini belirledikten sonra aşağıda sunulan çizelgeden ilgili tasarım çıktısı belirlenebilmektedir. Tasarım, at nalı kesitinde arazi gerilmesi 25 MPa'dan daha küçük olan derinlikler için verilmiştir (Özkan, 2010).

Çizelge 2.9. RMR (Bieniawski, 1973) sınıflama sistemine bağlı kaya tünellerinde kazı şekli ve tahkimat tasarımı (Tünel kesiti: at nalı, genişliği: 10 m, düşey arazi gerilmesi: < 25 MPa, kazı şekli: delme-patlatma) (Özkan, 2010)

| Kaya Kütle Sınıflaması | Kazı Şekli | Tahkimat | | |
|--|---|--|---|--|
| | | Kaya saplamaları (20 mm çaplı tamamı betonlanmış) | Püskürtme Beton | Çelik Bağ |
| RMR: 81-100 Kaya Sınıfı: I Kaya Tanımı: Çok Sağlam Kaya | 1) Tam ayna kazı 2) 3 m ilerle | Gerekli belirli noktalar haricinde tahkimat gerekmez | | |
| RMR: 61-80 Kaya Sınıfı: II Kaya Tanımı: Sağlam Kaya | 1) Tam ayna kazı 2) 1-1.5m ilerle 3) Tahkimatı aynadan 20m içinde tamamla | 1) Tavanda bölgesel kaya saplaması 2) 3m uzunlukta 3) 2.5m aralıklı 4) Gerektiğinde çelik hasırla birlikte | 1) Tavanda gerekli yerlerde 50mm kalınlığında | Gerekmez |
| RMR: 41-60 Kaya Sınıfı: III Kaya Tanımı: Orta Sağlam Kaya | 1) 2 basamak halinde kazı 2) Üst basamakta 1.5-3m ilerle 3) Her patlatma sonrası tahkimata başla 4) Tahkimatı aynadan 10m içinde tamamla | 1) Sistematik kaya saplaması 2) 4m uzunlukta 3) Tavan ve yan duvarlarda 1.5-2m aralıklı 4) Tavanda çelik hasırla birlikte | 1) Tavanda 50 100mm kalınlığında 2) Yan duvarlarda 30mm kalınlığında | Gerekmez |
| RMR: 21-40 Kaya Sınıfı: IV Kaya Tanımı: Zayıf Kaya | 1) 2 basamak halinde kazı 2) Üst basamakta 1.5-3m ilerle 3) Her patlatma sonrası tahkimata başla 4) Tahkimatı aynadan 10m içinde tamamla | 1) Sistematik kaya saplaması 2) 4-5m uzunlukta 3) Tavan ve yan duvarlarda 1-1.5m aralıklı 4) Çelik hasırla birlikte | 1) Tavanda 100 150mm kalınlığında 2) Yan duvarlarda 100 mm kalınlığında | Gerektiğinde 1,5 m aralıklı hafif bağ |
| RMR: 0-20 Kaya Sınıfı: V Kaya Tanımı: Çok Zayıf Kaya | 1) Birçok basamak halinde kazı 2) Üst basamakta 0.5-1.5m ilerle 3) Tahkimatı olabildiğince kazı ile yürüt 4) Patlatmadan sonra derhal püskürtme beton uygula | 1) Sistematik kaya saplaması 2) 5-6m uzunlukta 3) Tavan ve yan duvarlarda 1-1.5m aralıklı 4) Çelik hasırla birlikte tabana saplama uygula | 1) Tavanda 150-200mm kalınlığında 2) Yan duvarlarda 150 mm kalınlığında 3) Aynada 50mm kalınlığında | 1) Orta veya ağır bağ 2) 0,75 m aralıklarla 3) Çelik kamalar ile 4) Taban çevrili |

2.5.1.5. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1983,1986)

Kaya saplamalarına ait tasarım çalışmalarında RMR sınıflama sistemine bağlı olarak Bieniawski (1973) tarafından önerilen Çizelge 2.9'da kaya saplamalarına ait hangi türün kullanılacağı belirsizdir. Bu problemi aşmak amacıyla Ünal (1983, 1986) doktora tezi ve daha sonraki çalışmalarında kömür madenlerine yönelik RMR'a bağlı bir kaya saplama kılavuzu geliştirmiştir (Şekil 2.35). Bu kılavuzda mekanik ankrajlı ve reçine dolgulı kaya saplamaları dikkate alınmıştır. Kılavuz, 6 m (20ft), 5.5 m (18ft) ve 4.9 m (16ft) açıklığa (B) sahip galeriler ve 6m (20ft) (W) genişliğe sahip 4 yol keşişim bölgeleri için önerilmiştir. Kaya saplaması uygulaması planlanan galerilerinin ya da 4 yol ağzının tavan kısmında kalan kaya kütlelerinin RMR değeri girdi parametresi olarak kullanılmaktadır (Özkan, 2010).

Yaklaşımın uygulanma aşamasında, galeri açıklığının tavan kısmındaki kaya kütlelerini tanımlayan RMR değeri, kılavuz çizelgede yerine konulduğu takdirde mekanik ve reçine dolgulı kaya saplamalarının uzunluğu (L), saplama aralığı (S), saplama çelik kalitesi (G), saplama çapı (θ_b) ve saplama kapasitesi (C) hakkında bilgiye ulaşılabilmektedir. Ayrıca şekilsel olarak saplamaları galeri tavanına nasıl yerleştireceği konusunda bilgi sahibi olabilmektedir (Özkan, 2010).

| ROOF ROCK CLASS | ROCK MASS RATING (RMR) | ROCK LOAD HEIGHT H _r (FT) | SUPPORT SPECIFICATIONS | | ALTERNATE SUPPORT PATTERNS | | SPECIFICATIONS FOR POSTS |
|-----------------|------------------------|--------------------------------------|--|---|----------------------------|-------------------|--|
| | | | MECHANICAL BOLTS | RESIN BOLTS | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS | |
| I VERY GOOD | 90 | 2.0 | L : 2.5' S : 5' x 5' G : 40 θ : 5/8" C : 6.2 tons | | | Not economical | |
| | 80 | 4.0 | L : 2.5' S : 5' x 4.5' G : 60 (40) θ : 3/4" (7/8") C : 11 tons | L : 2.5' S : 5' x 5' G : 60 θ : 3/4" C : 12 tons | | | |
| II GOOD | 70 | 6.0 | L : 3.0' S : 4' x 4' G : 60 θ : 3/4" C : 10 tons | L : 3.0' S : 5' x 5' G : 60 θ : 3/4" C : 18 tons | | | |
| | 60 | 8.0 | L : 4.0' S : 5' x 5' G : 60 θ : 3/4" C : 9 tons | L : 4.0' S : 5' x 5' G : 60 θ : 1" C : 23.7 tons | | | θ _p = 5.5" S _p = 10' |
| III FAIR | 50 | 10.0 | L : 5.0' S : 5' x 5' G : 40 θ : 3/4" C : 8 tons | L : 4.0' S : 5' x 4' G : 60 θ : 1" C : 23.7 tons | | | θ _p = 6.5" S _p = 10' |
| | 40 | 12.0 | L : 6.0' S : 5' x 5' G : 40 θ : 3/4" C : 7 tons | L : 4' x 4' S : 5' x 5' G : 60 θ : 1" C : 23.7 tons | | | θ _p = 6.5" S _p = 7.5' |
| IV POOR | 30 | 14.0 | L : 7.0' S : 5' x 5' G : 40 θ : 5/8" C : 6 tons | L : 5' S : 5' x 5' G : 60 θ : 3/4" C : 12 tons | | | θ _p = 5.5" S _p = 5' |
| | 20 | 16.0 | L : 8.0' S : 4' x 4.5' G : 40 θ : 5/8" C : 5 tons | L : 5' S : 5' x 5' G : 60 θ : 3/4" C : 12 tons | | | θ _p = 6.0" |

L = bolt length
S = bolt spacing
G = grade of steel
θ = bolt diameter
c = bolt capacity
θ_p = post diameter
S_p = post spacing

(a) 6 m (20 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplama tasarım kılavuzu

| ROCK CLASS | ROCK MASS RATING (RMR) | ROCK LOAD HEIGHT (FT) | SUPPORT SPECIFICATIONS | | ALTERNATE SUPPORT PATTERNS | | SPECIFICATIONS FOR POSTS |
|----------------|------------------------|-----------------------|--|---|----------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | | MECHANICAL BOLTS | RESIN BOLTS | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS | |
| I VERY GOOD | 90 | 1.8 | L : 2.5' S : 5' x 5' G : 40 φ : 3/8" C : 6.2 tons | | | | |
| | 80 | 3.6 | L : 2.5' S : 5' x 5' G : 60 (40) φ : 3/4" (7/8") C : 11 tons | | | | |
| II GOOD | 70 | 5.4 | L : 3.0' S : 4.5' x 4' G : 60 φ : 3/4" C : 10 tons | L : 2.5' S : 4.5' x 5' G : 40 φ : 1" C : 15 tons | | | |
| | 60 | 7.2 | L : 4.0' S : 4.5' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 9 tons | L : 3.0' S : 4.5' x 4.5' G : 60 φ : 1" C : 18 tons | | | $\phi_p = 4.0''$ $S_p = 7.5'$ |
| III FAIR | 50 | 9.0 | L : 5.0' S : 4.5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8 tons | L : 4.0' S : 4.5' x 5' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 5.5''$ $S_p = 10.0'$ |
| | 40 | 10.8 | L : 6.0' S : 4.5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 7 tons | L : 4.0' S : 4' x 4' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 5.0''$ $S_p = 5.0'$ |
| IV POOR | 30 | 12.6 | L : 7.0' S : 4.5' x 4.5' G : 40 φ : 5/8" C : 6 tons | L : 4.0' S : 4' x 4' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 5.0''$ $S_p = 4.5'$ |
| | 20 | 14.4 | L : 8.0' S : 4.5' x 4' G : 40 φ : 5/8" C : 5 tons | L : 4.0' S : 4' x 4' G : 60 φ : 1-1/4" C : 28.76 tons | | | $\phi_p = 5.0''$ $S_p = 4.0'$ |

(b) 5.5 m (18 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplama tasarım kılavuzu

| ROCK CLASS | ROCK MASS RATING (RMR) | ROCK LOAD HEIGHT (FT) | SUPPORT SPECIFICATIONS | | ALTERNATE SUPPORT PATTERNS | | SPECIFICATIONS FOR POSTS |
|----------------|------------------------|-----------------------|---|--|----------------------------|-------------------|---------------------------------|
| | | | MECHANICAL BOLTS | RESIN BOLTS | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS | |
| I VERY GOOD | 90 | 1.6 | L : 2.5' S : 4' x 3' G : 40 φ : 5/8" C : 6.2 tons | | | | Not economical |
| | 80 | 3.2 | L : 2.5' S : 4' x 5' G : 60 (40) φ : 3/4" C : 11 tons | | | | Not economical |
| II GOOD | 70 | 4.8 | L : 3.0' S : 4' x 4.5' G : 60 (40) φ : 3/4" C : 10 tons | L : 2.5' S : 4' x 5' G : 60 φ : 3/4" C : 12 tons | | | |
| | 60 | 6.4 | L : 4.0' S : 4' x 5' G : 60 φ : 5/8" C : 9 tons | L : 3.0' S : 4' x 5' G : 40 φ : 1" C : 15.8 tons | | | $\phi_p = 4.0''$ $S_p = 10'$ |
| III FAIR | 50 | 8.0 | L : 4.0' S : 4' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8 tons | L : 3.0' S : 4' x 4.5' G : 60 φ : 1" C : 18 tons | | | $\phi_p = 5.0''$ $S_p = 10'$ |
| | 40 | 9.6 | L : 5.0' S : 4' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 7 tons | L : 4.0' S : 4' x 5' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 5.5''$ $S_p = 10'$ |
| IV POOR | 30 | 11.2 | L : 6.0' S : 4' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 6 tons | L : 4.0' S : 4' x 4.5' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 4.5''$ $S_p = 5'$ |
| | 20 | 12.8 | L : 7.0' S : 4' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 5 tons | L : 4.0' S : 4' x 4' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | | $\phi_p = 5.0''$ $S_p = 5'$ |

(c) 4.9 m (16 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplama tasarım kılavuzu

| ROCK CLASS | ROCK MASS RATING RMR | ROCK LOAD HEIGHT H _R (FT) | SUPPORT SPECIFICATIONS | | ALTERNATE SUPPORT - PATTERNS | |
|----------------|----------------------|--------------------------------------|--|--|------------------------------|-------------------|
| | | | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS |
| I VERY GOOD | 90 | 2.8 | L : 2.5' S : 5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8.8 tons | L ^A : 3.073.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8.8 tons | | |
| | | | L : 3.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 6.2 tons φ _p : 4" | L ^A : 4.0'/4.0' S : 5' x 5' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons | | |
| II GOOD | 70 | 8.5 | L : 5.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8.8 tons φ _p : 5" | L ^A : 3.075.0' S : 5' x 5' G : 60 φ : 3/4" C : 13.2 tons φ _p : 4.5" | | |
| | | | L : 6.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 3/4" C : 8.8 tons φ _p : 6" | L ^A : 3.576.0' S : 5' x 5' G : 60 φ : 3/4" C : 13.2 tons φ _p : 5.5" | | |

L^A Resin Length/Bolt Length

(d) 6 m (20 ft) genişliğe sahip 4 yol ağı galeriler için kaya saplama tasarım kılavuzu (RMR>50)

| ROCK CLASS | ROCK MASS RATING RMR | ROCK LOAD HEIGHT H _R (FT) | SUPPORT SPECIFICATIONS | | ALTERNATE SUPPORT - PATTERNS | |
|-------------|----------------------|--------------------------------------|---|--|------------------------------|-------------------|
| | | | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS | MECHANICAL BOLTS/POSTS | RESIN BOLTS/POSTS |
| III FAIR | 50 | 14.2 | L : 7.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 6.2 tons φ _p : 7" | L ^A : 3.576.0' S : 5' x 5' G : 60 φ : 3/4" C : 13.2 tons φ _p : 6.5" | | |
| | | | L : 9.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 6.2 tons φ _p : 5.5" | L ^A : 3.577.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 1" C : 15.8 tons φ _p : 7" | | |
| IV POOR | 30 | 19.8 | L : 10.0' S : 5' x 5' G : 40 φ : 5/8" C : 6.0 tons φ _p : 6.0" | L ^A : 4.578.0' S : 5' x 5' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons φ _p : 7" | | |
| | | | L : 12.0' S : 5' x 4' G : 40 φ : 5/8" C : 5.0 tons φ _p : 6.5" | L ^A : 5.078.0' S : 5' x 4' G : 60 φ : 1" C : 23.7 tons φ _p : 7" | | |

L^A Resin Length/Bolt Length

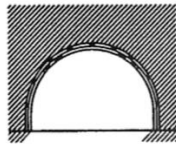
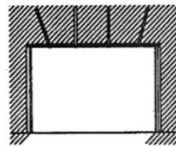
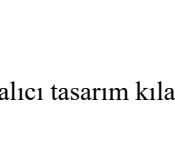
(e) 6 m (20 ft) genişliğe sahip 4 yol ağı galeriler için kaya saplama tasarım kılavuzu (RMR<50)

Şekil 2.35. Ünal (1983, 1986) tarafından kömür madenleri için önerilen kaya saplama tasarım çıktısı (Bieniawski, 1989)

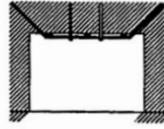
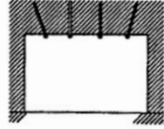

2.5.1.6. RMR sistemine bağlı Venkateswarlu tasarımı yaklaşımı (1986)

Hindistan'da bulunan 47 farklı kömür madeninde bir araştırma yapan Venkateswarlu (1986), RMR (Bieniawski, 1973) sınıflama sistemi üzerinde bazı değişiklikler önermiştir (Bieniawski, 1989). Venkateswarlu (1986) yeni RMR sistemi sonuçlarını dikkate alarak, kaya saplamaları veya çelik bağ ile tahkimat öngörüsünde bulunmuştur. Şekil 2.36'da sunulan tahkimat önerisinde bulunan Venkateswarlu (1986), 4.2-4.5 m (14-15 ft) açıklığa sahip maden galeri için geçici ve kalıcı olmak üzere iki ayrı tahkimat boyutlandırması yapmıştır. Kalıcı ve geçici tahkimat önerisinde çimento dolgulu ve reçineli kaya saplamaları dikkate alınmıştır. Saplamaların boyları (L_b), saplama aralıkları (S_b) ve saplama sıra aralıkları (S_r) verilmiştir (Özkan, 2010).


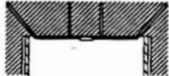
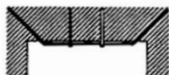
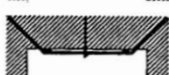

Yaklaşımın uygulama aşamasında, kömür maden galerileri üzerinde bulunan kaya kütlesi için belirlenen RMR değeri, Şekil 2.36 kullanılarak ilgili saplama türünü için, S_b ve S_r değerleri belirlenebilmektedir. Ayrıca kaya saplamasına alternatif olarak çelik bağ ile ilgili boyutlandırma verilmiştir. Önerilen kılavuzda galeri tavanında beklenen tavan basıncı (t/m^2) değerleri de sunulmuştur.

| Permanent Openings (life more than 10 yr) | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| RMR | Estimated Rock Load (t/m^2) | Support Description ^b | Recommended Supports |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0-20 | >10 | Type A: yielding steel arches of 28 kg/m section |  |
| 20-30 | 7-10 | Type B: full-column quick-setting grouted bolts with wire netting, W-straps and props; $l = 1.8$ m, $S_b = S_r = 1.0$ m or Type C: rigid steel arches; spacing 1.2 m |  |
| 30-40 | 5-7 | Type D: resin bolting with W-strap and steel props (10 cm ϕ , 5-mm wall thickness); $l = 1.8$ m, $S_b = 1.0$ m, $S_r = 1.2$ m or Type E: brick walling (40 cm thick) with steel girders (200 x 100-mm section) at 1.2-m spacing, and concrete sleepers |  |

(a) 4.2-4.5 m (14-15 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplamaları ile kalıcı tasarım kılavuzu (RMR < 40)

| Permanent Openings (life more than 10 yr) | | | |
|---|---|--|---|
| RMR | Estimated Rock Load (t/m ²) | Support Description ^a | Recommended Supports |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 40-50 | 3-5 | Type F: roof truss supplemented with grouted bolts and wooden sleepers (of treated timber); $l = 1.5$ m, $S_b = 1.0$ m, $S_r = 1.2$ m or Type G: rectangular steel supports (110 × 110-mm section) rigidly fixed at the ends with tie rods; timber lagging |  |
| 50-60 | 3-3 | Type H: full-column cement grouted bolts; $l = 1.5$ m, $S_b = S_r = 1.2$ m or Type I: steel props on either side of gallery at 1.2-m spacing |  |
| 60-80 | 0.5-2 | Type J: supports in disturbed zones wherever necessary (roof struss and bolting) |  |
| 80-100 | <0.5 | Generally supports not required | |

(b) 4.2-4.5 m (14-15 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplamaları ile kalıcı tasarım kılavuzu (RMR > 40)

| Temporary Openings (life less than 10 yr) | | | |
|---|---|---|---|
| RMR | Estimated Rock Load (t/m ²) | General Supports Recommended ^b | |
| 0-20 | >10 | Type C: steel arches |  |
| 20-30 | 7-10 | Type K: roof truss using quick-setting grout (spacing 1.0 m) and wooden props (15 cm ϕ) |  |
| 30-40 | 5-7 | Type L: rope truss system (spacing 1.2 m) with bolting; $l = 1.8$ m, $S_b = 1.0$ m, $S_r = 1.2$ m |  |
| 40-50 | 3-5 | Type M: roof truss supplemented with rope dowelling and timber lagging; $l = 1.5$ m, $S_b = 1.0$ m, $S_r = 1.2$ m |  |
| 50-60 | 2-3 | Type N: roof truss with a single rope dowel; $l = 1.5$ m |  |
| 60-80 | 0.5-2 | Roof bolting in disturbed zones only | |
| 80-100 | <0.5 | Generally no supports | |

(c) 4.2-4.5 m (14-15 ft) genişliğe sahip galeriler için kaya saplamaları ile geçici tasarım kılavuzu

Şekil 2.36. Venkateswarlu (1986) tarafından kömür madenleri için önerilen kaya saplamalarıyla kalıcı ve geçici tahkimat yaklaşımı (Bieniawski, 1989)

2.5.1.7. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1990)

Yeraltı boşluğu civarındaki kendi kendini tutamayan kaya kütesine bu özellik kaya saplamaları ile verilebilmektedir. Kazı öncesinde düzgün dağılım gösteren birincil arazi gerilmeleri kazı sonrasında değişerek (ikincil arazi gerilmeleri) açıklık kenarındaki

topuklar üzerine yığılmaktadır. Galeri üzerinde ise gerilme gevşemesine neden olmaktadır. Galeri üzerindeki gevşemiş bölgede bir arazi kemeri ve bir tavan kemeri olduğu yapılan gözlem ve teorik çalışmalardan anlaşılmaktadır (Bknz. Bölüm 2.4).

Arazi kemerinin altında oluşan yüklerin büyük bir bölümü tavan kemeri vasıtasıyla kaya kütleli içine transfer olmakta, kalan bölümü ise tavan kemeri üzerine gelmektedir. Ünal (1990)'a göre kaya saplamalarının işlevi, yük transferini sağlayan tavan kemerinin bütünlüğünü korumak, ayrıca tavan kemeri ve tavan üzerine gelen yükleri askıya alarak taşımaktır (Şekil 2.37a). Taşınması gereken toplam yük, kaya yükü yüksekliği (h_t) ile sınırlıdır. Kaya yükü yüksekliği, galeri tavanı üzerinde, tahkim edilmediği takdirde geçecek olan potansiyel duraysızlık bölgesinin yüksekliğidir (Şekil 2.37b) (Özkan, 2010).

Kaya yükü yüksekliği (h_t), galeride oluşan göçüklerin gözlenmesiyle veya RMR ve galeri genişliği (B)'ne bağlı olarak literatürde yer almaktadır (Ünal, 1983) ve aşağıdaki eşitlikten bulunabilir (Eşitlik 2.5).

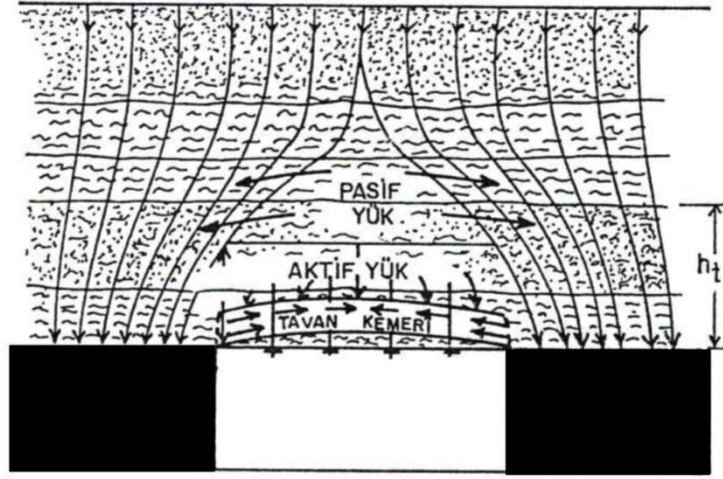
$$h_t = [(100 - \text{RMR}) / 100] B \quad (2.5)$$

Yeraltında yapılan gözlemler ve sayısal modelleme çalışmaları sonucunda (Gerçek, 1982; Ünal, 1983), kömür ocaklarında sürülen galerilerde tahkimat yapılmadığı zaman, normal olarak, galeri tavanında çekme ve makaslama gerilmeleri olduğu belirlenmiştir. Yenilme bölgelerinin yükseklikleri (h_f), kaya kütleli kalitesi belirteci (RMR) ve yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranına ($K = \sigma_h / \sigma_v$) göre değişmektedir. Bu durum Şekil 2.38 ve 2.39'da gösterilmektedir.

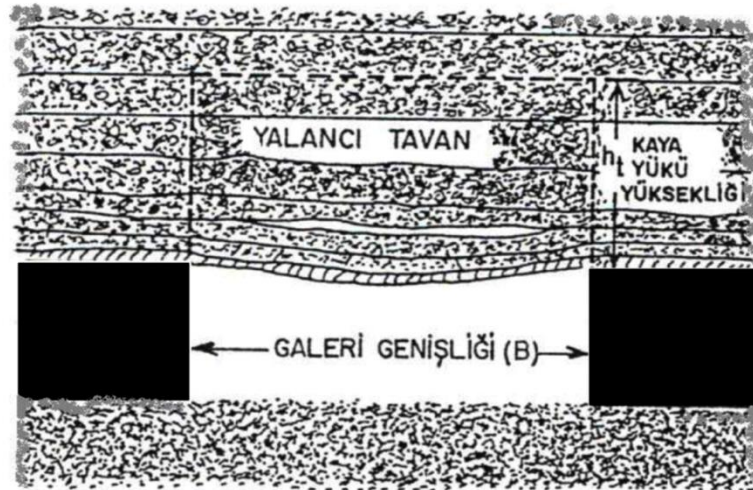
Şekil 2.38'de, 6.1 m genişliğindeki bir galeride ve yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının sabit ($K=0,3$) olduğu durumda, RMR değeri arttıkça ($\text{RMR}=23-85$) yenilme bölgelerinin yüksekliklerinin (h_f) azaldığı izlenmektedir. RMR değerinin 85 olduğu durumda ise açıklığın üzerinde hiçbir yenilme oluşmadığı belirlenmiştir.

Şekil 2.39'da yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının (K), yenilme bölgeleri yüksekliklerine etkisi gösterilmektedir. RMR değeri 45 ve genişliği 6.1 metre olan bir galeride K değeri arttıkça, önce çekme yenilmeleri bölgesi azalmaktadır. K'nin değerinin 0.8 olduğu durumda ise, yenilme yüksekliği (h_f) en düşük değerine ulaşmaktadır. Yatay gerilmeler artmaya devam ettikçe (derinlik azaldıkça, K arttıkça), kaya yükü yüksekliği artmakta bununla birlikte, tavanın merkezinde oluşan yenilmeler makaslama tipi yenilmelere dönüşmektedir. Yatay gerilmelerin fazla olmadığı koşullarda (derinlik

arttıkça, K azaldıkça), tavan üzerindeki duraysızlık bölgesi daha yüksek ancak kenarlara doğru kaymaktadır (Özkan, 2010).



(a) Tipik bir galeri tavanı üzerindeki yüklerin dağılımı



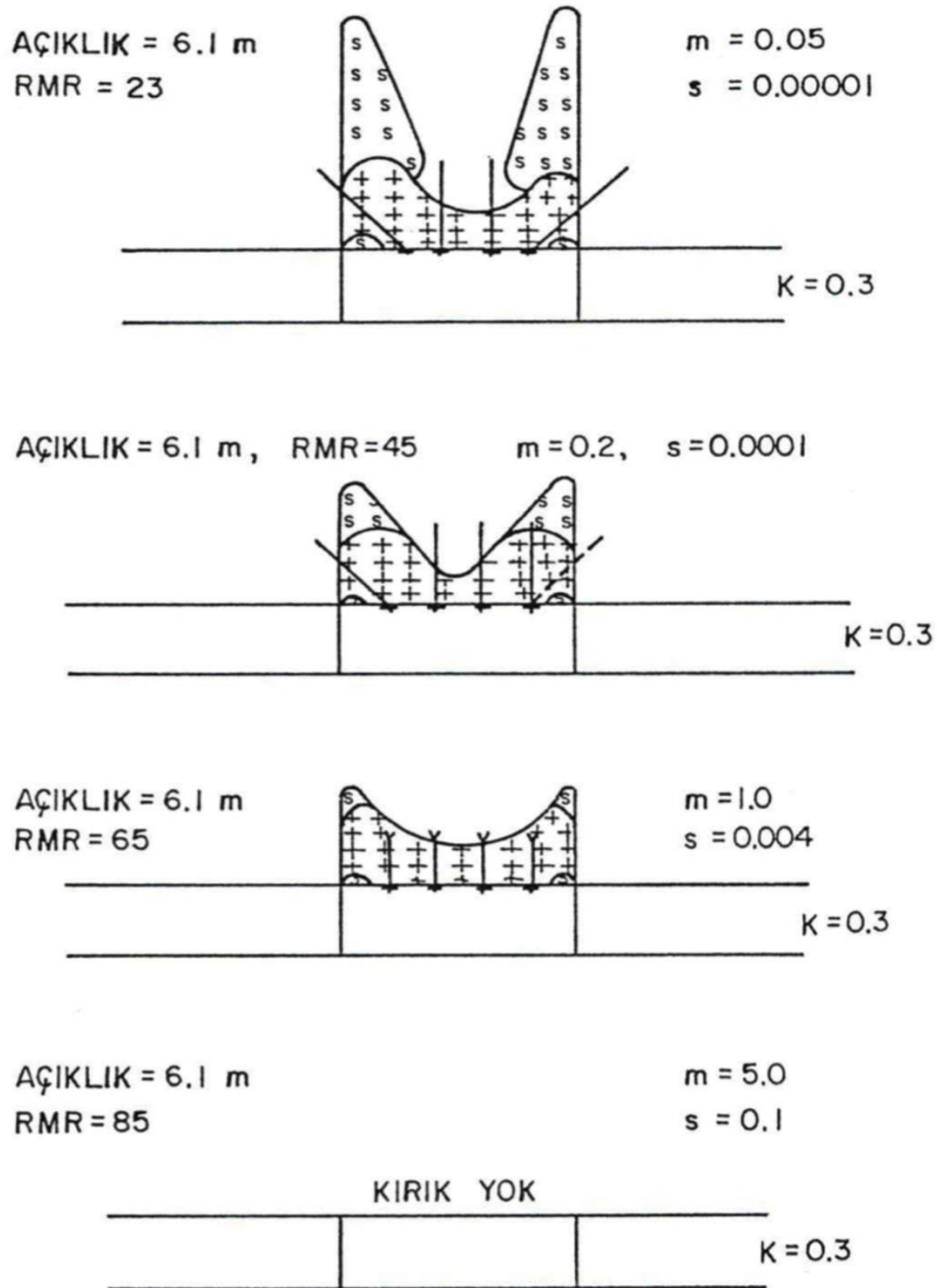
(b) Kaya yükü yüksekliği (h_t)

Şekil 2.37. Tipik bir galeri tavanındaki yüklerin davranışları (Ünal ve Ergür, 1990)

Hanna ve Canover (1989) tarafından yapılan sayısal çözümlerinde, önemli ölçüde yatay gerilmelerin bulunduğu ve kaya kütlesi kalitesinin (RMR) düşük olduğu koşullarda, duraysız bölge yüksekliğinin (h_f) galeri tavanının merkezinde oldukça fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu koşullar altında, Ünal (1990), kaya saplamalarının çoğunun askıya alma yerine, kiriş oluşturma ilkesine göre çalıştığını vurgulamaktadır

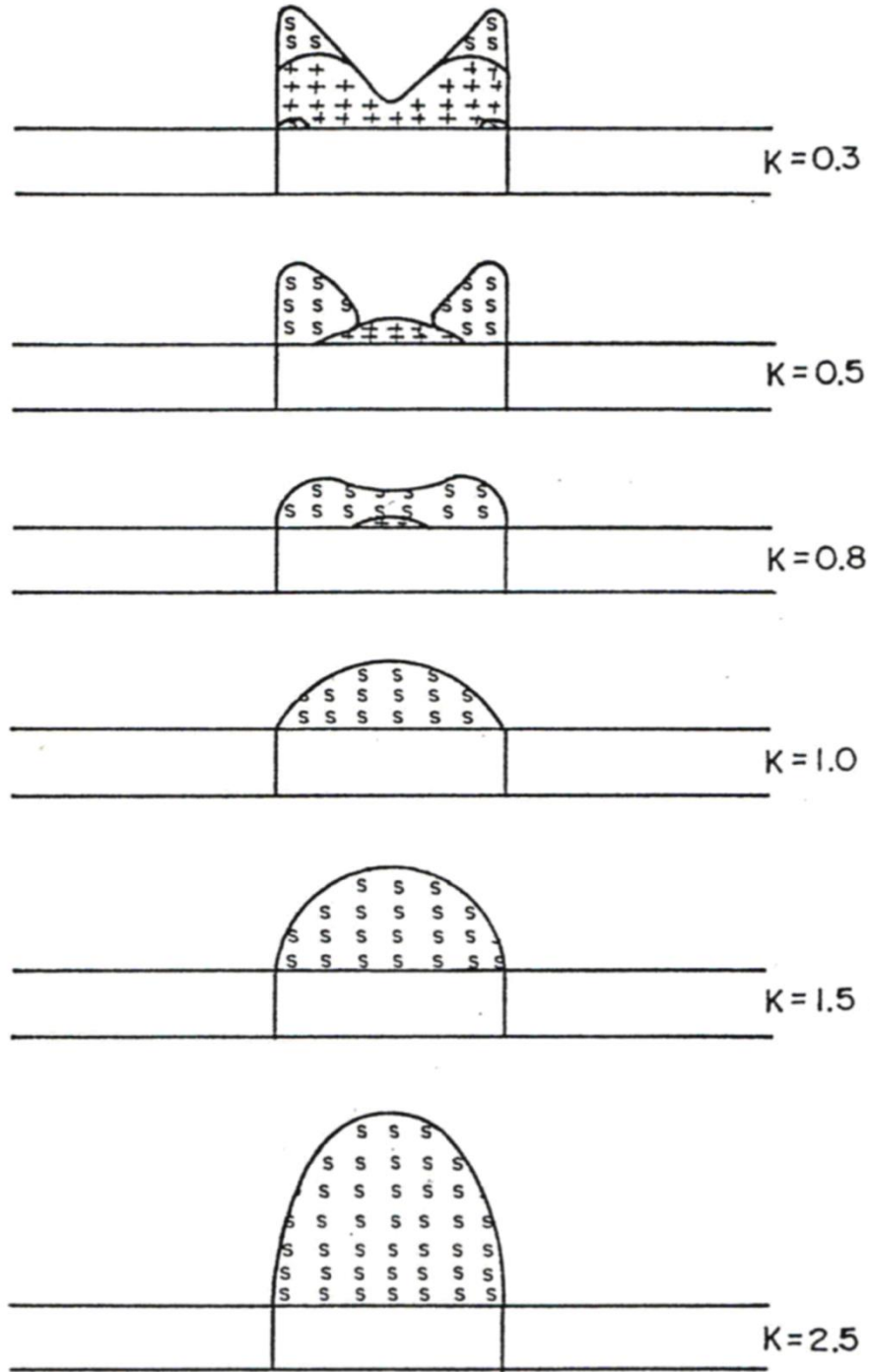
Ünal ve Ergür (1990) değişik RMR değerlerine göre, K (σ_h/σ_v) ile yenilme yüksekliğinin kaya yükü yüksekliğine oranı (h_f/h_t) ilişkisini Şekil 2.40'ta göstermişlerdir. Şekildeki yatay kesikli çizgi, sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen yenilme

yüksekliğinin (h_f), kaya yükü yüksekliğine (h_t) eşit olduğu sınırı göstermektedir. Ünal ve Ergür (1990), $K < 1.3$ olduğu durumlar için kaya yükü yüksekliğinin (h_t) analitik çalışmalar sonucu elde edilen verilere bir alt sınır oluşturduğunu kabul etmişlerdir (Özkan, 2010).



Şekil 2.38. Kaya kütlesi kalitesinin, galeriler üzerinde oluşan yenilmelere etkisi (Ünal ve Ergür, 1990)

AÇIKLIK=6.1 m, RMR=45 $m=0.2$, $s=0.0001$



Şekil 2.39. Yatay gerilme (σ_h), düşey gerilme (σ_v) oranının, galeriler üzerinde oluşan yenilmelere etkisi (Ünal ve Ergür, 1990)

Tüm bu değerlendirmeler ışığında Ünal ve Ergür (1990), $C = h_f / h_t$ 'nin 1'e eşit veya küçük olduğu durumlarda ($K \leq 1.3$ için) Eşitlik (2.5), diğer durumlarda ise ($K > 1.3$)

aşağıda sunulan eşitliği kullanmayı teklif etmişlerdir (Eşitlik 2.6). Bu eşitlikte yer alan C (h_f/h_t) değeri Şekil 2.40 'tan bulunabilir.

$$h_t = C[(100 - \text{RMR})/100]B \quad (2.6)$$

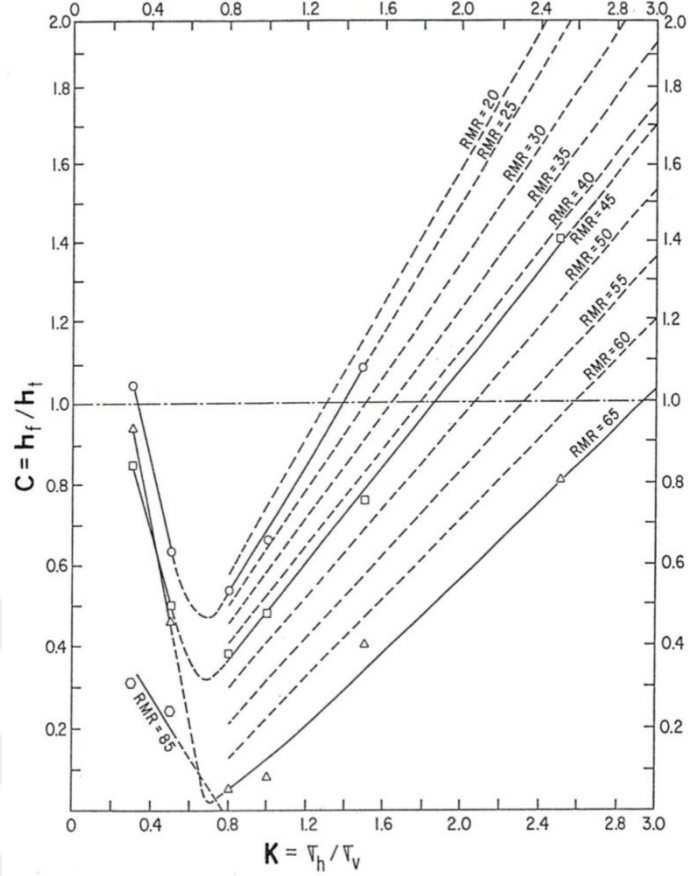
Ünal (1990), yukarıda sunulan Eşitlik 2.5 ve 2.6 kullanılarak açıklık veya dört yol ağızı üzerindeki kaya yükü yüksekliğinin (h_t) bulunabileceğini ve buna bağlı olarak aşağıda sunulan kaya saplama türleri için tahkimat tasarımı çıktılarına ulaşılabilceğini savunmaktadır (Özkan, 2010).

- i. Mekanik kaya saptamaları,
- ii. Reçineli kaya saptamaları,
- iii. Swellex kaya saptamaları,
- iv. Ağaç tahkimatla birlikte kaya saptamaları.

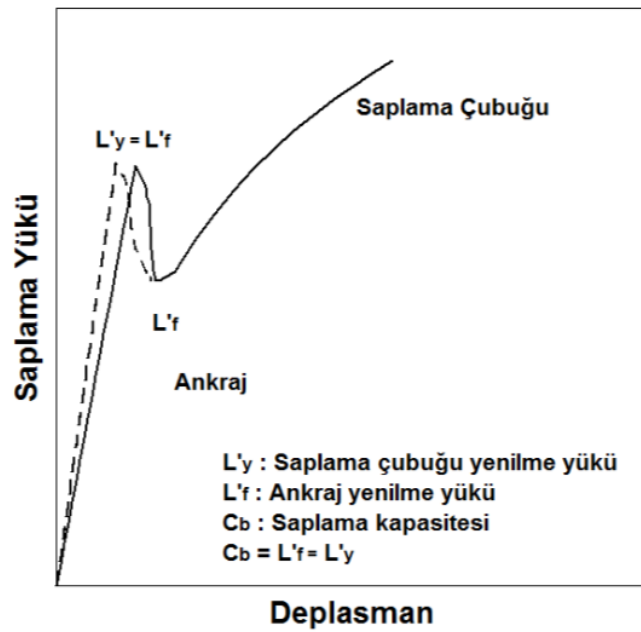
Ünal (1990), önerdiği kaya saptama tasarım yaklaşımında saptama çubuğunun mekanik davranışının laboratuvarında çekme deneyleriyle ve arazide ankraj kapasite belirleme deneyleriyle belirlenmesinin önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu davranış, kaya saptaması üzerinde uygulanan yüke bağlı olarak ölçülen toplam yer değıştirme değerlerinin yükün fonksiyonu olarak çizilmesiyle elde edilmektedir. Burada, tahkimat karakteristik eğrilerinden, tahkimat elemanı tarafından askıya alınarak taşınabilecek azami yük (saptama kapasitesi, C_b) bulunur. Saptama üzerinde oluşan yer değıştirmelardan birisi ankrajın kayaya göre göreceli hareketi, diğeri ise saptama çeliğinin deformasyonu olmaktadır (Özkan, 2010).

Kaya saptamasının ankraj yenilme yükü (L'_f) ve saptama çeliğinin akma sınırı (L'_y) ile ifade edilirse, her iki değerin birbirine eşit olması arzu edilir (Şekil 2.41). Eğer $L'_f > L'_y$ (Şekil 2.42) koşulu söz konusu olursa, saptama çubuğu ile kaya arasındaki ankraj (L'_f) görev yaparken, saptama çubuğu saptama deliğinin içerisinde daha kolay deformasyona uğrayarak kopacaktır. Diğeri bir örnekte (Şekil 2.43) $L'_y > L'_f$ koşulu söz konusu olursa, saptama çubuğu kopmadan görevine devam ederken saptama çubuğu ile kaya arasındaki ankraj (L'_f) yenilmiş, olacaktır. Her iki örnekte de sistem bütünlüğü bozulduğu için saptama istenen görevini yapamayacaktır (Özkan, 2010).

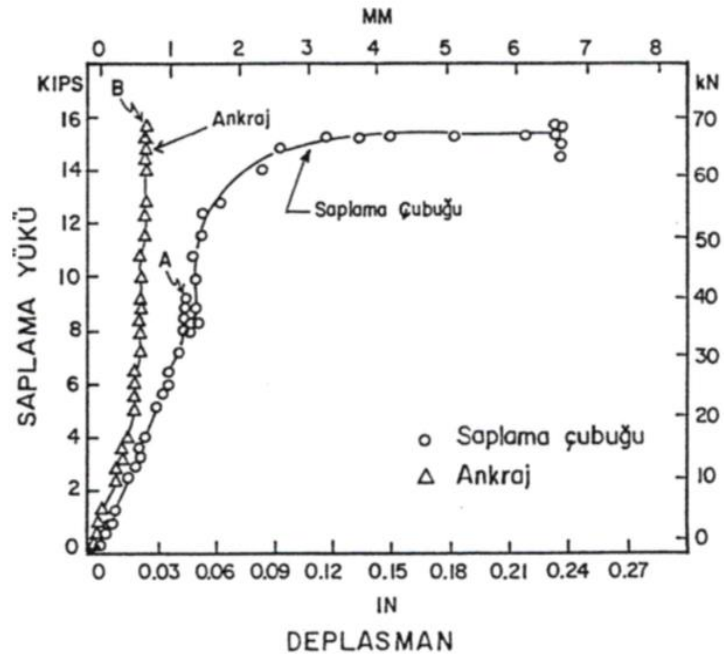
Kaya saptamalarının kapasitelerinin (C_b) belirlenmesi için, ankraj yenilme yükü (L'_f) ile saptama çeliğinin yenilme yükü (L'_y) karşılaştırmalı ve daha küçük olanı saptamanın ankraj kapasitesi (C_b) olarak kabul edilmelidir.



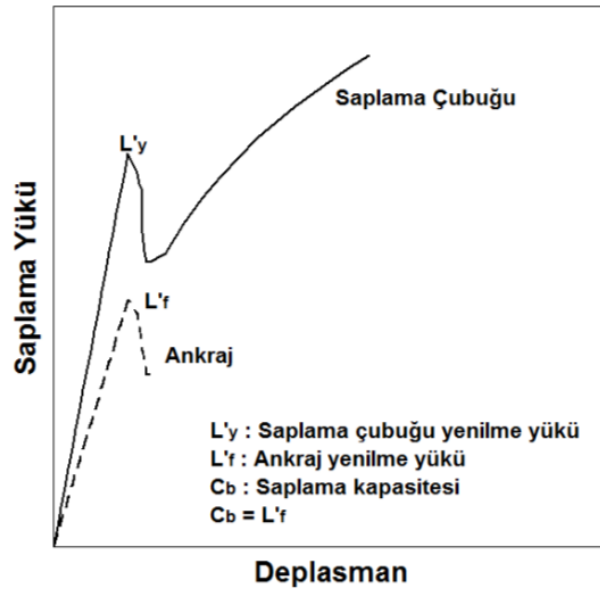
Şekil 2.40. Yatay gerilme (σ_h), düşey gerilme (σ_v) oranının, kırılma yüksekliği (h_f) kaya yüksekliği (h_t) oranına etkisi (Ünal ve Ergür, 1990)



Şekil 2.41. Kaya saplama tasarımı tahkimat karakteristik eğrilerinin ideal hali (Ünal ve Ergür, 1990)



Şekil 2.42. Kaya saplamaları için tipik tahkimat karakteristik eğrileri (A-saplama çubuğu yenilme yükü, B-ankraj yenilme yükü) (Ünal ve Ergür, 1990)



Şekil 2.43. Kaya saplama kapasitesinin, ankraj yenilme yüküne eşit olduğu tahkimat karakteristik eğrileri (Ünal ve Ergür, 1990)

Ünal (1990)'a göre, yeraltı ölçümlerinden elde edilen kapasite değerlerinin (C_b) tasarım eşitliklerinde doğrudan kullanılmamalıdır. Gerdirmeli kaya saplamalarına akma sınırlarının % 50-70'i kadar bir tork uygulanmalıdır. Bu yüzden, arazi deneylerinden elde

edilen ankraj kapasite (C_b) değerleri, tasarım eşitliklerinde kullanılırken, 1.5 değerlikle bir emniyet katsayısına bölünmelidir (Özkan, 2010).

Ünal (1990), mekanik, reçineli, Swellex kaya saplamaları ile birlikte ağaç tahkimat ile birlikte kullanılan kaya saplamaları için aşağıda sunulan eşitlikleri önermiştir (Eşitlik 2.7-2.30).

Mekanik kaya saplamaları

$$\text{Galeri için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B \quad (2.7)$$

$$\text{Dört yol kesişimi için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B' \quad (2.8)$$

$$\text{Saplama uzunluğu} \quad L_b = 0.65 \times h_t \quad (2.9)$$

$$\text{Saplama yük kapasitesi (küçük olan seçilir)} \quad C_b = L'_f \text{ veya } L'_y \quad (2.10)$$

$$\text{Saplama aralığı} \quad S_b = \sqrt{\frac{0.6 \times C_b}{\gamma^{im} \times h_t}} \quad (2.11)$$

Reçineli kaya saplamaları

$$\text{Galeri için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B \quad (2.12)$$

$$\text{Dört yol kesişimi için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B' \quad (2.13)$$

$$\text{Etkin reçine boyu} \quad L_{er} = \sqrt{\frac{B^2 \times \gamma^{im} \times h_t}{2 \times \sigma_v \times 0.33}} \quad (2.14)$$

$$\text{Saplama uzunluğu} \quad L_b = L_{er} \times 1.5 \quad (2.15)$$

$$\text{Ankraj yenilme yükü} \quad L'_f = L_{er} / BF \times 100 \quad (2.16)$$

$$\text{Saplama yük kapasitesi (küçük olan seçilir)} \quad C_b = L'_f \text{ veya } L'_y \quad (2.17)$$

$$\text{Saplama aralığı} \quad S_b = \sqrt{\frac{0.6 \times C_b}{\gamma^{im} \times h_t}} \quad (2.18)$$

Swellex tipi kaya saplamaları

$$\text{Galeri için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B \quad (2.19)$$

$$\text{Dört yol kesişimi için kaya yükü yüksekliği} \quad h_t = C[(100 - \text{RMR}) / 100]B' \quad (2.20)$$

$$\text{Taşınabilecek max. blok yüksekliği} \quad L_{er} = \sqrt{\frac{B^2 \times \gamma^{im} \times h_t}{2 \times \sigma_v \times 0.33}} \quad (2.21)$$

$$\text{Duvar basıncı} \quad q = 0.35 \times \sigma_w \quad (2.22)$$

$$\text{Tahkimatta çalışacak max. saplama uzunluğu} \quad L_{max} = \frac{C_b}{\pi \times \theta_h \times \mu \times q} \quad (2.23)$$

$$\text{Saplama uzunluğu} \quad L_b = L_{er} + L_{max} \quad (2.24)$$

$$\text{Saplama aralığı} \quad S_b = \sqrt{\frac{0.6 \times C_b}{\gamma^{im} \times h_t}} \quad (2.25)$$

Ağaç tahkimat ile birlikte kaya saplamaları

$$\text{Normal galerilere maden direği yük taşıma kapasitesi} \quad C_p' = \frac{C_p}{S_p \times B} \quad (2.26)$$

$$\text{Geniş galerilerde maden direği yük taşıma kapasitesi} \quad C_p' = \frac{C_p/2}{S_p \times B} \quad (2.27)$$

$$\text{Dört yol kesişimlerde maden direği yük t. kapasitesi} \quad C_p' = \frac{C_p/4}{[(B+4)^2 - 16]/N_p} \quad (2.28)$$

$$\text{Saplama üzerine gelen kaya yükü yüksekliği} \quad h_b = h_t - C_p' / \gamma^{im} \quad (2.29)$$

$$\text{Saplama aralığı} \quad S_b = \sqrt{\frac{0.6 \times C_b}{\gamma^{im} \times h_t}} \quad (2.30)$$

Yukarıda sunulan eşitliklerin kullanımı ile ilgili olarak Ünal (1990), uygulayıcı mühendislerin aşağıda sunulan özel notlara dikkat etmeleri uyarısını yapmıştır (Özkan, 2010).

- i. Reçineli ve mekanik kaya saplamaları için önerilen saplama çapları 19, 25 ve 32 mm olup, saplama çeliği kaliteleri ise G40 ve G60'tır.
- ii. Emniyet açısından, iki kaya saplamasının arasındaki mesafenin 1.5 m'yi aşmaması ve saplama uzunluğunun 75 cm'den az olmaması gerekir.
- iii. Verilen tüm eşitlikler metrik sistem için geçerlidir.

Eşitlik 2.7 ile Eşitlik 2.30 arasında verilen eşitliklerde kullanılmak amacıyla aşağıdaki çizelgelerden faydalanılması gerekmektedir (Çizelge 2.10-2.18). Bu çizelgelerden farklı çelik kalitelerine göre kaya saplama çapı, en küçük çelik yenilme yükü ($L'y$), ankraj yükü ($L'f$), bağ faktörü (BF) gibi parametreler belirlenerek ilgili eşitlikte kullanılmaktadır.

Ünal ve Özkan (1990) tarafından zayıf-tabakalı-anizotropik-kil içerikli-sık eklemlili kaya kütleleri için M-RMR (Modified RMR-Yeniden Düzenlenmiş Kaya Kütle İndeksi) sınıflama sistemi önermişlerdir. Önerilen sınıflama sistemi yardımıyla belirlenen M-RMR değerleri yukarıda sunulan eşitliklerde RMR değerleri yerine kullanılmıştır. Ulaşılan sonuçlar değerlendirilmiş, netice itibarı ile yukarıda sunulan eşitliklerde (Eşitlik 2.7 - Eşitlik 2.30) RMR yerine M-RMR değerlerinin kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Özkan, 2010).

Çizelge 2.10. G40 saplama çeliğinin teknik özellikleri (Ünal ve Ergür, 1990)

| Saplama Çapı (θ_b) | | Minimum Yenilme Yüğü (L'_y) | |
|-----------------------------|------|---------------------------------|--------------|
| (in) | (mm) | (US ton) | (Metrik ton) |
| 5/8 | 16 | 6.14 | 5.57 |
| 3/4 | 19 | 8.84 | 8.01 |
| 7/8 | 22 | 12.03 | 10.91 |
| 1 | 25 | 15.71 | 14.25 |
| 1 1/4 | 32 | 24.54 | 22.26 |

Çizelge 2.11. G55 saplama çeliğinin teknik özellikleri (Ünal ve Ergür, 1990)

| Saplama Çapı (θ_b) | | Minimum Yenilme Yüğü (L'_y) | |
|-----------------------------|------|---------------------------------|--------------|
| (in) | (mm) | (US ton) | (Metrik ton) |
| 5/8 | 16 | 8.44 | 7.65 |
| 3/4 | 19 | 12.15 | 11.02 |
| 7/8 | 22 | 16.54 | 15.00 |
| 1 | 25 | 21.60 | 19.60 |
| 1 1/4 | 32 | 33.75 | 30.61 |

Çizelge 2.12. G60 saplama çeliğinin teknik özellikleri (Ünal ve Ergür, 1990)

| Saplama Çapı (θ_b) | | Minimum Yenilme Yüğü (L'_y) | |
|-----------------------------|------|---------------------------------|--------------|
| (in) | (mm) | (US ton) | (Metrik ton) |
| 5/8 | 16 | 9.20 | 8.35 |
| 3/4 | 19 | 13.25 | 12.02 |
| 7/8 | 22 | 18.04 | 13.36 |
| 1 | 25 | 23.56 | 21.37 |
| 1 1/4 | 32 | 36.81 | 33.39 |

Çizelge 2.13. G75 saplama çeliğinin teknik özellikleri (Ünal ve Ergür, 1990)

| Saplama Çapı (θ_b) | | Minimum Yenilme Yüğü (L'_y) | |
|-----------------------------|------|---------------------------------|--------------|
| (in) | (mm) | (US ton) | (Metrik ton) |
| 5/8 | 16 | 11.51 | 10.43 |
| 3/4 | 19 | 16.57 | 15.03 |
| 7/8 | 22 | 22.55 | 20.45 |
| 1 | 25 | 29.45 | 26.71 |
| 1 1/4 | 32 | 46.02 | 41.74 |

Çizelge 2.14. Mekanik saptamalar için önerilen ankraj yenilme yükleri (Ünal, 1983; Özkan, 2010)

| Kaya Kütlesi Kalitesi Belirteci (RMR) | Ankraj Yenilme Yüğü (L'_f) | |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------|
| | (US ton) | (Metrik ton) |
| 100 | 14 | 12.7 |
| 90 | 12 | 10.9 |
| 80 | 11 | 10.0 |
| 70 | 10 | 9.1 |
| 60 | 9 | 8.2 |
| 50 | 8 | 7.3 |
| 40 | 7 | 6.4 |
| 30 | 6 | 5.5 |
| 20 | 5 | 4.6 |

Çizelge 2.15. Standart ölçülerdeki maden direklerinin minimum yük taşıma kapasiteleri (Ünal, 1983; Özkan, 2010)

| Direk Çapı | | Minimum Kapasite (C_p) | |
|------------|-------|----------------------------|--------------|
| (in) | (mm) | (US ton) | (Metrik ton) |
| 4 | 101.6 | 20 | 18.2 |
| 5 | 127 | 30 | 27.3 |
| 6 | 152.4 | 50 | 45.5 |
| 7 | 177.8 | 70 | 63.6 |

Çizelge 2.16. Reçineli saplamaların ankrajı için önerilen bağ faktörleri* (3 mm et kalınlığı ve pürüzlü delikler için) (Ünal ve Ergür, 1990)

| Kayanın Basma Dayanımı (σ_c , MPa) | Bağ Faktörü (BF) | | Gerekli Saplama Çapı (θ_b) | |
|--|------------------|-----------------|-------------------------------------|------|
| | (in/US ton) | (cm/metrik ton) | (in) | (mm) |
| 3,5-7,0 MPa, Çamurtaşı, Silttaşı | 3.75 | 10.48 | 0.75 | 19 |
| | 3.00 | 8.38 | 1.00 | 25 |
| | 2.50 | 6.99 | 1.25 | 32 |
| 10-20 MPa, Kömür, Yumuşak Şeyl | 2.50 | 6.99 | 0.75 | 19 |
| | 2.00 | 5.59 | 1.00 | 25 |
| | 1.67 | 4.67 | 1.25 | 32 |
| 25-70 MPa, Kumtaşı, Kireçtaşı, Sert Şeyl | 1.88 | 5.25 | 0.75 | 19 |
| | 1.50 | 4.19 | 1.00 | 25 |
| | 1.25 | 3.49 | 1.25 | 32 |

* Pürüzsüz delikler için bağ faktöründe emniyet katsayısının 2 olarak alınması, diğer bir anlatımla daha uzun saplamalar kullanılması önerilir.

Çizelge 2.17. Swellex tipi saplamaların şişirilmesinde kullanılan su basınçları (Ünal ve Ergür, 1990)

| Kayanın Basma Dayanımı (σ_c , MPa) | Su Basıncı (σ_w , MPa) |
|---|--------------------------------|
| 3.5-7.0 MPa (500-1000psi), Çamurtaşı, Silttaşı | 20 |
| | 20 |
| | 20 |
| 10-20 MPa, (1500-3000 psi) Kömür, Yumuşak Şeyl | 25 |
| | 25 |
| | 25 |
| 25-70 MPa, (4000-10000 psi) Kumtaşı, Kireçtaşı, Sert Şeyl | 30 |
| | 30 |
| | 30 |

Çizelge 2.18. Swellex ve süper Swellex tipi saplamaların teknik özellikleri (Ünal ve Ergür, 1990)

| Saplama Cinsi | Saplama Çapı, θ_b | Delik Çapı, θ_h (mm) | Yük Taşıma Kapasitesi C_b (Metrik ton) |
|---------------|--------------------------|-----------------------------|--|
| Swellex | 41 | 35 | 12 |
| Süper Swellex | 54 | 47 | 24 |

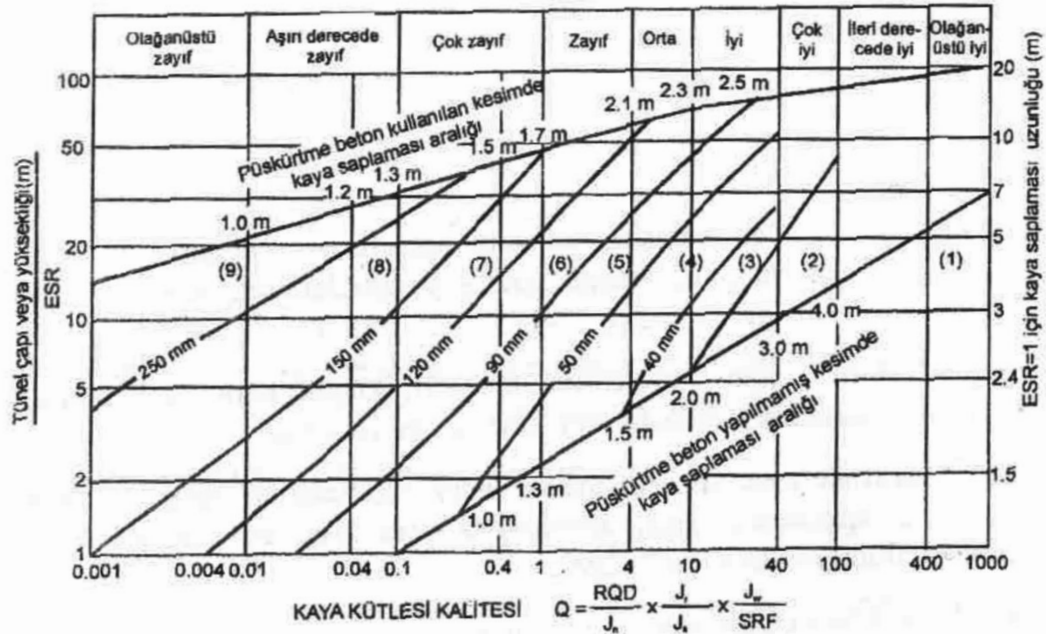
2.5.1.8. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995)

Barton ve arkadaşları tarafından 1974 yılında önerilen, ampirik tasarım yaklaşımı olarak kullanılan ve kaya kütle sınıflama sistemlerinden en yaygın kullanılan

sistemlerden biri olan Q sınıflama sistemi, kaya saplama boyları hakkında genel bir eşitlik sunmuştur (Eşitlik 2.31).

$$L=(2+0.15B)/ESR \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.31’de ifade edilen B, galeri açıklığı, ESR, Kazı Tahkimat Oranı değerleri olup L ise kaya saplama boyudur. Bunun haricinde Q sistem aynı zamanda detaylı bir tahkimat önerisini bir kılavuz çizelge ile sunmuştur. Birçok araştırmada kullanılan bu kılavuz burada sunulmamıştır. Kılavuz, çelik bağ ve püskürtme beton tahkimatı yanında kaya saplamaları ile tahkimat konusunda da önerileri içermektedir. Ancak Grimstand ve Barton (1995) tarafından Q sistemine bağlı kullanımı kolay bir tahkimat nomogramı önermişlerdir (Şekil 2.44). Bu nomogramda uygulayıcı mühendis kullanmayı planladığı kaya kütlesi için Q ve ESR değerini belirledikten sonra püskürtme beton kullanıp kullanmama durumuna göre kaya saplaması boyu (L) ve aralıkları (S) hakkında bilgi verebilmektedir (Özkan, 2010).



Şekil 2.44. Q sınıflama sistemine bağlı olarak önerilen tahkimat nomogramı (Grimstad ve Barton, 1995)

2.5.1.9. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımı (2013)

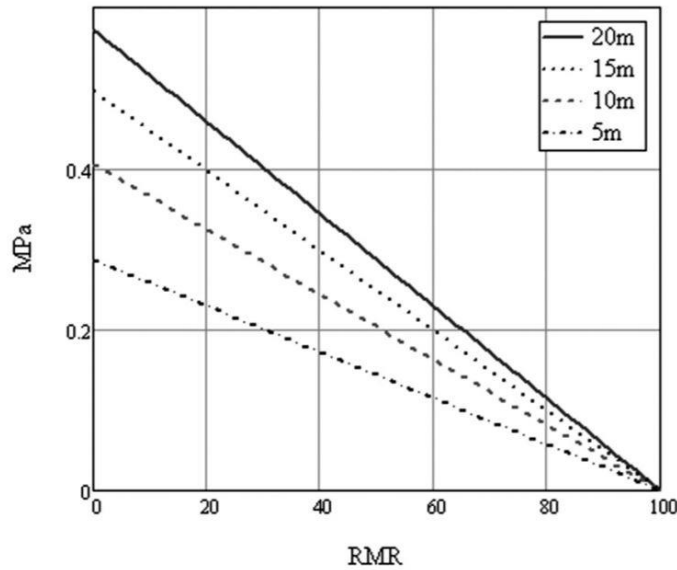
2013 yılında Lowson ve Bieniawski tarafından önerilen bu yaklaşımda (Lowson ve Bieniawski, 2013), yeraltı açıklıklarının tasarımında, kazı boşluğu ve kaya kütle

kalitesinin (RMR) değeri dikkate alınarak, kaya saplaması, püskürtme beton ve demir bağların uygulanması ile ilgili yeni tasarım çizelgeleri sunulmaktadır. Pratik tünel tasarımının farklı yönlerinin ele alındığı bu yaklaşım, ayrıca yer altı tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken kaya patlaması ve zemin sıkışması koşullarını da dikkate almaktadır.

Yaklaşımında bir tahkimat sistemine gelen kaya yükü değeri, kaya kütle durumu ve başlangıç gerilme durumunun bir fonksiyonu şeklinde ele alınarak Eşitlik 2.32’de belirtilmiştir.

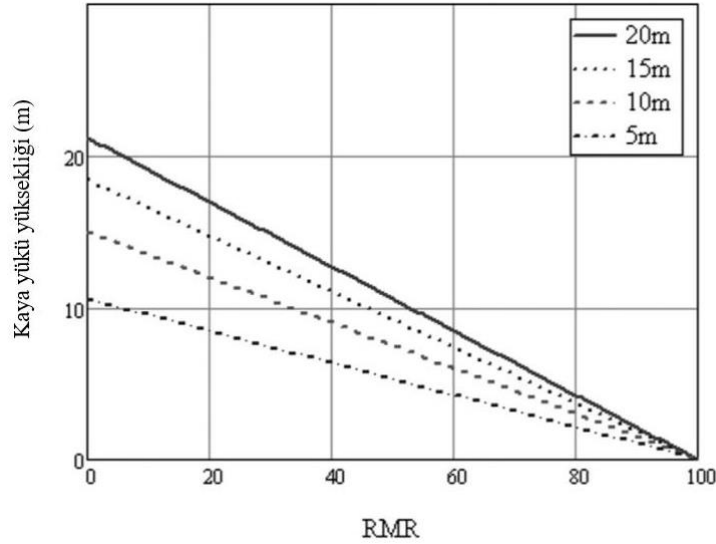
$$P_r = \frac{100-RMR}{100} \cdot 10m \cdot \left(\frac{S}{10m}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \rho_r \cdot \gamma_r \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32’de S; açıklık genişliği (m), γ_r ; bir kısmı faktör ve ρ_r ; kaya yoğunluğu olarak ifade edilmiştir. $\gamma_r = 1.5$ ve $\rho_r = 2.7 \text{ kN/m}^3$ değerleri için bu eşitlik Şekil 2.45 ve Şekil 2.46’da sunulan sonuçları vermektedir.



Şekil 2.45. Yeraltı açıklığı ile kaya yükü arasındaki ilişki (Lowson ve Bieniawski, 2013)

Şekil 2.45 ve Şekil 2.46’da, 10 metrelik bir açıklık için kazı aralığına eşit, maksimum değerde RMR miktarını düşürerek doğrusal olarak artan bir kaya yükü değeri ve kaya yükü yüksekliği verilmiştir. Farklı açıklık boyutları için bir modifikasyon faktörü uygulanmıştır, böylece maksimum yük, açıklık miktarının kareköküne bağlıdır.



Şekil 2.46. Yeraltı açıklığı ile kaya yükü yüksekliği arasındaki ilişki (Lowson ve Bieniawski, 2013)

Yaklaşımında saplamalar arası mesafe, açıklık etrafındaki kaya biriminin RMR değerine bağlı olarak aşağıda verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 2.33-2.35).

$$S_b = 0.5m + 2.5m \cdot \frac{RMR-20}{65} \quad 20 < RMR \leq 85 \quad (2.33)$$

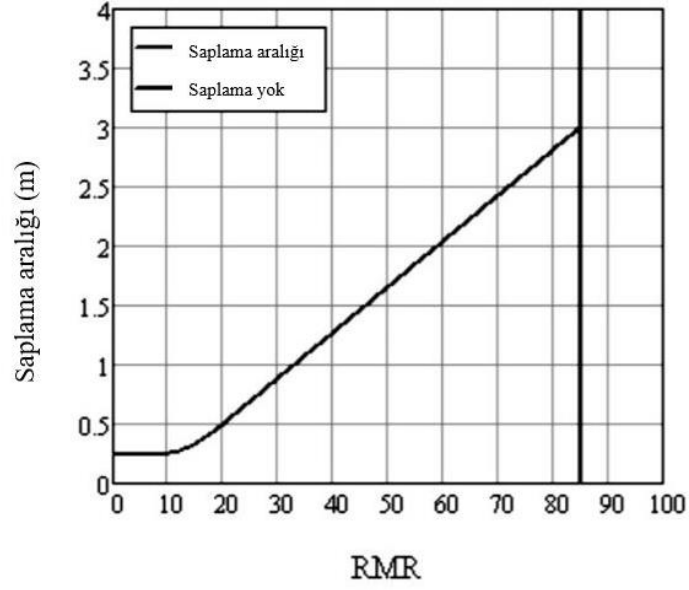
$$S_b = 0.5m + \frac{(RMR-10)^{1.5}}{140} m \quad 10 < RMR \leq 20 \quad (2.34)$$

$$S_b = 0.25 m \quad RMR < 10 \quad (2.35)$$

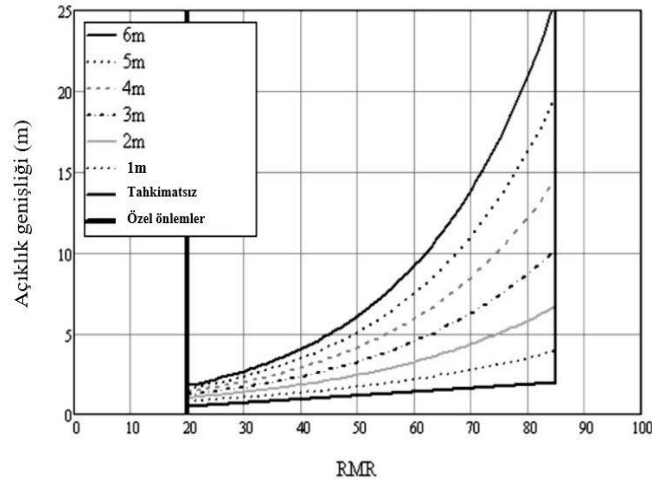
Yaklaşımında kaya saplaması uzunluğu, açıklık genişliğini ve RMR değerine bağlı olarak Eşitlik 2.36 ile ifade edilmiştir.

$$S = \frac{(L_b + 2.5)^{\frac{RMR+25}{52}}}{3.6} \quad (2.36)$$

Eşitlik 2.36'da belirtilen S değeri açıklığın metre cinsinden genişliğini, L_b ise metre cinsinden gömülü saplama uzunluğunu ifade etmektedir. Şekil 2.47 ve 2.48'de yaklaşımın önerdiği saplama aralığı ve saplama uzunluğu değerlerinin RMR ve galeri açıklığı ile olan ilişkisini gösteren grafikler sunulmuştur.



Şekil 2.47. RMR değeri ile kaya saplaması aralığı değeri ilişkisi (Lowson ve Bieniawski, 2013)



Şekil 2.48. RMR değeri ve açıklık genişliği ile kaya saplaması uzunluğu ilişkisi (Lowson ve Bieniawski, 2013)

Yaklaşımında, saplama kapasitesi RMR değerinin azalması ile doğru orantılı olarak azalmaktadır. Bu ilişki Eşitlik 2.37 ile ifade edilmiştir.

$$F_{bd} = \frac{F_b}{\gamma_b} \times \left(\frac{RMR}{85} \right)^{\frac{40}{RMR}} \quad (2.37)$$

Eşitlik 2.37'de ifade edilen F_{bd} değeri kaya saplamasının maksimum çekme kapasitesini, γ_b değeri ise bir kısmı faktörü ifade etmektedir.

2.5.2. Arazi ölçümlerine dayalı tasarım yaklaşımları

Arazi ölçümlerine dayalı kaya saplaması tasarım yaklaşımı ilk olarak Avustralya'da geliştirilmiştir (Gale, 1991; Gale ve Fabjanczyk, 1993). Sonraki yıllarda bu yaklaşım Britanya uygulama esasları tarafından da benimsenmiştir. Bu tasarım yaklaşımındaki temel kabul, aşırı miktarlarda gerilmeye uğramış ve yenilmiş tavan tabakaları, tavanda daha iç kısımlara doğru daha yüksek gerilmelere ve yenilmelere neden olur. Kaya saplaması tahkimatı, tavandaki yenilmenin yüksekliğini ve şiddetini sınırlamak için, tavandaki yenilmiş tabakaların sürtünme dayanımını harekete geçirmeyi amaçlar (Canbulat, 2008).

Arazi testleri, madencilik faaliyetleri esnasında kaya saplamalarında meydana gelen yüklerin, çok noktalı ve sonik ekstensometreleri gibi izleme sistemleri yardımıyla elde edilen tavan deformasyonları yüksekliğinin ve şiddetinin birlikte ölçülmesini içermektedir. 2000 yılında Mark yaptığı bir çalışmada; saha testlerine bağlı olarak kaya saplaması tasarımının optimizasyonunun şunları içermesi gerektiğini belirlemiştir:

- Saplama uzunluğunun, yenilmenin meydana geldiği tavan yüksekliği seviyesinin üzerinde, yeterli ankraj sağlanacak şekilde ayarlamak.
- Tavanın en çok ihtiyacı olduğu yerde tahkimatı maksimize etmek için saplama yerini ve yoğunluğunu buna göre ayarlamak.
- Saplamanın yerleştirileceği deliğin boyunu küçülterek ve delici tipini optimize ederek yük transferini iyileştirmek.

Belirtilen bu maddeler, çalışılan arazi koşullarına benzer koşullar gösteren durumlar için geçerlidir, farklı formasyonlarda ve önemli gerilme değişiklikleri gösteren durumlarda ek izlemeler gerektirebilir (Mark, 2000).

Altounyan ve Taljaard'a (2001) göre, saha testine dayalı tasarım iki ayrı aşamaya dayanmaktadır:

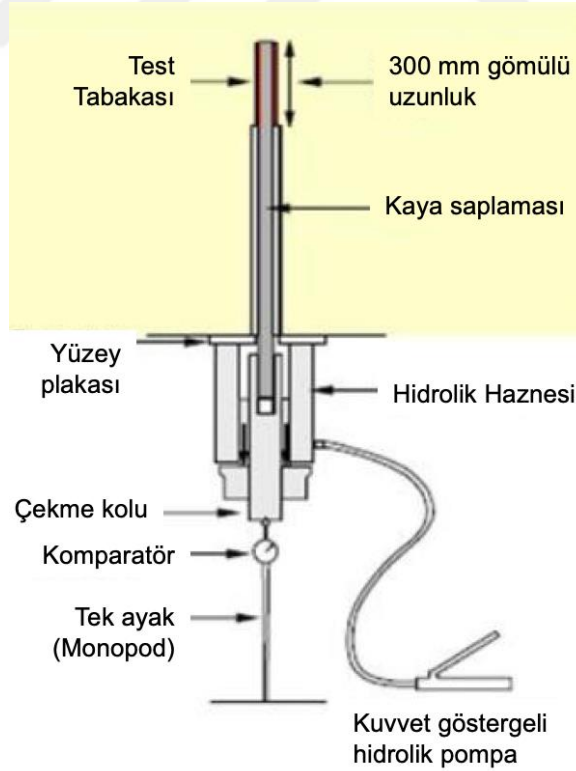
- Tasarım bilgisi sağlamak için detaylı izleme istasyonları
- Tavan hareketlerini görüntülemek ve izlemek için rutin izleme istasyonları (Altounyan ve Taljaard, 2001).

Çekme testleri (Pull-out tests), sonik ekstensometreler ya da sırtutmaz (telltale) gibi uyarı göstergeleri ve gerilme ölçerli saplamalar, tavan tabakalarının izlenmesinde kullanılan üç ana araçtır. Arazi testlerine dayanan tasarım, belirtilen bu üç ana araç ve yardımcı araçlarla gerekli izlemeleri yaparak kaya saplamalarının tasarımını belirlemeyi amaçlar.

2.5.2.1. Kısa kapsüllü çekme testleri

Mekanik bir ankraj ile galerilerde uygulanan bir kaya saplama sisteminin ankraj gücü, standart yüklü bir saplama çekilerek ölçülebilir. Reçine sabitleme sistemi ile reçinenin sağladığı ankraj, bağın uzunluğu ile ilgilidir ve bağlanma mukavemeti çeliğin mukavemetini kolayca aşabilir. Bu nedenle, kısa bir reçine kapsül ile özel olarak montelenmiş bir kaya saplama, saplama mukavemetinden ziyade reçine ankraj sisteminin ankraj özelliklerini ölçmek için gereklidir. Bu test “kısa kapsüllü çekme testi” (Short Encapsulated Pull Test- SEPT) olarak bilinir ve tam olarak montelenmiş kaya saplama sisteminin reçine ankrajını veya yapıştırma özelliklerini ölçmek için uluslararası kabul görmüş bir yöntemdir (Canbulat, 2008).

Reçineli bir kaya saplama sisteminin bağ mukavemeti, saplama performansını belirleyen temel bir parametredir. Bağ mukavemeti ne kadar güçlüyse, kaya saplama sisteminin ankraj bölgesi o kadar kısaldır ve mevcut tavan tabakalarının hareketine direnç sağlamak için saplamanın dayanım zonu daha uzun olur (Canbulat, 2008). Standart bir kısa kapsüllü çekme testi düzeneği Şekil 2.49’da sunulmuştur.



Şekil 2.49. Kısa kapsüllü çekme testi ekipmanları (Canbulat, 2008)

Yük transfer kapasitesi, tavan tabakalarına destek sağlamada, kaya saplamaının etkisine eşit bir parametredir. Serbousek ve Signer (1987), bu durumu kaya saplamaı boyunca, mesafeye göre yükteki değişim olarak tanımlamışlardır. Gray ve Finlow-Bates (1998) ise bu durumu, kaya saplamaının birim alanı başına üretilen maksimum gerilmesi olarak tanımlamışlardır. Daha etkili tahkimat sistemleri, düşük deformasyonlarda üretilen yüksek yüklerle birlikte, yüksek yük transfer kapasiteleri ile karakterize edilir (Serbousek ve Signer, 1987; Gray ve Finlow-Bates, 1998).

Geçtiğimiz 30 yılda tam kapsüllü bir saplama ile yük transferinin yapısına ilişkin iki adet model gelişmiştir. Bu modellerden birincisi, yerinde ve laboratuvarında gerçekleştirilen çekme testlerinde gözlemlenen, doğrusal olmayan yük transferini açıklamaktadır. Alternatif bir model ise saha çalışmalarında da gözlemlenen ancak tabaka ayrılması yoluyla yük aktarımının başlatıldığı doğrusal yük transferini açıklamaktadır. 1998 yılında Whitaker bu iki modele, kaya saplamaı yükleme yöntemlerinin farklılığı nedeniyle açıklık getirmiştir. Sıradan bir çekme testinde, genellikle hidrolik bir silindir olan dolgulu kaya saplamaının, boşta olan ucuna aksenal bir çekme yükü uygulanır. Aynı zamanda ortaya çıkan hidrolik silindirin tepki kuvveti, çevre kayanın yüzeyine karşı baskı yapma amacıyla olduğundan basınç yükünü başlatır (Whitaker, 1998).

2003 yılında Hagan, laboratuvar koşullarında bir kaya saplamaının yüklenme koşullarının etkilerini araştırmak için bir laboratuvar test programı hazırlamıştır. Hagan (2003) yükü gerilme ayarlı kaya saplamaına uygulamak için iki farklı yöntem uygulamıştır. Birinci yöntem, standart bir çekme testini tekrarlamak için tasarlanırken, ikinci yöntemde tabaka ayrışmasına bağlı bir kaya saplamaının yükleme durumunu yansıtmak için tasarlanmıştır. Test sonucunda Hagan (2003), birinci yöntemde çekme testinin doğrusal olmayan yük transferi izlediğini, ikinci yöntemde ise tabaka ayrışmasına bağlı yük transferinin mesafe ile azalan, doğrusal bir eğilim gösterdiğini tespit etmiştir. Hagan (2003), bu çalışmasının sonucunda, çekme testlerine bağlı sonuçlar yorumlanırken dikkatli olunması gerektiğini, bunun nedeninin de kaya saplamaı tahkimat sistemi tasarlanırken, tasarım performansı, kaya saplamaının üstlendiği yük transferi ve kısıtlanması sebebiyle, gerçekte sağlanacak olan tahkimat seviyesini olduğundan fazla gösterme eğiliminde olduğunu belirtmiştir (Hagan, 2003).

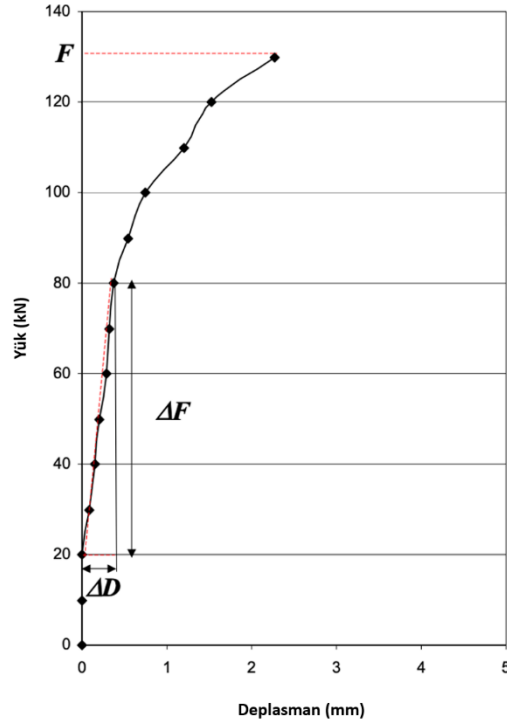
Kısa kapsüllü çekme testinde, kavrama faktörü (bağ mukavemeti), temas kesme dayanımı ve sistem rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Eşitlik 2.38-2.40). Bu testlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerine örnek bir gösterim Şekil 2.50'de sunulmuştur (Canbulat, 2008).

$$\text{Kavrama Faktörü (GP)} \quad GP = \frac{F}{l} \quad [\text{kN/mm}] \quad (2.38)$$

$$\text{Temas Kesme Dayanımı } (\tau) \quad \tau = \frac{F}{\pi dl} \quad [\text{MPa}] \quad (2.39)$$

$$\text{Sistem rijitliği (k)} \quad k = \frac{\Delta F}{\Delta D} \quad [\text{kN/mm}] \quad (2.40)$$

Eşitliklerde belirtilen F , kayma yükünü (kN), ΔF , yükteki değişimi (Genellikle 20 kN ile 80 kN arası) ΔD , Deformasyon değişimini (mm), l , ankraj uzunluğunu (250 mm), d ise delik çapını (mm) ifade etmektedir.



Şekil 2.50. Tipik bir kısa kapsüllü çekme testi sonuç grafiği (Canbulat, 2008)

Yukarıda verilen eşitliklerdeki (Eşitlik 2.38-2.40) ilişkileri kullanabilmek için kesme yenilmesi, reçine-kaya kütlesi ara yüzeyi ya da reçine-kaya saptaması ara yüzeyi arasında yer almak zorundadır. Zayıf tavan tabakalarında yenilme mekanizmasını, reçine-kaya kütlesi ara yüzeyi kontrol eder. Sağlam kaya malzemelerinde ise, reçine-kaya ara yüzeyinde bağ yenilmesi meydana gelebilir. Eğer yenilme oluşmazsa ve uygulanan kuvvet, maksimum kesme gerilmesini aşarsa, uygulanan kuvvet için Eşitlik 2.39'dan kesme gerilmesi hesaplanabilir ve aynı şekilde sistem rijitliği Eşitlik 2.40 ile hesaplanabilir (Pile ve ark., 2003).

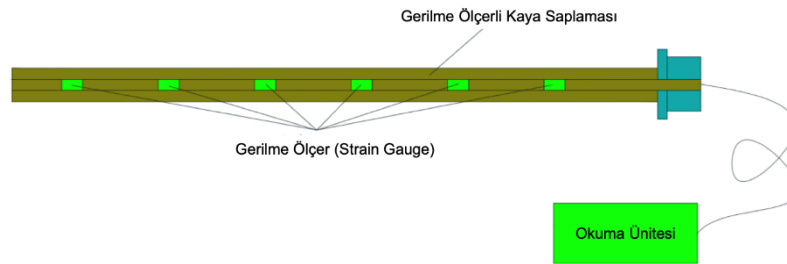
Kısa kapsüllü çekme testleriyle belirlenmiş iyi bir ankraj, ankraj kapasitesinin saplama sünme dayanımına eşit ya da nispeten biraz daha fazla olduğu minimum harekete (yüksek bağ mukavemeti) sahip olarak tanımlanır. Zayıf bir ankraj, aşırı harekete neden olur ve daha düşük yüklerde saplama sünme dayanımından daha başarısız olur (Canbulat, 2008).

Biron ve Arioğlu (1985), bir kaya saplamasının çekme yükündeki yük dağılımının, reçinenin elastik modülünün (ER), tavan kayacın elastik modülüne (ERR) oranı ile belirlendiğini belirtmişlerdir (Biron ve Arioğlu, 1985). Araştırmacıların yaptıkları bu çalışmaya göre;

- $ER/ERR > 10$ ise yük dağılımı doğrusaldır,
- $ER/ERR < 10$ ise yük dağılımı doğrusal değildir.

2.5.2.2. Gerilme ölçerli kaya saplamaları

Gerilme ölçerli tam dolgulu bir kaya saplaması, uzunluğu boyunca tutturulmuş gerilme ölçer çiftlerine sahiptir (Şekil 2.51). Elastisite modülü ve saplamanın kesit alanı kullanılarak saplama yükü hesaplanabilir ve saplama uzunluğu boyunca gerilmeler ölçülebilir.



Şekil 2.51. Gerilme ölçerli kaya saplaması ve bileşenleri (Song ve ark., 2017)

Gerilme ölçerli saplamalar, farklı madencilik faaliyetlerinde, saplamanın üzerine gelen yükü kesintisiz olarak ve yerinde ölçmek için kullanılırlar. Saplama yükü, kaya saplama sistemi tasarımının (saplama uzunluğu ve aralığı) izin verdiği optimum göçme yükü ile karşılaştırılır (Signer ve Jones, 1990). Kaya saplama tahkimat sistemini tasarlamamanın bir başka yolu, her gerilme ölçer ünitesi için toplam gerilmeyi (eksenel ve eğilme gerilmelerini) hesaplamaktır (Signer ve ark., 1997).

Bu ölçüm sistemine bağlı tasarım yaklaşımına göre, arazi ölçümlerinden elde edilen toplam gerilme, izin verilen maksimum gerilmeden daha büyükse, saptamadaki gerilmeyi azaltmak için saptama aralığının azaltılması, saptama sayısının artırılması ve saptama çapının artırılması önlemleri alınabilir (Canbulat, 2008).

Gerilme ölçerli saptamalar, saptama uzunluğu boyunca eksenel ve eğilme yüklerin dağılımları hakkında detaylı veriler sağlamasına rağmen, aşağıda belirtilen dezavantajlara sahiptirler (Signer, 1990);

- i. Saptama çeliği (nervürlü çelik) her yönünde belirli bir derinlikte frezelenir ve bu durum saptama alanının yanlış temsil edilmesine neden olur.
- ii. Gerilme ölçerlerin saptama çubuğu içerisinde aynı hizada olması en doğru sonuçları elde etmek için oldukça kritiktir.
- iii. Saptama çubuğu üzerine yüklenen aşırı yükleme durumunda veya tel kopması gibi durumların sonucu olarak, yapılacak okumalardan elde edilecek eksenel yük değerleri hatalı olabilir (Signer ve Lewis, 1998).

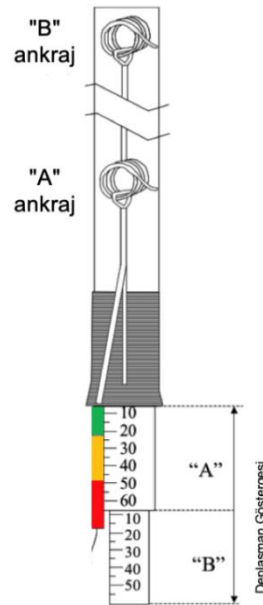
2.5.2.3. Sonik ekstensometreler ve Sırtutmazlar (telltale)

Bir yeraltı boşluğunu tahkim etmek için tasarlanan kaya saptamalarının tasarımından bağımsız olarak gerçekleştirilecek yenilmeler her zaman mümkündür. Açıklık etrafında oluşabilecek olumsuz bir durum önceden tespit edilirse duraysız bir alan ikincil bir destekle kontrol edilebilir (Yassien, 2003).

Dünyanın birçok bölgesinde, kaya saptaması tahkimatının uygulandığı bölgelerde, tavan hareketlerinin rutin bir şekilde izlenmesi için galerilerde ve yeraltındaki açıklıkların kesiştiği kavşak bölgelerinde “telltale”, Türkçe’deki karşılığı “Sırtutmaz” olan uyarı göstergeleri kullanmak yaygın hale gelmiştir. Özellikle İngiltere ve Kanada’da bu uygulama bazı yeraltı madenlerinde kaya saptaması tahkimatı uygulanan bölgelerde, her 20 metrede bir uyarı göstergesi kullanmak zorunlu hale getirilmiştir. Sırtutmazlar iki hareketli indikatöre sahiptir (Şekil 2.52). Bunlardan biri saptama yüksekliğindeki yer değiştirmeleri diğeri ise saptama üzerindeki hareketleri göstermektedir. Bu izleme sistemleri galeri içerisinde herkes tarafından görülebilir bir bölgeye konumlanır ve göstergeler ile elde edilen veriler daha sonra incelenmek üzere kaydedilebilir (Altounyan ve ark., 1997).

Mark (2000) yaptığı bir çalışmada, uyarı göstergelerini en etkili bir biçimde kullanmanın ve en doğru izlemenin yolunun uygun “etki seviyelerinin” belirlenmesi ile

olabileceğini belirtmiştir. İngiltere’de tipik uygun etki seviyeleri, saplamalı tabakada 25 mm ve saplama üzerinde 10 ile 25 mm arasındadır (Kent ve ark., 1999). Bununla birlikte Avustralya’daki maden ocaklarında etki seviyesi araştırmalarında böyle bir benzerlik bulunamamıştır (Mark, 2000). Burada bazı maden ocaklarında etki seviyesi olarak haftada 1 ile 10 mm aralıklarında oluşan deformasyonlar değerlendirilmiştir bazı maden ocaklarında ise toplam hareket kriteri temel alınmıştır.



Şekil 2.52. Çift ankrajlı bir sırtutmaz (telltale) ve bağlantı elemanları (Canbulat, 2008)

Genellikle, tavan izleme, tasarımda hesaba katılabilecek gizli bir jeolojik faktörü ortaya çıkarabilir (Mark, 2000). Örneğin, İngiltere'deki Selby kömür sahalarından gelen izleme verilerinin geriye dönük analizinde, girdilerin yatay gerilmeler ile ilgili olumsuz yönlendirme yaptığını ve kilit kalınlığının 2.5 m'yi aştığı yerlerde aşırı tavan hareketlerinin meydana geldiğini tespit etti (Kent ve ark., 1998).

2.5.3. Analitik yaklaşımlar

Elastisite teorisi dikkate alındığında, kaya saplama sistemlerinin tasarımcıları, yüksek dayanımlı kaya kütlelerinde açılan yeraltı boşluklarının etrafında yer alan yeni gerilmelerin, elastisite kanunlarının belirttiği davranışları takip ettiğini belirtmişlerdir. Sonraki dönemlerde gelişen yerinde ve sayısal (nümerik) analiz teknikleri, herhangi bir yeraltı açıklığının etrafındaki gerilmeleri belirlemeyi mümkün kılmıştır. Günümüzde,

analitik yaklaşımları birbirlerine olan bağımlılıklarından dolayı birkaç farklı türe ayırmak oldukça zordur. Bu nedenle, genel olarak analitik yaklaşımlar, teorik hesaplamalar, fiziksel modelleme ve sayısal (nümerik) modelleme olarak açıklanabilir.

2.5.3.1. Teorik yaklaşımlar

Kaya saplamaları tasarımı için kullanılan en eski, en basit ve muhtemelen hala en yaygın kullanılan yöntem geleneksel ölü ağırlık yükleme tasarım yaklaşımıdır (Obert ve Duvall, 1967; Stillborg, 1986). Kaya saplamalarının tasarımı, ölü ağırlık prensibine bağlı olarak aşağıda belirtilen gereklilikleri karşılamalıdır (Eşitlik 2.41-2.44).

- Kaya saplaması sisteminin dayanımı (SB), taşınması gereken gevşek tavan tabakalarının ağırlığından (W) daha büyük olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n SB_i > W \quad (2.41)$$

- Kaya saplaması sisteminin ankraj kuvveti (AF), taşınması gereken gevşek tavan tabakalarının ağırlığından (W) daha büyük olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n AF_i > W \quad (2.42)$$

- Tahkimat sistemi tasarımı genellikle bir emniyet faktörü (SF) içerir.

$$\sum_{i=1}^n SB_i - SF \cdot W > 0 \quad \text{ve} \quad \sum_{i=1}^n AF_i - SF \cdot W > 0 \quad (2.43)$$

- Gevşek tabaka veya tabakaların kalınlığını tahkim etmek için gerekli olan 1 m² başına düşen kaya saplaması sayısı (n) aşağıda belirtilen denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$n = SF \frac{\rho g t}{P_f} \quad (2.44)$$

Yukarıda belirtilen eşitliklerde; SF; emniyet faktörünü, ρ ; askıda olan tabakaların yoğunluğunu, g; yerçekimi ivmesini ve P_f ; ankraj kapasitesini ifade etmektedir.

Bir diğer analitik tasarım yaklaşımı olarak kabul edilen süspansiyon yöntemi, düşük gerilme kuvvetlerine maruz kalan kaya ortamları için uygundur. Bununla birlikte yatay kuvvetler, kaya saplamalarına uygulanan yükleri büyük ölçüde arttırabilir (Wright, 1973; Fairhurst ve Singh, 1974). Signer ve arkadaşları 1993 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, kaya saplamalarının maruz kaldıkları yük ölçümlerinde, ölçülen yüklerin, ölü ağırlık tasarımı ile tahmin edilenden iki kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır (Signer ve ark., 1993).

Kiriş teorisi, 1980'li yıllardan bu yana dünyanın birçok bölgesinde, yeraltı kömür madenlerinde, kaya saplama sistemlerinin tasarımında uygulanmıştır (Obert ve Duvall,

1967; Wagner, 1985; Van der Merwe, 1998; Van der Merwe ve ark., 2002). Kiriş teorisini ifade eden parametreler ve eşitlikler aşağıda sunulmuştur (Eşitlik 2.45-2.47).

$$\text{Maksimum eğilme gerilmesi (MPa); } \sigma_{xy} = \frac{\rho q L^2}{2t} \quad (2.45)$$

$$\text{Maksimum kesme gerilmesi (MPa); } \sigma_{xy} = \frac{3\rho q L}{4} \quad (2.46)$$

$$\text{Maksimum sapma (m); } \sigma_{xy} = \frac{\rho q L^4}{32E_t^2} \quad (2.47)$$

Yukarda belirtilen eşitliklerde; L; galeri genişliğini (m), t; tavan tabakası kalınlığını (m), ρ ; askıda olan tabakaların yoğunluğunu, g; yerçekimi ivmesini ve E; elastisite modülünü (MPa) ifade etmektedir.

2.5.3.2. Fiziksel modelleme

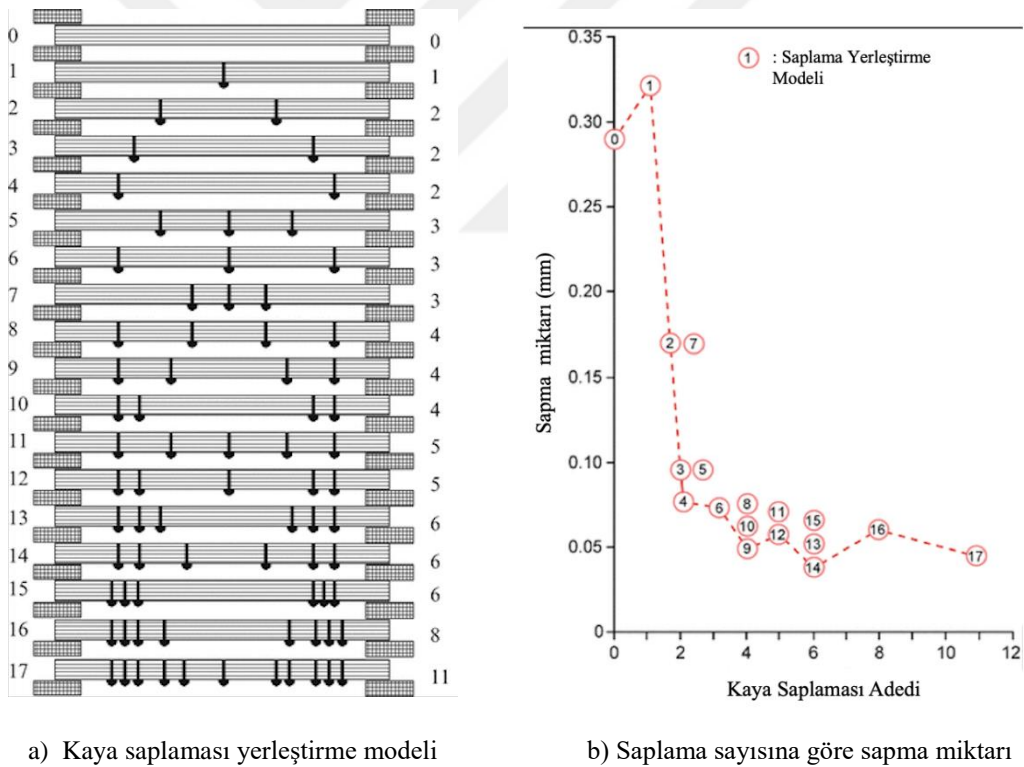
Fiziksel modelleme yaklaşımı, yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımı için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Laboratuvar koşullarında, kontrollü test araçları ile kaya saplama performansının doğru bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır. Ancak bu yaklaşım ile yapılacak olan çalışmalarda, açıklık geometrisi ve malzeme özelliklerinin tutarlı bir benzerlik oranını sağlamak zordur (Yassien, 2003).

Çok sayıda araştırmacı, kaya saplama performansını araştırmak için fiziksel modeller kullanmıştır (Fairhurst ve Singh, 1974; Dunham, 1976; Gerdeen ve ark., 1979). Bu araştırmacılardan biri olan Dunham (1976), kaya saplama ile tahkim edilmiş bir yeraltı maden galerisi için fiziksel bir modeli simüle ederek, saplama uzunluğunun, saplama aralığının ve saplama düzeninin, galeri tavanı duraylılığı üzerine etkisini incelemiştir.

Çalışmada, tam dolgulu bir kaya saplama, 0.4 mm çapında gümüş bir tel ile simüle edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak reçine, şırınga kullanılarak deliğin içerisine enjekte edilmiştir. Dunham (1976), yapmış olduğu bu çalışma ile kaya saplama uzunluğunun, tavan duraylılığının artırılmasında son derece önemli bir etkiye sahip olduğunu ve saplama uzunluğunun artırılması ile tavan duraylılığının artacağını tespit etmiştir. İlave olarak araştırmacı, belirli bir açı ile yerleştirilmiş olan saplama, daha duraylı koşullara neden olacağını ve saplama nervürlü çubuğu üzerindeki çapraz kesme çatlaklarını azaltacağını tespit etmiştir.

Bir başka fiziksel modelleme çalışması Tully (1987) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tully (1987), yapmış olduğu çalışmada, 2.4 metre uzunluğunda 5 adet kaya saplaması ile 2 adet 35° ila 40° eğim ile yerleştirilmiş dış saplama kullanılmasının tavan konverjansını azalttığını tespit etmiştir (Tully, 1987).

Spann ve Naiper (1983), kaya saplaması tahkimat ilkelerinden, kiriş oluşturma ilkesinin etkilerini incelemek amacıyla, Güney Afrika'da bir dizi fiziksel modelleme testi gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde Şekil 2.53a'da belirtilen kaya saplama modelleri oluşturmuşlardır. Bu modellerin tavan kontrolündeki etkileri Şekil 2.53b'de sunulmuştur. Araştırmacılar yaptıkları bu fiziksel modelleme çalışmasının sonucunda, galeri tavanında, tabakaların hareketini yöneten en önemli faktörün tavadaki kaya saplamalarının konumu olduğunu ve saplamaların modelde görüldüğü gibi mesnetlere yakın monte edilmesi halinde en iyi sonuçların elde edildiği sonucuna varmışlardır.

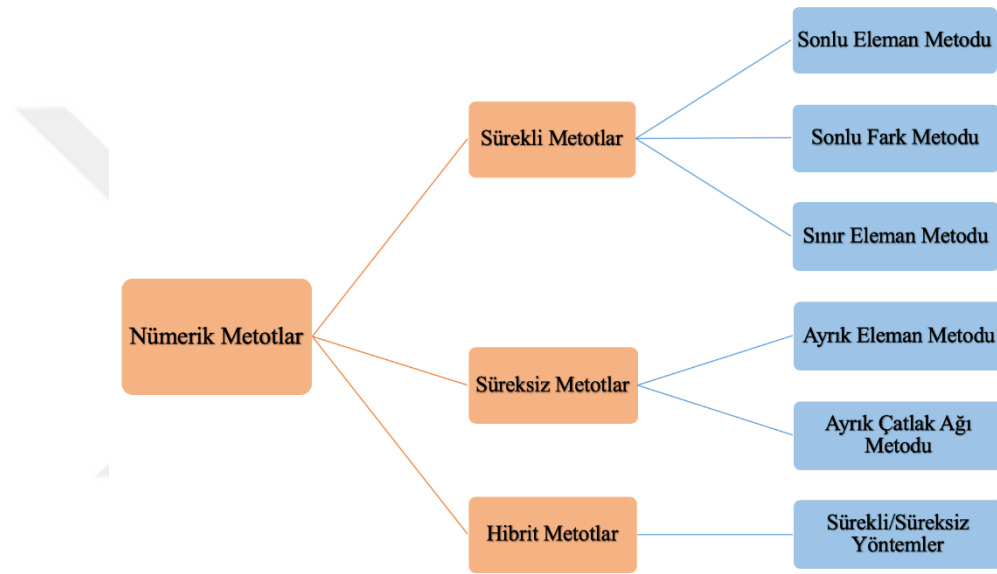


Şekil 2.53. Tipik bir kaya saplaması fiziksel modelleme çıktı örneği (Spann ve Naiper, 1983; Canbulat, 2008)

2.5.3.3. Sayısal (nümerik) modelleme

Pratik problemler için analitik çözümler elde etmek, gerçek durumu tam olarak yansıtması açısından zordur. Bu nedenle problemi açıklayan temel yönetici denklemler,

tahmini bir yaklaşımla nümerik olarak çözümler. Nümerik modelleme çalışmalarının birçok farklı alanda uygulama esnekliği, bu çalışmaları oldukça popüler kılar. Nümerik çözümleme teknikleri, günümüzde mühendisliğin tüm alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak toprak ya da kaya zeminlerin karmaşık öngörülemez bulanık davranışı nedeniyle jeoteknik problemlerde uygulama alanı sınırlandırılmıştır. Kaya mühendisliği problemleri yaygın olarak kullanılan nümerik modelleme yöntemleri Şekil 2.54'de belirtilen kategorilere ayrılabilir (Jing ve Hudson, 2002; Jing, 2003; Coggan ve ark., 2012; Sarathchandran, 2014).



Şekil 2.54. Kaya mekaniği problemlerinde yaygın olarak kullanılan nümerik modelleme yöntemleri (Sarathchandran, 2014)

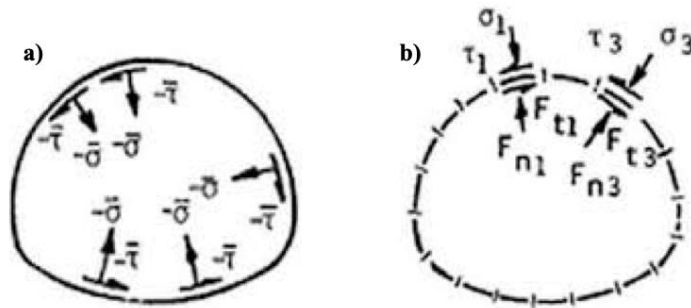
Nümerik çözümlemelerde sürekli metotlar; sonlu eleman metodu, sonlu fark metodu ve sınır eleman metodu olarak üç yönteme ayrılmıştır.

Sonlu eleman metodu ile tüm problem alanı, düğüm adı verilen noktalarla birbirine bağlı, üst üste binmeyen bölgelere bölünmüştür. Her bir elemanın, denge koşullarını, uyumluluğunu, malzeme oluşturma davranışını ve sınır koşullarını sağlayan davranışı tanımlanır ve elemanlar bir araya getirilir. Bu yöntem, mühendislik problemleri için kullanılan en yaygın yöntemdir, ancak yöntem kapsamlı hesaplama gücü gerektirmektedir. Çözümleri elde etmek için çok sayıda eşzamanlı denklem seti (birkaç binlerce) saklanmalı ve çözülmelidir.

Sonlu farklar metodunda, katı cisim dörtlü elemanlardan oluşan sonlu fark ağına bölünmüştür, ancak benimsenen çözüm şeması farklıdır. Sonlu farklar metodu kullanarak

katı cisim problemlerinin çözümü, Newton'un hareket yasalarını, yapısal bağlantılarını ve sınır koşullarını içerir. Bu metodun kullanıldığı bir hesaplama döngüsünde yeni hızlar ve yer değiştirmeler, hareket denklemleri kullanılarak gerilmeler ve birim deformasyonlardan elde edilir, birim deformasyon oranları ise yeni hızlar ve yeni gerilmelerden elde edilir. Sonlu farklar yönteminde, sonlu eleman metodunun aksine, yineleme prosedürü benimsenmiştir (Itasca, 2005) Bilgisayar belleği gereksinimleri düşüktür, büyük matrisler depolamayı gerekmez, ancak sayısal kararlılığı sağlamak için daha yavaş işlem adımları nedeniyle çözüm süresi daha uzun olabilir (Sarathchandran, 2014).

Sınır eleman metodunda ayırıştırma yalnızca modelin sınırlarında yapılır. Yöntem, sınır yüzeyinin hacme oranının düşük olduğu problemler için uygundur. Sınır elemanlar metodu kavramında, kazıların sınırdaki uygulanan bir dizi negatif tepki kuvveti olduğu varsayılmaktadır (Şekil 2.55). Bu yöntem ile yapılan çözümlerinde, kazının sınır yüzeyi ayırıştırılmıştır ve her bir eleman için, kazıdan önce yerinde gerilmeler eşittir ve bunun karşısında olduğu varsayılan hayali bir tepki kuvveti uygulanır. Bu yöntemde, hayali kuvvetleri, dışardan gelen kesme ve normal gerilmelerin, açıklık içerisindeki negatif kesme gerilmeleri ve kazı içerisinden gelen tepki kuvvetlerine eşit olacak şekilde eşleştirmesi için matematiksel ve yinelemeli bir prosedür uygulanır (Hoek ve Brown, 1980).



Şekil 2.55. (a): Kazının etkilerini temsil ettiği varsayılan negatif kuvvetler, (b): Bilinmeyen negatif tepki kuvvetlerini temsil etmek için ayırıştırılmış elemanlara uygulanan hayali kuvvetler (Hoek ve Brown, 1980)

Nümerik çözümlerinde süreksiz metotlar, ayırık eleman metodu ve ayırık çatlak ağı olmak üzere iki metoda ayrılmıştır.

Ayırık eleman metodunda yapılan modelleme uygulamalarında, her bir cisim, zamanın bir fonksiyonu olarak değişebilen sınır temasları yoluyla çevre elemanlarla iletişim kuran bağımsız bir unsurdan oluşur. Sonlu eleman ve sonlu fark yöntemlerinin

aksine, bu yöntemde hiçbir düğüm birden fazla eleman için ortak değildir. Tipik kaya mekaniği uygulamalarında, elemanlar sağlam kayayı temsil ederken, elemanlar arasındaki boşluklar çatlak olarak gösterilir. Yöntem, büyük yer değiştirmeler, dönme, kayma, ayrılma gibi doğrusal olmayan durumlara müdahale edebilir. Ayrık elemanlar yöntemi, özellikle, büyük deformasyonların beklendiği çatlaklı kaya kütleleri için uygundur. Başka bir ifadeyle, kaya çatlaklarının kazı boyutu ile karşılaştırılabildiği durumlar için ayrık elemanlar yöntemi en uygun yöntemdir (Pan ve Reed, 1991).

Ayrık çatlak ağı metodu, eşdeğer sürekli bir sistemin kurulmasının ya da modellenmesinin zor olduğu çatlaklı kaya kütleleri için kütle taşınımı ve akışkan problemi çalışmaları için en uygun yöntemdir (Jing ve Stephansson, 2007). Yöntem, çatlaklı kaya kütlelerinde akışkan akışı ve taşınım süreçlerini, bağlantılı bir çatlak sistemi aracılığıyla ilişkilendiren özel bir ayrık modeldir (Jing ve Hudson, 2002).

Nümerik çözümlerinde hibrit metotlar, nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçları ve bilgi işlem gücünü optimize etmek için yukarıda belirtilen tüm yöntemlerin bir kombinasyonudur. Hibrit metotlar için literatürde, sonlu eleman metodu-sınır eleman metodu, ayrık eleman metodu-sonlu eleman metodu ve ayrık eleman metodu-sınır eleman metodu gibi kombinasyonlardan bahsedilmiştir (Jing, 2003). Pan ve Reed (1991), bir yeraltı kömür madenciliği ortamında yapılan çözümlerinde ayrık eleman metodu-sonlu eleman metodu kombinasyonunun daha gerçekçi sonuçlar verebileceğinden bahsetmektedir.

Günümüzde, kaya mühendisliği uygulamalarında, yeraltı açıklıklarının nümerik modellenmesi çalışmaları oldukça yaygındır. Sayısal modeller kullanan etkili kantitatif tasarım için, üç temel ön koşulun yerine getirilmesi gerekir (Gale ve Fabjanczyk, 1993; Mark, 2000). Bu koşullara ait açıklamalar aşağıdaki paragraflarda belirtilmiştir.

Model: Model, Kayaların meydana gelebilecek tüm davranışlarını taklit edebilme yeteneğine sahip olmalıdır, bu da çeşitli yenilme modlarını ve tipik olarak meydana gelen büyük deformasyonları simüle edebilmesi gerektiğini gösterir.

Malzeme özellikleri ve gerilme: Kaya kütle özelliklerini temsil eden girdi parametreleri, karşılaşılan farklı kaya tabakalarının yenilme mekanizmalarının hem öncesini hem de sonrasını yansıtmalıdır. Ayrıca yerinde arazi gerilme ölçümlerinin yapılması gerekmektedir.

Doğrulama: Modelin, temsil ettiği yeraltı madenin davranışını doğru yansıttığını doğrulamak için yerinde gerilme ve yer değiştirme ölçümleri yapılmalıdır.

Kaya mühendisliği nümerik modelleme uygulamaları 2 ve 3 boyutlu bazı ticari yazılımlar yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Çizelge 2.19’da bu ticari yazılımlardan bazıları belirtilmiştir.

Çizelge 2.19. Kaya mühendisliği nümerik modelleme çalışmalarında kullanılan yardımcı yazılımlar (Sarathchandran, 2014)

| Yazılım adı | Geliştiren Kurum veya Firma adı | Modelleme Metodu |
|--|---|---------------------|
| FLAC 2D ve 3D | Itasca Inc. http://www.itascacg.com/ | Sonlu Fark Metodu |
| PLAXIS 2D VE 3D | Plaxis Bv http://www.plaxis.nl/ | Sonlu Eleman Metodu |
| 3DEC 3D | Itasca Inc. http://www.itascacg.com/ | Ayrık Eleman Metodu |
| UDEC 2D | Itasca Inc. http://www.itascacg.com/ | Sonlu Eleman Metodu |
| Phase ² (RS ²) 2D | Rocscience Inc. http://www.rocscience.com/ | Sonlu Eleman Metodu |
| RS ³ 3D | Rocscience Inc. http://www.rocscience.com/ | Sonlu Eleman Metodu |
| EXAMINE 2D ve 3D | Rocscience Inc. http://www.rocscience.com | Sınır Eleman Metodu |
| DIANA 2D ve 3D | TNO DIANA Bv www.tnodiana.com/ | Sonlu Eleman Metodu |
| ABAQUES 2D ve 3D | Dassault Systems http://www.3ds.com/ | Sonlu Eleman Metodu |
| CodeBright 2D | Polytechnic University of Catalonia (UPC). http://www.upc.edu/ | Sonlu Eleman Metodu |
| Map3D | Mine Modelling Pty Ltd http://www.map3d.com/ | Sınır Eleman Metodu |
| PFC 2D ve 3D | Itasca Inc. http://www.itascacg.com/ | Ayrık Eleman Metodu |
| ELFEN 2D ve 3D | Rockfield Software Ltd http://www.rockfield.co.uk/ | Sonlu Eleman Metodu |

Kaya mühendisliği alanındaki sayısal modelleme çalışmalarında, belirli bir modelin hangi durumlarda kullanılması gerektiğine karar verecek ilkeler yoktur. Genel olarak modelin boyutunun, tasarımın karakteristik boyutu ile aynı sırada olduğu durumlarda, ayrık sistem modellerinin daha uygun olduğu söylenebilir. Kaya kütlelerinde açılan bir yeraltı boşluğu, çok az veya hiç süreksizlik içermediği kabul ediliyorsa, sürekli sistem modelleri daha uygun görünmektedir (Bobet ve ark., 2009).

Süreksizliklerle belirlenen bir bölgenin boyutları, açıklığının çok daha küçükse, gerçek olmayan sürekli sistem modeli olarak modellenebilir. Tüm bu modelleme yöntemleri dik öğrenme eğrisine sahiptir ve bu modellerin başarılı bir şekilde uygulanması modelleyicinin uzmanlığına bağlıdır. Coggan ve arkadaşlarına göre, (2012) bir model yazılımının sınırlarını ve yeteneklerini bilmek başarılı sonuçlar elde etmek

açısından oldukça önemlidir. Çizelge 2.20’de nümerik modelleme metotlarından yeraltı kazı analizleri için uygun olan yöntemler sunulmuştur.

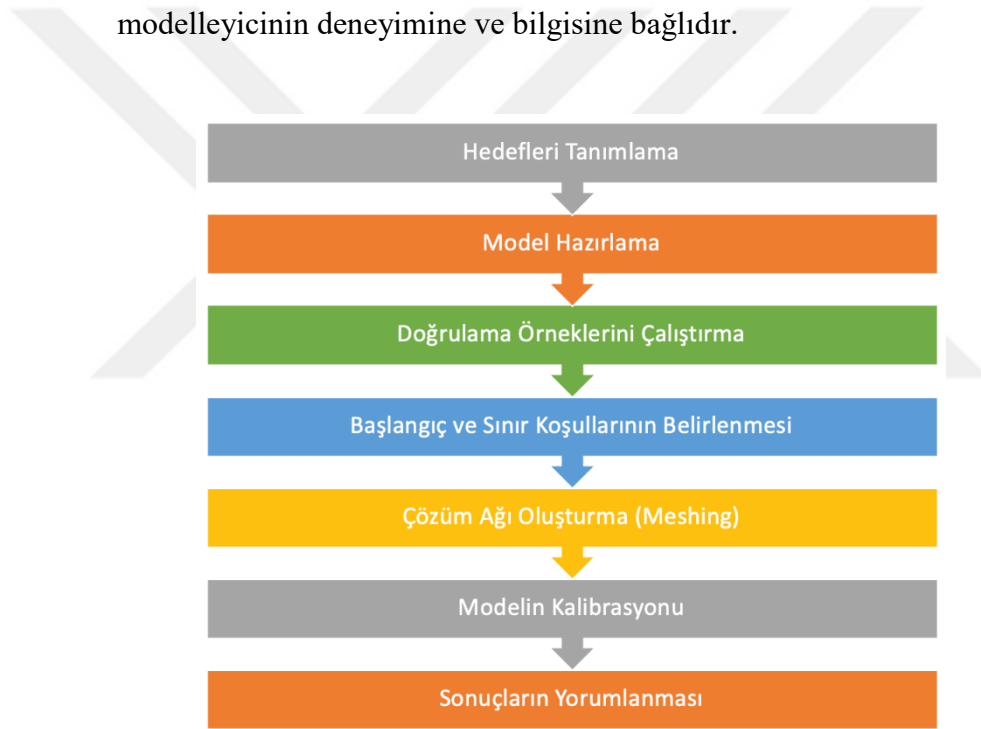
Çizelge 2.20. Yeraltı kazı analizleri için uygun nümerik metotlar, avantajları ve sınırları (Cai, 2008; Coggan ve ark., 2012)

| Modelleme Metodu | | Avantajları | Sınırları |
|-------------------|---|---|---|
| Sürekli Metotlar | Sonlu Eleman Metodu | Zemin/Kaya davranışını simüle edebilen bir dizi model havuzuna sahiptir Plastik analiz imkânı vardır. Kompleks geometri ve çoklu tabakaların modellenmesi özelliklerine sahiptir. | Bellek gereksinimleri oldukça yüksektir Sonuçların kalitesi mesh büyüklüğüne, çözüm planlarına, toleranslara, sınır etkilerine bağlıdır Süreksiz kaya kütlelerinde büyük yer değiştirmeleri simüle etmek için uygun değildir. |
| | Sonlu Fark Metodu | Sonlu eleman metodunun avantajlarına sahiptir. Bellek gereksinimleri düşüktür Doğrusal olmayan problemleri çözebilir. | Çözümlemeler, sonlu eleman metoduna göre daha fazla zaman almaktadır. Dik bir öğrenme eğrisi vardır. |
| | Sınır Eleman Metodu | Diğer sürekli metotlara göre daha sınırlı miktarda parametre gerekir Düşük bilgisayar çalışma sürelerine sahiptir. Gerilme konsantrasyonları daha hızlı değerlendirilir. | Normalde elastik analizle sınırlıdır (doğrusal olmayan seçenekler için uygun değildir). İnce tabakalı kaya kütlelerinin modellenmesi için ideal değildir. |
| Süreksiz Metotlar | Ayrık Eleman Metodu | Kırılma yayılımını, büyük rotasyonları ve yer değiştirmeleri kolayca taklit edebilir. Son derece dinamik efektler simüle edilebilir | Ağırlıklı olarak oldukça eklemli kaya kütlelerinde uygulanmaktadır. Ölçek etkisi önemli bir parametredir. |
| Hibrit Metotlar | Sürekli ve Süreksiz Metot Kombinasyonları | Sonlu eleman, sınır eleman ve ayrık eleman metotlarının en iyi özelliklerinin bir kombinasyonudur. | Yeraltı suyunun etkilerini simüle etmek için sınırlı yeteneğe sahiptir. Daha uzun çalışma süreleri gerektirir. |

Genel olarak, kaya mühendisliği problemlerinde doğru bir nümerik model oluşturmak için benimsenen yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir (Sarathchandran, 2014). Ayrıca Şekil 2.56’da yukarıda belirtilen nümerik modelleme işlem adımları özetlenmiştir.

- Analizin amacını tanımlamak: Modelleyicinin nümerik analiz çıktılarının ne olması gerektiği hakkında net bir fikir edinmesi gerekir.
- Modelin hazırlanması: Oluşturulacak model, asıl jeolojinin basit bir temsili olmalıdır, aynı zamanda tüm temel detayların dahil edildiğinden emin olunmalıdır.

- Mevcut kapalı form çözümlerini kullanarak doğrulama: Modelleme için kullanılan araca güven oluşturmak, analitik çözümlerin mevcut olduğu daha basit modelleri çalıştırmak ve karşılaştırmak.
- Giriş parametrelerini ve sınır koşullarının atanması: Oluşturulan modelde temsilci giriş parametreleri verilir ve sınır şartları atanır.
- Çözüm ağı oluşturma (meshing): İnce detayları yakalamak için uygun bir ağ oluşturmak.
- Modeli çalıştırma ve doğrulama: Modelden elde edilen sonuçlar, yerinde arazi ölçüleriyle karşılaştırılır ve bu ölçümlerle eşleşmesi gerekiyorsa model yeniden kalibre edilir.
- Sonuçların yorumlanması: Sonuçların doğru şekilde yorumlanması, modelleyicinin deneyimine ve bilgisine bağlıdır.



Şekil 2.56. Kaya mekaniği problemlerinde nümerik modelleme genel uygulama aşamaları (Sarathchandran, 2014).

Doktora tez çalışmalarında gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarında, iki boyutlu nümerik çözümler yapabilen Phase2 (v6.0) ve üç boyutlu nümerik çözümler yapılabilen FLAC 3D (v6.0) programı kullanılmıştır.

Phase2 (yeni adıyla RS2), toprak ve kaya ortam uygulamaları için kullanılan iki boyutlu bir sonlu eleman metodu yazılımıdır. Program kazı tasarımı, şev stabilitesi, yeraltı suyu sızıntısı, olasılık analizi, konsolidasyon ve dinamik analizler gibi çok çeşitli mühendislik projeleri için kullanılabilir. Phase2 programında kaya kütesinin hem elastik

hem de çeşitli yenilme ölçütleri kullanılarak elasto-plastik malzeme davranışları modellenenmektedir. Elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Drucker-Prager yenilme ölçütleri kullanılabilir (Geniş, 2016).

FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), kaya, zemin ve diğer malzemelerden oluşan çeşitli yapıların davranışlarını uygun bir şekilde nümerik olarak modelleyen ve Lagrangian hesaplama mantığı ile çalışan üç boyutlu bir sonlu fark metodu yazılımıdır. FLAC 3D yazılımı, bilinmeyen parametrelerin çözülmesi esasına göre değil, eleman ağının belirli bir düğüm noktasında oluşan etkinin, kısa bir zaman diliminde, sadece komşu elemanları etkileyebileceği esasına göre çalışmaktadır. Bu dinamik yaklaşımda, zaman dilimi sönümlenmekte ve bir problem adımı alınarak statik problemler çözülmektedir. Bu durum, genel rijitlik matrisinin kurulması gerektiğini ortadan kaldırmaktadır.

2.6. Kaya Saplamları ile İlgili Önceki Çalışmalara Ait Özet Bilgiler

1989-2019 yılları arasında dünyada kaya saplamları ile ilgili yapılan belli başlı çalışmalara ait özet bilgiler, kronolojik sırayla aşağıdaki paragraflarda sunulmuştur.

Albayrak (1989), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, Türkiye Taş Kömürü Kurumuna (TTK) ait kömür damarlarının üretimi amacıyla açılan yeraltı boşluğunda uygulanan rijit bağlar ile iki tip sürtünmeli kaya saplamasını maliyet açısından karşılaştırılarak, sonuçta; çelik bağlı tahkimatın kaya saplama tahkimata göre 1.6-2.0 kez daha pahalı olduğunu tespit etmiştir (Albayrak, 1989).

Yaralı (1991), yapmış olduğu tez çalışmasında, kaya saplamlarının tasarımı ve uygulanmasına ilişkin yönergeler ile galeri açıklıkları çevresinde oluşabilecek yenilme bölgesinin kalınlığını, tahkimat ön tasarımında kaya saplamlarının kullanılıp kullanılmayacağını, saplama boyunu, saplamlar arası mesafeyi, saplama sayısı ve saplamların yerleştirilme açısını optimum şekilde belirlemeye çalışmıştır. Araştırmacı yapmış olduğu tez çalışmasının sonunda, kaya saplamları ile yapılacak olan ön tasarım çalışmalarına yönelik olarak, aynı birincil gerilme koşullarında, kaya kütlesi kalitesi (RMR) ve kayacın tek eksenli basınç dayanımının, düşey birincil gerilmeye oranı arttıkça, açıklık çevresindeki olası yenilme bölgesinin kalınlığının küçüldüğü, birincil gerilmelerin oranındaki değişim arttığında ise, açıklık çevresindeki olası yenilme bölgesinin kalınlığının büyüdüğü sonucunu belirtmiştir (Yaralı, 1991).

Labiouse (1992), yapmış olduğu bir çalışmada, bir yeraltı açıklığının kaya saplamasız ve püskürtme beton ankrajlı (veya mekanik ankrajlı) ve kaya saplamalı davranış değişimini incelenmiştir. Araştırmacı, 4, 6 ve 8 m uzunluktaki kaya saplamalarının kullanıldığı yerlerde kapanma ölçümü gerçekleştirilip, iki saplama arasındaki mesafenin artışıyla, kapanmalarında o nispete arttığını belirtmiştir (Labiouse, 1992).

Özkan (1995), yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, Çayırhan yeraltı kömür madeninin A-810 galerisinin 300 metrelik bir bölümünde tavan davranışını incelemek için bir pilot çalışma gerçekleştirmiştir. A-810 galerisindeki 300 metrelik bölümü pilot ölçüm bölgesi olarak belirleyen ve 6 bölgeye ayıran Özkan, bölgelerden dördünde farklı tip kaya saplamalarını tahkimat elemanı olarak kullanmış, kalan iki bölgede ise rijit demir bağ tahkimatını uygulamıştır. Kaya saplaması uyguladığı dört bölgede kullanılan farklı saplama tipleri; piyasada kullanılan isimleriyle, Split-Set, Swellex, Sis-Resin ve Fosroc-Resin tipi kaya saplamalarıdır. Araştırmacı bu pilot bölgede 18 adet konverjans ölçüm istasyonu ve 16 adet ekstensometre ölçüm istasyonu kurarak bölgeyi izleme altına almıştır. Toplamda 15 aylık ölçüm periyodu boyunca, yaklaşık 46.000 konverjans ölçüm verisi ve 110.000 ekstensometre okuma verisi elde etmiştir. Özkan zamana bağlı ve ayak ilerleme miktarına bağlı olarak tavan tabaka kontrolü ve konverjans ölçümlerinden bir takım istatistiksel analiz çalışmaları yapmıştır. Hız ve ivme analizleri gerçekleştirerek bir tavan davranışı modeli geliştirmiştir. Farklı tahkimat tipleri uygulanan ölçüm bölgelerinde tahkimat davranışlarını analiz ederek bir takım ampirik eşitlikler geliştirmiştir. Ayrıca araştırmacı yapmış olduğu tez çalışmasının sonucunda, demir bağ tahkimatın kaya saplaması tahkimata göre daha fazla deformasyonlara izin verdiğini belirtmiştir. (Özkan, 1995).

McDonnell ve arkadaşları (1995), Yeraltı kömür madenlerinde kablolu saplama uygulamalarının değerlendirilmesi konulu çalışmalarında, Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bulunan bazı yeraltı kömür maden ocaklarında uygulanan kablolu saplamaların performanslarını incelemek amacıyla teorik değerlendirmeler ve yerinde arazi ölçümleri yapılmıştır. Araştırmacılar, kablolu kaya saplamalarının yeraltı kömür madenlerinde uygulanabilirliğini ve avantajlarını değerlendirmişler ayrıca uzunayak kömür madenciliğinde geri çekilme sürecinde kablolu saplama performansını arazi ölçümleri ile izlemişlerdir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar kablolu kaya saplamalarının yeraltı kömür madenciliğinde başarı ile uygulandığı ve hem reçine hem

de çimento dolgu ile montelenen kablolu saplamaların performanslarının yeterli olduğu sonucuna varmışlardır (McDonnell ve ark., 1995).

Kılıç (1997), Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) otoyolu Bahçe yöresindeki tünellerde bulunan, esas tahkimat elemanı olarak kullanılan kaya saplamalarının etkinliklerinin belirlenmesi çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Araştırmalar sonucunda, saplama-dolgu direncine etki eden faktörlerden en önemlisinin delik çapı olduğu, ayrıca dolgu harcına eklenen temiz kum ve uçucu külü kıyaslandığında; 15 günlük kür süresinde çimentoya göre temiz kumun yapışma direnci %10 artarken, uçucu külden %30 arttığını belirlemiştir. Çalışmada, temiz kumun, dolgu harcının deliklere pompalanabilirliğini azalttığı görülürken uçucu kül ilavesinin pompalanabilme yeteneğini arttırdığı görülmüştür. Araştırmacı ayrıca temiz kum kür süresini uzatırken uçucu külün kür süresini kısalttığını belirtmiştir. (Kılıç, 1997).

Stjern ve Myrvang (1998); yapmış oldukları bir çalışma kapsamında dolgulu kaya saplamalarının patlatma gibi olumsuz koşullardan etkilenme durumunu incelemek amacıyla, patlatma bölgesine yakın farklı iki noktada analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu noktalardan ilki patlatma bölgesine yakın (3 m) ve diğeri ise 22 m uzaklıkta seçilmiştir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar, üretim esnasında patlatma yapıldığında bu saplamaların etkinliklerinde çok fazla değişiklik görülmediğini belirtmişlerdir (Stjern ve Myrvang, 1998).

Kılıç ve Anıl (1999), kaya saplamalarının kaya kütlesine monte edilmesinde dolgu malzemesi olarak kullanılan çimento içerisine %4'e kadar kum veya uçucu kül ilavesinin saplama taşıma kapasitesine olan etkisini araştırarak, böyle bir katkının saplama kapasitesinin arttırdığını belirtmişlerdir (Kilic ve Anil, 1999).

Luo (1999), yapmış olduğu doktora tez çalışması kapsamında, bir yeraltı açıklığında tavan tabakalarına uygulanacak kaya saplamaları için bilgi tabanlı yeni bir tasarım yöntemi önermiştir. Araştırmacı, FLAC yazılımını kullanarak tavan tabakalarına uygulanacak kaya saplamalarının, açıklık stabilitesindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmacı çalışmanın sonunda, optimum kaya saplaması parametrelerini belirlemek için 4 adet istatistiksel model oluşturmuş ve bu modellere bağlı bir kaya saplaması tasarım kriteri önermiştir (Luo, 1999).

Ünal, Özkan ve Çakmakçı (2001), Ankara-Çayırhan yeraltı kömür madeninde Split-set ve Süper Swellex başta olmak üzere pilot ölçekte uygulanan kaya saplamaları üzerinde 15 ay süren kapanma ölçümleri olarak galeri duraylılığı analizleri yapmışlardır. Bu analizle ile galeride dinamik yükleme koşullarında kaya saplamalarının performansı

incelenmiştir. Araştırmacılar bu analizlerde deformasyon, hız ve ivme değerleri kullanılmışlardır. Sonuçta, kaya saplamaları tahkimat uygulanan pilot bölgelerde belirledikleri noktalarda yapılan tavan taban kapanma miktarının, kullanılan kaya saplaması tahkimat tipine, uygulama sistematığına ve saplamanın maruz kaldığı statik ve dinamik yüklere bağlı olduğunu belirtmişlerdir. (Ünal ve ark., 2001).

Uysal (2001), yapmış olduğu doktora tez çalışması kapsamında, kablolu saplamaların delik içerisine monte edilmesinde, ön gerdirme işlemini, çimento kullanımı nedeniyle donma süresinden bağımsız bir hale getirmek için yeni bir yöntem önermiştir. Araştırmacı, patlatma esaslı yeni bir delik dibi ankraj sistemi tasarlayarak, bu sayede kablolu saplamanın harcın donmasını beklemeden ön gerilmeye tabi tutulması çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu araştırmalar sonucunda “Eğik kapaklı çelik başlık – jelatinit dinamit konsepti” amaca yönelik olarak en uygun sistem olarak belirlenmiştir (Uysal, 2001).

Chatziangelou ve ark. (2002), Yunanistan’ın kuzeyindeki Platamon demiryolu tüneline RMR sınıflama sistemini dikkate alarak, püskürtme beton, çelik hasır ve kaya saplaması tahkimat tasarım uygulamaları yapmışlardır. Çalışmada teorik olarak hesaplanan emniyet faktörünün ihtiyaç duyulan emniyet faktöründen daha yüksek bir değer olduğu tespit edilmiştir (Chatziangelou ve ark., 2002).

Kılıç ve Çelik (2002), yaptıkları bir çalışmada, yaygın olarak çalışma alanı bulan çimento dolgulu kaya saplamalarının taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Buna göre; saplama boyu ve/veya saplama yapışma alanı, dolgu maddesinin makaslama dayanımı ve kür süresi arttıkça saplama kapasitesinin arttığı belirlenmiştir (Kılıç ve Çelik, 2002).

Ivanovic ve ark. (2003), yaptıkları bir çalışmada, reçine dolgulu kaya saplamaları için, statik ve dinamik olarak, ankraj sistemlerinin performansını incelemişlerdir. Sayısal benzetişim yardımıyla laboratuvar ortamında farklı yükleme seviyelerinin ve hız-titreşim değişimlerinin reçineli kaya saplamalarının ankraj performansına etkisini belirlemişlerdir. Araştırmacılar çalışmanın sonunda, laboratuvarda elde edilen sonuçlar ile sahada ölçülen sonuçlar arasında uyum olduğunu tespit etmişler ve reçineli saplama bağlantı elemanlarının frekans tepkisi üzerine ilk kez sayısal bir model çalışması gerçekleştirmişlerdir (Ivanović ve ark., 2003).

Roberts ve ark. (2004), Güney Afrika altın madenlerindeki ölümle sonuçlanan kazaların, yaralanmaların sebebi olarak kullanılmayan tahkimat elemanları gösterilmesi üzerine, bu konu ile ilgili yaptıkları bir çalışmada, bu madenlerin bir bölgesinde kaya

saplamaları ile ilgili bir çalışma başlatmışlardır. Araştırmacılar, sistematik olmayan kaya saplaması tahkimat tasarım problemi, duraylılık ve dayanım ölçümleri gibi sorunlara çözüm bulunmaya çalışmışlardır (Roberts ve ark., 2004).

Kalyoncu (2004), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, rebar türü kaya saplamasının farklı kaya türlerinde ve farklı katlardaki galerilerde oluşan deformasyon üzerindeki etkisini inceleyerek ve saplama ile kaya kütlesi etkileşimini araştırarak, sonuçta gerilme ve maliyet analizi yapmış ayrıca analitik yöntemlerle kaya saplaması tahkimat tasarımı yapmıştır. Araştırmacı çalışmasının sonucunda, RMR değerinin 60 ve üzeri bir puana sahip olduğu kayaçlarda sadece rebar türü kaya saplamalarının kullanılmasının yeterli olacağını belirtmiştir. (Kalyoncu, 2004).

Moosavi ve ark. (2005), Hoek hücresini laboratuvar koşullarında şekillendirerek, kaya saplamasının hidrolik olarak aksenal çekme değerini ölçmüşlerdir. Rebar ve Dywidag bar nervürlü demirlerin 1.3 MPa ve 3.2 MPa farklı yüklemelerdeki aksenal yenilme ve radyal uzama grafiklerini belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar Rebar kaya saplamasının yenilme koşullarının nervürlü demirlere göre daha geç gerçekleştiğini tespit etmişlerdir (Moosavi ve ark., 2005).

Fahimifar ve Soroush (2005) çalışmalarında, kaya kütlesi ile dolgulu kaya saplamaları arasındaki etkileşim analizi için bir analitik çözüm ileri sürmüşlerdir. Bu analitik çözümü karmaşıklaştıran diferansiyel eşitlikler gibi cebirsel problemlerin daha kolay çözüme ulaşması amacıyla da bir bilgisayar programı hazırlanmışlardır. Sonuçta, hazırladıkları program yardımı ile kaya kütlesi için doğrusal olmayan bir dayanım kriterini dikkate alarak ve kaya saplaması davranış modeli ile kaya tahkimat etkileşim kavramlarına dayanarak, kaya kütlesi ile saplama arasında olası ilişkiler türetmişlerdir (Fahimifar ve Soroush, 2005).

Moosavi ve Grayeli (2006), yapmış oldukları bir çalışmada, kablolu tip kaya saplamasının kaya kütlesi ile etkileşiminin en iyi biçimde anlaşılması amacıyla sürekli olmayan bir süreksiz deformasyon analizi (DDA) algoritması modeli önermişlerdir. Araştırmacılar bu model ile kablolu tip kaya saplamalarında gerçekleştirilecek olan tasarım parametreleri değişikliklerinin, kaya kütle etkileşimi ile olan ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonunda önerdikleri algoritma modeli ile piyasada yer alan sayısal modelleme programlarında kablolu kaya saplaması ile kaya kütlesi arasındaki ilişkiyi modelleyerek, bu algoritma modelinin doğru çalıştığını belirlemişlerdir (Moosavi ve Grayeli, 2006).

Zou ve ark. (2007), yeraltı açıklıklarında uygulanan dolgulu kaya saplama sisteminin harç miktarlarının enerji değişimine olan etkilerini ultrasonik dalgalar yardımıyla frekanslar olarak incelemiştir. Çalışmalarının sonunda, ultrasonik dalgalar değerlendirilmiş ve saplamanın uygulanması ile enerji yayılımı ve enerji kayıp miktarını tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar laboratuvar ortamında zamana bağlı enerji değişimi davranışları grafiksel olarak incelemiştir (Zou ve ark., 2007).

Ivanovic ve Neilson (2008), yaptıkları bir çalışmada bir kaya saplama tahkimat sisteminin aksenal titreşiminin tespiti için dinamik sürekli bir model sunmuşlardır. Araştırmacılar, sundukları bu modelin, kaya saplama sisteminde malzeme özelliklerine ve saplama geometrisini belirlemeye yönelik olan etkisini incelemiştir. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar neticesinde model çıktısı olarak uygun saplama çeliği geometrisi ve yine en uygun enjeksiyon yoğunluğu ve özelliklerini tespit etmeye çalışmışlardır. (Ivanović ve Neilson, 2008).

Van (2008), yapmış olduğu doktora tez çalışması kapsamında, Vietnam'daki yeraltı kömür madenlerinde kaya saplama tahkimat ile kaya kütlesi arasındaki etkileşimlerin nümerik olarak modellenmesi çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Araştırmacının kendi tez çalışmasında ki hedefi, bu doktora tez çalışmasına paralel bir eğilim göstermesi açısından dikkat çekmektedir. Dünyanın birçok bölgesindeki yeraltı kömür maden galerilerinde yaygın olarak kullanılan kaya saplama tahkimatın Vietnam'da uygulamalarının eksikliği ve sistematik bir uygulamanın olmaması açısından araştırmacı, kaya saplama sisteminin bu ülkedeki yeraltı kömür madenlerinde uygulama olanaklarını nümerik olarak incelemiştir. Nümerik analizlerinde iki boyutlu ve üç boyutlu FLAC yazılımlarını kullanan araştırmacı, Vietnamese kömür madenlerinin 5 farklı ocağı için kaya kütle ve malzeme özelliklerini tespit etmiş nümerik çalışmalar ile kaya saplama tahkimatın bu bölgelerde uygulanabileceği kanısına varmıştır. Araştırmacı sonuç olarak, zayıf yan kayaçlara sahip bölgeler için kaya saplama ile püskürtme beton kullanımını önermiştir (Van, 2008).

Chen ve arkadaşları (2009), tam dolgulu kaya saplama ve püskürtme beton ile tahkim edilen eklemlili kaya kütlelerinin sonlu elemanlar analizi ile modellenmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar çalıştıkları bu modelde kaya kütlelerinin elasto-viskoplastik davranışını ve ayrıca saplama ve püskürtme betonun, eklemlili kaya kütlelerinin sertlik ve kayma direncine katkısını dikkate almışlardır. Sonuçta elde ettikleri model çıktıları ile zayıf kaya kütlelerinde kaya saplama sisteminin yanında püskürtme beton

kullanımının özellikle elasto-viskoplastik davranış sergileyen kaya birimleri için önemli derecede olumlu etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir (Chen ve ark., 2009).

Hongwei ve ark. (2010), eklemlili kaya kütlelerinde uygulanan kaya saptamalarının performans analizi için bir takım sayısal simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, çift kesme modeli oluşturarak kaya saptamalarının performansını test etmişlerdir. Eklemler üzerinde oluşan normal yer değıştirme değerlerine göre oluşturdukları model ve ürettikleri grafikler yardımı ile uygulanmasını önerdikleri optimum kaya saptama aralıklarını tespit etmişlerdir (Hongwei ve ark., 2010).

Li (2010), özellikle yüksek gerilimlere maruz kalan yeraltı açıklıklarında uygulama alanı yaygınlaşan, yüksek enerji emme kapasiteli kaya saptamalarının yeni bir tipi olan ve D-bolt saptamasını analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. Araştırmacı hem saha çalışmaları hem de laboratuvar testleri yaparak D-bolt tipi kaya saptamalarının performansını incelemiştir. Araştırmacı ayrıca çalışmalarına çekme testlerini de dahil etmiştir. Çalışmalarının sonucunda D-Bolt tipi kaya saptamalarının diğer klasik saptamalara göre daha fazla enerjiyi absorbe ettiğini ve bu nedenle özellikle yüksek gerilimli boşluklarda kullanımının duraylılığı önemli ölçüde arttıracığını belirtmiştir (Li, 2010).

Deb ve Das (2011), nümerik modelleme yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile tam dolgulu kaya saptamaları üzerinde bir modelleme çalışması yapmışlardır. Kaya kütleleri için Mohr-Coloumb yenilme kriterini dikkate alan çalışmacılar, model çalışmasında kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ve çekme gerilmesi değerleri ile kaya saptaması uzunluğu değerini ilişkilendirmişlerdir. Araştırmacılar model çalışmalarının sonunda, kaya saptamalarının optimum uzunluğunun belirlenmesinde kaya kütlelerinin dayanım değerlerinin ve saptamanın uygulama geometrisinin en etkili parametreler olduğunu tespit etmişlerdir (Deb ve Das, 2011).

Divi ve ark. (2011), multi-iyonik yoğunlaştırılmış su ile havalandırılmalı simüle edilmiş ortamda kaya saptamalarını korozyona maruz bırakarak mevcut durumda saptama çeliğinin korozyon özelliklerini incelemiştir. Laboratuvar ortamında yaptıkları çalışmada tıpkı yeraltında tahkimat görevi yapan saptamaların yeraltı suyuna maruz kalmaları gibi bir ortam sağlayarak böyle bir durumun nasıl sonuçlar doğurabileceğine yönelik birtakım tespitler yapmışlardır. Sonuçta araştırmacılar, korozyona uğrayan saptama çeliklerinin kaya kütlelerinin mevcut direncine olan katkısında önemli eksikliklere neden olacağını ve özellikle yoğun yeraltı suyu problemi yaşayan

ocaklarda korozyona dayanıklı saplama ların kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır (Divi ve ark., 2011).

Maghous ve ark. (2012), çalışmalarında kaya saplama sı tahkimat tasarımı nın ampirik ve yarı ampirik yaklaşımların yanısıra 3 boyutlu teorik ve nümerik analizler ile yapılabilmesi konu almışlardır. Kaya saplama ları ile tahkim edilmiş bir yeraltı boşluğundaki gerilmelerin analizini teorik açıdan ve homojenizasyon yöntemi çerçevesinde, elastoplastik yapı denklemleri üreterek gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri bu denklemlerden elde ettikleri analiz çıktı larını 3 boyutlu model çalışmasından elde ettikleri verilerle karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada kullandıkları çalışma yöntemi neticesinde, ürettikleri denklemlerle elde ettikleri verilerin, 3 boyutlu model çalışmasından elde ettikleri tasarım çıktı ları ile uyumlu bir eğilim gösterdiğini belirtmişlerdir (Maghous ve ark., 2012) .

Bin ve ark. (2012) çalışmalarında, çimento dolgulu kaya saplama larının dolgu performansını incelemek amacıyla, harç yapışkanlığı ve çekme kuvvetini önemli ölçüde etkileyen ve tahmin edilmesi zor olan harç sürtünme açısı üzerine odaklanmışlardır. Dolgulu kaya saplama larında harç yapıştırma kuvveti ve çekme kuvvetine göre harç sürtünme açısını hesaplamak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Yöntemi doğrulamak için arazi ölçümleri ile geri analizler gerçekleştirmişler ayrıca iki parametreye ikilik prensibi ile yaklaşmak üzere FLAC3D tarafından sayısal bir model oluşturmuşlardır. Çalışmalarının sonunda yakınsama sonucunun sahada gerçekleştirilen çekme testleriyle uyumlu olduğunu kanıtlamışlardır (Bin ve ark., 2012).

Kun ve ark. (2012), Kömür madenlerinde kaya saplama sı uygulamaları ve tasarımı adlı çalışmalarında, teorik kaya saplama sı uygulama ilkeleri ile sahadaki uygulama durumunun karşılaştırılması sayı lacak bir makale yayınlamışlardır. Araştırmacılar belirli jeolojik koşullarda olmak koşulu ile çalışmalarında, mevcut kaya saplama ları yerleştirme ilkelerini (süspanسیون ilkesi, kilitleme ilkesi gibi.) sahadada yaptıkları uygulamalar ve arazi ölçümleri ile doğrulamışlardır. Özellikle zayıf kömür damarına sahip açıklıklarda kablolu saplama lar ile diğer kaya saplama larının kombinasyon şeklinde uygulanmasının performansı olumlu yönde etkileyeceğini belirtmişlerdir (Kun ve ark., 2012).

Teymen (2012), yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, tam dolgulu kaya saplama larının gerilme dağılımlarını belirlemeyi hedeflemiştir. Bu hedef doğrultusunda tam dolgulu kaya saplama larına, yenilme mekanizması ve tahkimat etkisini belirlemek amacı ile laboratuvar şartlarında çekme testleri uygulamıştır. Yaptığı testlerde; saplama

dayanımı, dolgu dayanımı, kaya dayanımı, uygulanan yükler ve şekil değiştirme davranışları gibi parametreleri dikkate almıştır. Araştırmacı, yaptığı bu çalışmalar ile yeraltı kazı boşluğu çevresine yerleştirilen saplamalar boyunca gerilme dağılımlarının ve bu boşluk çevresinde ortaya çıkan ikincil gerilmeler ile bu gerilmelerin neden olduğu deformasyon dağılımlarının tahmin edilmesi çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışmaların sonunda araştırmacı, dolgulu kaya saplamları için hazırladığı farklı karışımların değişik kür sürelerindeki mukavemet özellikleri inceleyerek, erken prizlenebilen yüksek mukavemetli dolgu karışımları belirlenmeye çalışmıştır. Yapılan bu testler sonucu, çimento miktarının % 10-15'i oranlarında silis dumanı ilavesinin dolgu mukavemetini artırdığını ve prizlenme süresini azalttığını öne sürmüştür (Teymen, 2012).

Wu ve ark. (2012), yeraltında tahkimat amacıyla uygulanan kaya saplamlarının performansını test etmek amacıyla yapmış oldukları çalışmalarında, bir yeraltı açıklığında uygulanmış olan kaya saplama tahkimatı üzerinde hız ve ivme analizleri yaparak gerilme dalga yayılımlarını test etmişlerdir. Bu tahribatsız test ile araştırmacılar, farklı saplama tipleri için mükemmel, iyi ve vasat gibi çeşitli sıfatlarla, belirli koşullarda uygulanan saplama tiplerini sınıflandırmışlardır. Araştırmacılar, çalışmanın sonucunda önerdikleri gerilme dalga yayılımı izleme yöntemi ile her bir saplamanın kaya kütlesi ile etkileşiminin incelenebileceğini bu sayede galerilerde tahkimat güvenliğinin bu yöntemle izlenebileceğini savunmuşlardır (Wu ve ark., 2012).

Chang ve ark. (2013), ana kayaç ve yan kayaçları zayıf olarak sınıflandırılacak bir galeride hidrolik genişleyen swellex tipi kaya saplamları ve ankraj mekanizmalarının performans değerlendirmesi ile galeride oluşan taban kabarması kontrollerini yapmışlardır. Ayrıca araştırmacılar, reçineli kaya saplamları ile hidrolik genişleyen swellex tipi kaya saplamları arasındaki farklı ankraj mekanizmalarının uygulama farklılıklarını, avantaj ve dezavantajlarını test etmişlerdir. Çalışmalarının sonunda hidrolik genişleyen kaya saplamlarının tabanda meydana gelen kabarmaları, kayacın plastik bölgesinin gelişmesini ve akışını engelleyerek önlediğini gözlemlemişlerdir (Chang ve ark., 2013).

Cao ve ark. (2013), reçineli kaya saplamlarının laboratuvar ortamında basma ve çekme teslerini yapmışlardır. Özellikle mekanik verilerden poisson oranının bu tür kaya saplamlarının basma ve çekme dayanımlarına etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarının sonunda mevcut teorik öngörülerini, yaptıkları laboratuvar testleriyle karşılaştırmışlar ve iyi bir uyum yakalamışlardır (Cao ve ark., 2013).

Khalymendyk ve ark. (2014), zayıf kayaçalarda ($UCS < 30MPa$) kablolu kaya saplaması kullanılması isimli çalışmalarında, bir maden galerisinde taban yolu tavanındaki kaya kütesinin jeomekanik davranış özelliklerini saha ve laboratuvar şartları altında incelemişlerdir. Araştırmalarının sonunda kablolu kaya saplamasının yeraltında ayak yüzeyinin önünde ve arkasında taban yolunun dikey konverjansında azalma sağladığını tespit etmişlerdir (Khalymendyk ve ark., 2014).

Chen (2014), yaptığı bir çalışmada, çekme ve makaslama yüklerine maruz kalan belirli kaya saplamalarının performans analizini belirleme çalışmaları yapmıştır. Testlerinde D-bolts tipi saplamaları ve tam dolgulu kaya saplamalarını dikkate alan araştırmacı yaptığı çalışmanın sonucunda, saplamaların yer değiştirme (yer değiştirme) açılarının, yüke maruz kaldıkları açılardan daha büyük olduğunu tespit etmişler ve bu durumu analitik çözümlerle doğrulamıştır (Chen, 2014).

Li ve ark. (2014), Yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamaları ile bilinen diğer kaya saplamalarını performanslarının değerlendirilmesi üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Araştırmacılar, bilinen kaya saplamaları tabiri ile mekanik, dolgulu ve sürtümlü kaya saplamalarını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar laboratuvar koşulları altında statik ve dinamik yüklere maruz kalan kaya saplamalarını kıyaslayarak, yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamalarının, bilinen diğer kaya saplamalarına nazaran, daha yüksek miktarda yük taşıdığını ayrıca önemli miktarda deformasyonları gövdelerinde barındırabildiklerini belirtmişlerdir. Özellikle yüksek gerilme koşullarına sahip kaya kütleleri için yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamaları uygulamalarının tahkimat performansını arttırmakta olduğu, diğer bilinen saplama türlerinin mekanik olarak dayanımlarına kıyasla daha dayanıklı bir saplama tipi olduğunu belirtmişlerdir (Li ve ark., 2014).

Kang ve ark. (2016), Farklı yükleme koşulları altında, kaya saplamalarının mekanik performansları ve gerilme durumları başlıklı çalışmada, kaya saplamalarının delik içerisinde çatlama ve kırılma faktörlerini araştırmak için birtakım laboratuvar testleri ve sayısal modelleme uygulamaları içeren kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Saplama çubuğunun yapısına göre (dişli veya düz) saplama uçlarının mekanik performanslarını değerlendirmek için, araştırmacılar tarafından deneysel testler yapılmıştır. Saplamanın delik içerisine enjekte edilme açısının, ön gerilimin ve kullanılan aksesuarların (plaka, somun vb.) etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda galeri yüzeyine eğimli bir açıyla yerleştirilen saplama çubuğunun, saplama üzerinde gerilme, bükülme ve burulma gibi karmaşık bir stres kombinasyonuna sahip olduğu bulunmuştur.

Araştırmacılar, bu karmaşık gerilme durumunun, saplamanın çekme gerilmesinden çok daha büyük olduğunu tespit etmişler ve çekme gerilmesinin akma dayanımından daha az olmasına rağmen, saplama çubuğu üzerinde bulunan dişlerin bozulmasına neden olacak şekilde bükülmeye ve çubuğun üzerinde çatlak büyümesine neden olduğunu yaptıkları 3 boyutlu modelleme çalışmaları ile tespit etmişlerdir (Kang ve ark., 2016).

Kömürlü, (2016), yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, kaya saplamalarına farklı tiplerde polimer kaplama malzemeleri uygulayarak bu polimerlerin saplama dayanımı üzerine etkilerini incelemiştir. Daha önce denenmemiş üç farklı polimer tipi ile çalışan araştırmacı, bu polimerlerle kapladığı saplamaları çeşitli mekanik ve çekme testlerine tabi tutmuştur. Dolgulu ribar ve Split-set türü saplamalar üzerinde yapmış olduğu testler sonucunda Poliamid-6 tipi kaya saplama malzemesinin saplama dayanımı üzerinde olumlu etkiler yarattığını tespit etmiş ve bu tip saplamaların sistematik olarak uygulanması gerektiği önerisinde bulunmuştur (Kömürlü, 2016).

Pan ve ark. (2017), yaptıkları bir çalışmada, derin bir yeraltı kömür madenindeki galerilerde uygulanan çimento dolgulu kaya saplaması tahkimatına ait parametrelerin tasarımı için dolgu parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar, kalın kömür damarına sahip bir galerinin tavanında, yalancı tavan tabakası için çimento dolgu takviyesinin etkisini test edecek bir test cihazı geliştirmişlerdir. Eş zamanlı olarak bu etki laboratuvar ortamında da test edilmiştir. Çalışmaların sonucunda, çimento dolgulu kaya saplamalarının derin kömür damarlarında tahkimat elemanı olarak kullanılmasında, özellikle uygulamada su-çimento oranlarının saplamanın tahkimat etkisi üzerinde farklılıklar yarattığı öne sürülmüştür. Ayrıca araştırmacılar, arazi ölçümlerine dayalı kaya saplaması tahkimat tasarımı ile çimento dolgulu saplamanın uzunluğu, sırası ve saplamalar arası mesafenin tespiti için birtakım arazi testleri yapmışlardır. Sonuç olarak araştırmacılar, çimento dolgulu kaya saplaması tahkimatın tasarlanmasında dolgu malzemesi parametrelerinin etkisinin önemli olduğunu belirtmişlerdir (Pan ve ark., 2017).

Tao ve ark. (2017), “Saplama nervür mesafesinin yük transfer mekanizması üzerine etkisi” başlıklı çalışmalarında, tam dolgulu nervürlü bir kaya saplamasının tahkimat etkisinin, saplama yüzey profili ile yakından ilgili olduğunu öne sürmüşlerdir. Araştırmacılar öne sürdükleri bu saptamayı doğrulamak için bir takım deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu deneylerde çelik borudan ve betondan temsil edilen, 12, 24, 36 ve 48 mm gibi farklı aralıklarda nervürlü saplama çubuklarına çekme testleri uygulanmıştır. Araştırmacılar bu çalışmanın sonucunda, yüksek nervür boşluğuna sahip

saplamalar için, saplamanın taşıyacağı pik yükün %25,3 arttığını tespit etmişlerdir . Deneysel çalışmalarda büyük nervür boşluğu olan saplamaların, küçük nervür boşluğuna sahip saplamalardan daha büyük deformasyonel enerji emilimine sahip olduğu tespit edilmiştir (Tao ve ark., 2017).

Li (2017), “Kaya saplamalarının tasarım ilkeleri” başlıklı bu çalışmada araştırmacı, bir yeraltı açıklığında uygulanması planlanan kaya saplaması tahkimat tasarımının başarısının, yeraltı yükleme koşulları, yeraltı açıklığının etrafındaki doğal basınç bölgesi, tasarım metodolojileri, uygun saplama tipinin seçimi, saplama uzunluğu ve aralığının belirlenmesi, güvenlik faktörü ve saplama elemanları arasındaki uyumluluk parametreleri ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı bu çalışmada, yüksek gerilimlere sahip arazi koşullarında yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamalarının tercih edilmesi gerektiğini savunmuştur. Yenilme bölgesinin küçük olduğu arazi şartlarında uygulanacak kaya saplamalarının, doğal baskı kemerine ulaşacak uzunlukta olması gerektiğini ve bu uzunluğun yenilme bölgesinin minimum 1 metre ötesinde olması gerektiğini belirtmiştir. Geniş bir yenilme bölgesi olması durumunda, bu yenilme bölgesinde yapay bir basınç kemeri oluşturmak için sıkıca yerleştirilmiş kısa kaya saplamaları monte edilip doğal basınç kemerine uzun kablolu saplamalar ile bağlanması gerektiğini belirtmiştir. Araştırmacı yapay bir tavan baskı kemeri oluşturma durumunda kaya saplaması aralığının, saplama uzunluğundan daha önemli bir parametre olduğunu belirtmiştir (Li, 2017b).

Wu ve ark, (2018), “Mekanik çalışma transfer yeteneğine göre yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamalarının tahkimat etkilerinin tahmini” başlıklı çalışmalarında, yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplaması ile kaya kütlesi arasındaki etkileşimi tanımlamak için bir etkileşim modeli önermişlerdir. Düzlem gerilme-eksenel simetri varsayımı ve artan plastiklik teorisine dayanarak, kayaç kütlesinin denge denklemleri ve uyumluluk denklemleri ile yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamasının tahkimat etkisini teorik olarak ortaya çıkarma çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar önerdikleri yöntemi bir Visual Basic ortamında programlamışlar ve birleştirme modeli için yarı analitik bir çözüm elde etmişlerdir. Konvansiyonel tünellerde yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamasının tahkimat mekanizması açıklayıcı bir örnek çalışmasıyla açıkça gösterilmiştir. Çalışmada, yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamasının farklı koşullar altında tahkimat etkisi kantitatif olarak tahmin edilmiştir ve mekanik iş aktarma kabiliyeti sunulmuştur. Bu çalışmalara ek olarak araştırmacılar, önerilen yöntemin geçerliliği sayısal simülasyonlarla

doğrulanmışlardır. Sonuç olarak araştırmacılar, yüksek arazi gerilmesi ve düşük dayanımlı kaya kütlelerine sahip ortamlarda, yüksek enerji emme kapasiteli kaya saplamasının tahkimat etkisi önemli ölçüde fazla olduğunu ve saplamaların daha fazla enerji emdiğini öne sürmüşlerdir (Wu ve ark., 2018).

Tahmasebinia ve ark (2018), “Ani yükleme koşulları altında tam dolgulu kablolu saplamaların yapısal davranışının analitik ve nümerik simülasyonu” başlıklı çalışmalarında, araştırmacılar yeraltı boşluklarında statik ve dinamik yükleme koşulları altında, kablolu kaya saplamalarının yapısal davranışlarını değerlendirmek için nümerik ve yeni bir analitik simülasyon tekniği geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, kablolu kaya saplamalarının, düşük gerilimli ortamlarda genel olarak statik yüklere maruz kaldığını, ancak kaya patlaması eğilimli koşullarda kablolu saplamaların dinamik yüklere maruz kalabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmaların sonunda, araştırmacılar hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altındaki kablolu saplamaların yapısal davranışını değerlendiren bir sonlu elemanlar modeli sunmuşlardır. Modeller başlangıçta literatürdeki mevcut deneylere karşı kalibre edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar plastik analize dayalı bir denklem önermişlerdir. Çalışmanın sonuçları, sayısal ve analitik modellerin, kaya patlaması eğilimli koşullarda kaya kütle tahkimatını tasarlamak için dinamik yükleme altındaki kablo saplama davranışını değerlendirmek için kullanılabilirliğini göstermektedir (Tahmasebinia ve ark., 2018).

Wu ve ark. (2019), yeraltı kömür maden ocaklarında derinlere inildikçe karşılaşılması mümkün olan kaya patlaması problemlerine özellikle kömür patlamalarından kaynaklanacak bir kaya patlaması problemine karşı tahkimat elemanı olarak kullanılan kaya saplamalarının verebilecekleri tepkiyi bir model çalışması ile simüle etmişlerdir. Çin’de bulunan Yima yeraltı kömür madeninde yapılan saha çalışmalarında, kaya saplamaları ile tahkim edilmiş olan galerilerde, kömür patlamasına benzer bir sismik dalgayı, sıradan bir patlatma çalışması ile simüle etmişlerdir. Araştırmacılar sahada yapmış oldukları bu çalışmanın sonrasında, patlatma yaptıkları bölgede kalan kaya saplamalarını laboratuvar ortamına taşıyarak, saplamalar üzerinde bir dizi performans testi yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, kömür patlamalarından kaynaklanan darbe yükleri, kaya saplamalarının mekanik özellikleri üzerinde gerilme mukavemetini azaltmak, uzama ve darbe emilim işini azaltmak, orantılı limiti arttırmak gibi etkiler oluşturduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, belirtilen bu etkilerin kömür patlaması eğilimli maden galerilerinde bir kaya saplaması tahkimat sistemi tasarlanırken göz önünde bulundurulması gerektiğini savunmuşlardır (Wu ve ark., 2019).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Genel

Doktora tez raporunun bu bölümünde, TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür maden işletmesi hakkında genel bilgiler yer almaktadır. Ayrıca doktora tez çalışmaları kapsamında TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür madeninde gerçekleştirilen arazi çalışmaları ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kaya malzeme özellikleri belirleme çalışmaları ile ilgili izlenen yöntem hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak görgül tasarım yaklaşımları ve iki boyutlu sayısal modelleme çalışmaları ile gerçekleştirilen, Ömerler yeraltı kömür maden ocağı A6 uzunayak panosuna ait kaya saplama tahkimatı ön tasarımı ve FLAC 3D programı ile yapılan modelleme çalışmalarında uygulanan yöntemler hakkında bilgiler bu bölümde sunulmaktadır.

3.2. TKİ-Garp Linyitleri İşletmesi Hakkında Genel Bilgiler

3.2.1. Kuruluş ve tarihçe

Devlet eliyle yapılan linyit işletmeciliği ilk defa, 16.02.1938 tarihinde Etibank'a bağlı olarak Değirmisaz işletmesinin kurulmasıyla başlamıştır. Daha sonra 18.05.1939 tarihinde Tunçbilek ve 23.09.1939 tarihinde Soma işletmeleriyle faaliyete geçmiştir. Bu üç işletme 01.01.1940 tarihinde birleşerek Etibank'a bağlı "Mahdut Mesuliyetli Garp Linyitleri İşletmesi Müessesesi" kurulmuş ve 15.09.1957 tarihinden itibaren 6974 sayılı kanunla kurulan "Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Kurumu" içinde yer almıştır

1940 yılında, 01.09.1995 tarihine kadar Müessese adı altında faaliyetlerini sürdüren Garp Linyitleri İşletmesi, bu tarihten itibaren GLİ Bölge Müdürlüğü'ne dönüştürülmüş, 2004 yılı başından itibaren ise tekrar GLİ Müessese Müdürlüğü halini almıştır. 12.05.2017 tarihinde yapılan son değişiklikle de TKİ Garp Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü olarak hizmet vermeye devam etmektedir (Anonim, 2017).

3.2.2. Coğrafi konum

Ömerler Yeraltı İşletmesi, Kütahya iline bağlı Tunçbilek beldesinde, Tavşanlı-Domaniç karayolu üzerinde olup Tavşanlı ilçesinin kuzeyinde, Tavşanlı'ya 13 km,

Kütahya'ya 63 km uzaklıktadır. İşletmeyi çevreye bağlayan 2. Karayolu ise 65 km'lik Tunçbilek-Domaniç-İnegöl yoludur. TKİ GLİ Müessesesi imtiyaz sınırları 1/25000 ölçekli Kütahya İ22-c2 paftasında bulunmaktadır. Bölge, ayrıca Kütahya-Balıkesir demiryoluna, Tavşanlı istasyonundan 11 km uzaklıktadır (Anonim, 2017). İşletmenin konumunu belirten yer bulduru haritası Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Çalışma sahasının yer bulduru haritası

3.2.3. İklim ve bitki örtüsü

Kütahya ve çevresinde, Batı Anadolu geçiş iklimi görülmektedir. Bu iklim tipi Ege, Marmara ve İç Anadolu bölgelerinde görülen iklim tipleri arasında geçiş iklimi niteliğini taşımaktadır. Mevsimlere göre yağış dağılımı bakımından Marmara ikliminin, sıcaklık bakımından İç Anadolu karasal ikliminin etkisindedir. Bölgede kışlar soğuk ve kar yağışlı geçmekte ve sık sık don olayı görülmektedir. Yaz aylarında yoğun bir sıcaklığa sahip olmayan bölgede yaz kuraklığı azdır.

Tavşanlı devlet meteoroloji istasyonu verilerine göre yıllık ortalama yağış miktarı 464.80 mm'dir. En çok yağış düşen ay Aralık, en az yağış düşen ay ise Ağustos ayıdır. Tunçbilek beldesine yakın meteoroloji istasyonlarının mevsimlere göre yağış rejimlerine bakıldığında, sırasıyla kış, ilkbahar, sonbahar, yaz mevsiminde yağış miktarlarında azalma görülmektedir. Kütahya ve çevresinin 62 yıllık verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık 10.6 °C olarak tespit edilmiştir. Aylık ortalama düşük sıcaklığın en az olduğu ay

Ocak (-3.6 °C)'tır. Aylık ortalama yüksek sıcaklığın en fazla olduğu ay ise Ağustos (27.9 °C)'dur (Anonim 2018).

Tunçbilek Ege Bölgesinde yer almaktadır. Çevresi zengin çam ağaçlarıyla kaplı orman örtüsüne sahip, genellikle yükseltisi fazla olmayan dağ ve tepelerle çevrilidir. Tunçbilek havzası tarıma uygundur.

Son yıllarda tarımsal faaliyetler azalmış olsa da tarımsal ürün olarak arpa, buğday, nohut ve şekerpancarının yanı sıra başta vişne, kiraz ve elma gibi meyvelerin yetiştirilmesine elverişli bir toprak yapısına sahiptir. Yöre genel olarak engebeli arazilerle kaplı olup bu arazilerin bir kısmı da maden sahası içerisinde yer almaktadır. Projelendirme yapılan sahanın bir bölümü daha önceki yıllarda döküm sahası olarak kullanılmıştır.

3.2.4. Genel jeoloji ve stratigrafi

3.2.4.1. Stratigrafik jeoloji



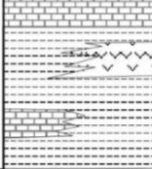
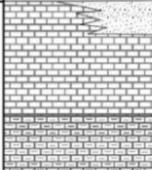
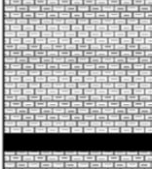
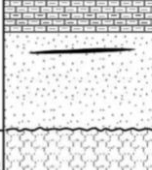

Tunçbilek kömür havzasında en yaşlı birim olarak Paleozoik yaşlı metamorfik şist ve kristalize kireç taşları ile paleozoik üzerinde diskordan olarak kretese yaşlı ultrabazik kayalar bulunmaktadır. Tüm bu birimler, Neojen yaşlı birimini oluşturmaktadır.

Havzanın temelini, genellikle serpantişleşmiş ultrabazik kayalar oluşturmaktadır. Tunçbilek havzasındaki neojen sedimanları; miyosende çökelenler, Alt seri ya da Tunçbilek serisi, pliyosenlerde çökelenler ise Üst seri veya Domaniç serisi olarak adlandırılmıştır.

Temel üzerinde diskordan olarak oturan Alt seri (Tunçbilek serisi), yuvarlak serpantin ve kireçtaşı çakıllı konglomera ile başlamakta, üst kısımlara doğru killi şist bölgesine gelmektedir. Serinin en üst kısmında killi şist bölgesi üzerine gelen mavi-gri marn tabakaları bulunmaktadır.

Serinin yaşı, killi şist horizonları içerisinde bulunan yaprak fosillerine dayanılarak alt-orta miyosen olarak kabul edilmiştir.

Volkanizma ürünleri ile kesilmiş olan Üst seri (Domaniç serisi) ise, tabanda serpantin materyallerinden oluşan gevrek bir moloz ile başlamakta, üste doğru marn bölgesi geçişi görünmektedir. Bu üst seri, silisli kalker bölgesi ile son bulmaktadır. Bölgeye ait genelleştirilmiş stratigrafik kesit Şekil 3.2'de belirtilmiştir (Çetin ve ark., 1985).

| Yaş | Litoloji | Açıklamalar |
|---------------|---|---|
| Kuv. |  | Alüvyon, çakıl, yamaç molozu (5-25 m.) |
| Pliyosen |  | Kireçtaşı, yer yer silisifiye, yer yer çakıllı (100-125 m.) |
| |  | Tüf-tüfit, bazalt, kireçtaşı (350-500 m.) |
| Miyosen |  | Kireçtaşı, yer yer kumtaşı, konglomera geçişli (50-150 m.) |
| |  | Linyit içeren marn, yer yer killi, siltli (400-450 m.) |
| |  | Kumtaşı, konglomera, mercekli linyit içerikli (60-150 m.) |
| Neojen öncesi |  | Ofiyolitik ve metamorfik temel kayalar |

Şekil 3.2. Tavşanlı havzasının geliştirilmiş stratigrafik kesiti (Çetin ve ark., 1985)

3.2.4.2. Yapısal jeoloji

Havzanın yapısal jeolojik özelliklerine bakıldığında, neojende yapısal olarak önemli olabilecek fay ve kıvrım eksenlerine rastlanmaktadır. Genelde havzanın belirli aralıklarla çökmesine bağlı olarak eğim atımlı normal faylar gelişmiştir. Sahanın tektoniğine yönelik jeofizik-rezistivite ve kömürlü zonun tavan kotuna göre yapılan yapı-kontur haritalarından fayların genelde kuzey-güney doğrultusuna da geliştikleri gözlenmiştir (Yaşlı, 2002)

Havzada, tabaka eğimleri genelde 5-20° eğimle kuzey doğuya doğrudur. Beke köyünden geçen Beke deresi havzanın antiklinal eksenidir. Beke deresinin kuzeyindeki birimler ise kuzeydoğuya eğimlidir. Güneyindeki birimler ise güneybatıya eğimlidir. Genelde yataya yakın 11-15° derece miyosen çökeller fay zonlarında eğim

kazanabilmektedir. Piyosen eğimleri ise faylanmalardan daha az etkilenmiştir (Yaşıtılı, 2002).

3.2.4.3. Tektonizma

Ömerler sahasında üst seri olarak adlandırılan Domaniç serisi, alt serinin üzerine diskordans olarak yatmaktadır. Onun yerine bazı mostralarda karşılaşılan yatak durumları, alt serinin üst seri tarafına diskonform durumda altta kalmış olduğunu gösterirler. Üst seride bulunan formasyonlar yataya yakın tabakalar halinde kendilerini göstermektedir.

Bölgede pliyosen boyunca faylanmalar meydana gelmiştir. Pliyosen-Kuaterner döneminde üst serinin çökmesinden sonra, bölge yeniden tektoniğe maruz kalmıştır. Sahada Miosen, Pliosen ve Plio kuaterner dönemlerinde oluşan, normal, ters, dönel ve makaslama fayları vardır. Fay eğimleri genelde 70°'nin üzerinde olup dike yakındır (Yaşıtılı, 2002).

3.2.5. Kömürün yapısı ve kömür damarını çevreleyen kayaçların jeoteknik özellikleri

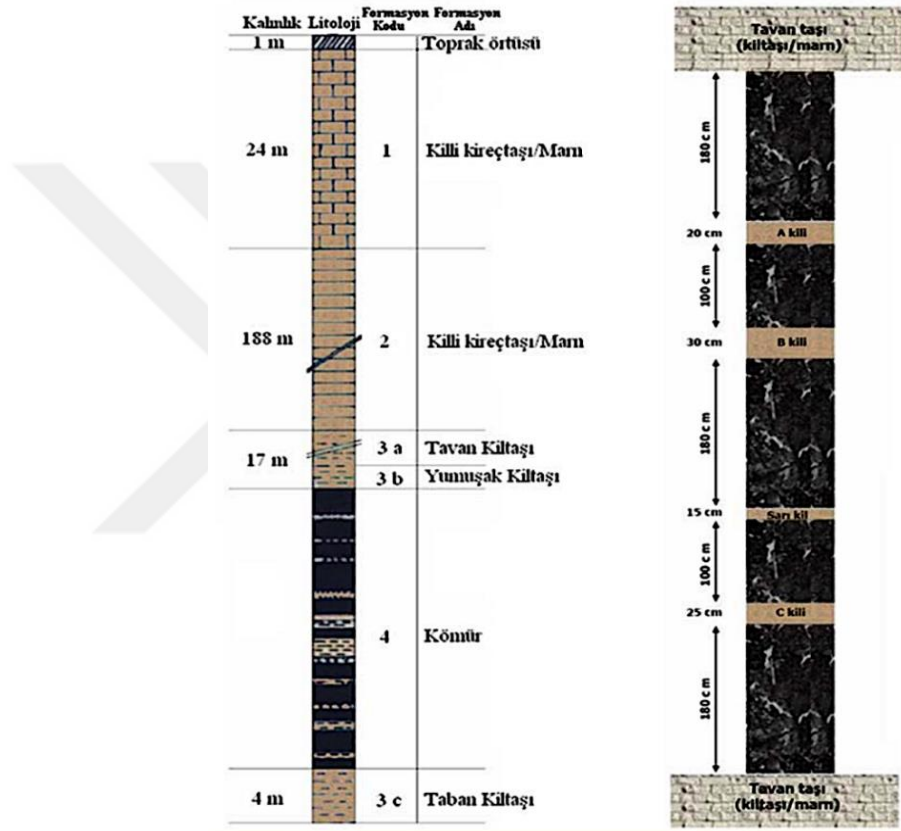
Ömerler kömür havzasının jeoteknik özelliklerini tespit etmek amacı ile Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 1987 yılında sondajlar yapılmıştır. Toplam derinliği 1726.5 metre olan sondajlarda, tüfit, kıltaşı, kireçtaşı, kumtaşı, konglomera, serpantin ve peridodit, dolarit, kalkerli marn ve marn birimleri kesilmiştir. Sondajlarda kesilen bu birimler, kıltaşı, kalkerli marn ve marn olmak üzere 3 adet ana grupta toplanmıştır (Çelik, 2005) (Şekil 3.3).

Sondajlardan alınan örnekler, MTA tarafından, laboratuvar ortamında, jeoteknik deneylere tabi tutulmuş bu deneylerden elde edilen veriler Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Şekil 3.3'te görülen kömür damarının hemen üzerinde yer alan, yumuşak kıltaşı tabakası, dayanımı düşük ve oldukça fazla süreksizlik içermektedir.

Yumuşak kil tabakasının üzerinde yer alan marn ise dayanımı daha yüksek bir kayaç olup, doğal nem içeriği bakımından düşük oranda nem miktarına sahiptir. Bölgede işletilmekte olan kömür damarı, genellikle orta sertlikte siyah ve parlak linyit ihtiva etmektedir. Kömür damarının taban ve tavan kısımlarında ara kesmeler daha az, orta kısımlarında ise daha fazladır (Destanoğlu ve ark., 2000)

Çizelge 3.1. Sondajların jeoteknik etüt sonuçları (Destanoğlu ve ark., 2000)

| Formasyon | Birim Hacim Ağırlık (MN/m ³) | Porozite (%) | Su İçeriği (%) | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Üç Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) | |
|---------------|--|--------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------|
| | | | | | | Kohezyon (MPa) | İçsel Sürtünme Açısı (°) |
| Kiltaş | 0.021 | 25.3 | - | 10,2 | 1 | 2.5 | 50 |
| Kalkerli Marn | 0.023 | 13.8 | - | 29,2 | 3.9 | 12,5 | 47 |
| Kireçtaşı | 0.025 | 4.3 | - | 64,3 | - | - | - |
| Marn | 0.022 | - | 14,2 | 16,1 | 1.9 | 5.0 | 31 |

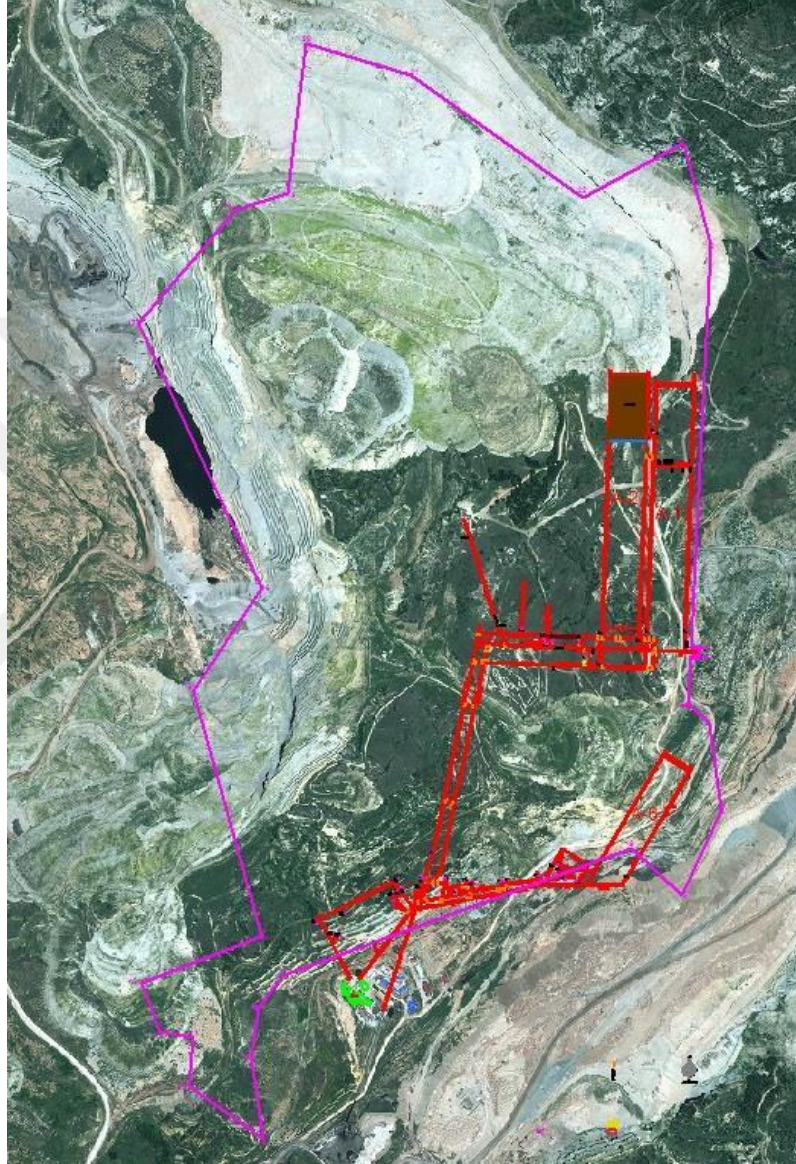


Şekil 3.3. Ömerler bölgesi kömür damarının çevre kayaçları ve stratigrafisi (Çelik, 2005)

3.2.6. Ömerler yeraltı işletmesi ve üretim yöntemi

GLİ Tunçbilek kömür havzasında, yeraltı kömür üretimi, mevcut Ömerler-A sahasında gerçekleştirilmektedir. Yeraltı kömür ocağındaki üretim, GLİ Yeraltı İstihsal Şube Müdürlüğü bünyesinde çalışan kendi personeliyle yapılmaktadır. Ömerler-A yeraltı ocağında yürüyen tahkimatların kullanıldığı, arkadan blok göçertmeli tam mekanize uzun ayak üretim yöntemi ile kömür üretimi yapılmaktadır. Ömerler-A sahasının sınırları Şekil 3.4'te mor renkle gösterilmiştir (Fişne, 2017)

Çalışma sahası içerisinde kalan kömür rezervi 18 milyon ton civarındadır. Kömür damarı kalınlığı 5-12 metre arasında değişmekte olup, ortalama 8 metre kalınlığa sahiptir. Yeraltı ocağında çalışılan en derin kısım +469 kotunda olup A1 panosu içerisinde yer almaktadır. Örtü tabakası kalınlığı yaklaşık 330 metredir.

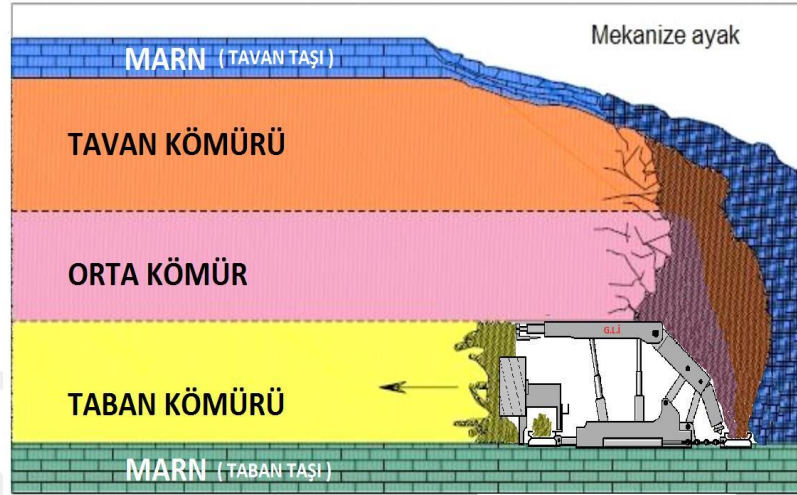


Şekil 3.4. Ömerler-A sahasına ait ocak sınırları (mor renk ile belirtilen hat) (Fişne, 2017)

Ocakta uygulanan üretim yöntemi, geri dönüşlü, arkadan göçertmeli, tam mekanize uzun ayak yöntemidir. Kömür damarının kalınlığından dolayı tek katlı yöntem uygulanmaktadır. Üretim yönteminin kesit görünümü Şekil 3.5'te verilmiştir.

Kömür damarının tabanından tavan (malzeme yolu) ve taban (kömür yolu) yolları sürülüp birbirine bağlanarak ayaklar oluşturulur. Ayak içi uzunlukları 90-110 m arasında

olup, oluşturulan panolar arasında 20 metrelik topuk bırakılmıştır. Ayak üretimleri, genel olarak kömür damarının 3 metrelik kısmı arından, 5 metrelik kısmı ayak arkasından olacak şekilde gerçekleştirilmektedir.



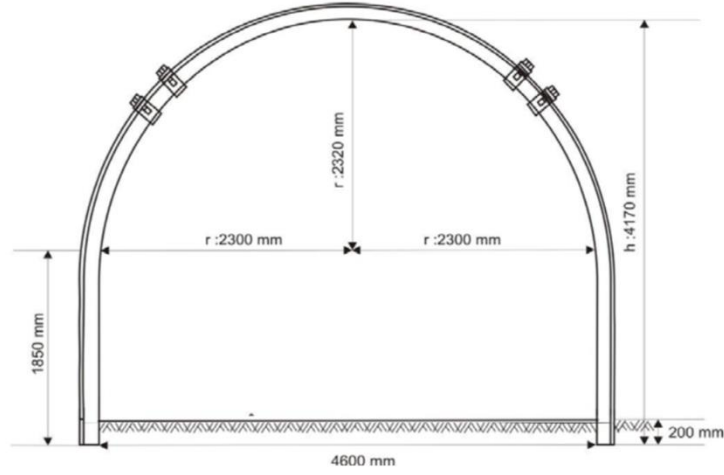
Şekil 3.5. Ömerler-A sahasında uygulanan üretim yönteminin kesit görünümü (Fişne, 2017)

Doktora tez çalışmaları kapsamında, arazi çalışmalarının gerçekleştirildiği tarihlerde (2016 - 2018 yılları arasında) A1 ve A2 uzunayak panolarında üretim ve hazırlık çalışmaları yapılmakta olup doktora tez raporunun hazırlandığı tarihlerde ise (2019 yılı itibarı ile) A6 panosunda hazırlık işleri devam etmektedir.

3.2.7. Ömerler yeraltı ocağında kullanılan tahkimat sistemleri ve özellikleri

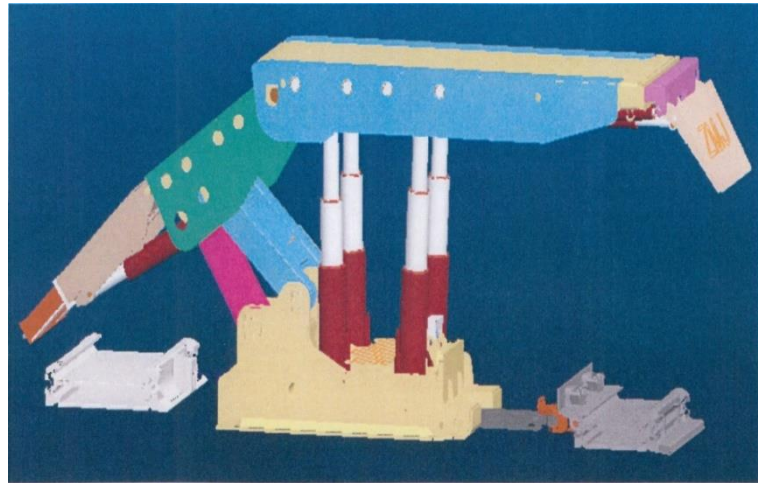
Ömerler yer altı mekanize üretim sisteminde iki ayrı tahkimat sistemi mevcuttur. Bunlardan birincisi galeri ve bacalarda kullanılmaktadır. Diğer tahkimat sistemi ise üretim yapılan ayakta, ayak içi tahkimatı olarak kullanılan tahkimat üniteleridir.

GLİ-Ömerler mekanize panolarında profil tipi GI 140 olan 4.60'lık çelik bağ kullanılır. Taban genişliği 4600 mm. yüksekliği ise 3500 mm. 'dir. Kazı alanı 15.79 m² faydalı kesiti ise 13.80 m²'dir. Ayrıca özel makas bağları ve kullanım yerinin durumuna göre daha değişik kalıplarda bağlar yapılarak kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da galeri ve bacalarda kullanılan tahkimat sisteminin şekli sunulmuştur. Ömerler yeraltı ocağında mekanize ayaktaki mevcut panolarda üç tip kalkan tahkimat ünitesi kullanılmaktadır. Bu üniteler; ayak içi tahkimatları, geçiş tahkimatları ve ayak başı tahkimatları olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.6. Ömerler yeraltı ocaklarında galeri ve bacalarda kullanılan tahkimat profili

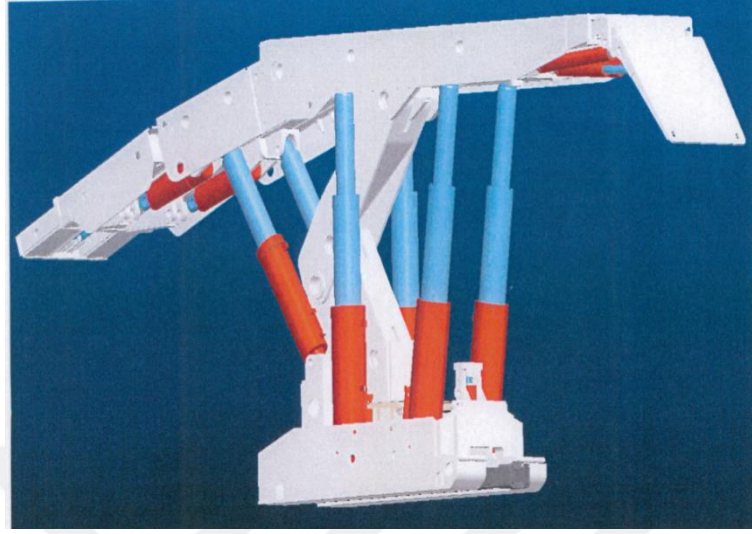
Ayak içi tahkimat üniteleri, ayak içini komple tahkim etmek üzere ve arka sarmadan kömür alma üzerine tasarlanan tahkimat üniteleridir. Bu tahkimatlar, çalışmaları esnasında, sarma ileriye doğru sürülür ve ayna tutucu aynaya yaslanır. Bu işlemlerden önce arka kömürün alımı sırasında tahkimat ile ayak konveyörü arasına dolan pasanın temizlenmesi gereklidir. Ayak motor başı tahkimatları ayak konveyörü ile ötelendikten sonra toplayıcı konveyör ile birlikte ötelenerek ilerletilir. Şekil 3.7’de bu tip tahkimat ünitelerine örnek bir görünüm sunulmuştur.



Şekil 3.7. Ömerler yeraltı ocaklarında kullanılan ayak içi tahkimat ünitelerinin görünümü

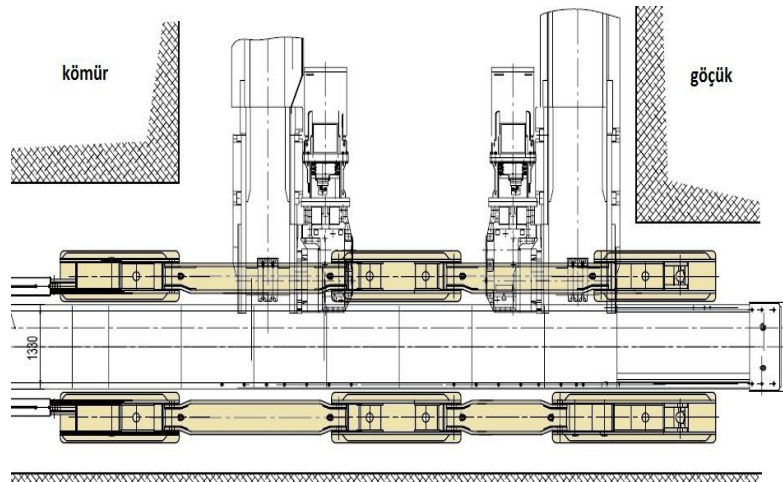
Geçiş tahkimat üniteleri, ocakta uzunayağın giriş kısımlarına yerleştirilmekte olup, ayak geçişini sağlamaktadırlar. Görünüm açısından bu ünitelerin ayak içi tahkimat ünitelerinin görünümünden pek bir farkları yoktur. Ancak bazı belirli özellikler ve boyut

açısından farklılıklar ihtiva etmektedir. Bu tip tahkimat ünitelerine ait şekilsel bir görünüm Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Ömerler yeraltı ocaklarında kullanılan geçiş tahkimat ünitelerinin görünümü

Ayak başı tahkimat üniteleri, yukarıdaki paragraflarda sunulan tahkimat sistemlerinden hem yapı hem de kapasite olarak oldukça farklı olup, üç parçadan oluşmaktadır. Bu üniteler, ayak başında emniyetli çalışma alanı sağlayarak, tavan yolu arkasındaki kömürün kazılmasına yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda zincirli konveyör baş kısmı ve tahrik üniteleri ile diğer yükleme ünitelerine yeterli genişlikte alanı emniyetle muhafaza ederek bu ünitelerin ilerletilmesini sağlamaktadır. Ayak başı tahkimat ünitelerine ait bir görünüm Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Ömerler yeraltı ocaklarında kullanılan ayak başı tahkimat ünitesinin görünümü

3.2.8. Ömerler yeraltı işletmesi panolarında üretim şekli

Ömerler yer altı mekanize panoda, arkadan göçertmeli ve geri dönümlü uzun ayak yöntemi kullanılmaktadır. Mekanize panoda M1, M2, M3, M4, M5, M7, M8, A5 panolarının üretimi tamamlanmıştır. 2008 yılı Nisan ayında biten ve mekanize üretim için açılan M6 panoda yangın çıkmış ve pano beton barajlar ile kapatılıp içeriye su basılmıştır.

Doktora tez çalışmaları kapsamında sürdürülen arazi faaliyetleri esnasında A1 panosunda hazırlık işlemleri devam ederken, eş zamanlı olarak A2 panosunda üretim faaliyetleri devam etmiştir. Doktora tez raporunun yazıldığı tarihlerde A1 uzunayak panosunda yaşanan ocak yangını ve aşırı su geliri problemlerinden dolayı, bu panoda çalışmalar durdurulmuştur. 2019 yılı Nisan ayından itibaren ocakta çalışmalar A6 uzunayak panosunda sürdürülmektedir.

Ocakta kömür kesme işlemi genellikle tek yönlü olarak gerçekleştirilmektedir ve kesime ayak motor başından veya ayak kuyruğundan başlanabilir.

Ayak başı yöntemi olarak ifade edilen bu kesim aşağıda belirtilen aşamalardan oluşmaktadır.

- Kesici makine, motor başından başlayarak taban temizliğine girer ve kesiciyi takiben konveyör aynaya itilir.
- Kesici makine, ayak kuyruğuna ulaştığında geri dönerek ayak konveyörünün aynaya ötelendiği kıvrımlı bölgede aynaya tam olarak girer.
- Kesicinin aynaya girmesinin ardından, daha önceden makine tarafından tabanı temizlenen kuyruk tarafında konveyör aynaya itilir.
- Kesici makine, tekrar geriye dönerek kuyruk girişindeki sonradan ayak konveyörünün dayanıldığı yerde, ayna kesimini yaparak geriye döner.
- Kesici makine, motor başına doğru ilerleyerek tüm ayna kesimi bitirilir ve kesim işlemi bitmiş olur ve 1. Aşamadaki konumuna gelir. Böylece kesim işlemi tamamlanır.
- Arka kömürün alınması çalışmalarında ise, hidrolik tahkimatların hareketi esnasında arka tarafın serbest bırakılması ile tavandan akan kömür arka konveyöre aktarılır.

Mekanize panoda üretim üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bunlar; ayna kesimi, bakım ve arka kömürün alınması aşamalarıdır.

Ocakta üretim periyotlarının vardiyalara göre dağılımı; 1. Vardiya (24:00-08:00): Arka kömürün alınması, 2. Vardiya (08:00-16:00): Ayna Kesimi ve 3. Vardiya (16:00-24:00): Bakım şeklindedir.

İşletmenin normal çalışma düzeninde, ayak ilerlemesi günde 3 ayna kesimi olarak planlanmaktadır. Ayna kesim vardiyasında 3 kesim tamamlanmakta ve bir sonraki vardiyada bakıma geçilerek tüm makine ve ekipmanların gerekli görülen tamir ve bakım işlemleri yapılmaktadır. Takip eden vardiyada ise arka kömür alınmaktadır.

Tahkimat ilerletilmesi çalışmaları, kesici makinenin 5 metre arkasından ayak konveyörünün sonuna kadar yapılır. Her bir tahkimatın kumanda işlemi yanındaki tahkimatın üzerindeki kontrol panelinden yapılır. İlerletilecek tahkimatın özellikle ayna tutucu ve uzatılabilir sarması geriye çekilir. Tahkimatların ana direkleri, tavan kırılmasına müsaade etmeyecek kadar alçaltılır. Bu durumda tahkimat üzerindeki tavan yükü azaltılmış olur. Tahkimatın alçaltılmasıyla birlikte, itme-çekme pistonu açılır. Pistona bağlı bulunan itme-çekme kazığının geriye çekilmesi ile tahkimat ileriye hareket eder.

Arka kömür, tahkimatlardaki arka sürgülerin açılması ve kömürün bu boşluktan konveyör üzerine akıtılması ile alınmaktadır. Birinci adımda arka kömürün kalınlığının yarısı, ikinci adımda ise diğer yarısı alınmaktadır. Bu sayede tavan kömürünün kırılabilirliğinin artırılması sağlanmaktadır. Eğer tavan kırılmamışsa pencerelerden tavana delikler delinip lağım atılarak tavanın göçertilmesi sağlanmaktadır.

Kesici makinenin kesim işlemine başlaması için makinenin kömür aynasına girmesi gerekmektedir. Bu işlem, makine taban temizliği yaparken makinenin 5 ila 6 tahkimat gerisinden ayak içi konveyörünün aynaya ötelenmesi ile yapılır. Öteleme işlemi 2 ila 4 tahkimatın itme-çekme pistonu aynı anda kapatılarak sağlanır. Pistonun kapanması ile pistonun bağlı olduğu itme çekme kazığı ileriye doğru hareket ederek konveyörün aynaya doğru itilmesini sağlar.


3.3. Kaya Kütle ve Malzeme Özelliklerini Belirleme Çalışmaları

Bu bölümde, TKİ-GLİ-Ömerler yeraltı kömür işletmesi A6 uzunayak panosu tabanyolları için kaya saplaması tahkimat tasarımı hazırlıkları çerçevesinde, sahada ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen, kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirleme çalışmalarının tümünde uygulanan yöntemler ve kullanılan materyaller hakkında bilgiler verilmiştir.

Böylelikle her bir kesitte 4 yönlü olarak, toplamda en az 60 metrelik bir yeraltı sondaj çalışması planlanmıştır.

Çalışmalarda kullanılan sondaj makinesi, işletmeye ait, 1996 model Atlas Copco marka ve Craelius Diamec model olup, basınçlı su yardımı ve delik delme prensibi ile çalışmaktadır. Kullanılan bu yeraltı sondaj makinasına teknik özellikleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Atlas Copco Craelius marka sondaj makinesine ait teknik özellikler

| | | | |
|----------------------------|---------------------------|----------------------|--|
| Marka Model | | Atlas Copco-Craelius |  |
| Tip | | Diamec DYB-37B | |
| Üretim Yeri ve Yılı | | İsveç-20/09/1996 | |
| Delgi Kapasitesi | Tij Çapı (mm) | 35 (Tij iç çapı) | |
| | Derinlik (m) | 100 | |
| Güç Ünitesi | Motor Tipi | Elektrikli | |
| | Güç (kW) | 15 -22 | |
| | Frekans Oranı (Hz) | 50 | |
| | | | |

Ocakta başlatılan ilk yeraltı sondajının konumu, 110 metrelik A1 pano ayak içerisinde olup, bu nokta, üst taban yoluna yaklaşık 65 metre, alt taban yoluna ise yaklaşık 45 metre mesafededir. Galeri kesitinde yatay yönde başlatılan bu sondaj SK-1/yatay kodu ile adlandırılmıştır (Şekil 3.11).

A1 pano ayak içinde yatay yönde başlayan yeraltı sondajı, 2 kişilik bir teknik ekip ile günde 1 vardiya şeklinde devam etmiştir. Toplamda 40 gün süren bu yeraltı sondaj çalışması, başladığı yatay yönde tamamlanmıştır. Bu çalışmada toplamda 15 tij (1 tij: 1.40m) uzunluğunda yaklaşık 21 metre delik delinmiş ve karot alınmıştır. Alınan karotlar genelde kırıklı ve karot özelliği taşımayan malzeme şeklinde çıkmıştır (Şekil 3.12). Sondaj çalışmasının yavaş ilerlemesinin nedenleri, kömür malzemesinin zayıf olması, işletmede çalışan personel sayısının azlığı, sondaj çalışmaları için ayrılan 2 kişilik ekibin bazı günlerde farklı işlere tertip edilmesi ve sadece gündüz vardiyasında sondaj çalışmalarına devam edilmesi olarak sıralanabilir.

TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninde gerçekleştirilen sondaj çalışmalarında yaşanan bu problemlerden sonra, kaya mekaniği ve kütle sınıflama çalışmalarını hızlandırmak amacıyla, yeraltından blok kütle çıkarılarak karot elde etme çalışmaları başlatılmıştır. Bu amaçla, A1 hazırlık galerisi ayak içi ve A2 üretim galerisi

ayak içinde belirlenen bölgelerde blok alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara ait detaylı bilgiler takip eden başlıkta belirtilmiştir.



Şekil 3.11. A1 pano ayak içinde yatay yönde başlayan SK-1/yatay kodlu yeraltı sondaj çalışmalarına ait tipik bir görüntü



Şekil 3.12. SK-1/Arın yeraltı sondajından elde edilen ve karot özelliği taşımayan örnekler için tipik görüntüler

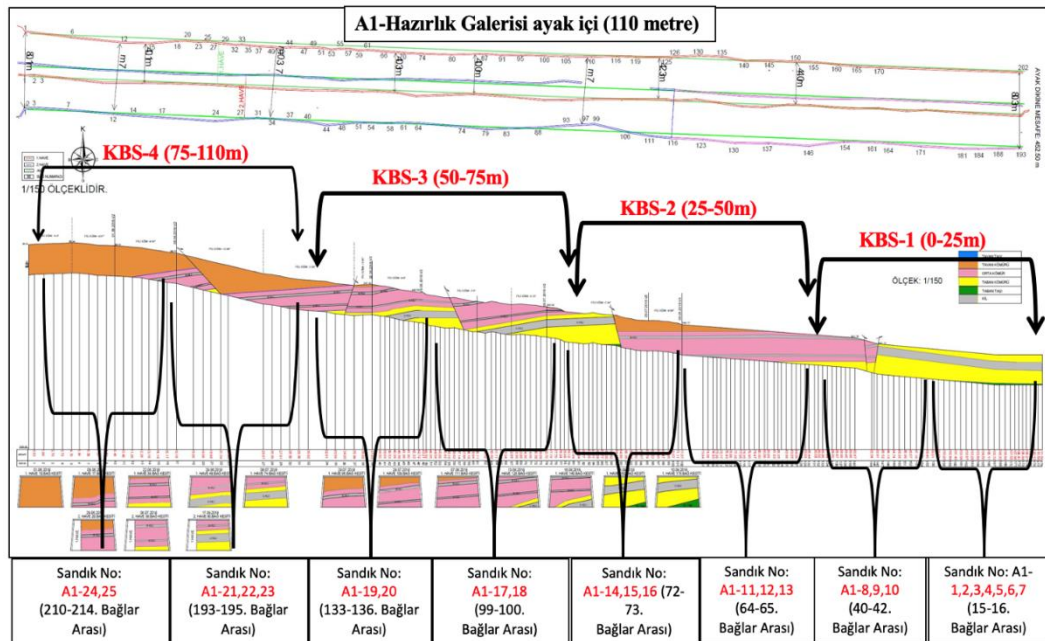
3.3.2. Kömür arınından blok alma çalışmaları

Kaya saptamaları ile tahkimat tasarım çalışmalarında gerekli olan kaya mekaniği verilerini elde etmek amacıyla, sahadaki sondaj çalışmalarından ayrı olarak kömür bloklarından laboratuvar şartlarında karotların alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede A1 uzunayak panosunun kılavuz galerisinden ve A2 uzunayak panosunun üretim arınından kömür blokları elde etme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Blok alma çalışmalarının gerçekleştirilmesine yardımcı olunması amacıyla, işletme yönetimi tarafından tahsis edilen, hazırlık servisine ait 2 tahkimat işçisi tertip edilmiştir. Ayrıca alınan blokların ahşap sandıklar içerisine konulması için marangozhaneye bağlı 2 işçi tertip edilmiştir. Her iki panoda yapılan çalışmalar aşağıda sıralandığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

A1 uzunayak panosunda gerçekleştirilen çalışmalar;

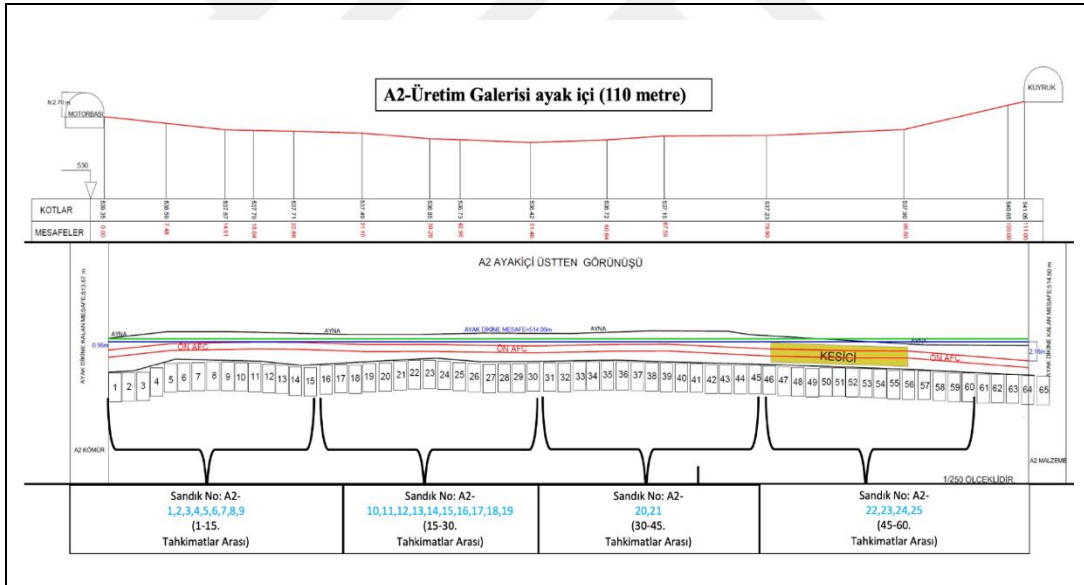
- 110 metre uzunluğundaki arın her biri yaklaşık 25-30 m'lik bölgelere ayrılmıştır. Bu bölgeler Kömür Blok Alma Sahası (KBS) olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.13).
- Her bir bölgenin içindeki ara kesmeler dikkate alınarak ara kesmelerin üstünde ve altında kalan damarlardan kömür blokları alınmıştır.
- Yaklaşık 50 cm x 50 cm x 50 cm boyutlarındaki kömür blokları nem kaybını önlemek amacıyla şeffaf paketleme malzemesi (streç film) ile kaplanmıştır.
- Streç film ile kaplanan her bir blok için naklieleri esnasındaki sarsıntılardan korumak amacıyla birebir özel sandıklar hazırlanarak içerisine yerleştirilmiştir.
- Bu çalışma disiplini içerisinde 25 adet kömür bloğu nem etkisinden korunmak amacıyla Konya Teknik Üniversitesi-Maden Mühendisliği Bölüm laboratuvarına nakil edilecek tarihe kadar yeraltında muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.13. A1 hazırlık galerisi ayak içinden alınan kömür bloklarına ait konum bilgileri

A2 uzunayak panosunda gerçekleştirilen çalışmalar;

- A2 panosunda üretim yapıldığı için 110 m uzunluğundaki kömür arınında kömür bloğu alınacak bölgeler 1-15, 15-30, 30-45 ve 45-60 numaralı yürüyen tahkimatlarla sınırlandırılmıştır (Şekil 3.14).
- Ayak içerisindeki kazı makinasının pozisyonuna ve çalışma yoğunluğuna göre bu bölgelerden kömür blokları alınmıştır.
- Her bir bölgenin içindeki ara kesmeler dikkate alınarak ara kesmelerin üstünde ve altında kalan damarlardan kömür blokları alınmıştır.
- Streç film ile kaplanan her bir blok, nakliyeleri esnasındaki sarsıntılardan korumak amacıyla birebir özel sandıklara yerleştirilmiştir.
- Bu çalışma disiplini içerisinde hazırlanan 25 adet kömür bloğu, nem etkisinden korunmak amacıyla Konya Teknik Üniversitesi-Maden Mühendisliği Bölüm laboratuvarına nakil edilecek tarihe kadar yeraltında muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.14. A1 üretim panosu ayak içinden alınan kömür bloklarına ait konum bilgileri

Çalışma sahasında yer alan A1 ve A2 panolarından alınan 50 adet blok sandığına ait lokasyon bilgileri Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 'de sunulmuştur.

Yukarıda belirtilen çalışma disiplini içerisinde alınan bloklar (Şekil 3.15) belirli bir süre yeraltında, doğal ortamında bekletildikten sonra TKİ-GLİ işletmesi tarafından tahsis edilen bir kamyon ile Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm laboratuvarına nakil edilmiştir.

Çizelge 3.3. A1 pano kılavuz galerisinden alınan bloklara ait lokasyon bilgileri

| Sandık No | Alınan Blok Konumu ve Tanımı | Blok Alma Bölgesi |
|------------------|--------------------------------------|--|
| 1-7 (7 sandık) | 15-16. Bağlar arası-Ara Kesme Altı | A1 Panosu kılavuz galerisi- (Uzunayak olması planlanan kömür arını) |
| 8-10 (3 sandık) | 40-42. Bağlar arası-Ara Kesme Üstü | |
| 11-13 (3 sandık) | 64-65. Bağlar arası-Ara Kesme Altı | |
| 14-16 (3 sandık) | 72-73. Bağlar arası-Ara Kesme Üstü | |
| 17-18 (2 sandık) | 99-100. Bağlar arası-Ara Kesme Altı | |
| 19-20 (2 sandık) | 133-136. Bağlar arası-Ara Kesme Üstü | |
| 21-23 (3 sandık) | 193-195. Bağlar arası-Ara Kesme Üstü | |
| 24-25 (2 sandık) | 210-214. Bağlar arası-Ara Kesme Üstü | |

Çizelge 3.4. A2 pano üretim galerisinden alınan bloklara ait lokasyon bilgileri

| Sandık No | Alınan Blok Konumu ve Tanımı | Blok Alma Bölgesi |
|-------------------|--|--------------------------|
| 1 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | A2 Panosu uzunayak arını |
| 2 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 3 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 4 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 5 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 6 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 7 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 8 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 9 | 1 numaralı ve 15 numaralı tahkimatlar arası | |
| 10-19 (10 sandık) | 15 numaralı ve 30 numaralı tahkimatlar arası | |
| 20-21 (2 sandık) | 30 numaralı ve 45 numaralı tahkimatlar arası | |
| 22-25 (4 sandık) | 45 numaralı ve 60 numaralı tahkimatlar arası | |

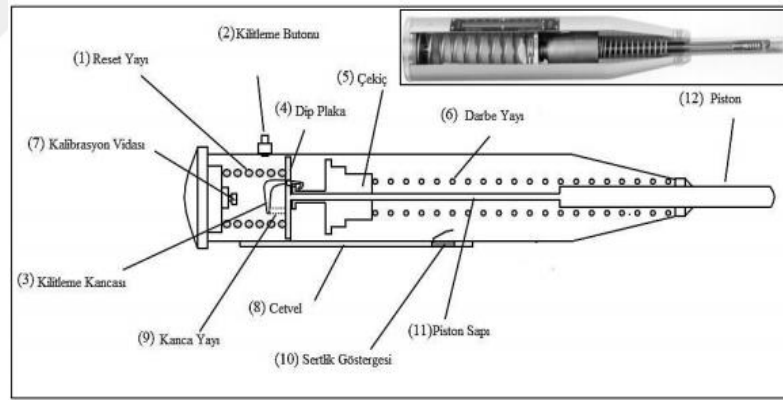


Şekil 3.15. A1 hazırlık galerisi ayak içerisinde gerçekleştirilen kömür arınından blok alma çalışmaları

3.3.3. Schmidt çekici ile kaya sertliği belirleme çalışmaları

Genel olarak bu deney, Schmidt çekici kullanılarak, kayaçların Schmidt geri sıçrama (Schmidt sertliği) sertliğinin tayini ve dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır (Ulusay ve ark., 2001) Schmidt çekici 1948 yılında beton numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı (σ_c) tahmini için geliştirilmiş basit bir deney düzeneğidir (Schmidt, 1951). 1960'lı yıllardan itibaren de kaya mekaniği alanında kullanılmaya başlanmıştır. Schmidt çekici aynı zamanda beton ve kayaç numunelerinin yüzey sertliklerinin de belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Schmidt çekiçleri darbe enerjilerine göre sınıflandırıldığında 2'ye ayrılmaktadır. Bunlar; L ve N tipi çekiçlerdir. L tipi çekiçlerin darbe enerjisi 0,735 Nm'dir ve N tipi Schmidt çekicinin darbe enerjisi 2,207 Nm'dir. Laboratuvar ortamında karot numuneleri üzerine sertlik deneyi yapılırken N tipi çekiç yerine L tipi çekiç kullanılmaktadır. Kullanım modellerine göre Schmidt çekiçleri ikiye ayrılmaktadır. Bunlar basit Schmidt çekiçleri ve dijital Schmidt çekiçleridir. Tipik bir Schmidt çekicinin yapısı Şekil 3.16'da sunulduğu gibidir (Anonim, 2016).



Şekil 3.16. Basit bir Schmidt çekicinin yapısı ve mekanizması (Anonim, 2016)


Klasik çekiçler ilk Schmidt çekici türleridir ve ilk icat edildiklerinden bugüne aynı şekilde gelmişlerdir. Sertlik değeri ölçülecek olan kayaç ya da beton numunesinin üzerine yerleştirilen çekiç numuneye bastırılarak göstergedeki geri sıçrama değeri okunur. Dijital Schmidt çekicinde değerler dijital olarak cihaz tarafından ölçülür ve göstergede gösterilir. Dijital çekiçlerin diğer bir özelliği geri sıçrama katsayısı denilen ve yeni bir ölçüm sistemi olan bir parametreyi de geri sıçrama değeri ile birlikte verebilmesidir.

Doktora tezi çalışmalarında, yeraltında dijital Schmidt çekici ile testler yapılmıştır. Testlerde kullanılan deney cihazı Proceq marka Digi Schmidt 2000 model L tipi dijital Schmidt çekicidir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.5’de belirtilmiştir.

Schmidt çekici ile sertlik belirleme çalışmaları için Ömerler yeraltı kömür madeninde, A1 pano ayak içinde dört farklı ana ölçüm bölgesi hazırlanmıştır. Bu test alanları SH-1, SH-2, SH-3 ve SH-4 olarak kodlanmıştır (Şekil 3.17). Yaklaşık 15 m²’lik bir yüzeyden oluşan her bir ana ölçüm bölgesinde ölçümler, farklı tarihlerde olmak üzere birden çok tekrarlanmıştır.

Örnek olarak verilen SH-3 ana ölçüm bölgesinde oluşturulan alt birim hücreler görülmektedir (Şekil 3.18). Ana ölçüm bölgesi kendi içerisinde yaklaşık 0,15m²’lik alt birim ölçüm hücrelerine bölünmüştür. Bir başka ifade ile Şekil 3.20b’de kırmızı ile belirtilen noktalar her bir alt hücrede vuruş yapılan noktayı temsil etmektedir Her bir ölçümden alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve çıktı sonuçları alınmıştır. A1 pano ayak içerisinde hazırlanan tüm ölçüm bölgelerine ait (SH-1-2-3-4) lokasyon ve alt birim hücre sayısına ait bilgiler Çizelge 3.6’da belirtilmiştir.

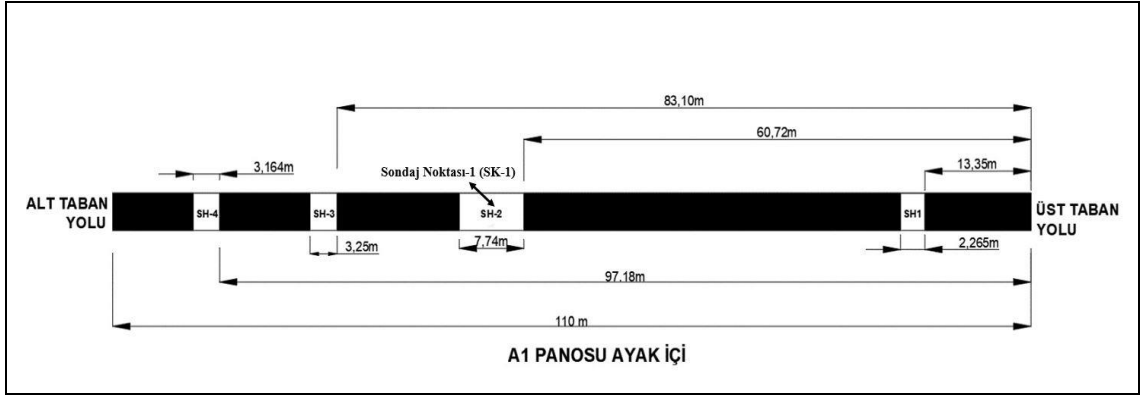
Çizelge 3.5. Ölçüm çalışmalarında kullanılan Schmidt çekicinin teknik özellikleri

| | | |
|--------------------|---|---|
| Test Çekici Tipi | L tipi |  |
| Darbe Enerjisi | 0.54 ft-lbs. (0.735 Nm) | |
| Basma Dayanımı | 1450psi- 10,150psi -10-70 N/mm ² | |
| Ölçüm Aralığı | | |
| Ölçüm Doğruluğu | ±0.2 R | |
| Tekrarlanabilirlik | ±0.5 R | |
| Boyutlar | 12.8" x 11.6" x 4.15" (325 x 295 x 105 mm) | |
| Ağırlık | 3 kg. | |

Çizelge 3.6. Schmidt çekici ölçüm bölgelerine ait bilgiler

| Schmidt Çekici Ölçüm Bölgesi Kodu | Ölçüm Bölgesi Toplam Kesit Alanı (m ²) | Ölçüm Bölgesinde Oluşturulan Birim Hücre Adedi | Üst Taban Yoluna Olan Uzaklığı (m) | Alt Taban Yoluna Olan Uzaklığı (m) |
|-----------------------------------|--|--|------------------------------------|------------------------------------|
| SH-1 | 7.835 | 52 | 13.35 | 91.39 |
| SH-2 | 24.815 | 98 | 60.72 | 38.69 |
| SH-3 | 12.375 | 70 | 83.10 | 20.80 |
| SH-4 | 9.158 | 70 | 97.18 | 6.80 |

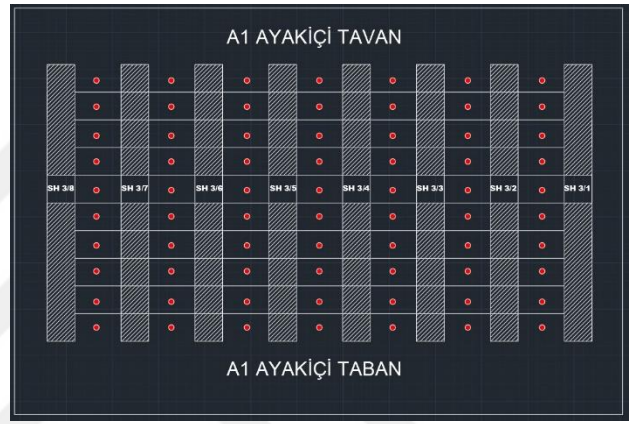
Ölçümlerde Schmidt çekici aynaya dik yönde ve belirlenen her bir alt hücrede birer ölçüm alınacak şekilde yapılmıştır (Şekil 3.19).



Şekil 3.17. A1 panosu ayak içinde konumlanan Schmidt Çekici ile sertlik belirleme uygulama bölgeleri

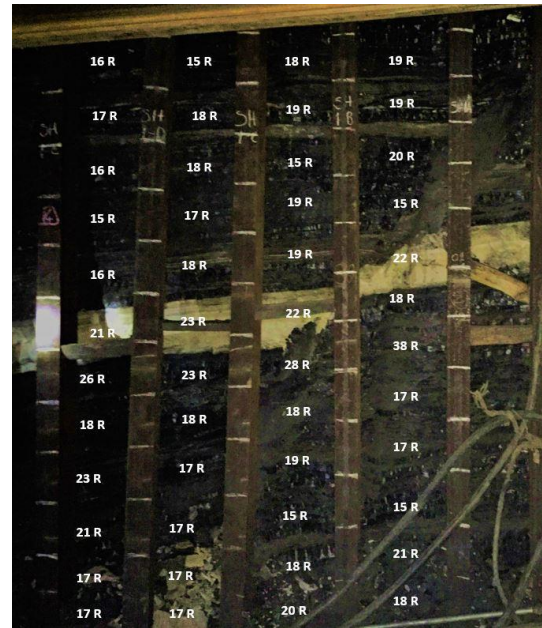


a-Schmidt Çekici Ölçüm Bölgesi (SH-3)



b-Schmidt Çekici Ölçüm Bölgesi Taslağı (SH-3)

Şekil 3.18. A1 panosu ayak içinde yapılan Schmidt çekici testleri ölçüm sistematığı



Şekil 3.19. A1 panosu ayak içinde yapılan Schmidt Çekici deney yöntemine ait tipik bir görüntü

3.3.4. Nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri

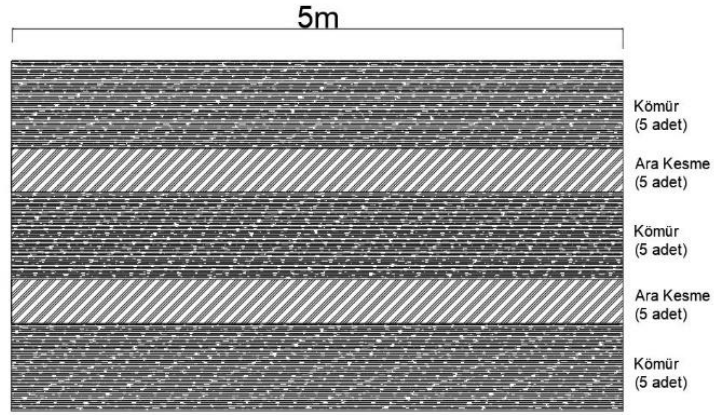
Nokta yükleme dayanım indeksi tayini deneyi, kayaçların dayanımlarına göre sınıflandırılmasında kullanılan nokta yük dayanım indeksinin saptanması amacıyla yapılmaktadır. Nokta yük dayanım indeksi tek eksenli basma ve çekme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerinin dolaylı olarak belirlenmesinde kullanılır. Deney sonucu esas alınarak kayacın “Nokta yükü dayanım indeksi” ve “Dayanım anizotropi indeksi” değerleri belirlenir. Deney numuneleri düzgün şekilde (çapsal veya eksenel), kesilmiş bloklar halinde veya düzgün olmayan parçalar şeklinde olabilir. Nokta yükleme deney aleti, basit ve taşınabilir bir cihazdır (Şekil 3.20) (Anonim, 2016).



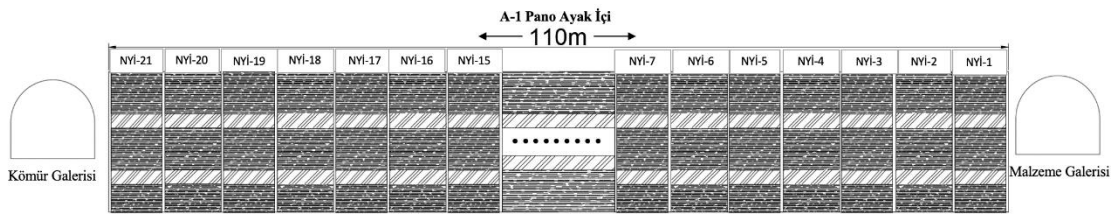
Şekil 3.20. Basit bir nokta yükü dayanım indeksi tayini belirleme deney cihazı (Anonim, 2016)

Doktora tez çalışmaları kapsamında, TKİ-GLİ Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocağında, A1 pano hazırlık galerisinde nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneylerin gerçekleştirileceği A1 panosu hazırlık galerisinde deneyler için örnek alınacak bölgeler tanımlanmıştır. Şekil 3.21’de görüldüğü üzere 110 metrelik kömür arını yaklaşık 5’er metrelik bölgelere ayrılmıştır. Her bölgeye NYİ-1 gibi kodlar verilmiştir (Şekil 3.22).

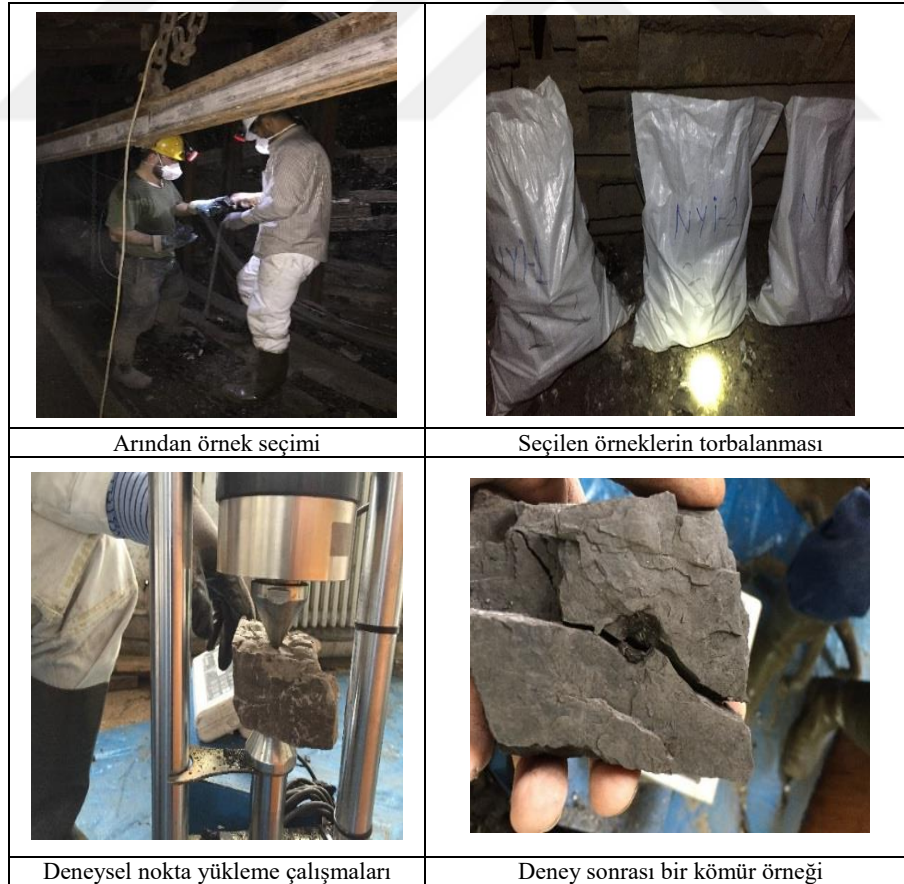
A1 pano ayak içerisindeki çalışma bölgesi, nokta yükleme indeks deneyi numunesi elde etmek amacıyla 21 adet ölçüm bölgesine ayrılmıştır. Her bir bölgede Şekil 3.22’de görüldüğü üzere kömür ve ara kesme birimlerinden örnekler toplanmıştır. Örnekler tertip edilen 2 işçi yardımıyla martöpikör ya da kazma kullanılarak arının iç kısımlarından alınmıştır. Her bir birimden en az 5’er adet olmak üzere toplamda her bir bölge için en az 25 adet örnek seçilmiştir. Daha sonra takip eden vardiyada seçilen örnekler işletme binasına nakledilmiştir. Yeraltından alınarak, takip eden vardiyada işletme binasına alınan örnekler, işletme yönetimi tarafından tahsis edilen kapalı bir alanda Şekil 3.23’te görüldüğü gibi deneye tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3.21. Bir NYİ bölgesinden örnek seçme sistematığı



Şekil 3.22. A1 kılavuz galerisinde belirlenen NYİ bölgeleri

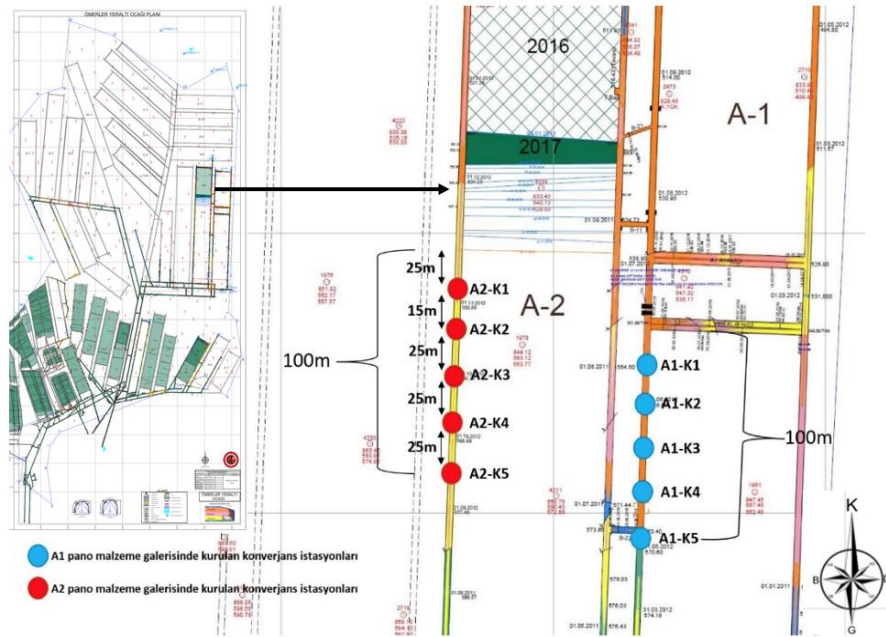


Şekil 3.23. Seçilen örnekler üzerinde gerçekleştirilen nokta yükleme dayanımı indeks deneyleri

3.3.5. Konverjans ve taban kabarması ölçümleri

Uzunayak madenciliğinde, taban yolları, ayak çalışmalarının etkisiyle yüksek basınçlara maruz kalmaktadır. Bu nedenle taban yollarında kesit boyunca simetrik olmayan bir gerilme dağılımı söz konusudur. Bir taban yolunun içerisinde, kömür, malzeme, insan ve hava geçişinin kesintisiz bir biçimde sağlanabilmesi için taban yolu açıklık boyutlarının kullanımını süresince korunması gerekmektedir.

Doktora tez çalışmaları kapsamında, A1 ve A2 uzunayak panoları taban yollarında konverjans ve taban kabarma istasyonları kurulmuştur (Şekil 3.24). Buradaki amaç, tez çalışmaları sonucunda elde edilecek olan nihai kaya saplaması tahkimat tasarımının, sahada uygulanması durumunda, uzunayak üretimine bağlı olarak, taban yollarının davranışlarının önceden belirlenmesini sağlamaktır. Şekil 3.24'te belirlenen bölgelerde kurulan konverjans ölçüm istasyonları ile taban kabarması istasyonları aynı kesitte yer almaktadır.



Şekil 3.24. Konverjans ve taban kabarması ölçüm istasyonlarının TKİ-GLİ Ömerler ocak planı üzerinde görünümü

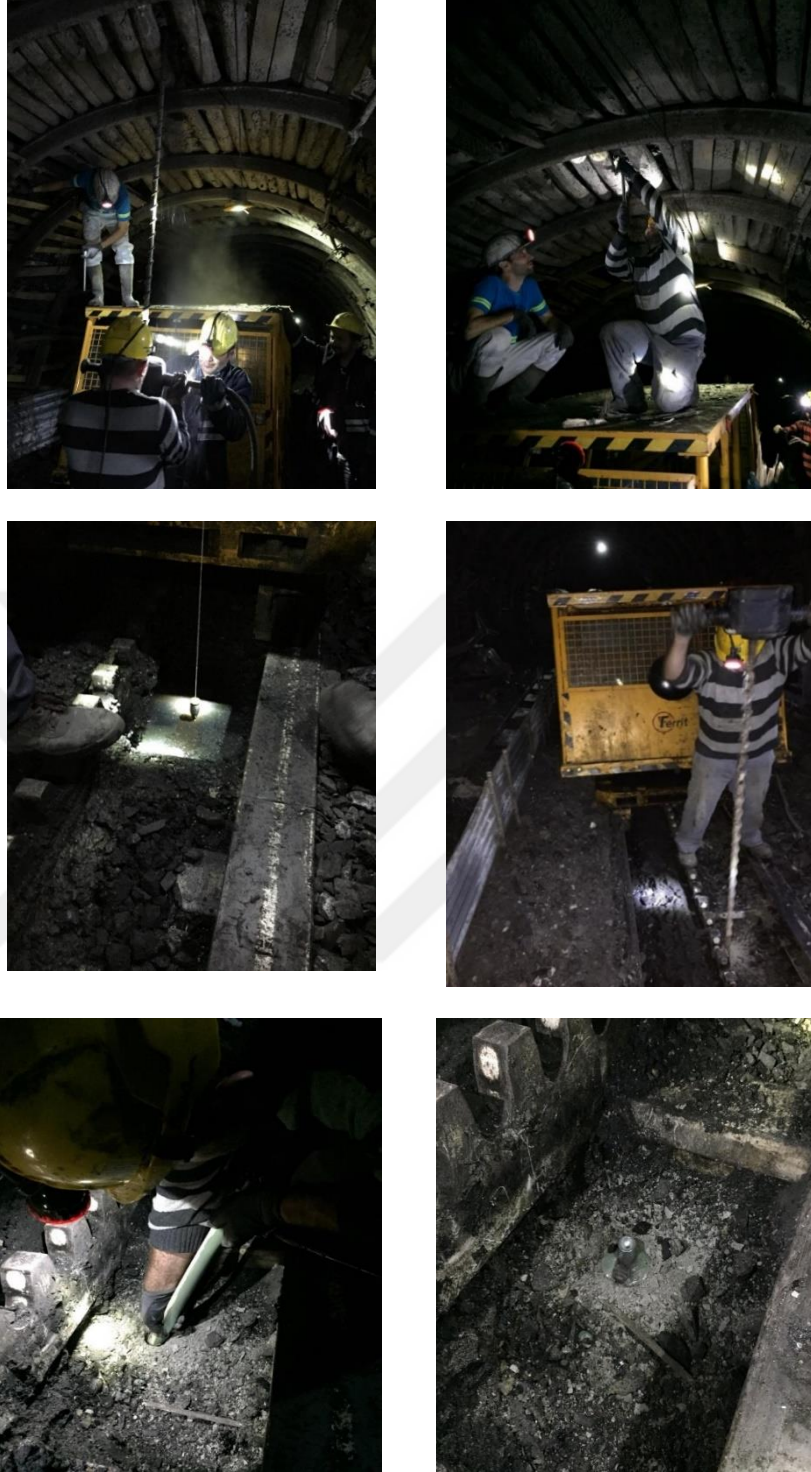
Belirtilen bölgelerde gerçekleştirilen konverjans ölçümleri ile galeri tavan ve tabanı arasındaki kapanma davranışlarının uzunayak arınının ilerlemesine bağlı olarak değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Benzer şekilde galeri tabanında oluşacak taban kabarması davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.24'te belirtilen konverjans

ölçüm noktaları, A1-K1 ve A2-K1 gibi kodlanırken, taban kabarması istasyonları ise A1-T1, A2-T2 gibi kodlanarak tanımlanmıştır.

Konverjans ölçüm istasyonlarının kurulumunda, ilk olarak tavanda yaklaşık 40 cm uzunluğunda bir delik açılmış ve açılan bu delik içerisine 50 cm uzunluğunda korozyona karşı dayanıklı bir demir çubuk yerleştirilmiştir. Çubuğun tavana sabitlenmesi için hızlı donma özelliğine sahip reçine kartuşlar kullanılmıştır. Tavan çubuğunun yerleştirilmesi işleminde, çubuğun uç bölümünün yaklaşık 5-10 cm'lik kısmının dışarıda kalmasına izin verilmiştir.

Tavan çubuğu sabitlendikten sonra, bir şakül yardımıyla taban çubuğunun yerleştirileceği nokta belirlenmiş ve bu noktayı içine alan tabanda bir çukur açılmıştır. Çukurun boyutları yaklaşık 30 cm x 30 cm x 30 cm şeklindedir. Daha sonra tekrar şakül yardımıyla taban noktası kontrol edilerek delici makine ile yaklaşık 40 cm uzunluğunda delik delinmiştir. Tabana yerleştirilecek olan çubuk tavanda olduğu gibi reçine kartuş yardımıyla delik içerisine sabitlenmiştir. Tabanda açılan çukurun içerisine yerleştirilen taban çubuğunun kafa kısmının yaklaşık 5-10 cm dışarıda kalması sağlanmıştır. Çubuk yerleştirilmeden önce tabanda çukur açılmasının nedeni, bu çukura yerleştirilen taban çubuğunun madencilik faaliyetlerinden etkilenmemesini sağlamaktır. Ayrıca, hazırlanan bir demir kapak da çukurun ağzına kapatılmıştır. Bahsedilen bu kurulum aşamalarına ait çalışmaları özetleyen tipik görüntüler Şekil 3.25'de sunulmuştur.

Konverjans ve taban kabarması ölçümleri, sistematik olarak Ömerler yeraltı ocağı A1 ve A2 panosu taban yollarında belirlenen bölgelerde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.27). Konverjans ölçümleri, saha çalışmasının öncesinde tasarlanıp imal ettirilen bir teleskobik konverjans ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Bu konverjans ölçer, birbirinden farklı boyut ve görevlere sahip 3 farklı tüpten oluşmaktadır. Konverjans ölçere ait bu tüpler birleştirildiğinde konverjans ölçerin boyu, en az 2 metre ile en fazla 4.5 metre arasında değişmektedir. Ölçümler mekanik bir komparatör saat ile gerçekleştirilmiştir. Hem konverjans hem de taban kabarması ölçüm çalışmalarında, sahada bulunulmayan günlerde de ölçüm alınması amacıyla, işletmede görev yapan iki işçi, ölçüm konusunda eğitilerek ölçümlerde görev almışlardır. Böylelikle ölçümler günde bir kez olmak üzere toplamda 30 gün gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm çalışması tek bir istasyon için üç kez tekrar edilmiş ve ortalama değer kullanılmıştır. Bu yöntem tüm ölçüm istasyonlarında uygulanmıştır.



Şekil 3.25. Konverjans ölçüm istasyonlarının TKİ-GLİ Ömerler yeraltı ocağında kurulum çalışmaları

Konverjans ölçüm istasyonları ile hemen hemen aynı lokasyonlarda bulunan taban kabarması ölçüm istasyonları, işletme tarafından tahsis edilen 2 işçi ile birlikte kurulmuştur. Kurulum çalışmalarında taban kabarması istasyonları için galeri tabanına

yapılacak olan delme işleminin taban taşında en az 1 metre ilerleyecek şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Taban kabarması ölçüm istasyonu TKİ-GLİ Ömerler yeraltı ocağında kurulum çalışmaları



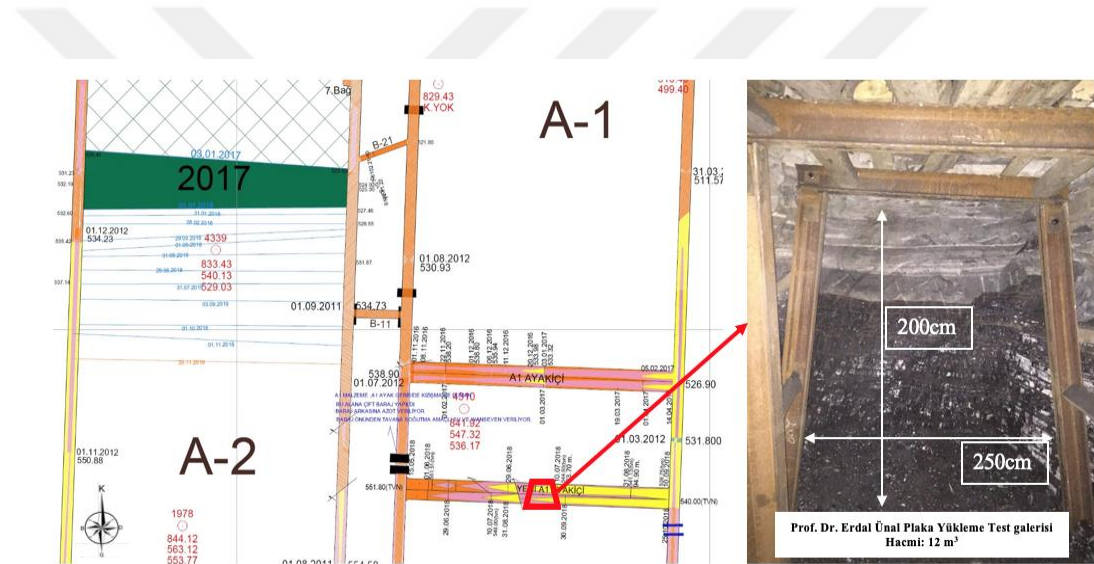
Şekil 3.27. Konverjans ölçüm çalışmalarına ait tipik bir görüntü

3.3.6. Plaka yükleme deneyleri

Plaka yükleme deneyi, zeminlerin taşıma kapasitesini yerinde ve hızlı bir şekilde tayin edebilmek amacıyla geliştirilmiş bir deney yöntemidir. Bu deney ayrıca, kaya mekaniği çalışmalarında, özellikle sık eklemlerli kaya kütlelerinde uygulanan pratik bir arazi deneyidir. Plaka yükleme deneylerinden elde edilen veriler yardımıyla kaya kütlelerinin yerinde elastisite modülü ve kaya zeminin sıkışma miktarı hesaplanabilir.

Kaya saplama tahkimatı tasarım çalışmalarında, veri tabanı olarak kullanılacak olan kaya malzeme verilerine nazaran gerçek duruma daha yakın bir tasarım için kaya kütle parametrelerinin kullanılmasının önemi aşikârdır. Doktora tez çalışmalarında, plaka yükleme deneyi uygulamalarının gerçekleştirilmesi de bu amaç doğrultusunda olmuştur.

Plaka yükleme deneyleri için Ömerler yeraltı kömür maden ocağında A1 panosundaki galerisi içerisinde işletme çalışanları tarafından kömür arınında bir cep açılmıştır. Açılan bu cep (test galerisi) içerisinde, yerinde plaka yükleme deneylerinin yapılması planlanmıştır. Bu test galerisi Prof. Dr. Erdal Ünal plaka yükleme test galerisi olarak adlandırılmıştır. Açılan test galerisi yaklaşık olarak 2 metre yüksekliğinde, 2.5 metre genişliğinde ve 2.5 metre derinlik boyutlarında olmuştur. Trapez kesitte açılan galeri, tahkimat ile desteklenmiştir. (Şekil 3.28).

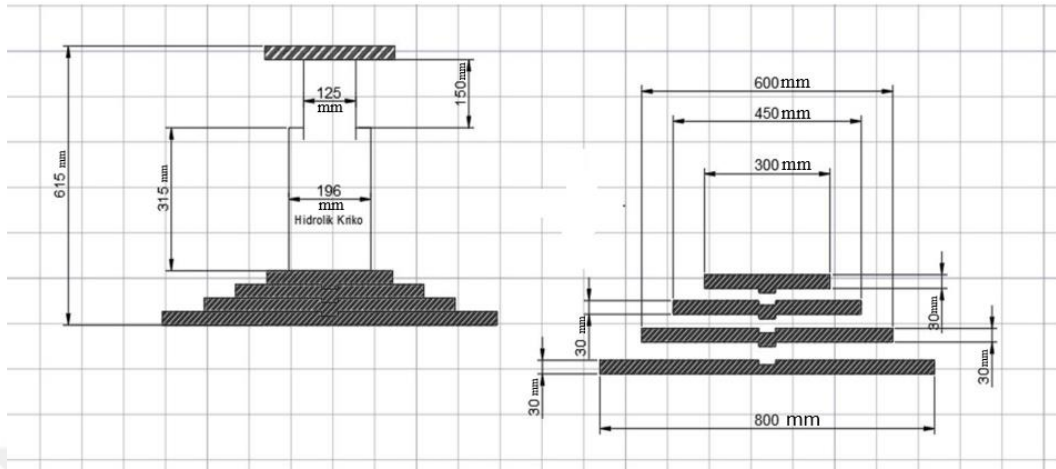


Şekil 3.28. A1 panosunda hazırlanan Prof. Dr. Erdal Ünal plaka yükleme test galerisi

Deneyel çalışmada kullanılan demir plakalar, maden işletmesi tarafından hazırlanmıştır. Ayrıca maden işletmesine ait 300 bar kapasiteli bir hidrolik pompa, plaka yükleme deneylerinde kullanılmıştır. Kesite ait taze arında plaka yükleme deneyi yapabilmek amacıyla, 80 cm x 80 cm x 80 cm boyutlarında bir cep açılmıştır. Açılan bu cep içerisine, hazırlanan plaka yükleme deney cihazı yerleştirilmiştir.

Deney ekipmanının teknik boyutları ve test bölgesindeki görünüşü Şekil 3.29'da sunulmuştur. Deformasyon ölçümlerinde, iki adet 0.01 mm hassasiyetli 50 mm stroklu komparatör saati kullanılmıştır. Deneyel çalışmada deney süreci, yükleme ve yük boşaltma süreçlerinden oluşmuştur. Deneyel çalışmalar, açılan test galerisinin arınında ve yan duvarlarında yapılmıştır. Deneyel çalışmalarda 5 kişi görev almıştır. Hidrolik

pompada oluşturulan her bir birim basınç artışında ya da azalışında, meydana gelen deformasyon değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.29. Plaka yükleme deney sisteminin teknik boyutu ve deneyin yerinde uygulanmasına ait tipik görüntüler

3.3.7. Kaya kütle sınıflama çalışmaları

Kaya kütlelerinin sık aralıklı süreksizlikler içermesi durumunda, laboratuvar koşullarında dayanım özelliklerini belirlemek amacı ile bilinen örnek boyutlarının dışında, çok büyük örnekler ihtiyacı duyulmaktadır. Ancak, bu tür kaya kütlelerinde metre boyutunda örnek alımı mümkün olmayıp, bu boyuttaki örneklerin yerleştirileceği çok büyük deney hücrelerinin geliştirilmesi de oldukça zordur.

80'li yıllardan bu yana kullanılan Hoek-Brown görgül yenilme ölçütü bu zorlukları aşmak için geliştirilmiş ancak zayıf kaya kütlelerinde uygulanmasında karşılaşılan bazı sınırlamalardan dolayı, günümüze kadar bu ölçüt pek çok değişikliğe uğramıştır.

1994 yılına kadar jeomekanik sınıflama sisteminden belirlenen RMR değerini esas alan Hoek-Brown yenilme ölçütünde, 1994'den sonra doğrudan RMR değerinin kullanılması yerine, RMR değerinden elde edilen Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index-GSI) dahil edilmiştir. Ölçütün güncellenen son versiyonunda; RMR değerinden bağımsız ve herhangi bir kaya kütlesi parametresi için sayısal değer esas alınmaksızın, sadece kaya kütlelerinin görsel olarak tanımlanmasına dayalı bir GSI sınıflama sisteminin kullanımına geçilmiştir. Güncel GSI sınıflama sisteminde, GSI değerleri, kaya kütlelerinin görünümüne ve tanımlanmasına göre belirlenebilmektedir.

Doktora tez çalışmalarının gerçekleştirildiği TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür madeninde özellikle zayıf nitelikte olan kömür tabakasına ait kaya kütle karakterizasyonunun belirlenebilmesi amacıyla GSI sınıflama sistemi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

GSI sınıflama yönteminde iki temel parametre mevcuttur. Bu parametrelerden ilki olan Yapısal Özellik Puanı (SR), kaya kütlelerinin çatlaklılık durumunu belirtir ve değeri hacimsel eklem sayısına (J_v) bağlı olarak aşağıda verilen Eşitlik 3.1'den hesaplanabilmektedir (Ulusay ve Sonmez, 2002).

$$SR = -17,5 \ln J_v + 79,8 \quad (3.1)$$

Hacimsel eklem sayısının (J_v) belirlenmesi için RQD değerinin kullanıldığı ve Palmström (2005) tarafından önerilen diğer bir eşitlik aşağıda verilmiştir (Eşitlik 3.2).

$$J_v = 44 - 0,4RQD \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de verilen RQD kaya kalite göstergesi olup yüzde (%) olarak ifade edilmektedir. J_v (Hacimsel eklem sayısı (eklem/m^3), homojen ve izotrop kabul edilebilecek kaya kütleleri için aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir (Eşitlik 3.3).

$$J_v = \frac{1}{S_x} \times \frac{1}{S_y} \times \frac{1}{S_z} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3’de görülen, S_x , S_y ve S_z değerleri, x , y , z yönlerindeki ortalama süreksizlik aralığını (m) ifade etmektedir. Kaya kütlelerinde birbirine dik yönde kesen üç hat etüdü yapılmasının çoğu zaman mümkün olmadığını ve ileri derecede eklemli kaya kütlelerinin homojen ve izotrop olduğunu kabul ederek (Ulusay ve Sönmez, 2007), hacimsel eklem sayısını (J_v) belirlemek için aşağıdaki eşitliğin (Eşitlik 3.4) kullanılmasını önermişlerdir.

$$J_v = \left(\frac{1}{S}\right)^3 \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4’de eklemlerin sayısı dikkate alınmadığından, verilen bu eşitliklerden belirlenecek olan hacimsel eklem sayısı (J_v) değerleri olması gerekenden daha yüksek değerlerde hesaplanabilir. Bu sınırlamanın giderilebilmesi amacıyla, Sönmez ve Ulusay (2002) aşağıda verilen eşitliği önermişlerdir (Eşitlik 3.5).

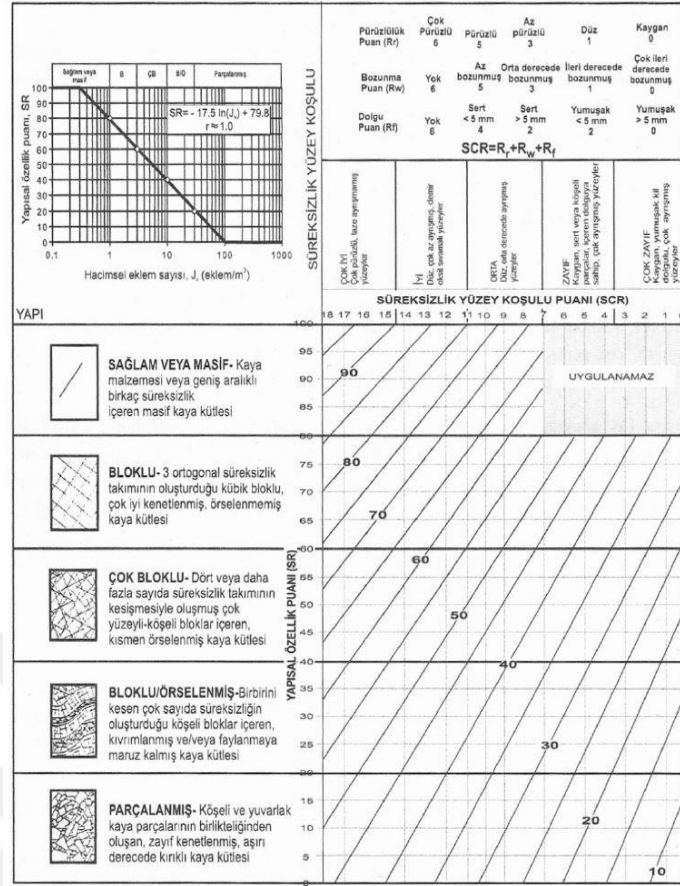
$$J_v = D_n \left(\frac{1}{S}\right)^3 \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5’de karşılaşılan D_n değeri, sık çatlaklı kaya kütlelerindeki, münferit kaya parçalarının yüzey sayısını ifade etmektedir.

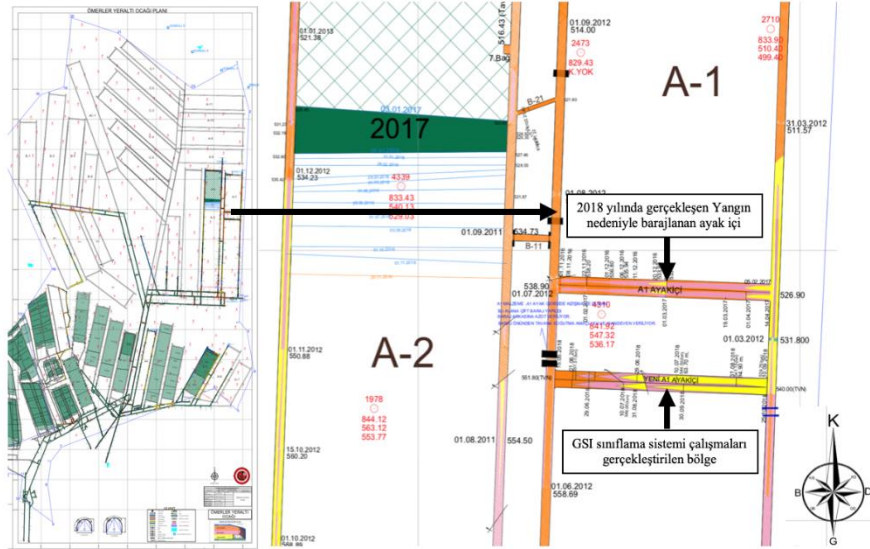
GSI sınıflama yöntemindeki ikinci temel parametre olan Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR); süreksizliklerin pürüzlülük (R_r), bozunma (R_w) ve dolgu (R_f) puanları toplamı şeklinde tanımlanmaktadır (Eşitlik 3.6) ve süreksizlik özelliklerine göre; R_r , R_w ve R_f puanları Şekil 3.30’da sunulan kantitatif GSI abağının sağ üst kısmında yer almaktadır (Ulusay ve Sönmez, 2007).

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (3.6)$$

Doktora tez çalışmalarının gerçekleştirildiği Ömerler yeraltı maden ocağında, A1 pano kılavuz galerisinde 2018 yılında bir yangın gerçekleşmiştir. Ocak yetkilileri ve mühendisler, bu dönemde mevcut hazırlık galerisini barajlayarak, yaklaşık 40 metre ileride yeni bir kılavuz galerisi sürme işlemini başlatmışlardır. Aynı dönemde gerçekleştirilen GSI sınıflama çalışmaları, yeni açılan ve hâlihazırda bakir halde bulunan kazı yüzeyleri üzerinde A1 kılavuz galerisi içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.30. Niceliksel GSI sınıflama sistemi abağı (Ulusay ve Sönmez, 2007)



Şekil 3.31. Ömerler yeraltı kömür madeninde gerçekleştirilen GSI sınıflama çalışmaları lokasyonu

A1 kılavuz galerisi içerisinde yaklaşık 10 m genişliğinde ve 3.5 m yüksekliğinde sekiz bölge belirlenmiştir. Belirlenen bu sekiz bölgede kaya kütle sınıflama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde seçilen her bir bölgedeki kömür aynasında,

süreksizlik yüzey koşulları (SCR) ve yapısal özellik (SR) belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.32).

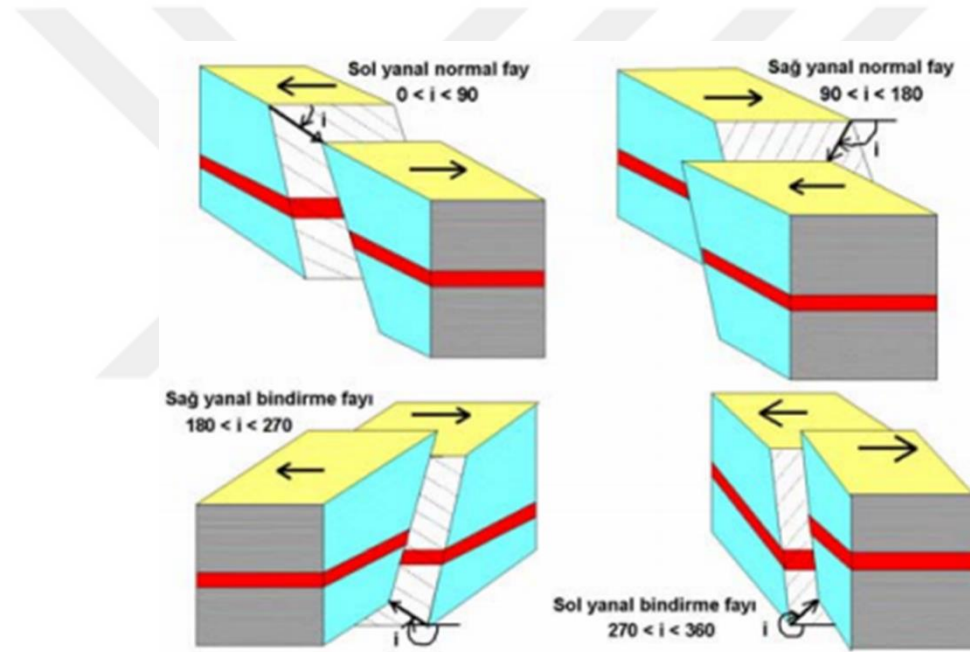


Şekil 3.32. Ömerler yeraltı kömür madeni A1 pano yeni ayak içinde gerçekleştirilen GSI sınıflama çalışmaları

3.3.8. Birincil arazi gerilmeleri belirleme çalışmaları

Birincil arazi gerilmeleri, kaya kütlesi içerisinde mühendislik uygulamaları gerçekleştirilmeden önce var olan gerilmelerdir. Birincil gerilmeler, 3 boyutlu olarak farklı doğrultularda asal birleşenlerine ayrılmaktadırlar. Asal birincil gerilme büyüklükleri ve doğrultularına bağlı olarak mühendislik tasarımları yapılmaktadır.

Tasarım çalışmalarının nümerik analizlerde gerçek durumu en iyi şekilde ifade edilmesi amacı ile yerinde birincil arazi gerilmelerini belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar Aydan'ın (2000) önerdiği fay çizizi yaklaşımını esas olarak gerçekleştirilmiştir. Aydan'ın önerdiği bu yaklaşımın temelini oluşturan fay çiziklerinin tanımı ve ölçüm mantığı Şekil 3.33'te belirtilmiştir (Aydan, 2000).

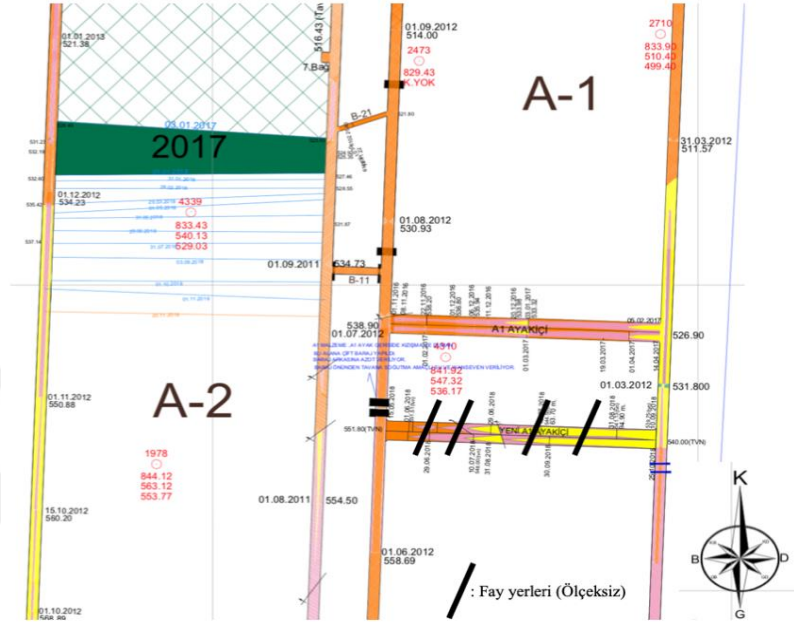


Şekil 3.33. Fay çiziklerinin tanımı ve ölçümü (Aydan, 2000)

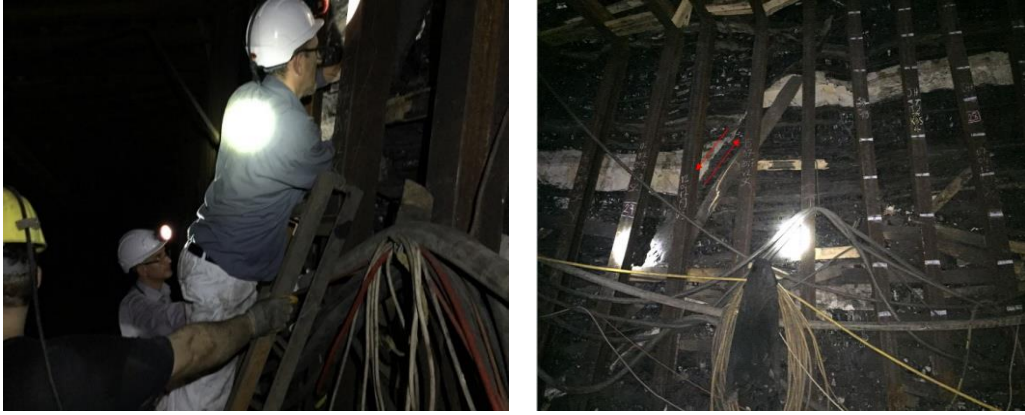
Doktora tez çalışması, bir TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmektedir. Proje ekibi ile birlikte gerçekleştirilen birincil arazi gerilmeleri belirleme çalışmaları, A1 panosu kılavuz galerisi içerisinde birincil gerilme yönlerini ve büyüklüklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda öncelikle, Şekil 3.34'te belirtilen A1 panosu ayak arınında mevcut fay lokasyonları belirlenmiştir.

A1 uzunayak panosu ayak içerisinde belirlenen her bir fayın doğrultusu, yatım yönü, yatım açısı, atım miktarı ve fay yüzeyindeki fay çiziklerinin konumları kayıt altına alındıktan sonra proje araştırmacılarından Prof. Dr. Melih Geniş, Bülent Ecevit

Üniversitesi-Maden Mühendisliği Bölümü'nde birincil gerilme alanını belirlemeye yönelik analizler gerçekleştirmişler (Şekil 3.35).



Şekil 3.34. A1 panosu kılavuz galerisi içinde arın yönünde incelenen fay lokasyonları



Şekil 3.35. A1 panosu kılavuz galerisi içinde tespit edilen faylar ve konumları

3.3.9. Kömür bloklarından laboratuvar deney örneklerinin hazırlanması

TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür madeni ocağında gerçekleştirilen blok alma çalışmalarında, A1 ve A2 panolarından elde edilen kömür bloklarından kaya mekaniği deneylerini gerçekleştirmek üzere karotiyer ve kesme makinasından ISRM standartlarına uygun örnek alma çalışmaları yapılmıştır.

Yeraltı sondaj çalışmaları ile karot elde etme çalışmalarında yaşanan sorunlar, laboratuvar ortamında blok sandıklarından silindirik örnek alma çalışmalarında da yaşanmıştır. Özellikle karot çapı 54.7 mm (NX) ve 42 mm (BX) olan silindirik bir örnek blok sandıklarından temin edilememiştir. Bunun nedeni, kömür içerisinde bulunan ince kil tabakaları, suyun etkisi ile ayrılmış ve kömür tabakalar halinde bölündüğü için karot alma olanaksız olmuştur. İşlem esnasında kullanılan suyun kömür bloğunun üzerinde bloğun her tarafına aktığı bunun da kömür tabakalarının ayrılmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Su kullanılmaksızın yapılan karot alma çalışmalarında ise karot ucu ilerleyememiş, karot ucunda biriken kesintiler uzaklaştırılamamıştır. Bu çalışmalara ait tipik görüntüler Şekil 3.36'da sunulmuştur.



Şekil 3.36. Kömür bloğundan laboratuvar ortamında karot alma çalışmaları

Karot alma işleminde yaşanan bu başarısızlıktan dolayı birtakım çözümler geliştirilmeye çalışılmıştır. Öncelikle Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yer alan birbirinden farklı tiplerde ve çaplardaki tüm karotiyerler ile karot alma çalışmaları yapılmıştır. Ancak yine karot özelliği taşınan bir numune alınamamıştır (Şekil 3.37).

Bir diğer çözüm yöntemi olarak sandık içerisinde kömür bloğundaki karot alma esnasında oluşan titreşimleri azaltmak aynı zamanda karot alma çalışmalarında kullanılan suyun kömür bloğunun diğer kısımlarına gitmesini önlemek amacıyla kömür bloğunun etrafı agrega ve çimentodan oluşan beton ile kaplanmıştır (Şekil 3.37b). Bu şekilde hazırlanan kömür bloğunda yapılan çalışmalar neticesinde ise su kömür bloğunun her tarafına yayılamamış ancak su karotiyerin içerisine hapis olmuştur. Bunun üzerine su

miktarı azaltılmış ancak karot ucunda biriken kırıntılar uzaklaştırılamamış, karot ucu soğutulamamış ve netice itibarı ile ilerleme sağlanamamıştır (Sekil 3.37c).

Karot alma işleminde başarılı olmak amacıyla farklı çözüm yöntemlerine başvurulmuştur. Bu yöntemler arasında, blokları suya doygun hale getirerek karot alma çalışması ve basınçlı hava ile karot elde etme denemeleri de olumsuz sonuçlanmıştır (Şekil 3.38). Son olarak, bu konuda uzman ve gerekli teknolojiye sahip özel firmalara başvurulmuştur. Bu amaçla bazı blok sandıkları bu firmalara taşınmıştır. Ancak bu firmalarında yapmış olduğu karot elde etme çalışmaları başarısız olmuştur.



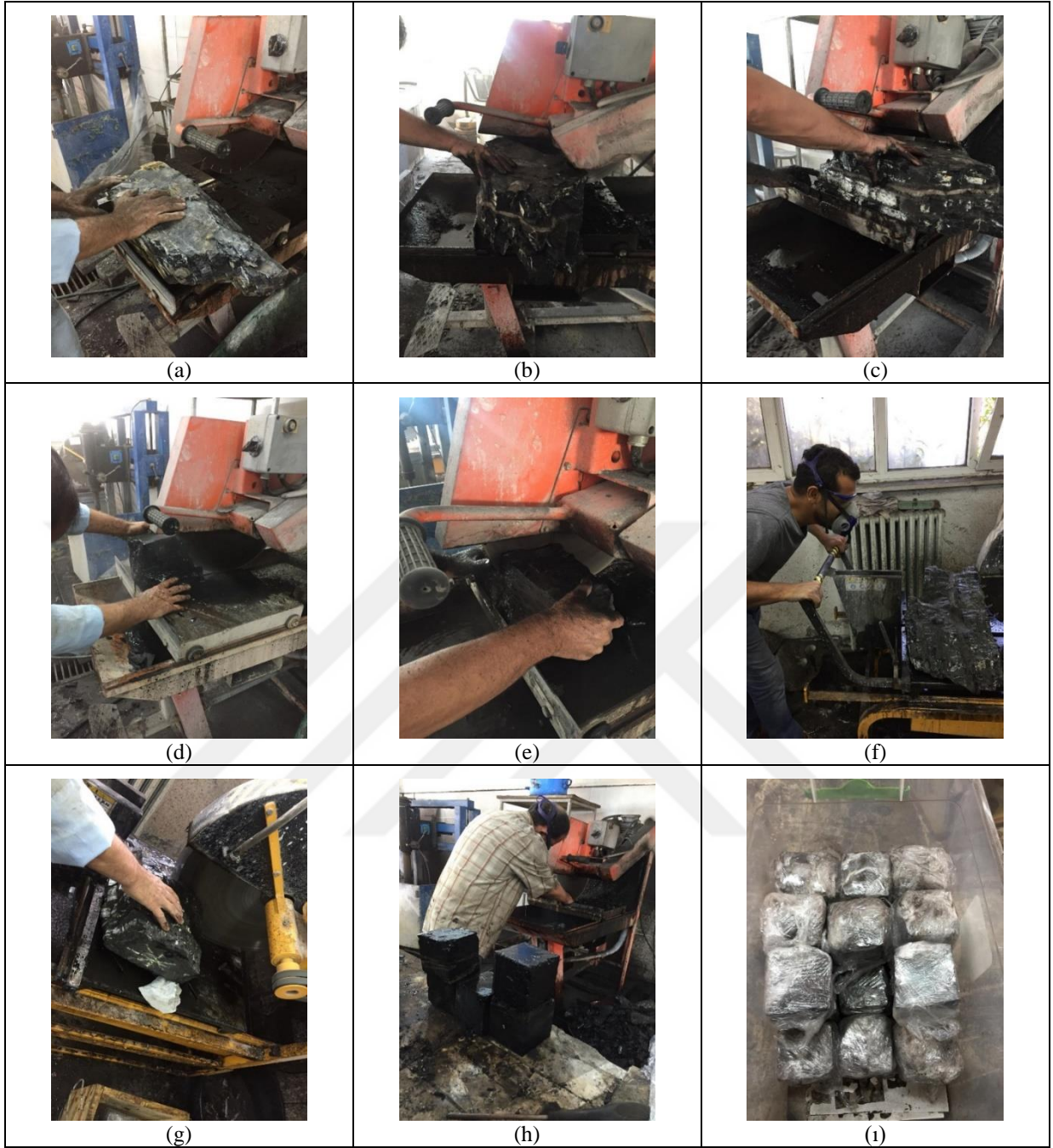
Şekil 3.37. Kömür bloğundan laboratuvar ortamında karot alma çalışmalarında karşılaşılan zorluklar

Yapılan tüm silindirik karot alma çalışmaları neticesinde A1 ve A2 pano ayak içinden temin edilen 50 adet blok sandığından 16 adedi bu amaç ile kullanılmıştır. Kalan bloklardan kesme makinası yardımı ile küp şeklinde, disk şeklinde ve küre şeklinde numune alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.39).

Yapılan bu çalışmalar neticesinde, A1 panosundan toplam 53 adet örnek (10 adet disk numune, 4 adet 5 cm'lik küp numune ve 19 adet 7 cm'lik küp numune, 20 adet küre şekilli numune), A2 panosundan toplam 64 adet örnek (16 adet 5 cm'lik küp numune ve 28 adet 7 cm'lik küp numune, 20 adet küre şekilli numune) hazırlanabilmektedir. Toplamda 117 adet örnek hazırlanabilmiş, deney öncesi dikkatlice streç film ile korumaya alınmış olup deneyler ise hemen gerçekleştirilmiştir. Kömür malzemesinin sahip olduğu zayıf karakterden dolayı ortaya çıkan tüm zorluklara karşı örnek hazırlama çalışmalarından ancak bu seviyede bir başarı sağlanabilmektedir.



Şekil 3.38. Kömür bloğundan laboratuvar ortamında karot alma çalışmalarında karşılaşılan zorluklar



Şekil 3.39. Kömür bloğundan laboratuvar ortamında örnek hazırlama çalışmaları (a,b,c,d,e,f,g; Büyük kömür bloklarının kesilmesi işlemleri, h,i; Deneyler için hazırlanan küp şeklinde örnekler)

Elde edilen bu numuneler üzerinde aşağıda sıralanan kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir.

- Fiziksel özellikleri belirlemeye yönelik deneyler (yoğunluk-birim hacim ağırlık, gözeneklilik tayini, doğal nem içeriğini belirleme, ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri).
- Suda dağılma dayanımı deneyleri
- Nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri

- Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı deneyleri
- Tek eksenli basma dayanımı deneyleri
- Tek eksenli deformabilite özellikleri belirleme deneyleri
- Direkt makaslama dayanımı deneyleri

Belirtilen bu deneysel çalışmalara ait detaylı bilgiler takip eden başlıklarda sunulmaktadır.

3.3.10. Kaya malzemesinin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler

Kaya mekaniğinde, kaya malzemesinin fiziksel özellikleri (parametreler) denilince, özgül ağırlığı, yoğunluğu, birim hacim ağırlığı, gözenekliliği, geçirgenliği gibi özellikler ve içerdiği su içeriğine bağlı olarak bu özelliklerden bazılarındaki değişimler akla gelmektedir. Doktora tez çalışması kapsamında, çalışma sahası olan Ömerler yeraltı kömür galerisinden alınan kömür bloklarından elde edilen örnekler üzerinde fiziksel özellik belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, geometrisi düzgün hazırlanan küp şekilli örnekler (Şekil 3.40) kömür malzemesinin yoğunluk-birim hacim ağırlık, su içeriği ve gözenek yapısı belirlemek amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.40. Yoğunluk-Birim hacim ağırlık, gözeneklilik (boşluk oranı) tayini, Ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri için hazırlanan örnekler

3.3.11. Suda dağılma dayanımı belirleme deneyleri

Suda dağılma dayanımı deneyi, kayaçların oluşum süreçleri ile aşınma, oksidasyon, çözünme gibi önemli mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Genellikle zayıf ve kil içeren kaya birimleri üzerinde yapılan bu deneyde, numunelerin iki standart ıslanma kuruma devrine tabi tutulması durumunda, zayıflama ve ayrılıp suda dağılmaya karşı gösterdiği duraylılık belirlenmektedir.

Doktora tez çalışmaları kapsamında, kömür bloklarından elde edilen numuneler, Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği'nin (ISRM (1981, 2007)) öngördüğü standartlar doğrultusunda her biri 40-60 gr arasında 10'ar adet küresel olacak şekilde toplamda 4 set hazırlanmıştır. (Şekil 3.41). Normal çeşme su ortamında 2 çevrim ile ağırlıkça malzeme kayıpları belirlenerek yüzde cinsinden (%) I_{d1} ve I_{d2} değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.41. Suda dağılma dayanımı belirleme deneyleri için hazırlanan örnekler ve deneylerin yapılışı

3.3.12. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı belirleme deneyleri

Çekme dayanımı, kayaçların mekanik özelliklerinden birisidir. Birçok kayaç; birisi çekme asal gerilmesi, diğeri basma asal gerilmesi olan iki eksenli gerilme alanı içerisinde, tek eksenli basma kuvveti ve çekme sonucu yenilmektedir. Çekme dayanımı değeri kaya mühendisliğinde bazı tasarım problemlerinde de girdi olarak kullanılmaktadır. Deney yuvarlak disk şeklindeki numuneler üzerine düşey yönde basma kuvveti uygulandığında, numunenin yatay yönde oluşan çekme kuvveti neticesinde kırılması esasına dayanır.

Kayaçların çekme dayanımını belirlemek için uygulamada “Direkt Çekme” ve “Endirekt Çekme (Brazilian)” olarak tanımlanan iki deney yöntemi bulunmaktadır. Direkt çekme deneyinin uygulanmasındaki bazı zorluklardan dolayı daha çok endirekt çekme deneyi tercih edilmektedir.

Ömerler yeraltı kömür madeninden alınan kömür bloklarından ISRM (1981, 2007) önerisi doğrultusunda hazırlanan silindir disk örnekleri Şekil 3.42’de belirtilmiştir. Deneylerde, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi (İLTEK) laboratuvarında bulunan Servo Kontrollü 600 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme hızı 200 N/sn seçilmiştir (ISRM 1981, 2007).



Şekil 3.42. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deneylerin yapılışı

3.3.13. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri

Tek eksenli basma dayanımı, bir kayaç örneğinin tek bir doğrultuda karşı koyabileceği maksimum basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Tasarımlarda en çok kullanılan mekanik büyüklük olan tek eksenli basınç dayanımı değeri, diğer mekanik büyüklüklerin tahmininde de kullanılabilir.

Deneyin genel amacı, kaya malzemelerinin üzerlerine uygulanan belirli bir basınç altında kırılmadan önce ne kadar yüke dayandığını belirlemektir. ISRM standardında tek eksenli basınç dayanımı deneyi genellikle boy/çap (L/D) oranı: 2.5-3.0 olan NX çaplı (54.7 mm) silindirik karot numuneleri ile yapılmaktadır. Özellikle zayıf ve kil içerikli kayaç birimlerinden silindirik karot almak zor olmaktadır. Bu durumda tek eksenli basma dayanımı deneyleri için kübik numuneler de tercih edilmektedir.

Belirtilen bu amaç doğrultusunda kömür bloklarından hazırlanan küp örnekleri Şekil 3.43'de sunulmuştur. Deneylerde Selçuk Üniversitesi'ne bağlı İLTEK (İleri Teknoloji Merkezi) laboratuvarında bulunan Servo Kontrollü 600 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme hızı 0,5-1 MPa/sn aralığından seçilmiştir (ISRM 1981, 2007).



Şekil 3.43. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deneylerin yapılışı

3.3.14. Tek eksenli deformabilite özelliklerini belirleme deneyleri

Kayaçalarda deformasyon, gerilme altında deformasyonları kontrol eden elastik parametrelere bağlıdır. Elastik parametreler arasında, elastisite modülü ve Poisson oranı,

kaya yapılarının tasarımında kullanılan görgül ve nümerik analizlerde girdi parametresi olarak önemli bir yere sahiptir. Laboratuvar koşullarında bu parametrelere ulaşmak amacıyla kaya malzemeleri üzerinde tek eksenli deformabilite deneyi uygulanmaktadır.

Bu deney, silindirik şekilli sağlam kayaç karot örneklerinin tek eksenli yükleme koşullarında gerilme-birim deformasyon özelliklerinin, elastisite modülünün ve Poisson oranının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır.

Doktora tez çalışmaları kapsamında, yeraltı sondaj çalışmalarında ve blok sandıklarından silindirik numune elde edilemediğinden, bu deney küp şekilli numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. ISRM (1981, 2007) önerisi doğrultusunda hazırlanan küp örnekleri Şekil 3.44’ de sunulmuştur.



Şekil 3.44. Tek eksenli deformabilite deneyleri için hazırlanan örnekler ve deneylerin yapılışı.

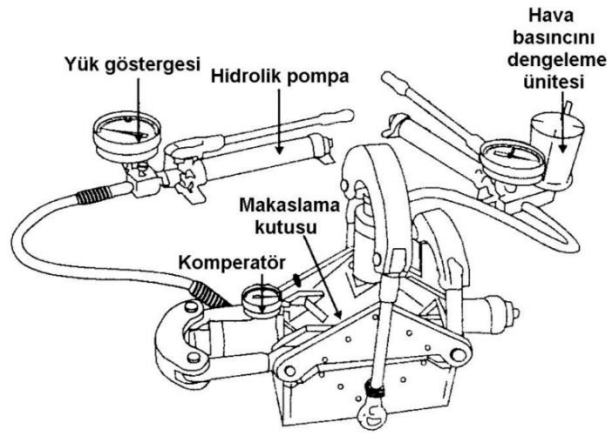
Tek eksenli deformabilite deneylerinde 2000 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Deney esnasında 0,001 mm hassasiyetli LVDT (Linear Variable Differential Transformer - Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü)’ler ve 100 ton

kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Yükleme hızı 0.5-1 MPa/sn aralığından seçilmiştir (ISRM 1981, 2007).

3.3.15. Direkt makaslama dayanımı deneyleri

Bu deney kaya malzemesinin bir düzlem boyunca kırılmasına neden olan kesme gerilmesinin, düzleme etkiyen normal gerilmenin bir fonksiyonu olarak belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Dayanımı incelenen düzlem, herhangi bir zayıflık düzlemi (eklem, dolgulu eklem, tabakalaşma düzlemi, vb.) olabileceği gibi, kusursuz laboratuvar örneğinin herhangi bir düzlemi de olabilir. Deneyde kesme kutusu adı verilen ekipman kullanılmaktadır (Şekil 3.45). Kesme dayanımı belirlenecek her bir yüzey için, en az 5 adet deney yapılmalı ve her örnek birbirinden farklı sabit normal gerilme altında deneye tabi tutulmalıdır.

Deney, hazırlık, pekiştirme ve makaslama aşaması olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Deney sonucunda elde edilen normal gerilme-kesme gerilmesi grafiğinde en yüksek (peak) ve kalıcı (residual) kesme dayanım zarfları belirlenmektedir. Bu grafik yardımıyla deneyi yapılan kaya birimine ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi mekanik parametrelere ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.45. Taşınabilir makaslama deney düzeneği

Doktora tez çalışmaları kapsamında, direkt kesme dayanımını gerçekleştirmek amacıyla, Ömerler yeraltı kömür madeninden alınan kömür bloklarından, bir kenarı en az 50mm olacak şekilde küp örnekler hazırlanmıştır. Süreksizlik yüzeyini içeren örnekler deney örneği hazırlama kaplarına sığacak şekilde alttan ve üstten kesilmiştir. Örnek hazırlama kalıplarının içerisine numuneyi sabitlemeye yarayan bağlayıcı malzemeler

(çimento, donmayı hızlandırıcı kimyasal ve su) dökülmüştür. Yaklaşık 50 mm kenar uzunluklarına sahip 5 adet linyit örneği bölüm laboratuvarında direkt makaslama deneyine tabi tutulmuştur. Deneylerde taşınabilir makaslama kutusu düzeneği kullanılmıştır. Düşey ve yanal yönlerdeki yer değiştirmelerin ölçülmesi için 0.1 mm duyarlılıkta okuma yapabilen komparatörler kullanılmıştır. Ayrıca yanal ve düşey yönde kuvvet uygulanabilmesi amacıyla iki adet hidrolik pompa kullanılmıştır (Şekil 3.46).



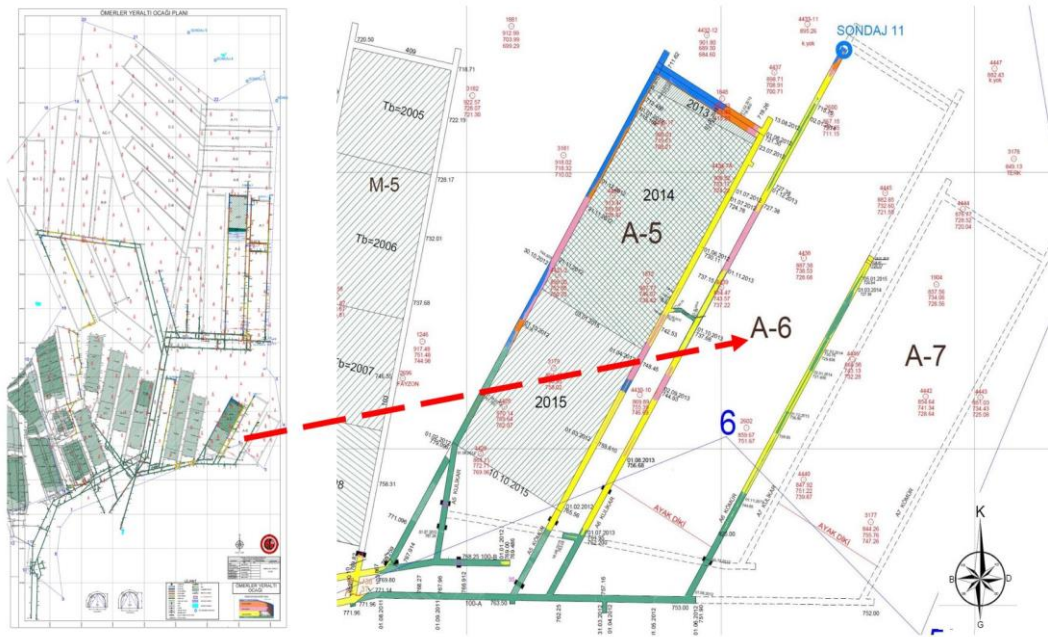
Şekil 3.46. Direkt makaslama dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney ve deneylerin yapılışı (a; Harç malzemesinin hazırlanışı, b; Harç malzemesinin kuruması için bekletilen hazne, c; Deney için hazırlanan örnekler, d; Örneğin üst ve alt yüzeyinin görünüşü, e,f; Deney görüntüleri)

3.4. Kaya Saplaması Tahkimat Sistemi Ön Tasarım Çalışmaları

Saha ve laboratuvar çalışmalarıyla elde edilen kaya kütle ve malzeme özellikleri yardımıyla, Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosu için kaya saplaması tahkimat sistemi ön tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Ön tasarım çalışmalarında, kaya saplama için literatürde önerilen görgül tasarım yaklaşımları kullanılmıştır. Bu yaklaşımların değerlendirilmesi ile elde edilen bütün tasarım çıktıları Phase 2 programında Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosu için analiz edilmiştir.

Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninde, 2019 yılı Mart ayı itibarı ile A6 uzunayak panosunda galeri açma işlemleri başlatılmıştır. Bu nedenle, ön tasarım çalışmalarında ocağa ait A6 uzunayak panosu dikkate alınmıştır. Kaya saplaması tahkimat tasarım çalışmaları yapılan A6 uzunayak panosunun işletme haritası üzerindeki konumu Şekil 3.47’de belirtilmiştir.



Şekil 3.47. Kaya saplaması tahkimat tasarım çalışmalarında dikkate alınan A6 panosunun ocak planındaki görüntüsü

Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocaklarında açılan galeriler at nalı kesindedir. Ana galerilerde ve taban yollarında kullanılan mevcut tahkimat şekli demir bağ tahkimatıdır.

TKİ-GLİ işletmesi, Ömerler yeraltı ocağında açılacak olan yeni galerilerin trapez kesitte açılmasını planlamaktadır. Bunun nedeni, özellikle üretim panolarında ayak başlarında yer alan tahkimat ünitelerini yürütürken, at nalı kesitin bu tahkimat ünitelerinin rahat bir şekilde yürütülmesine uygun olmamasıdır. İkinci neden ise at nalı galeri kesitine ait faydalı kesit alanının, ocaktaki çalışmalar için tatmin edici olmamasıdır. Bu nedenlerle, Ömerler yeraltı kömür madeni için yapılan kaya saptaması tahkimat sistemi tasarım çalışmaları her iki kesit için gerçekleştirilirken, ön tasarım sonuçlarının 3 boyutlu modellenmesi çalışmaları ise trapez kesitli taban yolları için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.48a'da TKİ-GLİ Ömerler yeraltı kömür maden ocağına ait mevcut galeri kesiti sunulmuştur. Burada belirtilen boyutlara göre galerinin genişliği 4600 mm ve galeri yüksekliği 3970 mm olarak görülmektedir. Buna göre mevcut durumda galeri kesiti 18.26 m² 'dir. Ancak galeri açıklığı cidarında gerçekleşen kapanmalar neticesinde bu galeri kesiti ocağın bazı bölgelerinde yaklaşık 13 m²'lere kadar düşebilmektedir.

Trapez galeri kesiti için boyutlandırma çalışmaları gerçekleştirilirken, işletme yetkililerinin fikirleri alınmış ve mevcut tabanyollarının bazı bölümlerinde açılan trapez kesitteki açıklıkların durumu dikkate alınmıştır. Ayrıca faydalı kesit alanının optimum şekilde genişletilmesi de yeni açılacak olan trapez galeri kesitinin boyutlandırılmasında etken bir parametre olmuştur.

Yeraltı açıklıklarında galeri kesitinin boyutlandırılması işlemlerinde, ocağın optimum bir biçimde havalandırma işlemine tabii tutulması gerektiği aşıkardır. Bu nedenle doktora tez çalışmalarında galeri kesitinin boyutlandırılması çalışmalarında, Ömerler yeraltı maden ocağında, 2017 yılında gerçekleştirilen bir havalandırma projesi dikkate alınmıştır.

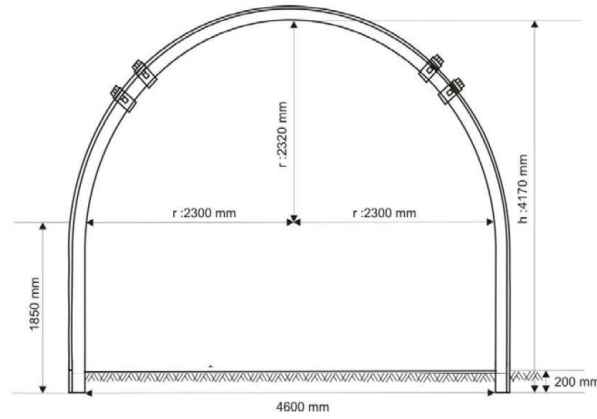
Fişne ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları havalandırma projesinde, Ömerler yeraltı ocağı için gerekli hava hızının, taban yollarında 0.5 m/sn, ayak içinde 1.0 m/sn olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ocak için hesaplanan gerekli hava miktarının 2591 m³/dk olduğunu ve ocağa giren 4040 m³/dk miktarındaki temiz havanın ocak için yeterli olacağı belirtilmiştir. Buna göre tez çalışması kapsamında boyutlandırılan ve Çizelge 3.7'nin en alt satırına eklenen yeni trapez kesitin ocak için gerekli temiz hava miktarı hesabına uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 3.48b'de Ömerler yeraltı madeni taban yolları için, mevcut at nalı kesitten trapez kesite geçişte tasarlanan trapez açıklık boyutları sunulmuştur. Şekil 3.48b'de görüldüğü gibi galeri boşluğuna ait faydalı kesit alanını genişletmek amacıyla galeri genişliği 6000 mm, galeri yüksekliği 4000 mm ve trapez kesit üst genişliği 5000 mm

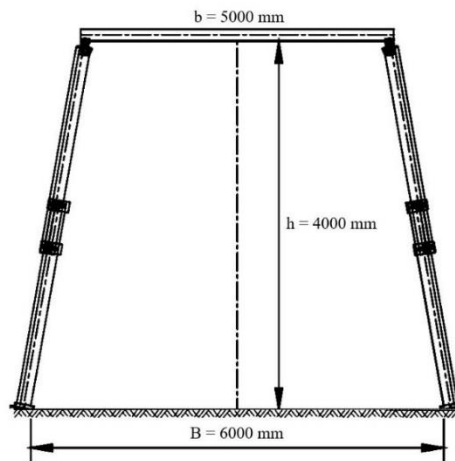
olarak belirlenmiştir. Bu durumda galeri kesiti 22 m^2 olarak hesaplanmıştır. Trapez kesite ait görgül ve nümerik analiz çalışmalarında dikkate alınan açıklık boyutları bu şekilde sunulduğu gibidir (Şekil 3.48b).

Çizelge 3.7. Hava hızı limitlerine göre hava ihtiyaçları (Fişne, 2017)

| Konum | Galeri Kesiti (m^2) | Min. Hava Hızı (m/sn) | Gerekli hava miktarı (m^3/dk) |
|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|
| A1 malzeme galerisi | 16.00 | 1.0 | 870 |
| A1 kömür galerisi | 13.75 | 0.5 | 480 |
| A2 ayakiçi | 14.50 | 0.5 | 413 |
| A6 malzeme galerisi | 13.80 | 0.5 | 414 |
| A6 kömür galerisi | 13.80 | 0.5 | 414 |
| TRAPEZ KESİT | 22.00 | 0.5 | 660 |
| Toplam | | | 3251 |



(a) TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı işletmesine ait mevcut at nalı galeri kesiti boyutları



(b) Kaya saplaması tahkimat tasarım çalışmalarında kullanılan trapez galeri kesitine ait boyutlandırma

Şekil 3.48. Kaya saplaması tahkimat tasarımında kullanılan galeri kesitlerine ait boyutlandırma

3.4.1. Görgül tasarım yaklaşımları ile yapılan ön tasarım çalışmaları

TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür maden ocağına ait kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirleme çalışmalarından sonra elde edilen parametreler ile kaya saplamaları tahkimat tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmaların bir ayağı olan görgül tasarım yaklaşımlarına dayalı kaya saplaması tahkimat tasarımında literatürde karşılaşılan tahkimat tasarım öngörülleri dikkate alınmıştır. Bu öngörüler aşağıda sıralanmıştır.

- Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı
- Panek tasarım yaklaşımı (1964)
- RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (1970, 1972)
- RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı (1973)
- RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1983, 1986)
- RMR sistemine bağlı Vanketaswarlu tasarım yaklaşımı (1986)
- RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (1990)
- Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995)
- RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımı (2013)

Belirtilen bu yaklaşımların hesaplama adımlarına ait detaylı bilgiler Bölüm 2 'de yer alan Kaynak Araştırması başlığı altında sunulmuştur (Bknz. Bölüm 2.5.1). Görgül analiz çalışmalarında yapılan çözümler, Ömerler yeraltı ocağının mevcut at nalı kesitine ve trapez galeri kesiti boyutlarına göre gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Sayısal modelleme çalışmaları ile yapılan ön tasarım çalışmaları

Doktora tez çalışmalarında, TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür galerilerine ait kaya birimlerinin kütle ve malzeme özellikleri belirlenmiş buna bağlı görgül yaklaşımlar ile kaya saplaması tahkimatı ön tasarımları oluşturulmuştur. Bundan sonraki aşamada görgül yaklaşımlardan elde edilen ön tasarım çıktıları, iki boyutta sayısal çözümler yapabilmeye Phase2 programında modellenerek test edilmiştir.

Phase2 programında gerçekleştirilen sayısal modelleme çalışmaları temel olarak 6 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar;

- İki boyutta model geometrisi ve model ağırlığının oluşturulması
- Model davranışı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi

- Modele ait sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi ve modelleme aşamalarının oluşturulması
- Yük dağılımı ve tahkimatın oluşturulması
- Programın çalıştırılması ve son çıktıların elde edilmesi şeklindedir

Bu bölüme ait alt başlıklarda, Phase2 programında modeli oluşturan bu aşamalar gerçekleştirilirken, izlenen yol ve uygulanan yöntemler belirtilmiştir.

3.4.2.1. İki boyutlu model geometrisi ve model ağının oluşturulması

Kaya saplaması tahkimatı ön tasarım çalışmalarında kullanılan Phase2 programında, Ömerler yeraltı madeni A6 uzunayak panosuna ait model geometrisi ve ağı oluşturulurken aşağıda sunulan aşamalar gerçekleştirilmiştir.

1. Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosunda ayak uzunluğu 90 metredir. Bu nedenle iki boyutlu model geometrisi oluşturulurken ayak uzunluğu +x yönüne 90 metre olarak tanımlanmıştır.
2. A6 uzunayak panosunun yüzeyden derinliği yaklaşık olarak 160 metredir. Panonun altında yer alan taban taşı birimi ile birlikte, iki boyutlu geometride ikinci boyut yani derinlik -y yönünde 200 metre alınmıştır.
3. İşletmeye ait imalat haritası dikkate alındığında (Şekil 3.47) A6 uzunayak panosunun hemen yanlarında yer alan A5 ve A7 uzunayak panoları görülmektedir. A6 uzunayak panosunun doğusunda yer alan A7 uzunayak panosu henüz bakir durumdadır. A6 panosunun batısında yer alan A5 panosu ise önceki yıllarda üretimi tamamlanmış göçük halinde bir panodur. Modele ait geometri oluşturulurken bu panolar da modele tanımlanmıştır. Ömerler yeraltı kömür madeninde panolar arasında yaklaşık 20 metrelik topuk bırakıldığından model geometrisinde de panolar arasında 20 metrelik topuk tanımlanmıştır. Böylelikle, model geometrisinin +x yönündeki sınırı 300 metre olarak belirlenmiştir.
4. Modelde, üretimi tamamlanmış olan ve göçük durumunda olan A5 panonun üzerinde 22.5 metre yüksekliğinde bir yalancı tavan tabakası tanımlanmıştır. Yalancı tavan yüksekliği belirlenirken Konak'ın (1995) Ömerler yeraltı kömür madeninde daha önce yapmış olduğu çalışmanın sonucunda önerdiği Eşitlik 3.7 dikkate alınmıştır (Konak, 1995). Buna göre yalancı tavan yüksekliğinin belirlendiğini hesaplama adımı aşağıda sunulmuştur.

$$h_{im} = \frac{m(1-v)[s(\gamma_1 - \gamma_2) + \gamma_2]}{(K-1)(1-s)\gamma_2} - \frac{mv(K_c-1)}{(K-1)} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7’de verilen ifadelerle ait açıklama aşağıda verilmiştir.

h_{im} : Yalancı tavan yüksekliği, m

m : Maksimum damar kalınlığı (11 m)

v : Kömür kaybı (%20 kabul edilmiştir)

s : Kömüre taş karışımı (%15 kabul edilmiştir)

γ_1 : Kömür yoğunluğu (1.26 ton/m³)

γ_2 : Tavan taşı yoğunluğu (2.2 ton/m³)

K : Tavan taşı kabarma faktörü (1.4)

K_c : Kömür kabarma faktörü (1.3)

Bu durumda yalancı tavan yüksekliği;

$$h = \frac{11(1-0.2)[0.15(1.26-2.2)+2.2]}{(1.4-1)(1-0.15) \times 2.2} - \frac{11 \times 0.2(1.3-1)}{(1.4-1)}$$

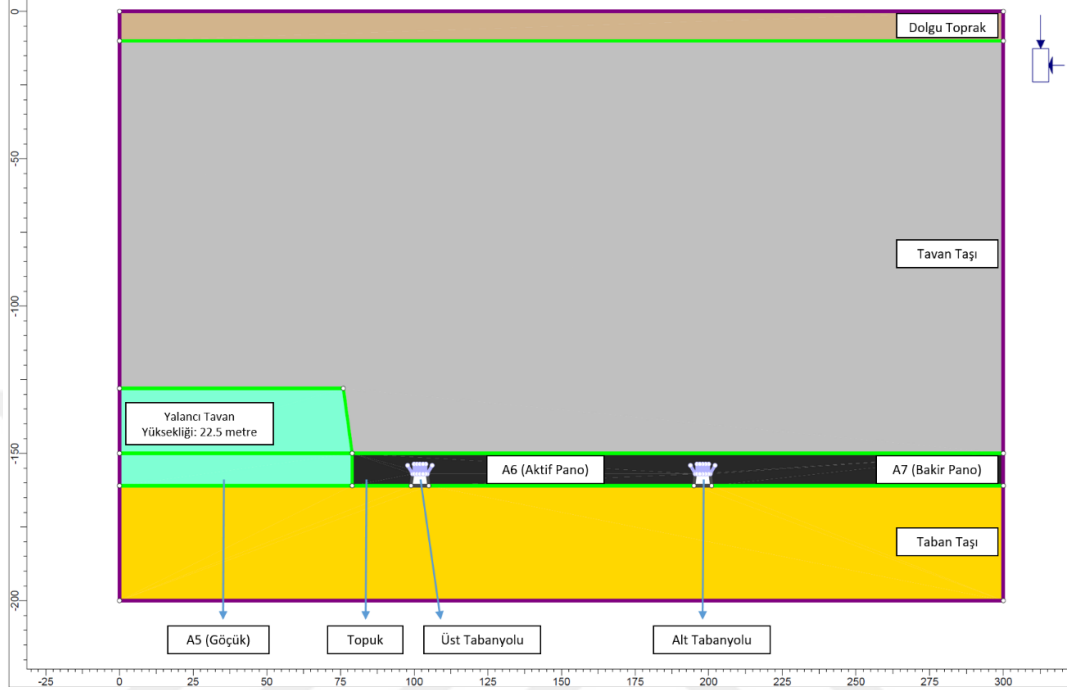
$h = 22.5$ metre olarak hesaplanmıştır.

5. Ömerler yeraltı kömür madeninde taban yolları ve ana nakliye galerileri at nalı kesitinde açılmaktadır. Kaya saplamaları tahkimatı ön tasarım çalışmalarında iki boyutlu ortamda yapılan analizler mevcut at nalı kesit için boyutları belirtilen trapez kesit için gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.48). Bu nedenle model geometrisi oluşturulurken galeri kesitleri hem at nalı kesit hem de trapez kesitte tanımlanmıştır.
6. Modele ağı oluşturulurken üçgen şekilli elemanlar kullanılmıştır. Modelde 24365 eleman ve 12461 düğüm noktası bulunmaktadır. Model geometrisine ait yukarıda bahsedilen parametrelerin Phase2 programındaki gösterimi Şekil 3.49’da belirtilmiştir.

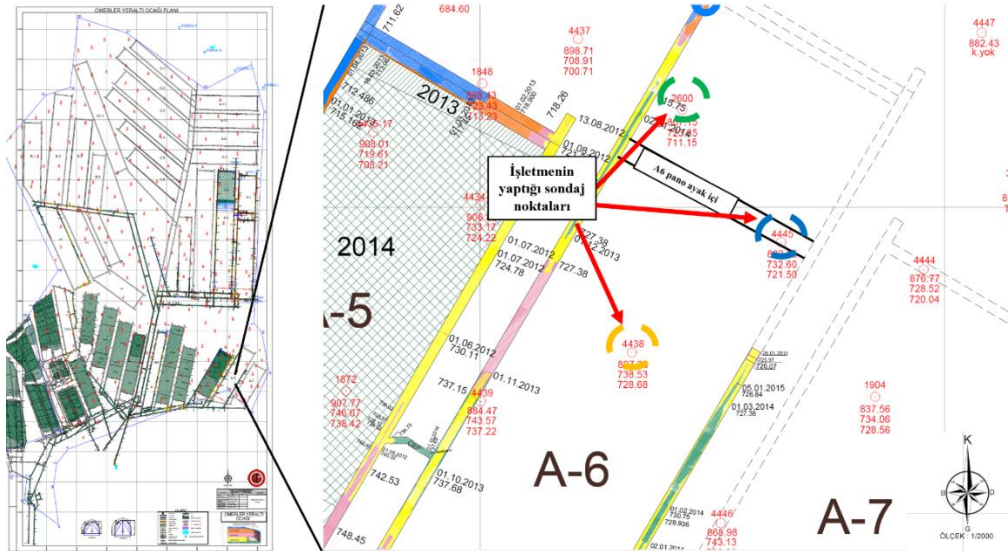
3.4.2.2. Model davranışı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Ömerler yeraltı kömür madenine ait A6 uzunayak panosu modellenirken kayaç katmanlarına ait kalınlıklar, TKİ-GLİ’nin 2012 yılında ocak bütününde yaptığı yeraltı karotlu sondaj çalışmalarına ait sondaj logları yardımı ile belirlenmiştir. İşletmenin

yaptığı bu sondajlar arasında A6 uzunayak panosunun üzerinde yapılan ve panoyu temsil eden 2600, 4438 ve 4445 numaralı sondajlarının konumu Şekil 3.50’de belirtilmiştir.



Şekil 3.49. A6 uzunayak panosunun ait geometrinin Phase2 programındaki görüntüsü



Şekil 3.50. Modelde tanımlanan A6 uzunayak panosunun konumu ve TKİ-GLİ'nin 2012 yaptığı yeraltı sondajlarının konumları

Modele tanımlanan A6 uzunayak panosunun konumuna en yakın olan sondaj, 4445 numaralı sondajdır (Şekil 3.50). Bu nedenle geometride tanımlanan tabakalar 4445

nolu sondajdan alınan litolojik bilgilere göre tanımlanmıştır. A6 uzunayak panosunu temsil eden ve bu bölgede yapılmış olan bu sondaj çalışmasından elde edilen litolojik bilgiler Şekil 3.51’de belirtilmiştir.

| DERİNLİK (M) | KALINLIK (M) | LİTOLOJİ 01:50 | AÇIKLAMALAR | KİMYASAL ANALİZ SONUÇLARI | | | | | ALT İSİ DEĞERİ K.Cal/Kg | |
|-------------------|-------------------|-------------------------|---|---------------------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|----------|-------------------------------|------|
| | | | | SU | KÜL | Uçucu md. | Top. Kükürt | Yogunluk | | |
| | 10,00 | | Harman Dolgu Toprağı | | | | | | | |
| | 39,00 | | Kireçtaşı Kilitaşı ardalanması(M3) | | | | | | | |
| | 6,00 | | Dolarit | | | | | | | |
| | 8,00 | | Dolarit etkileşimli marn | | | | | | | |
| | 87,25 | | Marn, yer yer kilitaşı silttaşı kumtaşı banlı (M2) | | | | | | | |
| | 150,25 | | | | | | | | | |
| | 155,10 | 4,85 | Azkirli Linyit | 13,65 | 26,81 | 36,66 | 1,14 | 1,13 | 4465 | |
| | 155,25 | 0,15 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 155,47 | 0,22 | Azkirli Linyit | 14,60 | 26,55 | 36,47 | 0,86 | 1,10 | 4490 | |
| | 155,60 | 0,13 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 155,77 | 0,17 | Cokkirli Linyit | 13,35 | 45,44 | 30,82 | 0,88 | 1,54 | 3090 | |
| | 155,89 | 0,12 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 156,60 | 0,71 | Ortakirli Linyit | 13,85 | 30,11 | 34,79 | 1,30 | 1,18 | 4240 | |
| | 156,72 | 0,12 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 156,77 | 0,05 | Cokkirli Linyit | 12,70 | 59,77 | 24,79 | 0,94 | 1,57 | 2235 | |
| | 156,84 | 0,07 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 156,90 | 0,06 | Cokkirli Linyit | 12,65 | 59,23 | 23,74 | 1,07 | 1,55 | 2253 | |
| | 157,04 | 0,14 | Ortakirli Linyit | 12,40 | 39,98 | 34,52 | 1,48 | 1,45 | 3693 | |
| | 157,56 | 0,52 | Kil | | | | | | | |
| | 158,67 | 1,11 | Ortakirli Linyit | 13,90 | 33,24 | 35,49 | 1,24 | 1,43 | 4074 | |
| | 158,86 | 0,19 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 159,63 | 0,77 | Kil | | | | | | | |
| | 159,79 | 0,16 | Ortakirli Linyit | 12,75 | 32,11 | 34,65 | 1,56 | 1,35 | 4221 | |
| | 160,03 | 0,24 | Siyah kil | | | | | | | |
| | 161,35 | 1,32 | Ortakirli Linyit | 13,25 | 32,39 | 34,08 | 1,84 | 1,37 | 4192 | |
| | | | | 721,50 | 13,61 | 29,80 | 35,63 | 1,27 | | 4286 |
| | 13,65 | | Kilitaşı | | | | | | | |
| | 175,00 | | | | | | | | | |
| SONDAJ NUMARASI | | K O O R D İ N A T L A R | | Kuyu yeri | : Ö-A-6 Pano | | Su Kaçağı: Yok | | | |
| 4445 | | Y : | 454 330.05 | Tarih | 01.11.2012-10.11.2012 | | | | | |
| | | X : | 4 395 385.08 | Derinliği | : 175,00 | | Karotlu İlerleme:(150.35-175.00) | | | |
| | | Z : | 882,85 | TUNÇBİLEK- KÜTAHYA | | | | | | |

Şekil 3.51. TKİ-GLİ İşletmesinden alınan A6 panosuna ait işletmenin yaptığı 4445 numaralı sondaja ait litolojik bilgiler

Şekil 3.51 dikkate alınarak, modelde yeralan tabakalar, yeryüzünden yeraltına doğru 10 metrelik bir bölüm dolgu toprak malzemesi, 140 metrelik bölüm tavantaşı (marn

yer yer kumtaşı silttaşı bantlı formasyon ile kireçtaşı kiltası ardalanması formasyonları) 11 metrelik kömür damarı ve 39 metrelik tabantaşı (kiltası) olarak gruplandırılmıştır.

Belirlenen bu model gruplarına ait saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen malzeme özellikleri modele tanımlanırken, kaya malzeme parametreleri RocLab (RocScience, 2002) programı kullanılarak kaya kütle özelliklerine dönüştürülmüştür. Modelde tabakaların mekanik davranışı Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ile tanımlanmıştır.

3.4.2.3. Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi ve modelleme aşamaları

Modele ait sınır koşulları belirlenirken, modelin sınırları, kazı ile oluşacak olan ikincil gerilme alanının sınır koşullarından etkilenmeyecek uzaklıkta seçilmiştir. Modelin dış sınırındaki noktalar yatay ve düşey yer değiştirmeye izin verilmeyecek şekilde sabitlenmiştir.

Modele ait başlangıç koşulları saha çalışmalarından elde edilen birincil gerilme analizi sonuçları kullanılarak, yerçekimi etkisi altında modele tanımlanmıştır.

Ömerler yeraltı madeni A6 uzunayak panosunun modellenmesi aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Modellemenin birinci aşamasında yerçekimi etkisi altında birincil gerilmelerin oluşması sağlanmıştır. İkinci aşamada tünelin kazısı üçüncü aşamada ise tahkimatı gerçekleştirilmiştir.

3.4.2.4. Yük dağılımının belirlenmesi ve tahkimatın oluşturulması

Phase2 programı aşamalı modelleme çalışmalarında, özellikle kazı ve tahkimat aşamaları oluşturulacağında, model üzerine gelecek olan yüklerin belirli oranlarda atanmasına izin vermektedir. Böylelikle, kazı ile tahkimatın yük almaya başlaması durumunda arazinin bir miktar deformasyona maruz kalması durumu dikkate alınabilmektedir. Geniş ve Acun (2015), yapmış oldukları bir çalışmada, sayısal çözümlerinde kullanılan yük dağılımının, tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70-75 arasında, tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %20-25 arasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Geniş ve Acun, 2015). Ömerler yeraltı madeni A6 uzunayak panosu modellenirken birincil arazi gerilmelerinin ve kazının tanımlandığı aşamalara %70, tahkimatın tanımlandığı aşamaya ise %30'luk bir yük dağılımı tanımlanmıştır.

Modelleme çalışmalarında at nalı ve trapez kesitte oluşturulan galerilerin, görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen tasarım çıktıları yardımı ile farklı boyut ve tiplerde tahkimatı gerçekleştirilerek model çıktıları izlenmiştir. Modellerde kullanılan kaya saplaması tahkimatlara ait özellikler ilerleyen bölümlerde FLAC 3D modelleme prosedürlerinde belirtilmiştir.

Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen sonuçlar hem at nalı hem de trapez kesitte açılmış galerilere uygulanmış, program çalıştırdıktan sonra elde edilen çıktılar arasında bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sonucu, Ömerler yeraltı kömür maden ocağındaki kayaçların kütle özellikleri ve sahaya ait kömür damarı ve yan kayaçların durumu dikkate alınarak güncellenmiş ve kaya saplaması tahkimatın ön tasarım sonucu ortaya çıkarılmıştır.

3.5. FLAC 3D Programı ile Modelleme Çalışmaları

Ömerler yeraltı maden ocağı A6 uzunayak panosunun FLAC 3D programı ile sayısal modellenmesi çalışmalarında gerçekleştirilen işlem adımları ve modelleme yöntemi bu bölümde belirtilmiştir.

Ana nakliye galerileri ve panolara ait taban yollarında demir bağ tahkimat sistemi uygulanan Ömerler yeraltı maden ocağı A6 uzunayak panosunun FLAC 3D v.6.0 nümerik yazılımı ile modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde 4 farklı durum incelenmiştir. İlk modelde, taban yollarının demir bağlar ile tahkimatının gerçekleştirilmesi durumu, diğer 3 modelde ise 3 farklı tip kaya saplaması ile (Swelllex tipi kaya saplaması, Reçine dolgulu kaya saplaması ve Kablolu kaya saplaması) tahkimatının gerçekleştirilmesi durumları incelenmiştir.

Oluşturulan bu modellerin analizlerinde iki farklı durum göz önüne alınmıştır. Bu durumlardan ilkinde A6 uzunayak panosunun taban yollarının açılması ve tahkimatının gerçekleştirildiği tünel pozisyonu durumu, ikincisi ise A6 uzunayak panosunda üretimin yapılacağı ayak içinin açılıp, ayak içi tahkimat ünitelerinin yerleştirilmesi ve sonrasında ayağın ilerlemesi ve arka kömürün göçertilmesi durumlarının modellendiği ayak üretimi pozisyonu durumudur. Oluşturulan modelde, her iki pozisyon için, tabanyolları tahkimatlarının üzerine gelen yük nedeniyle değişen gerilme ve deformasyonlar incelenmiştir. Modelleme ile ilgili detaylar aşağıdaki bölümlerde belirtilmiştir.

3.5.1. Model geometrisi ve ağının oluşturulması

Ömerler yeraltı maden ocağı A6 uzunayak panosuna ait geometrinin modellenmesi çalışmalarında, ocağa ait güncel durum dikkate alınmıştır. Bu nedenle yeraltı ocağına ait imalat haritasında görülen, daha önce çalışılmış olan A5 Panosu ve A6 panosunun diğer tarafında yer alan bakir durumdaki A7 panosu da modele tanımlanmıştır.

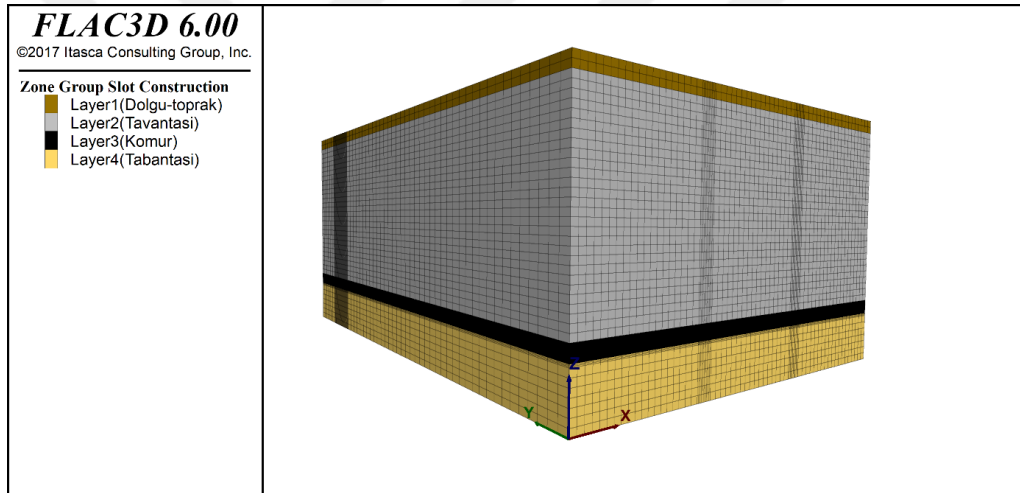
A6 panosunun ayak uzunluğu 90 m'dir. Panonun her iki yanında konumlanan A5 ve A7 panoları ile aralarında 20'şer m'lik emniyet topukları bırakılmaktadır. Her iki emniyet topuğunun yanlarında yer alan göçük halindeki A5 ve bakir durumdaki A7 panosu modele tanımlandığından, model geometrisi +x yönünde 300 m olarak tanımlanmıştır.

A6 uzunayak panosunun konumlandığı bölgedeki kömür damarı yeryüzünden yaklaşık 161 metre derinde bulunmaktadır. Kömür damarının altında bulunan taban taşı birimi olan kiltası, modelde 39 m alınarak, model geometrisi -z yönünde 200 m olarak tanımlanmıştır. Yaklaşık 11 m kalınlığındaki kömür damarının hemen üzerinde tavantaşı olarak tanımlanan birim, işletmeden alınan ve bu bölgeye ait olan sondaj logları dikkate alınarak 140 m olarak modele tanımlanmıştır. Bu 140 m'lik birimde yer alan ve kömür tavanının yaklaşık 134 m'lik büyük bir bölümünü oluşturan marn yer yer kumtaşı silttaşı bantlı formasyon ile kireçtaşı kiltası ardalanması formasyonları hemen hemen aynı kütle ve malzeme özelliklerine sahip olması nedeniyle bu formasyonlar aynı birim içerisinde tanımlanmıştır. 140 m'lik tavan biriminin yaklaşık % 4.2'sini (6 m) oluşturan dolarit kaya birimi için ayrıca bir sınır tanımlanmamıştır. Kömür tavanında yer alan 140 m'lik tabakaların üzerinde bulunan 10 m'lik toprak dolgu malzemesi ise modelde tanımlanmıştır.

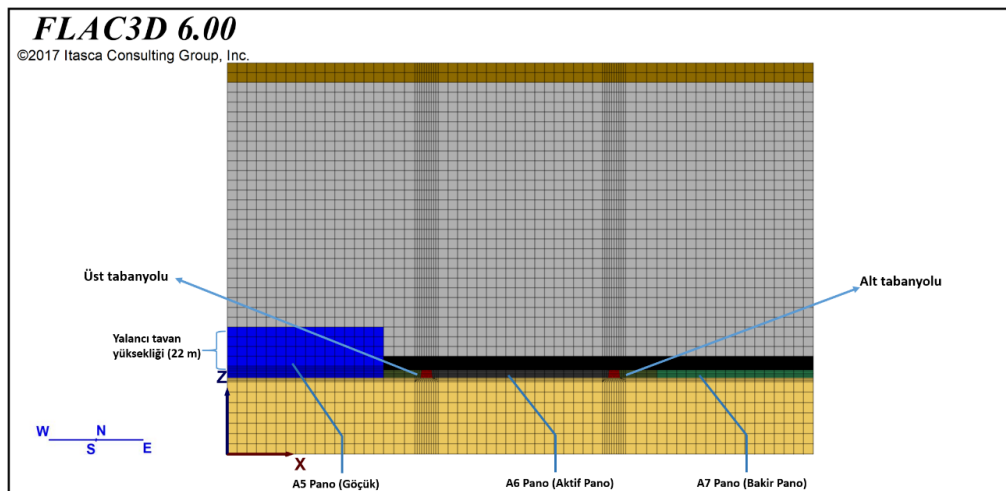
A6 uzunayak panosunun uzunluğu gerçekte yaklaşık olarak 450 m kadardır. Modelde ise panonun boyunu temsil eden geometri +y yönünde ve 500 m olarak tanımlanmıştır. Modelleme çalışmalarının ilk aşaması olan galerilerin açılması ve tahkimatın gerçekleştirilmesi safhasında, taban yolları 500 m sürülmüştür. Panoya ait ayak içi, model geometrisinde +y yönünde 450. m'de tanımlanmış olup, modelleme aşamalarından biri olan ayakiçi kazısı ve tahkimatı aşamasından sonra tanımlanmak üzere arkada kalan 50 m'lik bölüm sıkışmış göçük bölgesi olarak ayrılmıştır. Bunun nedeni, uzunayak panosuna ait ayakiçinde sıkışmış olan arka göçüğün ve ayağın ilerletilmesi ile gerçekleşen dinamik göçük bölgesinin etkilerinin incelenmesidir.

Model geometrisi oluştururken, bölgelerin (zone) belirlenmesinde dikdörtgen ve kare şekilli tuğla (brick) elemanlar kullanılmıştır. Model geometrisi ağlara bölünürken (mesh), panonun 450. m'sinde tanımlanan ve ayak içinden tabanyolunun girişine doğru devam eden 50 m'lik bölüm 1 m'lik ağlara bölünmüştür. Bunun nedeni modelleme esnasında 1'er m'lik kazı yapılacak olan bölgedeki gerilmelerin daha ayrıntılı incelenmesi amacıyla.

Model geometrisinin diğer bölgeleri ise gerilme ve deformasyonları incelenmek istenilen bölgelerin hassasiyetine göre 5 ve 10'ar m'lik ağlara bölünmüştür. Oluşturulan model, nihai halinde toplam 361665 bölge (zon) ve 376320 adet düğüm noktası (gridpoint) içermektedir. Yukarıda detayları verilen A6 uzunayak panosuna ait FLAC 3D programında oluşturulan model geometrisi genel olarak Şekil 3.52 ve 3.53'te belirtilmiştir.



Şekil 3.52. Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosunun modellendiği temel geometri

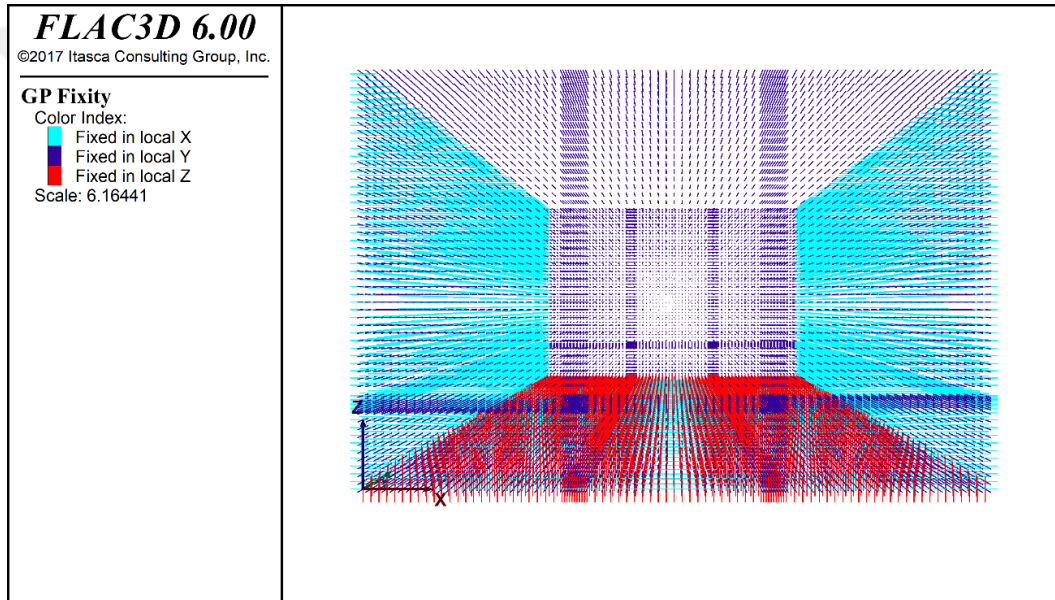


Şekil 3.53. Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosunun modellendiği detaylı geometri

3.5.2. Sınır ve başlangıç koşullarının belirlenmesi

Modele ait başlangıç ve sınır koşulları belirlenirken, model sınırı, kazı ile oluşan ikincil gerilme alanından etkilenmeyecek uzaklıkta seçilmiştir. Modelin sınır koşulları yer değiştirmeye izin verilmeyecek bir şekilde belirlenmiştir. Modelin kuzey ve güney yüzeyleri y yönünde, doğu ve batı yüzeyleri ise x yönünde sabitlenmiştir. Modelin tabanı ise x, y ve z yönlerinden sabitlenmiştir (Şekil 3.54).

Modele ait başlangıç koşulları belirlenirken, birincil gerilme analizlerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Buna göre $K_0 = 0.473$ (σ_h / σ_v) değeri modelin tümü için tanımlanmış ayrıca yerçekimi etkisi başlangıç koşullarında modele tanımlanmıştır.



Şekil 3.54. Modele ait belirlenen sınır koşulları

3.5.3. Model davranışı ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Modele ait malzeme özellikleri tez çalışmalarının birinci aşamasında kaya mekaniği çalışmaları ile elde edilen veriler ile tanımlanmıştır. Laboratuvar koşullarında elde edilen veriler, literatürde yer alan görgül yaklaşımlar ve yenilme kriterleri kullanılarak kaya kütle verilerine dönüştürülmüştür. Dönüşümlerin gerçekleştirilmesinde RocLab v.1.0 programından faydalanılmıştır (RocScience, 2002)

Modelde malzemelerin davranışı elastik-muntazam plastik malzeme özelliği ile tanımlanmış olup, tabakaların mekanik (yenilme) davranışı, göçük malzemesi hariç Mohr-Coulomb yenilme ölçütü ile tanımlanmıştır.

3.5.4. Göçük malzemesinin özelliklerinin ve davranışının belirlenmesi

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosunu FLAC 3D programı ile oluşturulan modelde göçük malzemesinin özellikleri tanımlanırken, literatürde yer alan bazı eşitliklerden faydalanılmıştır.

Xie ve arkadaşları (1999) yapmış oldukları çalışmalarında göçük malzemesinin elastisite modülünü (E), yoğunluğunu ve poisson oranını aşağıda belirtilen eşitlikler ile ifade etmişlerdir (Xie ve ark., 1999) (Eşitlik 3.8-3.10)

$$E=15+175(1-e^{-1.25t}) \quad (3.8)$$

$$\rho=1600+800(1-e^{-1.25t}) \quad (3.9)$$

$$v=0.05+0.2(1-e^{-1.25t}) \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.8’de, E (MPa) göçük malzemesinin elastisite modülünü ifade ederken, Eşitlik 3.9’da ρ göçük malzemesinin yoğunluğunu (kg/m^3); Eşitlik 3.10’da v poisson oranını ifade etmektedir. Her üç eşitlikte t zamanı temsil etmektedir.

Köse ve Çebi (1988)’nin Tunçbilek yeraltı ocağı ile ilgili yapmış oldukları bir çalışmada, göçük malzemesinin elastisite modülünün 15-3500 MPa aralığında değiştiğini belirtmişlerdir (Köse ve Çebi, 1988). Yavuz ve Fowell (2001) ise yapmış oldukları bir çalışmada göçük malzemesinin poisson oranını (v) 0.495 olarak almışlardır (Yavuz ve Fowell, 2001).

Yukarıda belirtilen bu yaklaşımlar dikkate alınarak, A5 panosuna ait göçük malzemesi özelliklerinde elastisite modülü yoğunluk ve poisson oranı belirlenirken Xie ve arkadaşlarının verdiği eşitlik ve Köse ve Çebi’nin sunduğu aralık dikkate alınmıştır. Buna göre bu bölgedeki elastisite modülü değeri 200 MPa yoğunluk değeri ise 2100 kg/m^3 olarak alınmıştır. Poisson oranı belirlenirken, Xie ve arkadaşlarının sunduğu Eşitlik 3.10 ve Yavuz ve Fowell (2001)’in göçük malzemesi için aldıkları değer dikkate alınarak bu değer 0.45 olarak alınmıştır.

Göçük bölgesinin mekanik davranışı FLAC 3D de göçüğün simüle edildiği çift akma modeli (double-yield) ile tanımlanmıştır. Pappas ve Mark (1993) uzunayak göçük malzemesinin davranışını laboratuvar testleri ile incelemiş ve Salamon’un göçük modelinde sunduğu eşitliğin (1990), laboratuvar testlerine en yakın sonuç verdiğini belirtmişlerdir (Pappas ve Mark, 1993). Salamon göçük modelinde aşağıdaki eşitlik sunulmuştur (Salamon, 1990) (Eşitlik 3.11).

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon / \varepsilon_m} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11’de σ malzemenin üzerine gelen tek eksenli gerilmeyi (MPa); ε gerilmeler altında malzemede meydana gelen birim deformasyonu; E_0 başlangıç tanjant modülünü (MPa); ε_m ise sıkışmış kaya malzemesinde olabilecek en fazla birim deformasyonu temsil etmektedir.

Yavuz (2001) göçük baskısının yeniden oluşması ile ilgili yapmış olduğu çalışmada aşağıdaki eşitliği türetmiştir (Eşitlik 3.12).

$$E_0 = \frac{10.39 \sigma_c^{1.042}}{b^{7.7}} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12’de σ_c göçük bölgesindeki kaya parçalarının tek eksenli basınç dayanımını temsil etmektedir. Eşitlik 3.13’te b , göçük malzemesinin başlangıç sıkışma faktörünü temsil etmektedir ve b ile ε_m ilişkilidir. Bu ilişki aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Eşitlik 3.13-3.14). Eşitlik 3.14’de H_c , göçük bölgesinin yüksekliğini (m) temsil etmektedir.

$$\varepsilon_m = \frac{b-1}{b} \quad (3.13)$$

$$b = \frac{H_c + m}{H_c} \quad (3.14)$$

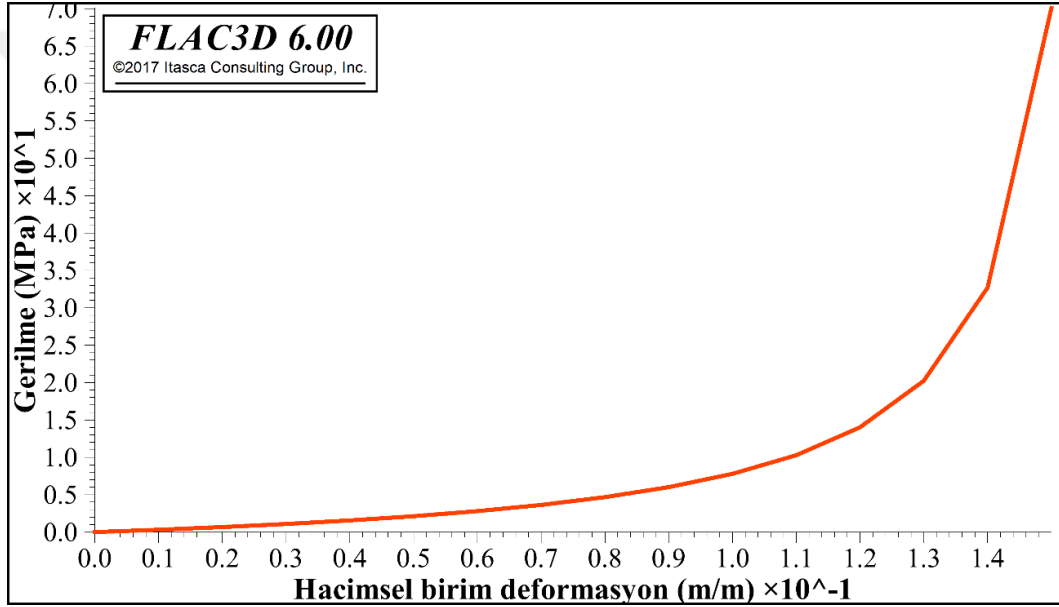
Modelleme çalışmalarında göçüğün mekanik davranışı belirlenirken yukarıda verilen eşitlikler kullanılmıştır. A6 panosunda ayak ilerlemesine bağlı olarak, her 1 metre ilerlemeden sonra, ayağın arkasındaki 1 metrelik kısma çift akma (double-yield) kurucu modeli özellikleri atanmıştır. Böylelikle, modelde, ayak ilerlemesinin ilk aşamalarında, göçük bölgesi, tavandan gelen baskıya dayanamayarak kırılan ve çöken bir bölgeyi temsil edecektir. Bu bölgede göçük yavaşça sıkışarak tavan gerilmelerinin artmasına neden olacaktır.

A6 panosunun modelinde ayak arkası göçükte oluşan bu hacimsel birim deformasyon davranışına ait hesaplanan sonuç denklemi, deformasyon değişimi değerleri ve FLAC 3D program çıktısı Şekil 3.55 ve Çizelge 3.8’de ve Eşitlik 3.15’te belirtilmiştir.

$$\sigma = \frac{29.2\varepsilon}{1-6.25\varepsilon} \quad (3.14)$$

Çizelge 3.8. Göçük malzemesinin sayısal modeli için türetilen tavan basıncı tablosu

| Birim deformasyon (m/m) | Gerilme (MPa) | Birim deformasyon (m/m) | Gerilme (MPa) |
|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| 0,00 | 0 | 0,08 | 4,67 |
| 0,01 | 0,31 | 0,09 | 6,01 |
| 0,02 | 0,67 | 0,10 | 7,79 |
| 0,03 | 1,08 | 0,11 | 10,28 |
| 0,04 | 1,56 | 0,12 | 14,02 |
| 0,05 | 2,12 | 0,13 | 20,25 |
| 0,06 | 2,8 | 0,14 | 32,70 |
| 0,07 | 3,63 | 0,15 | 70,08 |



Şekil 3.55. A6 uzunayak panosuna ait göçük modelinde tanımlanan gerilme-hacimsel birim deformasyon eğrisi

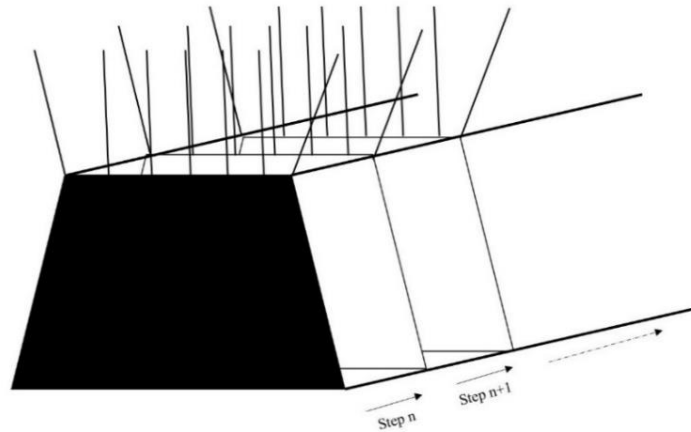
3.5.5. Modelin çalıştırılması ve tahkimat ünitelerinin modele tanıtılması

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosunun modellenmesi çalışmaları tünel pozisyonu ve ayak ilerleme pozisyonu olmak üzere iki aşamada incelenmiştir. Ancak model çalıştırılırken bu iki aşamanın birbirlerini takip etmeleri sağlanmıştır. Tünel pozisyonunu içeren ilk aşamada, pano uzunluğu boyunca (500 m) tabanyollarının kazısı ve tahkimatı işlemleri gerçekleştirilmiştir.

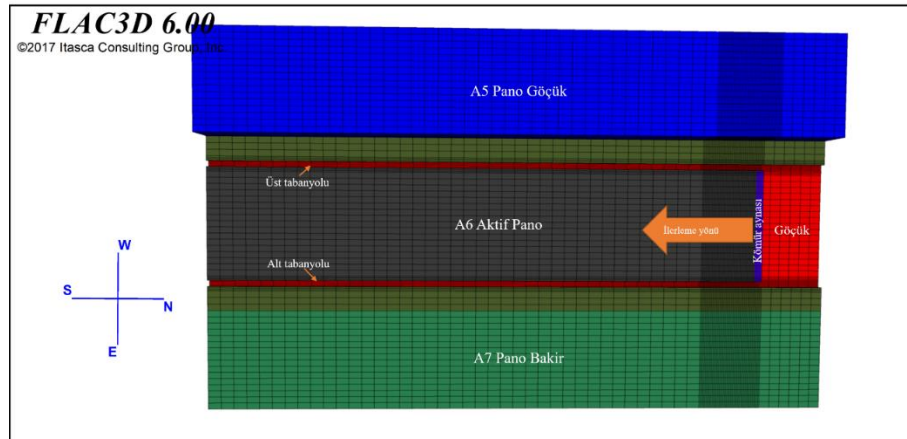
Tabanyolları kazısı ve tahkimatı işlemleri modelde FLAC'in programlama dili anlamına gelen FISH (FLAC-ISH) fonksiyonu kullanılarak 500 adımda gerçekleştirilmiştir. FISH, FLAC 3D programı içerisinde veri parametrelendirmek ya da

aynı modele farklı vakalar yerleştirmek için kullanılan bir kodlamadır. FISH sayesinde kazı işleminde her adımda 1 metrelik tabanyolu kazısı ve kazılan bölgenin tahkimatlandırılması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu işlemin mantığını özetleyen tipik bir gösterim Şekil 3.56'da sunulmuştur.

Bu aşamayı takip eden ikinci aşamada ise, genişliği 6 metre olan ayak içinin kazısı gerçekleştirilmiş ve bu bölge tahkimat ile desteklenmiştir. Bu işlem ile aynı adımda, 500 m'lik A6 panosunun son 50 m'lik bölümüne göçük malzemesi tanımlanmıştır. 50 m uzunluğundaki arka göçüğün modele tanıtılması ve ayak içinin tahkimatından sonra, ayak 1'er m'lik kazılar ile toplam 18 m boyunca ilerletilmiştir. Her bir ayak kazısı işleminde, aynı zamanda ayak içi tahkimat üniteleri 1'er m öne çekilmiş ve ayak arkası 1'er m göçertilmiştir. İkinci aşamanın gerçekleştiği model geometrisinde, üretim kazısı yapılan derinliğin kesiti Şekil 3.57'de belirtilmiştir.



Şekil 3.56. Modelde tanımlanan tabanyolları kazısı ve tahkimatının aşamalı olarak yapılması prensibi



Şekil 3.57. Model geometrisinde üretim yapılan derinliğin kesiti

Modelleme çalışmalarında, tabanyollarının tahkimatı, biri demir bağ ve üçü farklı tipte kaya saplaması olmak üzere 4 farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Her durumda farklı tahkimat tipi kullanılarak ayrı ayrı modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu model çalışmasında kullanılan demir bağ ve kaya saplaması tahkimat tipleri ve uygulama yöntemleri aşağıda belirtilmiştir.

3.5.5.1. Demir bağ tahkimat sisteminin modelde tanıtılması

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosu tabanyollarının demir bağlar ile tahkimatını modellemek amacı ile FLAC 3D’de tanımlı olan kiriş yapısal elemanı (beam structural elements) kullanılmıştır. Bu yapısal elemanlar FLAC 3D programında geometrik ve malzeme özellikleri ile tanımlanmaktadır.

Ömerler yeraltı ocağında kullanılan bağlar GI ve TH çelik profillerdir. Modelde demir bağları temsil etmek üzere işletmeden alınan, GI 140 profiline ait malzeme özellikleri kullanılmıştır (Çizelge 3.9).

Çizelge 3.9. Demir bağ tahkimatın modelde kullanılan özellikleri

| | | |
|----------------|--|--|
| Profil Tipi | GI 140 | |
| Kesit Ağırlığı | 41.6 kg/m | |
| Boyutlar | $h=140 \text{ mm} - b=110 \text{ mm}$ | |
| Kesit Alanı | 0.0154 m^2 | |
| I_x, I_y | $1586 \text{ cm}^4 - 315 \text{ cm}^4$ | |
| Yoğunluk | 2701.3 kg/m^3 | |

3.5.5.2. Kaya saplaması tahkimat sisteminin modelde tanıtılması

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosunun tabanyollarının kaya saplamaları ile tahkim edilmesi modelinde, 3 farklı tipte kaya saplaması için 3 ayrı model çalışması gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışmalarında kullanılacak olan kaya saplamalarının tiplerinin belirlenmesinde, yeraltı kömür ocaklarında kullanım yaygınlığı ve ülkemiz piyasasında daha kolay temin edilmesi parametreleri değerlendirilmiştir.

Bu parametreler ışığında modelleme çalışması gerçekleştirecek olan kaya saplamaları; Reçineli kaya saplamaları, Swellex kaya saplamaları ve Kablolü kaya saplamaları olarak belirlenmiştir.

Bu saplama tiplerinden Reçineli ve Swellex kaya saplamlarının FLAC 3D ile modellenmesinde kazık yapısal elemanları (Pile structural elements), kablolu saplamların FLAC 3D ile modellenmesinde ise kablo yapısal elemanları (cable structural elements) kullanılmıştır.

Bu üç farklı tipte kaya saplamlarının modele tanıtılmasında kullanılan girdi parametreleri Çizelge 3.10-3.12’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.10. Swellex kaya saplamasına ait modelde kullanılan özellikler

| Parametre | Değer | Kaynak |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| Saplama çapı (m) | 0.054 | Atlas Copco, 2008 s.36 |
| Saplama kalınlığı (m) | 0.003 | Atlas Copco, 2008 s.36 |
| Yoğunluk (kg/m ³) | 8 | ASM International, tablo 21 s.871 |
| Saplama çeliği young modülü (GPa) | 193 | ASM International, tablo 21 s.871 |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 620 | ASTM A 276-03, Tablo 2, s. 4, |
| Sınır Eksenel Kuvvet (kN) | 298 | $620 \cdot 10^6 \cdot \pi / 4 \cdot (0.054^2 - 0.048^2) / 1000 = 298 \text{ kN}$ |
| Bağ Mukavemeti (N/m) | $2.75 \cdot 10^5$ | $\tau = P / \pi d l$ |

Çizelge 3.11. Kablolu kaya saplamasına ait modelde kullanılan özellikler

| Parametre | Değer | Kaynak |
|--|-------------------|---|
| Delik çapı (m) | 0.048 | Minovaglobal ürün kataloğu s.3 |
| Kablo çapı (m) | 0.021 | Rocscience, 2007 |
| Kablo modülü (GPa) | 125 | Minovaglobal ürün kataloğu s.3 |
| Kesit Alanı (mm ²) | 313 | Minovaglobal ürün kataloğu s.3 |
| Maksimum Çekme Kapasitesi (kN) | 250 | Itasca, FLAC 3D modelleme klavuzu, 2012 |
| Su-Dolgu oranı | 0.35 | Rocscience, 2007 |
| Dolgu-bağ sertliği (N/m ²) | $1.75 \cdot 10^7$ | Itasca, FLAC 3D modelleme klavuzu, 2012 |
| Dolgu kohezyon mukavemeti (N/m) | $2 \cdot 10^5$ | Itasca, FLAC 3D modelleme klavuzu, 2012 |

Çizelge 3.12. Reçineli kaya saplamasına ait modelde kullanılan özellikler

| Parametre | Değer | Kaynak |
|--|------------------|--|
| Ribar (nervürlü çelik) çapı (m) | 0.020 | Mansour Mining Ürün Katalogu |
| Reçine dolguya uygun delik çapı (m) | 0.028 | Mansour Mining Ürün Katalogu |
| Çeliğin maksimum çekme kapasitesi (kN) | 180 | Mansour Mining Ürün Katalogu |
| Saplama çeliği young modülü (GPa) | 200 | Rocscience, 2007 |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 540 | Mansour Mining Ürün Katalogu |
| Sınır Eksenel Kuvvet (kN) | 162 | $540 \cdot 10^6 \cdot \pi / 4 \cdot (0.028^2 - 0.020^2) / 1000 = 162 \text{ kN}$ |
| Bağ Mukavemeti (N/m) | $3.5 \cdot 10^5$ | $\tau = P / \pi d l$ |

3.5.5.3. Ayak içi tahkimat ünitelerinin modelde tanıtılması

Ömerler yeraltı ocağında ayak içinde kullanılan yürüyen tahkimat ünitelerinin, FLAC 3D programına doğrudan yerleştirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle modelde, yürüyen tahkimat ünitelerini temsil etmek üzere, elastik modülü 180 GPa, poisson oranı 0.3 olan ve kalınlığı 45 cm olan kabuk yapısal elemanlar (Shell structural elements) kullanılmıştır.

3.5.6. Model geometrisinde izleme bölgelerinin yer tespiti ve tanımlanması

Ömerler yeraltı madeni A6 panosuna ait FLAC 3D modeli çalıştırdıktan sonra ilk ve ikinci aşamaya ait sonuçları analiz etmek amacıyla model geometrisi üzerinde belirli bölgelerde izleme noktaları belirlenmiştir. Belirlenen bu noktalar bir tür izleme istasyonu görevi görmekte olup model adımlarının her biri için o noktada gerçekleşen gerilme ve deformasyon gibi önemli parametreleri grafiksel olarak kullanıcıya sunmaktadır.

A6 uzunayak panosu model geometrisi üzerinde toplamda 120 adet izleme noktası tanımlanmıştır. Bu izleme noktalarından 40 adedi üst ve alt tabanyolları üzerinde belirlenen bölgelerin tavanında, ikinci 40 adedi tabanyollarının sağında ve solunda yer alan emniyet topukları tarafında ve kalan 40 adedi ise A6 uzunayak panosu tarafında yer almaktadır. Her bir tabanyolu hattındaki 60'ar adet izleme noktasından 33 tanesi ayak ilerleme yönünde 27 tanesi ise ayak arkasında göçük tarafında yer almaktadır.

İzleme noktalarından üst tabanyolu tarafında ve ayak ilerleme yönünde olan noktaların başlangıcı A6 pano ayak içi ile aynı hizada olan U0 izleme bölgesidir (447 metre). Bu izleme bölgesi 3 izleme noktasından oluşmaktadır. Bu üç izleme noktasından tabanyolu üzerinde olan nokta U0/Galeri, topuk tarafında olan nokta; U0/Topuk, pano tarafında olan nokta ise U0/Pano şeklinde kodlanmıştır. Üst tabanyolunda ayak ilerleme yönündeki izleme bölgeleri aynı şekilde U1, U2, U3...U11 şeklinde, ayak arkası göçük tarafında olanlar ise UG1, UG2, UG3...UG8 şeklinde kodlanmıştır. İzleme noktalarından alt tabanyolu tarafında olanlar ise aynı şekilde, A1, A2,...A11 ve ayak arkası göçük tarafında olan noktalar AG1, AG2...AG11 şeklinde kodlanmıştır.

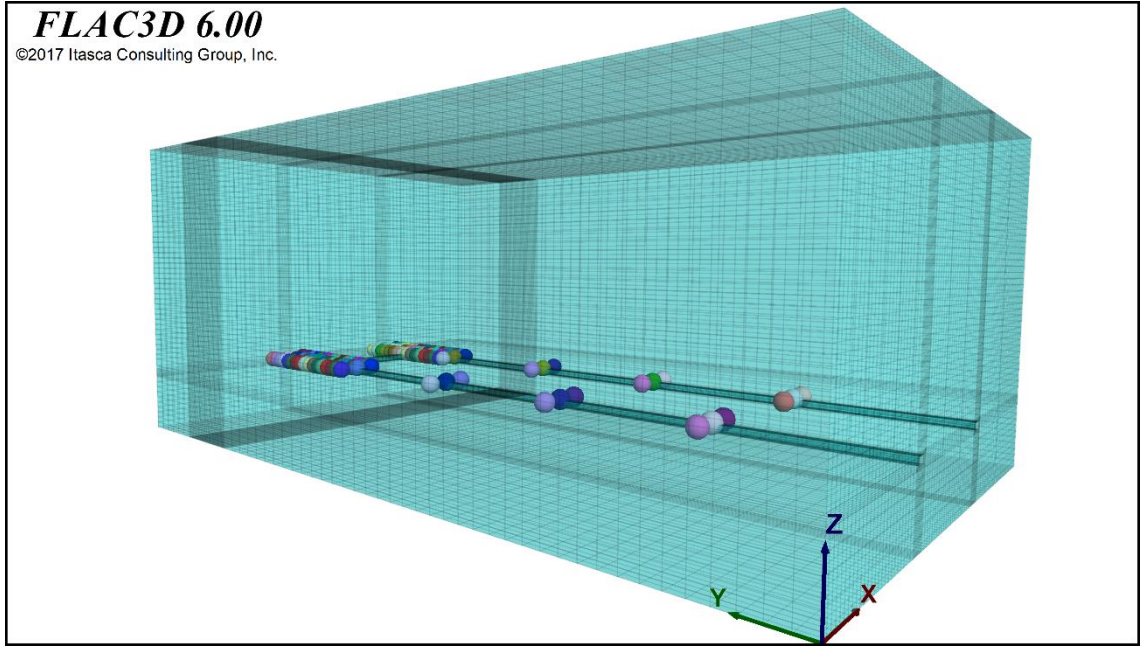
Bu izleme istasyonlarından üst taban yolunda olanların buldukları konumlara ait bilgiler Çizelge 3.13'de, alt taban yolunda olanlar ise Çizelge 3.14.'de belirtilmiştir. Bu noktaların model geometrisindeki konumları Şekil 3.58'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.13. Üst tabanyolunda yer alan izleme noktalarına ait bilgiler

| İzleme Noktası | Kodu | Açıklama | Koordinatı |
|----------------|------------|--|------------------|
| U0 | U0/Galeri | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-üst tabanyolu tavanı | (102, 447, -157) |
| | U0/Topuk | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-topuk tarafı | (88.5,447,-157) |
| | U0/Pano | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-pano tarafı | (114.5,447,157) |
| U1 | U1/Galeri | Arından 6 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 441, -157) |
| | U1/Topuk | Arından 6 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,441,-157) |
| | U1/Pano | Arından 6 metre ileride-pano tarafı | (114.5,441,157) |
| U2 | U2/Galeri | Arından 12 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 435, -157) |
| | U2/Topuk | Arından 12 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,435,-157) |
| | U2/Pano | Arından 12 metre ileride-pano tarafı | (114.5,435,157) |
| U3 | U3/Galeri | Arından 18 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 429, -157) |
| | U3/Topuk | Arından 18 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,429,-157) |
| | U3/Pano | Arından 18 metre ileride-pano tarafı | (114.5,429,157) |
| U4 | U4/Galeri | Arından 24 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 423, -157) |
| | U4/Topuk | Arından 24 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,423,-157) |
| | U4/Pano | Arından 24 metre ileride-pano tarafı | (114.5,423,157) |
| U5 | U5/Galeri | Arından 30 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 417, -157) |
| | U5/Topuk | Arından 30 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,417,-157) |
| | U5/Pano | Arından 30 metre ileride-pano tarafı | (114.5,417,157) |
| U6 | U6/Galeri | Arından 36 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 411, -157) |
| | U6/Topuk | Arından 36 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,411,-157) |
| | U6/Pano | Arından 36 metre ileride-pano tarafı | (114.5,411,157) |
| U7 | U7/Galeri | Arından 42 metre ileride-üst tabanyolu tavanı | (102, 405, -157) |
| | U7/Topuk | Arından 42 metre ileride-topuk tarafı | (88.5,405,-157) |
| | U7/Pano | Arından 42 metre ileride-pano tarafı | (114.5,405,157) |
| U8 | U8/Galeri | Üst tabanyolu 400. metrede -üst tabanyolu tavanı | (102, 400, -157) |
| | U8/Topuk | Üst tabanyolu 400. metrede -topuk tarafı | (88.5,400,-157) |
| | U8/Pano | Üst tabanyolu 400. metrede -pano tarafı | (114.5,400,157) |
| U9 | U9/Galeri | Üst tabanyolu 300. metrede -üst tabanyolu tavanı | (102, 300, -157) |
| | U9/Topuk | Üst tabanyolu 300. metrede -topuk tarafı | (88.5,300,-157) |
| | U9/Pano | Üst tabanyolu 300. metrede -pano tarafı | (114.5,300,157) |
| U10 | U10/Galeri | Üst tabanyolu 200. metrede -üst tabanyolu tavanı | (102, 200, -157) |
| | U10/Topuk | Üst tabanyolu 200. metrede -topuk tarafı | (88.5,200,-157) |
| | U10/Pano | Üst tabanyolu 200. metrede -pano tarafı | (114.5,200,157) |
| U11 | U11/Galeri | Üst tabanyolu 100. metrede -üst tabanyolu tavanı | (102, 100, -157) |
| | U11/Topuk | Üst tabanyolu 100. metrede -topuk tarafı | (88.5,100,-157) |
| | U11/Pano | Üst tabanyolu 100. metrede -pano tarafı | (114.5,100,157) |
| UG1 | UG1/Galeri | Arının 6 metre arkasında-üst tabanyolu tavanı | (102, 453, -157) |
| | UG1/Topuk | Arının 6 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,453,-157) |
| | UG1/Pano | Arının 6 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,453,157) |
| UG2 | UG2/Galeri | Arının 12 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 459, -157) |
| | UG2/Topuk | Arının 12 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,459,-157) |
| | UG2/Pano | Arının 12 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,459,157) |
| UG3 | UG3/Galeri | Arının 18 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 465, -157) |
| | UG3/Topuk | Arının 18 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,465,-157) |
| | UG3/Pano | Arının 18 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,465,157) |
| UG4 | UG4/Galeri | Arının 24 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 471, -157) |
| | UG4/Topuk | Arının 24 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,471,-157) |
| | UG4/Pano | Arının 24 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,471,157) |
| UG5 | UG5/Galeri | Arının 30 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 477, -157) |
| | UG5/Topuk | Arının 30 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,477,-157) |
| | UG5/Pano | Arının 30 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,477,157) |
| UG6 | UG6/Galeri | Arının 36 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 483, -157) |
| | UG6/Topuk | Arının 36 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,483,-157) |
| | UG6/Pano | Arının 36 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,483,157) |
| UG7 | UG7/Galeri | Arının 42 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 489, -157) |
| | UG7/Topuk | Arının 42 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,489,-157) |
| | UG7/Pano | Arının 42 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,489,157) |
| UG8 | UG8/Galeri | Arının 48 metre arkasında -üst tabanyolu tavanı | (102, 495, -157) |
| | UG8/Topuk | Arının 48 metre arkasında -topuk tarafı | (88.5,495,-157) |
| | UG8/Pano | Arının 48 metre arkasında -pano tarafı | (114.5,495,157) |

Çizelge 3.14. Alt tabanyolunda yer alan izleme noktalarına ait bilgiler

| İzleme Noktası | Kodu | Açıklama | Koordinatı |
|----------------|------------|--|------------------|
| A0 | A0/Galeri | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-alt tabanyolu tavanı | (198, 447, -157) |
| | A0/Topuk | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-topuk tarafı | (210.5,447,-157) |
| | A0/Pano | Kömür arını ile aynı hat üzerinde-pano tarafı | (185.5,447,157) |
| A1 | A1/Galeri | Arından 6 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 441, -157) |
| | A1/Topuk | Arından 6 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,441,-157) |
| | A1/Pano | Arından 6 metre ileride-pano tarafı | (185.5,441,157) |
| A2 | A2/Galeri | Arından 12 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 435, -157) |
| | A2/Topuk | Arından 12 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,435,-157) |
| | A2/Pano | Arından 12 metre ileride-pano tarafı | (185.5,435,157) |
| A3 | A3/Galeri | Arından 18 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 429, -157) |
| | A3/Topuk | Arından 18 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,429,-157) |
| | A3/Pano | Arından 18 metre ileride-pano tarafı | (185.5,429,157) |
| A4 | A4/Galeri | Arından 24 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 423, -157) |
| | A4/Topuk | Arından 24 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,423,-157) |
| | A4/Pano | Arından 24 metre ileride-pano tarafı | (185.5,423,157) |
| A5 | A5/Galeri | Arından 30 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 417, -157) |
| | A5/Topuk | Arından 30 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,417,-157) |
| | A5/Pano | Arından 30 metre ileride-pano tarafı | (185.5,417,157) |
| A6 | A6/Galeri | Arından 36 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 411, -157) |
| | A6/Topuk | Arından 36 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,411,-157) |
| | A6/Pano | Arından 36 metre ileride-pano tarafı | (185.5,411,157) |
| A7 | A7/Galeri | Arından 42 metre ileride-alt tabanyolu tavanı | (198, 405, -157) |
| | A7/Topuk | Arından 42 metre ileride-topuk tarafı | (210.5,405,-157) |
| | A7/Pano | Arından 42 metre ileride-pano tarafı | (185.5,405,157) |
| A8 | A8/Galeri | Alt tabanyolu 400. metrede-alt tabanyolu tavanı | (198, 400, -157) |
| | A8/Topuk | Alt tabanyolu 400. metrede -topuk tarafı | (210.5,400,-157) |
| | A8/Pano | Alt tabanyolu 400. metrede -pano tarafı | (185.5,400,157) |
| A9 | A9/Galeri | Alt tabanyolu 300. metrede-alt tabanyolu tavanı | (198, 300, -157) |
| | A9/Topuk | Alt tabanyolu 300. metrede -topuk tarafı | (210.5,300,-157) |
| | A9/Pano | Alt tabanyolu 300. metrede -pano tarafı | (185.5,300,157) |
| A10 | A10/Galeri | Alt tabanyolu 200. metrede-alt tabanyolu tavanı | (198, 200, -157) |
| | A10/Topuk | Alt tabanyolu 200. metrede -topuk tarafı | (210.5,200,-157) |
| | A10/Pano | Alt tabanyolu 200. metrede -pano tarafı | (185.5,200,157) |
| A11 | A11/Galeri | Alt tabanyolu 100. metrede-alt tabanyolu tavanı | (198, 100, -157) |
| | A11/Topuk | Alt tabanyolu 100. metrede -topuk tarafı | (210.5,100,-157) |
| | A11/Pano | Alt tabanyolu 100. metrede-pano tarafı | (185.5,100,157) |
| AG1 | AG1/Galeri | Arının 6 metre arkasında-alt tabanyolu tavanı | (198, 453, -157) |
| | AG1/Topuk | Arının 6 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,453,-157) |
| | AG1/Pano | Arının 6 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,453,157) |
| AG2 | AG2/Galeri | Arının 12 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 459, -157) |
| | AG2/Topuk | Arının 12 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,459,-157) |
| | AG2/Pano | Arının 12 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,459,157) |
| AG3 | AG3/Galeri | Arının 18 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 465, -157) |
| | AG3/Topuk | Arının 18 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,465,-157) |
| | AG3/Pano | Arının 18 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,465,157) |
| AG4 | AG4/Galeri | Arının 24 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 471, -157) |
| | AG4/Topuk | Arının 24 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,471,-157) |
| | AG4/Pano | Arının 24 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,471,157) |
| AG5 | AG5/Galeri | Arının 30 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 477, -157) |
| | AG5/Topuk | Arının 30 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,477,-157) |
| | AG5/Pano | Arının 30 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,477,157) |
| AG6 | AG6/Galeri | Arının 36 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 483, -157) |
| | AG6/Topuk | Arının 36 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,483,-157) |
| | AG6/Pano | Arının 36 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,483,157) |
| AG7 | AG7/Galeri | Arının 42 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 489, -157) |
| | AG7/Topuk | Arının 42 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,489,-157) |
| | AG7/Pano | Arının 42 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,489,157) |
| AG8 | AG8/Galeri | Arının 48 metre arkasında -alt tabanyolu tavanı | (198, 495, -157) |
| | AG8/Topuk | Arının 48 metre arkasında -topuk tarafı | (210.5,495,-157) |
| | AG8/Pano | Arının 48 metre arkasında -pano tarafı | (185.5,495,157) |



Şekil 3.58. İzleme bölgelerinin model geometrisi üzerinde konumları

3.5.7. Modelde yapılan varsayımlar ve kısıtlamalar

Modelleme çalışmalarının bütününde gerçekleştirilen bazı varsayım ve kısıtlamalara ait bilgiler aşağıda belirtilmiştir.

- i. Model çalışmalarında σ_1 'in düşey (-z yönünde), σ_2 ve σ_3 'ün yatay (x ve y yönünde) olduğu kabul edilmiştir.
- ii. Gerçekte 400-450 metre arasında olan A6 uzunayak panosunun uzunluğu modelde y yönünde 500 metre alınmıştır.
- iii. Göçüğe ait malzeme özellikleri literatürde yer alan bazı eşitlikler ile belirlenmiştir.
- iv. Tahkimat üniteleri modelde tanımlanırken, yürüyen tahkimat üniteleri, kabuk yapısal elemanı (Shell structural elements) ile demir bağ tahkimat sistemi, kiriş yapısal elemanı (Beam structural elements), kaya saplaması tahkimat elemanı ise kazık yapısal elemanı (Pile structural elements) ve Kablolu tip kaya saplaması, kablo yapısal elemanı (cable structural elements) ile tanımlanmıştır.
- v. Modelde A6 uzunayak panosunun bulunduğu kömür damarının eğimi 0° olarak kabul edilmiştir. Ayrıca yeraltı suyu model çalışmalarında ihmal edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Doktora tez çalışmaları kapsamında, Ömerler yeraltı kömür madeni A6 uzunayak panosu taban yollarında kaya saplaması tahkimat sisteminin uygulanabilirliğine yönelik gerçekleştirilen çalışma aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

- i. Arazi ortamında ve laboratuvar koşullarında kaya kütle ve malzeme özelliklerini belirleme çalışmaları ve kaya kütle sınıflama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- ii. Bu çalışmalardan elde edilen veriler ışığında, literatürde yer alan görgül tasarım yaklaşımları ve iki boyutlu sayısal modelleme çalışmaları ile kaya saplaması tahkimat sistemi ön tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- iii. Elde edilen nihai tasarım sonucunun, 3 boyutlu FLAC 3D programı ile modele dönüştürülmesi ve tasarım çıktılarının alınması çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu çalışmalara ait elde edilen bulgular ve değerlendirmeler, doktora tez raporunun bu bölümünde belirtilmiştir.

4.1. Arazi çalışmaları ile elde edilen bulgular

4.1.1.1. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri belirleme çalışmaları

Doktora tez çalışmalarının gerçekleştirildiği TKİ-GLİ-Tunçbilek-Ömerler yeraltı kömür maden ocağında, kaya kütle karakterizasyonunun tespit edilmesi amacıyla yeraltı sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiş, ancak zayıf nitelikte olan kömür tabakasına ait karot özelliği taşıyan örnek elde edilememiştir. (Bu çalışmalar ile ilgili detaylı bilgiler doktora tez raporunda Bölüm 3’de belirtilmiştir (Bknz. Bölüm 3.3.1)). Bu durum neticesinde kömür kaya birimine ait kaya kütle karakterizasyonunun belirlenebilmesi amacıyla Hoek tarafından önerilen ve daha sonra Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından daha kullanışlı hale getirilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değeri belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sınıflama sisteminde iki temel parametre olan; yapısal özellik puanı (SR) ve süreksizlik yüzey koşulları puanlarının (SCR) tespit edilmesi amacıyla yerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için, Ömerler yeraltı kömür maden ocağına ait A1 uzunayak panosu kılavuz galerisi içerisinde, yaklaşık 10 metre genişliğinde ve 3.5 metre yüksekliğinde sekiz adet analiz bölgesi belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Yapılan analizlerde, seçilen her bir bölgede, kömür aynasında süreksizlik

yüzey koşulları (SCR) ve yapısal özellik (SR) puanı belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen SCR verileri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

A1 uzunayak panosuna ait kılavuz galerinde kömür aynasında yapılan süreksizlik yüzey koşulu puanını (SCR) belirleme çalışmaları ile Çizelge 4.1'de belirtilen puanlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. GSI sınıflama çalışmaları yapılan bölgelerden elde edilen veriler

| Analiz Bölge No | Analiz Bölgesi | Pürüzlülük Durumu (Rr) (0-6) | Bozunma Durumu (Rw) (0-6) | Dolgu Durumu (Rf) (0-6) | Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı (SCR = Rr+ Rw+ Rf) |
|-----------------|---|------------------------------|----------------------------|-------------------------|---|
| 1 | A1 kılavuz galerisi aynaya paralel yönde kazı yüzeyi | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Az Bozunmuş (5) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 8 |
| 2 | A1 kılavuz galerisi aynaya paralel yönde 2. kazı yüzeyi | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 3 | A1 kılavuz galerisi ayna yüzeyi 50. bağ | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 4 | A1 kılavuz galerisi ayna yüzeyi 40. bağ | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 5 | A1 kılavuz galerisi ayna yüzeyi 30. bağ | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 6 | A1 kılavuz galerisi ayna yüzeyi 10. bağ | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 7 | A1 kılavuz galerisi ayna yüzeyi 5. bağ | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |
| 8 | A1 kılavuz galerisi içi tavan | Düz (1) | Yok (6) | Yok (6) | 13 |
| | | Düz (1) | Orta Derecede Bozunmuş (3) | 5 mm'den az yumuşak (2) | 6 |

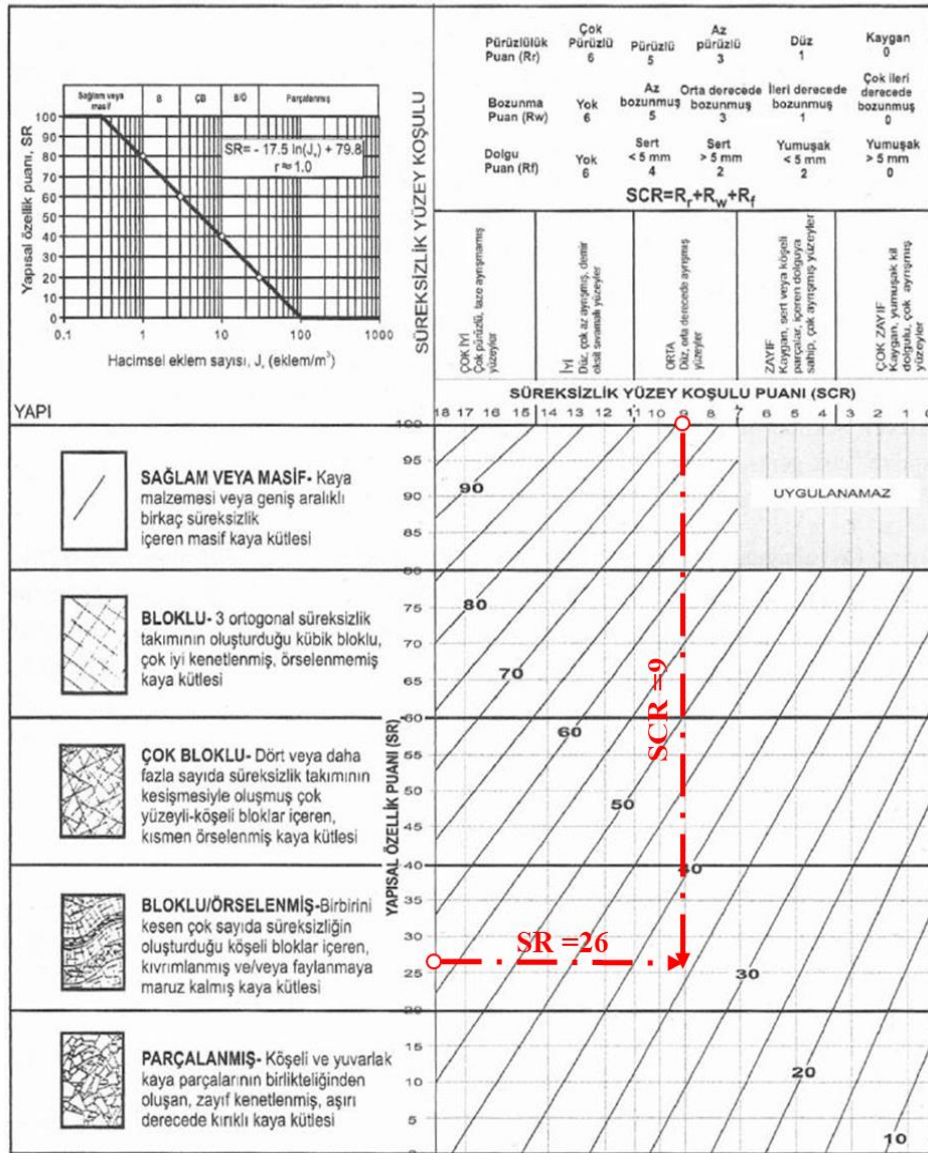
Çizelge 4.1 incelendiğinde SCR puanlarının aldığı en düşük değer 6 ve en yüksek değer 13 puan değerinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.1'de verilen GSI abağındaki SCR puan açıklamaları dikkate alındığında, kaya kütlesi süreksizlik yüzey koşuluna verilecek en uygun puanın $[(1 \times 8) + (7 \times 6) + (8 \times 13)] / 16 = 9.625 \approx 9$ 9 puan olduğuna karar verilmiştir.

Hacimsel eklem sayısı (J_v) hesaplamaları için, analiz yapılan 8 bölgede kömürün genel olarak 3-4 cm boyutlarında kübik birimlere kolayca ayrılabilirdiği belirlenmiştir. Belirlenen çatlak sistemi yardımıyla sahada kübik yapı sergileyen kömürün genel olarak ortalama blok boyutunun (S) 36 cm^3 olduğu tespit edilmiştir. Buna göre hacimsel eklem sayısı 21 adet/m^3 olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Eşitlik 4.1).

$$J_v = \left(\frac{1}{S}\right)^3 \quad (4.1)$$

$$J_v = \left(\frac{1}{36}\right)^3 \times 10^{-6} = 21.43 \cong 21 \text{ adet/m}^3$$

$SR = -17.5 \ln(21) + 79.8 \cong 26$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 Tunçbilek-Ömerler yeraltı linyit ocağına ait GSI değeri sonucu

Sonuç olarak A1 ve A2 uzunayak panolarında karşılaşılan kömür için SR değeri 26 ve SCR değeri 9 dikkate alınarak, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi kömür için GSI değeri yaklaşık olarak 35 indeks puanına sahip olduğu bu puana karşılık gelen kaya kütlesi ise Hoek ve arkadaşları tarafından. (1998) “Bloklu/Örselenmiş” olarak tanımlandığı tespit edilmiştir (Şekil 4.1).

Kömür yüzeylerinde yapılan hat etüdü çalışmalarından elde edilen kaya kütle parametreleri yardımıyla RMR ve Q sınıflama sonuçlarına ulaşılmıştır. Sahayı yansıtan kömür, tavan ve taban taşı için RMR değerleri sırasıyla; 32, 44 ve 47 değerlerini alırken Q değerlerinin sırasıyla; 0.37, 0.99 ve 1.16 olduğu tespit edilmiştir.

4.1.1.2. Schmidt Çekici ile kaya sertliği belirleme çalışmaları

Ömerler yeraltı kömür madeninde, A1 uzunayak panosu ayak içinde farklı tarihlerde, arın yüzeyindeki sertlik değerleri Schmidt Çekici ile okunmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen sertlik değerleri Çizelge 4.2’de belirtilmiştir. Bu değerlerin farklı tarihlerde okunmasındaki en büyük amaç, mevcut pozisyonda birbirlerine yaklaşık olarak 65 metre uzaklıkta bulunan A2 panosu arını ile A1 panosu arını arasındaki mesafenin zaman içerisinde daralmasıyla arın yüzeyindeki sertlik değerleri değişiminin incelenmesidir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Schmidt Çekici test sonuçlarına ait bilgiler

| Ölçüm Alanı | Tarih | Δt (Gün) | A1-A2 Arası Mesafe (m) | Ortalama Sertlik Değeri (N) |
|------------------|------------|------------------|------------------------|-----------------------------|
| SH-1 | 06.10.2017 | 0 | 66 | 19.4 |
| | 20.10.2017 | 14 | 66 | 22.9 |
| | 16.11.2017 | 35 | 65 | 21.2 |
| | 17.11.2017 | 36 | 65 | 22.5 |
| SH-2 | 26.12.2017 | 0 | 60 | 22.3 |
| SH-3 | 09.11.2017 | 0 | 65 | 20.9 |
| | 16.11.2017 | 7 | 65 | 21.5 |
| | 17.11.2017 | 8 | 65 | 21.2 |
| SH-4 | 19.10.2017 | 0 | 66 | 20.4 |
| | 26.10.2017 | 7 | 66 | 20.2 |
| | 16.11.2017 | 21 | 65 | 21.2 |
| | 17.11.2017 | 22 | 65 | 19.7 |
| Ort. | | | | 21.1 |
| Std.Sapma | | | | 1.09 |

Schmidt Çekici ile gerçekleştirilen sertlik belirleme ölçümlerinin yapıldığı tarihlerde, A1 pano ayak içerisinde hazırlık çalışmaları ve A2 pano ayak içerisinde üretim

çalışmaları devam etmiştir. Çizelge 4.2 dikkate alındığında, 4 ölçüm bölgesinde yapılan deneylerde ortalama sertlik değeri, $N = 21.1$ olarak belirlenmiştir.

Schmidt çekici ile elde edilen kaya sertlik değeri ile kömür birimine ait tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişki ile ilgili hesaplamalarda geçmiş yıllarda yapılan bazı çalışmalar dikkate alınmıştır (Çizelge 4.3). Tek eksenli basma dayanımı değeri ile kaya sertlik değeri arasındaki ilişkinin belirlenmesi çalışmalarında özellikle kömür kaya birimi için verilen eşitlikler incelenmiştir (Sheorey, 1984).

TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür işletmesinde A1 pano ayak içerisinde gerçekleştirilen Schmidt çekici ile sertlik belirleme çalışmalarında elde edilen ortalama sertlik değeri (N) olan 21.1 değeri Çizelge 4.3’de verilen eşitliklerde yerine yazılarak tek eksenli basma dayanımı değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Kömür kaya tipi için kaya sertlik değeri ile tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişkiye ait geçmiş yıllarda önerilen eşitlikler

| No | Araştırmacılar | Önerilen Eşitlik | R ² | Hesaplanan UCS değerleri (MPa) |
|----|--------------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| 1 | Sheorey (1984) | $UCS=0.4N-3.6$ | 0.94 | 4.84 |
| 2 | Haramy ve DeMarco (1985) | $UCS=0.994N-0.383$ | 0.70 | 20.49 |
| 3 | Ghose (1986) | $UCS=0.88N-12.11$ | 0.87 | 6.46 |
| 4 | Kahraman (2001) | $UCS=0.00045(N \times \rho)^{2.46}$ | 0.96 | 1.44 |

*UCS: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa) , N: Schmidt çekici ile belirlenen sertlik değeri, ρ : Kaya birimine ait yoğunluk değeri (g/cm^3)

Eşitliklerden elde edilen tek eksenli basma dayanımı değerleri (UCS) dikkate alındığında, hesaplanan en yüksek tek eksenli basma dayanımı değeri 20.49 MPa (Haramy ve DeMarco, 1985), hesaplanan en düşük tek eksenli basma dayanımı değeri ise 1.44 MPa olarak belirlenmiştir (Kahraman, 2001a). Schmidt Çekici ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen tek eksenli basma dayanımı değeri için dört eşitliğin verdiği ortalama tek eksenli basma dayanımı değeri dikkate alınmıştır. Buna göre bu değer 8.31 MPa olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada Schmidt Çekici deneyleri ile alansal olarak kömür malzemesinin dayanım değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kaya mekaniği çalışmalarında tek eksenli basma dayanımı değerine ulaşmak için Schmidt Sertlik Belirleme Deneyleri dolaylı bir yöntem olarak ISRM (2007) tarafından önerilmektedir. Bu çalışmada kömür malzemesi zayıf özellikte olduğu için blok örnek seçimi zor olmuş ve sadece tek eksenli basma dayanımı deneyleri için belirli sayıda kömür blokları alınabilmektedir. Belirli bölgelerden alınabilen bloklardan elde edilen örnekler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basma

dayanımı deney sonuçlarının tüm bölge için geçerli olup olmadığı Schmidt Sertlik Belirleme deney sonuçları ile kontrol edilmeye çalışılmıştır.

4.1.1.3. Nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri

TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı ocağında, nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri için A1 uzun ayak panosu hazırlık galerisi ayak içerisinde 21 adet bölge belirlenmiştir. Bu bölgelerden alınan düzensiz şekilli örnekler üzerinde, nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deneyleri yapılmıştır. Belirlenen 21 adet bölgenin kömür ve ara kesme yüzeylerinden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen en düşük ve en yüksek düzeltilmiş nokta yükleme indeksi dayanımı değerleri ($I_{s(50)}$) Çizelge 4.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.4. Nokta Yükleme Dayanımı İndeks deneyi sonuçları

| BİRİM ÖLÇÜM BÖLGE NO | BİRİM ÖLÇÜM BÖLGE YÜZEY ALANI (m ²) | ÖRNEK ADEDİ | KÖMÜR | | | | ARA KESME | | | |
|----------------------|---|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | | Tabakaya Dik (⊥) | | Tabakaya Paralel (//) | | Tabakaya Dik (⊥) | | Tabakaya Paralel (//) | |
| | | | Min. $I_{s(50)}$ MPa | Max. $I_{s(50)}$ MPa | Min. $I_{s(50)}$ MPa | Max. $I_{s(50)}$ MPa | Min. $I_{s(50)}$ MPa | Max. $I_{s(50)}$ MPa | Min. $I_{s(50)}$ MPa | Max. $I_{s(50)}$ MPa |
| NYİ-1 | 6.974 | 45 | 0.23 | 0.77 | 0.10 | 0.61 | 0.12 | 1.35 | 0.13 | 1.46 |
| NYİ-2 | 7.608 | 57 | 0.11 | 2.64 | 0.02 | 0.46 | 0.12 | 1.76 | 0.09 | 1.97 |
| NYİ-3 | 7.938 | 20 | 0.18 | 2.29 | 0.08 | 1.04 | 0.68 | 1.24 | 0.44 | 1.13 |
| NYİ-4 | 15.593 | 26 | 0.16 | 0.98 | 0.02 | 0.36 | 0.54 | 1.90 | 0.47 | 2.02 |
| NYİ-5 | 14.260 | 24 | 0.04 | 0.13 | 0.06 | 0.13 | 0.97 | 1.25 | 0.32 | 1.17 |
| NYİ-6 | 19.800 | 22 | 0.05 | 1.22 | 0.04 | 1.67 | 0.14 | 1.43 | 0.28 | 1.04 |
| NYİ-7 | 18.150 | 27 | 0.06 | 0.37 | 0.10 | 0.24 | 0.17 | 1.82 | 0.14 | 1.37 |
| NYİ-8 | 19.800 | 30 | 0.07 | 0.41 | 0.04 | 0.20 | 0.24 | 1.52 | 0.07 | 0.88 |
| NYİ-9 | 18.000 | 27 | 0.05 | 1.44 | 0.10 | 0.63 | 0.21 | 1.15 | 0.15 | 0.99 |
| NYİ-10 | 16.800 | 32 | 0.11 | 0.46 | 0.18 | 0.58 | 0.35 | 4.04 | 0.57 | 2.24 |
| NYİ-11 | 18.200 | 34 | 0.12 | 3.40 | 0.09 | 1.41 | 0.14 | 0.60 | 0.10 | 0.44 |
| NYİ-12 | 17.360 | 31 | 0.10 | 0.52 | 0.07 | 0.29 | 0.27 | 0.58 | 0.11 | 0.64 |
| NYİ-13 | 17.415 | 20 | 0.10 | 0.50 | 0.17 | 0.31 | 0.21 | 0.39 | 0.26 | 0.30 |
| NYİ-14 | 17.125 | 34 | 0.12 | 0.52 | 0.13 | 0.47 | 0.26 | 1.63 | 0.13 | 1.58 |
| NYİ-15 | 12.500 | 30 | 0.11 | 0.92 | 0.13 | 1.10 | 0.10 | 1.55 | 0.18 | 0.95 |
| NYİ-16 | 11.500 | 32 | 0.14 | 0.87 | 0.07 | 0.46 | 0.12 | 1.20 | 0.24 | 1.16 |
| NYİ-17 | 12.420 | 32 | 0.05 | 0.52 | 0.07 | 0.38 | 0.62 | 1.73 | 0.11 | 0.40 |
| NYİ-18 | 12.788 | 32 | 0.08 | 0.78 | 0.06 | 0.50 | 0.04 | 1.18 | 0.19 | 2.13 |
| NYİ-19 | 13.386 | 32 | 0.05 | 2.76 | 0.07 | 4.29 | 0.27 | 3.93 | 0.49 | 3.50 |
| NYİ-20 | 12.760 | 32 | 0.02 | 0.43 | 0.07 | 0.36 | 0.28 | 1.79 | 1.64 | 3.45 |
| NYİ-21 | 13.860 | 32 | 0.06 | 1.60 | 0.05 | 3.45 | 0.17 | 2.16 | 0.16 | 0.71 |

Çizelge 4.4 dikkate alındığında, toplam 651 adet örnek üzerinde nokta yükleme dayanımı indeksi deneyi yapıldığı görülmektedir. Bu deneyler arasında, kömüre ait örnekler üzerinde yapılan deneylerde, zayıflık düzlemine dik olarak yapılan deneylere ait ortalama düzeltilmiş nokta yükleme indeksi değeri 0.58 MPa ve zayıflık düzlemine

paralel yapılan deneylerde ortalama düzeltilmiş nokta yükleme indeksi değerinin 0.45 olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak, kömüre ait nokta yükleme anizotropi indeksi değeri ($I_{a(50)}$) 1.29 olarak hesaplanmıştır. Sahada gerçekleştirilen toplam 651 adet örnek üzerine yapılan deneylerden kömür ile ilgili yapılmış nokta yükleme indeksi deneylerinin hesaplanan ortalama nokta yükleme indeksi değeri ($I_{s(50)}$), 0.51 MPa olarak belirlenmiştir.

Belirlenen 21 adet deney bölgesindeki ara kesmelerden alınan örnekler üzerinde yapılan deneylerde, zayıflık düzlemine dik olarak yapılan deneylerde, ortalama düzeltilmiş nokta yükleme indeksi değeri 0.91 MPa, zayıflık düzlemine paralel olarak yapılan deneylerde ise bu değer 0.85 olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak ara kesmelere ait nokta yükleme anizotropi indeksi değeri 1.07 olarak hesaplanmıştır. Ara kesmelere ait ortalama nokta yükleme indeks dayanım değeri 0.9 MPa olarak belirlenmiştir.

Nokta yükleme dayanım indeksi değerinin tek eksenli basma dayanımı değeri ile görgül ilişkisine yönelik birçok eşitlik mevcuttur. Bu eşitlikler arasında 2001 yılında Kahraman'ın önermiş olduğu eşitlik, özellikle kömür tabakalarına yönelik olduğundan hesaplamalarda bu eşitlik dikkate alınmıştır (Kahraman, 2001b) (Eşitlik 4.2).

$$UCS = 23.62 NYI - 2.69 \quad (4.2)$$

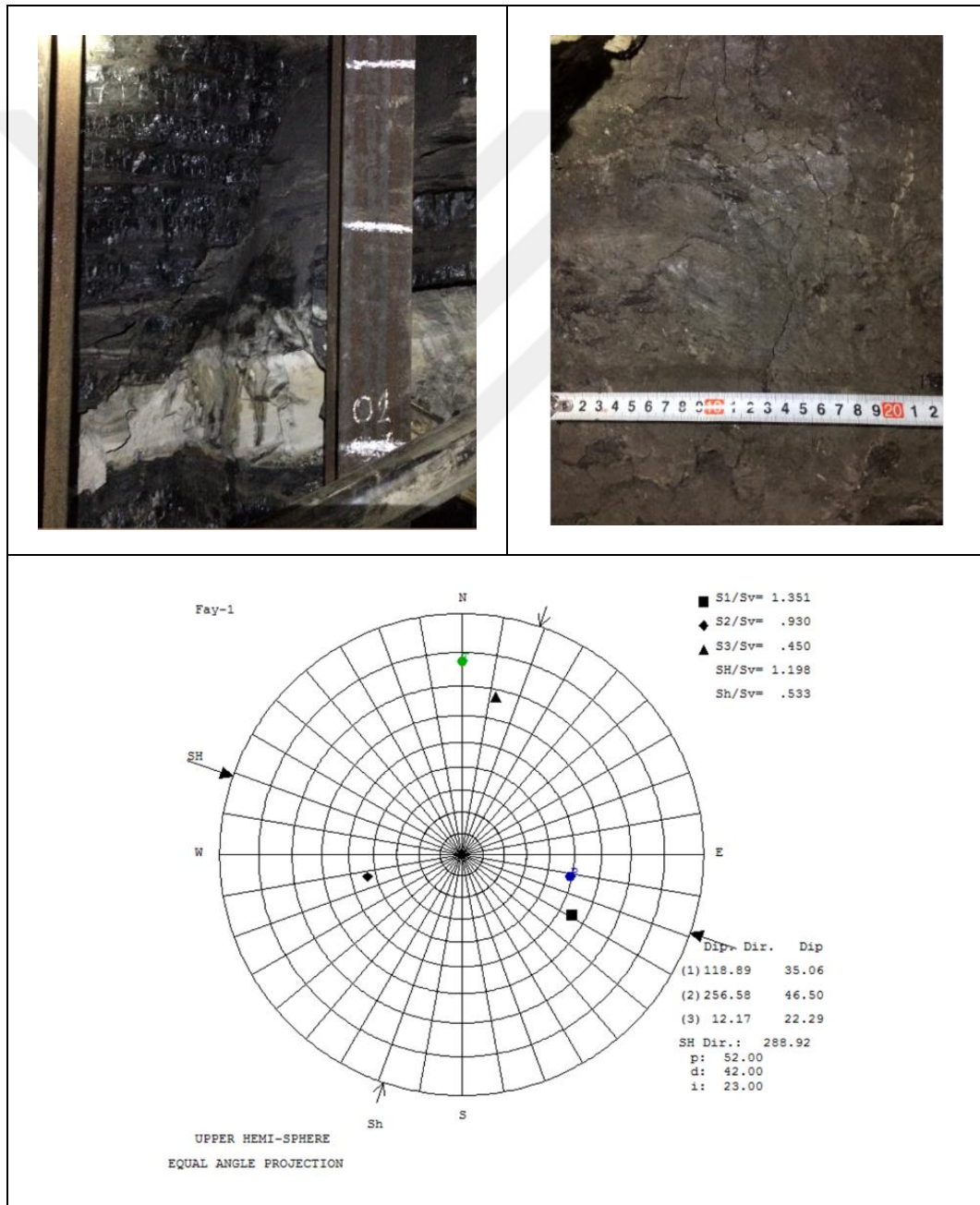
$$UCS = 23.62 \times (0.51) - 2.69 = 9.35 \text{ MPa}$$

Eşitlikte, UCS, tek eksenli basma dayanımı değerini, NYI ise düzeltilmiş nokta yükleme dayanım indeksi değerini temsil etmektedir. Kömür birimine ait nokta yükleme dayanımı deneylerinden elde edilen veriler ile kömür birimine ait tek eksenli basma dayanımı değerinin 9.35 MPa olduğu belirlenmiştir.

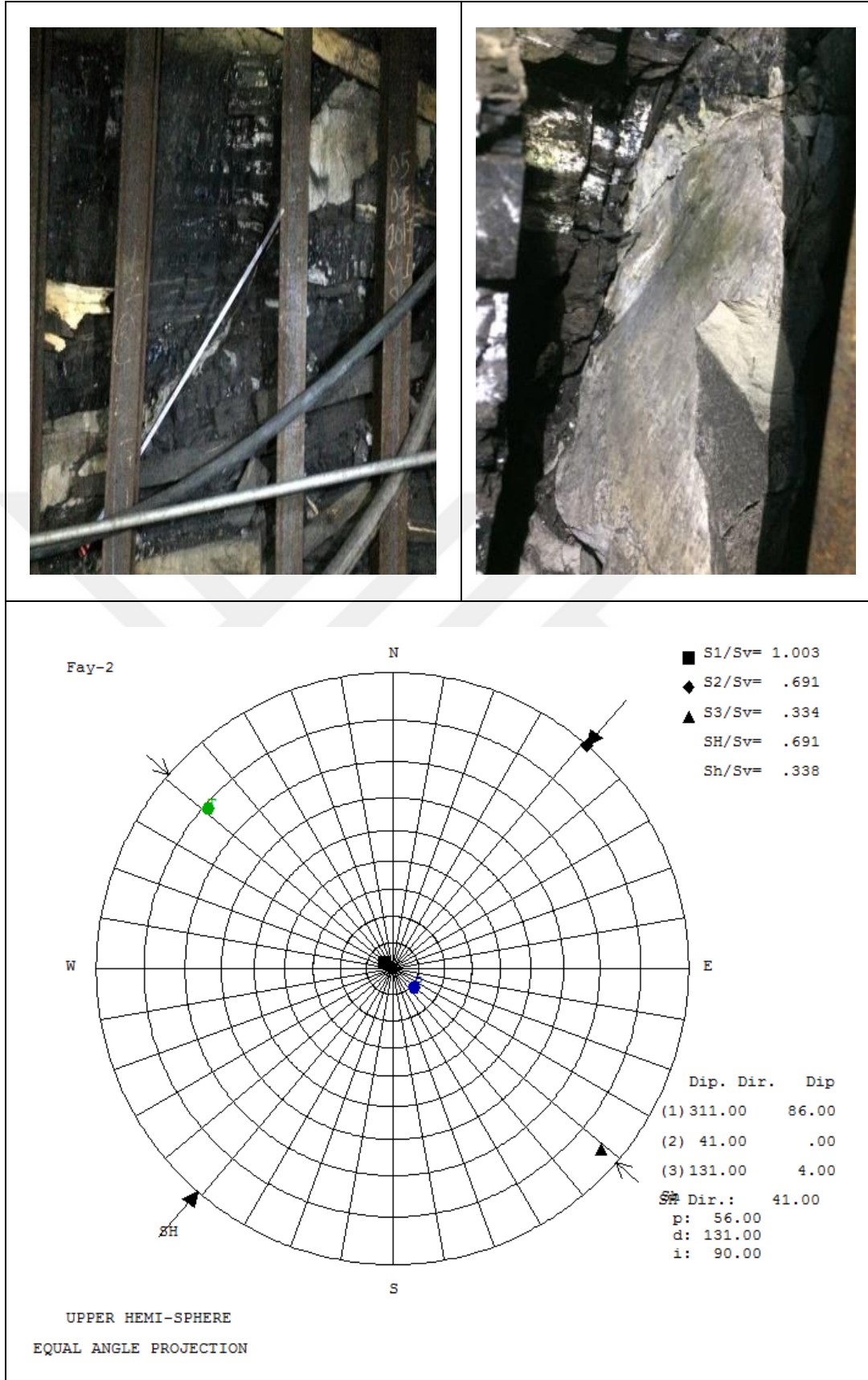
Bu çalışmada, kömür arınında belirlenen bölgelerde nokta yükleme indeks dayanımı deneyleri ile alansal olarak kömür malzemesinin dayanım değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Arından alınan kömür bloklarından elde edilen örnekler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı deney sonuçlarının tüm bölgeyi temsil edip etmediğini nokta yükleme indeks dayanımı deneylerinden elde edilen verilerin tek eksenli basma dayanımı ile ilişkisine ait sonuçları dikkate alınarak kontrol edilmeye çalışılmıştır.

4.1.1.4. Birincil arazi gerilmelerini belirleme çalışmalarına ait bulgular

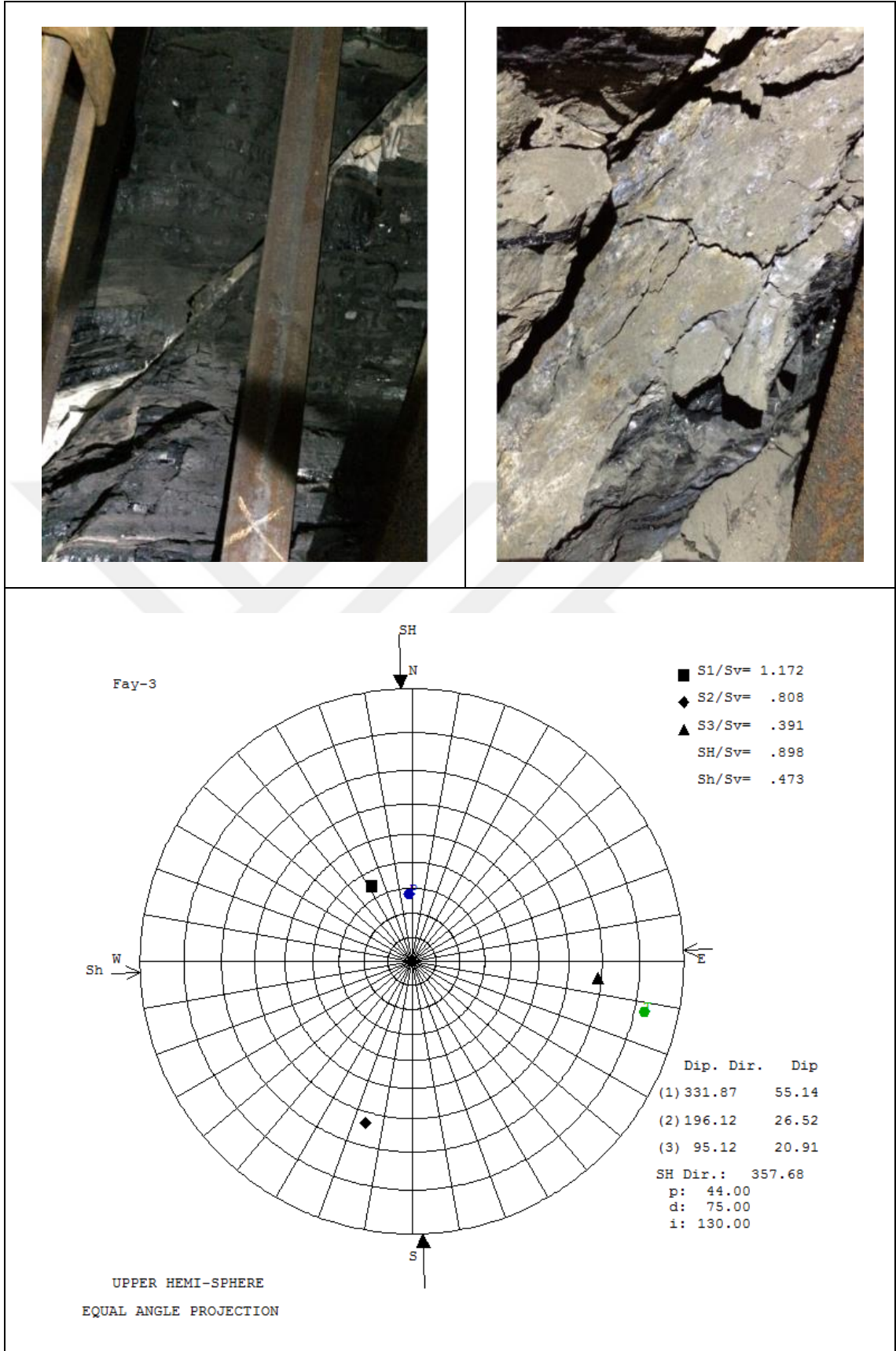
Yeraltı açıklıklarının duraylılık tahminlerinin gerçeğe yakın yapılabilmesi için kaya kütlelerinin mekanik özellikleri ve ortamın birincil gerilme ölçümü gereklidir (Geniş ve Aydan, 2007). Bu amaç doğrultusunda Ömerler yeraltı kömür madeninde, A1 uzunayak panosu içerisinde, birincil gerilme analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen birincil arazi gerilmelerini belirleme analizlerine ait sonuçlar Şekil 4.2 ile Şekil 4.5 arasında belirtilmiştir (Özkan, 2018).



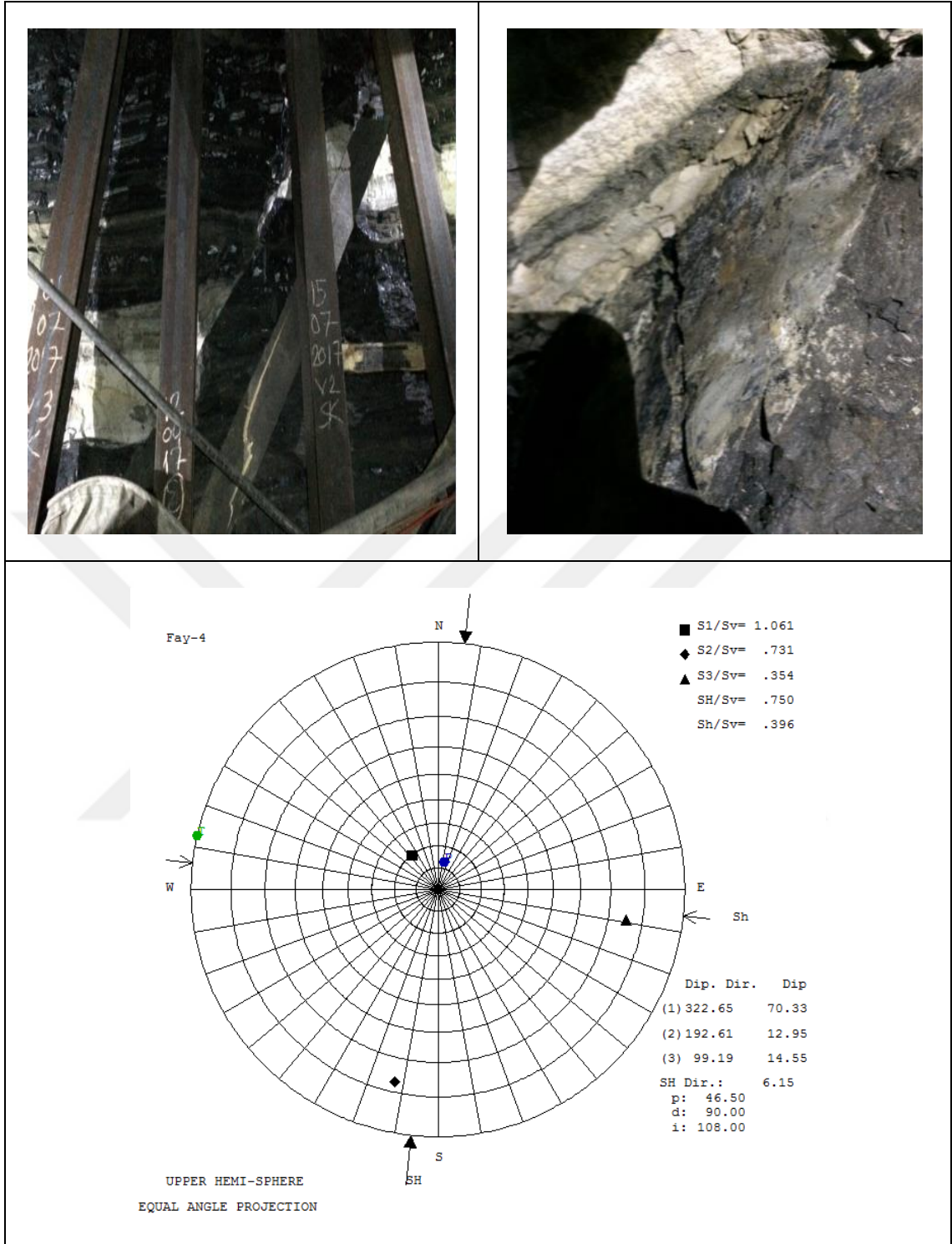
Şekil 4.2. A1 panosu ayak içerisinde belirlenen 1. Fay noktası ve analiz çıktısı



Şekil 4.3. A1 panosu ayak içerisinde belirlenen 2. Fay noktası ve analiz çıktısı



Şekil 4.4. A1 panosu ayak içerisinde belirlenen 3. Fay noktası ve analiz çıktısı



Şekil 4.5. A1 panosu ayak içerisinde belirlenen 4. Fay noktası ve analiz çıktısı

Birincil arazi gerilmelerini belirlemeye yönelik Aydın (2000) tarafından önerilen fay çizigi yaklaşımı dikkate alarak Prof. Dr. Melih Geniş tarafından gerçekleştirilen analizler neticesinde elde edilen birincil gerilme analizi tahmin sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Sunulan sonuçlardan görüldüğü üzere 3 ve 4 nolu faylar birbirlerine yakın sonuç vermiştir. 3 ve 4 nolu faylardan yapılan çözümlemelerde en büyük yatay gerilme

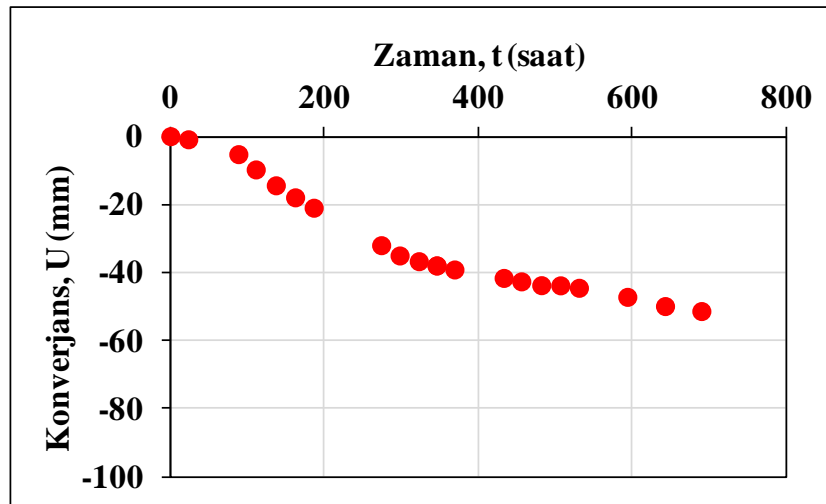
yaklaşık olarak kuzey-güney doğrultuludur. Sonuç olarak, 300 metre derinde konumlanan A1 panosunda en büyük yatay birincil gerilmenin ($P_H = 6.74$ MPa) tabanyolu eksenine paralel olarak konumlandığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Birincil gerilme tahminleri (Özkan, 2018)

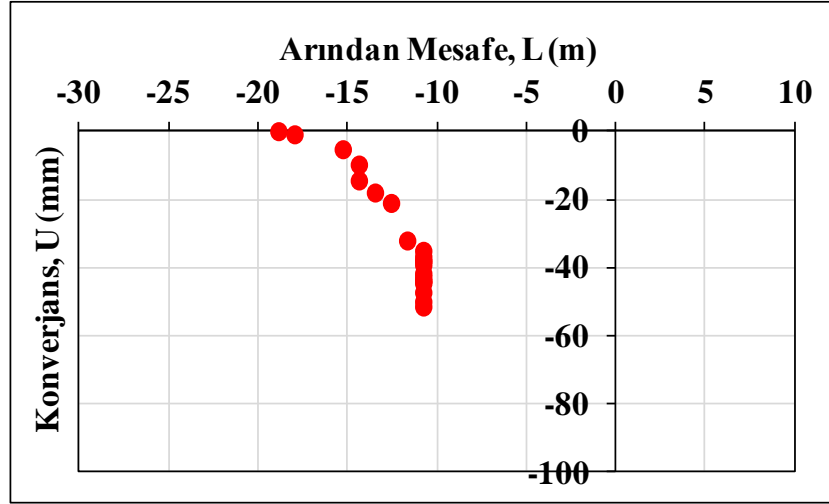
| Fay No | $K_H = P_H/P_V$ | $K_H = P_h/P_v$ | h (derinlik, m) | P_V (MPa) | P_H (MPa) | P_h (MPa) | P_H (°) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1 | 1.198 | 0.533 | 300 | Değerlendirme yapılmadı | | | 288.92 |
| 2 | 0.691 | 0.338 | 300 | Değerlendirme yapılmadı | | | 41.00 |
| 3 | 0.898 | 0.473 | 300 | 7.5 | 6.74 | 3.55 | 357.68 |
| 4 | 0.750 | 0.396 | 300 | 7.5 | 5.63 | 2.97 | 6.15 |

4.1.1.5. Konverjans ve taban kabarması ölçümleri

Doktora tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen saha çalışmalarında A1 ve A2 uzunayak panolarına ait taban yollarına kurulan konverjans ve taban kabarması ölçüm istasyonlarından (Bknz. Bölüm 3.3.5) sistematik olarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Konverjans ölçüm istasyonlarından, A2 uzunayak kömür arınının ilerlemesine bağlı olarak toplam 30 gün boyunca ölçümler gerçekleştirilmiş ve bu ölçümlerden elde edilen verilerle oluşturulan grafiklere tipik birer örnek Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sunulmuştur. Taban kabarması ölçüm istasyonlarından toplam 30 gün boyunca ölçümler alınmış ve bu ölçümlerden elde edilen verilerle oluşturulan grafiklere tipik bir örnek Şekil 4.8’de sunulmuştur.



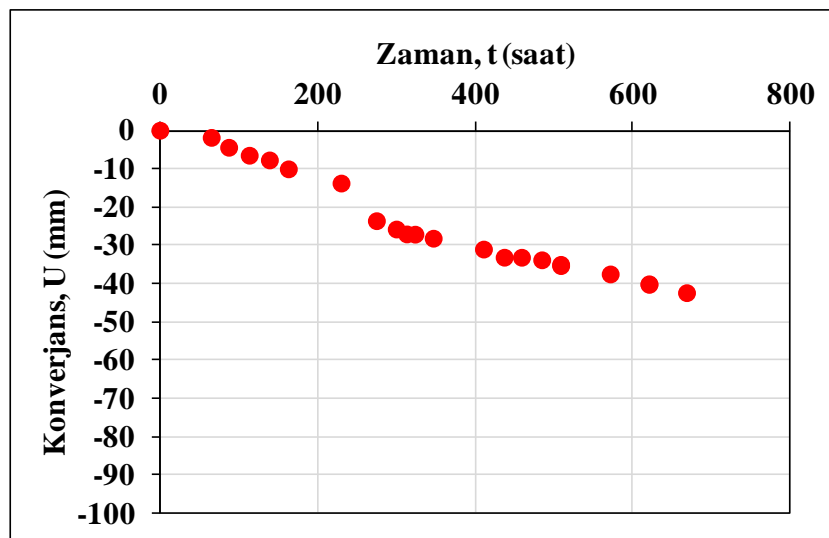
Şekil 4.6a. A2-K1 konverjans istasyonundan ölçülen tavan-taban kapanma davranışı zamana bağlı konverjans ölçüm sonucu



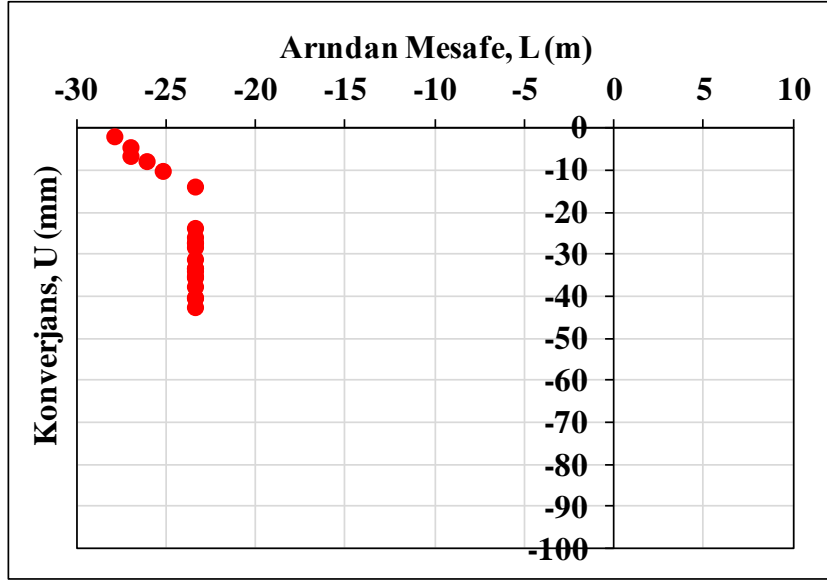
Şekil 4.6b. A2-K1 konverjans istasyonundan ölçülen tavan-taban kapanma davranışı uzunayak arın ilerlemesine bağlı konverjans ölçüm sonucu

Şekil 4.6 dikkate alındığında, 30 gün (720 saat) boyunca yapılan konverjans ölçümleri sonucunda, ayak üretim bölgesine en yakın olan A2-K1 konverjans istasyonunda yaklaşık 50 mm'lik bir kapanma görülmektedir. Şekil 4.6b dikkate alındığında ise bu 50 mm'lik kapanmanın olduğu sırada ayağın konverjans istasyonuna doğru 9 m'lik arın kazısı ile yaklaşmasıyla oluştuğu görülmektedir.

Şekil 4.7'de üretim yapılan ayak içine 40 metre mesafede olan A2-K2 konverjans ölçüm istasyonuna ait konverjans ölçüm sonuçları görülmektedir. A2-K1 ile aralarında 15 metrelik mesafe olan A2-K2 ölçüm istasyonunda 30 günlük ölçüm süresince yaklaşık 44 mm'lik bir kapanma olduğu görülmektedir.



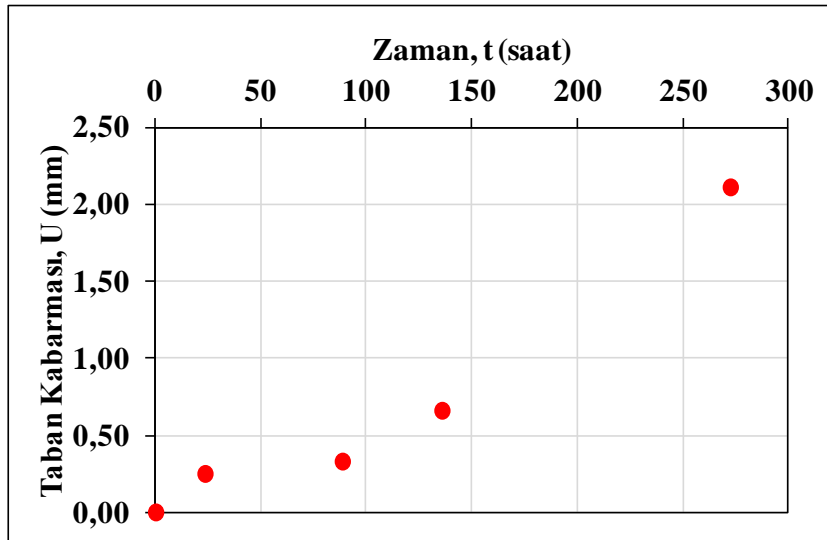
Şekil 4.7a. A2-K2 konverjans istasyonundan ölçülen tavan-taban kapanma davranışı Zamana bağlı konverjans ölçüm sonucu



Şekil 4.7b. A2-K2 konverjans istasyonundan ölçülen tavan-taban kapanma davranışı Uzunayak arın ilerlemesine bağlı konverjans ölçüm sonucu

Şekil 4.7b dikkate alındığında ayak kazısının, ayak içine 50 m mesafede olan A2-K2 konverjans istasyonuna doğru 7 m'lik arın kazısı ile yaklaşması sonucu konverjans istasyonunda yaklaşık 44 mm'lik bir kapanma olduğu görülmektedir.

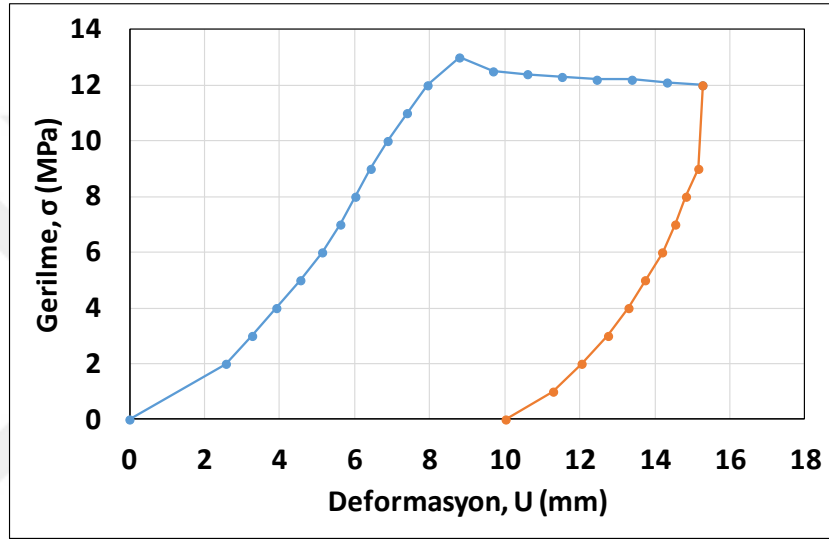
Şekil 4.8'de A2-TK2 taban kabarması istasyonundan 11 gün boyunca alınan ölçümlerden bu istasyonda yaklaşık olarak 2.2 mm'lik bir kabarma olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. A2-TK2 taban kabarması istasyonundan ölçülen taban kabarma davranışı

4.1.1.6. Plaka yükleme deneyleri

Ömerler yeraltı kömür madeninde, plaka yükleme deneyleri amacıyla açılan Prof. Dr. Erdal Ünal test galerisinde gerçekleştirilen deneyler, arında ve yan duvarlarda 3 kez tekrarlanacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda 5 kişi görev almıştır. Hidrolik pompada oluşturulan her bir birim basınç artışında ya da azalışında deformasyon değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmada deney süreci yükleme ve yük boşaltma süreçlerinden oluşmuştur. Bu deneylere ait tipik bir örnek Şekil 4.9’da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Plaka yükleme deneyinden elde edilen deformasyon – gerilme davranışı

Sunulan grafikten görüldüğü üzere, kömür malzemesi yerinde en yüksek 13 MPa gerilmeye kadar deforme (9 mm) olabilmekte daha sonra ise gerilme artışına dayanamayıp deformasyona devam etmektedir. Laboratuvarda küp örnekler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı deney sonuçlarının 4-12 MPa arasında değiştiği dikkate alınırsa kömürün yerinde benzer dayanım değerlerine çıkabildiği söylenebilir.

Şekil 4.9’da sunulan grafikte, +x eksenindeki deformasyon değerleri, deney esnasında, düşey yük altında sıkıştığını gözlemlediğimiz 125 mm’lik yükseklik değerine bölünmüştür (Bknz. Şekil 3.29). Böylelikle düşey birim deformasyon değerleri hesaplanmıştır. Yükleme aşaması ve yük boşaltma aşamalarında, eğrilerin eğimleri dikkate alınarak, elastik modül değerlerinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, yükleme aşaması için ve yük boşaltma aşaması için, elastik modül değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, her iki değerlerin ortalaması alınarak plaka

yükleme deney sonucuna dayalı kömür kütlelerine ait elastik modül (E_m) değerinin ortalama 302 MPa olduğu belirlenmiştir.

4.1.2. Laboratuvar çalışmalarına ait bulgular

Doktora tez çalışmaları kapsamında, Ömerler yeraltı kömür madeninde A1 ve A2 uzunayak panolarından alınan 50 adet kömür bloğundan elde edilen kömür numuneleri üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara ait bilgiler bu bölümde sunulmuştur.

4.1.2.1. Yoğunluk-birim hacim ağırlık-doğal nem içeriği-gözeneklilik (boşluk oranı) ve ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri

Laboratuvar ortamında hazırlanan düzgün şekilli küp örnekler üzerinde, kömür malzemesinin yoğunluk-birim hacim ağırlık, su içeriği ve gözenek yapısı ayrıca ağırlık ve hacimce su emme oranını belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kömüre ait fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deneylere ait hazırlanan örnek bilgileri ve deney sonuçları Çizelge 4.6-4.8 arasında belirtilmiştir.

Çizelge 4.6. Yoğunluk ve birim hacim ağırlık için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları

| ÖRNEK NO | ÖRNEK. BÖLG. | KENAR UZUNLUĞU | HACİM | ÖRNEK AĞIRLIĞI | KURU AĞIRLIK | DOĞAL YOĞ. | KURU YOĞ. | DOĞAL BİRİM HACİM AĞIRLIK | KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK |
|------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|--|
| | | a x b x c (mm) | V (cm ³) | W (gr) | W _d (gr) | ρ (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) | $\gamma = 9.81 \times \rho$ (kN/m ³) | $\gamma = 9.81 \times \rho$ (kN/m ³) |
| 1 | A1 Pano 3 no'lu sandık | 35.4 x 35.18 x 34.08 | 42.44 | 54.1 | 49.1 | 1.27 | 1.16 | 12.50 | 11.35 |
| 2 | A1 Pano 19 no'lu sandık | 35.53 x 35.92 x 34.42 | 43.93 | 54.6 | 50.3 | 1.24 | 1.15 | 12.19 | 11.23 |
| 3 | A1 Pano 6 no'lu sandık | 35.10 x 35.40 x 34.53 | 42.90 | 54.1 | 50.1 | 1.26 | 1.17 | 12.37 | 11.46 |
| 4 | A2 Pano 9 no'lu sandık | 34.95 x 35.30 x 35.05 | 43.24 | 55.6 | 51.7 | 1.29 | 1.20 | 12.61 | 11.73 |
| 5 | A2 Pano 24 no'lu sandık | 35.75 x 35.10 x 34.97 | 43.88 | 55.2 | 51.3 | 1.26 | 1.17 | 12.34 | 11.47 |
| Ortalama | | | | | | 1.26 | 1.17 | 12.40 | 11.45 |
| Std.Sapma | | | | | | ±0.01 | ±0.02 | ±0.13 | ±0.16 |

Çizelge 4.7. Gözeneklilik ve boşluk hacmi tayinini belirlemek için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları

| ÖRNEK NO | ÖRNEKLEME BÖLGESİ | KENAR UZUNLUĞU | HACİM | KURU AĞIRLIK | SUYA DOYGUN AĞIRLIK | BOŞLUKLARIN HACMİ $V_v = (W_s - W_d) / \rho_w$ | GÖZENEKLİLİK $n = (V_v / V) \times 100$ | BOŞLUK ORANI $e = n / (100 - n)$ |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---|--|-------------------------------------|
| | | a x b x c (mm) | V (cm ³) | W _d (gr) | W _s (gr) | V _v (cm ³) | n (%) | e (-) |
| A-1 | A1 Pano 3 no'lu sandık | 35.4 x 35.18 x 34.08 | 42.44 | 49.1 | 54.9 | 5.8 | 13.67 | 0.16 |
| A-2 | A1 Pano 19 no'lu sandık | 35.53 x 35.92 x 34.42 | 43.93 | 50.3 | 56.4 | 6.1 | 13.89 | 0.16 |
| A-3 | A1 Pano 6 no'lu sandık | 35.10 x 35.40 x 34.53 | 42.90 | 50.1 | 55.7 | 5.6 | 13.05 | 0.15 |
| A-4 | A2 Pano 9 no'lu sandık | 34.95 x 35.30 x 35.05 | 43.24 | 51.7 | 57.3 | 5.6 | 12.95 | 0.15 |
| A-5 | A2 Pano 24 no'lu sandık | 35.75 x 35.10 x 34.97 | 43.88 | 51.3 | 57.2 | 5.9 | 13.45 | 0.16 |
| Ortalama | | | | | | | 13.40 | 0.15 |
| Std. Sapma | | | | | | | ±0.36 | ±0.005 |

Çizelge 4.8. Doğal nem içeriğini belirlemek için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları

| ÖRNEK NO | ÖRNEKLEME BÖLGESİ | KAP AĞIRLIĞI | KAP+DOĞAL NEMLİ ÖRNEK AĞIRLIĞI | KAP + KURUTULMUŞ ÖRNEK AĞIRLIĞI | DOĞAL NEM İÇERİĞİ $W = (B - C) / (C - A) * 100$ |
|-------------------|-------------------------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|--|
| | | A (gr) | B (gr) | C (gr) | (%) |
| A-1 | A1 Pano 7 no'lu sandık | 3.2 | 191.5 | 175.6 | 9.22 |
| A-2 | A1 Pano 14 no'lu sandık | 3.1 | 315.1 | 271.5 | 16.24 |
| A-3 | A1 Pano 20 no'lu sandık | 3.1 | 213.5 | 195.2 | 9.53 |
| A-4 | A2 Pano 7 no'lu sandık | 3.1 | 351.6 | 322.4 | 9.15 |
| A-5 | A2 Pano 8 no'lu sandık | 3.1 | 382.1 | 338.5 | 13.00 |
| Ortalama | | | | | 11.43 |
| Std. Sapma | | | | | ±2.81 |

Çizelge 4.9. Ağırlıkça ve hacimce su emme belirleme deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları

| ÖRNEK NO | ÖRNEKLEME BÖLGESİ | KENAR UZUNLUĞU | HACİM | KURU AĞIRLIK | SUYA DOYGUN AĞIRLIK | AĞIRLIKÇA SU EMME ORANI $AW = ((W_s - W_d) / W_d) \times 100$ | HACİMCE SU EMME ORANI $HW = ((W_s - W_d) / V) \times 100$ |
|------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--|--|
| | | a x b x c (mm) | V (cm ³) | W _d (gr) | W _s (gr) | AW (%) | HW (%) |
| A-1 | A1 Pano 3 no'lu sandık | 35.4 x 35.18 x 34.08 | 42.44 | 49.1 | 54.9 | 11.81 | 13.67 |
| A-2 | A1 Pano 19 no'lu sandık | 35.53 x 35.92 x 34.42 | 43.93 | 50.3 | 56.4 | 12.13 | 13.89 |
| A-3 | A1 Pano 6 no'lu sandık | 35.10 x 35.40 x 34.53 | 42.90 | 50.1 | 55.7 | 11.18 | 13.05 |
| A-4 | A2 Pano 9 no'lu sandık | 34.95 x 35.30 x 35.05 | 43.24 | 51.7 | 57.3 | 10.83 | 12.95 |
| A-5 | A2 Pano 24 no'lu sandık | 35.75 x 35.10 x 34.97 | 43.88 | 51.3 | 57.2 | 11.50 | 13.45 |
| Ortalama | | | | | | 11.49 | 13.40 |
| Std.Sapma | | | | | | ±0.46 | ±0.36 |

Kömür malzemesinin doğal ve kuru yoğunluk değerleri $1.26 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ve $1.17 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca doğal ve kuru birim hacim ağırlık değerleri $12.40 \pm 0.13 \text{ kN/m}^3$ ve $11.45 \pm 0.16 \text{ kN/m}^3$, doğal nem içeriği $\%11.43 \pm 2.81$, gözenek ve boşluk oranı değerlerinin sırası ile $\%13.40 \pm 0.36$, 0.15 ± 0.005 olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca kömür malzemesinin ağırlıkça su emme oranı ve hacimce su emme oranlarının sırasıyla $\%11.49 \pm 0.46$ ve $\%13.40 \pm 0.36$ seviyesinde olduğu anlaşılmıştır.

4.1.2.2. Suda dağılma dayanımı belirleme deneyleri

ISRM (1981, 2007)'nin önerdiği deney yöntemi doğrultusunda hazırlanan, her biri 40-60 gr arasında toplam 4 set olmak üzere ve her set 10'ar adet olacak şekilde küresel örnekler üzerinde suda dağılma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çeşme suyu kullanılarak hazırlanan deney kabında 2 çevrim ile ağırlıkça malzeme kayıpları belirlenerek yüzde cinsinden (%) I_{d1} ve I_{d2} değerleri belirlenmiştir. Hazırlanan örneklerle ait bilgiler ve deney sonuçları Çizelge 4.10'da sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Suda dağılma dayanımı belirleme deney sonuçları

| TAMBUR NO | ÖRNEKLEME BÖLGESİ | ÖRNEK ADEDİ | DENEY SIVISININ SICAKLIĞI (°C) | I_{d1} (%) | I_{d2} (%) | SINIFLAMA |
|------------------|--|-------------|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | A1 Pano 3-6 ve A2 Pano 1-8 no'lu sandıklar | 10 | 20 | 92.34 | 86.79 | Orta-Yüksek |
| 2 | A1 Pano 6-15 ve A2 Pano 15-18 no'lu sandıklar | 10 | 20 | 96.92 | 93.79 | Orta-Yüksek |
| 3 | A1 Pano 15-20 ve A2 Pano 15-18 no'lu sandıklar | 10 | 20 | 98.60 | 97.56 | Yüksek |
| 4 | A1 Pano 15-20 ve A2 Pano 18-24 no'lu sandıklar | 10 | 20 | 96.62 | 85.84 | Orta-Yüksek |
| Ortalama | | | | 96.12 | 91.00 | Orta-Yüksek |
| Std.Sapma | | | | ± 2.31 | ± 4.88 | |

Sunulan çizelgeden görüldüğü üzere kömür malzemesinin suda dağılma dayanım değerleri sırası ile $I_{d1} = \%96.12 \pm 2.31$ ve $I_{d2} = \%91.0 \pm 4.81$ olduğu anlaşılmıştır. ISRM (1981, 2007) sınıflamasına göre kömür malzemesinin suya dayanım karakterinin Orta-Yüksek sınıfında olduğu belirlenmiştir.

4.1.2.3. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri

A1 uzunayak panosunda gerçekleştirilen yerinde nokta yükleme dayanım indeksi deneylerinin yanında Ömerler yeraltı ocağında A1 ve A2 uzunayak panolarından alınan 50 adet kömür blok sandığı, kaya mekaniği deneyleri çalışmaları yapılmak üzere numune

alma çalışmalarına tabi tutulmuştur. Kaya mekaniği deneyleri için farklı boyut ve şekillerde düzgün şekilli numune alma işlemleri tamamlandıktan sonra, mevcut tüm blok sandıkları içerisinde değerlendirilebilecek düzensiz şekilli kömür numunelerine laboratuvarda nokta yükleme dayanım indeksi deneyleri yapılmıştır. Yapılan tüm bu deneylere ait örnek bilgileri ve deney sonuçları Çizelge 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Nokta yükleme dayanım indeksi belirleme deney sonuçları

| SANDIK NO | ÖRNEK ADEDİ | KÖMÜR | | | |
|-----------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | Tabakaya Dik (L) | | Tabakaya Paralel (//) | |
| | | Min. $I_{S(50)}$ (MPa) | Max. $I_{S(50)}$ (MPa) | Min. $I_{S(50)}$ (MPa) | Max. $I_{S(50)}$ (MPa) |
| A1-5 | 10 | 0.24 | 0.70 | 0.12 | 0.58 |
| A1-6 | 7 | 0.43 | 0.90 | 0.26 | 0.26 |
| A1-7 | 10 | 0.16 | 0.48 | 0.46 | 0.77 |
| A1-8 | 10 | 0.26 | 0.46 | 0.06 | 0.57 |
| A1-10 | 10 | 0.17 | 0.80 | 0.10 | 0.60 |
| A1-14 | 4 | 0.35 | 0.35 | 0.25 | 0.25 |
| A1-15 | 6 | 0.47 | 0.68 | 0.30 | 0.43 |
| A1-18 | 3 | 0.18 | 0.32 | 0.06 | 0.06 |
| A1-19 | 9 | 0.38 | 1.07 | 0.11 | 0.63 |
| A1-23 | 7 | 0.33 | 0.47 | 0.15 | 0.15 |
| A1-24 | 5 | 0.41 | 0.45 | 0.44 | 0.57 |
| A2-1 | 11 | 0.28 | 0.39 | 0.16 | 0.53 |
| A2-2 | 7 | 0.36 | 0.57 | 0.14 | 0.29 |
| A2-9 | 10 | 0.50 | 0.68 | 0.32 | 1.13 |
| A2-13 | 8 | 0.24 | 0.54 | 0.18 | 0.36 |
| A2-25 | 6 | 0.14 | 0.28 | 0.12 | 0.40 |

Çizelge 4.11 incelendiğinde dikkate alındığında, toplam 123 adet örnek üzerinde nokta yükleme dayanım indeksi deneyi yapıldığı görülmektedir. Bu deneyler arasında, zayıflık düzlemine dik olarak yapılan deneylere ait ortalama düzeltilmiş nokta yükleme indeksi değeri 0.43 MPa ve zayıflık düzlemine paralel yapılan deneylerde ortalama düzeltilmiş nokta yükleme indeksi değerinin 0.35 olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak, kömür birimine ait nokta yükleme anizotropi indeksi değeri ($I_{a(50)}$) 1.23 olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar ortamında 123 örnek üzerinde gerçekleştirilen nokta yükleme dayanım deneyinden elde edilen değerlerin ortalaması alındığında bu değer 0.42 MPa olduğu belirlenmiştir.

A1 uzunayak pano kazı arınında gerçekleştirilen ve Bölüm 4.1.1.3’te verilen nokta yükleme indeks dayanım değerinin 0.51 MPa olduğu belirtilmiştir. Bloklardan temin edilen ve bu bölümde sunulan nokta yükleme dayanım indeksi deney sonucu olan 0.41 MPa değerinin genel olarak saha çalışmalarından elde edilen sonuca yakın olduğu görülmektedir.

Nokta yükleme dayanım indeksi değeri ile tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişkiye yönelik 2001 yılında Kahraman'ın önerdiği eşitlik dikkate alınarak (Eşitlik 4.2) nokta yükleme dayanımı deneylerinden elde edilen veriler ile kömür birimine ait tek eksenli basma dayanımı değerinin 7.23 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu deneysel çalışmalarda kullanılan kömür bloklarından alınan küp örneklerin tek eksenli basma dayanımı deney sonuçları ile nokta yükleme indeks dayanımı deney sonuçlarının ilişkisi görülmeye çalışılmıştır.

4.1.2.4. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı belirleme deneyleri

ISRM (1981, 2007) önerisi doğrultusunda hazırlanan disk şeklinde örnekler üzerinde dolaylı çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Servo Kontrollü 600 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme hızı 200 N/sn seçilmiştir (ISRM 1981, 2007). Hazırlanan örneklere ait bilgiler ve deney sonuçları Çizelge 4.12'de sunulmuştur. Sunulan çizelgeden görüldüğü üzere kömür malzemesinin dolaylı çekme (Brazilian) dayanım değerinin $\sigma_t = 2.30 \pm 0.30$ MPa olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 4.12. Dolaylı çekme (Brazilian) dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları

| Örnek No | Örneklem Bölgesi | Çap | Kalınlık | Yükleme Hızı | Yükleme Süresi | Yükleme Yönü | Yenilme Yüğü | Çekme Dayanımı | Çekme Dayanımı |
|-------------------|-------------------------|--------|----------|--------------|----------------|------------------|--------------|----------------|----------------|
| | | D (mm) | t (mm) | (N/sn) | (sn) | | F (kN) | σ (MPa) | σ (MPa) |
| A1-1 | A1 Pano 1 no'lu sandık | 53.51 | 32.92 | 200 | 15-30 | Takaya dik | 6.62 | 2.39 | 2.50 |
| A1-2 | A1 Pano 1 no'lu sandık | 53.11 | 32.98 | 200 | 15-30 | | 11.81 | 4.29 | |
| A1-3 | A1 Pano 3 no'lu sandık | 54.02 | 33.51 | 200 | 15-30 | | 3.78 | 1.33 | |
| A1-4 | A1 Pano 3 no'lu sandık | 54.05 | 35.03 | 200 | 15-30 | | 7.68 | 2.58 | |
| A1-5 | A1 Pano 10 no'lu sandık | 53.49 | 33.11 | 200 | 15-30 | | 5.39 | 1.94 | |
| A1-6 | A1 Pano 10 no'lu sandık | 51.05 | 34.99 | 200 | 15-30 | Tabakaya paralel | 8.31 | 2.96 | 2.09 |
| A1-7 | A1 Pano 10 no'lu sandık | 53.52 | 33.02 | 200 | 15-30 | | 5.21 | 1.88 | |
| A1-8 | A1 Pano 16 no'lu sandık | 53.54 | 33.06 | 200 | 15-30 | | 7.53 | 2.71 | |
| A1-9 | A1 Pano 16 no'lu sandık | 54.01 | 34.02 | 200 | 15-30 | | 1.89 | 0.65 | |
| A1-10 | A1 Pano 19 no'lu sandık | 53.52 | 33.99 | 200 | 15-30 | | 6.52 | 2.28 | |
| Ortalama | | | | | | | | | 2.30 |
| Std. Sapma | | | | | | | | | ± 0.93 |

4.1.2.5. Tek eksenli basma dayanımı belirleme deneyleri

Laboratuvar koşullarında hazırlanan küp şeklinde örnekler üzerinde tek eksenli basma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde servo kontrollü 600 kN

kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme hızı 0.5-1 MPa/sn aralığından seçilmiştir (ISRM 1981, 2007). Hazırlanan örnekler için bilgiler ve deney sonuçları sırası ile aşağıda sunulmuştur (Çizelge 4.13-4.15). Elde edilen bu sonuçların A1 ve A2 panolarından alınan blok sandığı bölgelerine göre dağılımları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.13. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları (5 cm'lik küp linyit numuneleri)

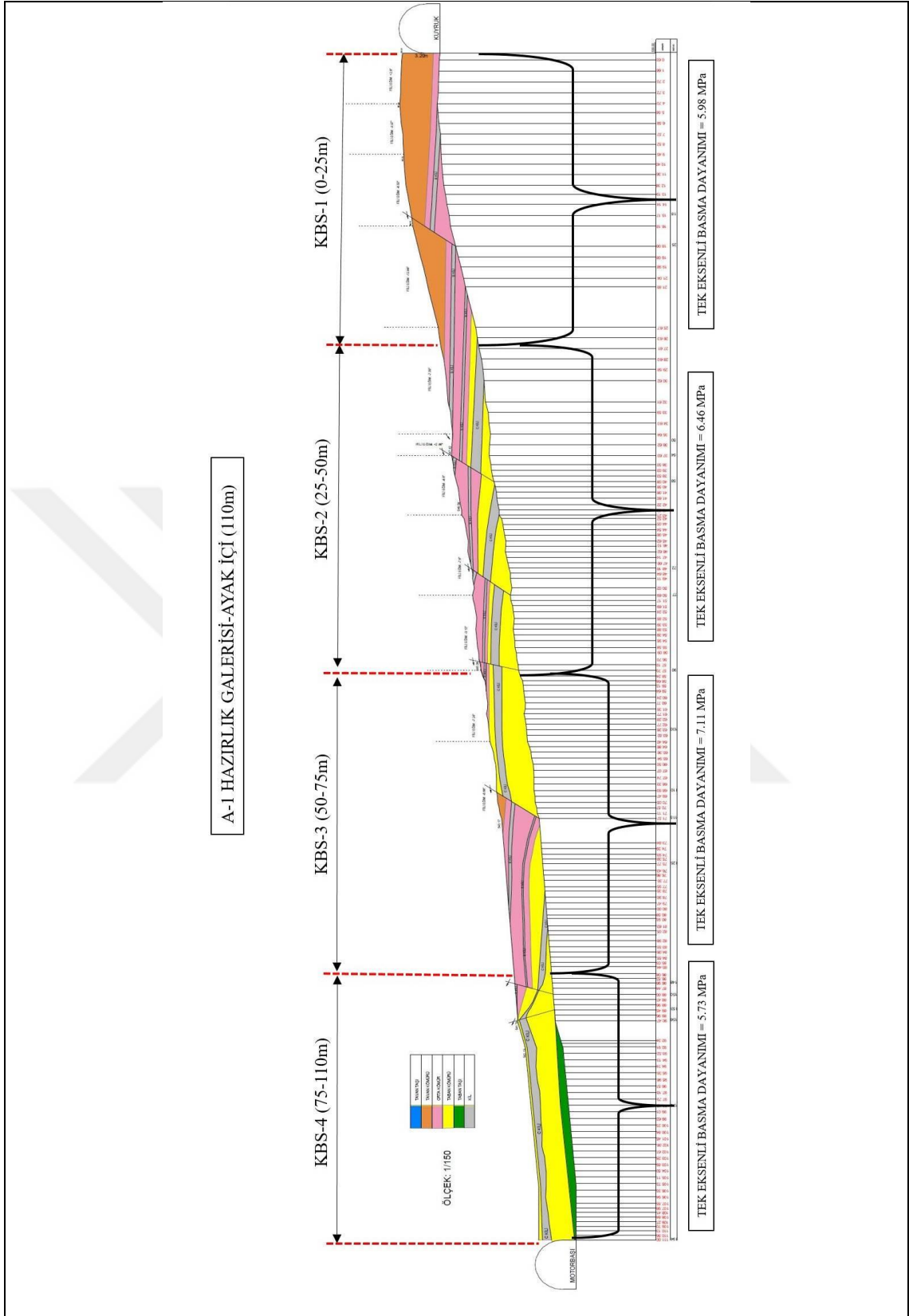
| Örnek No | Örnek Bölgesi | Kesit Alanı | Yükleme Hızı | Yükleme Yönü | Yenilme Yüğü | Yenilme Açısı | Tek Eksenli Basma Dayanımı |
|-------------------|------------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| | | A (m ²) | (MPa/sn) | | F (kN) | (°) | σ_c (MPa) |
| A2-5/1 | A2 Pano 5 Nolu Sandık | 0.002035 | 0.75 | Tabakalara dik | 16.60 | 65 | 8.16 |
| A2-5/2 | A2 Pano 5 Nolu Sandık | 0.001656 | 0.75 | Tabakalara dik | 15.94 | 50 | 9.62 |
| A2-5/3 | A2 Pano 5 Nolu Sandık | 0.002040 | 0.75 | Tabakalara dik | 9.11 | 52 | 8.47 |
| A2-5/4 | A2 Pano 6 Nolu Sandık | 0.002505 | 0.75 | Tabakalara dik | 28.72 | 73 | 11.47 |
| A2-5/5 | A2 Pano 7 Nolu Sandık | 0.001665 | 0.75 | Tabakalara dik | 38.26 | 46 | 12.98 |
| A2-5/6 | A2 Pano 7 Nolu Sandık | 0.001656 | 0.75 | Tabakalara paralel | 33.28 | 88 | 20.09 |
| A2-5/7 | A2 Pano 7 Nolu Sandık | 0.002510 | 0.75 | Tabakalara paralel | 38.89 | 84 | 15.49 |
| A2-5/8 | A2 Pano 8 Nolu Sandık | 0.001660 | 0.75 | Tabakalara paralel | 12.44 | 68 | 7.49 |
| A2-5/9 | A2 Pano 8 Nolu Sandık | 0.001660 | 0.75 | Tabakalara paralel | 9.42 | 61 | 9.67 |
| A2-5/10 | A2 Pano 12 Nolu Sandık | 0.001648 | 0.75 | Tabakalara paralel | 10.92 | 55 | 9.62 |
| Ortalama | | | | | | | 11.31 |
| Std. Sapma | | | | | | | ±3.92 |

Çizelge 4.14. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları (7 cm'lik küp linyit-ara kesme)

| Örnek No | Örnek Bölgesi | Kesit Alanı | Yükleme Hızı | Yükleme Yönü | Yenilme Yüğü | Yenilme Açısı | Tek Eksenli Basma Dayanımı |
|-------------------|------------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| | | A (m ²) | (MPa/sn) | | F (kN) | (°) | σ_c (MPa) |
| 1 | A1 Pano 8 Nolu Sandık | 0.005884 | 0.5 | Tabakalara paralel | 54.23 | 77 | 9.22 |
| 2 | A1 Pano 8 Nolu Sandık | 0.006432 | 0.5 | Tabakalara paralel | 44.61 | 82 | 6.94 |
| 3 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.006301 | 0.5 | Tabakalara paralel | 44.21 | 81 | 7.02 |
| 4 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.006051 | 0.5 | Tabakalara dik | 30.23 | 86 | 7.00 |
| A-TED-2 | A1 Pano 18 Nolu Sandık | 0.005317 | 0.75 | Tabakalara dik | 44.5 | 79 | 8.36 |
| A-TED-5 | A1 Pano 20 Nolu Sandık | 0.005355 | 0.75 | Tabakalara dik | 31.4 | 75 | 5.86 |
| 5 | A2 Pano 2 Nolu Sandık | 0.006581 | 0.5 | Tabakalara dik | 74.79 | 80 | 11.36 |
| 6 | A2 Pano 2 Nolu Sandık | 0.005649 | 0.5 | Tabakalara paralel | 80.86 | 87 | 14.31 |
| 7 | A2 Pano 3 Nolu Sandık | 0.005745 | 0.5 | Tabakalara dik | 81.84 | 76 | 14.24 |
| 8 | A2 Pano 4 Nolu Sandık | 0.006140 | 0.5 | Tabakalara paralel | 59.64 | 77 | 9.71 |
| 9 | A2 Pano 4 Nolu Sandık | 0.005581 | 0.5 | Tabakalara dik | 68.25 | 81 | 12.23 |
| 10 | A2 Pano 25 Nolu Sandık | 0.005739 | 0.5 | Tabakalara dik | 32.25 | 88 | 6.62 |
| A-TED-6 | A2 Pano 24 Nolu Sandık | 0.005366 | 0.75 | Tabakalara paralel | 29.4 | 81 | 7.47 |
| A-TED-7 | A2 Pano 18 Nolu Sandık | 0.005331 | 0.75 | Tabakalara paralel | 47.4 | 67 | 8.88 |
| A-TED-9 | A2 Pano 19 Nolu Sandık | 0.004630 | 0.75 | Tabakalara paralel | 61.3 | 87 | 13.23 |
| A-TED-10 | A2 Pano 19 Nolu Sandık | 0.005201 | 0.75 | Tabakalara paralel | 68.6 | 86 | 13.18 |
| Ortalama | | | | | | | 9.73 |
| Std. Sapma | | | | | | | ±2.94 |

Çizelge 4.15. Tek eksenli basma dayanımı deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları (7 cm'lik küp linyit)

| Örnek No | Örnek Bölgesi | Kesit Alanı | Yükleme Hızı | Yükleme Yönü | Yenilme Yükü | Yenilme Açısı | Tek Eksenli Basma Dayanımı |
|----------------------|------------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| | | A (m ²) | (MPa/sn) | | F (kN) | (°) | σ_c (MPa) |
| 1 | A1 Pano 5 Nolu Sandık | 0.006002 | 0.5 | Tabakalara paralel | 29.02 | 77 | 4.83 |
| 2 | A1 Pano 8 Nolu Sandık | 0.006213 | 0.5 | Tabakalara dik | 30.66 | 79 | 4.93 |
| 3 | A1 Pano 8 Nolu Sandık | 0.005798 | 0.5 | Tabakalara dik | 37.03 | 88 | 6.39 |
| 4 | A1 Pano 8 Nolu Sandık | 0.005925 | 0.5 | Tabakalara dik | 18.07 | 89 | 6.05 |
| 5 | A1 Pano 11 Nolu Sandık | 0.005908 | 0.5 | Tabakalara dik | 32.95 | 71 | 8.58 |
| 6 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.006288 | 0.5 | Tabakalara dik | 36.23 | 77 | 5.76 |
| 7 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.006066 | 0.5 | Tabakalara dik | 36.05 | 82 | 5.94 |
| 8 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.005974 | 0.5 | Tabakalara paralel | 41.36 | 88 | 6.92 |
| 9 | A1 Pano 21 Nolu Sandık | 0.005886 | 0.5 | Tabakalara paralel | 28.82 | 83 | 7.90 |
| A-TED-1 | A1 Pano 14 Nolu Sandık | 0.005505 | 0.75 | Tabakalara dik | 40.40 | 82 | 7.34 |
| A-TED-3 | A1 Pano 24 Nolu Sandık | 0.005535 | 0.75 | Tabakalara dik | 29.00 | 71 | 6.24 |
| A-TED-4 | A1 Pano 24 Nolu Sandık | 0.005827 | 0.75 | Tabakalara dik | 29.60 | 58 | 9.08 |
| 10 | A2 Pano 2 Nolu Sandık | 0.006037 | 0.5 | Tabakalara paralel | 61.12 | 67 | 10.12 |
| 11 | A2 Pano 2 Nolu Sandık | 0.006483 | 0.5 | Tabakalara paralel | 53.90 | 75 | 8.31 |
| 12 | A2 Pano 3 Nolu Sandık | 0.005671 | 0.5 | Tabakalara dik | 19.11 | 81 | 6.37 |
| 13 | A2 Pano 4 Nolu Sandık | 0.005769 | 0.5 | Tabakalara paralel | 76.68 | 68 | 13.29 |
| 14 | A2 Pano 4 Nolu Sandık | 0.006118 | 0.5 | Tabakalara dik | 39.92 | 75 | 6.92 |
| 15 | A2 Pano 10 Nolu Sandık | 0.006223 | 0.5 | Tabakalara dik | 24.16 | 81 | 6.88 |
| A ₂ -7/1 | A2 Pano 12 Nolu Sandık | 0.004900 | 0.75 | Tabakalara dik | 67.07 | 57 | 13.69 |
| A ₂ -7/2 | A2 Pano 12 Nolu Sandık | 0.005329 | 0.75 | Tabakalara dik | 54.68 | 48 | 10.26 |
| A ₂ -7/3 | A2 Pano 12 Nolu Sandık | 0.005234 | 0.75 | Tabakalara dik | 41.34 | 66 | 7.90 |
| A ₂ -7/4 | A2 Pano 6 Nolu Sandık | 0.005277 | 0.75 | Tabakalara dik | 28.35 | 62 | 8.37 |
| A ₂ -7/5 | A2 Pano 6 Nolu Sandık | 0.005336 | 0.75 | Tabakalara dik | 5.49 | 74 | 9.03 |
| A ₂ -7/6 | A2 Pano 6 Nolu Sandık | 0.006241 | 0.75 | Tabakalara paralel | 18.53 | 49 | 8.97 |
| A ₂ -7/7 | A2 Pano 7 Nolu Sandık | 0.005256 | 0.75 | Tabakalara paralel | 66.34 | 55 | 12.62 |
| A ₂ -7/8 | A2 Pano 7 Nolu Sandık | 0.005040 | 0.75 | Tabakalara paralel | 17.02 | 60 | 9.38 |
| A ₂ -7/9 | A2 Pano 8 Nolu Sandık | 0.004914 | 0.75 | Tabakalara paralel | 33.56 | 81 | 6.83 |
| A ₂ -7/10 | A2 Pano 8 Nolu Sandık | 0.005162 | 0.75 | Tabakalara paralel | 37.38 | 78 | 7.24 |
| A-TED-8 | A2 Pano 16 Nolu Sandık | 0.005519 | 0.75 | Tabakalara paralel | 36.9 | 82 | 6.69 |
| A-TED-11 | A1 Pano 6 Nolu Sandık | 0.005297 | 0.75 | Tabakalara dik | 34.30 | 66 | 6.47 |
| A-TED-12 | A2 Pano 5 Nolu Sandık | 0.005830 | 0.75 | Tabakalara paralel | 40.60 | 54 | 6.96 |
| Ortalama | | | | | | | 7.94 |
| Std. Sapma | | | | | | | ±2.23 |



Şekil 4.10. A-1 pano hazırlık galerisinden alınan kömür blok sandıklarının konumları ve bu bölgelere ait kömür kaya biriminin tek eksenli basma dayanımı değerleri

Sunulan çizelgelerden görüldüğü üzere kömür malzemesinin tek eksenli basma dayanım değeri 5cm'lik küp örneklerde 11.31 ± 3.92 MPa, 7cm'lik küp örneklerde 7.94 ± 2.23 MPa, 7cm'lik küp örnek ancak kil içeriği olan linyit örneklerinde ise 9.73 ± 2.94 MPa olduğu anlaşılmıştır. Tüm örnekler dikkate alındığında A1 ve A2 panolarında karşılaşılan kömür malzemesinin tek eksenli basma dayanımı genel olarak 9.66 ± 1.68 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak tek eksenli basma dayanımı deneyi için hazırlanan örneklerin kenar boyutları ya da çap değeri büyüdükçe şekil ve boyut etkisinin azaldığı bilinmektedir (Bieniawski, 1984). Bu çalışmada 7 cm'lik örneklerin tek eksenli basma dayanımı değerlerinin, 5 cm'lik örneklere göre daha düşük değerlerde olması bu yaklaşım ile açıklanabilir. Bundan dolayı, bu çalışmada sadece 7 cm'lik küp örneklerin tek eksenli basma dayanımı deney sonucu dikkate alınmış ve tasarım çalışmalarında kullanılmıştır. Buna göre kömür malzemesinin nihai tek eksenli basma dayanımı değeri 8.84 ± 1.26 MPa olarak tespit edilmiştir.

TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninde A1 ve A2 panolarından alınan kömür bloklarının alındıkları bölgeler, KBS (Kömür blok sandığı) olarak kodlanmıştır. Şekil 4.10 incelendiğinde, A1 panosuna ait hazırlık galerisinde, taban yollarına yakın bölgelerdeki (KBS-1 ve KBS-4) tek eksenli basma dayanımı değerleri, arının orta bölgelerindeki (KBS-2 ve KBS-3) tek eksenli basma dayanımına göre daha düşük değerlerde bulunmuştur. Ayrıca Şekil 4.10 üzerinde görülen lejanta dikkat edildiğinde bünyesinde orta kömür ve tavan kömürü ihtiva etmeyen bölgeye ait (KBS-4) tek eksenli basma dayanımı değeri en düşük halini almıştır (5.73 MPa).

Şekil 4.11'de A2 panosu üretim galerisine ait ayna kesiti görülmektedir. Burada alt taban yoluna (kömür galerisi-motor başı) yakın bölgelerdeki (KBS-5 ve KBS-6) tek eksenli basma dayanımı değerleri, üst taban yoluna (nakliye galerisi-kuyruk) yakın bölgelerdeki (KBS-7 ve KBS-8) tek eksenli basma dayanımı değerlerinden daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Ayrıca A1 pano hazırlık galerisinde olduğu gibi bünyesinde orta kömür ve tavan kömürü ihtiva etmeyen bölgelere ait (KBS-7 ve KBS-8) tek eksenli basma dayanımı değerleri en düşük halini almıştır (6.60 MPa-5.62 MPa). Belirtilen bu değerlendirmeler ışığında, tavan ve orta kömür ihtiva eden kömür arın bölgelerindeki tek eksenli basma dayanımı sonuçlarının diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

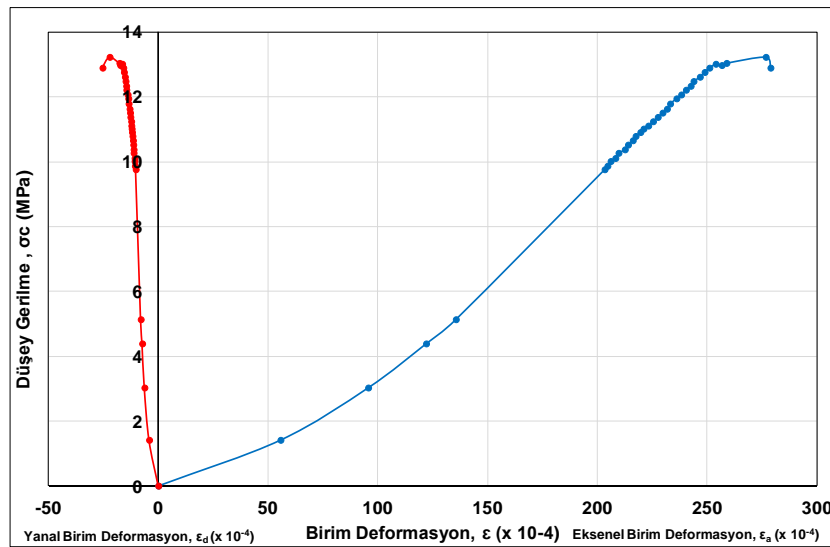
Sahada gerçekleştirilen nokta yükleme indeks dayanımı ve Schmidt sertlik deneyleri genel olarak tüm çalışma bölgelerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Nokta yükleme indeks dayanım deneyleri için toplam 304.237 m^2 'lik bir bölge, Schmidt sertlik

deneyleri için 54.183 m²'lik bir bölge hücrelere ayrılarak taranmıştır. Ancak tek eksenli basma dayanımı deneyleri için A1 ve A2 panolarının sadece blok örnek almaya uygun bölgelerinden bloklar alınmış ve bu bloklardan çıkan örnekler üzerinde tek eksenli basma dayanımı deneyleri gerçekleştirilebilmiştir. Sınırlı sayıda yapılan tek eksenli basma dayanımı deney sonuçlarının tüm sahayı temsil edip etmediği, nokta yükleme indeks dayanımı deneylerinden elde edilen sonucun tek eksenli basma dayanımı değeri ile olan ilişkisi ($\sigma_c = 9.35$ MPa) ve Schmidt sertlik belirleme deney sonucunun tek eksenli basma dayanımı değeri ile olan ilişkisi ($\sigma_c = 8.31$ MPa) belirlenerek kontrol edilmiştir. Belirlenen bu farklı deney sonuçlarına göre, tek eksenli basma dayanımı deney sonucunun, dolaylı yoldan belirlenen deney sonuçları ile yakın olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak tüm saha için belirlenen tek eksenli basma dayanımı değerinin ($\sigma_c = 8.84 \pm 1.26$ MPa) geçerli olduğu sonucuna ulaşılmıştır

4.1.2.6. Tek eksenli deformabilite özelliklerini belirleme deneyleri

Kömür bloklarından elde edilen küp örnekler üzerinde, tek eksenli deformabilite belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2000 kN kapasiteli hidrolik preste yapılmıştır. Deney esnasında 0.001 mm hassasiyetli LVDT'ler (Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü) ve 100 ton kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Yükleme hızı 0.5-1 MPa/sn aralığından seçilmiştir (ISRM 1981, 2007). Hazırlanan 7 cm'lik küp örneklere ait bilgiler ve deney sonuçları aşağıda sunulmuştur (Çizelge 4.16). Ayrıca tipik bir düşey gerilme-birim deformasyon davranışı Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Tek eksenli deformabilite deneyine ait tipik bir birim deformasyon-düşey gerilme davranışı (Örnek A-TED-9)

Çizelge 4.16. Tek eksenli deformabilite deneyleri için hazırlanan örnekler ve deney sonuçları (7 cm'lik küp linyit)

| Örnek No | Örneklemeye Bölgesi | Kesit Alanı | Yenilme Açısı | Yüklemeye Yönü | Yenilme Yüktü | Tek Eksenli Basma Dayanımı | Tanjant Elastik Modül | Tanjant Poisson Oranı |
|------------------|------------------------|---------------------|---------------|--------------------|---------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | A (m ²) | (°) | | F (kN) | σ_c (MPa) | E (GPa) | ν (-) |
| A-TED-1 | A1 Pano 14 Nolu Sandık | 0.0055 | 82 | Tabakalara dik | 40.4 | 7.34 | 0.3525 | 0.0485 |
| A-TED-2 | A1 Pano 18 Nolu Sandık | 0.0053 | 79 | Tabakalara dik | 44.5 | 8.36 | 0.7212 | 0.0250 |
| A-TED-3 | A1 Pano 24 Nolu Sandık | 0.0055 | 71 | Tabakalara dik | 29.0 | 5.24 | 0.2201 | 0.4538 |
| A-TED-4 | A1 Pano 24 Nolu Sandık | 0.0058 | 58 | Tabakalara dik | 29.6 | 5.08 | 0.2168 | 0.2788 |
| A-TED-5 | A1 Pano 20 Nolu Sandık | 0.0054 | 75 | Tabakalara dik | 31.4 | 5.86 | 0.3901 | 0.2939 |
| A-TED-6 | A2 Pano 24 Nolu Sandık | 0.0054 | 81 | Tabakalara paralel | 29.4 | 5.47 | 0.2683 | 0.4288 |
| A-TED-7 | A2 Pano 18 Nolu Sandık | 0.0053 | 67 | Tabakalara paralel | 47.4 | 8.88 | 0.4582 | 0.0895 |
| A-TED-8 | A2 Pano 16 Nolu Sandık | 0.0055 | 82 | Tabakalara paralel | 36.9 | 6.69 | 0.3874 | 0.0528 |
| A-TED-9 | A2 Pano 19 Nolu Sandık | 0.0046 | 87 | Tabakalara paralel | 61.3 | 13.23 | 0.6829 | 0.0336 |
| A-TED-10 | A2 Pano 19 Nolu Sandık | 0.0052 | 86 | Tabakalara paralel | 68.6 | 13.18 | 0.7396 | 0.0467 |
| A-TED-11 | A1 Pano 6 Nolu Sandık | 0.0053 | 66 | Tabakalara dik | 34.3 | 6.47 | 0.4714 | 0.1136 |
| A-TED-12 | A2 Pano 5 Nolu Sandık | 0.0058 | 54 | Tabakalara paralel | 40.6 | 6.96 | 0.1200 | 0.2500 |
| Ortalama | | | | | | 7.73 | 0.42 | 0.18 |
| Std.Sapma | | | | | | 2.81 | 0.21 | 0.16 |

Çizelge 4.16'da görüldüğü üzere kömür malzemesinin Elastik Modül değeri, $E_i = 0.42 \pm 0.21$ GPa ve tanjant Poisson Oranı ise $\nu = 0.18 \pm 0.16$ olduğu anlaşılmıştır. Kömür üzerinde gerçekleştirilen plaka yüklemeye deneyleri ile elde edilen 302 MPa değeri kömürün kütleli elastisite modülünü (E_m) temsil ettiğinden analizlerde elastisite modülü değeri olarak bu değer dikkate alınmıştır.

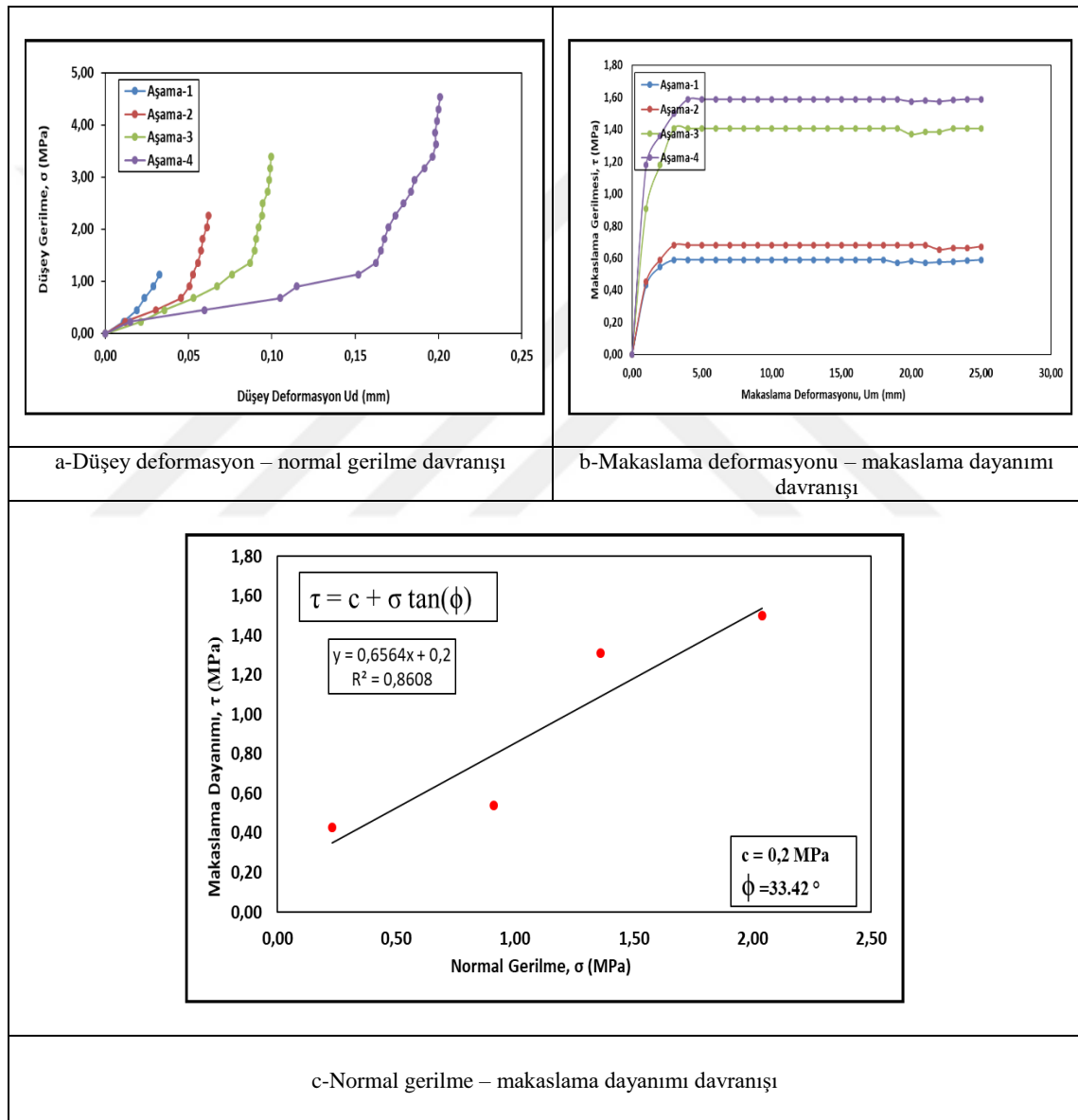
4.1.2.7. Direkt makaslama deneyleri

TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninden alınan kömür bloklarından hazırlanan 5 x 5 x 5 cm boyutlarında küp şeklinde kömür örnekler kullanılmıştır. Deneylerin hazırlık aşamasında, ISRM (2007)'in önerdiği deney yöntemi dikkate alınarak örnekler beton kalıplara alınmıştır. Beş deney örneği hazırlanmış ve laboratuvarında bulunan direkt makaslama deney cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde normal gerilme değerleri sistematik olarak dört kez artırılmıştır. Bu aşamalara ait tipik bir normal gerilme-deformasyon ve makaslama-deformasyon

davranışları ile buna bağlı normal gerilme-makaslama dayanımı davranışı Şekil 4.13’de verilmiştir. Düz yüzeylere sahip 5 adet kömür örneği üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda kömür birimine ait kohezyon (c) değeri 0.3142 ± 0.07 MPa ve yüzey sürtünme açısı (ϕ) değeri $24.83 \pm 7.22^\circ$ olarak bulunmuştur. Tüm deneylerden elde edilen nihai Mohr Zarfi eşitliği aşağıda sunulmuştur (Eşitlik 4.2).

$$\tau = 0.3142 + \sigma_n \tan (24.83) \quad (4.2)$$



Şekil 4.13. Direkt makaslama deneylerinden elde edilen tipik bir direkt makaslama deney sonucu

4.2. Kaya Saplama Tahkimatı Ön Tasarım Çalışmalarına Ait Bulgular

Görgül ve nümerik analizler öncesinde sahaya ait mekanik veri tabanını oluşturmak üzere kaya kütle ve malzeme özellikleri belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sahada ve laboratuvar ortamında yapılan çalışmalara ait detaylı bilgiler önceki bölümlerde sunulmuştur.

Kömür birimine ait kütle ve malzeme özelliklerini belirleme çalışmalarından elde edilen tüm verilere içeren genel bir çizelge aşağıda belirtilmiştir (Çizelge 4.17). Çizelge 4.17’de görülen tavan ve taban taşına ait değerleri için bu doktora tez çalışmalarının desteklendiği TÜBİTAK 116M698 nolu 1001 projesi ara raporundan faydalanılmıştır. Çizelge 4.18’de sahada yapılan çalışmalardan elde edilen kaya kütle verileri sunulmuştur. Bu çizelgede görülen bazı değerler RocLab (Rocscience, 2002) programı kullanılarak kaya malzeme verisinden kaya kütle verisine dönüştürülmüş parametrelerdir. Kaya saplama tahkimatı ön tasarımına ait çalışmalar bu veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.17. Ömerler yeraltı ocağına ait kaya malzemesi özellikleri

| Veri | Sembol | Kömür | Tavantaşı* | Tabantaşı* |
|--|-----------------|-------|------------|------------|
| Tek eksenli basma dayanımı (MPa) | (σ_{ci}) | 8.84 | 10.66 | 12.04 |
| Çekme dayanımı (MPa) | (σ_t) | 2.30 | 8.31 | 8.91 |
| Kohezhyon (MPa) | c | 0.401 | 0.487 | 0.419 |
| Yüzey sürtünme açısı ($^{\circ}$) | ϕ | 31.03 | 24.32 | 25.44 |
| Elastisite Modülü (MPa) | E | 2663 | 3198 | 3612 |
| Poisson Oranı | ν | 0.18 | 0.264 | 0.27 |
| Doğal yoğunluk (gr/cm^3) | ρ | 1.26 | 2.00 | 2.12 |
| Doğal Birim hacim ağırlık (kN/m^2) | γ | 12.40 | 19.60 | 21.7 |
| Suda dağılma dayanımı indeksi (%) | I_{d2} | 91.00 | 98.89 | 98.55 |
| Nokta yükleme dayanımı (MPa) | $I_{s(50)}$ | 0.51 | 0.70 | 2.38 |

*Bu veriler TÜBİTAK 116M698 nolu projenin 2. Ara raporundan alınmıştır.

Çizelge 4.18. Tahkimat tasarım çalışmalarında kullanılan Ömerler yeraltı ocağına ait kaya kütle verileri

| Veri | Sembol | Kömür | Tavantaşı* | Tabantaşı* |
|-------------------------------------|---------------------|--------|------------|------------|
| Jeolojik Dayanım İndeksi | GSI | 35 | 43 | 47 |
| Kaya Kütle Puanı | RMR | 32* | 44 | 47 |
| Kaya Kalite Göstergesi | RQD | 50* | 60 | 70 |
| Kaya Kalite İndeksi | Q | 0.37* | 0.99 | 1.16 |
| Tek eksenli basma dayanımı (MPa) | (σ_{cm}) | 1.481 | 1.244 | 1.543 |
| Çekme dayanımı (MPa) | (σ_{tm}) | 0.004 | 0.024 | 0.037 |
| Kohezhyon (MPa) | c | 0.401 | 0.487 | 0.419 |
| İçsel sürtünme açısı ($^{\circ}$) | ϕ | 31.03 | 24.32 | 25.44 |
| Elastisite Modülü (MPa) | E | 302 | 625.99 | 920.07 |
| Poisson Oranı | ν | 0.18 | 0.264 | 0.27 |
| Sıkışma Modülü (MPa) (kütle) | $K = [E/3(1-2\nu)]$ | 157.29 | 442.08 | 666.72 |
| Makaslama Modülü (MPa) (kütle) | $G = [E/2(1+\nu)]$ | 127.97 | 247.62 | 362.23 |

*Bu veriler TÜBİTAK 116M698 nolu projenin 2. Ara raporundan alınmıştır.

4.2.1. Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen kaya saplaması tahkimat ön tasarımına ait bulgular

Yeraltı boşluklarının kaya saplamaları ile tahkimatının tasarımında kullanılan görgül yaklaşımlara dayalı, TKİ-GLİ Ömerler yeraltı kömür madenine ait veri tabanı kullanılarak çözümlenen her bir yaklaşıma ait tasarım çıktıları bu bölümde sunulmuştur.

Tasarım çözümlenmelerinde kullanılan girdi parametreleri Çizelge 4.19'da belirtilmiştir.

Çizelge 4.19. Görgül tasarım yaklaşımlarının çözümlenmelerinde kullanılan girdi parametreleri

| TASARIM GİRDİ PARAMETRELERİ | | |
|--|---|---|
| Parametre | Sembol | Değer |
| Galeri Açıklığı (m) | B | 4,60 (At nalı kesit) 6,00 (Trapez kesit) |
| Süreksizlik Takım Sayısı (adet) | n | ≥3 |
| Süreksizlik Yatım Açısı (°) | φ | 45°-90° |
| Galeri tavanındaki kaya tabakalarının ortalama kalınlığı (cm) | t | 5 |
| Süreksizlikler arası mesafe (m) | JS | 0,4 |
| Galeri tavanındaki kömür kaya birimine ait kaya kalite değeri | RQD | 50 |
| Galeri tavanındaki kömür kaya birimi için kaya kütle kalitesi | RMR | 32 |
| Galeri açıklığı üzerindeki örtü tabaka kalınlığı (m) | H | 150.25 |
| Örtü tabakasına ait birim hacim ağırlık (kN/m ³) | γ | 21.48 |
| Yatay arazi gerilmesinin (σ _h) düşey arazi gerilmesine (σ _v) oranı | K | 0.473 |
| Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kalite indeksi | Q | 0.37 |
| Kaya yükü yüksekliği | $h_t = [(100-RMR)/100]*B$ | 2.90 |
| Kazı tahkimat oranı | ESR (Uzun süreli (kalıcı) maden kazıları, su tünelleri (1.6- 2.0) | 1.80 |
| Eşdeğer kazı açıklığı | De (B/ESR) | 2.56 (At nalı kesit) 3.33 (Trapez kesit) |
| Ekleme takımı sayısı | J _n | 15 |
| Blok Boyutu | RQD/J _n | 50/15 =3.33 |

Çizelge 4.19'da sunulan tasarım girdi parametreleri yardımıyla gerçekleştirilen analizlere ait tasarım çıktıları aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

4.2.1.1. Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımına bağlı görgül çözümler

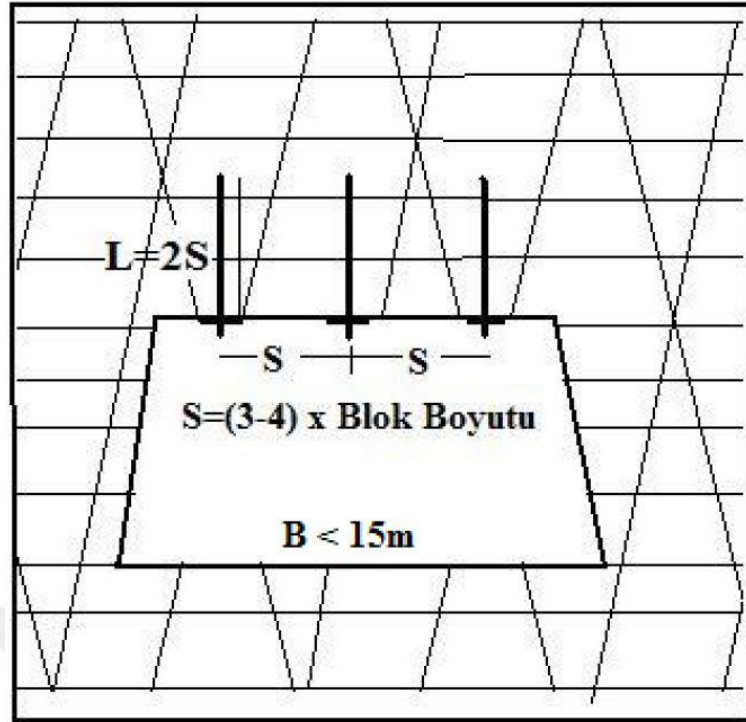
Kaya saptamaları tahkimat tasarımına yönelik önerilen bu yaklaşımda, yeraltında açılan açıklık genişliği, açıklık etrafındaki süreksizlik takım sayıları (n) ve eğimleri (φ) dikkate alınmaktadır. TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninde yapılan, kaya kütle karakterizasyonu ve birincil gerilme analiz çalışmaları esnasında galeri etrafındaki süreksizlik takım sayıları ve eğimleri ölçülerek analiz edilmiştir.

Çizelge 4.20’de sunulan tasarım girdi parametreleri dikkate alınarak tasarım çıktıları oluşturulmuştur. Buna göre yaklaşımın önerdiği kaya saptama boyu (L_b) 2.4 metre ve kaya saptamaları arası mesafe (S_b) 1.2 metre olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.20).

Çizelge 4.20. Süreksizlik Takım Sayısı ve Süreksizlik Eğimine Bağlı Tasarım Yaklaşımından elde edilen görgül çözümler

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|---|--|--|
| 1. Galeri açıklığı | $B = 4.6 \text{ m}$ ($B < 15 \text{ m}$) | $B = 6.0 \text{ m}$ ($B < 15 \text{ m}$) |
| 2. Süreksizlik takım sayısı | $n \geq 3$ | $n \geq 3$ |
| 3. Süreksizlik yatım açısı | $\varphi = 45^\circ - 90^\circ$ | $\varphi = 45^\circ - 90^\circ$ |
| 4. Blok boyutu | $RQD/J_n = 50/15 = 3.33$ | $RQD/J_n = 50/15 = 3.33$ |
| Tasarım çıktısı | | |
| 1. Kaya saptama boyu (m) | $L = 2.4 \text{ m}$ | $L = 2.4 \text{ m}$ |
| 2. Kaya saptamalar arası mesafe (m) | $S = 1.2 \text{ m}$ | $S = 1.2 \text{ m}$ |
| Tasarım Notları | | |
| 1. Kaya saptamaları açıklıktaki kazı yüzeyine dik konulmalıdır. | | |
| 2. Kavlaklanmayı önlemek için çelik hasır kullanılmalıdır. | | |
| 3. Kaya saptamaları, kazıyı hemen takip eden zamanda gevşemeyi önlemek için yerleştirilmelidir. | | |
| 4. Radyal tahkimat basıncını oluşturmak için saptamada ön gerilme uygulanmalıdır. | | |
| 5. Bulunan saptama boyutları tüm kaya saptama tipleri içindir. | | |

Yaklaşım, önermiş olduğu kaya saptaması boyutlarının yeraltı açıklığında ne şekilde yerleştirileceğine yönelik bir görsel sunmaktadır. Buna göre elde edilen kaya saptaması boyutları ile birlikte kaya saptamalarının uygulanma şekline ait öneri Şekil 4.14’de belirtilmiştir.



Şekil 4.14. Süreksizlik Takım Sayısı ve Süreksizlik Eğimine Bağlı Tasarım Yaklaşımından elde edilen kaya saplaması uygulama biçimi

4.2.1.2. Panek tasarım yaklaşımına bağlı görgül çözümler

Kaya saplaması tahkimat ilkelerinden, kirişleme ilkesi yaklaşımını dikkate alan Panek (1964), gerdirmeli kaya saplamaları için bir tasarım yaklaşımı önermiştir. Panek önerdiği bu yaklaşımda kullanılmak üzere bir nomogram geliştirmiştir (Şekil 4.15) Çizelge 4.21 'de sunulan tasarım girdi parametreleri ve aşağıda sunulan aşamalar dikkate alınarak tasarım çıktıları elde edilmiştir.

Aşama 1: Panek'in sunduğu bu yaklaşımda ilk olarak açıklığın hemen üzerinde oluşan yalancı tavadaki ince tabakaların ortalama kalınlığı belirlenir. TKİ-GLİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madeninde kaya saplaması tahkimatı tasarlanacak bölge olan A6 pano taban yollarındaki galerilerin tavanında, kömür damarının fiili eğimine bağlı olarak ortalama 5 m ile 7 m civarında değişen yükseklikte kömür tabakası bulunmaktadır. Ocakta gerçekleştirilen kaya kütle karakterizasyonu çalışmalarında ince kömür tabakalarının ortalama kalınlığının ortalama 5 cm olduğu tespit edilmiştir.

Aşama 2: Yaklaşımın bu aşamasında iyi bir ankraj sağlayabilmek için ince tabakaları birbirine bağlayarak kiriş etkisi yaratacak saplama boyu seçilmelidir. A6 Panosunda mevcut taban yolu galerilerinin tavanında yer alan 5-7 m civarında değişen

kömür tabakasında kiriş etkisi yaratması amacıyla seçilen kaya saplaması boyu 2.5 metredir.

Aşama 3: Saplama uygulanacak ön gerdirmeye değeri olarak 45 kN değeri seçilmiştir.

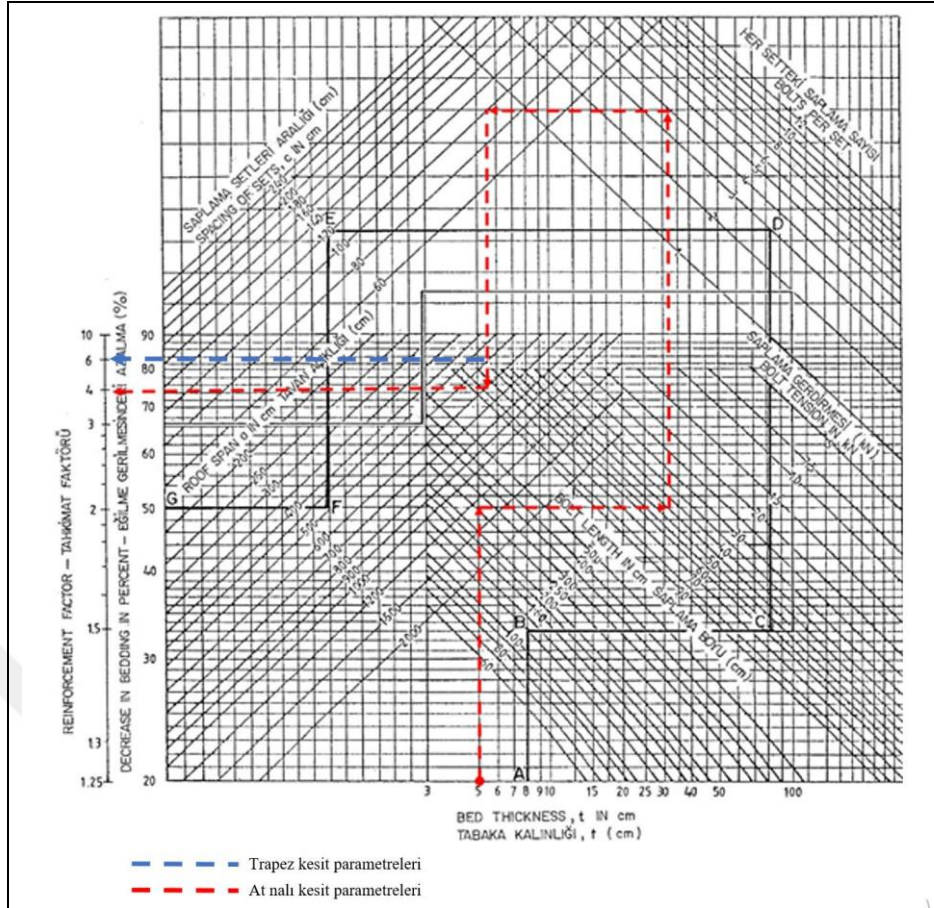
Aşama 4: Ömerler yeraltı kömür madeninde A6 panosuna ait süreksizlikler arası mesafe (JS) 40 cm civarındadır. Yaklaşımın önerisinde saplama aralığı değerinin süreksizlikler arası mesafenin 3 katına eşit ya da küçük bir değer olarak seçilmelidir ($S \leq 3 \times JS$). Buna bağlı olarak seçilen kaya saplama aralığı değeri olarak 100 cm seçilmiştir.

Panek'in önerdiği bu yaklaşımda, yukarıda sunulan aşamalar yardımıyla açıklığın genişliği dikkate alınarak tahkimat faktörü katsayısı belirlenir (RF). Bu katsayı 2'ye eşit ya da büyük olursa bu durumda tasarlanan kaya saplama açıklıkta duraylılığı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Şekil 4.15'de belirtilen nomogram çözümlemesi ve Çizelge 4.21'de görülen tasarım çıktısına bağlı olarak, başlangıçta belirlenen kaya saplama boyu ($L=2.5m$) ve saplama aralığı ($S=1m$) değerleri ile elde edilen tahkimat faktörü katsayısı, $RF=3$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda RF değeri ≥ 2 koşulunu sağlamaktadır.

Çizelge 4.21. Panek tasarım yaklaşımından (1964) elde edilen görgül çözümleme

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|---------------|--------------|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki ince kaya tabakalarının ortalama kalınlığı | t = 5 cm | t = 5 cm |
| 3. Seçilen saplama boyu (iyi bir ankraj sağlayabilmek için ince tabakaları birbirine bağlayarak kiriş etkisi yaratacak saplama boyu seçilmelidir.) | L= 2.5 m | L= 2.5 m |
| 4. Seçilen saplama gerdirmeye yükü (saplama uygulanacak ön gerdirmeye, saplama kapasitenin %60'ını geçmemelidir) (kN) | P= 45kN | P= 45kN |
| 5. Seçilen her setteki saplama sayısı | N= 4 adet | N= 4 adet |
| 6. Seçilen saplama setleri aralığı (Saplama aralıklarının belirlenmesinde süreksizlikler arası mesafenin (JS) belirlenmesi gerekir. Saplama aralıkları $S \leq 3 \times JS$ alınmalıdır) | S = 1 metre | S = 1 metre |
| Tasarım çıktısı | | |
| 1. Panek nomogramından elde edilen tahkimat faktörü katsayısı | RF=4 | RF=6 |
| Tasarım notları | | |
| 1-Seçilen saplama detaylarına göre $RF \geq 2$ koşulunu sağlamaktadır. | | |
| 1-Bulunan saplama boyutları gerdirmeli kaya saplama tipleri içindir. | | |



Şekil 4.15. Panek tasarım yaklaşımının (1964) önerdiği nomogram ve çözümleme şekli

4.2.1.3. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımına ait görgül çözümler

Deere ve arkadaşları (1970) ve Merritt (1972) tarafından önerilen yaklaşım, kaya birimine ait RQD değerine göre kaya saplama aralığı ile ilgili önerilerde bulunmaktadır (Çizelge 4.22).

Çizelge 4.22. RQD sistemine bağlı tasarım yaklaşımından (1970, 1972) elde edilen görgül çözümler

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|---------------|---|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki kömür kaya birimine ait kaya kalite değeri | RQD = 50 | RQD = 50 |
| Tasarım çıktısı | | |
| Deere ve arkadaşları (1970) tarafından öngörülen kılavuzdan belirlenen saplama aralığı | - | S = 0.6-1.2m (150 mm tavan ve yan duvarda püskürtme beton) |
| Merritt (1972) tarafından önerilen nomogramdan belirlenen saplama aralığı | S = 1.2 -1.8m | S = 1.2 -1.8m |
| Tasarım notları | | |
| 1-Bulunan saplama boyutları bütün kaya saptamaları içindir. | | |

Çizelge 4.22’de belirtilen tasarım girdi parametreleri dikkate alınarak elde edilen sonuçlara göre 4.6 metre genişliğindeki at nalı kesitli galeri için Merritt (1972) tarafından önerilen kaya saplama aralığı 1.2 metre ile 1.8 metre arasındadır. 6 metre genişliğine sahip trapez kesit için ise Deere ve arkadaşları (1970) tarafından önerilen saplama aralığı 0.6 metre ile 1.2 metre arasındadır. Ayrıca tavan ve yan duvarlarda 150 mm ya da daha fazla kalınlıkta püskürtme beton kullanımını önermişlerdir.

4.2.1.4. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımına ait görgül çözümler

RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı (Bieniawski, 1973), at nalı kesitinde ve arazi gerilmesi 25 MPa’dan daha küçük olan derinlikler için geçerlidir. Buna göre RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımı girdi parametreleri ve tasarım çıktısı Çizelge 4.23’de belirtilmiştir. Tasarım çıktılarına göre RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımının önerdiği saplama boyu 4-5 m saplama aralığı ise 1-1.5 m olarak belirlenmiştir

Çizelge 4.23. RMR sistemine bağlı Bieniawski tasarım yaklaşımından (1973) elde edilen görgül çözümler

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|---|---------------|--------------|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B =6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kütle kalitesi | RMR = 32 | RMR = 32 |
| Tasarım çıktısı | | |
| Kaya saplama boyu | L= 4-5 metre | - |
| Tavan ve yan duvarlarda saplama aralığı | S = 1-1,5m | - |
| Tasarım notları | | |
| 1-Tasarım, kazı şekli delme-patlatma olan at nalı kesitinde ve arazi gerilmesi 25 MPa’dan daha küçük olan derinlikler için verilmiştir. | | |
| 2- Tavanda çelik hasır ile birlikte uygulanmalıdır. Ayrıca tavanda 100-150 mm kalınlığında, yan duvarlarda 100 mm kalınlığında püskürtme beton ile uygulanmalıdır | | |
| 3-Gerektiğinde 1.5 metre aralıklı hafif çelik bağ kullanılabilir. Bulunan saplama boyutları bütün kaya sapsamaları içindir. | | |

4.2.1.5. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımına ait görgül çözümler

1983 ve 1986 yıllarında Ünal’ın önermiş olduğu RMR sistemine bağlı yaklaşımda, mekanik ve reçine dolgulı saplama türleri için kılavuzlar önerilmiştir. Bu

kılavuzlara bağı olarak A6 panoda mevcut at nalı kesitte ve trapez kesitte, yaklaşıma ait tasarım çıktıları Çizelge 4.24’de sunulmuştur.

Çizelge 4.24. RMR sistemine bağı Ünal tasarım yaklaşımından (1983, 1986) elde edilen görgül çözümleme

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B =6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki kömür kaya birimine ait kaya kütle kalitesi | RMR = 32 | RMR = 32 |
| Tasarım çıktısı (4.6 m genişliğe sahip at nalı kesitli galeri için) | | |
| | Mekanik Saplamlar | Reçine Dolgulu Saplamlar |
| Kaya saplama boyu | L= 6' (≈1.9 metre) | L= 4' (≈1.3 metre) |
| Saplama aralığı | S= 4' x 5' (≈ 1.2m x 1.5m) | S= 4' x 5' (≈ 1.2m x 1.5m) |
| Saplama çeliği kalitesi | G = 40 | G = 60 |
| Saplama çubuğu çapı | Φ = 5/8 '' (=15.9 mm) | Φ = 1 '' (=25.4 mm) |
| Ankraj kapasitesi | C= 6 ton | C =23,7 ton |
| Tasarım çıktısı (6.0 m genişliğe sahip trapez kesitli galeri için) | | |
| | Mekanik Saplamlar | Reçine Dolgulu Saplamlar |
| Kaya saplama boyu | L= 7' (≈2.2 metre) | L= 5' (≈1.6 metre) |
| Saplama aralığı | S= 5' x 5' (≈ 1.5m x 1.5m) | S= 5' x 5' (≈ 1.5m x 1.5m) |
| Saplama çeliği kalitesi | G = 40 | G = 60 |
| Saplama çubuğu çapı | Φ = 5/8 '' (=15.9 mm) | Φ = 3/4 '' (=19.05 mm) |
| Ankraj kapasitesi | C= 6 ton | C =12 ton |
| Tasarım çıktısı (6.0 m genişliğe sahip trapez dörtyol kesişim bölgesi için) | | |
| | Mekanik Saplamlar | Reçine Dolgulu Saplamlar |
| Kaya saplama boyu | L= 10' (≈3.1 metre) | L= 8.0' (≈2.5 metre) |
| Saplama aralığı | S= 5' x 5' (≈ 1.5m x 1.5m) | S= 5' x 5' (≈ 1.5m x 1.5m) |
| Saplama çeliği kalitesi | G = 40 | G = 60 |
| Saplama çubuğu çapı | Φ = 5/8 '' (=15.9 mm) | Φ = 1 '' (=25.4 mm) |
| Ankraj kapasitesi | C= 6 ton | C =23,7 ton |
| Tasarım notları | | |
| 1-Bulunan saplama boyutları mekanik ve reçineli kaya saplamları içindir. | | |

1' (feet): 30.48 cm, 1'' (inch): 25.4 mm olarak alınmıştır. ≈ : Küsüratlı değerler saplama boyu için bir üst tam sayı değerine tamamlanmıştır. Saplama aralığı için ise bir alt tam sayı değerine tamamlanmıştır.

Çizelge 4.24’ de görüldüğü gibi at nalı kesitte ve trapez kesitte saplama boyu saplama aralığı saplama çeliği kalitesi, saplama çubuğu çapı ve ankraj kapasitesi hakkında tasarım çıktıları elde edilmiştir. Buna göre at nalı kesit için RMR sistemine bağı

Ünal tasarım yaklaşımında, mekanik saplama boyu 1.9 metre saplama aralığı 1.2 m x 1.3m ve saplama çubuğu çapı 15.9 mm olarak belirlenmiştir. Saplama çeliği kalitesi olarak G40 tipi çelik kullanılmasını öneren yaklaşım, 6 ton ankraj kapasitesi değerini önermiştir. Reçine dolgulu saplama için yaklaşımın önerisi ise saplama boyu 1.3 metre, saplama aralığı 1.2 m x 1.5 m, saplama çapı 25.4 mm şeklindedir. Saplama çeliği kalitesi G60 tipi çelik kullanımını öneren yaklaşım, 23.7 ton ankraj kapasitesi değerini önermiştir.

Trapez kesitte, mekanik saptamalar için kaya saptaması boyu 2.2 metre, saptama aralığı 1.5 m x 1.5 m ve saptama çubuğu çapı 15.9 mm olarak belirlenmiştir. Saptama çeliği kalitesi G40, ankraj kapasitesi olarak 6 ton değeri yaklaşım tarafından önerilmiştir. Reçine dolgulu saptamalar için saptama boyu 1.6 metre, saptama aralığı 1.5 m x 1.5 m, saptama çeliği kalitesi G60 ve ankraj kapasitesi olarak 12 ton değeri yaklaşım tarafından önerilmiştir.

4.2.1.6. RMR Sistemine Bağlı Vantekaswarlu Tasarım Yaklaşımına ait çözümleme

RMR sistemine bağlı Vantekaswarlu tasarım yaklaşımı (1986), 4.2 m ve 4.5 m boyutlarında yeraltı açıklıkları için geçici ve kalıcı tahkimat tasarım önerilerinde bulunmuştur. Buna göre yaklaşımın önerdiği kaya saptama tahkimat tasarımına ait girdi parametreleri ve tasarım çıktıları Çizelge 4.25’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.25. RMR sistemine bağlı Vantekaswarlu tasarım yaklaşımından (1986) elde edilen görgül çözümleme

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|---------------|--------------|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kütle kalitesi | RMR = 32 | RMR = 32 |
| Tasarım çıktısı | | |
| Kaya saptama boyu (L) | L= 1.8 m | - |
| Saptama aralığı (Sb) | S= 1 m | - |
| Saptama sıraları arası mesafe (Sr) | Sr = 1.2 m | - |
| Tasarım notları | | |
| 1-Bulunan saptama boyutları reçineli saptamalar içindir. Ayrıca uygulamada tavan bağı ve çelik direk kullanımı önerilmiştir. | | |
| 2-Tasarım yaklaşımına göre tahmin edilen kaya yükü değeri 5-7 ton/m ² olarak belirlenmiştir. | | |

Çizelge 4.25’de görüldüğü üzere, RMR sistemine bağlı Vantekaswarlu tasarım yaklaşımına göre at nalı kesitte kullanılacak olan reçine dolgulu kaya saptaması boyu 1.8

m saplama aralığı 1 m ve saplama sıraları arası mesafe 1.2 m olarak önerilmiştir. Ayrıca yaklaşım kaya saptamaları ile birlikte tavan bağ ve çelik direk kullanımını önermiştir.

4.2.1.7. RMR sistemine bağlı Ünal Tasarım yaklaşımına ait çözümler

1990 yılında Ünal, kaya saptaması tahkimat tasarımına ilişkin oldukça detaylı bir yaklaşım önermiştir. Araştırmacı, önermiş olduğu yaklaşım ile birbirinden farklı birçok saptama tipine göre tasarım parametresi belirlemektedir.

Mekanik, reçineli ve standart swellex tipi kaya saptamaları için tasarım önerisinde bulunan yaklaşım bu saptamaların dışında dyna-rok ve dyna-rok plus tipi kaya saptaması ve ağaç tahkimatlarla birlikte kaya saptaması uygulamaları içinde önerilerde bulunmuştur. Ancak bu saptama tipleri ve tasarım şekli günümüzde artık uygulanmadığından bu saptama tiplerine ait çözümler gerçekleştirilmemiştir.

Çizelge 4.26'da RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımına ait, mekanik, reçineli ve standart swellex kaya saptamalarına ait at nalı ve trapez kesitte açılan galeriler için tasarım girdi parametreleri ve çıktıları belirtilmiştir

Çizelge 4.26'da görüldüğü üzere, RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımının önerdiği kaya saptaması tahkimat tasarımı, At nalı galeri kesiti için, mekanik saptamalarda kaya saptama uzunluğu 1.98 metre saptama aralığı 0.3 metredir.

Reçine dolgulu kaya saptamaları için, saptama uzunluğu 3.41 metre, saptama aralığı 0.3 metredir. Standart Swellex tipi saptama için ise saptama uzunluğu 2.89 metre saptama aralığı ise 0.3 metre olarak hesaplanmıştır. At nalı kesitte galeri için hesaplanan kaya saptaması tasarımına ait diğer bilgiler Çizelge 4.26 'da sunulmuştur.

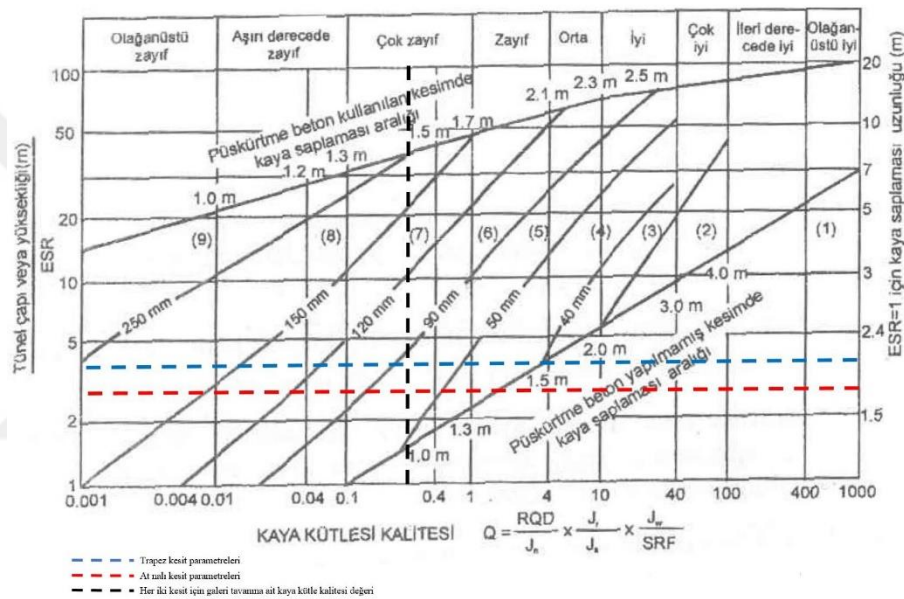
Trapez kesit için mekanik saptamalarda kaya saptama uzunluğu 2.57 metre, saptama aralığı 0.26 metredir. Reçine dolgulu saptamalar için kaya saptama uzunluğu 5.1 metre ve saptama aralığı 0.26 metre olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Standart Swellex tipi saptama için kaya saptaması uzunluğu 4.01 metre ve saptama aralığı 0.26 metre olarak hesaplanmıştır. Trapez kesitte galeri için hesaplanan kaya saptaması tasarımına ait diğer bilgiler Çizelge 4.26'da sunulmuştur.

Çizelge 4.26. RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımından (1990) elde edilen görgül çözümleme

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|---|--|--|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kütle kalitesi | RMR = 32 | RMR = 32 |
| 3. Galeri açıklığı üzerindeki örtü tabaka kalınlığı | H = 150.25 | H = 150.25 |
| 4. Örtü tabakasına ait birim hacim ağırlık | $\gamma = 21.48$ | $\gamma = 21.48$ |
| 5. Yatay arazi gerilmesinin (σ_h) düşey arazi gerilmesine (σ_v) oranı | K = 0,473 | K = 0,473 |
| 6. K = 0,473 için (K ≤ 1,3 için) | C=1 | C=1 |
| 7. Kaya yükü yüksekliği ($h_t = (C \cdot [(100-RMR)/100]) \cdot B$) | $h_t = 3,04$ | $h_t = 3,96$ |
| 8. Yalancı tavan birim hacim ağırlığı (kN/m ³) | $\gamma_{im} = 17.46$ | $\gamma_{im} = 17.46$ |
| Tasarım çıktısı | | |
| Mekanik Saplamlar | | |
| | At nalı kesit | Trapez kesit |
| Saplama uzunluğu | $L_b = 1.98$ m | $L_b = 2.57$ m |
| Saplama ankraj yenilme yükü | $L'_f = 5.5$ ton | $L'_f = 5.5$ ton |
| Saplama çeliği kalitesi | G40 | G40 |
| Saplama çeliği kalitesi | G60 | G60 |
| Saplama çeliğinin yenilme yükü | $L'_y = 8.01$ ton | $L'_y = 8.01$ ton |
| Saplama çeliğinin yenilme yükü | $L'_y = 12.02$ ton | $L'_y = 12.02$ ton |
| Seçilen saplama çeliği kapasitesi | $C_b = 8.01$ ton | $C_b = 8.01$ ton |
| Seçilen saplama çeliği çapı | $\Phi_b = 19$ mm | $\Phi_b = 19$ mm |
| Saplama aralığı | $S_b = 0.90$ m | $S_b = 0.86$ m |
| Reçine Dolgulu Saplamlar | | |
| Düşey arazi gerilmesi ($\sigma_v = H\gamma$) | $\sigma_v = 329$ ton/m ² | $\sigma_v = 329$ ton/m ² |
| Etkin reçine boyu | $L_{er} = 2.27$ m | $L_{er} = 3.39$ m |
| Saplama uzunluğu | $L_b = 3.41$ m | $L_b = 5.1$ m |
| Bağ faktörü | Saplama çapı $\Phi = 19$ mm-BF = 6.99 cm/ton Saplama çapı $\Phi = 25$ mm-BF = 5.59 cm/ton Saplama çapı $\Phi = 32$ mm-BF = 4.67 cm/ton | |
| Ankraj yenilme yükü | $\Phi = 19$ mm-BF = 6.99 cm/t, $L'_f = 32.47$ t $\Phi = 25$ mm-BF = 5.59 cm/t, $L'_f = 40.61$ t $\Phi = 32$ mm-BF = 4.67 cm/t, $L'_f = 48.61$ t | $\Phi = 19$ mm-BF = 6.99 cm/t, $L'_f = 48.50$ t $\Phi = 25$ mm-BF = 5.59 cm/t, $L'_f = 60.64$ t |
| Saplama çeliği yenilme yükü | G40, $\Phi = 19$ mm, BF = 6.99, $L'_y = 8.01$ ton G40, $\Phi = 25$ mm, BF = 5.59, $L'_y = 14.25$ ton G40, $\Phi = 32$ mm, BF = 4.67, $L'_y = 22.26$ ton G60, $\Phi = 19$ mm, BF = 6.99, $L'_y = 12.02$ ton G60, $\Phi = 25$ mm, BF = 5.59, $L'_y = 21.37$ ton G60, $\Phi = 32$ mm, BF = 4.6, $L'_y = 33.39$ ton | |
| Saplama aralığı | $S_b = 0.90$ m | $S_b = 0.86$ m |
| Standart Swellex Kaya Saplamları | | |
| Taşınabilecek maksimum blok yüksekliği | $L_{er} = 2.27$ m | $L_{er} = 3.39$ m |
| Kaya saplama için yerleştirme su basıncı | $\sigma_w = 25$ MPa | $\sigma_w = 25$ MPa |
| Duvar basıncı | $q = 875$ ton/m ² | $q = 875$ ton/m ² |
| Saplama kapasitesi | $C_b = 12$ ton | $C_b = 12$ ton |
| Tahkimata çalışacak maksimum saplama uzunluğu | $L_{max} = 0.62$ m | $L_{max} = 0.62$ m |
| Saplama uzunluğu | $L_b = 2.89$ m | $L_b = 4.01$ m |
| Saplama aralığı | $S_b = 0.90$ m | $S_b = 0.86$ m |
| Not: Bulunan saplama boyutları mekanik, reçineli ve swellex tipi kaya saplamları içindir. | | |

4.2.1.8. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımına ait çözümler

Görgül tasarım yaklaşımı olarak, kaya kütle sınıflama sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan Q sınıflama sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımına göre hesaplanan kaya saplama tahkimat tasarım girdi parametreleri ve tasarım çıktıları Çizelge 4.27’de belirtilmiştir. Yaklaşımında Q sınıflama sistemine bağlı önerilen tahkimat nomogramı kullanılmıştır. Kullanılan bu nomogramda dikkate alınan değerler Şekil 4.16’da belirtilmiştir.



Şekil 4.16. Q sınıflama sisteminin önerdiği tahkimat nomogramı ve çözümleme şekli (Grimstand ve Barton, 1995)

Çizelge 4.27’de görüldüğü üzere, Q sınıflama sistemine bağlı Grimstand ve Barton yaklaşımına göre, at nalı kesitli galeri için püskürtme beton kullanılması durumunda, Şekil 4.16’den kestirilen kaya saplama boyu 1.8 metre ve saplama aralığı 1.45 metre, püskürtme beton kalınlığı ise 70 mm’dir. Püskürtme beton kullanılmaması durumunda ise kaya saplaması boyu 1.8 metre saplama aralığı ise 0.9 metre olarak belirlenmiştir. Trapez kesitli galeri için ise, püskürtme beton kullanılması durumunda Şekil 4.18’den kestirilen kaya saplama boyu 2.1 metre, saplama aralığı 1.45 metre, püskürtme beton kalınlığı ise 70 mm olarak hesaplanmıştır. Püskürtme beton kullanılmaması durumunda ise saplama boyu 2.1 metre ve saplama aralığı 0.9 metre olarak belirtilmiştir.

Çizelge 4.27. Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımından (1995) elde edilen görgül çözümler

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|--|--|
| Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| Galeri tavanındaki kömür kaya birimine ait kaya kalite indeksi | Q = 0.37 | Q = 0.37 |
| Kazı tahkimat oranı | ESR = 1.6 | ESR = 1.6 |
| Eşdeğer kazı açıklığı | D _e = 2.875 | D _e = 3.75 |
| Tasarım çıktısı (4.6 m genişliğe sahip at nalı kesitli galeri için) | | |
| | Püskürtme beton kullanılması durumunda | Püskürtme beton kullanılmaması durumunda |
| Kaya saplama boyu (m) | L= 1.8 | L= 1.8 |
| Saplama aralığı (m) | S= 1.45 | S= 0.9 |
| Püskürtme beton kalınlığı (mm) | 70 mm | - |
| Önerilen tahkimat | Çelik hasır, püskürtme beton ve kaya saplaması | Çelik hasır ve kaya saplaması |
| Tasarım çıktısı (6.0 m genişliğe sahip trapez kesitli galeri için) | | |
| | Püskürtme beton kullanılması durumunda | Püskürtme beton kullanılmaması durumunda |
| Kaya saplama boyu | L= 2.1 | L= 2.1 |
| Saplama aralığı | S= 1.45 | S= 0.9 |
| Püskürtme beton kalınlığı | 70 mm | - |
| Önerilen tahkimat | Çelik hasır, püskürtme beton ve kaya saplaması | Çelik hasır ve kaya saplaması |
| Tasarım notları | | |
| 1- Bulunan saplama boyutları tüm kaya saplamaları içindir. | | |

4.2.1.9. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımına ait çözümler

Yeraltı tasarımlarında kaya patlaması ve zemin sıkışması gibi önemli koşulları dikkate alan bu yaklaşıma göre elde edilen tasarım çıktıları Çizelge 4.28’de belirtilmiştir. Tasarım yaklaşımı, her iki kesit içinde kaya saplama boyu ve saplama aralığının yanı sıra, kaya saplama kapasitesi ve saplama düzeni hakkında da önerilerde bulunmaktadır. Pratik tünel tasarımının farklı yönlerinin ele alındığı bu yaklaşım, ayrıca yer altı tasarımlarında göz önünde bulundurulması gereken kaya patlaması ve zemin sıkışması koşullarını da dikkate almaktadır. Çizelge 4.28 de görüldüğü gibi, RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski yaklaşımına (2013) göre, at nalı kesitli galeri için önerilen kaya saplama boyu 9.4 metre saplamalar arası mesafe ise 0.96 metre olarak belirlenmiştir. Trapez kesitte ise saplama boyu 12.5 metre olarak önerilmiş olup saplamalar arası mesafe 0.96 metre olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.29’da özetlenmiştir.

Çizelge 4.28. RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski tasarım yaklaşımından (2013) elde edilen görgül çözümleme

| Tasarım girdi parametreleri | At nalı kesit | Trapez kesit |
|--|---------------|---------------|
| 1. Galeri açıklığı | B = 4.6 m | B = 6.0 m |
| 2. Galeri tavanındaki linyit kaya birimine ait kaya kütle kalitesi | RMR = 32 | RMR = 32 |
| Tasarım çıktısı | | |
| Kaya yükü (KPa) | $P_r = 85,78$ | $P_r = 97,97$ |
| Kaya yükü yüksekliği (m) | $h_t = 6,92$ | $h_t = 7,9$ |
| Kaya saplama boyu (m) | $L_b = 9,4$ | $L_b = 12,5$ |
| Kaya saplama aralığı (m) | $S_b = 0,96$ | $S_b = 0,96$ |
| Kaya saplama kapasitesi (kN) | $F_b = 50$ | $F_b = 50$ kN |
| Kaya saplama düzeni | 0,9 m x 1 m | 0,9 m X 1 m |
| Tasarım notları | | |
| 1- Bulunan saplama boyutları genel olarak tüm kaya saplama için içindir. | | |

Çizelge 4.29. Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen kaya saplama tahkimat tasarım çıktıları

| 4.6m genişliğinde at nalı kesitli galeri için görgül tasarım çıktıları | | | | |
|--|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Tasarım Yaklaşımı | Saplama boyu, L_b (m) | Saplama aralığı, S_b (m) | Saplama düzeni S_1 (m) x S_2 (m) | Her sırada saplama adedi N (#) |
| Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı | 2.4 | 1.2 | 1.2 x 1.2 | 6 |
| Panek tasarım yaklaşımı (Panek, 1964) | 2.5 | 1.0 | 1.0 x 1.0 | 4 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Bieniawski, 1973) | 5.0 | 1.0 | 1.0 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (Ünal, 1983) (Mekanik kaya saplama) | 1.9 | 1.2 | 1.2 x 1.5 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (Ünal, 1983) (Reçine kaya saplama) | 1.3 | 1.2 | 1.2 x 1.5 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Vanketaswarlu, 1986) | 1.8 | 1.0 | 1.0 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Mekanik kaya saplama) | 1.98 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Reçineli kaya saplama) | 3.41 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Swellex kaya saplama) | 2.89 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995) | 1.80 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski yaklaşımı (2013) (Kablolü kaya saplama) | 9.4 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| 6m genişliğinde trapez kesitli galeri için görgül tasarım çıktıları | | | | |
| Tasarım Yaklaşımı | Saplama boyu, L_b (m) | Saplama aralığı, S_b (m) | Saplama düzeni S_1 (m) x S_2 (m) | Her sırada saplama adedi N (#) |
| Süreksizlik takım sayısı ve süreksizlik eğimine bağlı tasarım yaklaşımı | 2.4 | 1.2 | 1.2 x 1.2 | 5 |
| Panek tasarım yaklaşımı (Panek, 1964) | 2.5 | 1 | 1.0 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (Ünal, 1983) (Mekanik kaya saplama) | 1.9 | 1.2 | 1.2 x 1.5 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı (Ünal, 1983) (Reçine kaya saplama) | 2.2 | 1.5 | 1.5 x 1.5 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Mekanik kaya saplama) | 2.57 | 0.86 | 0.86 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Reçineli kaya saplama) | 5.1 | 0.86 | 0.86 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı tasarım yaklaşımı (Ünal, 1990) (Swellex kaya saplama) | 4.01 | 0.86 | 0.86 x 1.0 | 6 |
| Q sistemine bağlı Grimstand ve Barton tasarım yaklaşımı (1995) | 2.1 | 0.9 | 0.9 x 1.0 | 6 |
| RMR sistemine bağlı Lowson ve Bieniawski yaklaşımı (2013) (Kablolü kaya saplama) | 12.5 | 0.96 | 0.9 x 1.0 | 6 |

4.2.2. 2 Boyutlu sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen kaya saplaması tahkimat ön tasarımına ait bulgular

TKİ-GLİ Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür madenine ait gerçekleştirilen kaya saplaması tahkimat ön tasarımı çalışmalarında görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen tasarım çıktıları (Çizelge 4.29) Phase2 (v6.0) programında sayısal olarak modellenmiş ve her bir yaklaşım sonucu at nalı ve trapez kesitte açılan galeriler için denenmiştir.

Phase 2 programından alınan tasarım çıktıları, at nalı galeri kesiti için Çizelge 4.30'da trapez galeri kesiti için ise Çizelge 4.31'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.30. At nalı galeri kesitinin modellendiği Phase2 tasarım çıktıları

| Görgül tasarım yaklaşımı no | Kaya Saplaması Tipi | Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen tasarım sonuçları | | | | 2 Boyutlu sayısal analizlerden elde edilen tasarım çıktıları | | |
|--|---|---|-----------------------------|---------------|--------------------------|--|-----------------------|------------------------------|
| | | Önerilen saplama boyu (m) | Önerilen saplama aralığı(m) | Saplama adedi | Saplama Düzeni (Sb x Sr) | Toplam yer değiştirme (m) | Yenilen eleman sayısı | Yenilen kaya saplaması adedi |
| 1-Sür. takım say. ve sür eğim. bağlı tasarım yaklaşımı | Reçineli | 2.4 | 1.2 | 6 | 1.2x1.0 | 0.1128 | 2559 | 26 |
| | Kablolu | 2.4 | 1.2 | 6 | 1.2x1.0 | 0.1129 | 2579 | 6 |
| | Swellex | 2.4 | 1.2 | 6 | 1.2x1.0 | 0.1066 | 2546 | 35 |
| 2-Panek tasarım yaklaşımı (1964) | Reçineli | 2.5 | 1 | 4 | 1.0x1.0 | 0.1136 | 2553 | 0 |
| | Kablolu | 2.5 | 1 | 4 | 1.0x1.0 | 0.1131 | 2580 | 2 |
| | Swellex | 2.5 | 1 | 4 | 1.0x1.0 | 0.1141 | 2595 | 9 |
| 3-RQD sistemine bağlı tasarım (1970-1972) | Yaklaşımında sadece kaya saplaması aralığı ile ilgili öneri verildiği için sayısal analizler yapılmamıştır. | | | | | | | |
| 4-RMR-Bieniawski tasarım (1973) | Reçineli | 5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1125 | 2556 | 21 |
| | Kablolu | 5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1130 | 2578 | 13 |
| | Swellex | 5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1058 | 2579 | 76 |
| 5-RMR-Ünal tasarım yaklaşımı (1983-1986) | Mekanik | 1.9 | 1.2 | 6 | 1.2x1.5 | 0.1130 | 2575 | 12 |
| | Reçineli | 1.3 | 1.2 | 6 | 1.2x1.5 | 0.1128 | 2560 | 25 |
| 6-RMR-Vanketasvarlı tasarım yaklaşımı (1986) | Reçineli | 1.8 | 1 | 6 | 1x1.2 | 0.1127 | 2559 | 21 |
| 7-RMR-Ünal tasarım yaklaşımı (1990) | Mekanik | 1.98 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1130 | 2578 | 12 |
| | Reçineli | 3.41 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1127 | 2543 | 15 |
| | Swellex | 2.89 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1094 | 2559 | 25 |
| 8-Q-Grim. ve Barton tasarım yaklaşımı (1995) | Reçineli | 1.8 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1129 | 2546 | 14 |
| | Kablolu | 1.8 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1130 | 2578 | 0 |
| | Swellex | 1.8 | 0.90 | 6 | 0.9x1 | 0.1103 | 2574 | 26 |
| 9-RMR-Lowson ve Bieniawski tasarım y. (2013) | Kablolu | 9.4 | 0.9 | 6 | 0.9x1 | 0.1130 | 2576 | 66 |

Çizelge 4.30 incelendiğinde at nalı kesitli galeriler için görgül yaklaşımların önerdiği tahkimat boyutlandırmasında en başarılı yaklaşım RMR sistemine bağlı Ünal tasarım yaklaşımı olduğu belirlenmiştir. Buna göre at nalı kesitinde 2.89 metre uzunluğunda Swellex tipi kaya saplamaları diğer yaklaşımların önerdiği saplama

boyutlandırmasına göre daha az deformasyona izin vermekte ayrıca kaya saplamasını oluşturan elemanlarda daha az yenilme oluşmaktadır.

Çizelge 4.31’de trapez kesitli galerinin modellendiği Phase 2 tasarım çıktıları verilmiştir. Çizelge 4.31’de sunulan sonuçlara göre en başarılı yaklaşım RMR sistemine bağlı Ünal (1990) tasarım yaklaşımı olduğu görülmektedir. Buna göre trapez kesitli galeri için 5.1 metre uzunluğunda Reçineli kaya saplaması diğer yaklaşımların önerdiği saplama boyutlandırmalarına göre daha az deformasyona izin verdiği ve kaya saplamasını oluşturan elemanlarda daha az yenilmenin olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.31. Trapez kesitli galeri kesitinin modellendiği Phase2 tasarım çıktıları

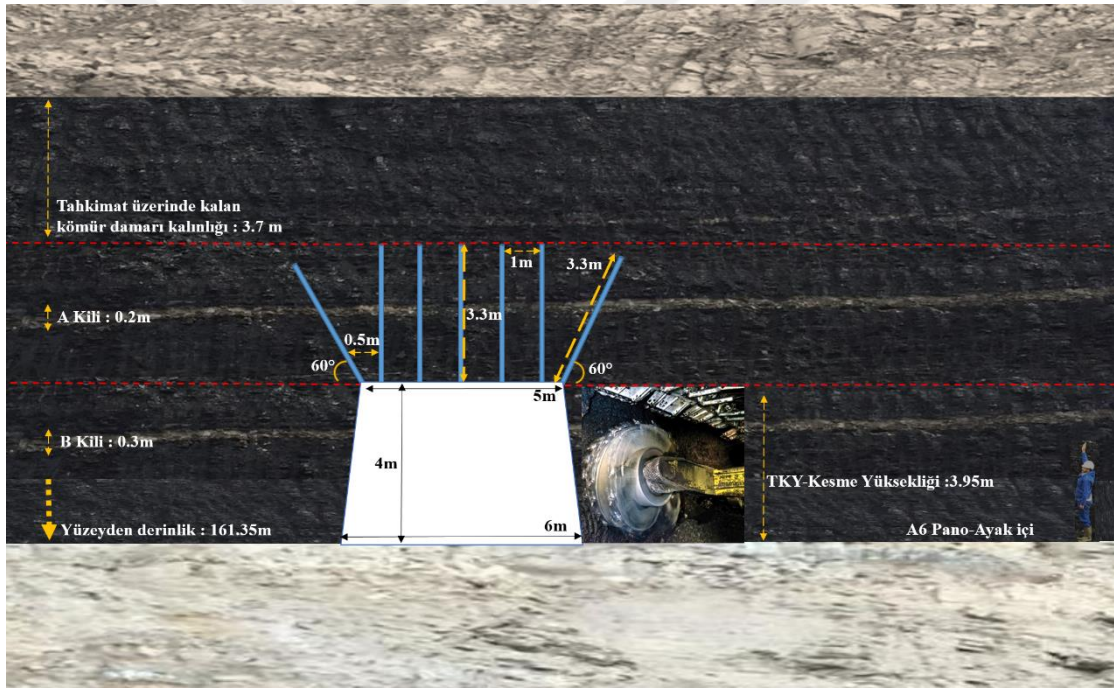
| Görgül tasarım yaklaşımı no | Kaya Saplaması Tipi | Görgül tasarım yaklaşımlarından elde edilen tasarım sonuçları | | | | 2 Boyutlu sayısal analizlerden elde edilen tasarım çıktıları | | |
|--|--|---|-----------------------------|---------------|--------------------------|--|-----------------------|------------------------------|
| | | Önerilen saplama boyu (m) | Önerilen saplama aralığı(m) | Saplama adedi | Saplama Düzeni (Sb x Sr) | Toplam yer değiştirme (m) | Yenilen eleman sayısı | Yenilen kaya saplaması adedi |
| 1-Sür. takım say. ve sür eğim. bağlı tasarım yaklaşımı | Reçineli | 2.4 | 1.2 | 5 | 1.2x1.0 | 0.1076 | 2167 | 17 |
| | Kablolu | 2.4 | 1.2 | 5 | 1.2x1.0 | 0.1075 | 2178 | 0 |
| | Swellex | 2.4 | 1.2 | 5 | 1.2x1.0 | 0.1142 | 2183 | 0 |
| 2-Panek tasarım yaklaşımı (1964) | Reçineli | 2.5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1077 | 2164 | 17 |
| | Kablolu | 2.5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1075 | 2181 | 0 |
| | Swellex | 2.5 | 1 | 6 | 1.0x1.0 | 0.1147 | 2182 | 3 |
| 3-RQD sistemine bağlı tasarım (1970-1972) | Yaklaşımında sadece kaya saplaması aralığı ile ilgili öneri verildiği için sayısal analizler yapılmamıştır. | | | | | | | |
| 4-RMR-Bieniawski tasarım (1973) | Yaklaşımında sadece at nalı galeri kesiti ile ilgili öneri verildiği için sayısal analizler yapılmamıştır. | | | | | | | |
| 5-RMR-Ünal tasarım yaklaşımı (1983-1986) | Mekanik | 2.2 | 1.5 | 6 | 1.5x1.5 | 0.1077 | 2175 | 10 |
| | Reçineli | 1.6 | 1.5 | 6 | 1.5x1.5 | 0.1074 | 2171 | 19 |
| 6-RMR-Vanketasvarlı tasarım yaklaşımı (1986) | Yaklaşımında 5 m yeraltı açıklığından daha küçük galeri kesiti ile ilgili öneri verildiği için sayısal analizler yapılmamıştır | | | | | | | |
| 7-RMR-Ünal tasarım yaklaşımı (1990) | Mekanik | 2.57 | 0.86 | 7 | 0.86x1 | 0.1074 | 2163 | 13 |
| | Reçineli | 5.1 | 0.86 | 7 | 0.86x1 | 0.1075 | 2150 | 4 |
| | Swellex | 4.01 | 0.86 | 7 | 0.86x1 | 0.1135 | 2179 | 7 |
| 8-Q-Grim. ve Barton tasarım yaklaşımı (1995) | Reçineli | 2.1 | 0.9 | 6 | 0.9x1 | 0.1075 | 2168 | 14 |
| | Kablolu | 2.1 | 0.9 | 6 | 0.9x1 | 0.1076 | 2179 | 0 |
| | Swellex | 2.1 | 0.9 | 6 | 0.9x1 | 0.1074 | 2165 | 2 |
| 9-RMR-Lowson ve Bieniawski tasarım y. (2013) | Kablolu | 12.5 | 0.96 | 5 | 0.9x1 | 0.1072 | 2177 | 76 |

4.2.3. Ön tasarım sonuçlarına ait genel değerlendirme

TKİ-GLİ-Ömerler yeraltı ocağında maden yönetimi taban yollarında kullanılmakta olan at nalı kesit yerine trapez kesitte çalışmak istemektedir. Bundan dolayı bu tez çalışmasında nihai tasarım analizlerinde trapez galeri kesiti dikkate alınmıştır.

Görgül tasarım yaklaşımlarına ait sonuçlar, sayısal analiz sonuçları ve ayrıca saha gözlemleri ile uzunayak arınındaki madencilik faaliyetleri dikkate alınarak tabanyolları için kaya saplamalarına ait nihai tasarım sonucu olarak Şekil 4.17 geliştirilmiştir.

Ömerler yeraltı ocağında kömür damarı içerisindeki kil ara kesmeleri dikkate alındığında 11 m'lik kalın kömür damarının en üst seviyesinde 20 cm'lik bir A kili tabakasının yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.17). Ön tasarımda kaya saplamasının bu kil tabakasının üzerine çıkmasına karar verilmiştir. Ayrıca kömür kazı arınında tamburlu kesici yükleyici ile gerçekleştirilecek olan kazı işlemlerini olumsuz etkilememek için arın tarafındaki saplamanın yerleştirilme açısı yatay ile 60°'lik açı yapacak şekilde belirlenmiştir. Bu nihai tasarım sonucuna göre kaya saplamalarının boyu, $L_b = 3.3$ m, saplama aralığı, $S_b = 1$ m, galeri eksenli boyunca saplama aralığı, $S_r = 1$ m ve her sırada 7 adet kaya saplamasının kullanılmasına karar verilmiştir.

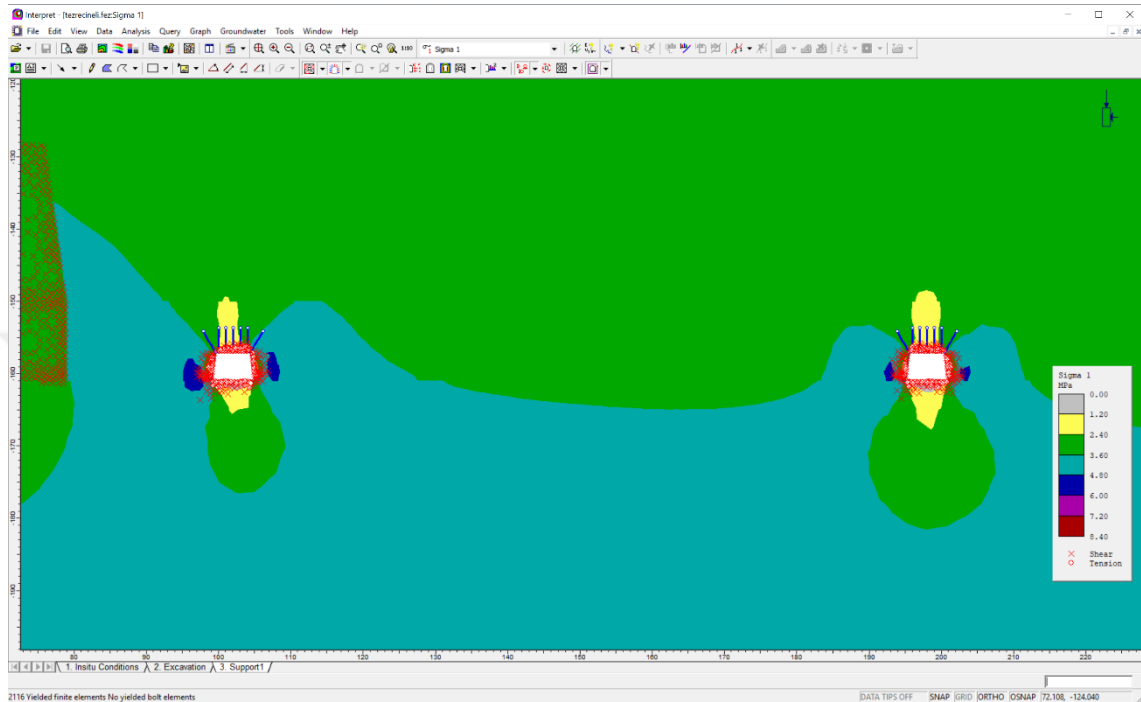


Şekil 4.17. Kaya saplaması tahkimat tasarımına ait ön tasarım sonucu

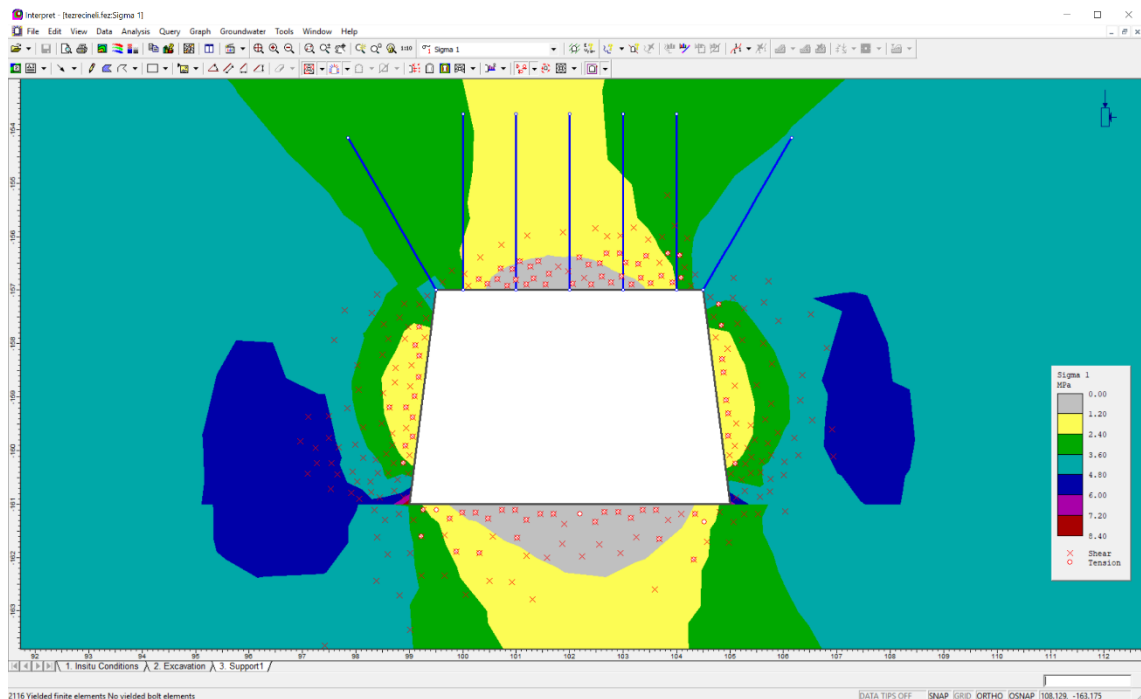
Nihai tasarım sonucu FLAC 3D ile analiz edilmeden önce Phase2 programı ile tekrar değerlendirilmiştir. Bu nihai tasarım sonucu Phase2 programında 3 farklı tipte kaya saplaması için denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.32). Bu çalışmalardan reçineli kaya saplaması tipinin modellendiği Phase 2 çıktısı Şekil 4.18-4.20 arasında tipik bir örnek olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.32. Nihai tasarım sonucuna Phase2 programının verdiği tasarım çıktıları

| Kaya Saplama Tipi | Kaya saplama boyu (m) | Saplama aralığı (m) | Saplama adedi | Saplama Düzeni ($S_b \times S_r$) | Toplam yer değiştirme (m) | Yenilen eleman sayısı | Yenilen kaya saplama adedi |
|-------------------|-----------------------|---------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Reçineli | 3.3 | 1.0 | 7 | 1.0 x 1.0 | 0.0926 | 2116 | 0 |
| Kablolu | 3.3 | 1.0 | 7 | 1.0 x 1.0 | 0.0960 | 2142 | 0 |
| Swellex | 3.3 | 1.0 | 1.0 x 1.0 | 0.1016 | 2148 | 0 | |

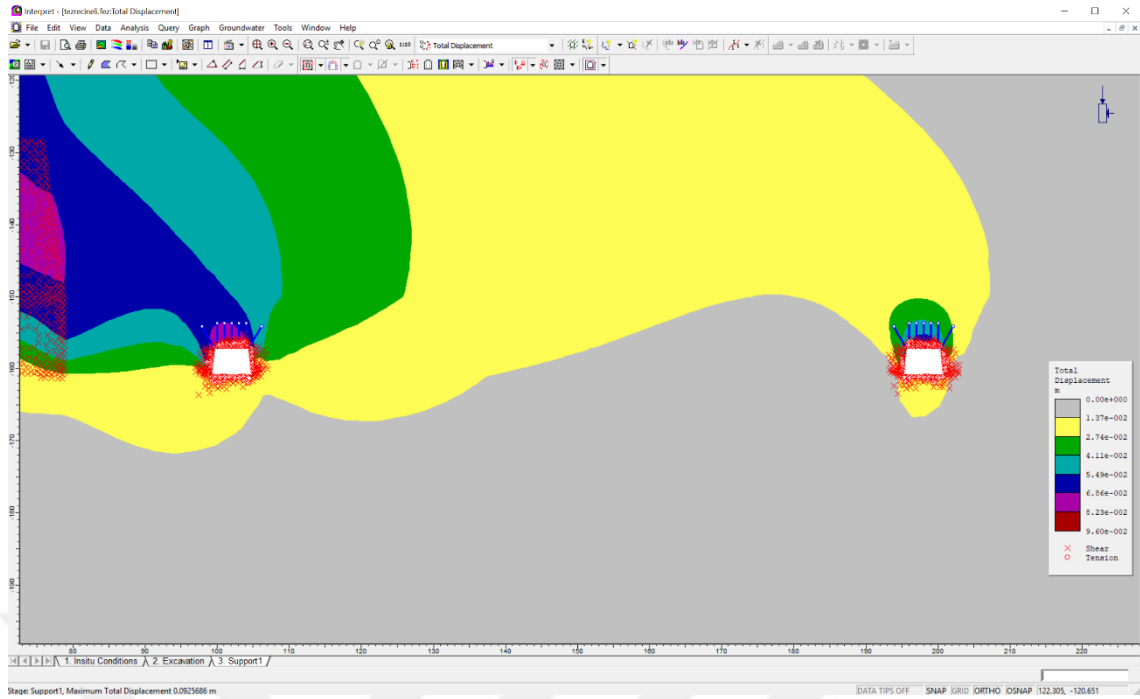


a-En büyük asal gerilme kontur diyagramı genel görünüm

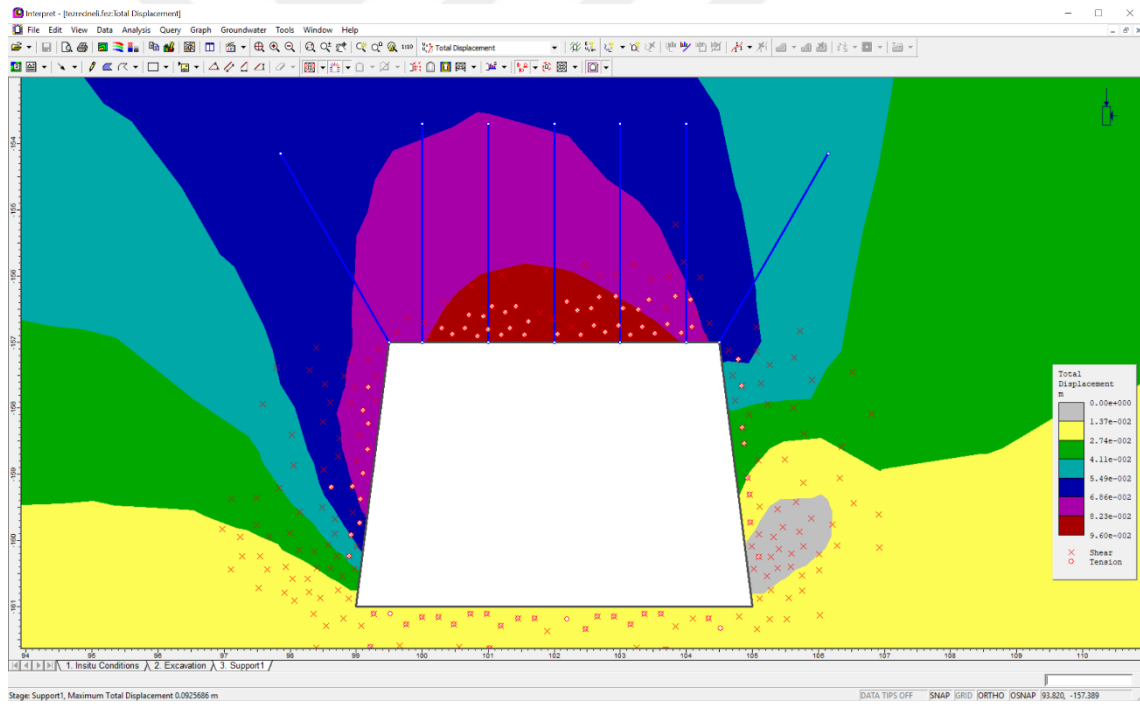


b-Açıklık etrafında oluşan en büyük asal gerilme kontur diyagramı

Şekil 4.18. Trapez kesitli tabanyolları çevresinde oluşan en büyük asal gerilme ve yenilme bölgesi (Reçineli Kaya Saplama - $L_b = 3.3$ m, $S_b = 1$ m)

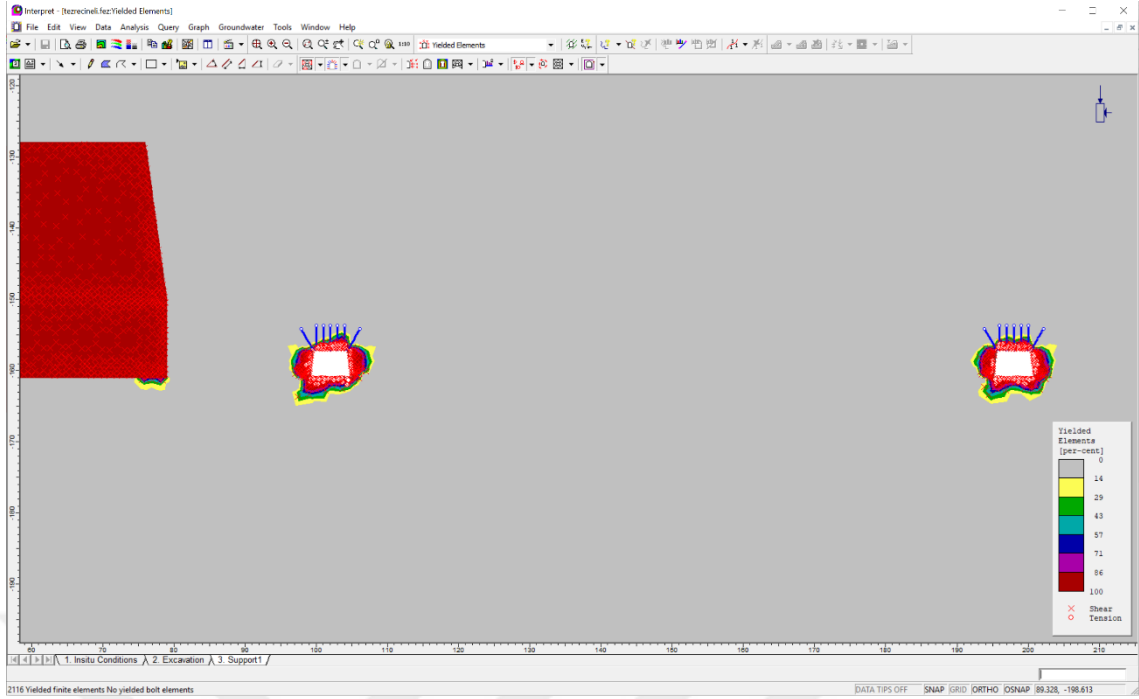


a-Toplam yerdeğiştirme kontur diyagramı genel görünüm

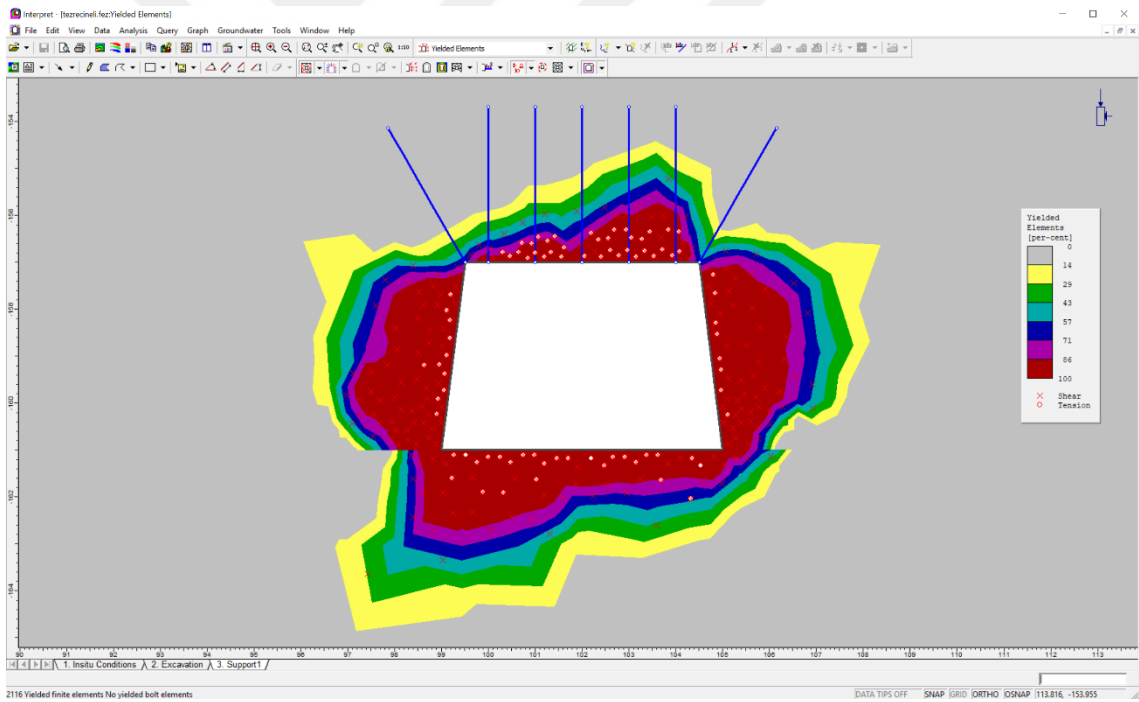


b-Açıklık etrafında meydana gelen toplam yerdeğiştirme kontur diyagramı

Şekil 4.19. Trapez kesitli tabanyolları çevresinde meydana gelen toplam yer değiştirme ve yenilme bölgesi (Reçineli Kaya Saplaması - $L_b = 3.3$ m, $S_b = 1$ m)



a-Yenilme bölgesi kontur diyagramı genel görünüm



b-Açıklık etrafında meydana gelen toplam yerdeğiştirme kontur diyagramı

Şekil 4.20. Trapez kesitli tabanyolları çevresinde meydana gelen yenilme bölgesi (Reçineli Kaya Saplaması - $L_b = 3.3$ m, $S_b = 1$ m)

Şekiller incelendiğinde, 3.3 metre uzunluğunda ve 1 metre aralığa sahip reçineli kaya saplamaların tabanyolu kazı ve tahkimatında herhangi yenilen eleman olmadığı, bununla birlikte uzunayak kazısı gerçekleştirildiğinde ise ayak tarafında kalan bölgedeki saplamaların beklendiği gibi hepsinin yenildiği tespit edilmiştir.

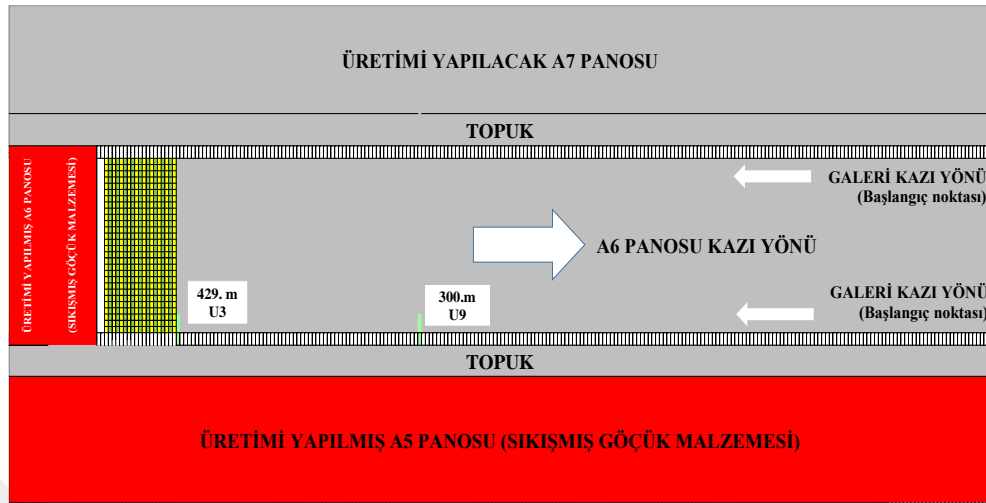
4.3. FLAC 3D Programı ile Gerçekleştirilen Sayısal Analiz Sonuçları

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosunun modellendiği FLAC 3D programında, ocakta kullanılan demir bağ tahkimat ve ön tasarımı gerçekleştirilen kaya saplaması tahkimatı ayrı ayrı olmak üzere aşağıda belirtilen ortak modelleme prosedürü ile modellenmiştir.

- i. 500 m uzunluğundaki panonun alt ve üst taban yolları 1'er metrelik kazı ve tahkimat adımları ile sürülmüştür (Şekil 4.21).
- ii. Tabanyollarında kazı ve tahkimat tamamlandıktan sonra, panonun 450. m'sinde ayak içi bölgesi tanımlanmıştır. Bu bölgenin arkasında kalan 50 m uzunluğundaki bölgede sıkışmış göçük bölgesi oluşturulmuştur (Şekil 4.21).
- iii. Uzunayak kazı arınında 1'er m'lik kazılar şeklinde ayak arını 18 m ilerletilmiştir (Şekil 4.21'de sarı ve yeşil renkli hatlar).
- iv. Uzunayağın ilerletilmesinde 1 m'lik arın kazısı gerçekleştirilmiş sonrasında ise yürüyen tahkimat üniteleri olarak modele tanımlanan kabuk yapısal elemanları (shell structural elements) 1 m ilerletilmiştir.
- v. Her 1 m'lik ayak ilerlemesi ile arka kömür bölgesi boşaltılmış ve tavanı göçertilmiştir.
- vi. Yeni oluşturulan bu göçük malzemesinin mekanik davranışı, modelde çift akma modeli (double-yield) ile tanımlanmıştır.
- vii. Düşey ikincil gerilme ve düşey yer değiştirme (deplasman) analizlerini gerçekleştirmek için, üst ve alt taban yolu üzerinde toplamda 40 adet (20 adet + 20 adet) izleme bölgesi oluşturulmuştur. Her bir izleme bölgesi üç alt izleme noktasından oluşmuştur. Bunlar sırası ile galerinin orta noktasında galeri tavanı, galeri kenarından pano içine doğru 10 m içeride pano bölgesinde ve 20 m genişliğindeki topuğun 10. m'sindeki topuk bölgesinde konumlandırılmıştır. 40 izleme bölgesinin alt istasyonları ile birlikte modelde toplamda 120 adet izleme istasyonu tanımlanmıştır. Pano ve topuk bölgelerinde yer alan izleme noktalarının buldukları seviye aynı hat üzerinde yer alan ve galeri tavanında bulunan izleme noktası ile aynı seviyededir.

Yukarıda tanımlanan model prosedürü adımları dört farklı tahkimat türü için ayrı ayrı hazırlanan modellerde uygulanmıştır. Hazırlanan dört farklı model ayrı ayrı FLAC 3D programı ile test edilmiş ve sayısal sonuçlara ulaşılmıştır. FLAC 3D programı yardımı ile

oluşturulan model dikkate alınarak öncelikle tünel pozisyonunda açılan taban yollarına ait sonuçlar takibinde ise ayak kazısına bağlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.21. FLAC 3D programında hazırlanan modelin açıklayıcı plan görünüşü

4.3.1. Demir bağ tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları

A6 uzunayak panosunun taban yolları, bu modelde demirbağ ile tahkim edilmiştir. Demir bağları temsil etmek üzere modelde kiriş yapısal elemanları (beam structural elements) kullanılmıştır. Kullanılan bu elemanlara ait detaylı bilgiler önceki bölümlerde belirtilmiştir (Bknz. Bölüm 3.5.5.1).

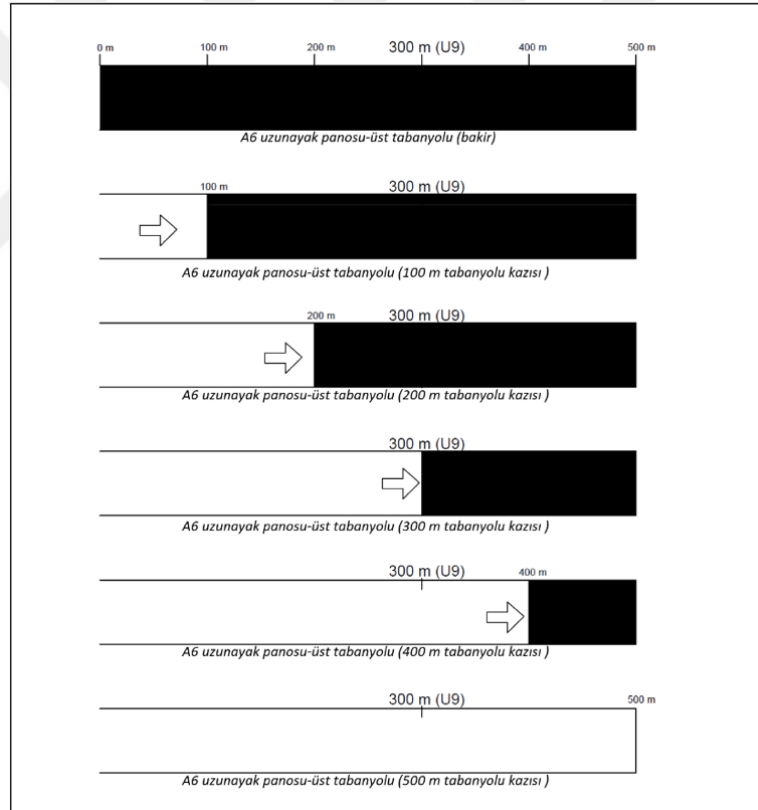
A6 panosunun yanında daha önce çalışılmış ve göçük halinde olan A5 panosu yer almaktadır. Bu pano A6 panosunun üst taban yoluna komşu konumdadır. A6 panosunun alt tabanyolu henüz hazırlık çalışmalarına başlanılmamış olan A7 panosuna komşu konumdadır (Şekil 4.21). Yapılan analiz sonuçlarında A5 panosunu sıkışmış göçük pozisyonunda olmasından dolayı, üst taban yolunda oluşan yer değiştirme ve gerilmelerin alt taban yolunda oluşan yer değiştirme ve gerilmelerden daha yüksek değerler içerdiği belirlenmiştir. Bundan dolayı bu tezde, kötü koşulu yansıtan üst taban yoluna ait sonuçlar değerlendirilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde, demir bağ tahkimat modelinin, tünel kazısı ve uzunayak kazısı durumuna bağlı elde edilen sonuçlar ayrı ayrı sunulmuştur.

4.3.1.1. Demir bağ tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

500 m uzunlukta bir uzunayak panosu olarak modele tanımlanan A6 panosunda tabanyolu, demir bağ tahkimatı ile modellenmiştir. FLAC 3D ile gerçekleştirilen sayısal

analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için modele tanımlanan 40 adet izleme bölgesinde düşey yer değiştirme (deplasman) ve düşey ikincil gerilme değerleri ortaya konulmuştur. Elde edilen tüm grafiksel sunumlardan bu tezde sadece daha önce çalışılmış ve göçük halinde terk edilmiş A5 panosuna komşu olan üst tabanyolu üzerinde tanımlanan U9 izleme bölgesine ait sonuçlar sunulmuştur. A6 panosu üst tabanyolunun 300. m'sinde yer alan U9 izleme bölgesinden (Bu bölge 3 noktadan oluşmaktadır; Galeri tavanı-U9/Galeri, pano bölgesi-U9/Pano, topuk bölgesi-U9/Topuk) düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimleri değerleri kayıt altına alınmıştır.

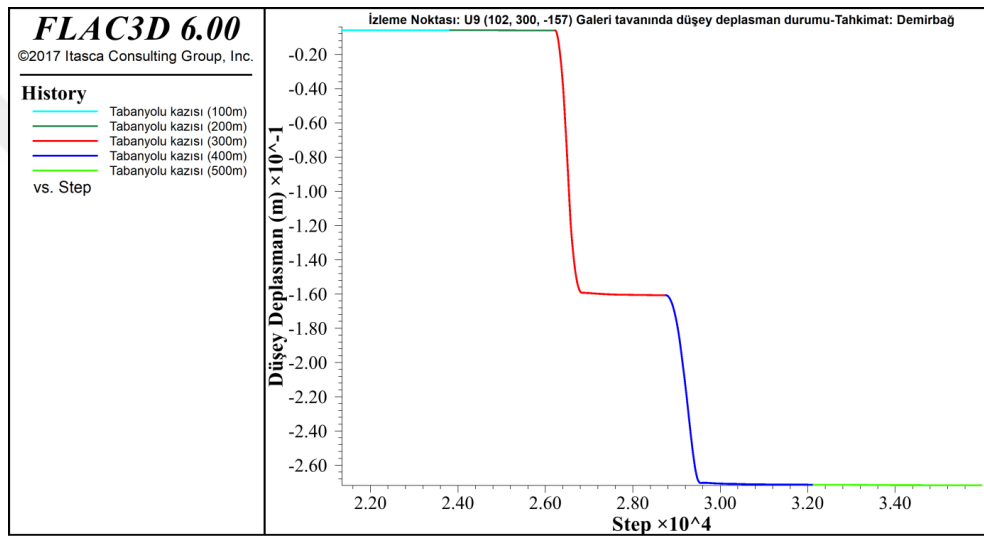
U9 izleme bölgesine ait değerlendirmelerin daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için tabanyolu kazısı ve izleme durumu tipik olarak Şekil 4.22'de belirtilmiştir (Demir bağ tahkimat için gerçekleştirilecek olan analizlerdeki bu değerlendirmeler kaya saplamaları tahkimat modelleri için de geçerli olacaktır).



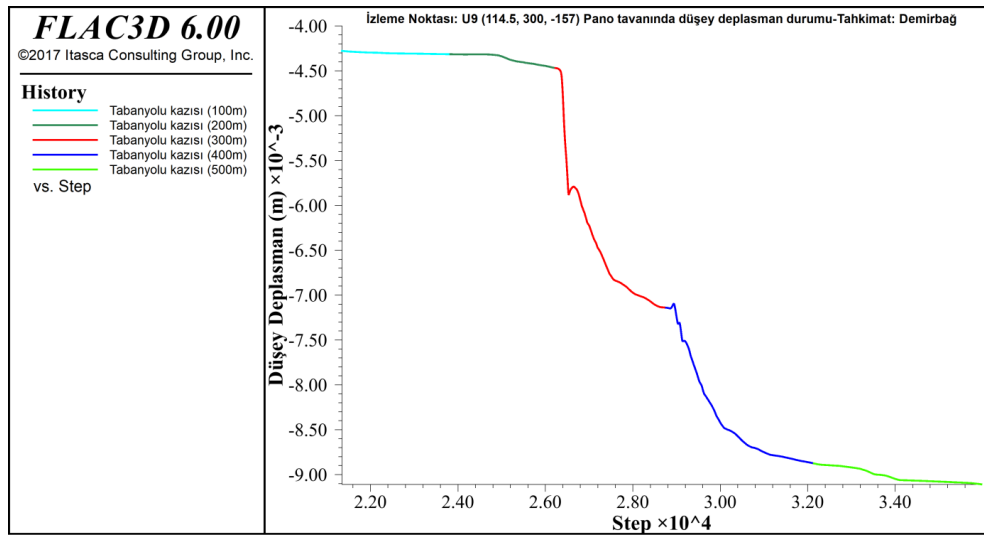
Şekil 4.22. A6 Uzunayak panosu tabanyolu kazısı ve izleme aşamaları (U9/Galeri)

Şekil 4.22 görüldüğü üzere hiç kazıya başlamadan önce U9 izleme bölgesindeki düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değerleri dikkate alınırken daha sonra ilk 100 m kazı sonrasında henüz kazısı yapılmamış olan 300. m'deki durum dikkate alınmıştır. Tabanyolunda 200 m'lik kazı yapıldığında, aynı şekilde bu kazının henüz

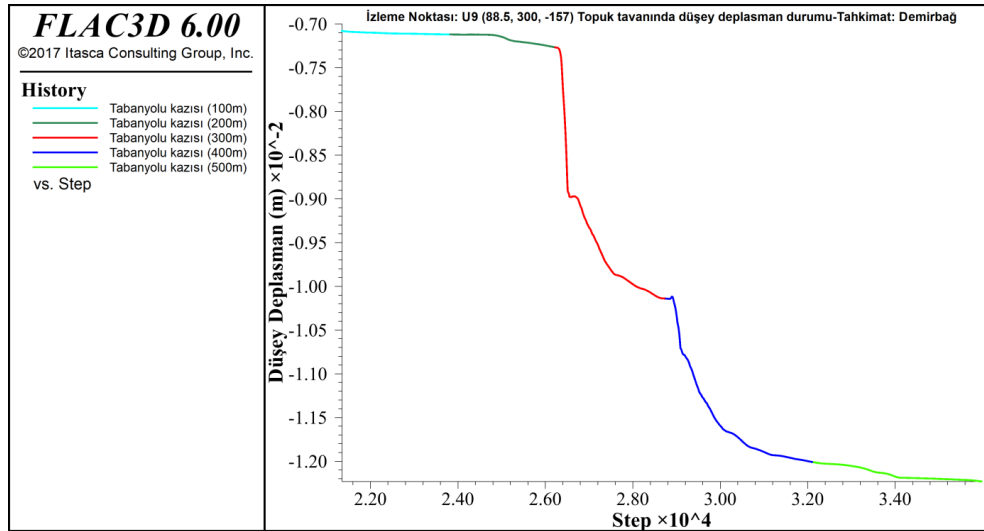
kazısı yapılmamış 300. m’indeki U9 izleme noktasındaki durum incelenmiştir. Üçüncü aşamada tabanyolundaki ilk 300 m’lik kazı yapıldığında kazı arını, izlenen U9 izleme bölgesine ulaşmış olacaktır. Bu koşul için izleme sonuçları alındıktan sonra tabanyolu arını kazıya devam ederek 400. m’ye ulaşmaktadır. Bu koşul altında, kazı arınının gerisinde kalan 300. m’deki U9 izleme bölgesindeki sonuçlar alınmıştır. Son aşamada ise tabanyolunda 500 m’lik kazı tamamlanmıştır. Bu aşamada 200 metre geride kalan U9 izleme noktasındaki düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değerleri kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.22) Bu kayıtlardan düşey yer değiştirme değişimlerini gösteren model çıktıları Şekil 4.23 ile Şekil 4.25 arasında sunulmuştur.



Şekil 4.23. Demir bağ ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Galeri)



Şekil 4.24. Demir bağ tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Pano)



Şekil 4.25. Demir bağ tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Topuk)

Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25 'te sunulan model çıktılarında, 500 m'lik pano boyunca tabanyolu kazı ve demir bağ tahkimatı gerçekleştirilirken, üst tabanyolunun yalnızca 300. m'sinde oluşan düşey yer değiştirme değişimleri görülmektedir. Şekil 4.23'te, taban yollarının ilk 200 m'si kazılırken, henüz kazısı gerçekleşmemiş olan 300. m'deki izleme noktasında düşey yer değiştirmelerin gerçekleşmediği, ancak bu noktaya yaklaşırken düşey yer değiştirme değerlerinin artmaya başladığı görülmektedir. U9 izleme noktasının bulunduğu 300. m'ye gelindiğinde ise bu değer yaklaşık 150 mm olduğu görülmektedir. Tabanyollarının kazı ve tahkimat işlemi 300. m'yi geçtikten sonra, 400. m'ye kadar gerçekleşen kazı işlemlerinde, düşey yer değiştirme değerleri yaklaşık 260 mm değerine kadar çıkmaktadır. 400 ile 500 m arasında devam eden kazı işleminde ise artık bu nokta etkilenmeyerek düşey yer değiştirme değerleri sabit kalmıştır.

Şekil 4.23 'tekine benzer davranış, Şekil 4.24 ve 4.25'te tasarım çıktıları verilen pano ve topuk bölgelerinde de görülmektedir. Ancak bu noktalardaki düşey yer değiştirme değerlerinin, galeri tavanındaki düşey yer değiştirme değerlerden oldukça düşük olduğu farkedilmektedir. Şekil 4.25'te verilen topuk tarafındaki düşey yer değiştirme değerleri, Şekil 4.24'te verilen pano tarafındaki düşey yer değiştirme değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni, topuğun hemen yanında bulunan, daha önce çalışılmış ve göçük halinde olan A5 panosunun yarattığı etki olarak açıklanabilir.

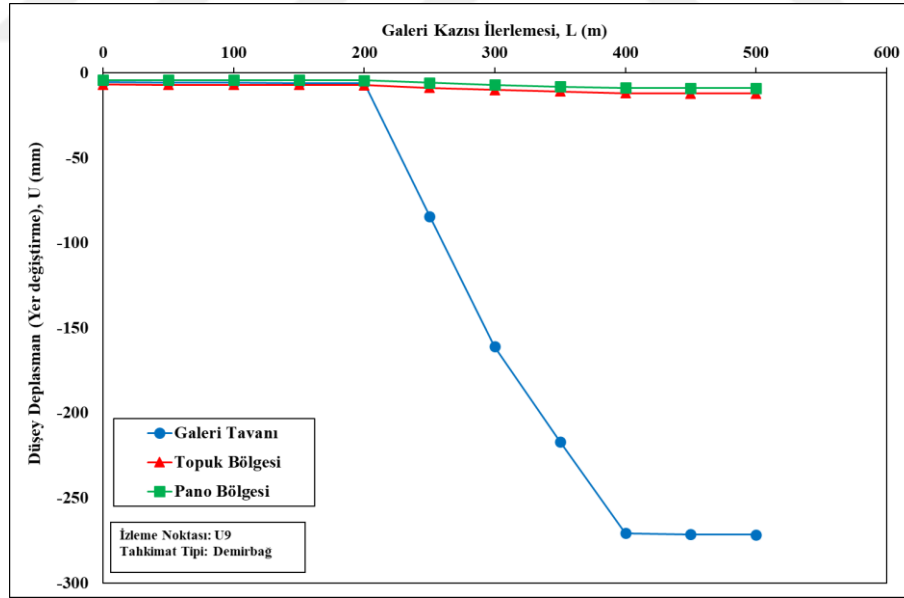
Şekil 4.23-4.25 arasındaki model çıktılarında görülen düşey yer değıştirme değerleri çizelge formatında Çizelge 4.33'te ve grafik formatında Şekil 4.26'da sunulmuştur.

Çizelge 4.33. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey yer değıştirmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -5.6* | -7* | -4.28* |
| 50 | -5.7 | -7.1 | -4.3 |
| 100 | -5.9 | -7.12 | -4.31 |
| 150 | -6 | -7.19 | -4.35 |
| 200 | -6.1 | -7.26 | -4.47 |
| 250 | -84.4 | -8.8 | -5.85 |
| 300** | -161.1 | -10.1 | -7.14 |
| 350 | -216.9 | -11 | -8.1 |
| 400 | -270.85 | -12 | -8.8 |
| 450 | -271.4 | -12.18 | -9.01 |
| 500 | -271.6 | -12.2 | -9.1 |

*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey yer değıştirme miktarı

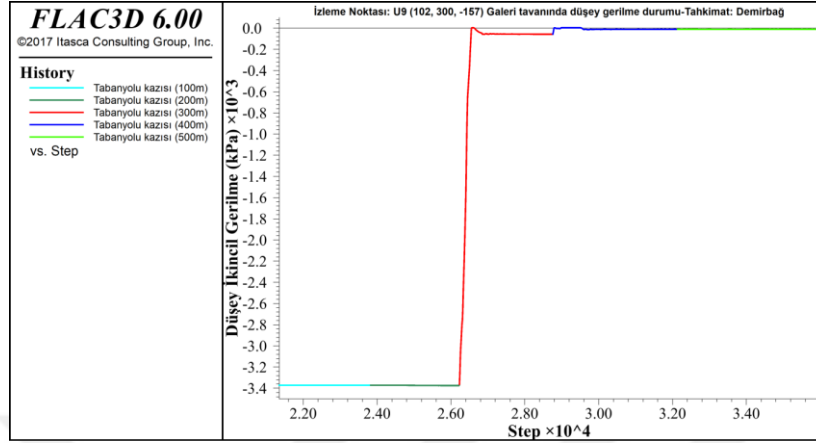
**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.



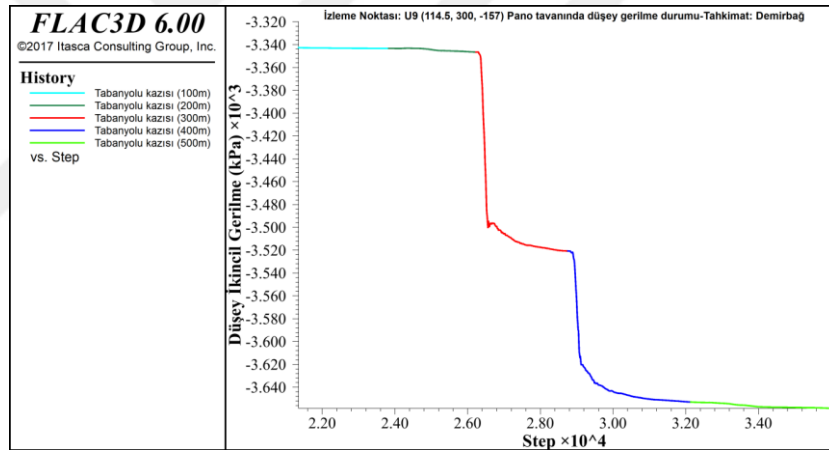
Şekil 4.26. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde (U9 izleme bölgesinde) oluşan düşey yer değıştirmeler

Çizelge 4.33 ve Şekil 4.26 incelendiğinde, tüm taban yolu kazı ve tahkimatı sonrasında, üst taban yolunun 300. m'sinde bulunan izleme noktalarında, galeri tavanında 271.6 mm, topuk bölgesinde 12.2 mm ve pano bölgesinde ise 9.1 mm düşey yer

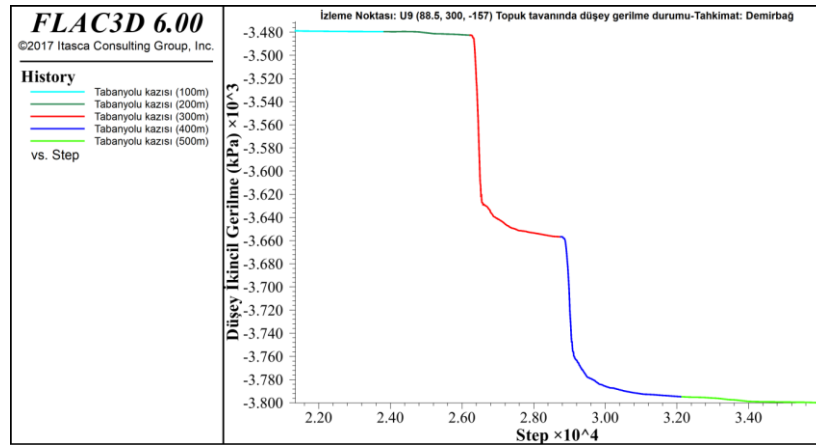
değişirmelerin olduğu görülmektedir. Üst tabanyolunun 300. m’de oluşturulan izleme noktasında (U9) oluşan düşey ikincil gerilme değerleri galeri tavanı, pano bölgesi ve topuk bölgesi için sırası ile Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.27. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Galeri)



Şekil 4.28. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Pano)



Şekil 4.29. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Topuk)

Şekil 4.27 incelendiğinde, tabanyollarının kazı ve tahkimat işlemlerinin başlamasıyla, düşey ikincil gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Düşey ikincil gerilme değerlerinin galeri tavanında azalmasının nedeni olarak pasif tahkimat olan demir bağların, tavan tabakalarının iyice tahkimat üzerine oturmasını beklemesi olarak gösterilebilir. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da ise düşey ikincil gerilmeler topuk ve pano bölgesinde artmaktadır. Bu davranışın kazının, 300. m’deki galeri arınına 100 m gerisinde iken başladığı ve kazının izleme bölgesini 100 m geçmesi ile sonlandığı belirlenmiştir.

Düşey ikincil gerilme değerleri için hazırlanan çizelge ve grafik Çizelge 4.34 ve Şekil 4.30’da sunulmuştur. 500 m uzunluğundaki galeri kazısının tamamlanması ile birlikte 300. m’deki izleme bölgesinde (U9) galeri tavanında 8.93 kPa, pano bölgesinde 3657.72 kPa ve topuk bölgesinde ise 3799.87 kPa ikincil gerilmelerin olduğu görülmektedir (Çizelge 4.34 ve Şekil 4.30).

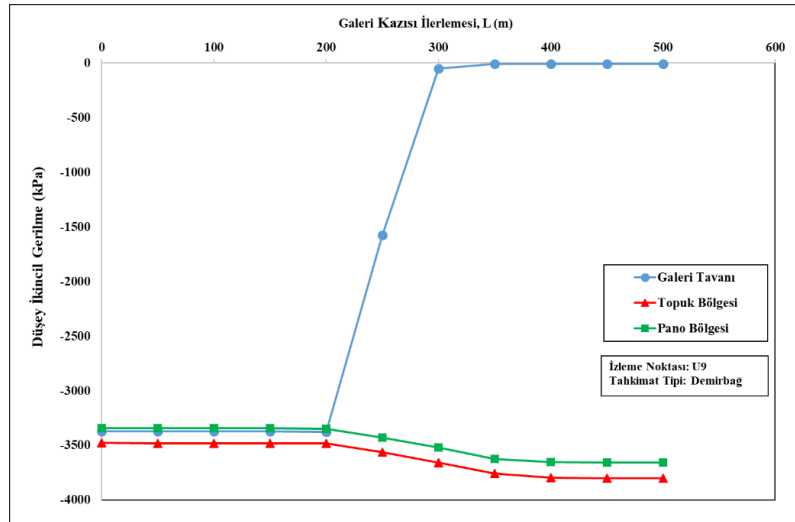
Çizelge 4.34. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey ikincil gerilme değerleri (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -3371.26* | -3478.84* | -3343.62* |
| 50 | -3371.68 | -3479.32 | -3343.07 |
| 100 | -3371.96 | -3479.56 | -3343.33 |
| 150 | -3373.66 | -3481.09 | -3345.3 |
| 200 | -3375.08 | -3482.57 | -3346.51 |
| 250 | -1574.55 | -3563.66 | -3427.97 |
| 300** | -53.3806 | -3656.39 | -3520.48 |
| 350 | -8.93721 | -3758.15 | -3624.22 |
| 400 | -8.93725 | -3794.71 | -3652.65 |
| 450 | -8.9275 | -3799.07 | -3657.71 |
| 500 | -8.9275 | -3799.97 | -3657.72 |

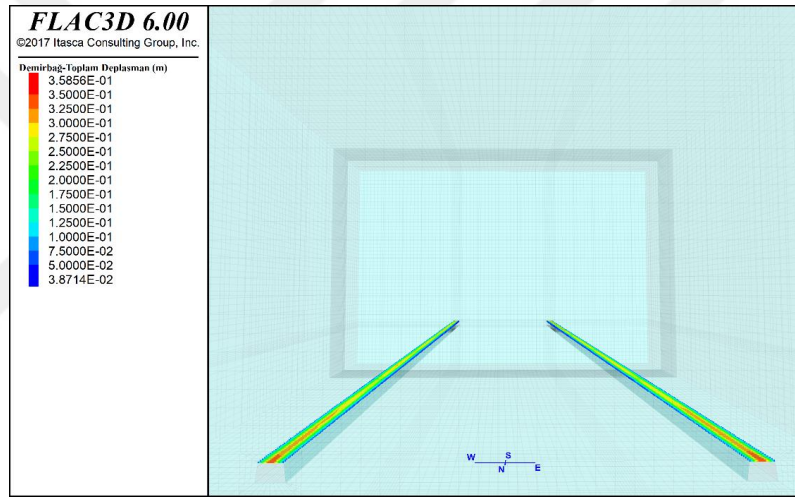
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey gerilme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

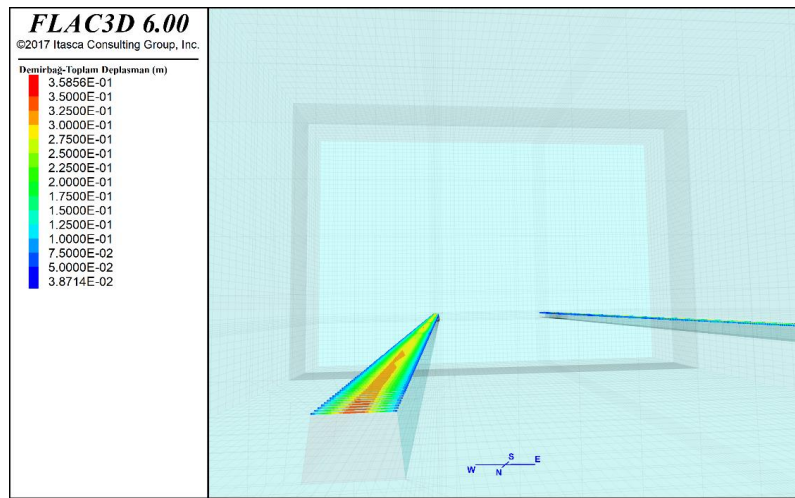
Yukarıda sunulan analizlerde sadece üst tabanyolunun 300. metresindeki U9 izleme bölgesindeki durum incelenmiştir. Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.31’de belirtilmiştir.



Şekil 4.30. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan ikincil gerilmeler



a-Demir bağların üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Demir bağların üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

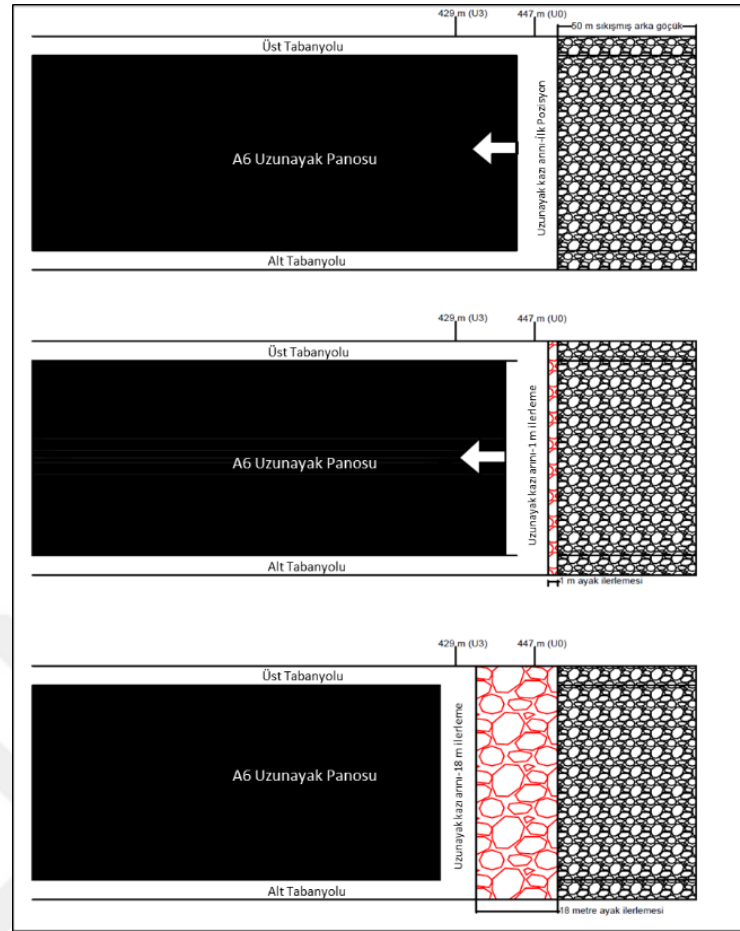
Şekil 4.31. 500 metre uzunluğunda taban yolu kazısından sonra demir bağların üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

Demir bağ tahkimatın modellendiği, 500 metrelik tabanyolu kazısı işlemi gerçekleştirildikten sonra, demir bağlarda gerçekleşen en büyük toplam yer değiştirmelerin 35 cm civarında olduğu görülmektedir. Kontur diyagramı dikkatle incelendiğinde, demir bağ ünitelerinin üzerinde görülen yer değiştirmelerin, her bir demir bağda orta bölgelerde yoğunlaştığı, her bir bağın ortasında 15 cm ile 35 cm arasında toplam yer değiştirmelerin olduğu görülmektedir. Demir bağ tahkimat ünitelerinde, her bir bağın köşelerine doğru toplam yer değiştirme değerlerinin azaldığı en az toplam yer değiştirme değerlerinin bağların tam uç noktalarında görüldüğü söylenebilir. 500 metrelik tabanyolu kazısının gerçekleştirilmesi ile bağların köşelerinde meydana gelen yer değiştirme değerlerinin 3.8 cm civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.31)

4.3.1.2. Demir bağ tahkimatlı taban yollarında uzunayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

Demir bağ tahkimat modelinde, uzunayak kazısına dayalı oluşan yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimleri bu bölümde sunulmuştur.

Modelin bu aşamasında, uzunayağın ilerletilmesi ile izleme bölgelerinde gerçekleşen, düşey ikincil gerilme ve düşey yer değiştirme değişimlerinin incelenmesi hedeflenmiştir. FLAC 3D ile gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için modele tanımlanan 40 adet izleme bölgesinde düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değerleri elde edilerek değerlendirilmiştir. Elde edilen tüm grafiksel sunumlar arasında bu tezde sadece daha önce çalışılmış ve göçük halinde bulunan A5 panosuna komşu durumdaki üst tabanyolu üzerinde tanımlanan U3 izleme bölgesine ait sonuçlar sunulmuştur. Bu amaçla, modelde ayağın ilerletildiği son nokta olan ve ayağın 18 m önündeki 429. m'de yer alan U3 izleme bölgesi (Galeri tavanı-U3/Galeri, A6 pano bölgesi-U3/Pano, topuk bölgesi-U3/Topuk) seçilmiştir. Modelde tünel kazısı aşaması için 500 m uzunluğunda tabanyolları sürüldükten sonra her iki tabanyolu arasında oluşturulacak uzunayağın kazı arını 450. m'de tanımlanmış, arka tarafta kalan 50 m'lik bölüm başlangıç koşulunda sıkışmış göçük malzemesi olarak modele tanımlanmıştır. Tabanyolu üzerinde arın hizasında (447. metre) tanımlanan U0 izleme bölgesinden sonra her 6 m ara ile izleme bölgeleri tanımlanmıştır (Şekil 4.32).

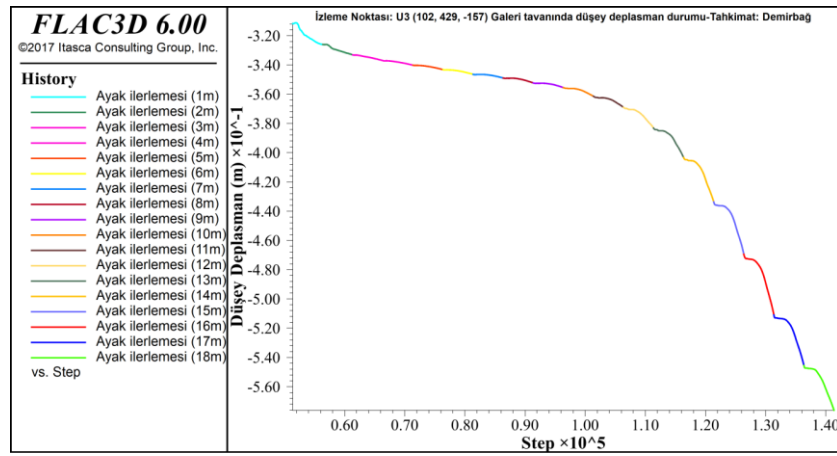


Şekil 4.32. A6 Uzunayak panosu ayak kazısı ve izleme aşamaları (U3/Galeri)

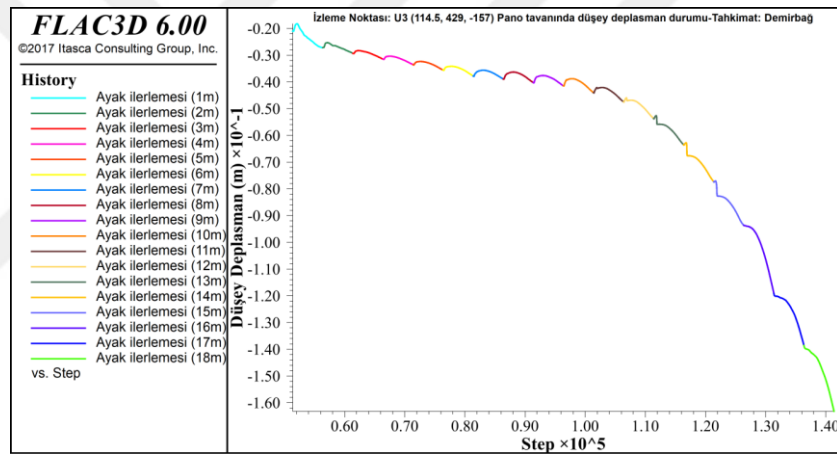
Burada verilecek olan analizlerde 429. m’de konumlandırılmış olan U3 izleme bölgesi dikkate alınmıştır. Uzunayak ayakiçinin merkezi ile aynı hizada ve üst tabanyolunda bulunan (447. m) U0 izleme istasyonu ile izlenecek olan U3 izleme istasyonu (429. m) arasında 18 m bulunmaktadır. Uzunayak arınında 1 m’lik kazılar ile arın ilerletilirken, ileride bulunan U3 izleme bölgesindeki düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilmeler incelenmiştir. Böylece ayak kazısına bağlı olarak 18. m’de mevcut demir bağı galeri tavanında oluşan yer değiştirme ve gerilmelerden nasıl etkilendiği ortaya konmuştur (Şekil 4.32) (Burada belirtilen analizlerin değerlendirilme mantığı kaya saplamaları tahkimat modellerinin analizlerinde de geçerli olacaktır).

Bununla birlikte ayak kazılarına bağlı olarak pano tarafında ve topuk tarafında oluşan yer değiştirme ve gerilme değişimleri belirlenmiştir. Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki düşey yer değiştirme durumları Şekil 4.33-4.35’te sunulmuştur. Bu şekiller üzerinde yer alan eğrilerde her bir farklı renk 1 metrelik arın kazısını temsil etmektedir. Şekillerde x eksenlerinde belirtilen Step, FLAC 3D programının modellenen her bir aşamada düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme

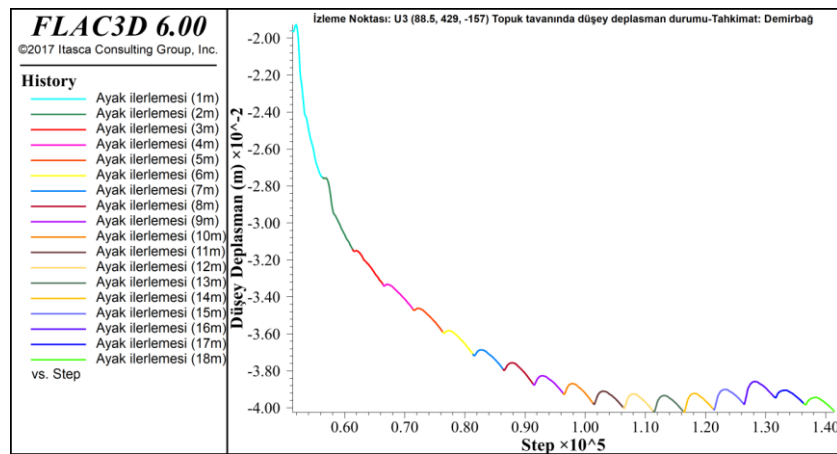
durumunun değiştiği işlem adımlarını ifade etmektedir. Bu eğriler analiz edilirken her bir aşama için başlangıç ve bitiş noktaları dikkate alınmıştır.



şekil 4.33. Demir bağ ile tahkim edilmiş üç taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Galeri)



şekil 4.34. Demir bağ ile tahkim edilmiş üç taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Pano)

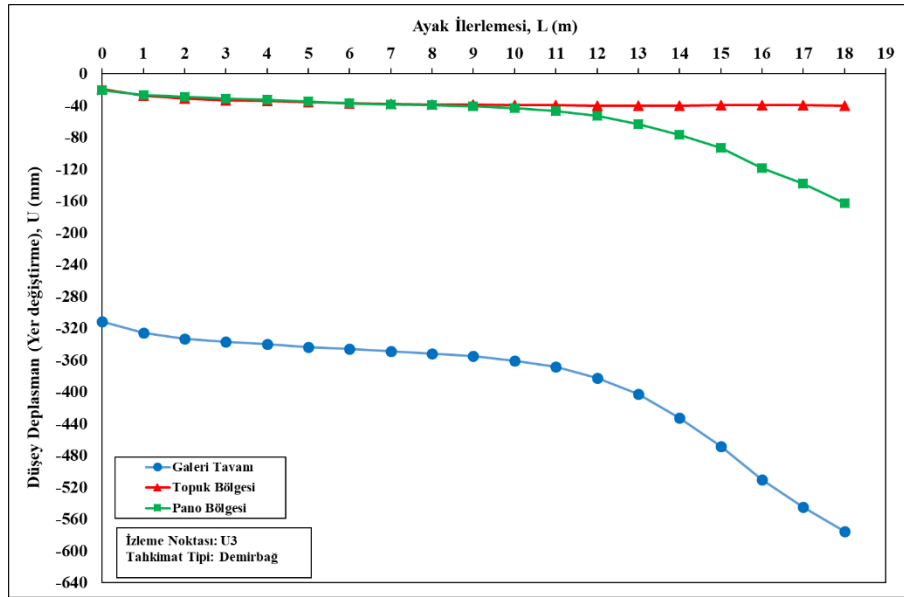


şekil 4.35. Demir bağ ile tahkim edilmiş üç taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Topuk)

Şekil 4.33'te görüldüğü gibi, ayağın 1'er metrelik her ilerlemede galeri tavanında düşey yer değiştirme değerleri hızla artmaktadır. Ayak önünde 429. m'de konumlanan U3 izleme bölgesinde, galeri tavanındaki izleme noktasında, ayak 429. m'ye gelince, bir başka ifade ile ayak 18 metre ilerleyince oluşan yer değiştirme değerinin 578 mm'ye çıktığı belirlenmiştir. Sadece 18 m'lik uzun arın kazısı ile yer değiştirme artışı 267 mm (578 mm - 311 mm) olmuştur. Burada başlangıç değeri olan 311 mm, tabanyollarının açılması, ayağın oluşturulması ve ayak arkasında tanımlanan sıkışmış malzemeden oluşan göçüğün tanımlanması ile meydana gelen toplam düşey yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Üst tabanyolunda bulunan izleme noktasından (U3/Galeri) 10 m pano içerisine doğru olan bölgedeki U3/pano izleme noktasındaki yer değiştirme davranışı Şekil 4.34'te sunulmuştur. Burada 18 m arın kazısı sonrasında nihai düşey yer değiştirme değeri 163.1 mm olmuştur. Üst taban yoluna komşu olan topuğun orta noktasına ait bölgede (U3/topuk) ise nihai düşey yer değiştirme değeri 40 mm seviyesinde oluşmuştur (Şekil 4.35). Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35'te üretilen sayısal değerler Çizelge 4.35'te sunulmuştur. Bu değerlere dayalı grafiksel sunum Şekil 4.36'da verilmiştir.

Çizelge 4.35. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3 izleme bölgesi)

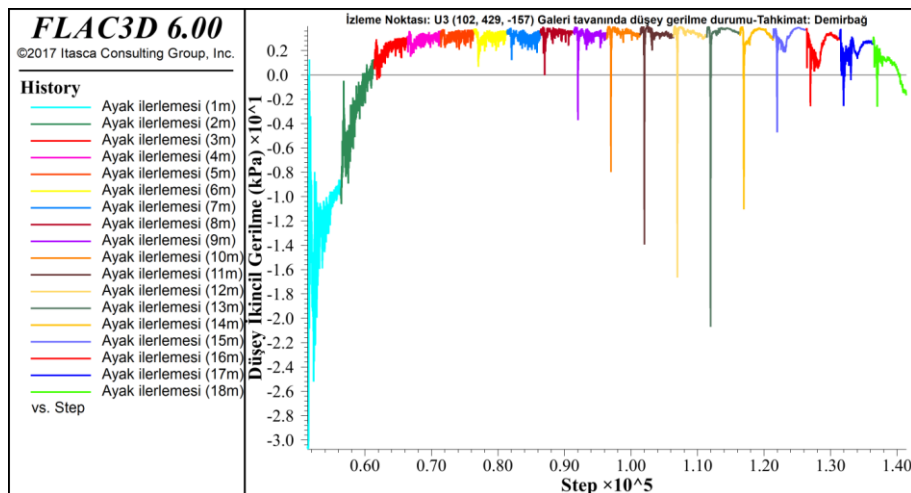
| Ayak Kazı İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|----------------------|-----------|----------|----------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -311.345 | -19.6037 | -20.5931 |
| 1 | -325.976 | -27.5224 | -27.2664 |
| 2 | -333.113 | -31.413 | -29.4254 |
| 3 | -337.038 | -33.3066 | -31.1919 |
| 4 | -340.25 | -34.6494 | -33.1546 |
| 5 | -343.461 | -35.8888 | -35.3136 |
| 6 | -346.316 | -37.0594 | -37.4726 |
| 7 | -348.814 | -37.8857 | -38.6503 |
| 8 | -352.026 | -38.6432 | -39.8279 |
| 9 | -355.237 | -39.1941 | -41.2018 |
| 10 | -361.304 | -39.7449 | -43.5571 |
| 11 | -368.441 | -39.9515 | -47.0901 |
| 12 | -382.714 | -40.1581 | -53.3708 |
| 13 | -402.698 | -40.1925 | -63.1845 |
| 14 | -433.03 | -40.1237 | -76.9237 |
| 15 | -468.715 | -39.7449 | -93.2144 |
| 16 | -510.466 | -39.3318 | -118.73 |
| 17 | -544.723 | -39.7449 | -138.357 |
| 18 | -575.769 | -40.2269 | -163.088 |



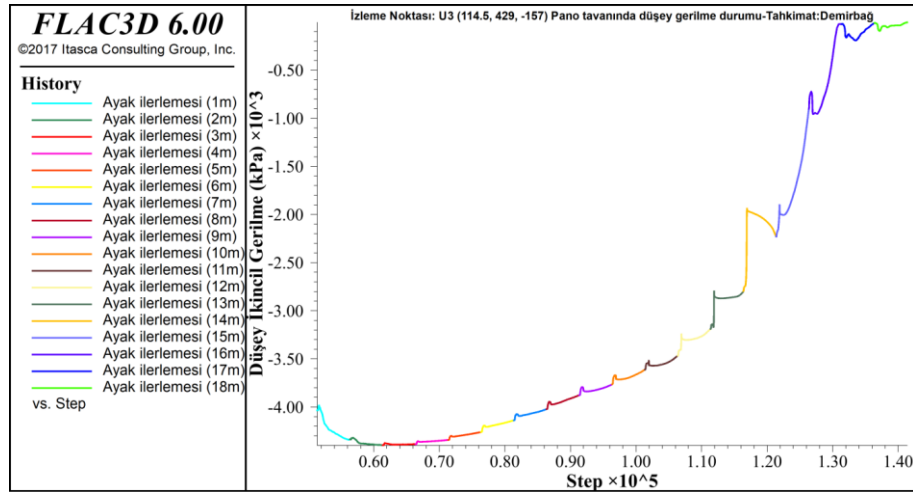
Şekil 4.36. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler

Çizelge 4.35 ile Şekil 4.36 incelenirse, sadece 18 m'lik arın kazısı ile U3 izleme noktasında galeri tavanında 267 mm, pano tarafında 142.4 mm ve topuk tarafında 20.7 mm yer değiştirme artışı olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre galeri tavanında en büyük yer değiştirme artışının olduğu, topuk tarafında ise en düşük yer değiştirme artışının olduğu görülmektedir.

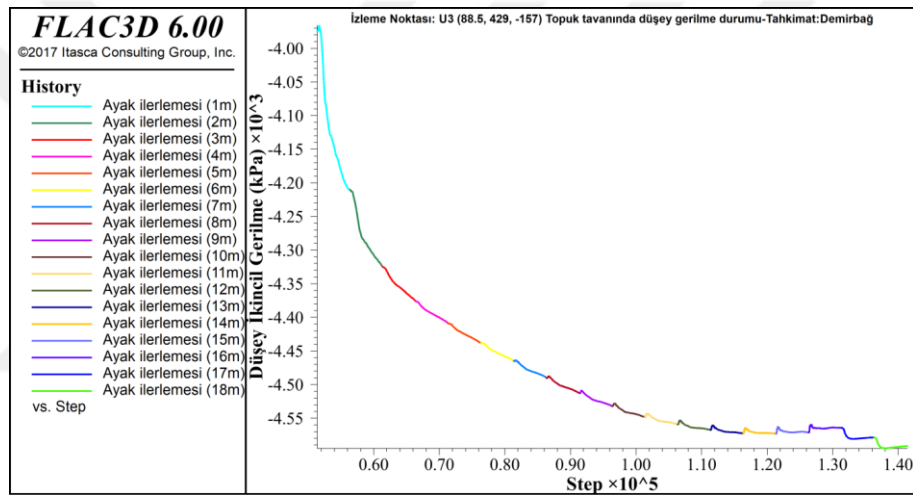
Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki gerilme değişimleri Şekil 4.37-4.39'da verilmiştir. Bu şekiller üzerinde her bir farklı renk 1 m'lik kazıyı belirtmektedir. Her bir renkteki eğrinin başlangıç ve bitiş noktasındaki değerler analizlerde dikkate alınmıştır.



Şekil 4.37. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Galeri)



Şekil 4.38. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Pano)



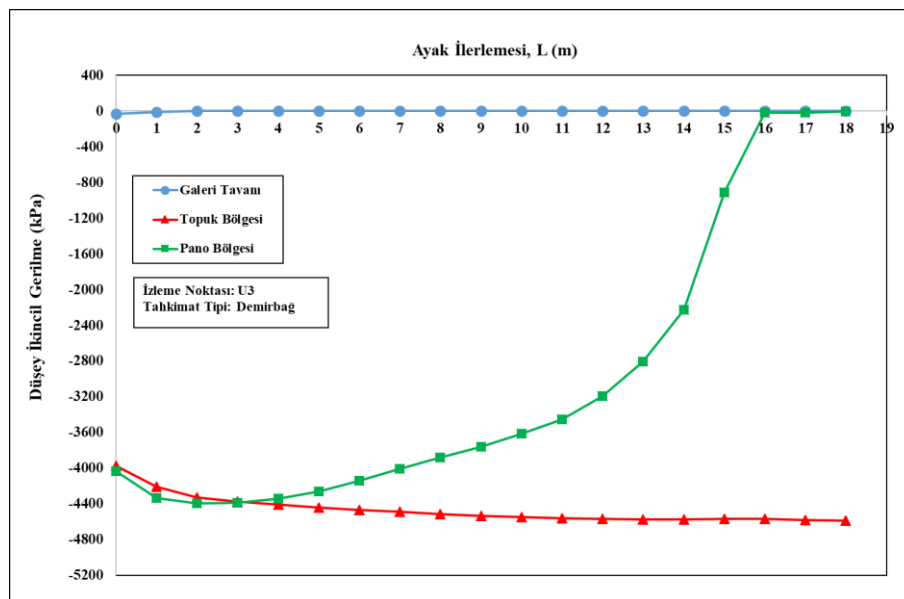
Şekil 4.39. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Topuk)

Şekil 4.37’de her 1 m ayak kazısı yapıldıkça hızla galeri tavanında düşey gerilme değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayak önünde 18. m’de konumlanan U3 izleme bölgesindeki galeri tavanında ayak 18. m’ye gelince oluşan gerilme değerinin 1.6 kPa’a düştüğü belirlenmiştir. Düşey ikincil gerilme değerlerinin Şekil 4.38’den pano bölgesinde 4.49 kPa, Şekil 4.39’dan topuk üzerinde 4591 kPa olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39’dan elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.36’da sunulmuş grafiksel değerlendirmesi ise Şekil 4.40’da verilmiştir. Sadece 18 m’lik arın kazısı ile U3 izleme bölgesinde galeri tavanında gerilme düşüşü 28.8 kPa (30.4 kPa-1.6 kPa) olmuştur. Ancak bu süreçte gerilmelerin önce çekme gerilmelerine (+) dönüştüğü daha sonra tekrar basma (-) gerilmelere dönüştüğü görülmektedir. Pano tarafında 4032 kPa değerinde ikincil

gerilme düşüşü olurken topuk tarafında 618 kPa değerinde ikincil gerilme artışı olduğu belirlenmiştir.

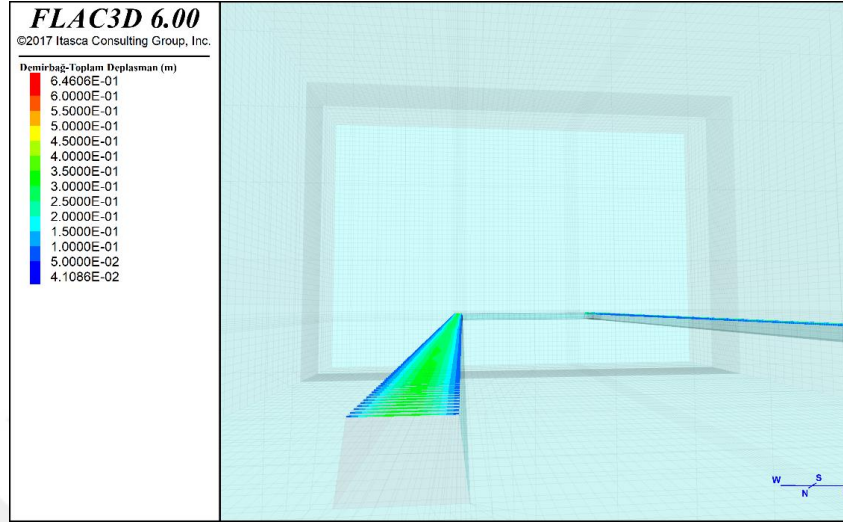
Çizelge 4.36. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey gerilme değerleri (U3 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|-------------------|-----------|----------|----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -30.4404 | -3972.9 | -4036.23 |
| 1 | -8.94565 | -4208.72 | -4335.5 |
| 2 | 1.26613 | -4324.68 | -4391.97 |
| 3 | 2.90858 | -4373.4 | -4386.32 |
| 4 | 3.26564 | -4409.46 | -4341.15 |
| 5 | 3.6941 | -4437.72 | -4262.1 |
| 6 | 3.55128 | -4465 | -4143.51 |
| 7 | 3.337 | -4489.36 | -4007.99 |
| 8 | 3.348 | -4511.75 | -3883.77 |
| 9 | 3.194 | -4532.24 | -3759.54 |
| 10 | 3.265 | -4547.83 | -3612.73 |
| 11 | 3.265 | -4559.52 | -3454.62 |
| 12 | 3.194 | -4565.37 | -3194.87 |
| 13 | 3.551 | -4571.22 | -2805.25 |
| 14 | 2.98 | -4572.19 | -2223.64 |
| 15 | 3.69 | -4569.27 | -913.604 |
| 16 | 2.98 | -4564.39 | -21.4252 |
| 17 | 2.694 | -4579.01 | -15.7785 |
| 18 | -1.59031 | -4590.7 | -4.48507 |

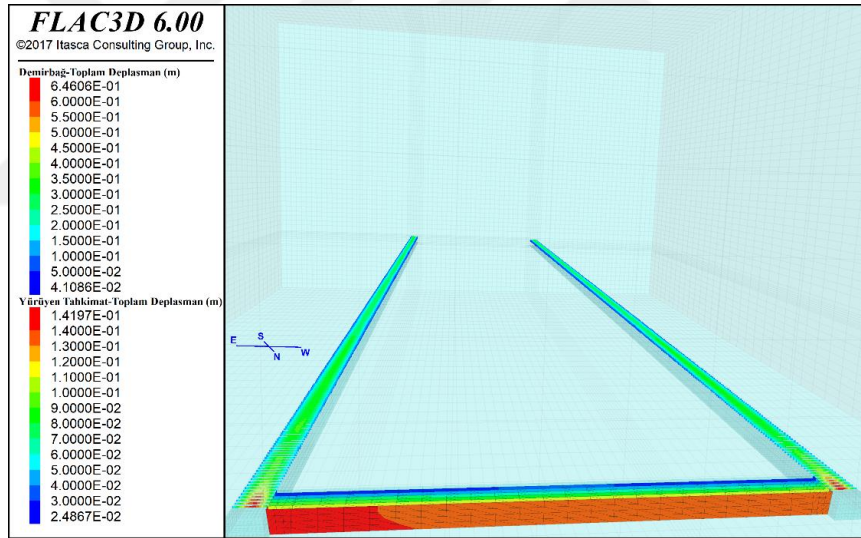


Şekil 4.40. Demir bağ ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan gerilme davranışı

Demir bağ tahkimatın modellendiği, 18 m'lik uzunayak kazı işlemi gerçekleştirildikten sonra, tüm tabanyolları üzerindeki demir bağlarda gerçekleşen düşey yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.41'de verilmiştir.



a-Demir bağların üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Demir bağların üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.41. Tabanyollarının kazısı ve ayağın 18 m'lik kazısından sonra demir bağların üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

Şekil 4.41'de görüldüğü üzere tabanyollarının kazı aşaması ve uzunayağın 18 m ilerlemesinden sonra demir bağların üzerindeki düşey yer değiştirme değerleri en fazla 65 cm civarında ve bu değer ayağın hemen arkasında göçük hizasında olduğu görülmektedir. Ayağın 18 m ilerlemesi ve öncesinde gerçekleşen tabanyolu kazısı ile demir bağların ortalarında meydana gelen toplam yer değiştirmelerin 20 cm ile 40 cm arasında değiştiği, bağların köşelerinde ise bu değerlerin 5 cm ile 15 cm arasında değiştiği

görülmektedir. Şekil 4.41b’de yürüyen tahkimat ünitelerinde görülen toplam yer değiştirmelerin en fazla 15 cm civarında ve ayağın arkasında göçük sınırında olduğu görülmektedir.

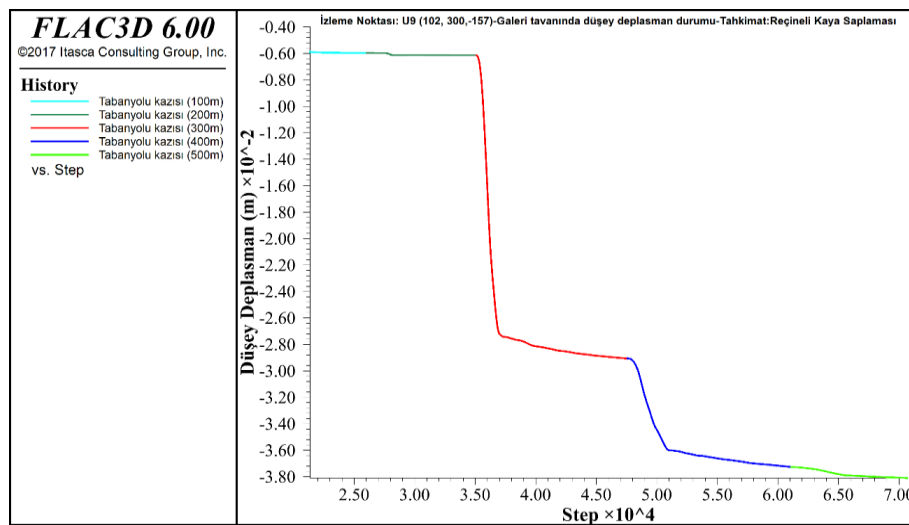
4.3.2. Reçineli kaya saplaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları

A6 uzunayak panosunun tabanyolları, bu modelde Reçineli kaya saplamaları ile tahkim edilmiştir. Kaya saplamalarını temsil etmek üzere modelde kazık yapısal elemanları (pile structural elements) kullanılmıştır. Kullanılan bu elemanlara ait detaylı bilgiler önceki bölümlerde belirtilmiştir (Bknz. Bölüm 3.5.5.2).

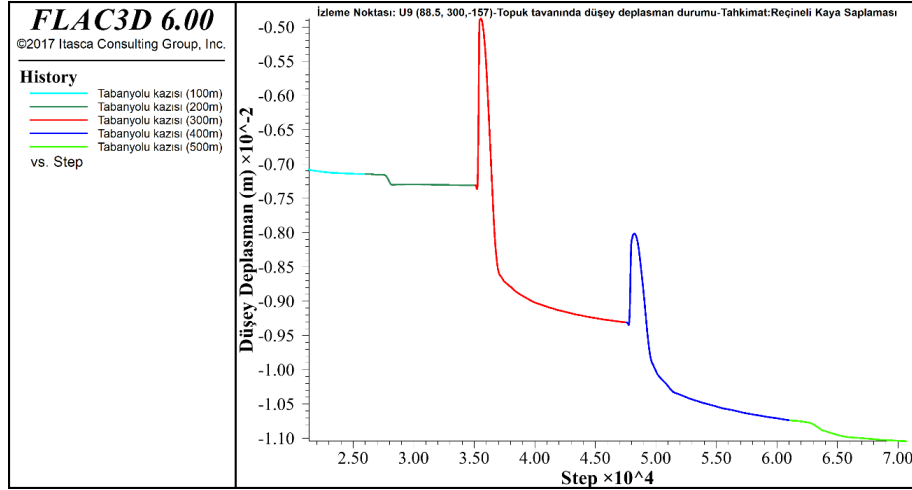
4.3.2.1. Reçineli kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

Bölüm 4.3’te belirtilen genel modelleme prosedürü ile çalıştırılan modelde tabanyollarının tahkimat elemanı olarak Reçineli kaya saplaması kullanılmıştır. Modelde tabanyollarının kazısı ve tahkimatını içeren tünel kazısına bağlı aşamada, Reçineli kaya saplamalarının performansı incelenmiştir.

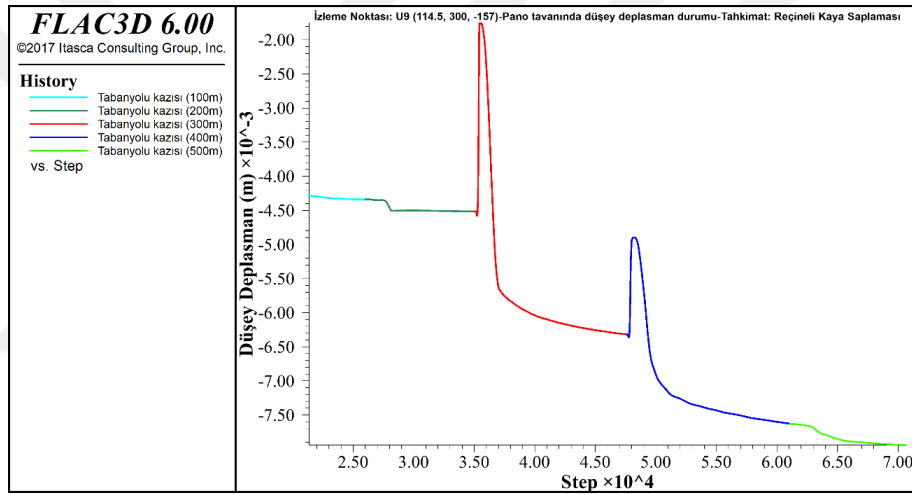
Üst tabanyolunun kazısının başlamasıyla, 300. metredeki duruma ait galeri tavanı ve pano ile topuk bölgesinde meydana gelen düşey yer değiştirmeler sırası ile Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44’te sunulmuştur.



Şekil 4.42. Reçineli kaya saplamaları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Galeri)



Şekil 4.43. Reçineli kaya saplamları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Pano)



Şekil 4.44. Reçineli kaya saplamları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Topuk)

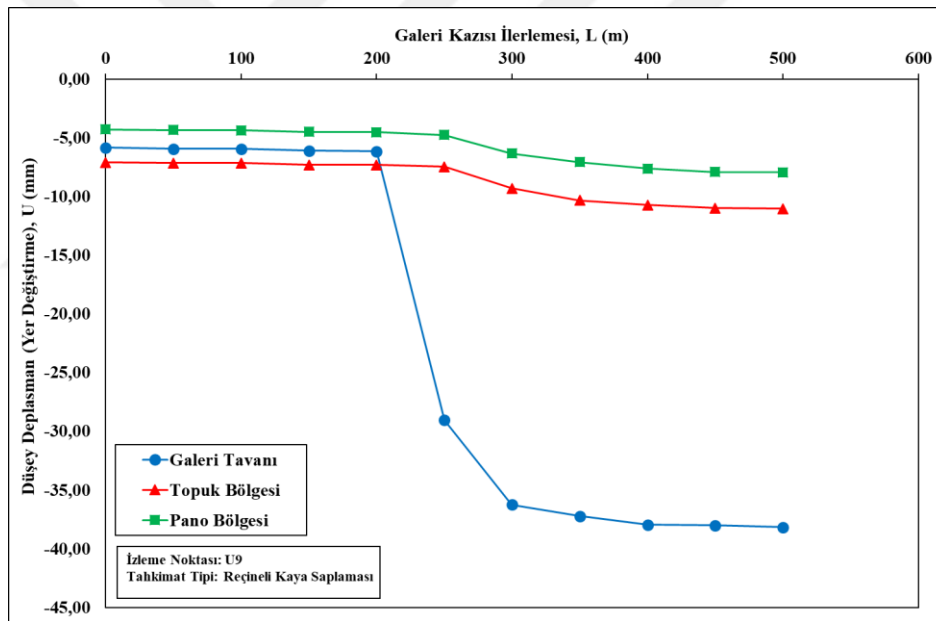
Şekil 4.42, 4.43 ve 4.44 incelendiğinde, galeri tavanında ve pano ile topuk bölgelerinde 300. m'ye ulaşmadan önce düşey yer değiştirme değerlerinin oldukça düşük olduğu, özellikle 200-300 m'ler arasındaki bölgenin kazısında düşey yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. 300-400 m'ler arasında ilgilenen noktanın geride kaldığı durumda düşey yer değiştirmelerin arttığı ancak 400-500 m'ler arasındaki bölgeye ait üst tabanyolu kazısında düşey yer değiştirmelerin azalarak sabitlendiği anlaşılmaktadır. Burada değinilen durumu veren düşey yer değiştirme değerleri çizelge formatında Çizelge 4.37'de ve grafik formatında Şekil 4.45'de sunulmuştur.

Çizelge 4.37. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -5.84* | -7.09* | -4.27* |
| 50 | -5.93 | -7.13 | -4.32 |
| 100 | -5.93 | -7.14 | -4.34 |
| 150 | -6.10 | -7.30 | -4.50 |
| 200 | -6.14 | -7.31 | -4.52 |
| 250 | -29.04 | -7.47 | -4.74 |
| 300** | -36.25 | -9.30 | -6.32 |
| 350 | -37.21 | -10.32 | -7.05 |
| 400 | -37.95 | -10.73 | -7.63 |
| 450 | -38.01 | -10.98 | -7.89 |
| 500 | -38.16 | -11.04 | -7.94 |

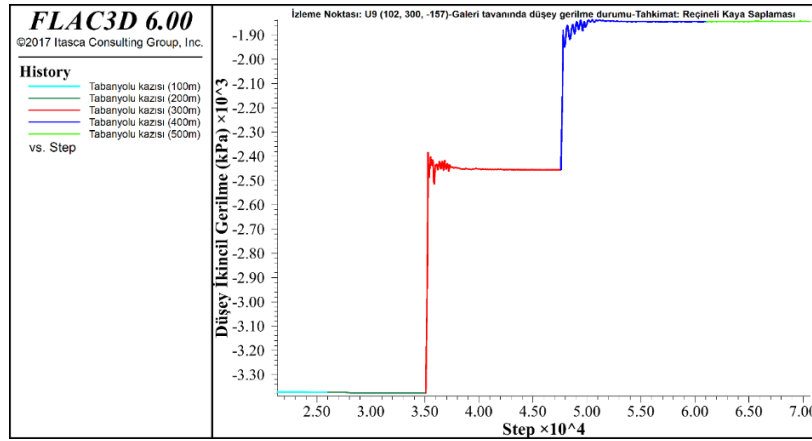
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey yer değiştirme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

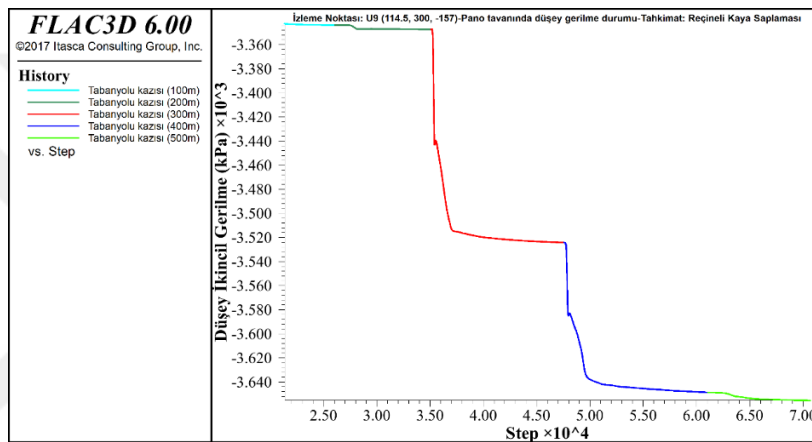


Şekil 4.45. Reçineli kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler

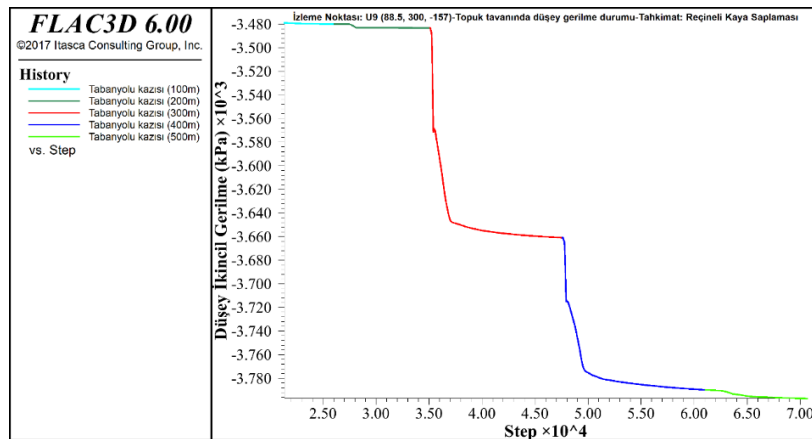
Çizelge 4.37 ve Şekil 4.45 incelendiğinde, tüm tabanyolu kazı ve tahkimatı sonrasında, üst taban yolunun 300. m'sinde bulunan izleme noktalarında, galeri tavanında 38.16 mm, topuk bölgesinde 11.04 mm ve pano bölgesinde ise 7.94 mm düşey yer değiştirme olduğu görülmektedir. Üst tabanyolunun 300. metresinde oluşturulan izleme noktasında (U9) oluşan düşey gerilme değerleri galeri tavanı, pano bölgesi ve topuk bölgesi için sırası ile Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'de verilmiştir. Düşey gerilme değerleri için hazırlanan çizelge ve grafik Çizelge 4.38 ve Şekil 4.49'da sunulmuştur.



Şekil 4.46. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Galeri).



Şekil 4.47. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Pano).



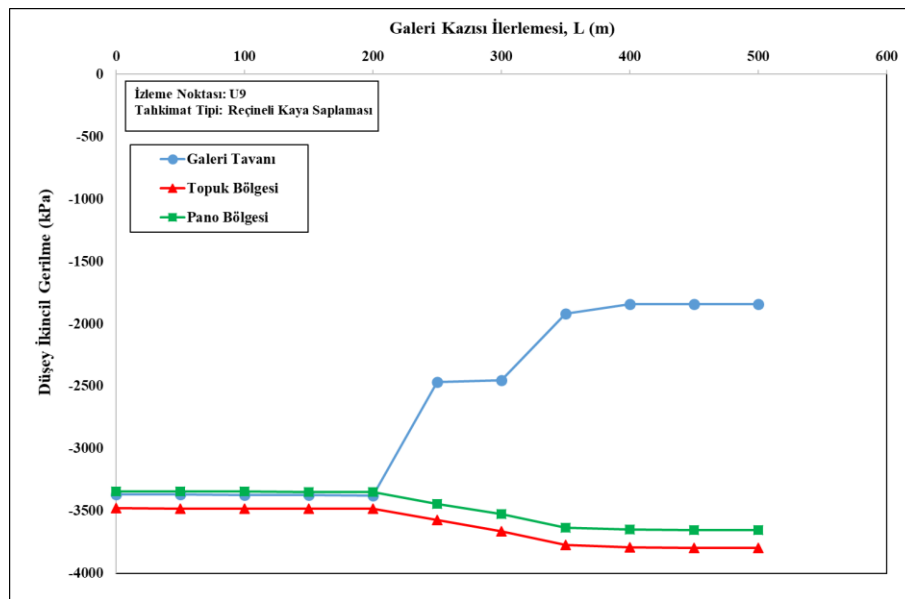
Şekil 4.48. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Topuk)

Şekil 4.46'da galeri üzerindeki düşey ikincil gerilmeler azalırken, topuk ve pano üzerinde arttığı görülmektedir. A6 pano bölgesi ve A5 ile komşu olan topuk bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmelerin ise basma yönünde arttığı görülmektedir. 500 m

uzunluğundaki galeri kazısının tamamlanması ile birlikte 300. m'deki izleme noktasında (U9) galeri tavanında 1845.16 kPa, pano bölgesinde 3797.03 kPa ve topuk bölgesinde ise 3654.8 kPa ikincil gerilmelerin oluştuğu görülmektedir (Çizelge 4.38 ve Şekil 4.49). Demir bağ tahkimat analizlerinde tabanyolu kazısı ile galeri tavanında sifıra yaklaşan düşey ikincil gerilme değerleri, Reçineli kaya saptamalarında tabanyolu kazısı ile 3367.29 kPa değerinden 1845.16 kPa değerine düşmektedir. Buradan, Demir bağ tahkimatın galeri tavanında meydana gelen ikincil gerilmeleri tutamadığı yer değiştirmelere izin verdiği ancak Reçineli kaya saptamalarda düşey ikincil gerilmelerin belirli bir seviyeden sonra korunduğu söylenebilir.

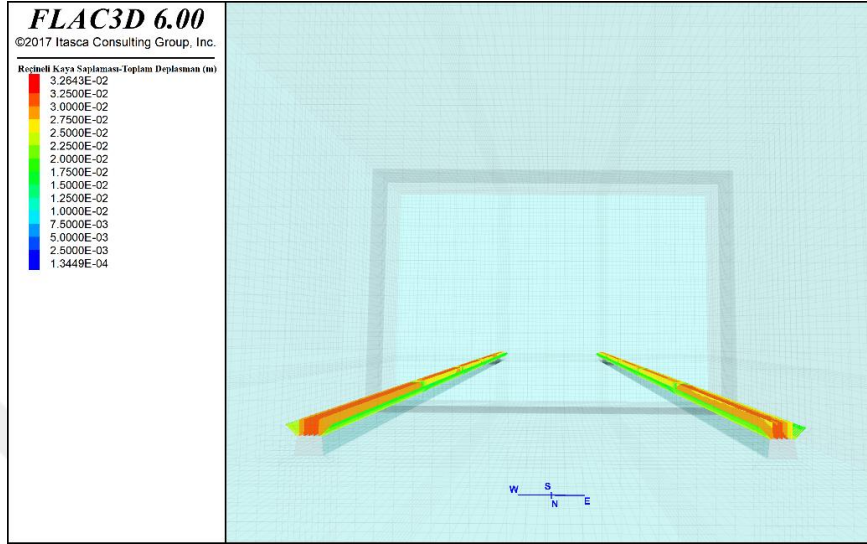
Çizelge 4.38. Reçineli kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -3367.29* | -3478.86* | -3343.05* |
| 50 | -3369.3 | -3479.96 | -3343.05 |
| 100 | -3371.31 | -3479.27 | -3343.86 |
| 150 | -3371.31 | -3483.39 | -3346.69 |
| 200 | -3375.32 | -3482.98 | -3346.69 |
| 250 | -2467.67 | -3570.65 | -3441.3 |
| 300** | -2453.61 | -3660.79 | -3524.6 |
| 350 | -1919.46 | -3773.57 | -3634.98 |
| 400 | -1845.16 | -3789.62 | -3647.92 |
| 450 | -1845.16 | -3796.21 | -3654.39 |
| 500 | -1845.16 | -3797.03 | -3654.8 |

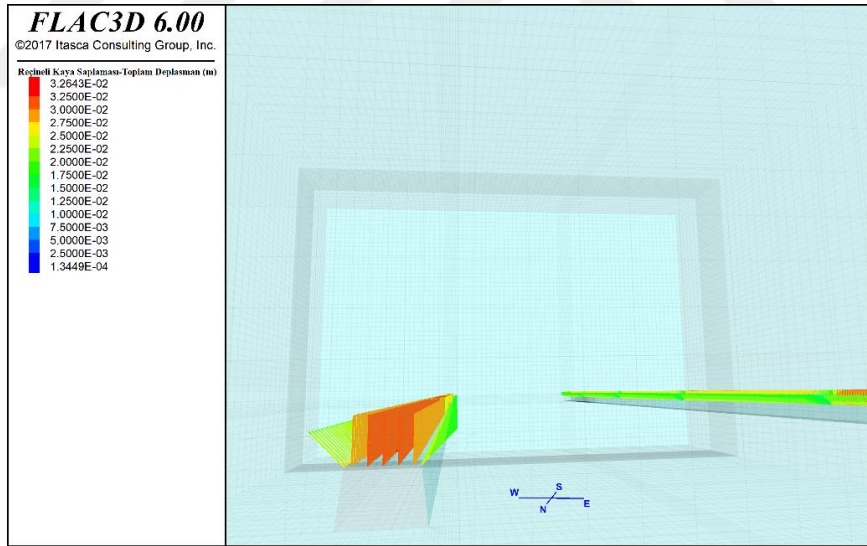


Şekil 4.49. Reçineli kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler

Yukarıda sunulan analizlerde sadece üst tabanyolunun 300. metresindeki U9 izleme bölgesindeki durum incelenmiştir. Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.50’de belirtilmiştir.



a- Reçineli kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Reçineli kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.50. 500 metre uzunluğunda taban yolu kazısından sonra Reçineli kaya saplamalarının üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

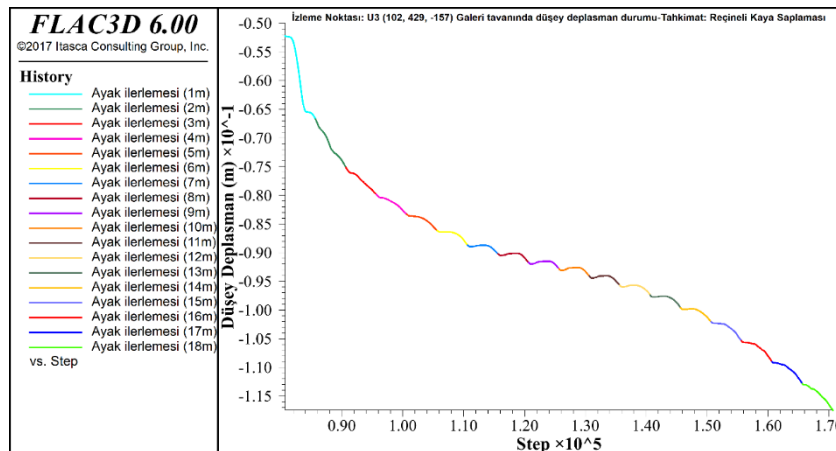
Reçineli kaya saplamaları tahkimatın modellendiği, 500 m’lik tabanyolu kazısı işlemi gerçekleştirildikten sonra, saplamalarda gerçekleşen en büyük toplam yer değiştirmelerin 3.3 cm civarında olduğu görülmektedir. Kontur diyagramı dikkatle incelendiğinde, saplamaların üzerinde görülen yer değiştirmelerin, galeri tavanında kaya

kütlesi içerisinde dik bir şekilde yerleştirilen saplamalarda, köşelere yatay ile 60° 'lik açıyla yerleştirilen saplamalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Açıklığın köşelerinden kaya kütlesi içerisinde yerleştirilen Reçineli kaya saplamalarında toplam yer değiştirme değerleri 1.25 cm ile 2.75 cm arasında değişirken, tavana dikey yerleştirilen saplamalarda bu değer 3 cm ile 3.25 cm arasında değiştiği görülmektedir. (Şekil 4.50)

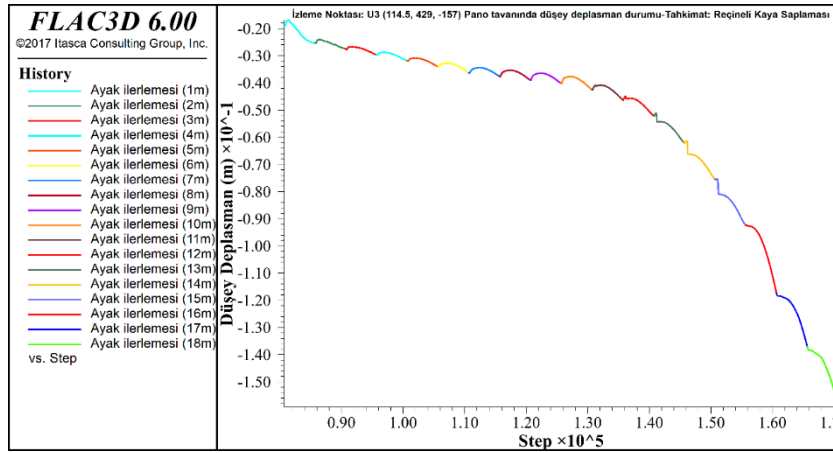
4.3.2.2. Reçineli kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

Modelde tanımlanan tabanyollarının reçineli kaya saplaması ile tahkimatında uzunayak kazısına dayalı oluşan yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimleri bu bölümde belirtilmiştir.

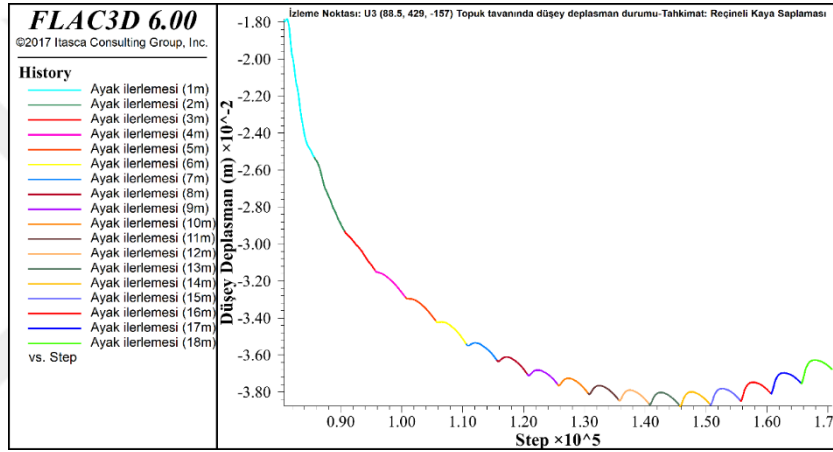
Modelde 1 m'lik ayak kazılarından 18. kazının yapıldığı koşul burada sunulmuştur. Bu koşul galeri başlangıç noktasına göre, galerinin 429. m'sine karşılık gelmektedir. Başlangıç koşuluna göre ayağın ilerisinde konumlanan 18. metredeki izleme bölgesinde (U3), düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimleri, arında yapılan her 1 m'lik kazıya bağlı olarak incelenmiştir. Böylece ayak kazısına bağlı olarak 18. m'de mevcut Reçineli kaya saplamalarının, o noktadaki galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimlerinden nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. Bununla birlikte ayak kazılarına bağlı olarak pano bölgesinde ve topuk bölgesinde oluşan yer değiştirme ve gerilme değişimleri belirlenmiştir. Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki yer değiştirme değişimleri Şekil 4.51-4.53'de sunulmuştur.



Şekil 4.51. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Galeri).



Şekil 4.52. Reçineli kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Pano)

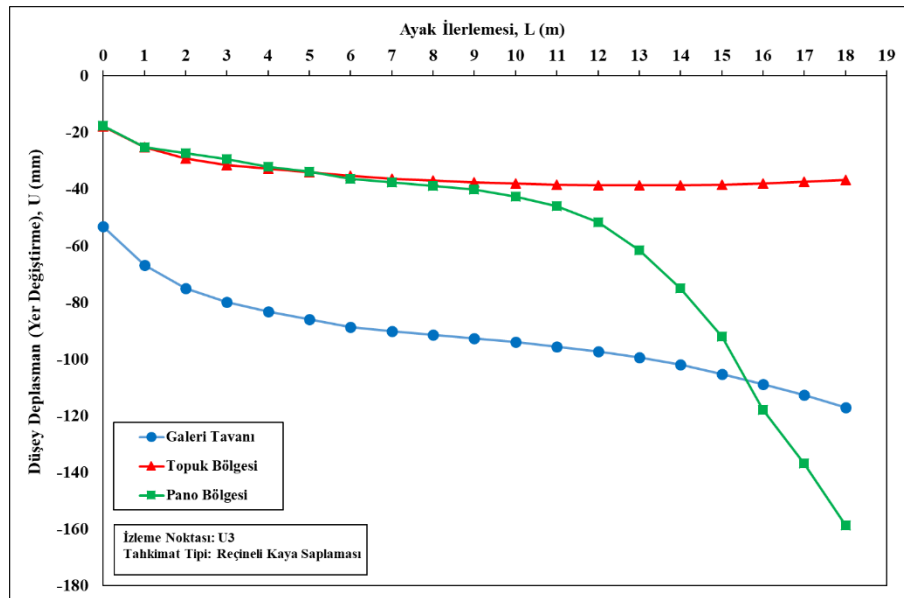


Şekil 4.53. Reçineli kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Topuk)

Şekil 4.51-4.53 incelendiğinde, ayak önünde 18. m’de bulunan U3 izleme bölgesinde, galeri tavanındaki izleme noktasında ayak 18. m’ye gelince oluşan yer değiştirme değerinin 117.18 mm’ye çıktığı belirlenmiştir. 18 m’lik arın kazısı ile yer değiştirme artışı 79.02 mm (117.18 mm-38.16 mm) olmuştur. Üst tabanyolunda bulunan U3/Galeri izleme noktasından panodan içeri doğru 10. m’de bulunan U3/Pano noktasında oluşan düşey yer değiştirme davranışı Şekil 4.52’de sunulmuştur. Burada 18 m’lik arın kazısı sonrasında yer değiştirme değeri 158.76 mm olmuştur. Üst taban yoluna komşu olan topuğun orta noktasına ait tavanda 36.71 mm yer değiştirme oluşmuştur (Şekil 4.53). Şekil 4.51, 4.52 ve 4.53’den üretilen sayısal değerler Çizelge 4.39’da sunulmuştur. Bu değerlere dayalı grafiksel sunum Şekil 4.54’de verilmiştir.

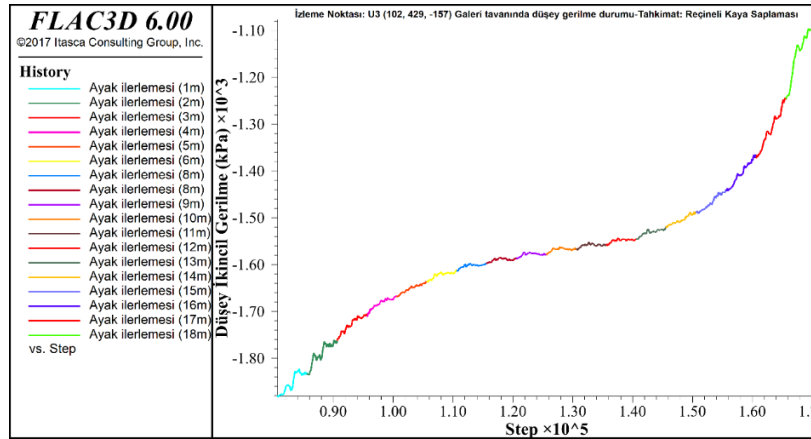
Çizelge 4.39. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3 izleme bölgesi)

| Ayak Kazı İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|----------------------|-----------|-----------|----------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -53.0992 | -17.9012 | -17.6694 |
| 1 | -66.7571 | -25.3151 | -25.2214 |
| 2 | -75.0458 | -29.22926 | -27.2476 |
| 3 | -79.8445 | -31.4572 | -29.4579 |
| 4 | -83.16 | -32.8642 | -32.2209 |
| 5 | -86.0392 | -34.1089 | -33.8786 |
| 6 | -88.6567 | -35.4077 | -36.2732 |
| 7 | -90.1339 | -36.2736 | -37.5625 |
| 8 | -91.5359 | -37.0582 | -38.8519 |
| 9 | -92.6702 | -37.5723 | -40.143 |
| 10 | -94.0662 | -38.0684 | -42.72 |
| 11 | -95.5494 | -38.4111 | -46.0356 |
| 12 | -97.2944 | -38.6276 | -51.7456 |
| 13 | -99.4756 | -38.7629 | -61.6922 |
| 14 | -102.006 | -38.6817 | -75.1385 |
| 15 | -105.409 | -38.4382 | -92.0845 |
| 16 | -108.986 | -38.0594 | -117.872 |
| 17 | -112.738 | -37.5182 | -136.844 |
| 18 | -117.187 | -36.7065 | -158.763 |

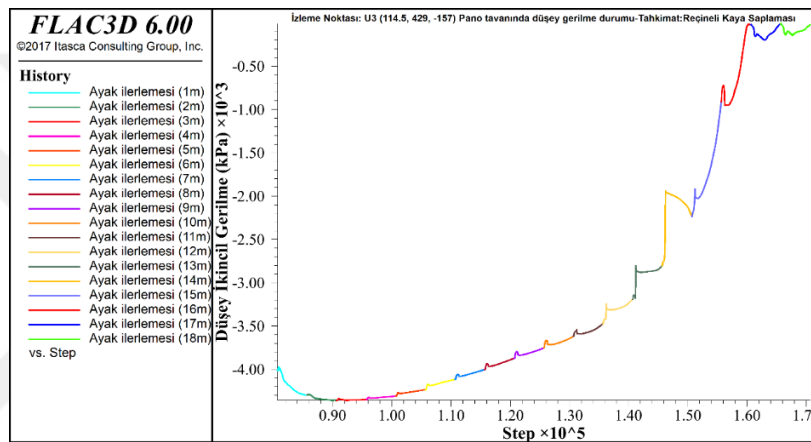


Şekil 4.54. Reçineli kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler

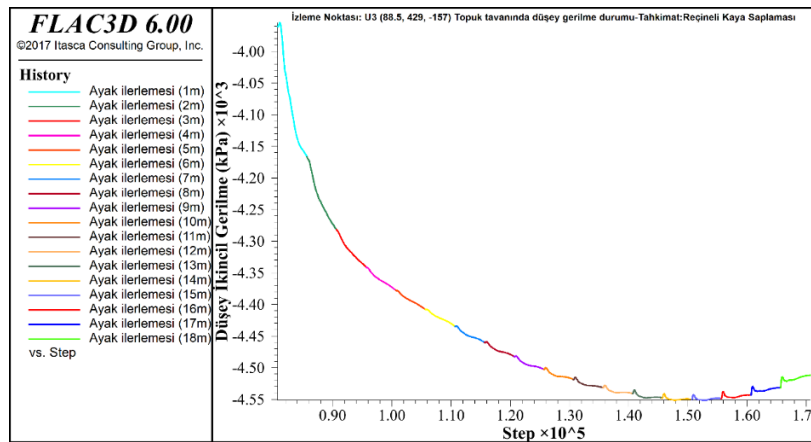
Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki gerilme değişimleri Şekil 4.55-4.57’de verilmiştir.



Şekil 4.55. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Galeri)



Şekil 4.56. Reçineli kaya saplama ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Pano)



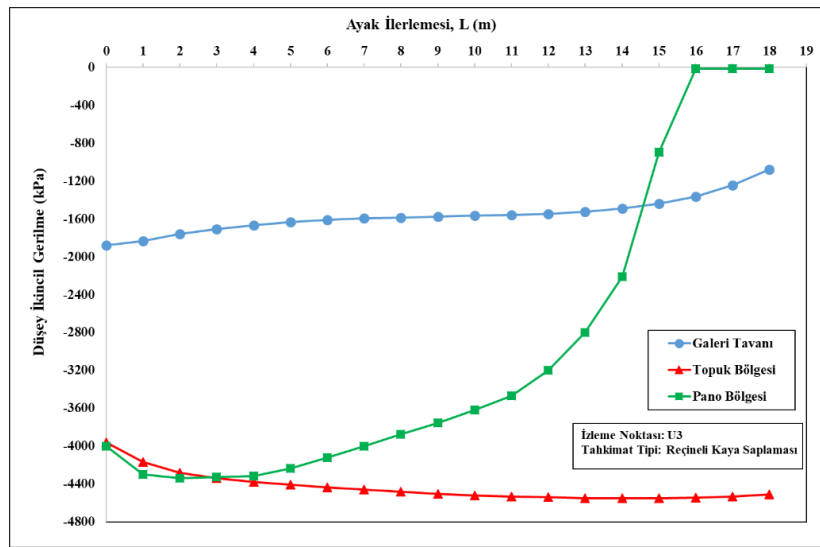
Şekil 4.57. Reçineli kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey gerilme değişimleri (U3/Topuk)

Şekil 4.55’de her 1 m’lik ayak kazısı yapıldıkça hızla galeri tavanında düşey gerilme değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayak önünde 18. m’de konumlanan U3 izleme bölgesindeki galeri tavanında ayak 18. m’ye gelince oluşan gerilme değeri

1077.47 kPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Şekil 4.56'dan düşey ikincil gerilme değerlerinin, pano bölgesinde 15.80 kPa, Şekil 4.57'den topuk bölgesinde 4511.26 kPa olduğu görülmektedir. Şekil 4.55, 4.56 ve 4.57'den elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.40'da sunulmuş grafiksel değerlendirmesi ise Şekil 4.58'de verilmiştir.

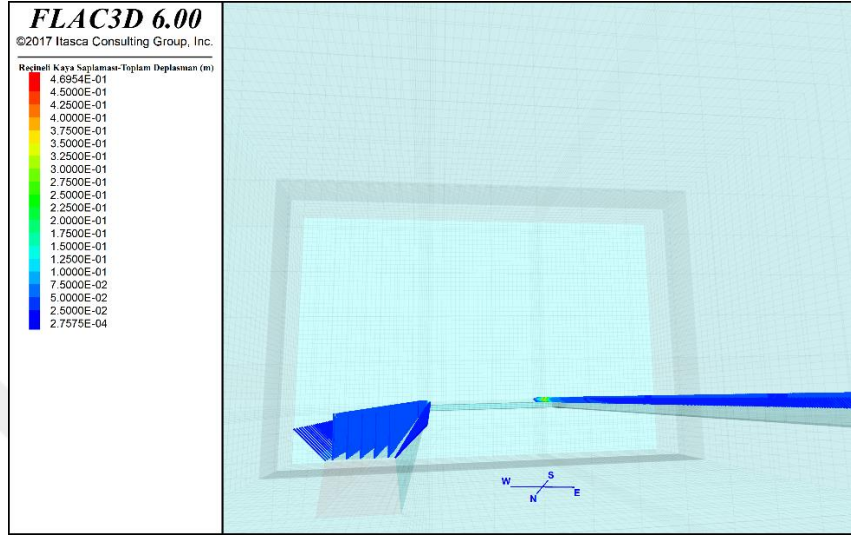
Çizelge 4.40. Reçineli kaya sapslamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey gerilme değerleri (U3 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | Galeri Tavanı | Topuk Tavanı | Ayak Tavanı |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -1880.33 | -3958.72 | -4003.07 |
| 1 | -1833.53 | -4166.31 | -4295.51 |
| 2 | -1761.77 | -4280.52 | -4340.5 |
| 3 | -1707.69 | -4340.71 | -4329.25 |
| 4 | -1667.14 | -4375.44 | -4312.38 |
| 5 | -1635.94 | -4407.08 | -4233.65 |
| 6 | -1612.02 | -4433.32 | -4121.17 |
| 7 | -1596.42 | -4459.56 | -4003.07 |
| 8 | -1587.06 | -4482.71 | -3873.72 |
| 9 | -1577.7 | -4502.78 | -3755.62 |
| 10 | -1567.3 | -4518.21 | -3615.03 |
| 11 | -1556.9 | -4531.33 | -3468.81 |
| 12 | -1546.5 | -4539.05 | -3198.84 |
| 13 | -1522.58 | -4546.76 | -2799.58 |
| 14 | -1488.26 | -4549.85 | -2209.08 |
| 15 | -1440.42 | -4547.53 | -898.74 |
| 16 | -1367.63 | -4541.36 | -15.8057 |
| 17 | -1244.91 | -4530.56 | -15.8057 |
| 18 | -1077.47 | -4511.26 | -15.8057 |

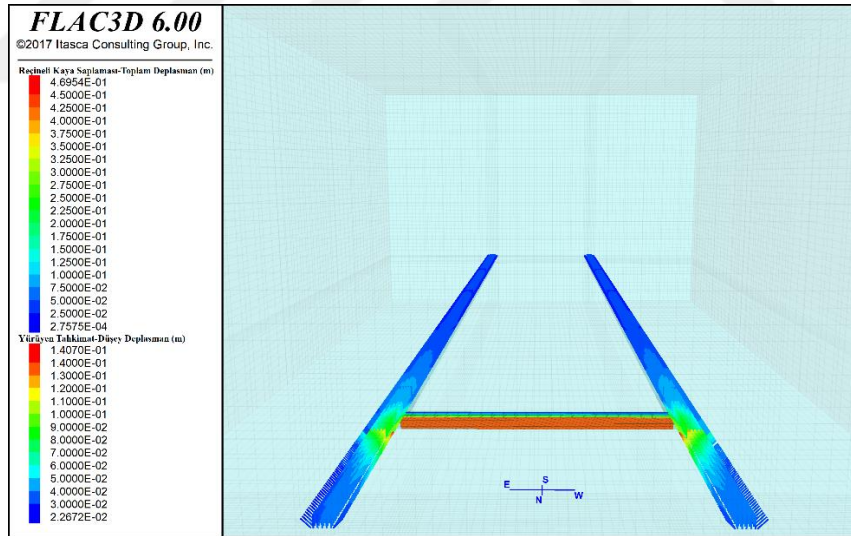


Şekil 4.58. Reçineli kaya sapslamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan gerilme davranışı

Yukarıda sunulan analizlerde üst tabanyolunun 300. m'sinde ve 429. m'sinde bulunan U3 ve U9 izleme bölgesindeki durum incelenmiştir. Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısı ve 18 m'lik ayak kazısı sonucunda tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.59'da belirtilmiştir.



a-Reçineli kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Reçineli kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.59. Tabanyollarının kazısı ve ayağın 18 m kazısından sonra Reçineli kaya saplamalarının üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

Reçineli kaya saplama tahkimatın modellendiği, 18 m'lik uzun ayak kazı işlemi gerçekleştirildikten sonra, tüm tabanyolları üzerindeki saplamalarda gerçekleşen düşey yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.59'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere tabanyollarının kazı aşaması ve uzunayağın 18 m ilerlemesinden sonra saplamaların

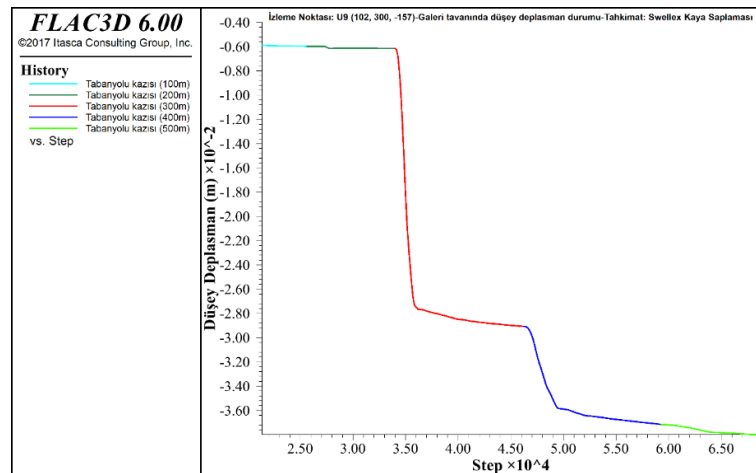
üzerindeki düşey yer değiştirme değerlerinin tabanyollarının girişinden ayağa doğru düşük yer değiştirme değerlerinde olduğu bu değerlerin 2.5 cm ile 7.5 cm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.59b’de yürüyen tahkimat ünitelerinde görülen toplam yer değiştirmelerin en fazla 14 cm civarında ve ayağın arkasında göçük sınırında olduğu ve saplamalarda görülen en büyük toplam yer değiştirmelerin 47 cm civarında bu bölgede olduğu görülmektedir.

4.3.3. Swellex kaya saptaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları

A6 uzunayak panosunun taban yolları, bu modelde Swellex kaya saptamaları ile tahkim edilmiştir. Kaya saptamalarını temsil etmek üzere modelde kazık yapısal elemanları (pile structural elements) kullanılmıştır. Kullanılan bu elemanlara ait detaylı bilgiler önceki bölümlerde belirtilmiştir (Bknz. Bölüm 3.5.5.2).

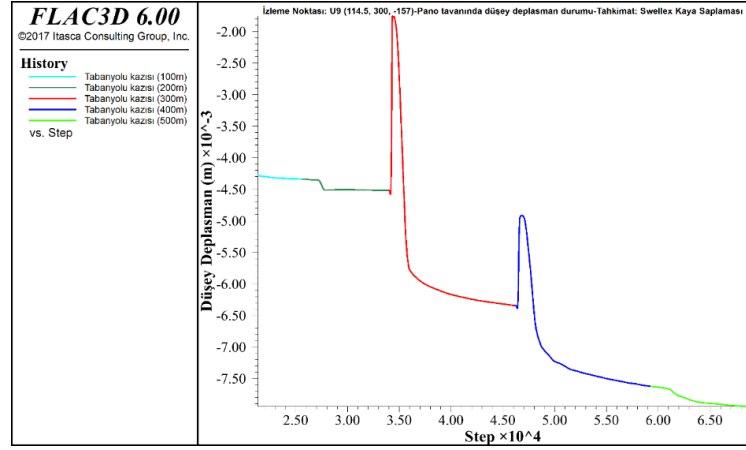
4.3.3.1. Swellex kaya saptaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

Model geometrisinde, üst taban yolunun orta noktasına yakın 300. metresinde konumlandırılan U9 kodlu izleme bölgesinden (Galeri tavanı-U9/Galeri, A6 pano bölgesi-U9/Pano, topuk bölgesi-U9/Topuk) elde edilen sonuçlar Şekil 4.60 ile Şekil 4.62 arasında sunulmuştur.

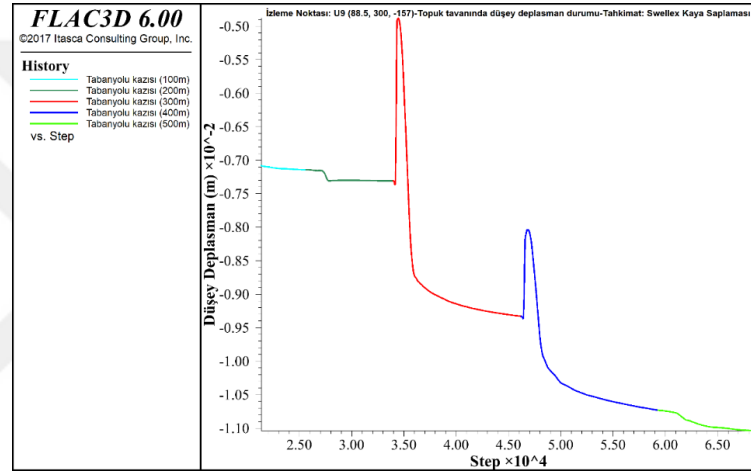


Şekil 4.60. Swellex kaya saptamaları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Galeri)

Şekil 4.60-4.62 arasındaki model çıktılarına ait düşey yer değiştirme değerleri Çizelge 4.41’de ve Şekil 4.63’te sunulmuştur.



Şekil 4.61. Swellex kaya saplamları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Pano)



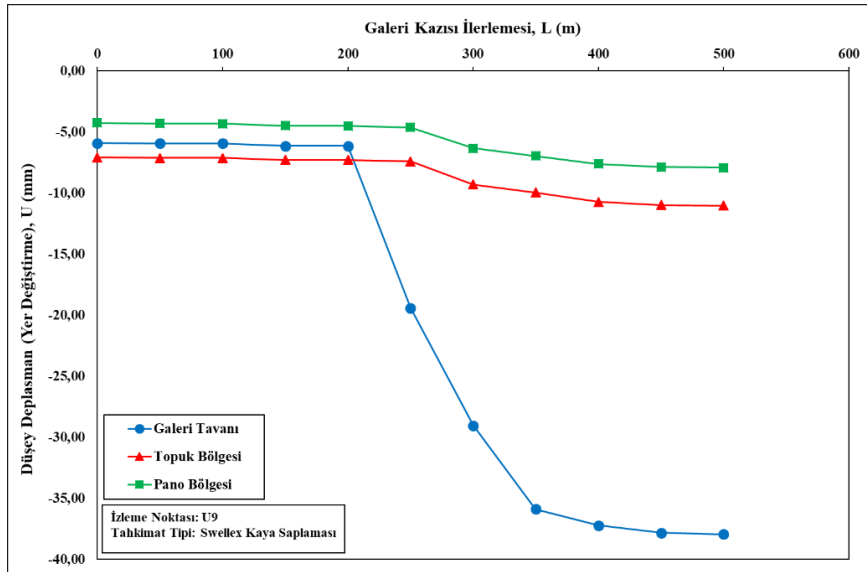
Şekil 4.62. Swellex kaya saplamları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9/Topuk)

Çizelge 4.41. Swellex kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -5.93* | -7.08* | -4.27* |
| 50 | -5.95 | -7.13 | -4.32 |
| 100 | -5.95 | -7.14 | -4.33 |
| 150 | -6.15 | -7.30 | -4.51 |
| 200 | -6.15 | -7.31 | -4.51 |
| 250 | -19.42 | -7.43 | -4.63 |
| 300** | -29.05 | -9.32 | -6.34 |
| 350 | -35.90 | -9.96 | -6.97 |
| 400 | -37.22 | -10.72 | -7.63 |
| 450 | -37.82 | -10.98 | -7.89 |
| 500 | -37.94 | -11.03 | -7.93 |

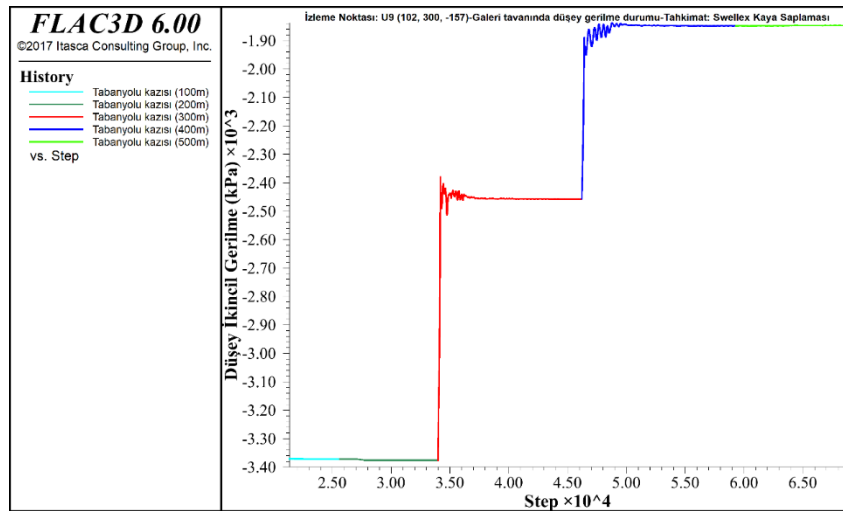
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey yer değiştirme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

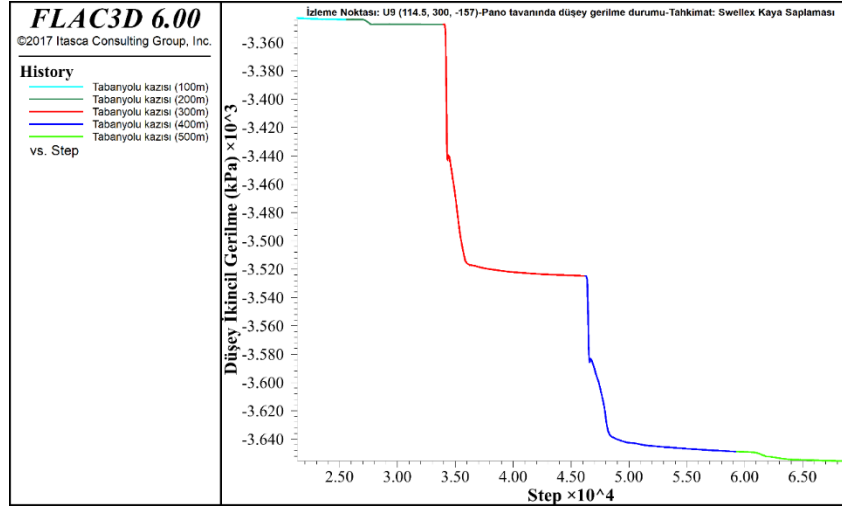


Şekil 4.63. Swellex kaya saptlamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler.

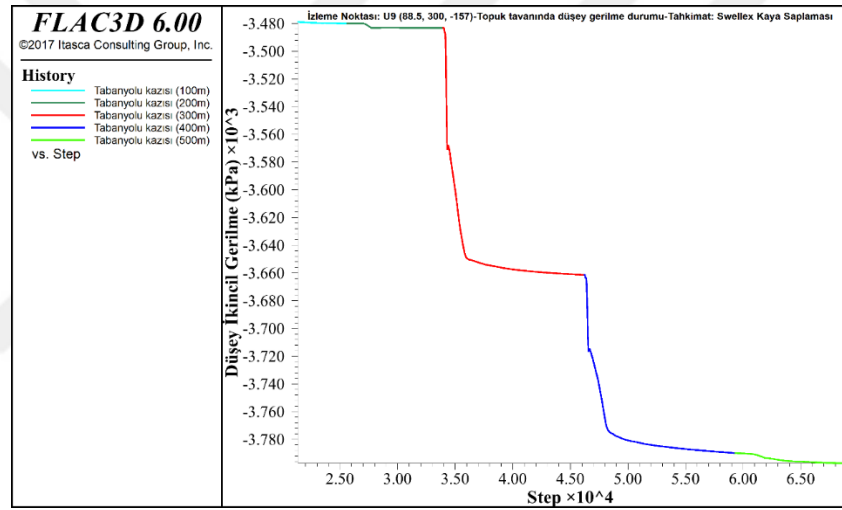
Çizelge 4.41 ve Şekil 4.63'ten galeri tavanında 37.94 mm, topuk tavanında 11.03 mm ve pano tavanında ise 7.93 mm yer değıştirme olduğu görülmektedir. Üst taban yolunun 300. m'sinde oluşturulan izleme noktasında (U9) oluşan düşey gerilme değeri galeri tavanı, pano bölgesi ve topuk bölgesi için sırası ile Şekil 4.64, 4.65 ve 4.66'da verilmiştir.



Şekil 4.64. Swellex kaya saptlaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Galeri)



Şekil 4.65. Swellex kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Pano)



Şekil 4.66. Swellex kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9/Topuk)

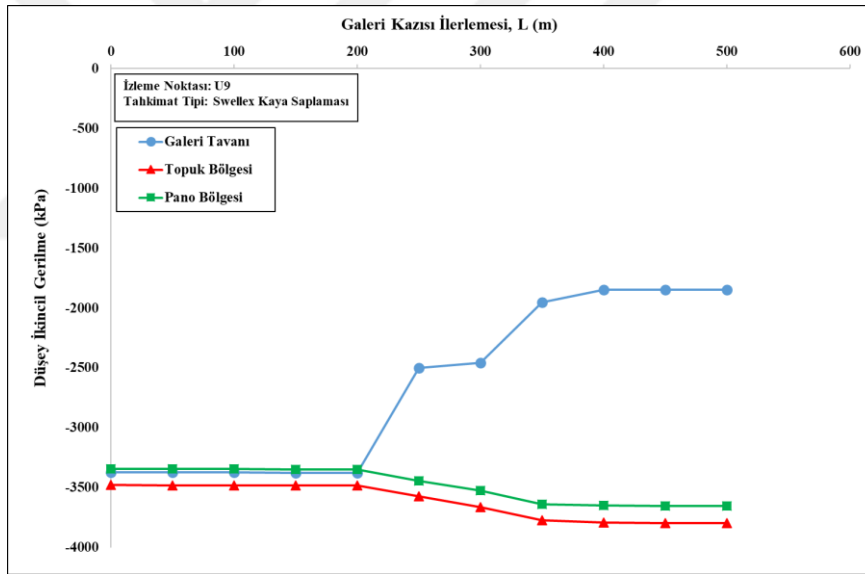
Düşey ikincil gerilme değerleri için hazırlanan veriler ve grafiksel sunum Çizelge 4.42 ve Şekil 4.67’de sunulmuştur. Şekil 4.67’de 500 m uzunluğundaki galeri kazısının tamamlanması ile birlikte 300. m’deki izleme noktasında (U9) galeri tavanında 1846.27 kPa, pano bölgesinde 3655.09 kPa ve topuk bölgesinde ise 3796.34 kPa ikincil gerilmelerin oluştuğu görülmektedir (Çizelge 4.42 ve Şekil 4.67).

Çizelge 4.42. Swellex kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey ikincil gerilmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -3370.44* | -3478.91* | -3342.69* |
| 50 | -3370.44 | -3480.07 | -3343.14 |
| 100 | -3370.44 | -3480.3 | -3343.59 |
| 150 | -3374.97 | -3482.84 | -3347.2 |
| 200 | -3377.24 | -3483.07 | -3347.65 |
| 250 | -2498.35 | -3569.77 | -3441.87 |
| 300** | -2455.25 | -3660.86 | -3524.36 |
| 350 | -1952.87 | -3774.61 | -3638.19 |
| 400 | -1846.27 | -3790.33 | -3649.01 |
| 450 | -1846.27 | -3795.19 | -3653.37 |
| 500 | -1846.27 | -3796.34 | -3655.09 |

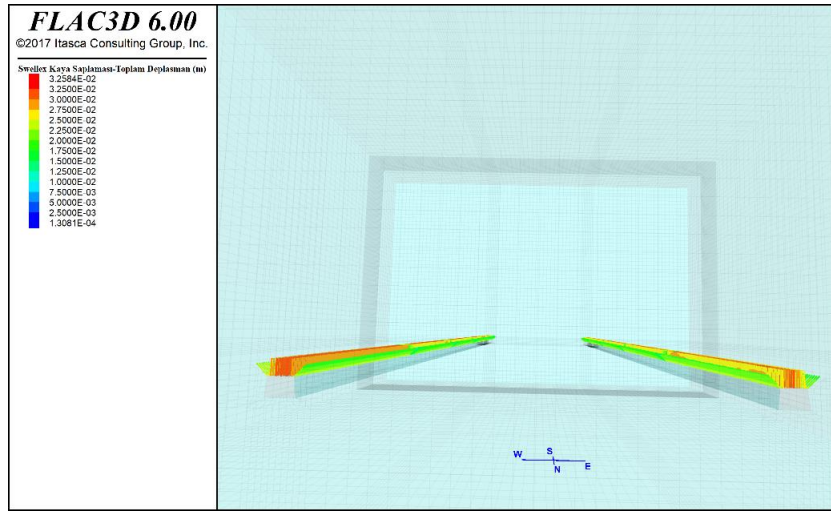
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey gerilme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

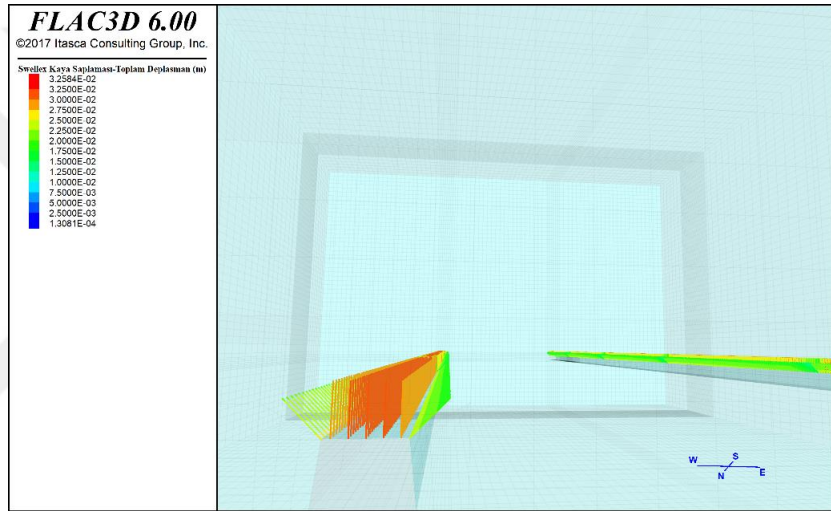


Şekil 4.67. Swellex kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilmeler

Yukarıda sunulan analizlerde sadece üst tabanyolunun 300. metresindeki U9 izleme bölgesindeki durum incelenmiştir. Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.68’de belirtilmiştir.



a- Swellex kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Swellex kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

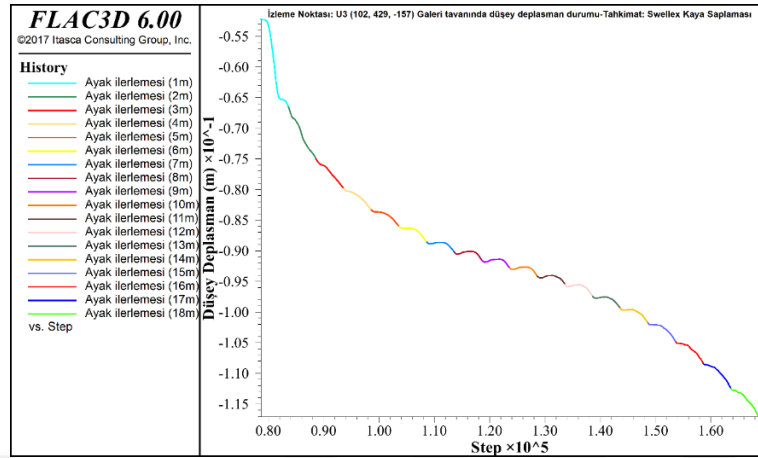
Şekil 4.68. 500 metre uzunluğunda taban yolu kazısından sonra Swellex kaya saplamalarının üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

Şekil 4.68’de görüldüğü üzere, saplamalar üzerinde gerçekleşen en büyük toplam yer değiştirmelerin 3.25 cm civarında olduğu görülmektedir. Kontur diyagramı dikkatle incelendiğinde, saplamaların üzerinde görülen yer değiştirmelerin, galeri tavanında kaya kütlesi içerisine dik bir şekilde yerleştirilen saplamalarda, köşelere yatay ile 60°’lik açıyla yerleştirilen saplamalara göre daha fazla olduğu görülmektedir. (Şekil 4.68).

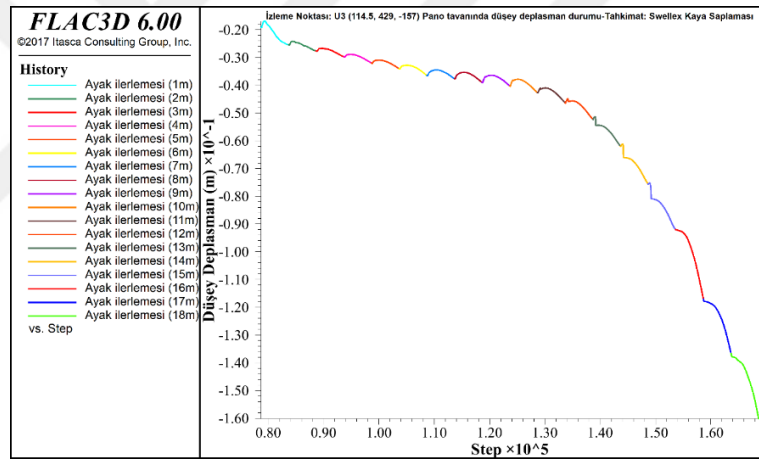
4.3.3.2. Swellex kaya saplaması tahkimatlı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

Modelde tanımlanan tabanyollarının Swellex kaya saplaması ile tahkimatında uzunayak kazısına dayalı oluşan yer değiştirme ve düşey gerilme değişimleri bu bölümde

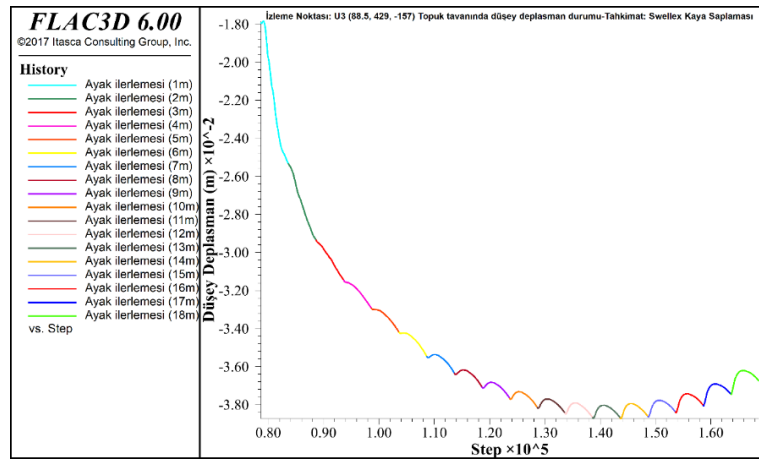
sunulmuştur. Ayağın 18 metre önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki yer değiştirme değişimleri Şekil 4.69-4.71’de sunulmuştur.



Şekil 4.69 Swellex kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Galeri).



Şekil 4.70. Swellex kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Pano)



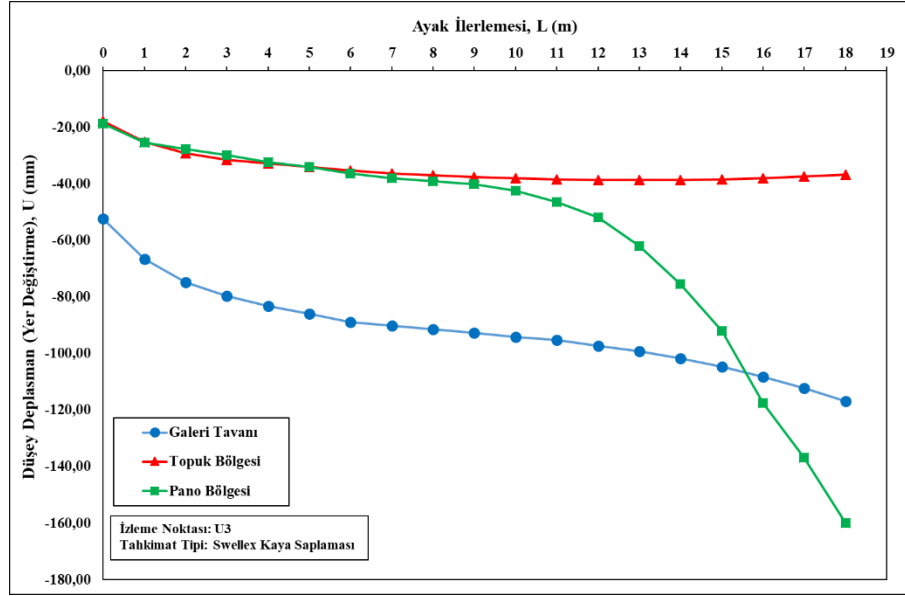
Şekil 4.71. Swellex kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Topuk)

Şekil 4.69’da her 1 m’lik ayak kazısı yapıldıkça, galeri tavanında düşey yer değiştirme değerlerinin hızla arttığı görülmektedir. Ayak önünde 18. m’de konumlanan U3 izleme bölgesinde, galeri tavanındaki izleme noktasında, ayak 18. metreye gelince oluşan yer değiştirme değerinin 116.94 mm’ye çıktığı belirlenmiştir. Bu izleme noktasından 10 m pano içerine doğru bir noktada bulunan U3/pano izleme noktasında oluşan yer değiştirme davranışı Şekil 4.70’te sunulmuştur. Burada 18 m’lik arın kazısı sonrasında yer değiştirme değeri 159.96 mm olmuştur. Üst taban yoluna komşu olan topuğun orta noktasına ait bölgede ise 36.77 mm yer değiştirme oluşmuştur (Şekil 4.71).

Şekil 4.69, 4.70 ve 4.71’de üretilen sayısal değerler Çizelge 4.43’te sunulmuştur. Bu değerlere dayalı grafiksel sunum Şekil 4.72’de verilmiştir.

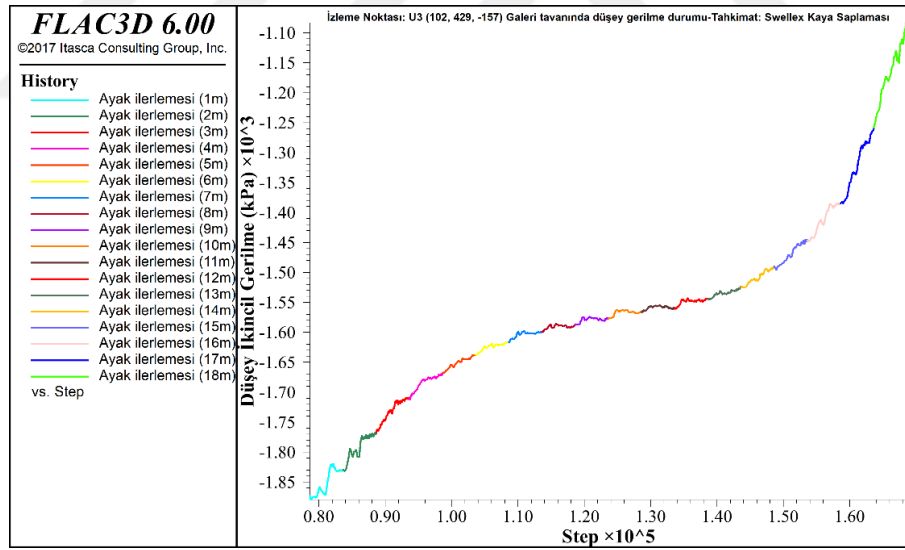
Çizelge 4.43. Swellex kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3 izleme bölgesi)

| Ayak Kazı İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|----------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -52.37 | -17.97 | -18.81 |
| 1 | -66.54 | -25.31 | -25.47 |
| 2 | -74.78 | -29.29 | -27.65 |
| 3 | -79.73 | -31.46 | -29.94 |
| 4 | -83.17 | -32.88 | -32.33 |
| 5 | -85.99 | -34.13 | -34.00 |
| 6 | -88.98 | -35.40 | -36.39 |
| 7 | -90.14 | -36.34 | -37.95 |
| 8 | -91.36 | -37.10 | -39.10 |
| 9 | -92.68 | -37.60 | -40.14 |
| 10 | -94.09 | -38.15 | -42.42 |
| 11 | -95.32 | -38.42 | -46.38 |
| 12 | -97.34 | -38.66 | -51.99 |
| 13 | -99.18 | -38.60 | -61.98 |
| 14 | -101.72 | -38.60 | -75.51 |
| 15 | -104.79 | -38.37 | -92.14 |
| 16 | -108.32 | -38.00 | -117.52 |
| 17 | -112.32 | -37.49 | -136.77 |
| 18 | -116.94 | -36.77 | -159.96 |

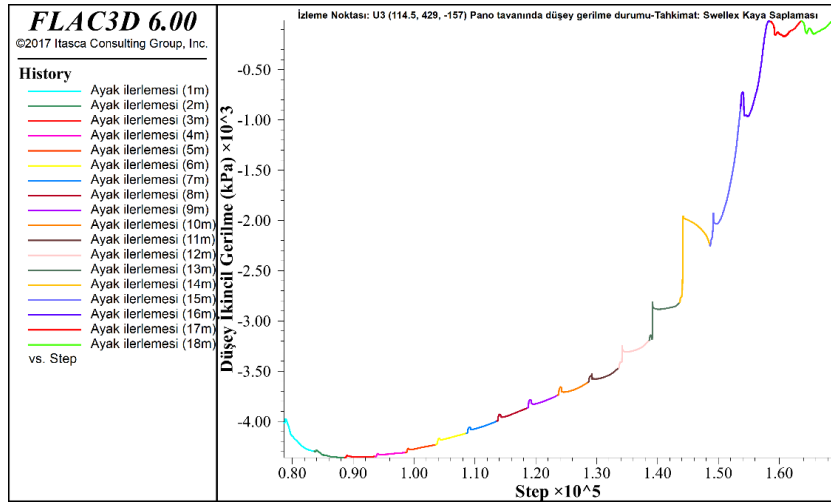


Şekil 4.72. Swellex kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler

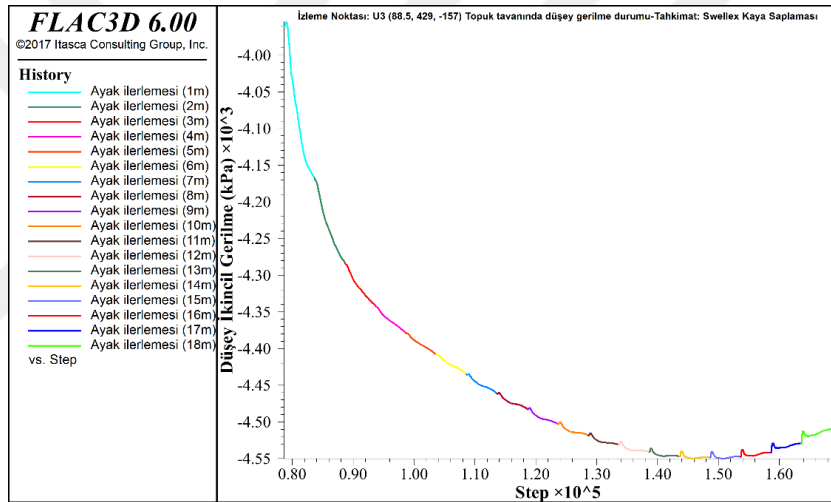
Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki düşey ikincil gerilme değişimleri Şekil 4.73-4.75'te verilmiştir.



Şekil 4.73. Swellex kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey ikincil gerilme değişimleri (U3/Galeri).



Şekil 4.74. Swellex kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilme değişimleri (U3/Pano)

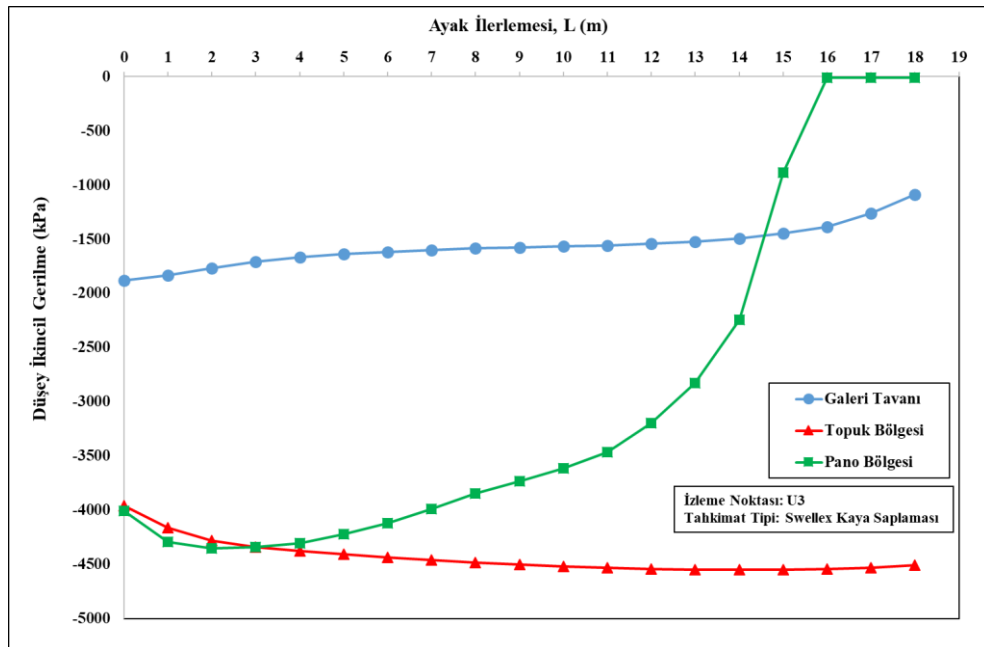


Şekil 4.75. Swellex kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilme değişimleri (U3/Topuk)

Şekil 4.73'te her 1 m ayak kazısı yapıldıkça galeri tavanında düşey ikincil gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ayak önünde 18. m'de konumlanan U3 izleme bölgesinde, galeri tavanında ayak 18. m'ye gelince, düşey ikincil gerilme değerinin 1089.37 kPa değerine düştüğü belirlenmiştir. Düşey ikincil gerilme değerlerinin Şekil 4.74'ten pano bölgesinde 13.92 kPa, Şekil 4.75'ten topuk bölgesinde 4509.08 kPa olduğu görülmektedir. Şekil 4.73, 4.74 ve 4.75'ten elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.44'te sunulmuş grafiksel değerlendirmesi ise Şekil 4.76'de verilmiştir.

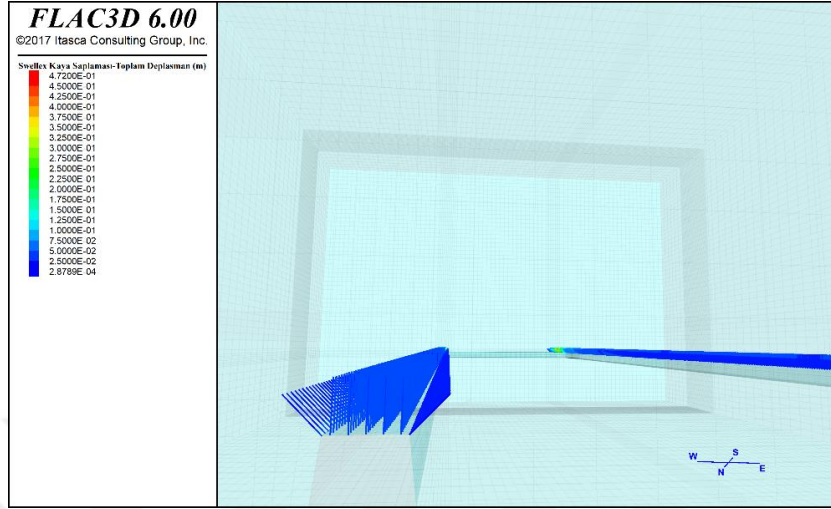
Çizelge 4.44. Swellex kaya saptlamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey ikincil gerilme değerleri (U3 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|-------------------|-----------|----------|----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -1878.9 | -3959.69 | -4007.08 |
| 1 | -1831.54 | -4164.74 | -4291.18 |
| 2 | -1768.58 | -4281.54 | -4351.15 |
| 3 | -1710.83 | -4342.53 | -4338.53 |
| 4 | -1666.93 | -4378.44 | -4303.8 |
| 5 | -1639.21 | -4407.42 | -4221.73 |
| 6 | -1616.68 | -4434.24 | -4117.56 |
| 7 | -1599.36 | -4460.63 | -3991.3 |
| 8 | -1586.07 | -4482.69 | -3849.25 |
| 9 | -1577.41 | -4501.29 | -3735.61 |
| 10 | -1567.01 | -4516.87 | -3612.5 |
| 11 | -1560.66 | -4529.84 | -3467.29 |
| 12 | -1544.49 | -4540.66 | -3195.82 |
| 13 | -1524.27 | -4546.28 | -2826.49 |
| 14 | -1492.51 | -4548.01 | -2245.67 |
| 15 | -1447.46 | -4548.01 | -888.309 |
| 16 | -1383.93 | -4541.09 | -13.9174 |
| 17 | -1259.17 | -4528.98 | -13.9174 |
| 18 | -1089.37 | -4509.08 | -13.9174 |

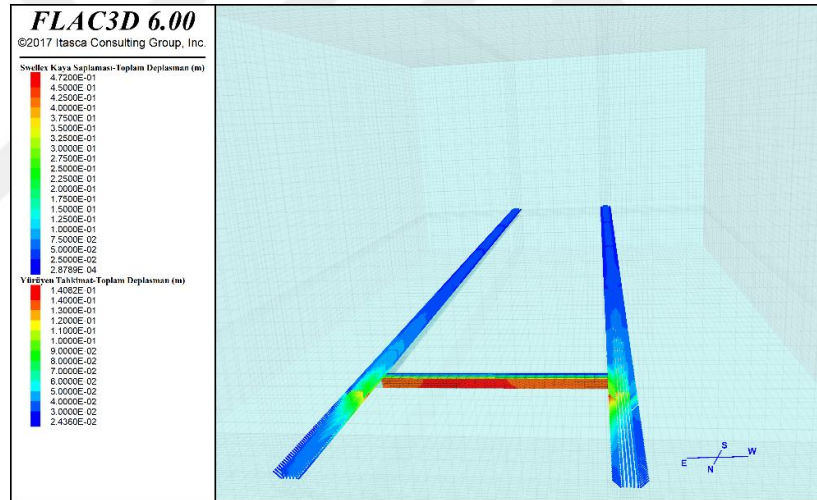


Şekil 4.76. Swellex kaya saptlamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilme davranışı

Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısı ve 18 m'lik arın kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.77'de belirtilmiştir.



a-Swellex kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Swellex kaya saplamalarının üzerinde görülen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.77. Tabanyollarının kazısı ve ayağın 18 m ilerlemesinden sonra Swellex kaya saplamalarının üzerine gelen toplam yer değiştirmelere ait kontur diyagramı

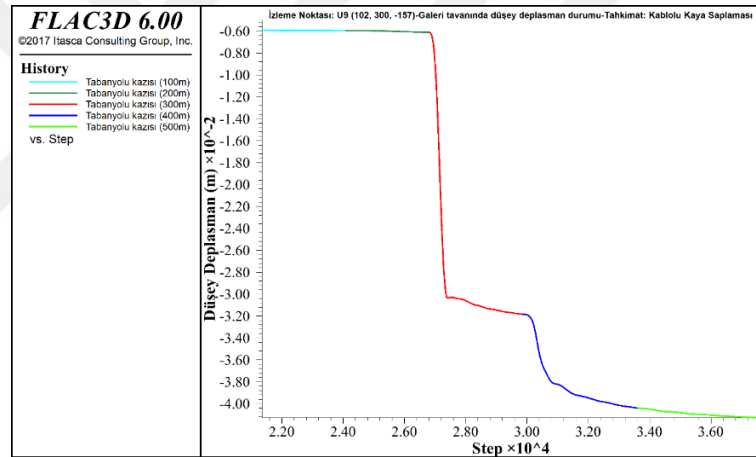
Şekil 4.77'de görüldüğü üzere tabanyollarının kazı aşaması ve uzunayağın 18 m ilerlemesinden sonra saplamaların üzerindeki düşey yer değiştirme değerlerinin tabanyollarının girişinden ayağa doğru düşük yer değiştirme değerlerinde olduğu bu değerlerin 2.5 cm ile 7.5 cm arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 4.77b'de yürüyen tahkimat ünitelerinde görülen toplam yer değiştirmelerin en fazla 14 cm civarında ve ayağın arkasında göçük sınırında olduğu ve saplamalarda görülen en büyük toplam yer değiştirmelerin 47.2 cm civarında bu bölgede olduğu görülmektedir.

4.3.4. Kablolü kaya saptaması tahkimat koşuluna ait sayısal analiz sonuçları

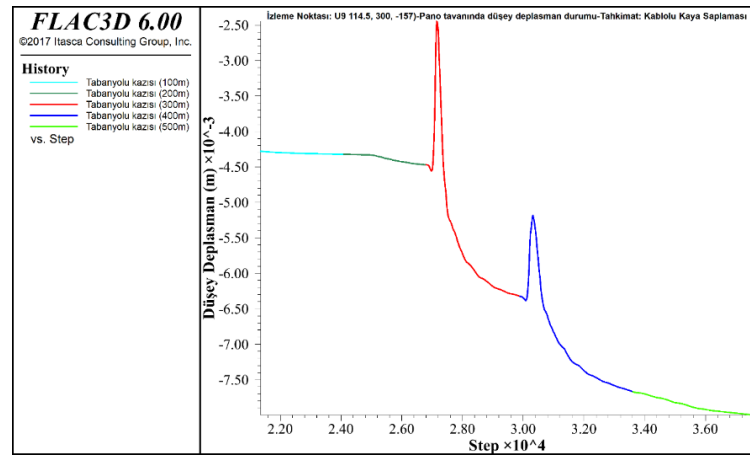
A6 uzunayak panosunun taban yolları, bu modelde Kablolü kaya saptamaları ile tahkim edilmiştir. Kablolü kaya saptamalarını temsil etmek üzere modelde kablo yapısal elemanları (cable structural elements) kullanılmıştır. Kullanılan bu elemanlara ait detaylı bilgiler önceki bölümlerde belirtilmiştir (Bknz. Bölüm 3.5.5.2).

4.3.4.1. Kablolü kaya saptaması tahkimatlı taban yollarında tünel kazısına bağı sayısal analiz sonuçları

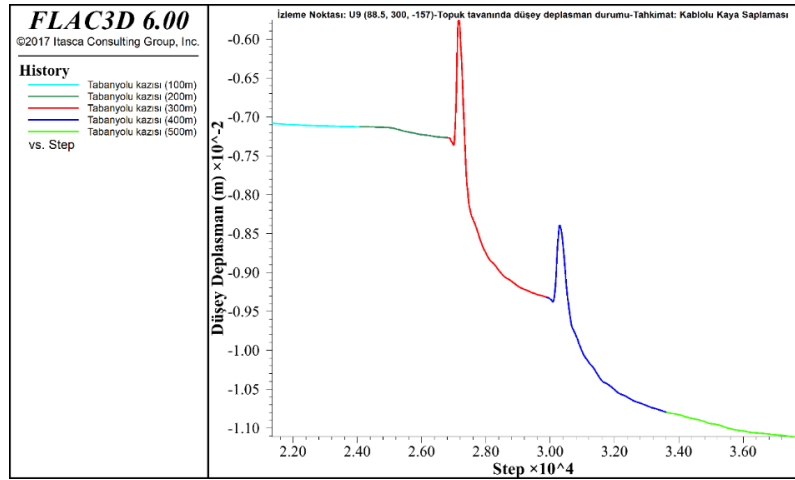
Model geometrisinde, üst tabanyolunun orta noktasına yakın 300. m'sinde konumlandırılan U9 kodlu izleme bölgesinden (Galeri tavanı-U9/Galeri, A6 pano bölgesi-U9/Pano, topuk bölgesi-U9/Topuk) elde edilen sonuçlar Şekil 4.78 ile Şekil 4.80 arasında sunulmuştur.



Şekil 4.78. Kablolü kaya saptamaları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde galeri tavanında oluşan düsey yer değıştirmeler (U9/Galeri)



Şekil 4.79. Kablolü kaya saptamaları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düsey yer değıştirmeler (U9/Pano)



Şekil 4.80. Kablo koya saplamları ile tahkimat modelinde üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey yer değıştirmeler (U9/Topuk)

Şekil 4.78 - 4.80 arasında sunulan tasarım çıktıklarına ait veriler Çizelge 4.45'te ve Şekil 4.81'de sunulmuştur.

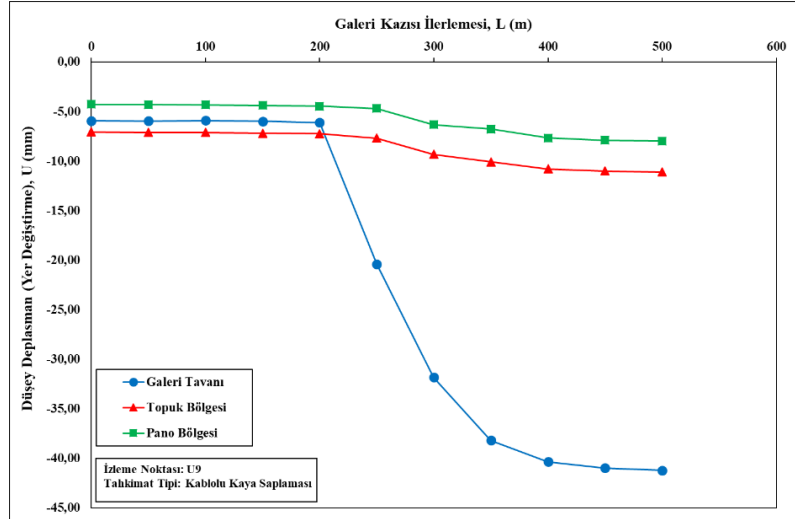
Çizelge 4.45. Kablo koya saplama ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan düşey yer değıştirmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -5.93 | -7.08 | -4.29 |
| 50 | -5.95 | -7.11 | -4.31 |
| 100 | -5.90 | -7.13 | -4.33 |
| 150 | -5.98 | -7.18 | -4.39 |
| 200 | -6.11 | -7.26 | -4.47 |
| 250 | -20.43 | -7.71 | -4.70 |
| 300** | -31.83 | -9.32 | -6.32 |
| 350 | -38.21 | -10.10 | -6.77 |
| 400 | -40.36 | -10.80 | -7.67 |
| 450 | -40.99 | -11.02 | -7.89 |
| 500 | -41.22 | -11.11 | -7.99 |

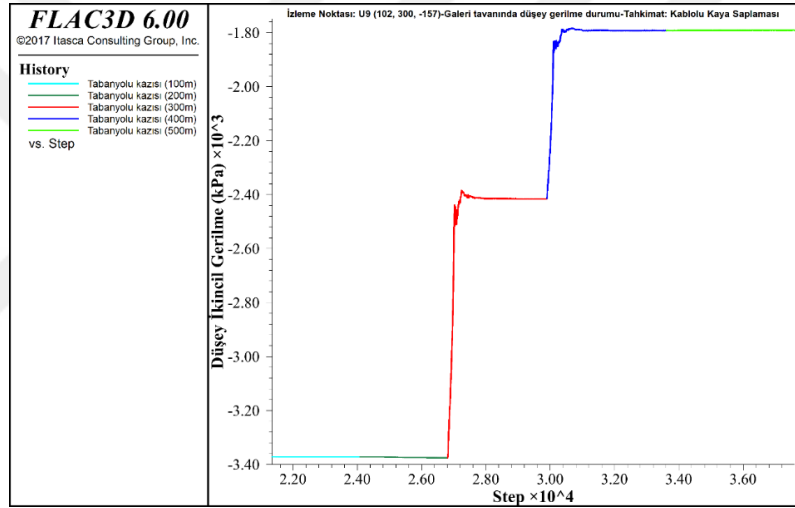
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey yer değıştirme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

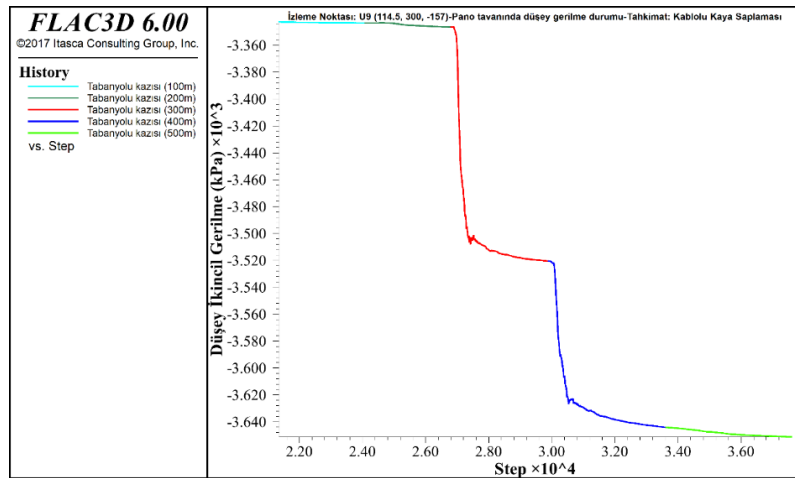
Çizelge 4.45 ve Şekil 4.81 incelendiğinde galeri tavanında 41.22 mm, topuk bölgesinde 11.11 mm ve pano bölgesinde ise 7.99 mm yer değıştirme olduğu görülmektedir. Üst taban yolunun 300. metresinde oluşturulan izleme noktasında (U9) oluşan düşey ikincil gerilme değeri galeri tavanı, pano bölgesi ve topuk bölgesi için sırası ile Şekil 4.82, 4.83 ve 4.84'te verilmiştir.



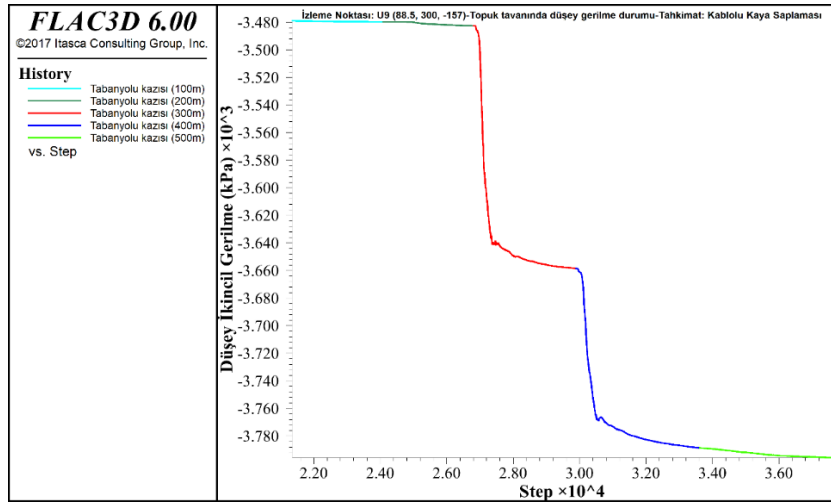
Şekil 4.81. Kablolu kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan yer değıştirmeler.



Şekil 4.82. Kablolu kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde galerî tavanında oluşan düşey gerilmeler (U9/Galerî)



Şekil 4.83. Kablolu kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde pano bölgesinde oluşan düşey gerilmeler (U9/Pano)



Şekil 4.84. Kablo lu kaya saplaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde topuk bölgesinde oluşan düşey gerilmeler (U9/Topuk)

Üst taban yolunun 300. m'sinde oluşturulan izleme bölgesindeki (U9) düşey gerilme değerleri için hazırlanan çizelge ve grafik Çizelge 4.46 ve Şekil 4.85'te sunulmuştur.

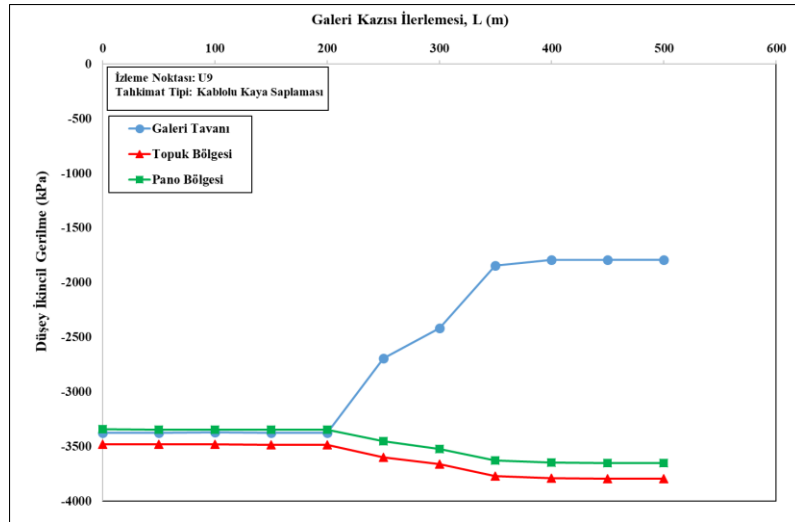
Çizelge 4.46. Kablo lu kaya saplama ları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde oluşan ikincil gerilmeler (U9 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U9/Galeri | U9/Topuk | U9/Pano |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -3375.87* | -3478.91* | -3342.69* |
| 50 | -3372.29 | -3479.37 | -3342.92 |
| 100 | -3369.9 | -3479.8 | -3343.36 |
| 150 | -3373.48 | -3481.21 | -3344.71 |
| 200 | -3373.48 | -3482.13 | -3346.05 |
| 250 | -2693.71 | -3599 | -3451.14 |
| 300** | -2417.03 | -3658.81 | -3520.83 |
| 350 | -1842.21 | -3767.85 | -3625.7 |
| 400 | -1790.93 | -3788.33 | -3644.08 |
| 450 | -1790.93 | -3793.62 | -3648.56 |
| 500 | -1790.93 | -3795.69 | -3651.25 |

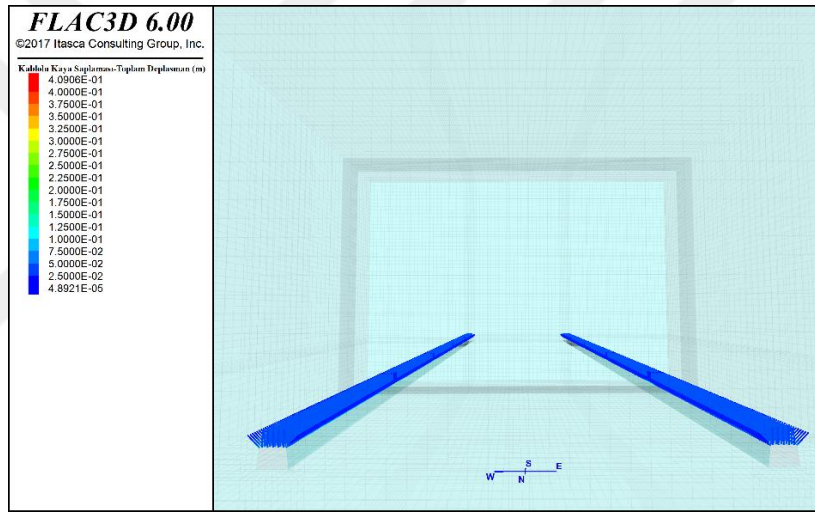
*Başlangıç koşullarından dolayı oluşan düşey gerilme miktarı

**Bu koşulda U9 izleme bölgesi, tam 300. metre kazı arında konumlanmaktadır.

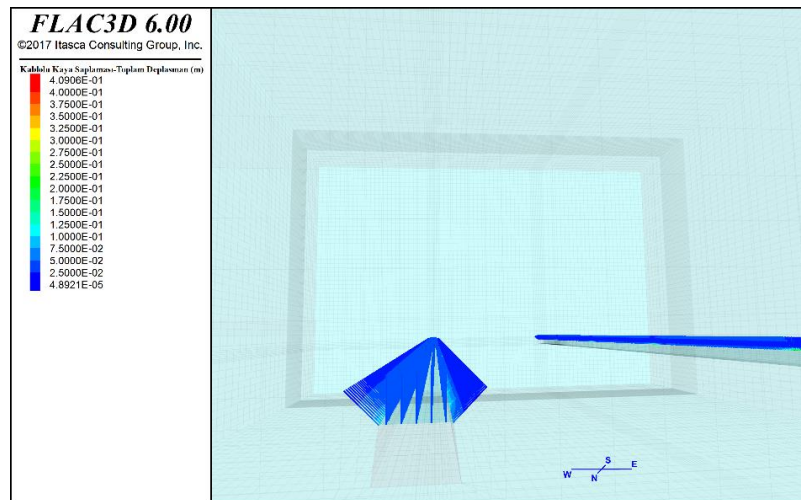
Üç boyutlu sayısal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan kablo lu kaya saplama sı tahkimatın üzerine gelen toplam yer değıştirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.86'da belirtilmiştir.



Şekil 4.85. Kablolu kaya saptaması ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 300. metresinde modelde tesis edilen U9 izleme bölgesinde oluşan ikincil gerilmeler



a- Kablolu kaya saptamalarının üzerinde görülen toplam yer değıştirmelere ait kontur diyagramı



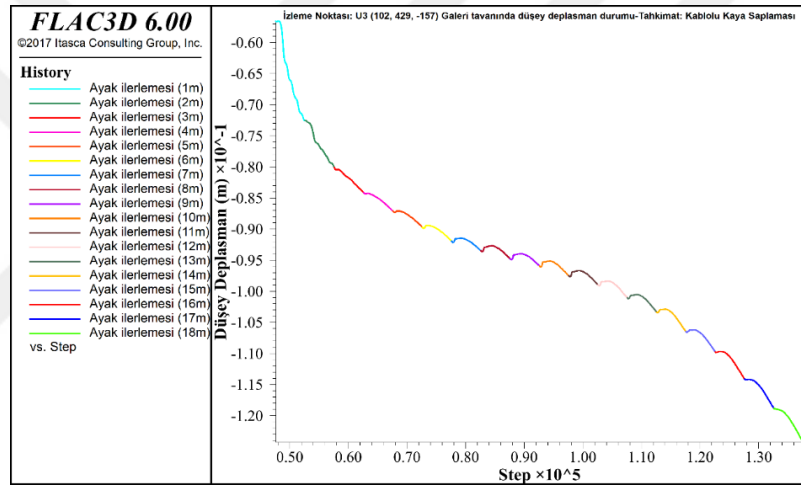
b-Kablolu kaya saptamalarının üzerinde görülen toplam yer değıştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.86. 500 metre uzunluğunda taban yolu kazısından sonra Kablolu kaya saptamalarının üzerine gelen toplam yer değıştirmelere ait kontur diyagramı

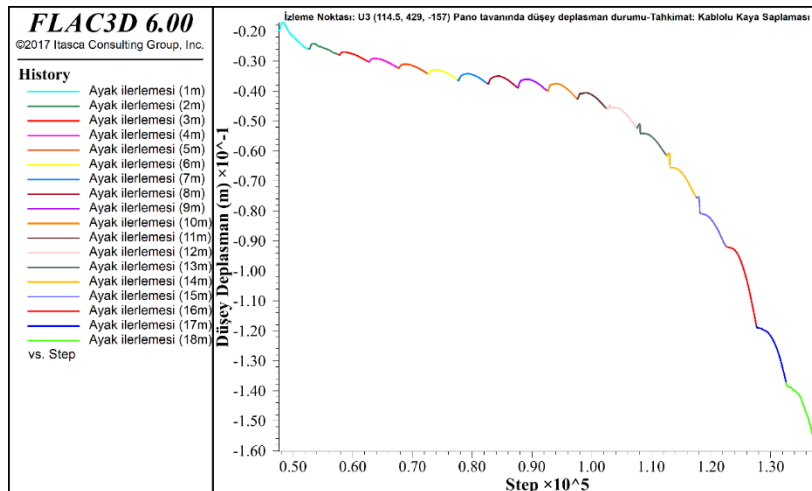
Kablolu kaya saplamaları üzerine gelen toplam deplasmanların kontur diyagramına bakıldığında, 500 m tabanyolu kazısı sonrasında dengeli bir durumdan söz edilebilir. Saplamaların üzerine gelen toplam yer değiştirme miktarları 2.5 cm ile 10 cm arasındadır (Şekil 4.86).

4.3.1.2. Kablolu kaya saplaması tahkimathı taban yollarında ayak kazısına bağlı sayısal analiz sonuçları

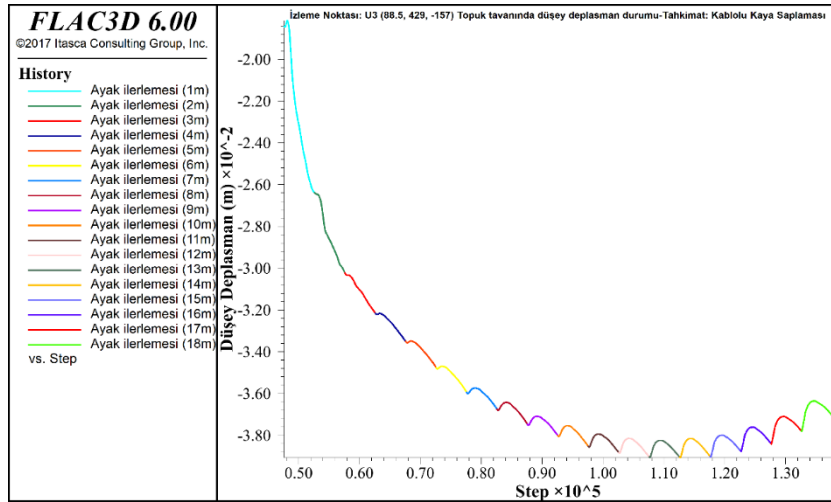
Modelde tanımlanan tabanyollarının kablolu kaya saplaması ile tahkimatında uzunayak kazısına dayalı oluşan yer değiştirme ve düşey gerilme değişimleri bu bölümde sunulmuştur. Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki yer değiştirme değişimleri Şekil 4.87-4.89’da sunulmuştur.



Şekil 4.87. Kablolu kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Galeri).



Şekil 4.88. Kablolu kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Pano)

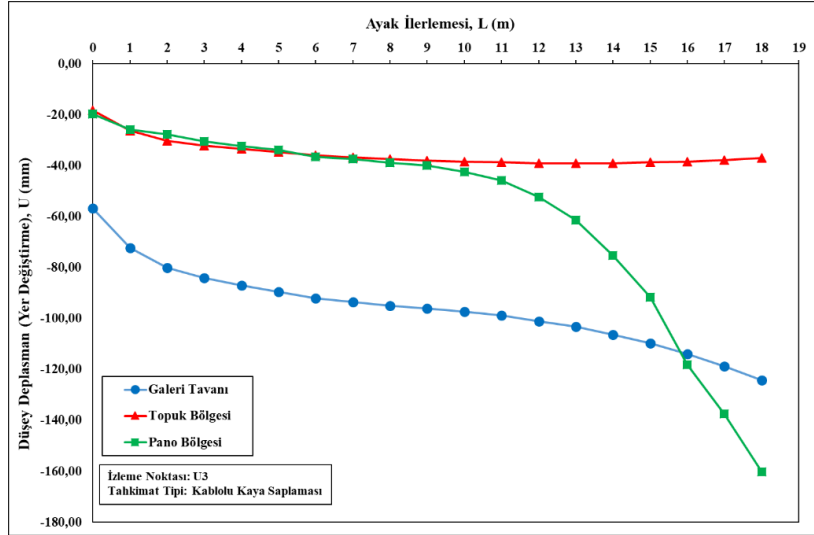


Şekil 4.89. Kablolu kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3/Topuk)

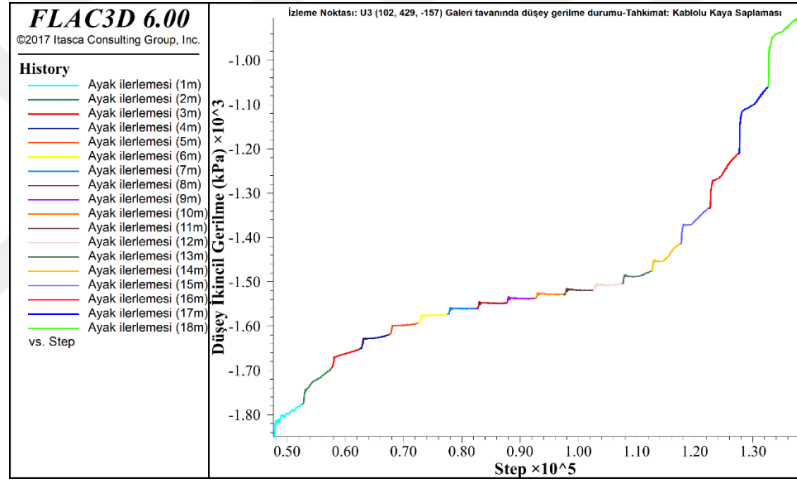
Şekil 4.87, 4.88 ve 4.89'dan türetilen sayısal değerler Çizelge 4.47'de sunulmuştur. Bu değerlere dayalı grafiksel sunum Şekil 4.90'da verilmiştir. Ayağın 18 m önünde konumlanan U3 izleme bölgesindeki düşey ikincil gerilme değişimleri Şekil 4.91-4.93'te verilmiştir.

Çizelge 4.45. Kablolu kaya saplamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey yer değiştirmeler (U3 izleme bölgesi)

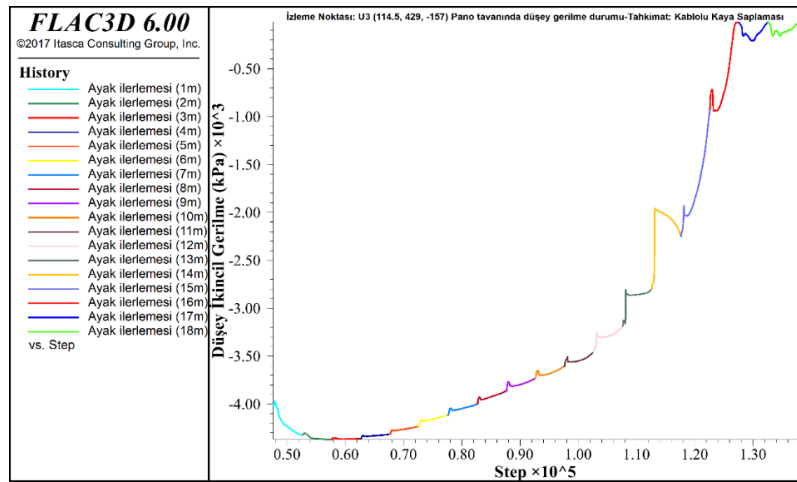
| Ayak Kazı İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|----------------------|-----------|----------|---------|
| L (m) | U (mm) | U (mm) | U (mm) |
| 0 | -56.67 | -18.33 | -19.71 |
| 1 | -72.34 | -26.37 | -25.84 |
| 2 | -80.10 | -30.17 | -27.82 |
| 3 | -84.07 | -32.16 | -30.42 |
| 4 | -87.02 | -33.46 | -32.39 |
| 5 | -89.57 | -34.71 | -33.75 |
| 6 | -91.98 | -35.95 | -36.55 |
| 7 | -93.55 | -36.72 | -37.49 |
| 8 | -94.97 | -37.48 | -38.84 |
| 9 | -96.01 | -37.99 | -39.98 |
| 10 | -97.43 | -38.52 | -42.48 |
| 11 | -98.76 | -38.77 | -45.91 |
| 12 | -101.11 | -39.01 | -52.25 |
| 13 | -103.22 | -39.04 | -61.40 |
| 14 | -106.47 | -39.01 | -75.33 |
| 15 | -109.66 | -38.77 | -91.55 |
| 16 | -114.03 | -38.43 | -118.17 |
| 17 | -118.69 | -37.83 | -137.40 |
| 18 | -124.24 | -37.02 | -160.27 |



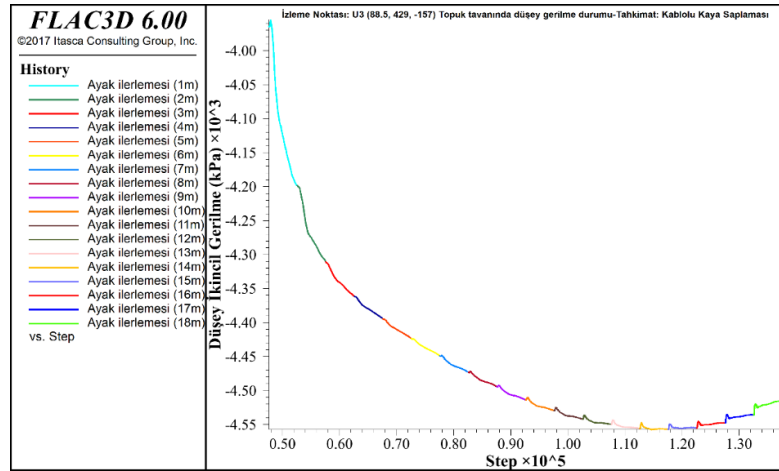
Şekil 4.90. Kablolu kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan yer değiştirmeler



Şekil 4.91. Kablolu kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) galeri üzerinde oluşan düşey ikincil gerilme değişimleri (U3/Galeri)



Şekil 4.92. Kablolu kaya saptamaları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) pano bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilme değişimleri (U3/Pano)



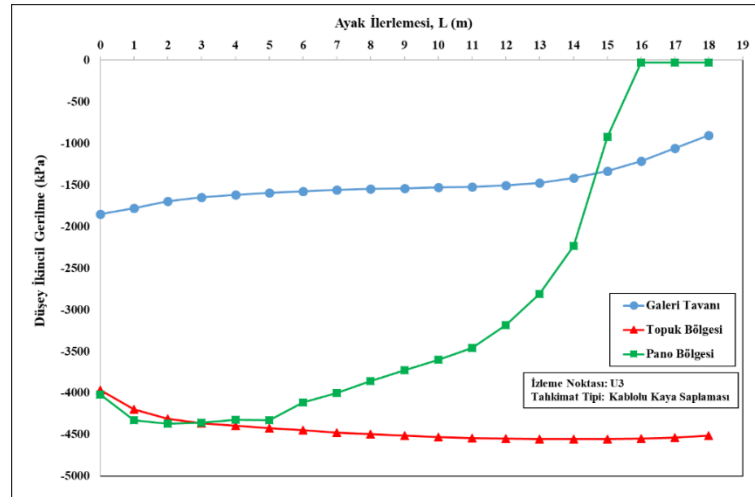
Şekil 4.93. Kablo lu kaya saplama ları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde (ayak önünde 18. metre) topuk bölgesinde oluşan düşey gerilme değ işimleri (U3/Topuk)

Şekil 4.91-4.93'den elde edilen sayı sal değ erler Çizelge 4.48'de sunulmuş, grafiksel değ erlendirmesi ise Şekil 4.94'te verilmiştir.

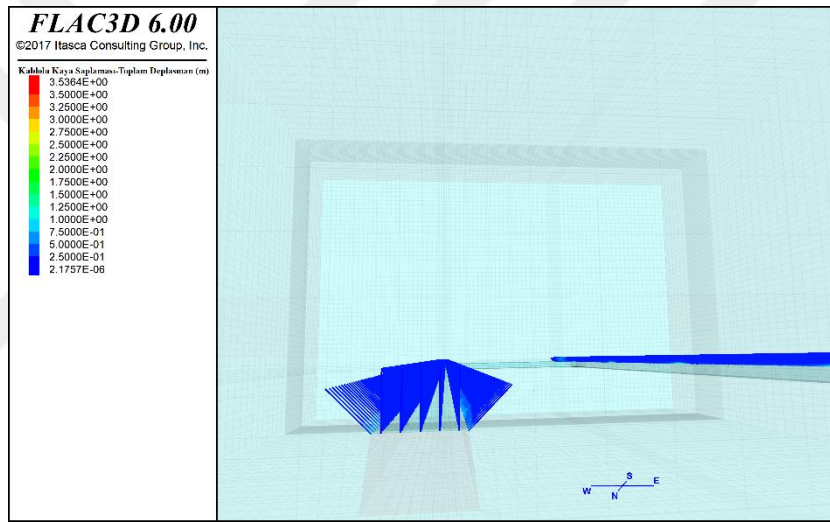
Çizelge 4.48. Kablo lu kaya saplama ları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde oluşan düşey gerilme değ erleri (U3 izleme bölgesi)

| Galeri İlerlemesi | U3/Galeri | U3/Topuk | U3/Pano |
|-------------------|-----------|----------|----------|
| L (m) | P (kPa) | P (kPa) | P (kPa) |
| 0 | -1847.82 | -3965.19 | -4017.22 |
| 1 | -1775.97 | -4198.82 | -4327.43 |
| 2 | -1693.87 | -4309.33 | -4371.74 |
| 3 | -1650.08 | -4362.02 | -4355.92 |
| 4 | -1619.29 | -4395.27 | -4321.1 |
| 5 | -1591.92 | -4423.71 | -4325.63 |
| 6 | -1574.82 | -4448.65 | -4115.35 |
| 7 | -1561.45 | -4474.02 | -4001.4 |
| 8 | -1548.14 | -4494.58 | -3855.79 |
| 9 | -1537.87 | -4513.4 | -3726.01 |
| 10 | -1529.66 | -4529.59 | -3602.56 |
| 11 | -1520.08 | -4540.52 | -3456.96 |
| 12 | -1503.66 | -4549.71 | -3184.74 |
| 13 | -1474.93 | -4556.27 | -2808.06 |
| 14 | -1414.03 | -4556.71 | -2231.97 |
| 15 | -1333.3 | -4554.96 | -921.516 |
| 16 | -1211.51 | -4546.65 | -25.7228 |
| 17 | -1060.30 | -4535.27 | -25.7228 |
| 18 | -904.986 | -4514.71 | -25.7228 |

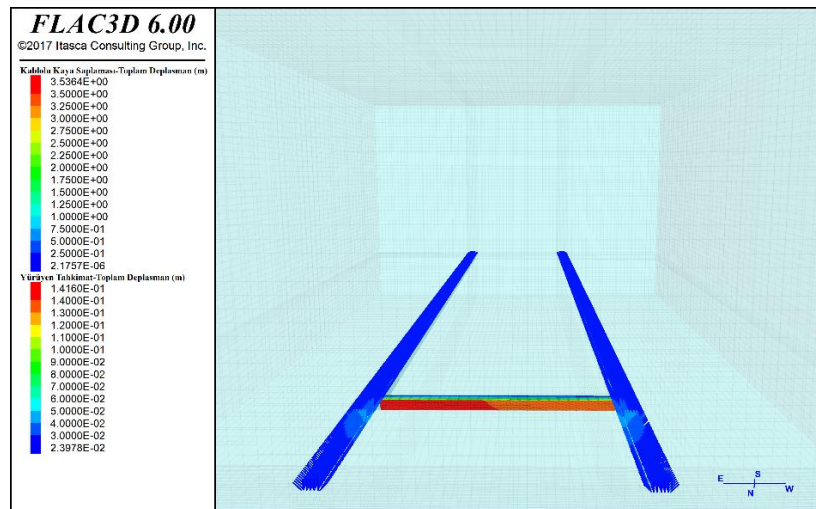
Üç boyutlu sayı sal modelleme sonucunda, tabanyollarının kazısı ve 18 m'lik arın kazısından sonra tüm tabanyolları üzerinde bulunan tahkimatın üzerine gelen toplam yer değ iş tirmelere ait kontur diyagramı Şekil 4.95'te belirtilmiştir.



Şekil 4.94. Kablo lu kaya saplamları ile tahkim edilmiş üst taban yolunun 429. metresinde modelde tesis edilen U3 izleme bölgesinde oluşan düşey ikincil gerilme davranışı



a-Kablo lu kaya saplamlarının üzerinde görülen toplam yer de ğiştirmelere ait kontur diyagramı



b-Kablo lu kaya saplamlarının üzerinde görülen toplam yer de ğiştirmelere ait kontur diyagramı-(üst tabanyolu yakın görünüm)

Şekil 4.95. Tabanyollarının kazısı ve ayağın 18 m ilerlemesinden sonra Kablo lu kaya saplamlarının üzerine gelen toplam yer de ğiştirmelere ait kontur diyagramı

4.3.5. Genel Değerlendirme

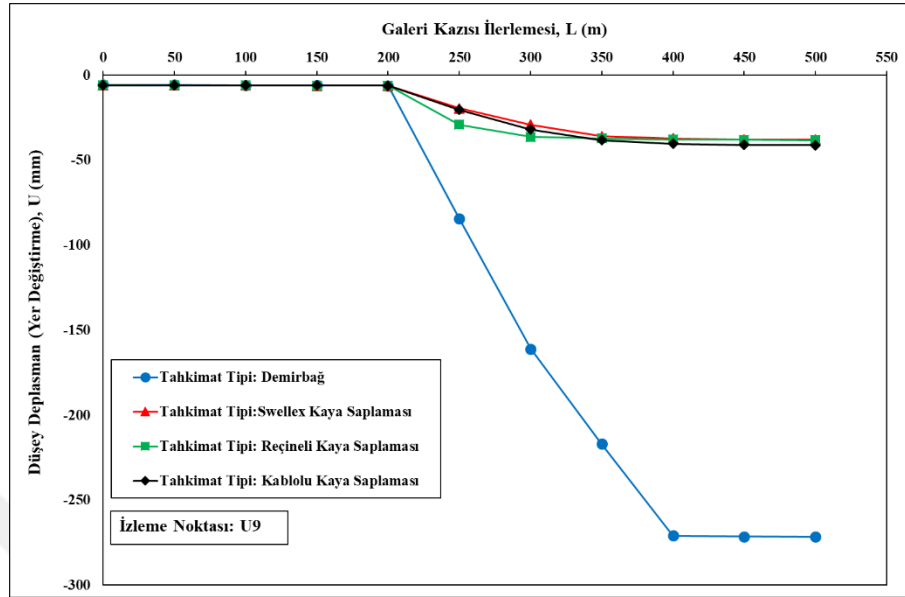
4.3.5.1. Tünel şeklindeki durum için genel değerlendirme

Bu başlık altında hazırlanan modelde açılan üst taban yolunun tünel gibi değerlendirilmesi durumunda hazırlanan düşey yer değiştirme ve ikincil gerilmeler topluca Şekil 4.96-4.102’de sunulmuştur. Bu değerlendirmede galerinin 300. m’inde tanımlanan U9 izleme bölgesi dikkate alınmıştır. Galeride kazıya başlandığı andan itibaren galerinin 300. m’sindeki U9 izleme noktasında oluşan yer değiştirmeler incelenmiştir.

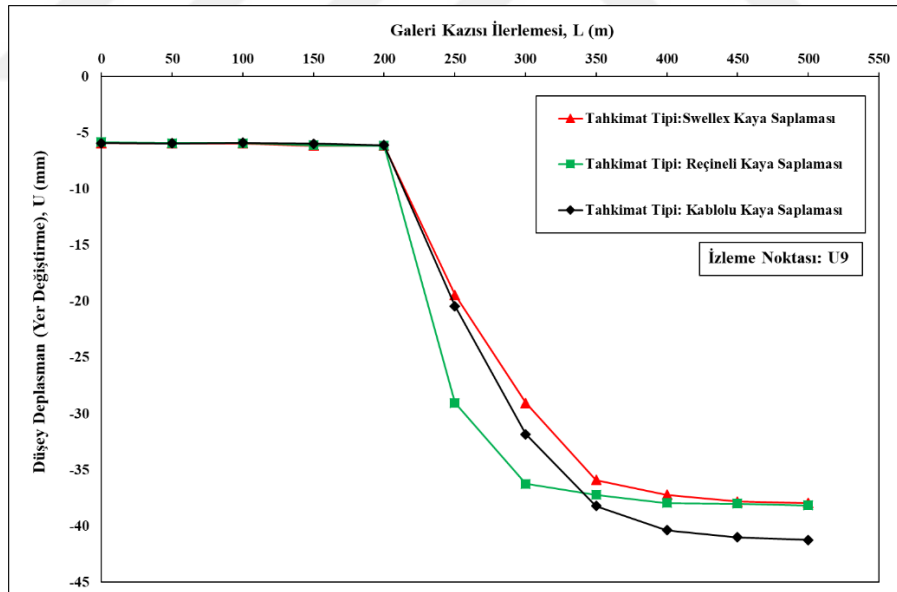
Tüm tahkimat tiplerinin birbirleri ile düşey yer değiştirme değerlerini karşılaştırmak amacıyla önce galeri tavanındaki yer değiştirme davranışı Şekil 4.96 ve 4.97 sunulmuştur. Şekil 4.96’da tüm tahkimat tipleri verilirken sadece kaya saplamaları Şekil 4.97’de sunulmuştur. Şekil 4.96 dikkate alındığında demir bağ tahkimat tipinin daha çok yer değiştirmelere izin verdiği anlaşılmaktadır. Kaya saplamalarının genel olarak birbirlerine yakın ancak demir bağdan oldukça düşük yer değiştirmelere izin verdiği anlaşılmaktadır. Yaklaşık 271,6 mm yer değiştirmelerin görüldüğü Demirbağlarda bu değerlerin fazla olması bu tahkimat tipinin pasif tahkimat tipi olması ile açıklanabilir. Kaya saplamaları kendi içerisinde değerlendirilirse Swellex kaya saplamalarında yer değiştirme değeri 37.9 mm olurken, Reçineli tiplerde 38.2 mm ve Kablolulu tiplerde 42.2 mm olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.96 ve 4.97). Her bir tahkimat tipinin pano ve topuk tarafındaki etkisi Şekil 4.98 ve 4.99’da sunulmuştur. Pano ve topuk tarafında kaya saplamalı koşul için demirbağlı tahkimata nazaran daha az nihai yer değiştirmelerin olduğu anlaşılmaktadır.

Tüm tahkimat tiplerinin birbirleri ile gerilme değişimleri açısından karşılaştırmak amacıyla önce galeri tavanındaki gerilme davranışı sunulmuştur (Şekil 4.100). Genel olarak demirbağ tahkimat tipinin daha çok gerilme değişimlerine maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Pasif tahkimat tipinde olan demir bağın tavanda mevcut olan gerilmeyi tutamadığı ve bu gerilme değerlerinin sıfıra çok yaklaştığı anlaşılmaktadır. Bu durumun yer değiştirme temelinde kendini gösterdiğini ifade edilebilir ($U=271.6$ mm). Kaya saplamalarının ise başlangıçta yaklaşık 3370 kPa seviyesinde olan gerilme değerlerini genel olarak yaklaşık 1850 kPa seviyesinde tutabildiği anlaşılmaktadır. Bu da yer değiştirmelerin daha az olmasına izin verildiği ile açıklanabilir. Pano ve topuk

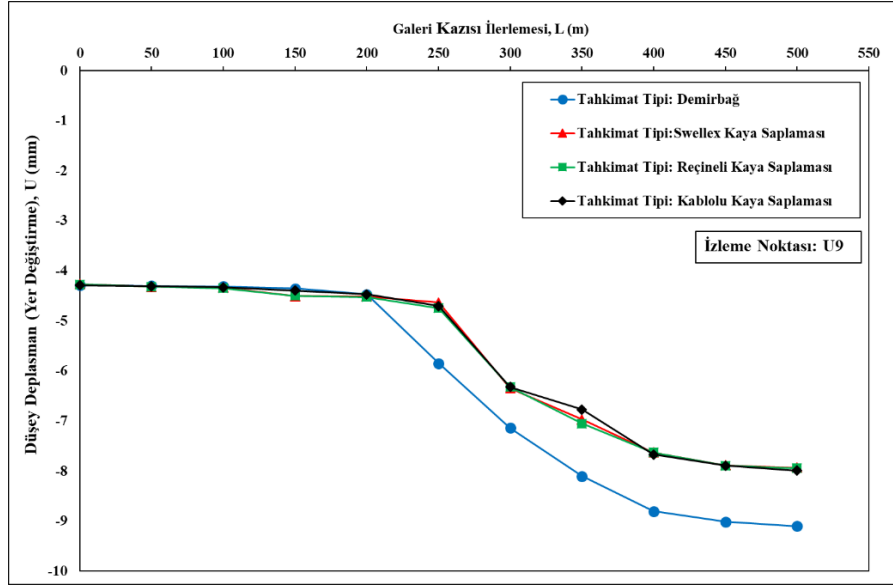
bölgelerinde oluşan gerilme değerlerinin tüm tahkimat tipleri için birbirlerine çok yakın olduğu ve bu nihai gerilme değerlerinin 3795-3800 kPa arasında değiştiği anlaşılmıştır.



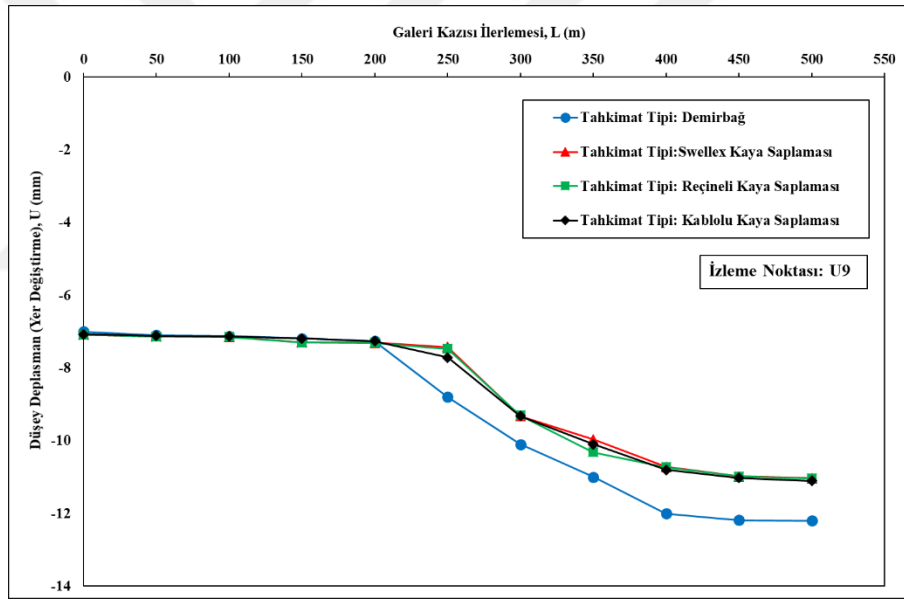
Şekil 4.96. Tüm tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan yer değiştirme davranışı (U9/Galeri)



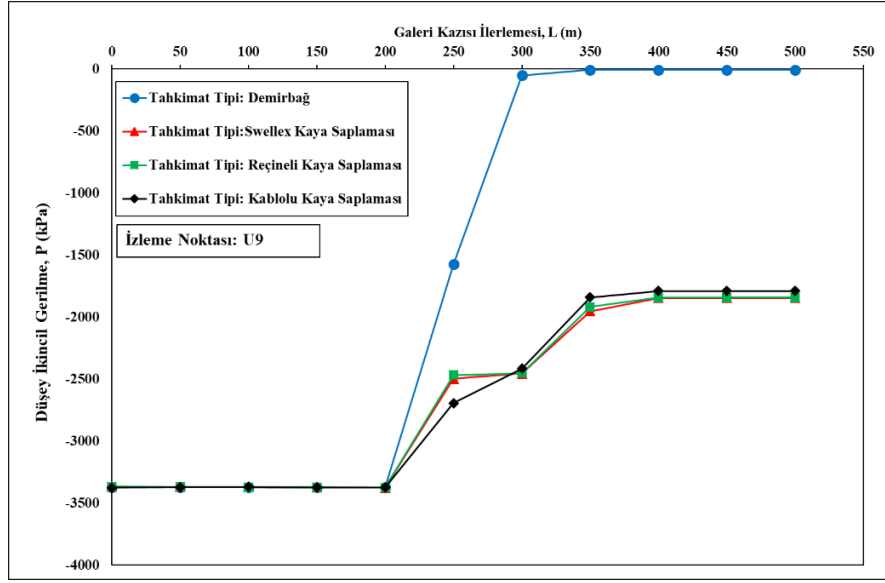
Şekil 4.97. Tüm kaya saplama tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan yer değiştirme davranışı (U9/Galeri)



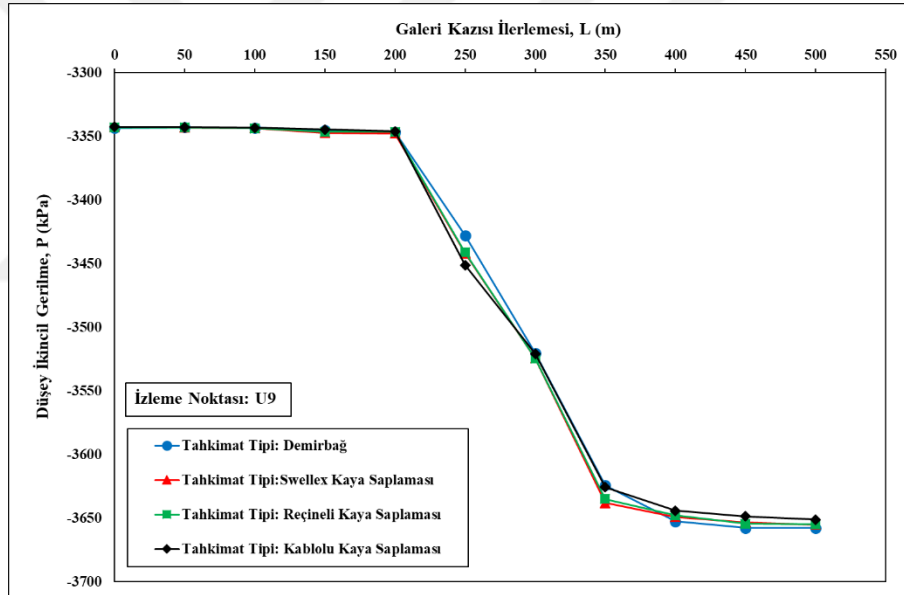
Şekil 4.98. Tüm tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki pano bölgesinde oluşan yer değiştirme davranışı (U9/Pano)



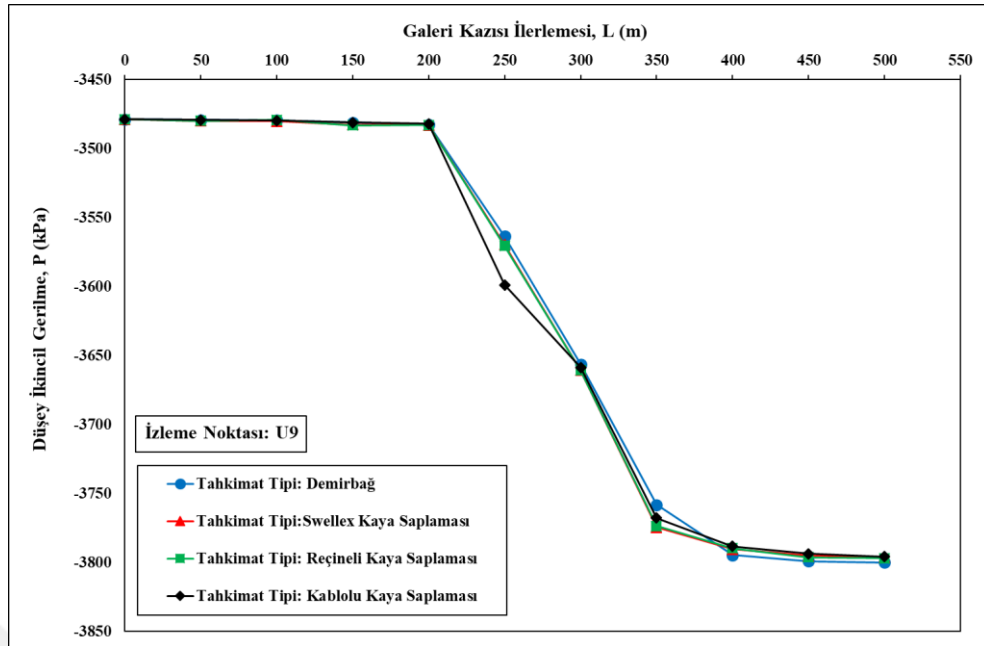
Şekil 4.99. Tüm tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki topuk bölgesinde oluşan yer değiştirme davranışı (U9/Topuk)



Şekil 4.100. Tüm tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan ikincil gerilme davranışı (U9/Galeri)



Şekil 4.101. Tüm kaya saplama tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki pano bölgesinde oluşan ikincil gerilme davranışı (U9/Pano)

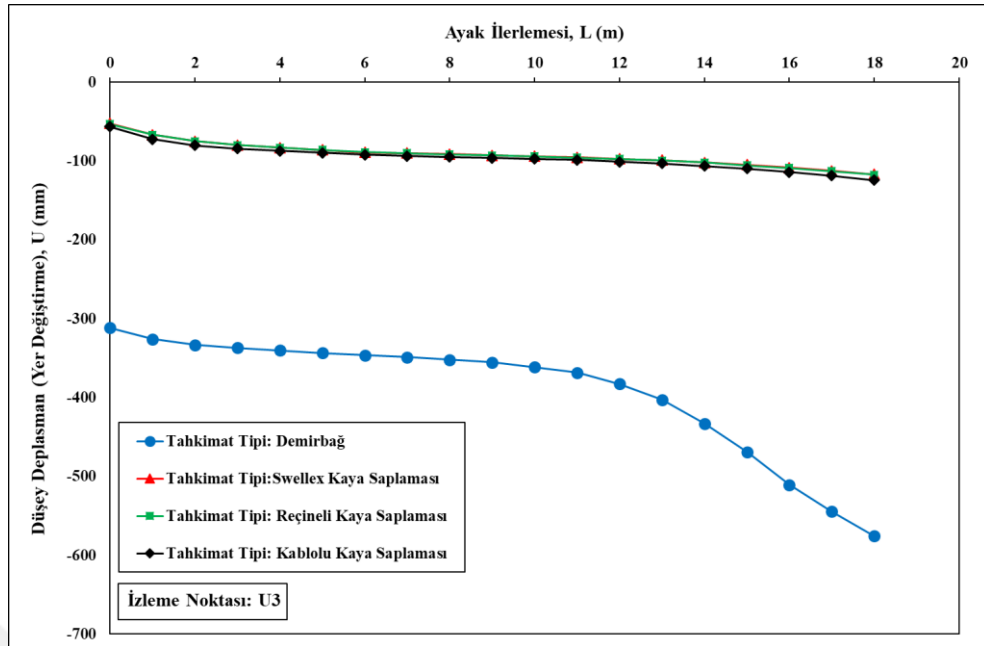


Şekil 4.102. Tüm tahkimat tiplerinin 300. metrede konumlanan U9 izleme bölgesindeki topuk bölgesinde oluşan ikincil gerilme davranışı (U9/Topuk)

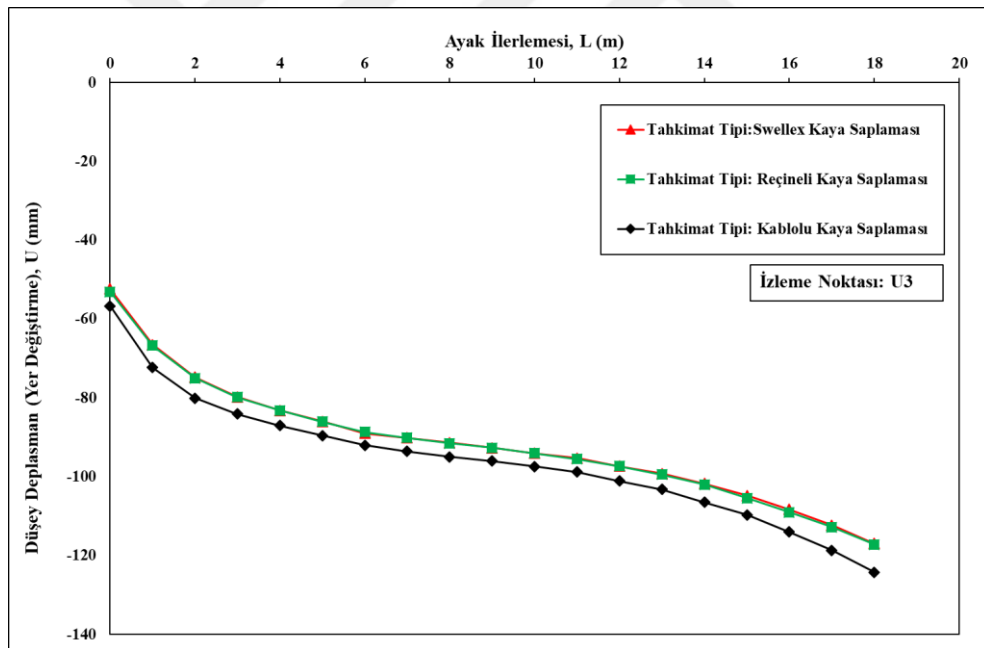
4.3.5.2. Uzunayak kazısı durum için değerlendirme

Bu başlık altında hazırlanan modelde uzunayak arınında 18 m'lik kazı yapılması durumunda açılan üst tabanyolunun 429. m'sinde tanımlanan U3 izleme bölgesinde oluşan düşey yer değiştirme ve ikincil gerilmeler topluca Şekil 4.103-4.109'da sunulmuştur.

Bu değerlendirmede önce galerinin 429. m'sinde tanımlanan U3 izleme bölgesi dikkate alınmıştır. Uzunayak arınında 1 metrelik 18 adet kazı yapılması durumunda her bir metrelik kazıya bağlı üst taban yolunun 429. m'sindeki U3 no'lu izleme bölgesinde tanımlanan noktada oluşan yer değiştirmeler incelenmiştir. Tüm tahkimat tiplerinin birbirleri ile yer değiştirme temelinde karşılaştırmak amacıyla önce galeri tavanındaki yer değiştirme davranışı Şekil 4.103 ve 4.104 sunulmuştur. Şekil 4.103'te tüm tahkimat tipleri verilirken sadece kaya saptamaları için Şekil 4.104 sunulmuştur.



Şekil 4.103. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirme davranışı (U3/Galeri)



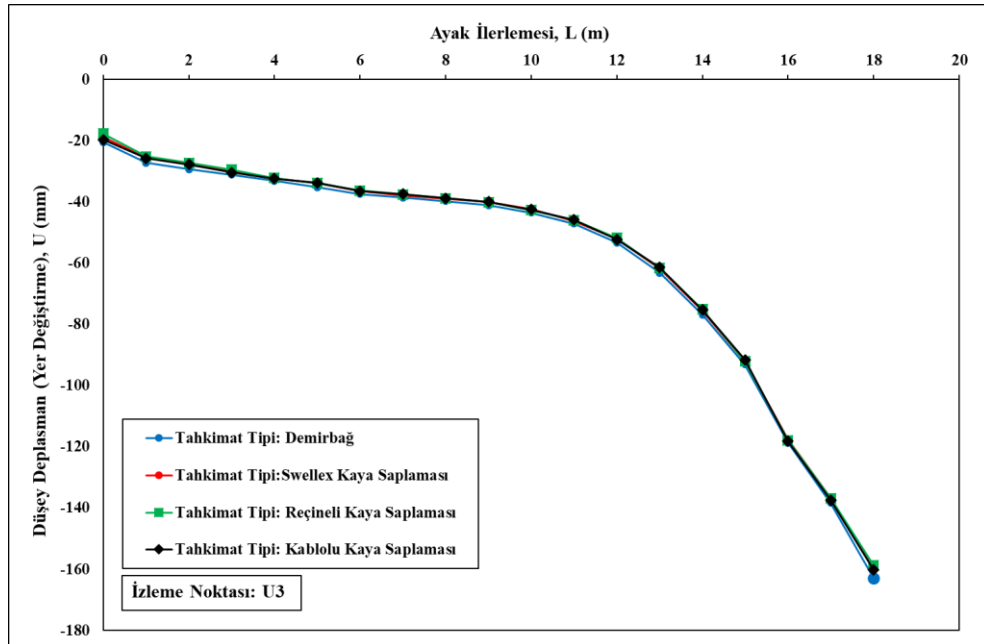
Şekil 4.104. Tüm kaya saplama tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan düşey yer değiştirme davranışı (U3/Galeri)

Şekil 4.103 incelendiğinde, genel olarak demirbağ tahkimat tipinin daha çok yer değiştirmelere izin verdiği anlaşılmaktadır. Kaya saptamalarının genel olarak birbirlerine yakın ancak demir bağdan oldukça düşük yer değiştirmelere izin verdiği anlaşılmaktadır. Pasif tahkimat olarak bilinen demirbağlarda yer değiştirme miktarı 575.8 mm olmuştur. Kaya saptamaları kendi içerisinde değerlendirilirse swellex kaya saptamalarında yer

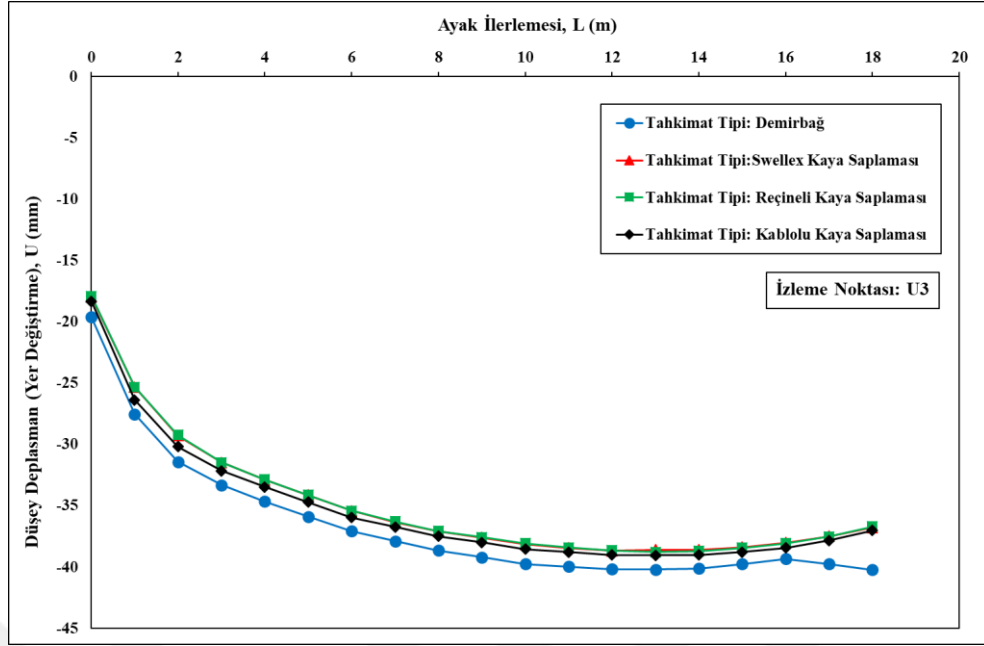
değiştirme değeri 116.9 mm olurken, reçineli tiplerde 117.2 mm ve kablolu tiplerde 124.24 mm olduğu anlaşılmaktadır.

Swellex ve reçineli kaya saplamaları hemen hemen aynı davranışı sergilerken kablolu kaya saplamaları biraz daha fazla yer değiştirme sergilemiştir. İlk arın kazısı yapılmadan önce arının 18 m önünde U3 izleme bölgesinde (üst taban yolunun 429. metresi) mevcut yer değiştirme demirbağ tahkimatlı durumda başlangıçta 311.3 mm yer değiştirme bulunmaktadır. Bu yer değiştirme daha önce üst taban yolunun açılması esnasında ve uzunayağın oluşturulmasında oluşan yer değiştirmedir. Galeri tavanında var olan bu yer değiştirme değeri, 18 m'lik uzunayak kazısı ile 311.3 mm den 575.8 mm'ye çıkmaktadır. Böylelikle bu noktada (U3-429. metre) uzunayak kazısı ile yer değiştirme değeri 264.5 mm artmıştır. Buna karşın aynı noktada kaya saplamaları ile tahkim edilmiş durumda yer değiştirme artışı 64-67.5 mm aralığında olmuştur. En az yer değiştirme artışı swellex kaya saplamasında olmuştur. Bunu reçineli ve kablolu kaya saplamaları takip etmiştir (Şekil 4.103-4.104). Kaya saplamalarında uzunayak kazısına bağlı yer değiştirme artışının demir bağa nazaran oldukça az olduğu belirlenmiştir.

Her bir tahkimat tipinin pano ve topuk bölgesindeki etkisi Şekil 4.105 ve 4.106'da sunulmuştur.



Şekil 4.105. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki pano bölgesinde oluşan düşey yer değiştirme davranışı (U3/Pano)



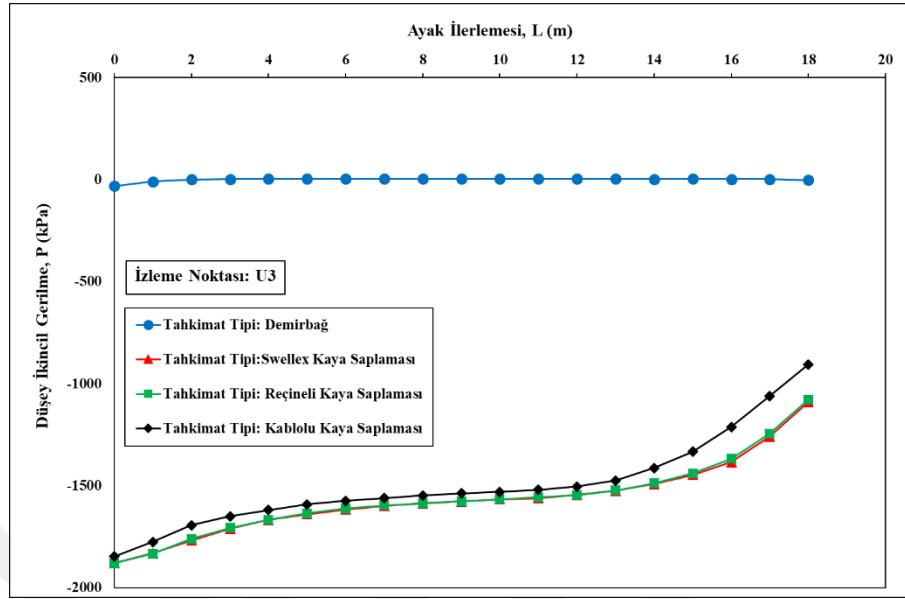
Şekil 4.106. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki topuk bölgesinde oluşan düşey yer değiştirme davranışı (U3/Topuk)

Pano bölgesinde oluşan yer değiştirme davranışının tüm tahkimat tiplerinde aynı olduğu görülmektedir (Şekil 4.105). Demirbağ ile tahkim edilen koşulda pano üzerinde yer değiştirme değeri 163.1 mm olurken, swellex, reçineli ve kablolu kaya saplamalarında ise sırası ile yer değiştirme değerleri 159.96 mm, 158.76 mm ve 160.27 mm olmuştur (Şekil 4.105). Genel olarak sunulan grafikten uzunayak arınının ilk 10 m'sinde yapılan kazıda etkileşim daha kontrollü olurken son 8 m'lik kısmında yapılan kazıda hızla pano bölgesindeki deplasmaların artma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır.

Topuk bölgesinde kaya saplamalı koşul için demirbağlı tahkimata nazaran daha az yer değiştirme olduğu anlaşılmaktadır. Uzunayak arınındaki ilk 8 metrelik kazı sonrasında topuk üzerindeki yer değiştirme değerlerinin hızla arttığı daha sonra genel olarak sabitlendiği görülmektedir (Şekil 4.106). Demir bağ tahkimatlı durumda kazı arınına 2 metre kalan bölgede hızla topuk bölgesindeki deplasmaların artmaya başladığı anlaşılmaktadır. Göçük tarafına geçen topuk malzemesindeki yer değiştirmelerin arttığı görülmektedir.

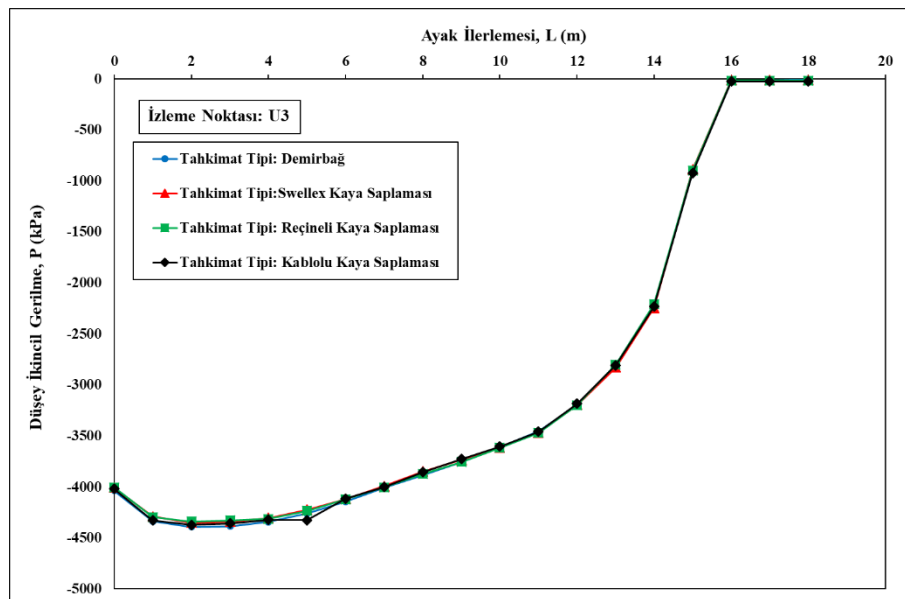
Tüm tahkimat tiplerinin birbirleri ile gerilme değişimleri açısından karşılaştırmak amacıyla önce galeri tavanındaki gerilme davranışı Şekil 4.107'de sunulmuştur. Genel olarak demirbağ tahkimat tipinde 30.4 kPa olan basma yönündeki gerilmeler önce çekme gerilmelerine dönüşmüş daha sonra 1.6 kPa'lık bir basma gerilmesine ulaşmıştır. Kaya saplamalarında genel olarak 1880 kPa olan başlangıç gerilmesi kablolu kaya

saplamasında 904 kPa, swellex ve reçineli kaya saplamalarında 1080 kPa seviyesine azaldığı görülmektedir.

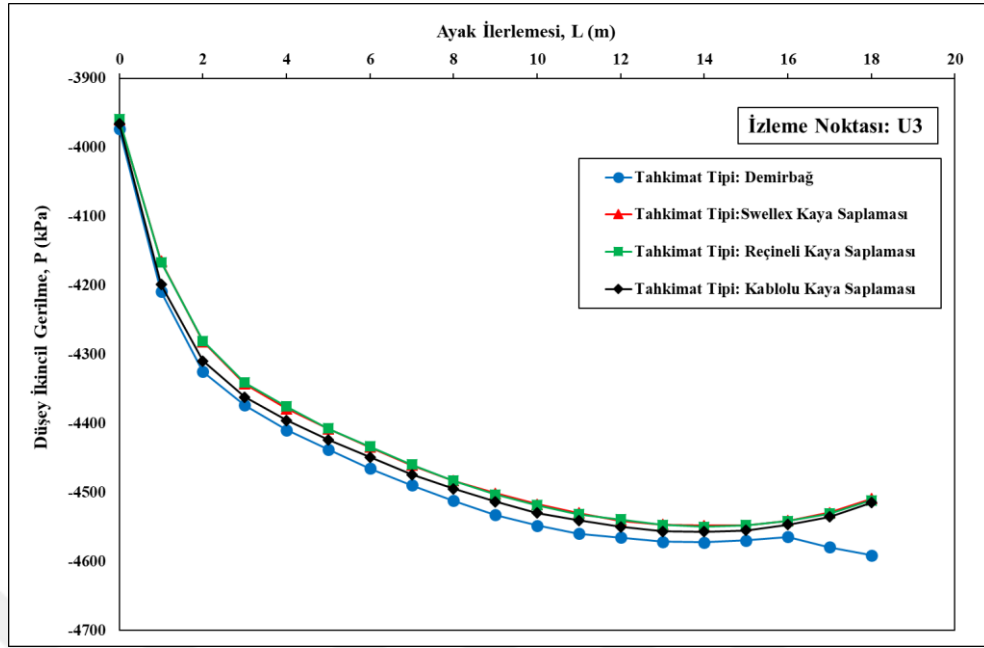


Şekil 4.107. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki galeri tavanında oluşan ikincil gerilme davranışı (U3/Galeri)

Pano bölgesinde oluşan gerilmelerin benzer bir davranışla sifira yaklaştığı anlaşılmaktadır. Ayak arınına 12 m kala gerilmelerin düşmeye başladığı son iki metre kala ise 10-15 kPa seviyelerine düştüğü belirlenmiştir (Şekil 4.108). Topuk bölgesinde oluşan gerilme değerlerinin tüm tahkimat tipleri için birbirlerine çok yakın olduğu ancak göreceli olarak demirbağ tahkimatlarında daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.109).



Şekil 4.108. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki pano tavanında oluşan ikincil gerilme davranışı (U3/Pano)



Şekil 4.109. Tüm tahkimat tiplerinin 429. metrede konumlanan U3 izleme bölgesindeki topuk tavanında oluşan ikincil gerilme davranışı (U3/Topuk)

Bu tez çalışması ile ortaya konulan 3 boyutlu sayısal çözümlere istinaden, hem taban yolunun tünel şeklinde düşünülmesi hem de uzunayak kazısının yapılması durumunda maden işletmesinde mevcut olan demir bağlarda oluşan düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilmelerin, kaya saptmalarına göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Trapez kesitte, kaya saptmalarının kullanılması durumunda Swellex, Reçineli ve Kablo Kaya Saptmalarının daha az düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilme değişimi ile trapez kesitli galeride duraylılığı sağlamada daha üstün oldukları anlaşılmıştır. Bu durum topuk ve pano bölgelerindeki düşey yer değiştirme ve düşey ikincil gerilmeler ile teyit edilmiştir. Sonuç olarak başarılı olan tüm kaya saptmalarının kendi içerisinde bir sıralaması yapılması düşünülürse, en iyi saptlama türünün Swellex, daha sonra sırası ile Reçineli ve Kablo Kaya Saptlama türlerinin geldiği ifade edilebilir. Bu tez çalışmasında herhangi bir ekonomik analiz yapılmamıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu doktora tezinde, yeraltı kömür madenciliği endüstrisinde, dünyanın birçok bölgesinde birincil tahkimat sistemi haline gelen kaya saplamaları tahkimat sisteminin, ülkemiz yeraltı kömür madenciliğinde kullanılabilirliğinin sayısal olarak modellenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Kaya malzeme ve kütle özelliklerini belirlenmesi amacıyla A1, A2 ve A6 uzunayak panolarında deneysel saha ve laboratuvar çalışmalarına gerçekleştirilmiştir. Kömür ve çevre kayaçlarının malzeme ve kütle özelliklerinden oluşan bir veri tabanı hazırlanmıştır. Hazırlanan veri tabanı kullanılarak kaya saplamaları için ön tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ön tasarım çalışmaları iki aşamadan oluşmuştur. Ön tasarım çalışmalarının ilk aşamasında 9 farklı bilinen görgül tasarım yaklaşımları kullanılmıştır. Ön tasarım çalışmalarının ikinci aşamasında görgül yaklaşımların her birinden elde edilen kaya saplama tasarım sonuçları ayrı ayrı iki boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Phase2 yardımıyla yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak genel bir kaya saplama boyutlandırması yapılmaya çalışılmıştır. Bu boyutlandırmada uzunayakta tamburlu kesici-yükleyicinin tambur boyutları ve çalışma düzeni dikkate alınmıştır.

Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosunun trapez kesitte açılan taban yolları için gerçekleştirilen ön tasarım sonuçlarına göre; kaya saplaması boyu (Lb) 3.3 m, saplamalar arası mesafe (Sb) 1 m, saplama setleri arası mesafe (Sr) 1 m olarak tasarlanmıştır. Ayrıca ön tasarım çalışmalarında her kesitte 7 adet kaya saplamasının kullanılması ve bu saplamalardan 2 tanesinin trapez galeri kesiti tavanının iki köşesinde yatay eksenle 60° açı yapacak şekilde, kalan 5 tanesinin de galeri tavanında yatay eksenle 90°'lik açı yapacak şekilde yerleştirilmesi kararlaştırılmıştır.

Ön tasarım sonuçları ile belirlenen kaya saplaması boyutları (Lb=3.3 m, Sb=1 m ve Sr=1 m) dikkate alınarak swellex, reçineli ve kablolu kaya saplama türleri için 2 boyutlu sayısal analizler (Phase2) yapılmıştır. Sonuç olarak kaya saplama üretici firmalarının katalog bilgileri dikkate alınarak yapılan analizlerden kaya saplamalarında yenilmelerin olmadığı belirlenmiştir.

Ön tasarım sonuçları ile belirlenen kaya saplama boyutları ve düzeni ($L_b=3.3$ m, $S_b=1$ m ve $S_r=1$ m) dikkate alınarak nihai tasarım için üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadaki çalışmalarda, öncelikle A6 uzunayak panosu, bu panoya komşu olan üretimi yapılmış sıkışmış göçük halinde A5 panosu, henüz üretimi yapılmamış A7 panosu ve topuklar, FLAC 3D programı için modellenmiştir. Bu modelde panoya ait taban yolları 3 farklı tipte kaya saplaması (Swellex, Reçineli ve Kablolü Kaya Saplamaları) ve demir bağ ile tahkimatlandırılmıştır. Dört farklı tahkimat türü için hazırlanan dört model ayrı ayrı FLAC 3D ile analiz edilmiştir. Dört farklı tahkimat türü için FLAC 3D ile gerçekleştirilen model analizlerinin değerlendirilmesinde önce taban yolu kazısı tünel gibi düşünülmüş ve bu durum için galeri kazına bağlı olarak farklı tahkimat türlerinin performansı analizleri yapılmıştır. Daha sonra uzunayak arın kazısının yapılması durumunda taban yollarındaki farklı tahkimatların performansı değerlendirilmiştir.

Tabanyolu kazısının tünel gibi düşünülmesi durumunda ulaşılan üç boyutlu sayısal analiz sonuçları;

Tünel kazısına bağlı taban yollarında gerçekleşen düşey yer değiştirme analizlerinde, demir bağ tahkimat tipinin kaya saplamaları tahkimat sistemine göre daha çok düşey yer değiştirmelere izin verdiği belirlenmiştir. Kaya saplamaları ise genel olarak birbirlerine yakın, ancak demir bağdan oldukça düşük yer değiştirmelere izin verdiği anlaşılmaktadır. Modelde yer alan U9 izleme bölgesi (taban yolunda 300. metre) için yapılan analizlerde galeri kazısına bağlı demir bağ tahkimatında yaklaşık olarak nihai 271.6 mm düşey yer değiştirme görülmüştür. Kaya saplamaları kendi içerisinde değerlendirildiğinde, Swellex kaya saplamalarında yer değiştirme değeri 37.9 mm olurken; reçineli tiplerde 38.2 mm ve kablolü tiplerde 42.2 mm düşey yer değiştirme görülmüştür. Yer değiştirme etkisinin tabanyolu arınından henüz kazısı yapılmayan yönde yapılacak 100 m'lik kazı boyunca sürdüğü daha sonra yapılan kazıdan yer değiştirme değerlerinin etkilenmediği belirlenmiştir. Bu davranış şekli tüm tahkimat tipleri için geçerli olurken kaya saplamalarında nihai yer değiştirme değerleri oldukça düşük 37.9-42.2 mm seviyesinde sabitlendiği tespit edilmiştir.

Tünel kazısına bağlı taban yollarında gerçekleşen düşey ikincil gerilme analizlerinde demir bağ tahkimat tipinin daha çok gerilme değişimlerine maruz kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Pasif tahkimat tipinde olan demir bağın, tavanda mevcut olan gerilmeyi tutamadığı ve bu gerilme değerlerinin sifıra çok yaklaştığı buna karşın yer değiştirmelerin büyük değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Kaya saplamalarının ise

başlangıçta yaklaşık 3370 kPa seviyesinde olan gerilme değerlerini, yaklaşık olarak 1850 kPa seviyesinde tutabildiği anlaşılmıştır. Kaya saplamaları tarafından kontrol altında tutulmaya çalışılan gerilme değerlerinin büyük olması, galeri tavanında oluşan yer değiştirmelerin düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır.

Tünel kazısına bağlı topuk ve pano bölgelerinde gerçekleşen düşey yer değiştirme analizlerinde, kaya saplaması tahkimatlı koşulda demir bağlı tahkimata nazaran daha az yer değiştirme olduğu anlaşılmaktadır. Düşey gerilme analizlerinde ise pano ve topuk bölgelerinde oluşan gerilme değerlerinin tüm tahkimat tipleri için birbirine çok yakın olduğu ve bu gerilme değerlerinin 3795-3800 kPa arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Taban yolunun sadece tünel gibi düşünülmesi durumu için kaya saplamalarının demir bağlara nazaran daha iyi bir tahkimat sağladığı belirlenmiştir. Birbirlerine oldukça yakın sonuçlar veren kaya saplamalarının birbirleri ile karşılaştırılmasında ise iyiden kötüye doğru kaya saplamaları swellex, reçineli ve kablolu kaya saplaması olarak sıralanabilir. Teknik açıdan birbirlerine yakın davranış sergileyen bu kaya saplamalarından en ekonomik olan türün seçilmesi yerinde olacaktır. Bu çalışmada ekonomik değerlendirmeler yapılmamıştır.

Uzunayak kazısının yapılması durumunda ulaşılan sayısal analiz sonuçları;

Uzunayak kazısına bağlı taban yollarında gerçekleşen düşey yer değiştirme analizlerinde, demir bağ tahkimat tipinin daha çok yer değiştirmelere izin verdiği görülmüştür. Kaya saplamalarının genel olarak birbirine yakın, ancak demir bağdan oldukça düşük yer değiştirmelere izin verdiği tespit edilmiştir. Modelde yer alan U3 izleme bölgesi (taban yolunda 429. metre) için yapılan analizlerde, demir bağlarda görülen yer değiştirme miktarı 575.8 mm olmuştur. Kaya saplamaları kendi içerisinde değerlendirilirse, Swellex kaya saplamalarında yer değiştirme değeri 116.9 mm olurken; reçineli tiplerde 117.2 mm ve kablolu tiplerde 124.24 mm olduğu tespit edilmiştir. Uzunayak kazı arınının 8 metre ilerisinde yer değiştirme etkisinin hızla arttığı belirlenmiştir. Bu davranış şekli tüm tahkimat tipleri için geçerli olurken kaya saplamalarında uzunayak kazı arınında yer değiştirme değerlerinin 116.9-124.24 mm seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Aynı durum için demirbağda oluşan yer değiştirme değeri ise 575.8 mm seviyesinde olmuştur.

Uzunayak kazısına bağlı taban yollarında gerçekleştirilen düşey ikincil gerilme analizlerinde, modelde yer alan U3 izleme bölgesi için demir bağ tahkimat tipinde 30.4 kPa olan basma yönündeki gerilmeler, önce çekme gerilmelerine dönüşmüş ve daha sonra

1.6 kPa'lık bir basma gerilmesine ulaşmıştır. Kaya saplamalarının tümünde yaklaşık 1880 kPa olan başlangıç gerilmesi, kablolu kaya saplamasında 904 kPa, Swellex ve Reçineli kaya saplamalarında 1080 kPa seviyesine azaldığı tespit edilmiştir. Pasif tahkimat tipinde olan demir bağın tavanda mevcut olan gerilmeyi tutamadığı ve bu gerilme değerlerinin sifira çok yaklaştığı belirlenmiştir. Kaya saplamalarında gerilme açısından etkileşimin arına 8 metre kala hızla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Uzunayak kazısına bağlı durum için kaya saplamalarının demir bağlara nazaran daha iyi bir tahkimat sağladığı belirlenmiştir. Birbirlerine oldukça yakın sonuçlar veren kaya saplamalarının birbirleri ile karşılaştırılmasında ise iyiden kötüye doğru kaya saplamaları swellex, reçineli ve kablolu kaya saplaması olarak sıralanabilir. Uzunayak kazısına bağlı olarak göçük tarafına geçen tabanyolunda da ayak arkası gibi düzenli tavan kömürünün düşmesi beklenecektir. Mevcut uygulamada demir bağlar söküldüğü için ayak arkası göçük bir problem yaratmazken kaya saplamaları sökülemeyeceği için arka göçükte sergileyeceği durum uygulamalarda dikkate alınmasını gündeme getirecektir. Teknik açıdan birbirlerine yakın davranış sergileyen bu kaya saplamalarından en ekonomik olan türün seçilmesi yerinde olacaktır. Ancak bu tez çalışmasında ekonomik değerlendirmeler yapılmamıştır.

Tüm bu analizler ışığında, Ömerler yeraltı ocağı A6 uzunayak panosu taban yollarının kaya saplamaları ile tahkimatının, demir bağlar ile tahkimatına göre performans açısından daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Model çalışmalarında kullanılan kaya saplamalarının kendi içerisinde değerlendirilmesinde, Swellex tipi kaya saplamasının A6 uzunayak panosu taban yollarının tahkimatında Reçineli ve Kablolu kaya saplamalarına göre nispeten daha başarılı bir tahkimat sistemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.2. Öneriler

Bu doktora tez çalışması ile ortaya konan kaya saplama tasarım sonuçlarının yerinde bir pilot uygulama galerisinde uygulanması, tahkimat tasarımının performansını belirlemek amacıyla yerinde konverjans, taban kabarması, tabaka ayrışma ve hidrolik yük ölçüm istasyonları ile alınacak ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, saha sonuçları ile FLAC 3D sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması, geriye dönük analizler ile FLAC 3D modelindeki eksiklikleri giderilmesi ve doğruluğu teyit edilen sayısal modelin işletmedeki diğer hazırlanacak panolar için kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Agioutantis, Z., Stiakakis, C., Stiakakis, N. ve Karmis, M., 2001, An interactive roof bolting selection and performance system. 4th International Symposium for Roofbolting in Mining. Aachen, Germany.
- Albayrak, S., 1989, Zonguldak Kömür Havzasında Sürtünmeli Kaya Saplama Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*, 100.
- Altounyan, P., Bigby, D., Hurt, K. ve Peake, H., 1997, Instrumentation and procedures for routine monitoring of reinforced mine roadways to prevent falls of ground, *Proceedings of the 27th International Conference of Safety in Mines Research Institutes*, 759-766.
- Altounyan, P. ve Taljaard, D., 2001, Developments in Controlling the Roof in South African Coal Mines-a Smarter Approach, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 101 (1), 33-40.
- Anonim, 2016, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Kaya Mekaniği Laboratuvar Föyü, http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_4c60b.pdf [Ziyaret Tarihi: 10 Ağustos 2016].
- Anonim, 2017, Garp Linyitleri İşletmesi Müessesesi Müdürlüğü'nün kuruluşu, <http://www.gli.gov.tr/hakkimizda/kurulus/5> [Ziyaret Tarihi: 14 Aralık 2017].
- Anonim, 2018, Tarım ve Orman Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Resmi verileri, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik>. [Ziyaret Tarihi: 3 Ocak 2018].
- Ataman, T., 1978, Yeraltında Tahkimat Esasları, *Ankara*, ODTÜ Yayınları, p.
- Atlas Copco., 2012, Swellex rock bolts product catalogue. Sweden.
- Aydan, Ö., 2000, A new stress inference method for the stress state of Earth's crust and its application, *Yerbilimleri*, 22, 223-236.
- Barton, N., Lien, R. ve Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock mechanics*, 6 (4), 189-236.
- Bieniawski, Z. T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, *Civil Engineer in South Africa*, 15 (12), 335-344.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering, John Wiley & Sons, p. 251.
- Bin, L., Taiyue, Q., Wang, Z. ve Longwei, Y., 2012, Back analysis of grouted rock bolt pullout strength parameters from field tests, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 345-349.
- Biron, C. ve Arioglu, E., 1985, Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı, *Istanbul Technical University. Istanbul*, Birsen Kitabevi, p.
- Bjurholt, J., 2007, Pull and Shear Tests of Rockbolts, Yüksek Lisans Tez., *Lulea University of Technology*, 72.
- Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F. ve Yeung, M. R., 2009, Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (11), 1547-1561.
- Cai, M., 2008, Influence of stress path on tunnel excavation response—numerical tool selection and modeling strategy, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (6), 618-628.

- Canbulat, İ., 2008, Evaluation and Design Optimum Support Systems in South African Collieries Using the Probabilistic Design Approach, Doktora Tezi, *University of Pretoria*, 368.
- Cao, C., Jan, N., Ren, T. ve Naj, A., 2013, A study of rock bolting failure modes, *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (1), 79-88.
- Cardy, B. ve Brown, E., 1993, *Rock Mechanics for Underground Mining*, London: George Allen and Unwin.
- Chang, Q., Zhou, H., Xie, Z. ve Shen, S., 2013, Anchoring mechanism and application of hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control, *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (3), 323-328.
- Chatziangelou, M., Christaras, B., Dimopoulos, G., Soulios, G. ve Kiliyas, A., 2002, Support of unstable wedges along the Platamon railway tunnel under construction, in northern Greece, *Engineering geology*, 65 (4), 233-243.
- Chen, S. H., Fu, C. H. ve Isam, S., 2009, Finite element analysis of jointed rock masses reinforced by fully-grouted bolts and shotcrete lining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (1), 19-30.
- Chen, Y., 2014, Experimental study and stress analysis of rock bolt anchorage performance, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (5), 428-437.
- Coggan, J., Gao, F., Stead, D. ve Elmo, D., 2012, Numerical modelling of the effects of weak immediate roof lithology on coal mine roadway stability, *International Journal of Coal Geology*, 90, 100-109.
- Çelik, R., 2005, GLİ Ömerler mekanize ocakta yürüyen tahkimatın taşınmasının geliştirilmesi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi*, 144.
- Deb, D. ve Das, K. C., 2011, Modelling of fully grouted rock bolt based on enriched finite element method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48 (2), 283-293.
- Deere, D. U., 1968, Geological Considerations, In: *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Eds: Stagg, K. G. ve Zienkiewicz, O. C., Wiley, Newyork, p.
- Destanoğlu, N., Taşkın, F., Taştepe, M. ve Öğretmen, S., 2000, Ömerler Mekanizasyon Uygulaması, *TKİ, Ankara*.
- Divi, S., Chandra, D. ve Daemen, J., 2011, Corrosion susceptibility of potential rock bolts in aerated multi-ionic simulated concentrated water, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26 (1), 124-129.
- Dunham, R. K., 1976, Anchorage tests on strain-gauged resin bonded bolts, *Tunnels & Tunnelling International*, 8 (6).
- Dywidag Systems., 2015, *Mining and Tunneling Products Catalogue*.
- Fahimifar, A. ve Soroush, H., 2005, A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20 (4), 333-343.
- Fairhurst, C. ve Singh, B., 1974, Roof bolting in horizontally laminated rock, *Engineering and Mining Journal*, 175 (90), 80-88.
- Fişne, A., 2017, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Garp Linyitleri İşletmesi Müdürlüğü Ömerler-A Yeraltı Kömür Ocağı Havalandırma Sisteminin Değerlendirilmesi *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ)*.
- Franklin, J. A. ve Dusseault, M. B., 1989, *Rock Engineering*, McGraw-Hill Inc., p.
- Gale, W. J., 1991, Strata Control Utilising Rock Reinforcement Techniques and Stress Control Methods, in *Australian Coal Mines*, *Mining Engineer*, 150 (352), 247-253.

- Gale, W. J. ve Fabjanczyk, M. W., 1993, Design Approach to Assess Coal Mine Roadway Stability and Support Requirements, *Eighth Australian Tunnelling Conference: Finding Common Ground*, 153.
- Geniş, M. ve Aydan, Ö., 2007, Static and dynamic stability of a large underground opening, *Proceedings of the second symposium on Underground excavations for Transportation (in Turkish), TMMOB, Istanbul*, 317-326.
- Geniş, M. ve Acun, D., 2015, Kuyu duraylılığının analitik ve sayısal yöntemler ile karşılaştırmalı bir incelemesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (2), 201-216.
- Geniş, M., 2016, Zonguldak-Üzülmez Tünellerinin Çevre Kaya Özelliklerinin Belirlenmesi ve Duraylılığının Değerlendirilmesi, *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 6 (1), 144-151.
- Gerçek, H., 1982, Stability of Intersections in Room-and-pillar Coal Mines, PhD.
- Gerdeen, J. C., Snyder, V. W., Viegelahn, G. L. ve Parker, J., 1979, Design criteria for roof bolting plans using fully resin-grouted nontensioned bolts to reinforce bedded mine roof. Volume III: Experimental model studies; Volume IV: Theoretical analysis, Houghton, MI: Michigan Technological University. US Bureau of Mines contract.
- Gray, P. ve Finlow-Bates, P., 1998, The Pre-Tensioned Placebo, *Australia's Longwalls Magazine Mar*, 78-81.
- Grimstad, E. ve Barton, N., 1995, Rock mass classification and the use of NMT in India, *Proc. Conf. Design and Construction of Underground Structures*, 23-25.
- Hagan, P. C., 2003, The Effect of Resin Annulus on Anchorage Performance of Fully Encapsulated Rockbolts, *10th ISRM Congress*.
- Haramy, K. ve DeMarco, M., 1985, Use of the Schmidt hammer for rock and coal testing, *The 26th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1980, *Underground Excavations in Rock*, CRC Press, p.
- Hongwei, S., Yanyan, D. ve Jing, Y., 2010, Numerical simulation on bolted rock joint shearing performance, *Mining Science and Technology (China)*, 20 (3), 460-465.
- Itasca, 2005, Fast Lagrangian analysis of continua, *Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minn.*
- Ivanović, A., Starkey, A., Neilson, R. D. ve Rodger, A. A., 2003, The influence of load on the frequency response of rock bolt anchorage, *Advances in Engineering Software*, 34 (11-12), 697-705.
- Ivanović, A. ve Neilson, R. D., 2008, Influence of geometry and material properties on the axial vibration of a rock bolt, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45 (6), 941-951.
- Jager, A. J., 1992, Two New Support Units For the Control of Rockburst Damage, *International Symposium on Rock support Sudbury, Canada*, 621-631.
- Jenmar., 2015, Ground control products-Product Catalogue.
- Jing, L. ve Hudson, J. A., 2002, Numerical methods in rock mechanics, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (4), 409-427.
- Jing, L., 2003, A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (3), 283-353.
- Jing, L. ve Stephansson, O., 2007, Discrete fracture network (DFN) method, In: *Developments in geotechnical engineering*, Eds: Elsevier, p. 365-398.
- Kahraman, S., 2001a, A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (5), 729-733.

- Kahraman, S., 2001b, Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (7), 981-994.
- Kaiser, P. K., Maloney, S. ve Yazıcı, S., 1992, New Perspective on Cable Bolt Design, *CIM (Canadian Mining and Metallurgical) Bulletin*, 85 (962), 102-109.
- Kalyoncu, G., 2004, Çimento ve Reçine Dolgulu Kaya Saplamları Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara.
- Kang, H., Wu, Y., Gao, F., Jiang, P., Cheng, P., Meng, X. ve Li, Z., 2016, Mechanical performances and stress states of rock bolts under varying loading conditions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 138-146.
- Kent, F., Coggan, J. ve Altounyan, P., 1998, Investigation into factors affecting roadway deformation in the Selby coalfield, *Geotechnical & Geological Engineering*, 16 (4), 273-289.
- Kent, L., Cartwright, P. B. ve Bigby, D. N., 1999, Tunnel deformation monitoring" action levels" in coal mines for support/reinforcement design, *Proceedings of the 18th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV: West Virginia University, 98-107.
- Khalymendyk, I., Brui, A. ve Baryshnikov, A., 2014, Usage of cable bolts for gateroad maintenance in soft rocks, *Journal of Sustainable Mining*, 13 (3), 1-6.
- Kilic, A. ve Anil, M., 1999, The effects of grout properties to the bolt capacity; Dolgu özelliklerinin kaya bulonu tasima kapasitesine etkisi.
- Kılıç, A., 1997, Tarsus Ayrımı-Adana-Gaziantep (TAG) Otoyolu Bahçe Yöresindeki Tünellerin Kaya Sınıflandırmaları ve Kaya Bulonlarıyla Desteklenmesi, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi*, 226.
- Kılıç, A. ve Çelik, A. G., 2002, Çimento Dolgulu Kaya Saplamlarında Dolgu ve Saplama Özelliklerinin Saplama Dayanımına Etkisi *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 41 (3), 18-26.
- Konak, G., 1995, Measurement and Evaluation of Loads an Convergences in Underground Coal Mines with Regard To Roof Control, PhD, *Dokuz Eylül University*.
- Kömürlü, E., 2016, Çeşitli Mühendislik Polimerlerinin Kaya Saplama Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi*, Trabzon, Türkiye, 86.
- Köse, H. ve Çebi, Y., 1988, Investigation the stresses forming during production of thick coal seam, *6th coal congress of Turkey*, 371-383.
- Kun, Q., Xiao-dong, X. ve Yu-long, C., 2012, The design and application of rock bolting in coal mine, *Energy Procedia*, 14, 280-284.
- Labiouse, V., 1992, The rock-support interaction analysis applied to ungrouted tensioned, *Rock Support in Mining and Underground Construction*, 75.
- Li, C. C., 2010, A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (3), 396-404.
- Li, C. C., Stjern, G. ve Myrvang, A., 2014, A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts, *Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering*, 6 (4), 315-327.
- Li, C. C., 2017a, Rockbolting: Principles and Applications, Elsevier-Butterworth-Heinemann, p.203-207.
- Li, C. C., 2017b, Principles of rockbolting design, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9 (3), 396-414.
- Luo, J., 1999, A New Rock Bolt Design Criterion and Knowledge-Based Expert System for Stratified Roof, *Virginia Tech*.

- Maghous, S., Bernaud, D. ve Couto, E., 2012, Three-dimensional numerical simulation of rock deformation in bolt-supported tunnels: a homogenization approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31, 68-79.
- Mansour., 2015, Ground Support Product Catalogue.
- Mark, C., 2000, Design Of Roof Bolt Systems; Proceedings: New Technology For Coal Mine Roof Support, *Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centres for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS, (NIOSH) Publication No. 2000-151, IC 9453*.
- Mark, C., 2002, The Introduction of Roof-Bolting to US Underground Coal Mines (1948–1960): A Cautionary Tale, *21st International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV: West Virginia University, USA., 150-160.
- McDonnell, J. P., Tadolini, S. C. ve DiGrado, P. E., 1995, Field evaluation of cable bolts for coal mine roof support.
- Merritt, A. H., 1972, Geologic Prediction For Underground Excavations, *First Rapid Excavation and Tunneling Conference*, Chicago.
- Minova Orica., 2015, Minova-MAI Self-Drilling Bolts Product Catalogue.
- Moosavi, M., Jafari, A. ve Khosravi, A., 2005, Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure, *Cement and Concrete Composites*, 27 (1), 103-109.
- Moosavi, M. ve Grayeli, R., 2006, A model for cable bolt-rock mass interaction: Integration with discontinuous deformation analysis (DDA) algorithm, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4 (43), 661-670.
- Obert, L. ve Duvall, W. I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, *J. Wiley*.
- Ortlepp, W. D., 1992, The Design of Support For the Containment of Rockburst Damage in Tunnels-an Engineering Approach, *Rock Support in Mining Underground Construction*, 593-609.
- Özkan, İ., 1995, Modified rock mass rating (M-RMR) system and roof behavior model, *PhD Thesis, 370p., METU, Ankara, Turkey*.
- Özkan, İ., 2010, Kaya Saplama Tahkimat Ders Notları, 72.
- Özkan, İ., 2018, TÜBİTAK 116M698 no'lu 1001 projesi 2. ara raporu, *TÜBİTAK*.
- Pan, R., Wang, Q., Jiang, B., Li, S. C., Sun, H. B., Qin, Q., Yu, H. C. ve Lu, W., 2017, Failure of bolt support and experimental study on the parameters of bolt-grouting for supporting the roadways in deep coal seam, *Engineering Failure Analysis*, 80, 218-233.
- Pan, X. D. ve Reed, M. B., 1991, A coupled distinct element—finite element method for large deformation analysis of rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 93-99.
- Panek, L. A., 1964, Design For Bolting Stratified Roof, *Trans SME*, 229, 113-119.
- Panek, L. A. ve McCormick, J. A., 1973, Roof/rock bolting, *SME Mining Engineering Handbook*, 1, 13-125.
- Pappas, D. M. ve Mark, C., 1993, Behavior of simulated longwall gob material.
- Peng, S. S. ve Tang, D. H. Y., 1984, Roof Bolting in Underground Mining: a State-of-the-Art Review, *International Journal of Mining Engineering*, 2 (1), 1-42.
- Pile, J., Bessinger, S., Mark, C. ve Tadolini, S. C., 2003, Short-Encapsulation Pull Tests for Roof Bolt Evaluation at an Operating Coal Mine, *22nd International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV: West Virginia University, 226-232.

- Player, J. R., Villaescusa, E. ve Thompson, A. G., 2009, Dynamic Testing of Friction Rock Stabilisers, *Proceedings of the 3rd Canada-US Rock Mechanics Symposium and 20th Canadian Rock Mechanics Symposium*.
- Reed, M. B., Grasso, P., Rizzi, D. ve Rabajoli, G., 1993, Improvement of Rock Properties by Bolting in the Plastic Zone Around a Tunnel: a Numerical Study, *International Journal of Rock Mechanics Mining Geomechanics Abstracts*, 30 (5).
- Roberts, M. K. C., Lamos, R. A. ve Murphy, S. K., 2004, Application of short rockbolts in ultradeep tabular stoping.
- RocScience, R., 2002, Rocscience inc, *Toronto, Canada*.
- Salamon, M., 1990, Mechanism of caving in longwall coal mining, *Rock mechanics contributions and challenges: Proceedings of the 31st US symposium*, 161-168.
- Sandvik., 2015, Sandvik Rock Reinforcement Product Catalogue.
- Sarathchandran, A., 2014, Three dimensional numerical modelling of coal mine roadways under high horizontal stress fields, *University of Exeter, Exeter*.
- Schmidt, E., 1951, A non-destructive concrete tester, *Concrete*, 59, 34-35.
- Scott, J. J., 1977, Testing of Friction Rock Stabilizers, *AIME-SME Annual Meeting, Atlanta*.
- Scott, J. J., 1983, Friction Rock Stabilizer Impact upon Anchor Design and Ground Control Practices. International Symposium on Rock Bolting : Theory Application in Underground Construction: 407-418.
- Serbousek, M. O. ve Signer, S. P., 1987, Linear Load-Transfer Mechanics of Fully Grouted Roof Bolts, *U.S. Bureau of Mines. R19135*.
- Sheorey, P., 1984, Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.:(United States)*, 21 (1).
- Signer, S. P., 1990, Field verification of load-transfer mechanics of fully grouted roof bolts. Report of Investigations/1990, *Bureau of Mines, Spokane, WA (USA). Spokane Research Center*.
- Signer, S. P. ve Jones, S. D., 1990, A case study of grouted roof bolt loading in a two-entry gate road, *Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV: West Virginia University*, 35-41.
- Signer, S. P., Mark, C., Franklin, G. ve Hendon, G., 1993, Comparisons of active versus passive bolts in a bedded mine roof, *Proceedings of the 12th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV: West Virginia University*, 16-23.
- Signer, S. P., Cox, D. ve Johnston, J., 1997, A method for the selection of rock support based on bolt loading measurements, *9th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV: West Virginia University*, 35-41.
- Signer, S. P. ve Lewis, J. L., 1998, A case study of bolt performance in a two-entry gateroad, *17th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV: West Virginia University*, 249-256.
- Skrzypkowski, K., 2018, Laboratory Testing of a Long Expansion Rock Bolt Support for Energy-Absorbing Applications, *E3S Web of Conferences*, 00004.
- Song, G., Li, W., Wang, B. ve Ho, S., 2017, A Review of Rock Bolt Monitoring Using Smart Sensors, 17 (4), 776.
- Spann, H. P. ve Naiper, J. A. L., 1983, The Influence of Different Bolt Patterns and Anchor Types on the Deflection of a Laminated Beam, *Chamber of Mines Research Organisation, South Africa*.
- Stillborg, B., 1986, Professional Users Handbook for Rock Bolting, p. Vol. 15.
- Stjern, G. ve Myrvang, A., 1998, The influence of blasting on grouted rockbolts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13 (1), 65-70.

- Şerifoğlu, E., 1985, Etibank Çayeli (Rize) Bakır İşletmesinde Split-Set Kaya Saplamlarının Kullanımının İncelenmesi, Bitirme Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*, Ankara.
- Tahmasebinia, F., Zhang, C., Canbulat, I., Vardar, O. ve Saydam, S., 2018, Numerical and analytical simulation of the structural behaviour of fully grouted cable bolts under impulsive loading, *International Journal of Mining Science and Technology*, 28 (5), 807-811.
- Tao, W., Chen, C., Jun, H. ve Ting, R., 2017, Effect of bolt rib spacing on load transfer mechanism, *International Journal of Mining Science and Technology*, 27 (3), 431-434.
- Teymen, A., 2012, Tam Dolgulu Kaya Saplamlarında Gerilme Dağılımlarının Belirlenmesi Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi*, Adana/Türkiye, 342.
- Tully, D. M., 1987, The application of scale model studies in the design of rockbolting systems for mine roadways, *The 28th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C. ve Binal, A., 2001, Kaya Mekanigi Laboratuvarı Deneyleri, *JMO*, Ankara.
- Ulusay, R. ve Sonmez, H., 2002, Engineering properties of rock masses, *The Chamber of Geology Engineering of Turkey*, Ankara, Turkey.
- Ulusay, R. ve Sönmez, H., 2007, Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri.
- Uysal, Ö., 2001, Patlatma Esaslı Halat Tipi (Kablo Tipi) Kaya Saplamlarının Tasarımı Üretimi ve Uygulamaları, Doktora Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi*, Sivas.
- Ünal, E., 1977, Strata Control by Rock Bolting, *The Pennsylvania State University*.
- Ünal, E., 1983, Development of Design Guidelines and Roof-Control Standards for Coal-Mine Roofs, PhD Thesis, *Penn State University*.
- Ünal, E. ve Ergür, K., 1990, Kaya Saplamları Uygulamaları ve Tasarımı Çalışma Grubu Toplantısı, *TKİ Orta Anadolu Linyitleri Müessesesi, Çayırhan*, Ankara.
- Ünal, E., Özkan, İ. ve Çakmakçı, G., 2001, Modeling the behavior of longwall coal mine gate roadways subjected to dynamic loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (2), 181-197.
- Van, C. L., 2008, Numerical analysis of the interaction between rockbolts and rock mass for coal mine drifts in Vietnam.
- Van der Merwe, J. N., 1998, Practical coal mining strata control: a guide for managers and supervisors at all levels, Itasca Africa, p.
- Van der Merwe, J. N., Madden, B. J. ve Buddery, P., 2002, Rock engineering for underground coal mining: A practical guide for supervisors at all levels, mine planners and students, South African Institute of Mining and Metallurgy, p.
- Villaescusa, E., Thompson, A. G. ve Player, J. R., 2015, Dynamic Testing of Ground Support Systems.
- Wagner, H., 1985, Design of roof bolting patterns, *Chamber of Mines workshop on roof bolting in collieries. Republic of South Africa. Johannesburg*.
- Whitaker, A., 1998, Critical Assessment of Past Research into Rock Bolt Anchorage Mechanisms, *Unpublished BE (Mining Engineering) thesis, University of New South Wales, Sydney*.
- Windsor, C. R., 1992, Invited Lecture: Cable Bolting For Underground and Surface Excavations, In: *Rock Support in Mining Underground Construction*, Eds: Kaiser, P. ve McCreath, D., *Balkema, Rotterdam*, p. 349-376.
- Wright, F., 1973, Roof control through beam action and arching, *SMS mining engineering handbook, society of mining engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, INC Part City, New York*, 1380-1396.

- Wu, R., Xu, J., Li, C., Zhou, B., Ma, Q. ve Wang, Z., 2012, Stress wave propagation in supporting bolts: A test for bolt support quality, *International Journal of Mining Science and Technology*, 22 (4), 567-571.
- Wu, X., Jiang, Y., Guan, Z. ve Wang, G., 2018, Estimating the support effect of energy-absorbing rock bolts based on the mechanical work transfer ability, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 168-178.
- Wu, Y., Gao, F., Chen, J. ve He, J., 2019, Experimental Study on the Performance of Rock Bolts in Coal Burst-Prone Mines, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-12.
- Xie, H., Chen, Z. ve Wang, J., 1999, Three-dimensional numerical analysis of deformation and failure during top coal caving, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (5), 651-658.
- Yaralı, O., 1991, Kaya Saplamaları Uygulamaları, Tasarımı ve Kullanımlarına İlişkin Yönergeler, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*.
- Yassien, A. M., 2003, 2-D numerical simulation and design of fully grouted bolts for underground coal mines, PhD, *West Virginia University*, Morgantown, 180.
- Yaşitli, N. E., 2002, Tavan Kömürü Göçertmeli Uzunayak Yönteminin Sayısal Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*.
- Yavuz, H. ve Fowell, R., 2001, Softening effect of coal on the design of yield pillars, *Billaux et al, proc. Of FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, 313-320.
- Yücel, A., 2007, Silis Dumanı ve Akışkanlaştırıcı İlavesinin Tam Dolgulu Kaya Saplamalarının Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi*, 103.
- Zou, D. H., Cui, Y., Madenga, V. ve Zhang, C., 2007, Effects of frequency and grouted length on the behavior of guided ultrasonic waves in rock bolts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (6), 813-819.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Mesutoğlu
Uyruğu : Türkiye
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya 02.09.1988
Telefon : 0 (505) 743 58 18
Faks :
E-Posta : mmesutoglu@ktun.edu.tr

EĞİTİM

| Derece | Adı | İlçe | İl | Bitirme Yılı |
|---------------|------------------|----------|---------|--------------|
| Lise | : Malatya Lisesi | Merkez | Malatya | 2004 |
| Üniversite | : Selçuk Üniv. | Selçuklu | Konya | 2010 |
| Yüksek Lisans | : Selçuk Üniv. | Selçuklu | Konya | 2013 |
| Doktora | : | | | |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|-------|---------------------------|---------------------|
| 2011- | Konya Teknik Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

UZMANLIK ALANI

Maden İşletme, Kaya Mekaniği

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Ozsen H, Ozkan I, Mesutoglu M. 2018 “An approach on modelling of in-situ deformations for unstable coal mine slopes”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment DOI: 10.1007/s10064-018-1344-0 (Yüksek Lisans)

Mesutoglu M, Ozkan I. 2018. “ A mathematical approach for prediction of inclinometer measurements in open-pit coal mine slopes”, Conference: EUROCK 2018 - the ISRM European Rock Mechanics Symposium At: St. Petersburg-Russia (Yüksek Lisans)

Ustun A, Ozkan I, Mesutoglu M at all. 2014 “Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR”, Environmental Earth Sciences, DOI: 10.1007/s12665-014-3890-5 (Yüksek Lisans)

Mesutoglu M, Ozkan, I. 2019 “Büyük Ölçekli Kömür Arınında Gerçekleştirilen Schmidt Sertlik İndeksi Ve Nokta Yükleme Dayanımı Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Doktora-Yayına Kabul Edildi)