

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEŞİTLİ MÜHENDİSLİK POLİMERLERİNİN KAYA SAPLAMA MALZEMESİ  
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Maden Yük. Müh. Eren KÖMÜRLÜ**

**TEMMUZ - 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEŞİTLİ MÜHENDİSLİK POLİMERLERİNİN KAYA SAPLAMA MALZEMESİ  
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Maden Yük. Müh. Eren KÖMÜRLÜ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 / 05 / 2016**

**Tezin Savunma Tarihi : 18 / 07 / 2016**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL**

**Trabzon 2016**

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında

Eren KÖMÜRLÜ tarafından hazırlanan

ÇEŞİTLİ MÜHENDİSLİK POLİMERLERİNİN KAYA SAPLAMA MALZEMESİ  
OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31/ 05 /2016 gün ve 1665 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Fikri BULUT

.....  
.....

Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

.....  
.....

Üye : Prof. Dr. C. Okay AKSOY

.....  
.....

Üye : Doç. Dr. Kerim AYDINER

.....  
.....

Üye : Doç. Dr. Güzin Gülsev UYAR

.....  
.....

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

“Çeşitli Mühendislik Polimerlerinin Kaya Saplama Malzemesi olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı doktora tezim, 2012 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı ve 2014-2015 yıllarında bir yıl süre ile misafir araştırmacı olarak bulunduğum Queensland Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde gerçekleşen çalışmalarım sürecinde tamamlanmıştır. Ülkemizde ve Dünya’da çok sayıda Kaya ve Zemin Mühendisliği uygulama alanlarında zemin güçlendirmek amaçlı kullanılan kaya saptamaları performanslarının iyileştirilmesine katkı sağlaması amacı ile literatüre girmekte olan tezimi tamamlamış olmanın mutluluğu içerisindeyim. Öncelikle, tezimin oluşumunda büyük role sahip olan danışman hocam Prof. Dr. Ayhan Kesimal’e, lisans hayatımdan bugüne üzerimde emekleri olan ve bana mesleğimi sevdiiren Prof. Dr. Bahtiyar Ünver’e, mesleki gelişimim için önemli destekler sağlayan ve değerli zamanını hiç esirgemedi ayıran Prof. Dr. C. Okay Aksoy’a, tez izleme komitesinde ve jürimde bulunarak çalışmalarım için değerli katkılar sağlayan Prof. Dr. Fikri Bulut ve Doç. Dr. Kerim Aydınar’e, Queensland Üniversitesi’ndeki çalışmalarımda değerli katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Nazife Erarslan ve Prof. Dr. David Williams’a, hayatımın her aşamasında yanımda olan aileme ve nişanlım Fatma Sinem’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezimin inceleyenler için fayda sağlamasını dilerim.

Eren KÖMÜRLÜ  
Trabzon 2016

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezim olarak sunduğum “Çeşitli Mühendislik Polimerlerinin Kaya Saplama Malzemesi olarak Kullanılabilirliğinin Araıtırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ayhan KESİMAL‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili maden ve laboratuarlarda yaptığımı/yaptırıldığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araıtırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/ 07/ 2016

(İmza)  
Eren KÖMÜRLÜ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kaya Saplamlarının Zemin Güçlendirme Mekanizmaları .....	4
1.3. Kaya Saplamlarının Ankraj Mekanizmaları .....	5
1.4. Kaya Saplama Türleri .....	6
1.4.1. Mekanik Ankrajlı (Öngermeli) Kaya Saplamları .....	6
1.4.2. Öngermesiz Dolgulu Ribar türü Kaya Saplamları .....	8
1.4.3. Sürtüneli Kaya Saplamları (Dolgulu veya Dolgusuz) .....	9
1.4.4. Yüksek Enerji Emme Kapasiteli Kaya Saplamları .....	13
1.4.5. Delici Bitli Kaya Saplamları .....	15
1.4.6. Kablo Saplamlar .....	16
1.5. Kaya Saplama Malzemesi olarak Polimer Malzemeler .....	18
1.6. Tezin Amacı .....	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	25
2.1. Poliüre türü Püskürtme Membran Kaplamalı Kaya Saplamları .....	25
2.2. Polipropilen Kompozit Gövdeli Sürtüneli Kaya Saplamları .....	27
2.2.1. Montaj Testi .....	32
2.2.2. Eksenel Yük (itme) Testi .....	34
2.2.3. Makaslama Testi .....	35
2.2.4. Çapsal Daralma Testleri .....	37
2.2.5. Sünme Testleri .....	38

2.2.6. Darbe Testleri .....	39
2.2.7. Doğrudan Çekme Testi .....	41
2.2.8. Arazi Testleri .....	42
2.3. Poliamid Saplamlara yönelik Testler .....	44
2.3.1. Doğrudan Çekme (Eksenel Yükleme Testleri) .....	45
2.3.2. Makaslama Testleri .....	46
2.3.3. Sünme Testleri .....	48
2.3.4. Çimento Enjeksiyonu ile Aderans ve Çekme/Çıkarma Testleri .....	49
2.4. Çalışmalarda Kullanılan Polimerlerin Maliyetleri .....	53
3. BULGULAR .....	54
3.1. Poliüre Püskürtme Membran Kaplamalı Kaya Saplamlarına yönelik Bulgular .	54
3.2. Polipropilen Kompozit Sürtünmeli Kaya Saplamlarına yönelik Bulgular .....	56
3.3. Poliamid Saplama Numunelerine yönelik Bulgular .....	65
4. İRDELEME .....	68
4.1. Poliüre türü Püskürtme Membran Kaplama ile ilgili İrdeleme .....	68
4.2. Polipropilen Kompozit Gövdeli Sürtünmeli Kaya Saplamları için İrdeleme ....	69
4.3. Poliamid Saplamlar için İrdeleme .....	75
5. SONUÇLAR .....	78
6. KAYNAKLAR .....	79
ÖZGEÇMİŞ .....	87

## Doktora Tezi

### ÖZET

#### ÇEŞİTLİ MÜHENDİSLİK POLİMERLERİNİN KAYA SAPLAMA MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Eren Kömürlü

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ayhan KESİMAL  
2016, 86 Sayfa

Bu tez çalışmaları kapsamında üç farklı polimerin (Poliüre, PP-R ve Poliamid-6) yeni kaya saplama malzemeleri olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Dolgulu ribar ve split-set türü kaya saplama poliüre püskürtme yöntemi ile pratik bir şekilde kaplanmış ve bu işlemin tahkimat performansı üzerindeki etkileri yeraltında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Poliüre kaplamalı ve kaplamasız olarak montajı yapılmış olan kaya saplama malzemelerine kısa ve uzun dönem yeraltında taşıma kapasitesi testleri uygulanarak poliüre kaplamanın tahkimat performansını önemli ölçüde artırdığı, aynı zamanda ekonomik olarak su yalıtımı sağladığı görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca, PP-R (polipropilen random kopolimer) türü cam lif katkılı kompozit tüplerin çelik split setler yerine korozyonun önlenmesi amaçlı sürtünmeli kaya saplama malzemesi olarak kullanılabilirliği laboratuvar ve arazi ölçekli bir dizi deneysel çalışma ile değerlendirilmiştir. PP-R tüpler çelik split setler ile kıyaslamalı olarak statik yük testleri (çekme ve makaslama), dinamik yük (ani yükleme) testleri, sünme, korozyon, çapsal daralma ve montaj testleri ile incelenmiştir. PP-R tüplerin delik pürüzlerine bağlı temas yüzeyinin şeklini alarak yüksek sürtünme katsayısı, taşıma kapasitesi sağlıyor olması ve yüksek kimyasal direnci sebebiyle sürtünme ile yük taşıma amaçlı çelik split setler yerine kullanımının avantajlı olduğu görülmüştür. Dolgulu kaya saplama malzemesi olarak tahkimat özellikleri belirlenen Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin yüksek gövde dayanımı ve dolgu içerisinde yüksek aderans sağladığı görülmüştür. Poliamid-6 üzerine uygulanan çalışmaların çıktısı olarak, dolgulu saplama uygulamalarına yönelik kancalı saplama malzemeleri geliştirilmiştir. Statik ve dinamik yükler altında ideal tahkimat reaksiyonları sergileyecek olan Poliamid-6 saplama malzemelerinin kaya mühendisliğinde sistematik uygulamalarının başlatılması önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tahkimat, Kaya Saplama, Yeraltı Madenleri, Mühendislik Polimerleri, Polimer tahkimat malzemeleri, Korozyon



PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF USABILITY OF VARIOUS ENGINEERING POLYMERS AS ROCK BOLT MATERIAL

Eren Kömürlü

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof.Dr. Ayhan KESİMAL  
2016, 90 Pages

In this study, three different kinds of polymer materials (Polyurea, PP-R, Poliyamide-6) were investigated to be used as rock bolt materials. Grouted rebar and split-set types of rock bolts were easily coated with polymer spraying. The experimental studies on use of polyurea coated rock bolts were performed under acidic underground water conditions. Long and short terms pull-out tests were performed on polymer coated and uncoated rock bolts separately to examine the effect of the surface treatment method on rock bolt corrosion. It was observed that polyurea layer prevented steel corrosion economically while bolt load bearing capacity was being increased significantly. Tubes made of Polypropylene random copolymer (PP-R), another polymer material used in this study were assessed with a series of experimental study including laboratory and field tests to use instead of steel split sets, in terms of prevention of the corrosion problem. PP-R tubes and typical steel split sets were comparatively investigated with statical loading (pull and shear), dynamic (impact) loading, creep, corrosion, diametral compression and insertion tests. PP-R tubes having proper chemical resistivity and mechanical properties, advantages of being shaped by the roughness of the drillhole surface making the friction coefficient be high were assessed to be usable as frictional rock bolts in rock engineering. According to the data obtained with this study, it is suggested to develop new rock bolt products to use PP-R tubes instead of steel split sets. Polyamide-6 type engineering polymer whose the support characteristics were determined in this study was assessed to have a high body strength and adherence in the cement mortar grouts. As outcome of the study performed on the Polyamide-6 type engineering polymer, new mechanical anchored and grouted rock bolts were designed. Polyamide-6 rock bolts seen to exhibit ideal support reactions under both static and dynamic loads are suggested to start being systematically applied in mining.

**Key Words:** Support, Rock Bolts, Underground Mines, Engineering Polymers, Polymer Support Materials, Corrosion

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No.

Şekil 1.1. Doğu Delaware tüneli (Perez, 1952) .....	2
Şekil 1.2. Kaya saptlamalarının zemin güçlendirme mekanizmaları .....	5
Şekil 1.3. Kaya saptlamalarının ankraj .....	6
Şekil 1.4. Mekanik ankraj başları .....	7
Şekil 1.5. Split set türü sürtünmeli kaya saptlaması .....	10
Şekil 1.6. Kaya patlaması yaşanan bir yer altı açıklığı .....	14
Şekil 1.7. Roofex kaya saptlaması tarafından müsaade edilen kaya kütlesi deformasyonu ....	15
Şekil 1.8. Delici bitli kaya saptlaması .....	16
Şekil 2.1. a) Poliüre püskürtme, b) Poliüre kaplamalı split-set yüzeyleri, c) Poliüre kaplamalı ribar yüzeyleri .....	26
Şekil 2.2. Çekme testleri .....	27
Şekil 2.3. PP-R kompozit tüplere uygulanan laboratuvar testlerinin şematik gösterimi .....	28
Şekil 2.4. Delik delinecek konumun bloklar üzerinde işaretlenmesi .....	28
Şekil 2.5. Delik delinecek işaretlenmiş yer .....	29
Şekil 2.6. Delik delme işlemi .....	29
Şekil 2.7. Kesilmiş ve kesilecek makaslama testi numuneleri .....	30
Şekil 2.8. Montaj için hazır polimer tüp .....	31
Şekil 2.9. Montaj için hazır, uçları kesilmiş çelik ve polimer saptlama numuneleri .....	32
Şekil 2.10. a) Pres makinası alt deliği, b) delikli alt platen .....	33
Şekil 2.11. Saptlamanın düşey ile paralelliğinin kontrol edilmesi .....	33
Şekil 2.12. Kaya saptlaması montaj testi .....	34
Şekil 2.13. İtme testi uygulanan montajı tamamlanmış numune .....	35
Şekil 2.14. a) Makaslama testi, b) makaslanmış polimer saptlama .....	37

Şekil 2.15. Çapsal daralma testi .....	38
Şekil 2.16. a) Askıdaki polimer saplamalı bloklar, b ve c) blok üzerine konan 15 kilogram yük, d) blok üzerindeki 39 kilogram ağırlık .....	39
Şekil 2.17. a) Çelik split setlerin blok içinde sürtünme yüzeyi temas konumunun çizilmesi, b) çelik split set montajı, c) polimer tüplerin blok içindeki temas konumu sınırlarının çizilmesi, d) montajı tamamlanmış çelik ve polimer tüpler... 41	41
Şekil 2.18. a) Darbe testi deney düzeneği, b) plastik kelepçenin kesilmesi, c) ağırlığın düşmesi, d) kaya saplamasının sıyrılmış olduğu numune .....	41
Şekil 2.19. Yeraltı testlerinde kullanılmak için hazırlanmış PP-R kompozit saplamalar .....	43
Şekil 2.20. Saplama tutma halkası (a), ve saplama ile birleştirilmesi (b,c,d) .....	43
Şekil 2.21. PP-R kompozit tüpün deliğe itilmesi ve bükülme .....	44
Şekil 2.22. PP-R kompozit tüplerin yeraltında montajı .....	44
Şekil 2.23. Poliamid saplama çekme testi .....	45
Şekil 2.24. Makaslama testlerinde kullanılan ayrılmış çelik halkalar .....	46
Şekil 2.25. Makaslama halkalarının poliamid rod ile kullanımları .....	47
Şekil 2.26. Makaslama testi .....	47
Şekil 2.27. Makaslanmış poliamid numune .....	48
Şekil 2.28. Makaslanmış poliamid numune .....	48
Şekil 2.29. Poliamid sünme testi .....	49
Şekil 2.30. Poliamid çekme/çıkarma numunelerinin hazırlanması .....	51
Şekil 2.31. Poliamid saplama ucundaki kanca: a) ucu delinmiş poliamid saplama, b ve c) vidalanmış kanca, d) kancalı ve kancasız poliamid saplamalar .....	52
Şekil 2.32. Poliamid saplamalara uygulanan çekme çıkarma testi: a, b) Poliamid çubuğun test düzeneğine oturtulması, c) numunenin yüklenmesi, d) yenilmiş numune içindeki kanca, e) kancasız poliamid numunenin çimento içinden sıyırılması.....	52
Şekil 3.1. Korozyona uğramış split-set .....	55
Şekil 3.2. Kırılmış split-set çeliği .....	55
Şekil 3.3. İtme testi polimer numunelerinin montajlarında yük-deformasyon ilişkileri .....	58
Şekil 3.4. Kısa dönem itme testleri yük-deformasyon eğrileri .....	59

Şekil 3.5. Kısa dönem makaslama testi yük-deformasyon eğrileri .....	60
Şekil 3.6. Çapsal daralma testi numuneleri için yük-deformasyon grafikleri .....	61
Şekil 3.7. PP-R tüplere uygulanan doğrudan çekme testi ve yük deformasyon eğrileri.....	62
Şekil 3.8. Delik içerisinde çekme kuvveti ile gövdesi yenilmiş PP-R kompozit tüpler .....	64
Şekil 3.9. a) Saplama çekme testi, b) saplama tutma halkası birleşiminde yenilme .....	65
Şekil 3.10. Poliamid çekme testinden elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği .....	66
Şekil 5.1. Polimer tüp yarık temas yüzeyleri.....	71



## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 1.1. Çeşitli polimerlerin tipik dayanım, deformasyon modülü ve özgül ağırlık değerleri (Kömürlü ve Kesimal, 2012b) .....	21
Tablo 3. 1. Split set numuneleri için çekme testi sonuçları (P: poliüre kaplamalı, K: kaplamasız, Fu: maksimum yük, S.D: standart sapma).....	54
Tablo 3.2. Dolgulu ribarlar için çekme testi sonuçları.....	56
Tablo 3.3. İtme testi numuneleri montajlarında ölçülen maksimum yükler (P: Polimer, S: Çelik).....	57
Tablo 3.4. Makaslama testi numuneleri montajları esnasında ölçülen maksimum yükler.....	57
Tablo 3.5. Darbe dayanımı testi numuneleri montajlarında ölçülen maksimum yükler.....	57
Tablo 3.6. Kısa dönem itme testi sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik).....	58
Tablo 3.7. Uzun dönem itme testi sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik).....	58
Tablo 3.8. Makaslama testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri.....	60
Tablo 3.9. Çapsal daralma testi verileri.....	60
Tablo 3.10. Ani yük testi sürtünme yüzeyindeki deformasyon verileri (T.F: tamamen saplamanın kaya bloğundan sıyrılması) .....	61
Tablo 3.11. PP-R kompozit saplamalara uygulanan doğrudan çekme (eksenel yük) testi sonuçları.....	61
Tablo 3.12. Saplama çekme testi sonuçları .....	64
Tablo 3.13. Poliamid sünme testi ile elde edilen zamana bağlı sehim değerleri.....	67
Tablo 3.14. Poliamid saplamalar için aderans (çekme/çıkarma) testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri.....	67

## SEMBOLLER DİZİNİ

c: Kohezyon (MPa)

D: Çap (m)

E : Elastisite modülü (GPa)

L: Kiriş efektif boyu (m)

M: Moment (Nm)

F: Yük (N)

$F_u$ : Maksimum yük (N)

$\varepsilon$ : Birim deformasyon

$\phi$  : İçsel sürtünme açısı ( $^{\circ}$ )

$\gamma$ : Birim hacim ağırlık ( $kN/m^3$ )

$\rho$ : yoğunluk ( $t/m^3$ )

$\nu$ : Poisson oranı

$\sigma$ : Normal gerilme (MPa)

$\sigma_c$ : Sıkışma gerilmesi (MPa)

$\sigma_t$ : Çekme gerilmesi (MPa)

$\tau$  : Makaslama gerilmesi (MPa)

SD: Standart sapma

ML: Eksenel itme testlerinde sürtünme arayüzeyinde ölçülen maksimum yük (N)

IL: Sürtünme arayüzeyinde montaj esnasında ulaşılan maksimum yük (N)

PL: Sürtünme arayüzeyinde kaymaya başlama (plastik deformasyon) yükü (N)

$\sigma_{if}$  : Eğilme dayanımı (MPa)

## 1. GENEL BİLGİLER

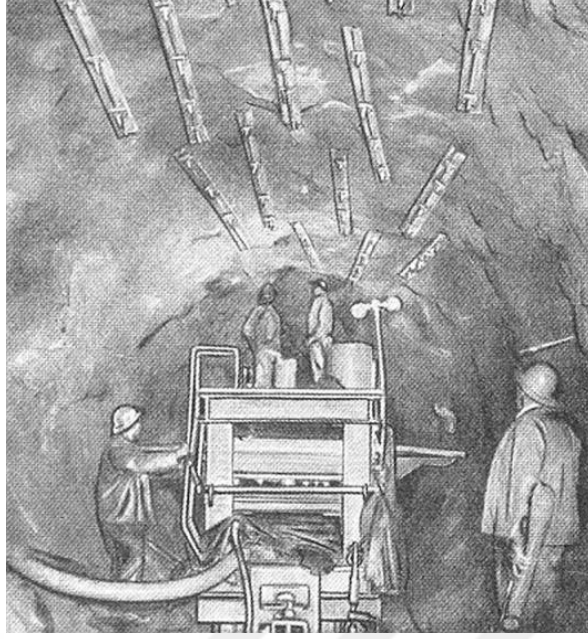
Kaya saplama türleri, ankraj ve kaya kütlesi güçlendirme mekanizmaları, polimer malzemelerin çeşitleri ve mekanik özelliklerine yönelik genel bilgiler sıradaki alt başlıklar halinde verilmiştir.

### 1.1. Giriş

1890'lı yıllardan beri kullanıldığı bilinen kaya saplamalarına yönelik ilk patent 1918 yılında Stephan, Fröhlich ve Klüpfel tarafından alınmıştır. Stephan ve arkadaşlarının bu patent için 1913 yılında başvurdukları bilinmektedir. Patent başvurusunun sonuçlanması için sürenin uzun olmasında 1. Dünya savaşının yaşanıyor olmasının etken olduğu söylenmektedir (Kovari, 2003a). Stephan ve arkadaşları (1918) bu yeni uygulamayı yeraltında kaya kütlesi içinde konumu farklı ve farklı deformasyona uğrayan noktaları birbirine bağlamak amaçlı kullandıklarını, bunun gerçekleşmesi için önce yeteri uzunlukta delik delinip sonra çelik ribarların deliğe montajlarının yapıldığını ve ribar ile zemin arasında aderansın sağlanması için delik içerisini çimentoladıklarını söylemektedirler. Patent başvurusu üzerinden 100 yılı aşkın süre geçen bu uygulama, günümüzdeki tipik bir dolgulu ribar (SN bulon) tanımına paraleldir.

Püskürtme betonun henüz kullanılmadığı/yaygınlaşmadığı, eski uygulamalarda kaya saplamaları arasında bağlantı kuran uzun plakaların yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu duruma yönelik 1952 yılına ait bir resim Şekil 1.1'de verilmektedir. Bu uygulama, kaya saplamalarının birbirine yük aktarmasına olanak sağlamaktadır.

Kaya saplamaları, 1920'li yıllarda yaygınlaşmamış, ancak 1930'lu, 40'lı ve 50'li yıllarda hızla yeni uygulamalarda kendine yer bulmuştur. 1960'lı yıllarda ise popüler hale gelmiş, tahkimat prensiplerine yönelik genel detaylar anlaşılmış ve birçok standartlaştırma yapılmıştır (Kovari, 2003b; Schubert, 2013; Muller, 1990).



Şekil 1.1. Doğu Delaware Tüneli (Perez, 1952)

Kaya saplamlarının paslanma ve zamana bağlı olarak taşıma kapasitelerinin azalması nedeni ile çelik yerine alternatif, korozyon problemi olmayan malzeme arayışlarına gidilmiştir. Kaya saplamlarının zamanla paslanmasını önlemek için, lifli polimer (FRP) kompozit malzemeler kaya mühendisliği uygulamalarına girmiştir. FRP kompozit kaya saplama ilk kez 1985 yılında İsviçre’li Weidmann tarafından kullanılmıştır (Firep, 2013). Çeliğe nazaran daha yüksek dayanıma sahip, paslanma problemi olmayan, hafif, kolay uygulanabilir, yüksek çekme ve tork testi sonuçları veren bu ürünler fiyatları dolayısı ile henüz çelik kadar yaygın kullanılmamaktadırlar (Kömürlü ve Kesimal, 2012a; Kömürlü ve Kesimal, 2015).

Lif ve polimer matriks malzemeleri, karışım oranları, ekstra katkıları, üretim şekilleri gibi etkenlere bağlı olarak geniş aralıkta değişebilen mekanik parametre değerlerine sahip kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Çeşitli üreticilerin teknik verilerine dayanarak kaya saplama malzemesi olarak kullanılmakta olan karbon lifli polimer kompozitler (CFRP) için tipik çekme dayanımı değerinin 1,5 GPa dolaylarında olduğu, cam lifli polimer kompozitler (GFRP) için ise bu değer 700 – 800 MPa dolaylarında olduğu söylenebilir. Bu değerler çoğu çelik malzemesinin çekme dayanımının üzerinde değerlerdir. Çelik belli bir gerilmeden itibaren akma göstermekte olup, 250-300 MPa dolaylarında akma gösteren malzemeler uygulamalarda yaygın kullanılmaktadır. CFRP ve GFRP malzemeleri için akma ve tamamen yenilme gerilmeleri arasındaki fark oldukça düşüktür (Kömürlü, 2011).



Kaya saplama malzemesinin montajının yapıldığı delik ve enjeksiyon malzemesi ile etkileşimi taşıma kapasitesi ve gerekli tahkimat basıncının sağlanacağı deformasyon miktarını etkilemektedir (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000). Kaya saplama olarak kullanılan lifli polimer malzemelerde epoksi, poliester ve vinilester türü polimerlerin daha çok kullanıldığı görülmektedir. CFRP ve GFRP, genelde enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmakta olan çimento su harcı ile oldukça yüksek aderans sağlayabilmektedir (Kömürlü vd., 2014). Öngermeli, sürtünmeli, enjeksiyon dolgulu veya doğrudan zemine temas eden birçok saplama türü geliştirilmiştir. Dolgulu uygulamalarda kaya saplama malzemelerinin yanı sıra enjeksiyon dolgu malzemeleri de tahkimat performansı ve reaksiyonları üzerinde önemli ölçüde etkiye sahiptir. Günümüzde sulu zemine iyi yapışabilen, polimerleşme tepkimeleri sulu ortamda hızla gerçekleşebilen ve kimyasal katkıları ile deformasyon özellikleri değiştirilebilen akrilat bazlı dolgu malzemeleri üretilmektedir. Patlatmadan kaynaklı aynaya yakın yeni uygulanmış kaya saplama malzemelerinin gevşemesi konusunda olduğu gibi delik yüzeyinden aktarılan dinamik yüklere karşı enerji absorpsiyon kapasitesi yüksek olan ve hızla dayanım kazanan bu tip malzemeler avantaj sağlamaktadır (BASF, 2009). Bu konuda, hızlı yüksek taşıma kapasitesi sağlayan reçine dolgularının da geleneksel çimento dolgusuna nazaran önemli avantajları vardır (Hoek, 2006). 1956 yılında kaya saplama uygulamaları için ilk reçine dolgunun geliştirildiği ve ilk kartuşlu reçine dolgu uygulamasının da 1959 yılında Almanya’da gerçekleştirildiği bilinmektedir (Hoa, 2008). İlerleyen süreç içerisinde reçine dolgu malzemeleri gelişim göstermiş olup, günümüzde farklı özelliklere sahip çok sayıda ürüne ulaşılabilmektedir. Tipik bir reçine dolgu uygulamasında iki birleşen kartuşlar halinde deliğe itirilip delik içinde kartuşların delinerek birleşenlerin karışması sağlanır.

Kaya saplama mekanik öngermeli, öngermesiz, dolgulu, sürtünmeli, delici bitli gibi uygulanış ve tahkimat mekanizmalarına bağlı olarak sınıflara ayrılmaktadırlar. Kaya saplama malzemelerinin ana fonksiyonları duraysızlık yaşayabilecek olan blokları birbirine veya sağlam zemine bağlayarak yapısal kontrollü duraysızlıkları önlemek ve zemin konverjansını kontrol ederek gerilme kontrollü duraysızlıkları önlemek konuları altında iki başlıkta toplanabilirler. Kaya saplama malzemesi zemin güçlendirme mekanizmalarını açıklamak için kullanılan temel teoriler askıya alma, kiriş etkisi, anahtar etkisi, kemerleme etkisi gibi başlıklar altında incelenebilmektedir. Ayrıca, bu başlıkların dışında, kaya saplama malzemelerinin ankraj etkisi sonucu zemindeki gerilme dağılımlarının değişmesi ile konverjans kısıtlandırılabilir.

## 1.2. Kaya Saplamalarının Zemin Güçlendirme Mekanizmaları

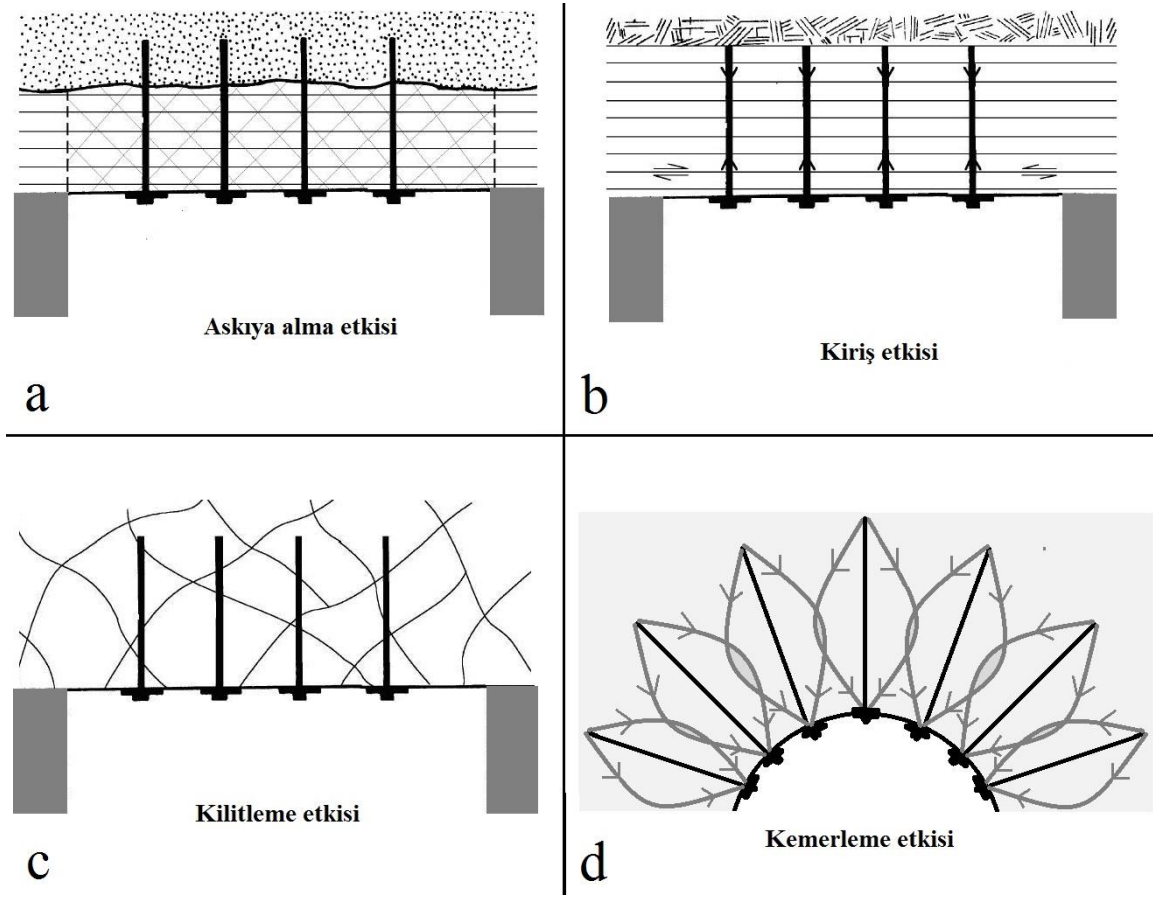
Askıya alma etkisi ile bir formasyonu üzerindeki formasyona veya bloklar halinde bulunan kaya kütlelerini sağlam kayaya bağlayarak duraysızlıklar önlenmektedir (Şekil 1.2a). Askıya almak için sağlam kaya kütleleri derinde bulunuyor ise tabakalı kaya kütlelerinde sıkça uygulanan, tabakaların birlikte hareket etmesi ile deformasyonun kısıtlandırılmasını sağlayan kiriş etkisi ile duraylılık korunabilir. Kiriş etkisi ile süreksizliklerin veya tabakaların güçlendirilmesi ve birlikte reaksiyon göstermeleri neticesinde kendilerini taşıması sağlanmaktadır (Şekil 1.2b).

Sık çatlaklı kaya kütlelerinde kaya saplamaları kullanılarak süreksizliklerin sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinin artırılması neticesinde kilitleme etkisi sağlanabilmektedir (Şekil 1.2c). Kilitlenemeyen bloklardan birinin duraysızlığı ile gevşeme ve dolayısı ile diğer blokların duraysızlığı yaşanabilmektedir. Kilitlenen bloklar arasındaki bir bloğun düşmesine gerek olmaksızın gevşeme nedeni ile ölü yüklerin artacağı ve sık çatlak içeren kaya kütleleri koşullarında katı (rijit) bir tahkimat sistemi uygulaması ile konverjansın minimum seviyede tutulması gerektiği unutulmamalıdır. Kaya bloklarının gevşemesi ile eklem sürtünme yüzeylerinin taşıma kapasitesinin azalması neticesinde yapısal kontrollü duraysızlıklar yaşanabilmektedir (Ulusay, 2010).

Kaya saplamalarının gerilme kontrollü duraysızlıkların engellenmesi için sağladığı temel etki, konverjans kısıtlaması yolu ile zemindeki gerilme dağılımlarının değişmesi şeklinde açıklanabilir. Kaya saplamaları zemin reaksiyonlarına bağlı olarak farklı değerlerde tahkimat basıncı sağlamaktadırlar. Aktif kaya saplamalarında zemin deformasyonuna gerek kalmaksızın ön germe ile ek olarak tahkimat basıncı sağlanabilmekte ve gerilme kontrollü yenilmeler karşısında daha etkili uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir.

Kaya saplamalarının yeteri yakınlıktaki aralıklarda uygulanması ve kaya saplamaları reaksiyonları neticesinde zeminde oluşan etki alanlarının belirli mesafelerde kesişmesi ile kemerleme etkisi oluşmakta ve zemin duraylılığı açısından önemli bir avantaj olarak kaya saplamalarının sağladığı birbirleri açısından olumlu etkiler tahkimat verimini artırmaktadır. Kemerleme etkisi ile güçlendirilmiş olan kaya kütleleri üzerindeki bir konumda yaşanacak duraysızlıklar da kemerleme etkisi nedeni ile önlenmektedir (Hoek vd., 1995).

Yüksek dayanımlı ve gevrek kayalarda yaşanan kaya patlamaları, zayıf ve düşük elastisite modülü değerlerine sahip kayalarda gözlenen kaya sıkışmaları gibi gerilme kontrollü duraysızlıkların önlenmesi için aktif tahkimat sistemleri pasif tahkimatlara nazaran verimli olmakta ve yenilme sonrası göçük engellenmesi için yüksek enerji emme kapasitesine sahip, deformasyona müsaade edebilen saplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. 1990'lı yıllardan itibaren yüksek enerji emme kapasitesine sahip kaya patlamalarına yönelik geliştirilmekte olan kaya saplamaları üretilmekte ve yaygınlaşmaktadır (Ortlepp, 1992; Li vd., 2014).



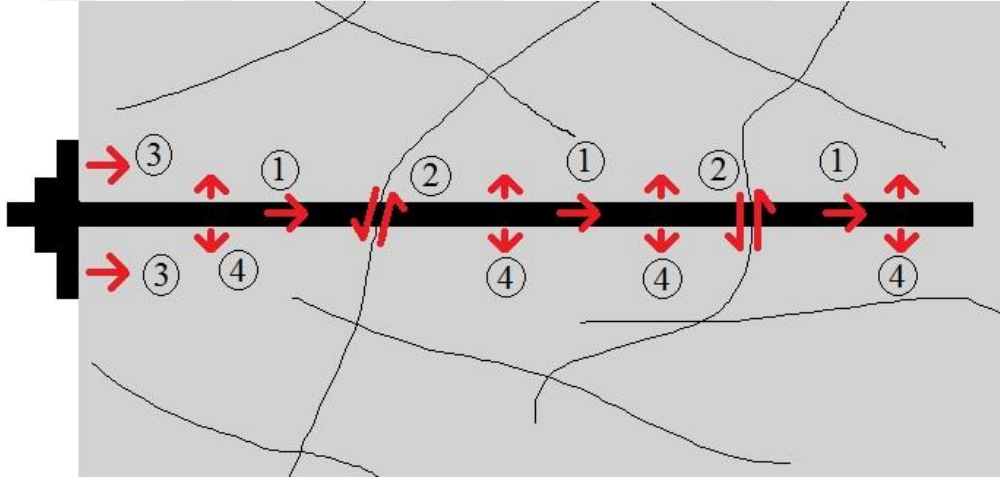
Şekil 1.2. Kaya saplamalarının zemin güçlendirme mekanizmaları

### 1.3. Kaya Saplamalarının Ankraj Mekanizmaları

Kaya saplamalarının tahkimat basıncı sağlama mekanizmaları temel olarak 4 farklı ankraj etkisi altında incelenebilmektedir. Bu mekanizmalardan ilki, saplama gövdesinin aksel olarak yüklenmesi sonucu tahkimat basıncının sağlanmasıdır. Kaya kütlesi deformasyonu altında kaya saplamaları çoğu kez aksel yüklendiği gibi makaslama gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Bu sebeple, saplamaların makaslanma etkisi de tahkimat

basıncı sağlanması için ikinci bir mekanizmadır. Bir diğer ankraj mekanizması ise, plakanın zemini itmesi nedeni ile oluşmaktadır. Tünel cidarından saplama doğrultusunda plaka tarafından uygulanan ankraj etkisi nedeni ile önemli ölçüde tahkimat basıncı sağlanabilmektedir. Dördüncü ankraj mekanizması ise özellikle sürtünmeli saplamalar için yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde belirleyen delik yüzeyini itme etkisine dayanmaktadır. Sürtünmeli kaya saplaması türüne bağlı olarak, delik yüzeyine etkiyen yüksek normal gerilmeler nedeni ile zemindeki gerilme dağılımları dikkate alınır ölçüde değişebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen ankraj mekanizmaları birbirlerini etkileyebilmektedirler. Dolgulu ribar nervürlerinin aksel yüklenme kapasitesini artırdığı gibi makaslanma etkisi altında da saplamaların taşıma kapasitesini artırması bu durum için örnek gösterilebilmektedir. Bu başlık altında bahsedilen ankraj mekanizmaları Şekil 1.3'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Kaya saplamalarının ankraj mekanizmaları (1: Aksel yüklenme, 2: Makaslanma etkisi, 3: Plakanın zemini itme etkisi, 4: Delik içi yüzey basıncı etkisi)

#### 1.4. Kaya Saplaması Türleri

Kaya saplamaları, uygulamalarındaki ve ankraj mekanizmalarındaki farklılıklara göre sıradaki altbaşlıklarda görüldüğü gibi gruplandırılabilirler.

##### 1.4.1. Mekanik Ankrajlı (Öngermeli) Kaya Saplamaları

Delik içine itildikten sonra genişleyen uç kısımları sayesinde mekanik olarak ankraj sağlayan kaya saplamaları ürün detaylarına bağlı olarak 1940'lı yıllardan günümüze kadar geliştirilmiş çok sayıda çeşide sahiptir (Şekil 1.4). İlk geliştirilen mekanik ankrajlı kaya

saplamaları öngermesiz ve sadece delik içindeki uç kısımlarında genişleme başlığına sahip ürünlerdir. Bu tür kaya saptamaları genişleyen baş kısımları sayesinde zemin reaksiyonlarına karşılık plaka ve dolgu ile saptama arayüzündeki aderansa ek olarak ankraj sağlamaktadır.



Şekil 1.4. Mekanik ankraj başları

Zaman içerisinde öngörme sağlayan mekanik ankrajların geliştirilmesi ile zemin deformasyonuna gerek duymaksızın aktif olarak tahkimat basıncı sağlayabilen kaya saptamaları üretilmiştir. Mekanik ankrajlı öngermeli kaya saptamalarının genişleme başlığının açılması ve torklanarak gerilmesi yolu ile aktif tahkimat basıncı sağlanabilmektedir. Tipik olarak, çapı 19 mm ile 35 mm arasında değişen çelik saptamalar 41 mm ile 63 mm aralığında değişen çaptaki deliklere uygulanarak, mekanik ankraj, çelik ve dolgu kalitesine bağlı olarak 200 kN ile 300 kN aralığında eksenel yük taşıma kapasitesine sahip olunabilmektedir.

Mekanik ankrajlı kaya saptamalarının yumuşak ve/veya yüksek ölçüde deformasyona müsaade edebilen kaya kütleleri içindeki deliklerde kullanımı durumunda sert delik yüzeylerine nazaran verim düşmektedir. Mekanik ankrajlı kaya saptamaları için dolgu işlemi genellikle saptamaların deliğe itilmesi ve zemin ile mekanik ankrajın sağlanması sonrasında yapılmaktadır. Özellikle öngermeli kaya saptamalarına yönelik geliştirilen çok sayıda farklı özelliklerdeki plakalar aktif tahkimat basıncı açısından önem taşımaktadır.

Mekanik öngermeli kaya saptamaları, torklanarak hızlı bir şekilde aktif tahkimat basıncı sağlanmaları ve zemin reaksiyonları sonucu pasif tahkimat basınçlarının da oluşması ile yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Korozyonun önlenmesi ve pasif tahkimat performansının artırılması için dolgu kalitesi önem arz etmektedir. Bu tür kaya saptamalarında dezavantaj olarak, montaj, mekanik ankraj ve dolgu işlemlerinde oluşabilecek işçilik problemleri yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde düşürmektedir.

### 1.4.2. Öngermesiz Dolgulu Ribar türü Kaya Saplamaları

Bu tür kaya saplamaları madencilik ve inşaat sektörlerinde en yaygın görülen türdür. Zemin deformasyonu sonucunda pasif olarak tahkimat basıncı sağlarlar. Zemin deformasyonuna karşı tepki olarak sağlanan tahkimat basıncı açısından dolgu kalitesi oldukça önemlidir. Kısa süre içerisinde tahkimat basıncının sağlanması için kimyasal katkı içeren dolgu malzemeleri kullanılabilir. En yaygın ve ekonomik olan dolgu malzemesi Portland çimentosu ve su karışımıdır. Su çimento harcı kullanılarak dolgu işlemi ribarların deliklere montajlarından önce veya sonra yapılabilir. Delik içinden akmanın önlenmesi için dolgulu kaya saplama uygulamalarında nispeten kıvamlı enjeksiyonlar uygulanmaktadır. Su/çimento oranı genellikle kütlece 0.30 – 0.35 olarak seçilmektedir ve dolgu ile aderansın artması için çoğunlukla ribarlar nervürlü olarak uygulanmaktadır.

Portland çimentolu geleneksel dolgulara kıyasla çok kısa süre içerisinde kürlenme tepkimeleri gerçekleşebilen ve yüksek taşıma kapasitesi sağlayan reçine dolgular kartuşlu uygulama ile saplamanın montajından önce deliğe sokulur ve saplamanın deliğe itilerek dönderilmesi ile reçine dolgunun karışımı sağlanır. Geniş aralıkta değişen mekanik özelliklere sahip farklı reçine dolgu ürünleri ve bu ürünler için geliştirilen farklı kimyasal katkıları mevcuttur. Hızlı kürlenmeleri ve sulu zeminlerdeki performansları nedeni ile reçine türü dolgular avantaj sağlıyor olsalar da maliyet açısından geleneksel çimento dolgularına göre daha pahalıdır. Ayrıca, kimyasal olarak tepkimeye giren, kartuş içindeki birleşenlerin delik içinde iyi karışmama riski, delik içindeki karışım ve kürlenmenin görülemiyor olması reçine dolgular için dezavantajdır.

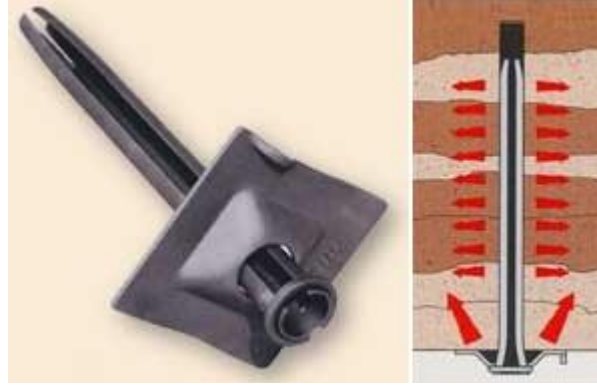
Çimento ve sudan oluşan dolgular delik içine girmeden önce karıştırıldıkları için reçine dolgulardaki birleşenlerin temas etmeme riski olmasa da, delik ve saplama yüzeylerine düzenli temas sağlanması ve montaj esnasında delik içinde boşluk oluşmaması açısından iyi bir işçilik gerektirmektedir. Dolgulu ribar uygulamalarında malzeme ve işçilik kalitesine bağlı olarak yenilme dolgu malzemesinde, kaya saplama malzemesinde, delik/dolgu veya dolgu/saplama arayüzlerinde başlayabilir. Yaygın olarak, 18 mm ile 25 mm aralığında çapa sahip olan çelik ribarlar 35 mm - 38 mm çapındaki deliklere uygulanarak 150 kN– 250 kN aralığında taşıma kapasitesi sağlamaktadırlar. Bu değerler tüm delik boyunca dolgu yapılmaz ise düşmektedir.

Dolgu malzemesinin çelik korozyonunu önlemesi açısından delik içinde minimum boşluk olması önemlidir. Kaya saplamalarının paslanma ve zamana bağlı olarak taşıma kapasitelerinin azalması nedeni ile çelik yerine kullanılabilir, korozyona uğramayan malzeme arayışlarına gidilmiş ve lifli polimer (FRP) kompozit malzemeler kaya mühendisliğine girmiştir.

Kaya saplamasının montajının yapıldığı delik ve enjeksiyon malzemesi ile etkileşimi taşıma kapasitesi ve gerekli tahkimat basıncının sağlanacağı deformasyon miktarını etkiler (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000). Kaya saplaması olarak kullanılan lifli polimer malzemelerde epoksi, poliester ve vinilester türü polimerlerin daha çok kullanıldığı görülmekte olup, lif malzemesi olarak çoğunlukla karbon ve cam lif katkıları kullanılmaktadır. CFRP ve GFRP adları altında sırası ile karbon lif ve cam lif katkılı polimer kompozit saplamalar genelde çimento su harcı ile oldukça yüksek yapışma sağlayabilmektedir. Daha yüksek dayanım ve daha katı bir tahkimat ihtiyacına genellikle CFRP ürünler cevap verebilmekte olup, GFRP türü kompozit malzemelerin elastisite modülü değerleri çoğunlukla çelik malzemelere nazaran daha düşüktür ve istenen tahkimat basınçlarının sağlanması için çeliğe nazaran daha yüksek oranda deformasyona uğramaları gerekmektedir. Ancak, çelik korozyonu nedeni ile zaman içerisinde dayanım ve deformasyon modülü değerlerinde önemli ölçüde düşüş yaşarken, polimer kompozit malzemelerin yüksek kimyasal dirençleri ile avantaj sağlamış oldukları göz önünde bulundurulmalıdır.

#### **1.4.3. Sürtünmeli Kaya Saplamaları (Dolgulu veya Dolgusuz)**

Split setler 1970'li yılların başlarında bulunmuş olan ilk sürtünmeli kaya saplamalarıdır. Split setler üzerine yapılan ilk yayın 1974 yılında "Zemin kontrolü problemleri için sürtünmeli kaya saplamaları ve uygulamaları" ismi ile Dr. J. J. Scott tarafından sunulmuştur. Split setler boyları genellikle 2 ile 3 metre aralığında değişen uygulandıkları delik çapından daha büyük nominal çapa sahip ve kesitlerinde genelde 1.25 cm veya 1.5 cm eninde yarık bulunduran kaya saplamalarıdır. Nominal çaplarından daha küçük çapta delinen deliklere montajları yapıldığı esnada yarıktaki daralma ve çaplarındaki azalma nedeni ile delik çeperine basınç uygulama ve sürtünme ile yük taşıma özelliklerine sahiptirler (Davis, 1979; Kömürlü vd., 2014; Brady ve Brown, 2005). Örnek bir split set resmi ve şematik uygulama Şekil 1.5'te verilmektedir.



Şekil 1.5. Split set türü sürtünmeli kaya saptaması

Split setler deliğe montajları yapılması ile hemen yük taşımaya başlayabilen, dolgulu saptamalarda olduğu gibi enjeksiyon malzemesinin kürlenmesi için beklemeye gerek olmayan, yüksek deformasyon değerlerinde taşıma kapasitelerini önemli ölçüde koruyarak ideal tahkimat reaksiyonları gösterebilen saptamalardır. Uygulamaları pratiktir ve dolgulu ribar saptamalara nazaran hatalı işçilikten kaynaklı taşıma kapasitesindeki düşüş ihtimali oldukça azdır. Ancak, yeraltı suları ile direk temas halinde olmaları nedeni ile erken korozyona uğrayabilmektedirler.

Özellikle, uzun süreler ve asidik yeraltı suları ile temas durumları için önemli oranda taşıma kapasitelerini kayıp etmektedirler. Korozyondan koruma amaçlı galvaniz kaplamalar kullanılıyor olsa da, deliğe uygulama esnasındaki çizilmeler nedeni ile galvaniz yüzeyin korozyonu önlemekten ziyade uzun süreli korozyonda azalmalara imkan sağlaması söz konusu olmaktadır (Hoek, 2006; Kömürlü ve Kesimal, 2015; Hassel ve Villaescusa, 2005).

Split setlerin taşıma kapasitelerinin artırılması için saptama çapının delik çapına oranının artırılması bir seçenek olsa da bu durum montaj esnasında yüzeye etkileyen gerilmeleri ve yüzey çizilmelerini de artırmış olduğu için korozyon problemi artmaktadır. Delik çapının kaya saptaması çapına oranı split set uygulamaları için tipik olarak 0,90 ile 0,95 arasında değişmektedir. Split setlerin aksel yük taşıma kapasitesini etkileyen iki temel unsur zemin ve saptama arayüzündeki normal gerilme ve sürtünme katsayısıdır (Li vd., 2014; Heerden, 2007; Qingliang vd., 2013). Yarıktaki ve dolayısı ile çaptaki daralma nedeni ile yüzeye etkileyen normal gerilmenin yüksek olması için kaya saptamasının rijit bir malzeme kullanılarak üretilmiş olması avantaj sağlıyor olsa da, rijit bir yüzey nedeni ile delik içi pürüz şekilleri iyi alınamamakta, sürtünme katsayısı düşmektedir.



Kaya kütlesi deformasyonu nedeni ile kaya saplamaları için iki temel yüklenme mekanizmaları aksenel ve makaslama etkileri başlıkları altında incelenebilir. Zemin süreksizliklerinin hareketi ile makaslanan kaya saplamalarında aynı zamanda eğilme etkisi görülmekte ve eğilme momentleri oluşmaktadır. Genellikle, kaya kütlesi içerisinde makaslama etkisi aksenel yüklenme ile birlikte yaşanmakta ve delik yüzeyindeki sürtünme hem aksenel yük hem makaslama etkileri açısından taşıma kapasitesini belirleyici olmakta, tahkimat reaksiyonlarını etkilemektedir (Pellet ve Egger, 1996; Srivastava ve Singh, 2015; Oreste ve Cravero, 2008).

Sürtünmeli kaya saplamaları tercih edilirken delik yüzeyi ile olan etkileşim ve malzeme dayanımı göz önüne alınmalıdır. Duraysızlık sürtünme yüzeyinden başlayabileceği gibi yüksek makaslama ve/veya aksenel yüke maruz kalan bir saplama gövdesinin yenilmesi şeklinde de gerçekleşebilmektedir. Dayanım değerlerinin yanı sıra, tercih edilen malzemeye ait deformasyon modülleri (Elastisite modülü, Rijidite modülü) tahkimat reaksiyonları açısından belirleyicidir (Li vd., 2012 ; Kömürlü ve Kesimal, 2013a; Strygin, 1965).

Saplama malzemesine ait Elastisite modülü değeri tahkimat uygulanan zemin reaksiyonlarını iki temel nedene bağlı olarak etkilemektedir. Bunlardan ilki, zemin deformasyonu ile saplamanın deformasyona uğraması ve tahkimat katılığına bağlı olarak kaya kütlesi deformasyonuna müsaade etmesidir (Deb ve Das, 2014; Aziz vd., 2003). İkincisi ise yarık daralması esnasında malzeme rijitliğine bağlı olarak delik yüzeyine uygulanan gerilmenin sürtünme ile yük taşıma kapasitesini ve sürtünme arayüzeylerinin rijidite modülünü belirlemesinden kaynaklanmaktadır (Soni, 2000; Akkiriş, 2014; Kömürlü ve Kesimal, 2012a).

Çelik split set alternatifi olması açısından polimer malzeme türüne bağlı olarak nispeten daha kalın duvarlı tüplerin kullanımına ihtiyaç olmaktadır. Eğer dayanımı ve Elastisite modülü oldukça düşük olan çeşitli polimer malzemelerden birisi kullanılıyor ise katı kesite sahip saplamaların kullanımı durumunda dahi istenen tahkimat reaksiyonları sağlanamayacaktır. Bu yüzden, malzeme tercihinin son derece önemli olduğu ve sonuçları etkileyeceği açıktır. Aynı zamanda, yüksek dayanıma sahip mühendislik polimerlerinin fiyatları düşünüldüğünde ekonomik bir çözüm sunmak için, alternatif malzemelere yönelik kapsamlı bir inceleme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Kaya saplamaşı duvar (et) kalınlığı arttıka delik içindeki çap daralması nedeni ile delik yüzeyine uygulanan gerilme artmaktadır. Delik temas yüzeyine etkiyen gerilmelerin artması ile kaya saplamaşlarının taşıma kapasitelerinde artış görülebilecektir. Delik içinde yarık olması nedeni ile makaslama etkisi altında kaya saplamaşlarının tahkimat reaksiyonları yarık konumu ve kuvvet doğrultusuna bağlı olarak önemli lde etkilenmektedir. Bu nedenle, mümkün olduğunca kk yarık enine sahip bir kesit kaya kütlesi hareketleri karşıında tahkimat katılığını (rijitliğini) ve dayanımını artırabilecektir.

Kaya saplamaşı ve delik yüzeyindeki sürtünme kuvvetlerine karşı direncin yüksek olması yalnızca aksenal yüklere karşı kaya saplamaşlarının performansını artırmayıp, aynı zamanda makaslama gerilmelerine maruz kalan kaya saplamaşları için de taşıma kapasitesini artırmaktadır. Bu konuda arayüzey tokluğu mikro sıyrılmaların ilerlemesi konusundaki direnci belirleyecek ve elastik deformasyon limitine bağlı olarak sıyrılma başlangıcı, bir diğer ifadeyle plastik deformasyon engellenebilecektir. Temas yüzeyinin pürüzlülüğü arayüzeyin elastik deformasyon limitini ve çatlak ilerleme direncini artıran bir unsurdur. Polimer yüzeylerin bu konuda sağlayacağı avantaja ek olarak, kendi elastik deformasyon limitlerinin yüksek olması ve sünek malzeme özellikleri de arayüzeyin çatlak ilerleme direnci açısından olumlu etkilere sahiptir (Bengisu ve Akkaya, 1999; Akono vd., 2012; Czichos, 1986; Moliqve, 1994).

Kaya saplamaşı malzemesi tercihinde en önemli unsurlardan biri de malzemenin kimyasal direncidir. Korozyon problemi olmayan bir malzeme kullanılarak aynı zamanda elik split setlerdeki su yalıtım malzemesi masraflarından kaçınılmış olacaktır. Temas yüzeylerinin bağlı sertlikleri arasındaki fark artışı ile yüzey şekillerinin daha iyi alınması ve temas yüzeyi alanının artması neticesinde sürtünme katsayısı artış göstermektedir (Mikhin ve Lyapın, 1970; Kömürlü vd., 2014; Basavaraju ve Ranganatha, 2013). Bu sebeple plastik yüzeyli saplamaşlar avantaj sağlamaktadırlar.

Plastik sürtünme yüzeyine sahip kaya saplamaşları kullanımı durumunda kaymaya başlanması ile delik pürüz ve mineral tanelerine takılma olması nedeni ile yük değerlerinde artış yaşanması ve tüplerin kaymaya devam etmesi için yük artışına gerek olması duraysızlıkların önlenmesi ve ideal tahkimat reaksiyonlarına sahip olunması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Polimer kaplamalı olarak swellex türü sürtünmeli kaya saplamaşlarının kullanımları yaygınlaşmaktadır.

Swellex türü kaya saptlamaları 1980'li yıllarda ilk kez kullanılmaya başlayan, delik içine itildikten sonra genellikle yağ veya su basıncı sayesinde şişirilerek delik temas yüzeyi ile sürtünme sağlayan kaya saptlamalarıdır. Dolayısıyla, delik içine montajlarından önce delik çapına nazaran daha küçük değerlerde çapa sahiptirler. Delik içine itme esnasında yüzey çizilme problemi olmadığı için uygulama açısından pratiklik sağlanmakta ve korozyonun engellenmesi için avantaja sahip olunmaktadır. Split setler için delik içine itme sürecindeki sürtünmeler, montaj pratikliği açısından düşünüldüğü zaman kaya saptlamalarının yük taşıma kapasitesi açısından sınırlandırıcı olmaktadır. Bu sebeple, swellex uygulamalarında split setlerinkine nazaran delik yüzeyine daha yüksek normal gerilme sağlanabilmektedir.

Delik ve saptlama malzemesi özelliklerine bağlı olarak değerler geniş aralıkta değişim gösterebilse de paslanmamış olan ve yaygın olarak uygulanan 2 – 2.5 metre uzunluğunda ve nominal dış çapı 39 mm olan, 35 mm – 37 mm çapındaki deliklere uygulanan split setler 60-90 kN aralığında sürtünme ile yük taşıma kapasitesine sahipken, aynı delik şartlarında bu değerler sürtünme yüzeyine daha yüksek normal gerilme sağlanması nedeni ile 2 – 2.5 metre uzunluğunda swellex türü saptlamalar için 100–140 kN değerlerine çıkabilmektedir.

Sürtünmeli kaya saptlamalarının taşıma kapasitesi sürtünme arayüzündeki yenilme veya saptlama gövdesi yenilmesi neticesinde belirlenmekte olup, bazen çok zayıf zeminlerden başlayan yenilmeler de söz konusu olmaktadır. Yaygın kullanılan pek çok split set için 100-110 kN gibi yüklere ulaşıldığında sürtünme arayüzünde bir yenilme olmasa dahi çelik gövde yenilmesi gerçekleşmektedir. Tipik değerlerin önemli ölçüde bilgi verici olmasının yanı sıra, kullanılacak olan kaya saptlamalarına özgü performans detayları göz önünde bulundurulmalıdır.

#### **1.4.4. Yüksek Enerji Emme Kapasiteli Kaya Saptlamaları**

Kaya patlaması problemlerine yönelik, enerji emme kapasitesi yüksek olan ve dinamik ani yüklere karşı tasarlanan ilk kaya saptlaması konik uçlu kaya saptlamalarıdır. Karmaşık olmayan bir tasarıma sahip olan konik uçlu kaya saptlamalarının çelik ribar gövdenin uç kısmında çapı genişler ve bu yüzden dolgu içinde daha iyi ankraj performansı sağlanmış olur.

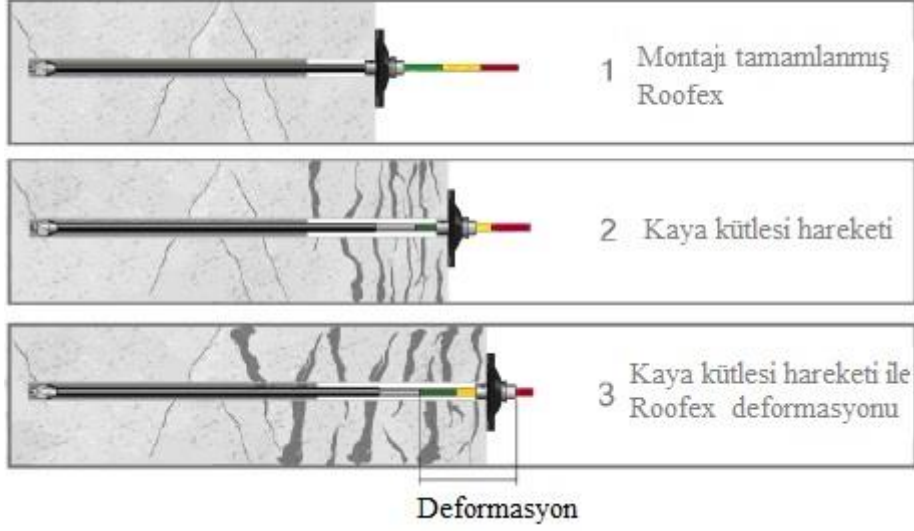
Enerji emme kapasitesini artırmak ve kaya patlamaları ile mücadele etmek amaçlı birbiri içerisinde kayan kaya saptlaması gövdesine sahip ilk kaya saptlamaları 2008 yılında Garford saptlaması (Avustralya) ve Roofex (İsveç) isimleri ile geliştirilmiştir. Bu saptlamalar, yüksek

yük taşıma kapasitesi ve deformasyon limiti sağlamakta olup, geleneksel kaya saplamlarına nazaran daha sünek tahkimat reaksiyonları sergilemekte ve bu sebeple kaya patlaması nedeni ile yenilmiş kaya kütlelerinin askıda kalmasını sağlayarak göçük oluşumunu engelleyebilmektedirler.

Ülkemizde giderek derinleşen madencilik faaliyetleri açısından kaya patlaması problemlerine yönelik geliştirilmiş olan tahkimatların takip edilmesi ve üzerinde durulması madenciliğimiz ve gelecekte yaşanacak sorunlar ile mücadele edilmesi açısından önemli avantaj sağlayacaktır. Şekil 1.6'da kaya patlaması yaşanan bir yer altı açıklığı görülmektedir. Şekil 1.7'de ise Roofex türü kaya saplamlarının yüksek deformasyon limiti dolayısı ile kinetik enerjinin absorbe edilmesi sonucu önlenen bir göçük şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Kaya patlaması yaşanan bir yeraltı açıklığı



Şekil 1.7. Roofex kaya saplaması tarafından müsaade edilen kaya kütlesi deformasyonu

Kaya saplamasına etkiyen yük ve bu yüklenme sonucu yaşanan deformasyonun çarpımına eşit olan enerji birimi Joule (N.m) cinsinden 2 – 2.5 metre uzunluklarında ve 20 – 22 mm çapında tipik bir dolgulu ribar için enerji emme kapasitesi 10 kJ ile 15 kJ arasında değişmekte iken bu değer konik uçlu saplamalar ile 20 kJ - 25 kJ aralığına yükseltilebilmektedir. Daha yüksek değerlerde enerji emme kapasitesine sahip Roofex ve Garford türü saplamaların kullanımı ile bu değer 40 kJ seviyesine yükselebilmektedir. İyi bir işçilik ile 50 kJ seviyelerine kadar çıkabilen enerji emme kapasiteleri ile Roofex ve Garford türü kaya saplamaları kaya patlama riski olan kaya kütleleri içerisindeki yeraltı açıklıkları için önemli avantaj sağlamaktadırlar (Li vd., 2014).

#### 1.4.5. Delici Bitli Kaya Saplamaları

1980’li yıllardan bu yana kullanılan, montajı öncesinde oluşturulmuş deliğe gerek duyulmadan, direk uygulanabilen delici bitli saplamalar önemli pratiklik ve zaman kazancı sağlamaktadır. Özellikle deliğin kapanmasına yol açan zayıf zemin koşullarındaki montaja yönelik yaşanan problemlerin giderilmesi adına delici bitli saplamalar eşsiz bir avantaja sahiptirler. Şekil 1.8’de delici bitli bir kaya saplaması görülmektedir.



Şekil 1.8. Delici bitli kaya saptaması

#### 1.4.6. Kablo Saptamalar

1963 yılında ilk kez Kanada'da uygulandığı bilinen kablo saptamalar, hızla yaygınlaşarak 1970'li yıllarda Güney Afrika, Avustralya ve İskandinav ülkelerinde, 1980'li yıllarda ise pek çok ülkede kullanılan bir tahkimat olmuştur. 1980'li ve 1990'lı yıllarda çok sayıda farklı kablo saptama ürünleri üretilmiş ve tahkimat reaksiyonları oldukça iyi anlaşılmıştır (Hoek vd. 1995; Yazıcı ve Kaiser, 1992; Kaiser vd., 1992; Windsor, 1992; Hutchinson ve Diedrichs, 1996).

Kablo saptamaların en önemli avantajı geniş mesafeli olarak kaya kütesinin güçlendirilmesine olanak sağlamasıdır. Yeraltında açıklık kesitinden daha derin mesafelerdeki deliklere saptama montajının yapılabilmesi nedeni ile kablo saptamaların kullanımı önemli avantaja sahiptir. Kablo saptamaların ilk kullanımına dair, madencilikte kuyu halatı gibi amaçlarla kullanılan kabloların belirli boylarda kesilerek uygulandığı yönünde bilgi mevcuttur. Günümüzde farklı amaçlar için üretilmiş çok çeşitli kablo saptamalar öngermeli veya öngermesiz olarak uygulanabilmektedirler.

Kablo saptamaların taşıma kapasitesi enjeksiyonun kalitesi, saptama ve delik yüzeyine yapışma performansına bağlı olarak değişmektedir. Yenilme, enjeksiyon uygulama kalitesine ve kablo dayanımına bağlı olarak yapışma arayüzeylerinden, enjeksiyon malzemesinden veya kablo gövdesinden başlayabilir. Yeterli enjeksiyon dayanımını sağlamak için düşük su/çimento oranına sahip enjeksiyon malzemelerinin pompalanması zor olmaktadır. Ancak, günümüzde çok viskoz çimento karışımları için üretilen pompaların mevcut olması avantaj sağlamaktadır.

Yük taşımaya başlanması için enjeksiyon malzemesinin kürlenme reaksiyonlarının beklenmesi sebebi ile ani tahkimat basıncı gereksinimlerinin karşılanamaması ve makaslama gerilemelerine karşı rijit tahkimat özelliği gösterilememesi kablo saplamaların dezavantajlarıdır.

Kablo saplamaların çalışma prensibi dolgu ribar türü kaya saplamaları ile benzerdir. Kablo saplamaların yerleştirildiği delik içinde enjeksiyon malzemesi ile yapışma göstermesi neticesinde tahkimat basıncı sağlanabilmektedir. Enjeksiyonun delik içerisine iyi yerleşebilmesi için belirli bir akışkanlıkta olması gerekmektedir. Yaygın kullanılan çimentolar ile verimli hidrasyon tepkimeleri için su/çimento oranı kütlece 0.35 olmalıdır ve mümkün oldukça 0.45 üzerine çıkmamalıdır. Ancak, sıradan pompalarla, delik boyutlarına ve konumuna bağlı olarak gerekli akışkanlığın sağlanması için daha yüksek değerlerde uygulamalar yapılabilmektedir. Bu kapsamda, akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımını aşırı su/çimento oranına sahip olunmaması amaçlı başvurulan bir yöntemdir. Akışkanlığın çok artması ile enjeksiyonun delik içinden dışarı çıkması, yüksek su/çimento oranı ve/veya karışımdaki yüksek akışkanlaştırıcı katkı oranı sebebi ile yaşanan dayanım değerlerindeki düşüşe ek, uygulamaya yönelik bir dezavantajdır.

Kablo gövdeleri tel elemanların birbirlerine sistematik olarak sarılması ile veya birbirlerine sarılmış tel elemanlardan oluşan sırmaların belirli bir sistemde birbirlerine tekrar sarılması şeklinde üretilmektedirler. Enjeksiyon malzemesi ile kablo arasındaki aderansı artırmak ve dolayısıyla sistemin taşıma kapasitesini artırmak amaçlı çelik kablo oluşturan tel veya sırma elemanlar belirli aralıklarla birbirinden ayrılarak oluşturulan kafes sistemi ile standart kabloya alternatif kablolar da kullanılabilir.

Tipik olarak dolgusu iyi yapılmış olan 35 mm deliğe yerleştirilmiş, 20 mm çapında bir kablo saplama 300 kN seviyelerine kadar yük taşıyabilir, ancak bu değerlere gelindiğinde çimento veya çimento saplama arayüzeyinden başlayan bir yenilme yaşanmaz ise kablo kopması yaşanmaktadır. Madencilik ve inşaat sektöründe 500 kN seviyelerini aşan gövde dayanımı değerlerine sahip, daha büyük çaplı kablo uygulamaları da mevcuttur.

Kablonun yerleştirilmesi ve dolgu uygulamaları delik doğrultusuna göre değişiklik göstermektedir. Dolgu uygulamalarında mümkün olduğu kadar hava boşluklarının olmaması için yukarı doğru deliklere kablolar nefeslik borusu bağlanarak itilebilmektedirler. Yukarı doğru delik uygulamalarında dolgunun delik içinden aşağı akmasının önlenmesi amacı ile

delik ağzına tıkaç konulmakta ve dolgu aşağıdan yukarıya, nefeslik borusu ucuna doğru ilerlemektedir. Nefeslik borusundan dolgu geldiği zaman delik içinin dolduğu anlaşılmaktadır. Yatay veya aşağı doğru açılan deliklerde nefeslik borusu kullanılmadan enjeksiyon borusu kablo ile bağlanarak deliğe itilebilmekte ve dolgu delik içinde, kablo ucundan delik dışına doğru ilerlemektedir. Bu uygulamada deliğin dolmuş olması daha net gözlemlenebilmektedir. Katı kıvamlı viskoz dolgular delik içine homojen yerleşememe ve pompa basıncının delik içinde ekstra hava boşlukları oluşturması nedenleri ile dezavantaja sahiptirler. Öte yandan, akışkanlığı yüksek dolguların yukarı yönlü delik uygulamalarında işçiliğinin daha dikkatli yapılması gerekmektedir.

### **1.5. Kaya Saplama Malzemesi olarak Polimer Malzemeler**

Kaya saptamaları için hizmet süreleri uygulama alanına bağlı olarak değişmektedir. Otoyol tünelleri, demiryolu tünelleri gibi 100 yılın üzerinde tahkimat basıncı sağlanması amaçlanan alanların yanı sıra, maden galerinde olduğu gibi birkaç aya kadar düşebilen kullanım süreleri mevcuttur (Kolymbas, 2005; Hoek, 2006; Holter, 2014). Özellikle, sülfürik madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına maruz kalan kaya saptamaları çok hızlı korozyona uğramakta ve taşıma kapasitelerini önemli ölçüde kaybetmektedirler (Kömürlü ve Kesimal, 2013a).

Tahkimat uygulamalarına yönelik çeşitli eksiklikler, yeni malzemelerin kullanımı ihtiyacını doğurmuştur. Bu duruma örnek olarak, paslanma problemine sahip çelik saptamalar yerine 1980'li yıllardan itibaren alternatif olarak lif katkılı polimer kompozit saptamaların üretilmesi gösterilebilir. Bu ürünler yüksek performansa sahip olsalar da, fiyatları nedeni ile çelik gibi yaygın kullanılmamaktadırlar (Ranasooriya, vd. 1995; Li and Lindblad, 1999; Kömürlü, 2012; Hassell ve Villaescusa, 2005; Kömürlü ve Kesimal, 2013b). Paslanma problemi olmayan polimer malzemeler çelik yerine kullanılmaktansa, su yalıtımı sağlayacak kaplamalar olarak uygulanmaları ekonomik olarak korozyon probleminin çözülmesine katkı sağlayacaktır. Bu tez kapsamında incelenen polimerlerden biri olan poliüre türü termoset polimer kaplama yöntemi ile kaya saptamalarının korozyondan korunmasına ve taşıma kapasitelerindeki etkilere yönelik arazi ölçekli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Poliüre, günümüzde gemilerde, tanklarda, kamyon kasaları iç yüzlerinde, yapılarda, havuz ve atık depolama alanlarının izolasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan izosiyenat bazlı termoset bir polimer türüdür (Kömürlü ve Kesimal, 2012a). Bu



uygulamalara ek olarak, poliürenin sülfürik asit ve hidrojen sülfür gazlarına karşı olan yüksek kimyasal direnci dolayısı ile kanalizasyon çeperlerinde kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır (Muynck vd., 2009).

Poliüre, beton, çelik ve kayaç yüzeylerine çok iyi yapışabilmekte olan bir malzemedir. Poliüre, su yalıtım malzemesi olarak püskürtme membran yöntemi ile geleneksel membran örtülerine karşılık sahip olduğu uygulama pratikliği ve yalıtım performansı nedeniyle tünelcilik sektöründe hızla yaygınlaşmaktadır. Aynı zamanda, püskürtülen ince kaplamalar (PİK) adı altında tahkimat amaçlı olarak 1990'lı yıllardan itibaren madencilikteki yerini almıştır (Ozturk, 2012a; Ozturk, 2012b; Ozturk ve Tannant, 2010; Tannant, 2001; Holter, 2014; Kömürlü ve Kesimal, 2013a; Jain and Gupta, 2012; Kömürlü ve Kesimal, 2012b; Zhu vd., 2009; BASF, 2009).

Poliüre, sıvı fazda bulunan izosiyenat ve amin türü birleşenlerin kimyasal reaksiyonları sonucu polimerleşmektedir. Karışımın sıvı fazda kalma süresi ve polimerleşme zamanları ürün türüne bağlı olarak tercih edilebilmekte olup, bu çalışma kapsamında iki veya üç saniye içerisinde polimerleşmeye başlayan bir ürün kullanılmış, profesyonel poliüre püskürtme makinesi ve ekipmanları ile kaplamaları yapılan kaya saplamalarının korozyona karşı dirençleri ve taşıma kapasitelerine yönelik yeraltında testler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında kaya saplamalarının polimer membran ile kaplanmasına yönelik çalışmalara ek olarak, tamamen polimer malzeme ile üretilen tüplerin çelik split setler yerine sürtünmeli kaya saplaması olarak kullanılabilirliği de incelenmiştir.

Çelik split set alternatifi olması açısından polimer malzeme türüne bağlı olarak nispeten daha kalın duvarlı tüplerin kullanımına ihtiyaç olmaktadır. Eğer dayanımı ve Elastisite modülü oldukça düşük olan çeşitli polimer malzemelerden birisi kullanılıyor ise katı kesite sahip saplamaların kullanımı durumunda dahi istenen tahkimat reaksiyonları sağlanamayacaktır. Bu yüzden, malzeme tercihinin son derece önemli olduğu ve sonuçları etkileyeceği açıktır. Aynı zamanda, yüksek dayanıma sahip mühendislik polimerlerinin fiyatları düşünüldüğünde ekonomik bir çözüm sunmak adına, alternatif malzemelere yönelik kapsamlı bir inceleme yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Split set uygulamalarında delik içerisine montajı yapılan tüp kesitinde yarık bulunması nedeni ile tahkimat performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Polimer tüp uygulamalarında yarık eni delik çapına bağlı olarak seçilip, delik içinde yarık kenarlarının temas etmesi ve tüp

çapındaki bir miktar azalmanın yüzey deformasyon özellikleri nedeni ile gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Yarığın delik içine ittirildikten sonra kapanmasının delik yüzeyine uygulanan normal gerilmeyi ve dolayısı ile sürtünme ile yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyeceği düşünülmüştür. Ayrıca, bu uygulamada tüm delik yüzeyi ile temas olması nedeni ile de taşıma kapasitesi açısından avantaj sağlanması beklenmiştir.

Kaya saplama duvar (et) kalınlığı arttıkça delik içindeki çap daralması nedeni ile delik yüzeyine uygulanan gerilme artmaktadır. Yarığın temas edip yüzeyin sıkışması delik temas yüzeyine etkiyen gerilmelerin artmasına neden olacak ve bu sebeple kaya saplama taşıma kapasitelerinde artış görülebilecektir. Ancak, çelik saplama için yalnızca yarık daralması yolu ile sürtünme yüzeyine normal gerilme sağlanabilmektedir. Delik içinde yarık olması nedeni ile makaslama etkisi altında kaya saplama tahkimat reaksiyonları önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, yarık içermeyen bir sürtünmeli kaya saplama kesiti kaya kütlesi hareketleri karşısında tahkimat katılığını (rijitliğini) ve dayanımını artırılabilir.

Kaya saplama malzemesi tercihinde en önemli unsurlardan biri de malzemenin kimyasal direncidir. Korozyon problemi olmayan bir malzeme kullanılarak aynı zamanda çelik split setlerdeki su yalıtım malzemesi masraflarından kaçınılmış olacaktır. Kimyasal direnç ve fiyat maliyeti olarak sergiledikleri yüksek performansları nedeni ile polietilen ve polipropilen türü termoplastikler Dünya’da en yaygın kullanılan iki polimer malzemedir. Günümüzde bu malzemeler gıda, ilaç ve kozmetik paketleme işlemleri, içme suyu taşıma ve depolama uygulamaları gibi kimyasal direncin çok önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Kömürlü vd., 2014; Lyons, 2013; Piringer ve Baner, 2008). Ayrıca, yaklaşık olarak çelikten 7 kat daha hafif olmaları bu malzemelerin kullanım pratikliği açısından önemli avantaj sağlamaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2012a; Kömürlü ve Kesimal, 2012b).

Mekanik özelliklerine bakıldığında aynı isme sahip olan polimerlerin üretim detaylarına bağlı olarak farklılıklar sergiledikleri görülebilmektedir. Polimer malzeme tercihinde tipik dayanım değerlerinin göz önünde bulundurulması gibi farklı ürünlerin kıyaslanması için ürün detaylarının dikkate alınması gereklidir. Mekanik özellikleri nedeni ile tercih edilen polimerler genellikle mühendislik polimerleri olup, Poliamid, ABS, Akriik gibi türler en popüler olanlarıdır. Bu tür mühendislik polimerlerinin fiyatları da nispeten daha

yüksektir. Kaya saplamalarının uygulanacağı zemindeki suyun kimyasal özelliklerine bağlı olarak polimer ürünler tercih edilmelidir.

Polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için lif katkılı üretim yaygınlaşmış bir yöntemdir. Cam lif katkı bu amaçla en yaygın kullanılan lif türüdür. Cam lif katkılı polimer kompozitlerin elastisite modülü de dayanım değerleri gibi lif katkısız polimerlere nazaran yüksektir. Çeşitli polimer malzemelere yönelik tipik dayanım ve deformasyon modülü değerleri oda sıcaklığı şartı için Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Çeşitli polimerlerin tipik dayanım, deformasyon modülü ve özgül ağırlık değerleri (Kömürlü ve Kesimal, 2012b)

Polimer türü	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık	Elastisite modülü (GPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme modülü (GPa)
ABS	75-80	1.04	2-3	75	2.5
ABS+30% cam lif	115	1.54	8-9	120	7
Poliamid-6	80-90	1.20	3-4	85	2.3
Poliamid-66	80-90	1.14	3-4		
Polimid	220-240	1.42	4-5	175	5.5
Polimid+40% cam lif	250-270	1.90	10-12	270	12
Polietilen (HDPE)	30-40	0.94	1-3	45	1.2
Polipropilen	30-40	0.91	2-3	45	1.5
Polipropilen+30% cam lif	50-70	1.12	4-6		
Polistren	60-70	1.05	3-4	40	1.5
Poliüre	20-30	1.25	0.2-0.5		

Delik içerisinde sıkışma sonucu yüzeyin elastik olarak deformasyona uğraması sürtünme yüzeyine uygulanan kuvveti artıracaktır. Polimer malzemenin elastisite modülü değerinin yüksek olması aynı zamanda çapsal daralma nedeni ile kaynaklanan yüzeye temas kuvveti ve sürtünme ile yük taşıma anlamında önemlidir.

Yüzey özelliklerinin yanı sıra gövde dayanımı ve deformasyon özelliklerinin malzeme seçimi konusunda dikkate alınması gerekmektedir. Basit bir yaklaşımla, kesitin aksel yük taşıma kapasitesi kesit alanı ile oranlandığında, çekme dayanımı 45 MPa olan bir polimer malzeme 2 mm duvar kalınlığında 4 cm dış çapa sahip bir çelik split set tüp ile yaklaşık aynı aksel yük taşıma kapasitesine sahip olması için kesitinde boşluk bulundurmamalıdır (çeliğin akma dayanımı 250 MPa olarak dikkate alınmıştır). Bu durumda kesitinde boşluk bulunan bir tüp kullanmak için 45 MPa üzerinde çekme dayanımı değerine sahip bir malzeme kullanmak gerektiği anlaşılmaktadır. Bu durumda mühendislik polimerleri kullanımı veya lif

katkılı polimer kompozitlerin kullanımı söz konusu olabilmektedir. Eksenel yük taşıma kapasitesinin yanısıra gövdenin makaslama dayanımı ve rijitliği polimer tüplerin çelik split set alternatifini olarak kullanılabilirliği konusunda belirleyici özelliklerdir.

Bu çalışmada, sürtünmeli kaya saplamaları uygulamaları için lif katkı polipropilen random kopolimer (PP-R) malzemenin ekonomik olarak istenilen mekanik özellikleri sağlayabileceği değerlendirilmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilmiştir. Kimyasal direnci yüksek olması nedeni ile içme suyu taşımak için yaygın kullanılan malzemelerden biri olan PP-R normal homopolimer polipropilenlere nazaran daha yüksek darbe dayanımına, elastik deformasyon aralığına, çatlak direncine sahiptir. Çalışmada kullanılan lif katkı PP-R tüplerin duvar kalınlığı 6 mm olup, bu değer tipik bir split set tüpün duvar kalınlığına nazaran 3 kat daha fazladır. Yüzey temas alanının artmasını sağlamak için çalışmada lif katkı kompozit gövde üzerinde katkısız PP-R katmana sahip tüpler kullanılmıştır. PP-R fiyat performans olarak uygun bir malzeme olup, darbe dayanımının yüksek olması kaya patlaması problemlerine karşı avantaj sağlayabilecektir. Kaya patlamaları yaşanan zeminde yüzey sürtünmeleri nedeni ile belirli temas uzunluğu üzerindeki kaya saplamalarının gövdeleri yenilebilmektedir. Kaya patlaması problemleri ile mücadele edilmesi için polimer malzemeler yüksek enerji emme kapasiteleri ve darbe dirençleri nedeni ile tercih edilmektedirler (Kömürlü, 2012; Wu ve Oldsen, 2010; Archibald ve Dirige, 2006).

PP-R malzemelere nazaran daha yüksek dayanıma sahip, ancak maliyetleri daha yüksek olan Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin kaya saplaması malzemesi olarak kullanımı üzerine de bu tez kapsamında bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüksek kimyasal direnci ve dayanım değerleri nedeni ile Poliamid-6 türü polimer malzemelerin farklı mühendislik alanlarında çeşitli amaçlar ile kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır (Kömürlü ve Kesimal, 2016a). 2015 yılı rakamlarına göre Dünya genelinde yıllık 7 milyon ton üzerinde Poliamid kullanılmaktadır (Nexant, 2015). Poliamid-6 türü malzemeler üretim şekline, içerik ve polimerleşmelerine bağlı olarak genellikle 70-100 MPa aralığında çekme dayanımına sahip olup, lif katkı Poliamid-6 kompozit ürünler için bu değer önemli ölçüde artmakta ve 150 MPa üzerinde çekme dayanımına sahip olan cam lif katkı Poliamid-6 ürünler temin edilebilmektedir.

Lif katkı kaya saplamalarının dayanım değerlerini artırıyor olsa da, birim deformasyon limitlerini saf polimer kullanımlarına kıyas ile azaltmaktadır. Çeliğe nazaran deformasyon limitleri yüksek olsa da lif katkı polimer kompozit saplamalar tipik olarak %2 - %3

dolaylarında birim deformasyona müsaade edebilmektedir ve %10 mertebelerine çıkan yeraltı açıklığı kesitindeki kapanmaların yaşandığı spesifik uygulama alanlarında kullanımı uygun değildir (Li vd., 2009; You vd., 2015). Kil şişmesinin önlenmesi için rijit tahkimat sistemlerinin kullanılması pek çok kez sonuç vermemekte ve çok yüksek taşıma kapasitesi sağlayabilecek rijit tahkimatlarda dahi kilin şişme özelliklerine bağlı olarak yenilmeler görülmektedir. Ancak, kilin şişmesine müsaade edildikten sonra duraylılığın daha düşük tahkimat basınçları ile sağlanması mümkün olmaktadır. Kil şişmesine yenilmeden cevap verilebilmesi ve şişme tamamlandıktan sonra tahkimat basıncında azalma yaşanmaması durumu arzu edilen tahkimat reaksiyonudur.

Bu çalışmada, kil şişmesi veya kaya sıkışması problemlerine sahip uygulama alanlarında olduğu gibi yeraltı açıklıklarında yüksek oranda deformasyona müsaade edilmesi gereken zemin koşullarına yönelik saf polimer malzemeden imal edilmiş lif katkısız saplama malzemelerinin kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, lif katkısız Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin kaya saptaması malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş ve tahkimat özellikleri değerlendirilmiştir. Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin dolgu kaya saptaması uygulamalarında kullanılmasına yönelik polimer malzeme üzerine uygulanan mekanik testlere ek olarak çimento enjeksiyonu içerisinde saptama çekme/çıkarma testleri gerçekleştirilmiş ve aderansın artırılarak yüksek taşıma kapasitesine sahip olunması için saptama ucunda bulunan mekanik ankraj (kanca) tasarımı yapılmıştır.

Özet olarak, bu tez kapsamında üç farklı polimerin kaya saptaması malzemeleri olarak kullanılabilirlikleri deneysel çalışmalar ile irdelenmiştir. Çelik kaya saptamalarının tahkimat performanslarının iyileştirilmesi amaçlı uygulanan püskürtme poliüre membran kaplamalı kaya saptamaları ve çelik split-set yerine kullanılmak üzere üretimi gerçekleştirilen PP-R kompozit gövdeli sürtünmeli kaya saptamalarının tahkimat özellikleri arazi ve laboratuvar ölçekli testler ile belirlenmiştir. Bu tez kapsamında, ilk kez püskürtme poliüre membranlı kaya saptaması ve PP-R kompozit türü sürtünmeli kaya saptamaları üretilmiş ve uygulanmıştır. Ek olarak, Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin kaya saptaması malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş ve tahkimat özellikleri elde edilen sonuçlar ışığında değerlendirilmiştir.

## 1.6. Tezin Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, yaygın kullanılmakta olan çelik tahkimat malzemeleri dezavantajlarının giderilmesi, kaya saplamaları performansının iyileştirilmesi için çeşitli mühendislik polimerlerinin kullanılabilirliği üzerine deneysel veriler ışığında tartışmak ve yeni tahkimat malzemelerinin kaya mühendisliğine kazandırılması amaçlanmıştır.



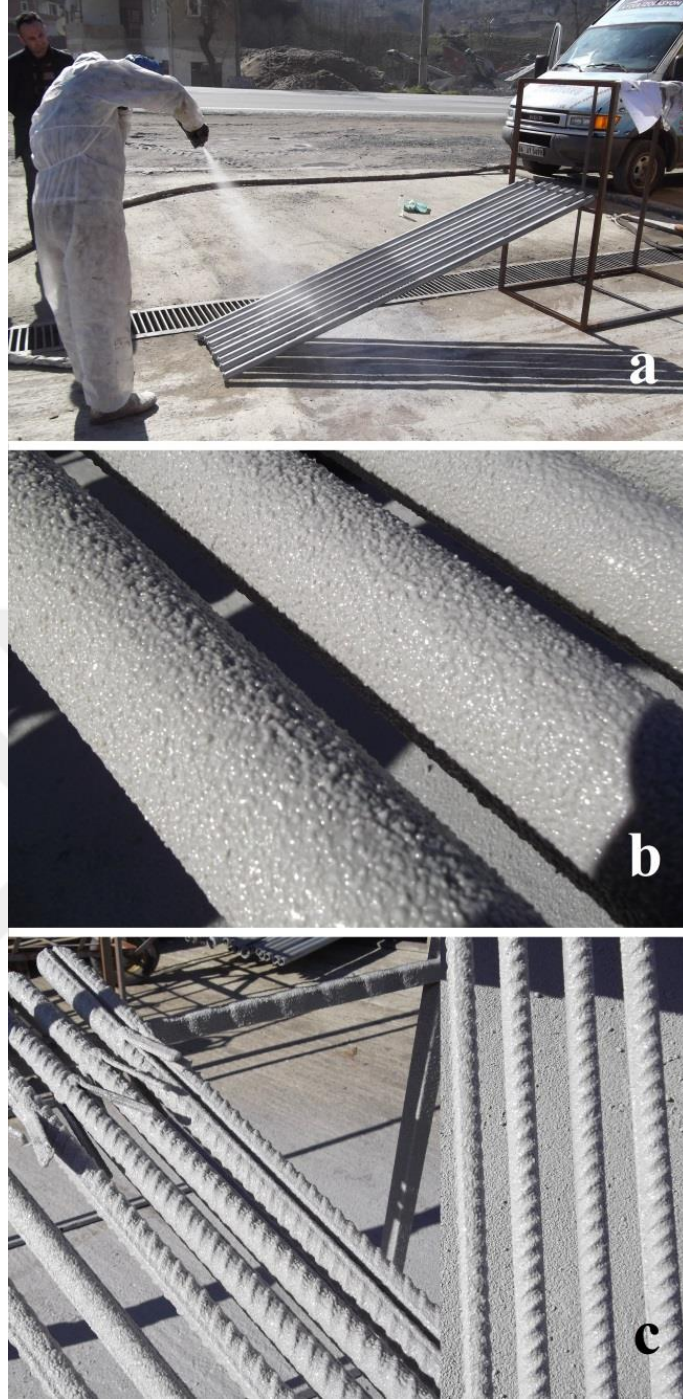
## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Tez kapsamında incelenen üç farklı polimer malzeme için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile ilgili detaylar sıradaki altbaşlıklar halinde verilmiştir.

### **2.1. Poliüre türü Püskürtme Membran Kaplamalı Kaya Saplamları**

Toplam 30 adet ribar türü dolgulu (15 adet) ve split-set türü sürtünmeli (15 adet) kaya saplamları poliüre püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır (Şekil 2.1). Yatık vaziyette yaslanmış saplamlar, üzerine püskürtme uygulanması esnasında tüm yüzeylerin kaplanması için birkaç kez döndürülmüştür. Kullanılan ribar ve split-set türü kaya saplamları 2.4 metre uzunluğundadır. Galvanizli yüzeye ve 39 mm nominal çapa sahip olan split-setler 35 mm çapındaki deliklere uygulanmışlardır. Ribarlar ise 22 mm çapında, nervürlü ve galvanizsiz yüzeye sahip olup su-çimento harcı ile dolgulu olarak uygulanmışlardır. Şekil 2.1c'de görüldüğü gibi, poliüre nervür şekillerini koruyacak şekilde kaplanabilmiştir. Profesyonel ekipmanların kullanımı ile iki kişi tarafından 30 adet kaya saplaması pratik bir şekilde 15 dakika içerisinde kaplanmıştır.

Çayeli Bakır İşletmelerinde su problemi olan bir bölgede kaplamalı ve kaplamasız numunelerin montajları aynı şekilde gerçekleştirilmiş, kaya saplamlarının korozyona karşı dirençleri ve taşıma kapasitelerine yönelik yeraltında testler yapılmıştır. Poliüre türü püskürtülen ince kaplamanın tahkimat performansı üzerindeki etkileri kaya saplamlarına yönelik çekme testleri (pull-out test) ile 3 farklı zaman dilimi için (1 hafta, beş hafta, 6 ay) incelenmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. a) Poliüre püskürtme, b) Poliüre kaplamalı split-set yüzeyleri, c) Poliüre kaplamalı ribar yüzeyleri



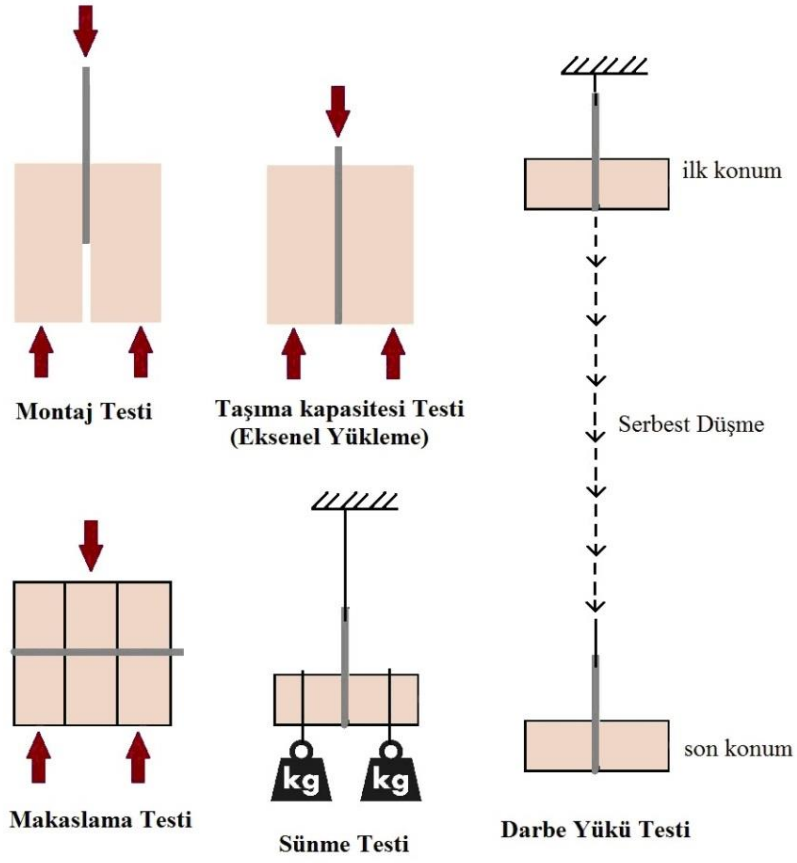


Şekil 2.2. Çekme testleri

## 2.2. Polipropilen Kompozit Gövdeli Sürtünmeli Kaya Saplama

Deneysel çalışmalar kapsamında 25cm x 25cm x 15 cm boyutlarında kumtaşı blokları temin edilmiş ve herbirine 25 cm uzunluğundaki kenarları doğrultusunda 36 mm çapına sahip karotiyer ile delikler delinmiştir. Bu deliklere farklı kaya saplaması numuneleri (polimer ve çelik) monte edilerek deformasyon kontrollü olarak tahkimat performansları incelenmiştir.

Polimer sürtünmeli kaya saplamalarının tahkimat performanslarının değerlendirilmesi ve çelik saplamalar ile kıyaslanması için aşağıdaki alt başlıklar halinde verilen deney programları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara yönelik şematik bir gösterim Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekil 2.4-2.7'de ise testlerde kullanılan kaya blokları ve hazırlık işlemleri görülmektedir.



Şekil 2.3. PP-R kompozit tüplere uygulanan laboratuvar testlerinin şematik gösterimi



Şekil 2.4. Delik delinecek konumun bloklar üzerinde işaretlenmesi



Şekil 2.5. Delinecek yerin işaretlenmesi



Şekil 2.6. Delik delme işlemi

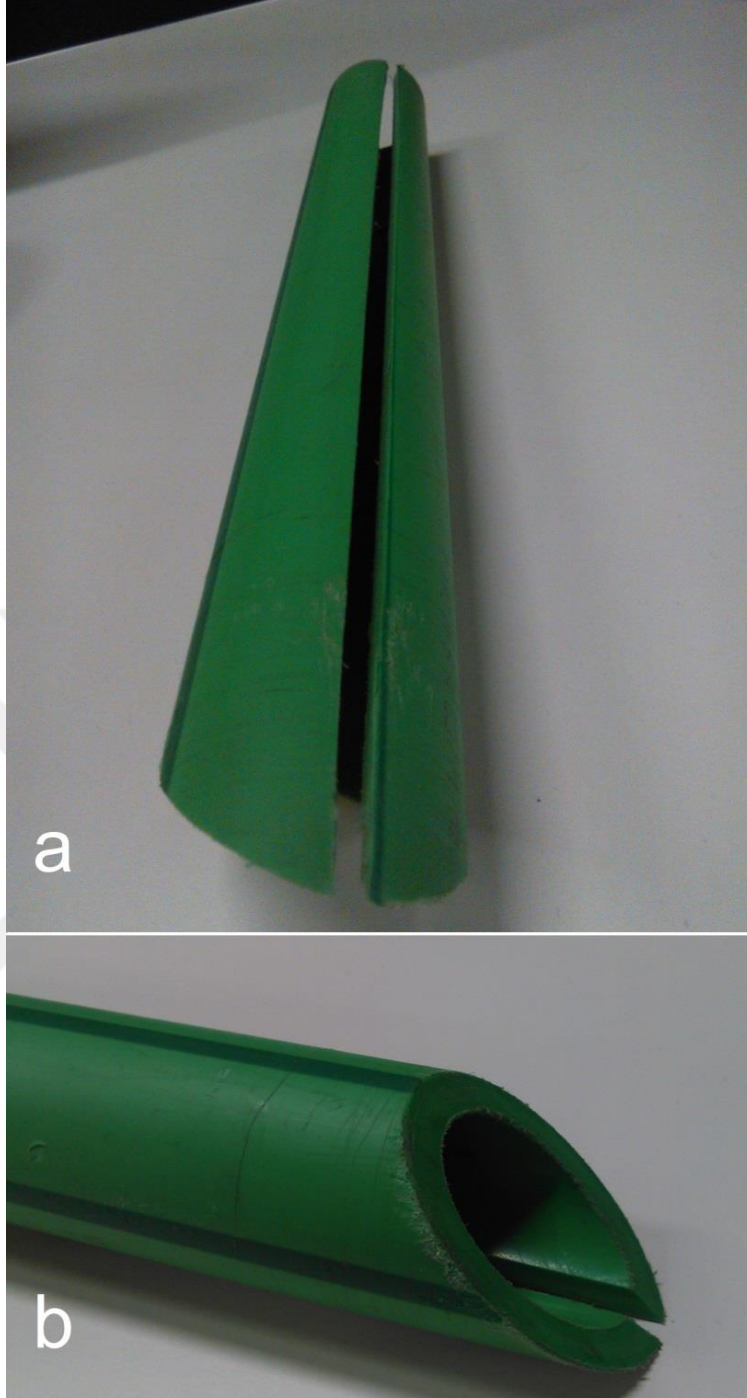




Şekil 2.7. Makaslama testi için kesilmiş ve kesilecek blok numuneler

Kaya blokları makaslama testlerinde kullanılmak için kesilerek üç eş parçaya bölünmüş ve ortadaki bloğun ittirilmesi, sağ ve sol tarafta kalan blokların ise mesnetlenmesi neticesi ile delik içine montajı yapılmış kaya saplamalarının makaslama tepkileri incelenmiştir.

40 mm çapındaki polimer tüplerin montajları için uçları  $45^\circ$  açı ile kesilmiştir. Delik içinde yarığın teması için yarık eni 8 mm olarak seçilmiştir ve yarıklar tüplerin uzun kenarı boyunca açılmıştır (Şekil 2.8). Montaj için hazır olan polimer saplamaların uzun kenarı 33 cm ve kısa kenarı 29 cm uzunluğundadır. Kullanılan split setlerin konik uçları nedeni ile deliğe montajları gerçekleştirilebilmiştir. Çelik split setlerin konik uçları montaj tamamlandığında dışarıda olacak şekilde taşıma kapasitesi testlerinde delik içine tamamen temas halinde kullanılmışlardır. Montajın devam edeceği konumu belirlemek için split setlerin konik kısımları Şekil 2.9’da görüldüğü gibi işaretlenmiştir. 10 cm uzunluğa sahip olan konik kısmın 5 cm uzunluğundaki uç kısmı test düzeneğindeki alt delik derinliği nedeni ile kesilerek split set numuneleri montajları yapılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Split set numuneleri toplam uzunlukları konik uç dahil 35 santimetre boyutuna sahip olacak şekilde hazırlanmışlardır.



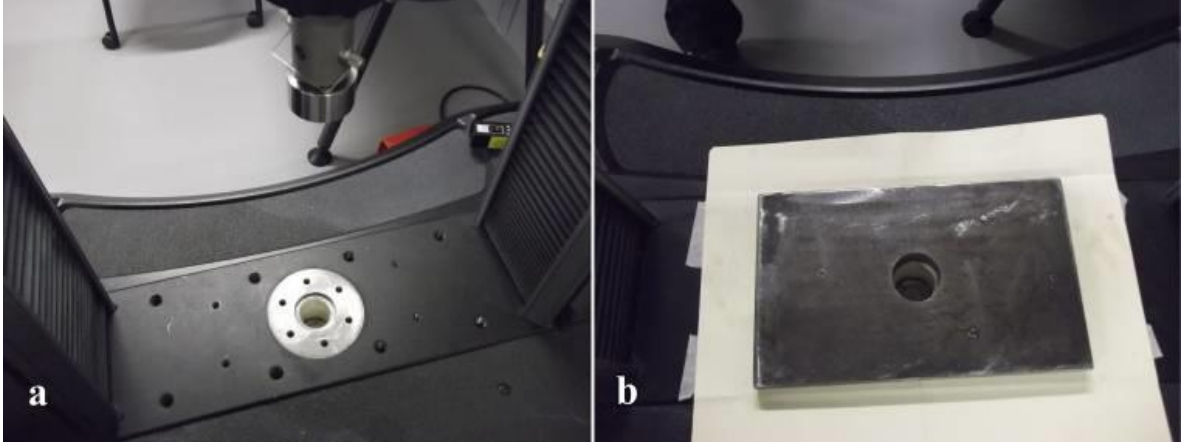
Şekil 2.8. Montaj için hazır polimer tüp



Şekil 2.9. Montaj için hazır, uçları kesilmiş çelik ve polimer saplama numuneleri

### 2.2.1. Montaj Testi

Montaj testinde amaç farklı kaya saplama numunelerinin delik içine uygulanmalarının ne derece pratik olduğunu tayin etmektir. Bu test deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilip delik temas yüzeyindeki deformasyonlara bağlı olarak saplamanın montajı için gerekli yükler incelenmektedir. Montaj yapılacak bloklar 5 santimetre çapında delinmiş olan alt çelik platen üzerine yerleştirilmişlerdir (Şekil 2.10). Test ekipmanının çapı 6 santimetre olan üst yükleme plateni kesiti ve kaya blok deliği kesiti merkezlerinin düşey doğrultuda aynı hizada olacak şekilde yerleştirilmesinden sonra montaj için hazırlanmış olan kaya saplama numuneleri ilk olarak deliğe el ile yerleştirilip delik içine pres makinası yardımı ile itilmeden önce düşey hizada (düşey ile paralel) olduklarının kontrolleri yapılmıştır (Şekil 2.11). Yükleme başlamadan önce üst platen ve kaya saplama numunelerinin merkezlerinin kesiştiği kontrol edilmiştir. Tüm hizalama (saplamaların düşey doğrultu ile paralelligi, blok içindeki delik ile alt platen deliği ve üst platen kesit merkezlerinin kesişimi ve kaya saplama numunesi ile üst platen kesitlerinin temas halinde merkezlerinin kesişmesi) ölçümlerinde 1 mm maksimum sapmaya müsaade edilmiştir.



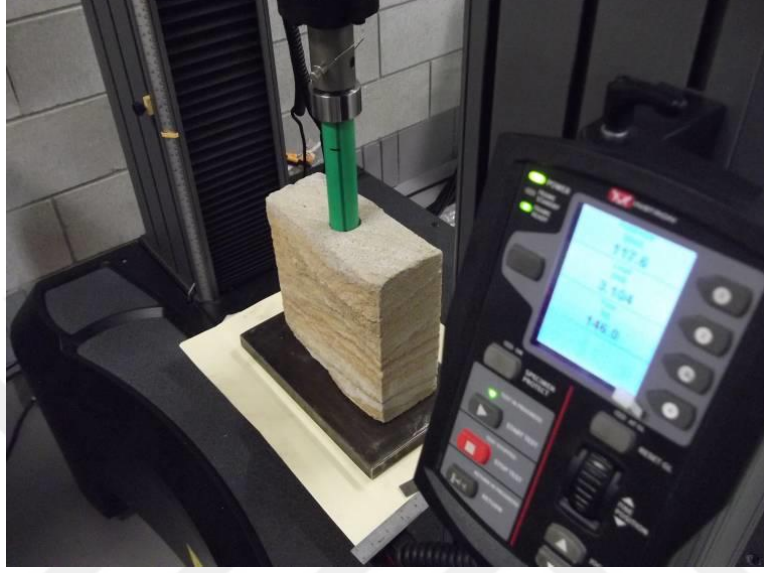
Şekil 2.10. a) Pres makinası alt deliği, b) delikli alt platen



Şekil 2.11. Saplamanın düşey ile paralelliğinin kontrol edilmesi



Kaya saplaması numuneleri delik içine itilirken yükleme hızı 100 mm/dakika olarak seçilmiştir (Şekil 2.12). Kaya saplamaları ile kaya bloğu deliği içinde tam temas sağlanması için polimer tüplerin açılı kesilen uçları tamamen dışarı çıkana kadar itilmişlerdir. Çelik split set tüplerin ise montajları öncesinde işaretlenen uç kısımları dışarda kalacak şekilde montajları tamamlanmıştır.



Şekil 2.12. Kaya saplaması montaj testi

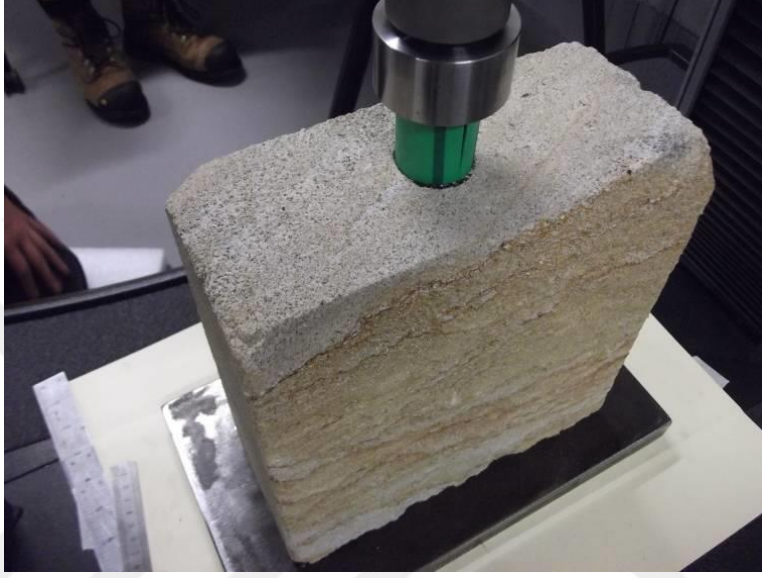
Makaslama numunelerinin montajı için 3 parça halinde kesilmiş bloklar sırası ile üst platen dairesel kesitine göre hizalanarak yerleştirilmiştir. Bloklar üst üste yerleştirildikten sonra dış kenarlarından hizalanmış ve delik içlerinin hizalı oldukları kontrol edilmiştir. Ek olarak ikinci ve üçüncü parçalar konulduğunda delik içine 35 mm çapında bir çubuk sokularak parçaların temas konumlarının hizalı oldukları kontrol edilmiştir.

### 2.2.2. Eksenel Yük (itme) Testi

Montajı tamamlanmış olan kaya saplamalarının korozyon etkisini tayin etmek amaçlı farklı bekleme sürelerinde sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinin incelenmesi için eksenel yük testi deformasyon kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 2.13). Bu sebeple, tahkimat katılığı (kN/mm) da eksenel yük testleri kapsamında tayin edilebilmiştir. Montajları tamamlanan numunelerin bir kısmı uzun dönem testleri için kür havuzuna alınmışlardır. Kür havuzu uygulaması için musluk suyu ile doldurulmuş olan konteynırlar kullanılmıştır. Kısa dönem eksenel yük testleri ise montajların ertesi günü uygulanmışlardır. Saplamaların kaya



deliği dışına çıkmış olan, yükleme testi başında alt platen deliğine giren 40 milimetre uzunluğunda uç kısımlarına ek olarak delik içerisinde 50 milimetrelik ek deformasyon limitleri dahilinde itme testleri 35 milimetre deformasyon miktarına kadar devam ettirilmiştir. İtme testleri uygulanmadan önce kaya saplamaları ve üst platen kesit merkezleri temas halinde aynı düşey doğrultuda olacak şekilde hizalanmışlardır ve 50 mm/dakika yükleme hızı ile düşey yönde itme testleri uygulanmıştır.



Şekil 2.13. İtme testi uygulanan montajı tamamlanmış numune

### 2.2.3. Makaslama Testi

Sağ ve sol blokların mesnetlenmesi ve ortadaki bloğun düşey yönde itilmesi nedeni ile deformasyon kontrollü olarak polimer ve çelik saplamaların makaslama gerilmelerine karşı tepkileri test edilmiştir. Makaslama testleri de itme testleri gibi korozyon etkisini incelemek için farklı sürelerde bekletilmiş olan numunelere uygulanmıştır (1 gün ve 6 ay). Korozyon etkisinin görülmesi adına montajı yapılmış bloklar su içinde bekletilmişlerdir. Makaslama testi sonuçlarının çelik tüplerin yarı konumuna bağlı olarak değişmesi beklendiğinden, yarı ve yükleme doğrultusu arasındaki açı  $45^\circ$  olacak şekilde numune montajları yapılmıştır (yarık kenarlarını bağlayan doğru, düşey ile  $45^\circ$  açıya sahiptir). Üç parça halinde kesilmiş olan makaslama testi blokları sıra ile hizalanarak yerleştirilmiş ve kaya saplaması numuneleri montajları itme testi numunelerinde olduğu gibi 100mm/dakika yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Makaslama testlerinde ve itme (eksenel yükleme) testlerinde kullanılan kaya saplamaları aynı özelliklere sahiptir. Ayrıca, makaslama testlerinde kullanılan kaya

blokları itme testlerinde kullanılan bloklar ile aynı fiziksel özelliğe sahip olup aralarındaki fark makaslama testlerinde kullanılan blokların üç eş parçaya kesilerek ayrılmış olmalarıdır.

Makaslama numuneleri için kaya saplaması montajları yapıldıktan sonra uzun dönem numuneleri kür havuzuna alınmış ve kısa dönem numuneleri ise ertesi gün teste tabi tutulmuşlardır. Makaslama testleri için 3 parça halinde kesilmiş blokların sağ ve sol parçalarının altına düz yüzeyli 50 milimetre yüksekliğinde çelik platenler yerleştirilmiş ve ortadaki bloğun üst platen tarafından itilmesi neticesinde testler uygulanmıştır (Şekil 2.14). Makaslama testlerinde kullanılan blok numuneleri içindeki yatay konumdaki kaya saplamalarının kesit merkezleri ve üst platen kesit merkezinin düşey doğrultuda kesişmeleri için yükleme öncesi numuneler hizalanmıştır. Makaslama testlerinde yükleme hızı 10 mm/dakika olarak seçilmiştir.





Şekil 2.14. a) Makaslama testi, b) makaslanmış polimer saplama

#### 2.2.4. Çapsal Daralma Testleri

Çapsal daralma testleri için 20 santimetre uzunluğundaki çelik ve polimer tüpler yarık kenarları arasındaki doğru yükleme doğrultusu ile paralel olacak şekilde v bloğu kanalı içine yerleştirilmiştir (Şekil 2.15). Bu test ile kısa dönem ve su içinde kürlenmiş numunelerin birim

apsal daralmaları için gerekli olan yükler incelenmiştir. apsal daralma testi uygulanarak numunelerin yarıklarındaki daralma nedeni ile delik yüzeyine etkiyen normal gerilmeler hakkında karşılaştırma imkanı bulunabilmiş ve paslanma neticesinde değerlerdeki değişimin sürtünme ile yük taşıma performansı üzerindeki etkileri hakkında bilgi elde edilebilmiştir. apsal daralma testlerinde kullanılan 7 cm x 7 cm boyutlarındaki kare kesitli st platen saplama numuneleri uzunluklarını ortalayacak şekilde yükleme yapılmıştır.



şekil 2.15. apsal daralma testi

### 2.2.5. Sünme Testleri

Sünme direnci analizleri için itme testinde kullanılan bloklar kullanılmıştır. Kısa dönem itme testleri uygulanan, uçları montajları öncesinde delinmiş ikişer adet polimer ve elik tüp numuneleri, itme testlerinden sonra deliklerine bağlanan metal teller yardımı ile asılmışlardır. 15 kg kütleye sahip bloklar üzerine şekil 2.16'da görüldüğü gibi konulan ekstra 15 kilogram

değerindeki yükler ile 25 santimetre uzunluğundaki sürtünme yüzeyine yaklaşık 300 N düşey yük bir ay süre ile etki etmiş ve bu süreç sonunda sünme testi numunelerine Şekil 2.16d'de görüldüğü gibi ekstra 24 kilogram yük daha eklenerek, saplama ve blok sürtünme yüzeyine toplam yaklaşık 540 N değerinde kuvvet etkimiştir. Bu durumda, 2.16 kN/m değerindeki sabit yük altında numuneler 6 ay süre ile sünme testine tabi tutulmuşlardır. Delik ve saplama sürtünme yüzeyindeki sünme etkisinin incelenmesi için tüplerin blok dışına çıkmış olduğu sınırları işaretlenmiş ve sürtünme yüzeyindeki deformasyon, bloğun kayması neticesinde oluşabilecek yer değiştirmeler bu referans çizgilere bağlı olarak tayin edilmiştir. Sürtünme yüzeyindeki sünme analizlerinin yanı sıra, kaya saplamalarının blok dışında kalan kısımlarının boylarındaki hassas ölçüm yolu ile tüplerin de sünme etkileri incelenebilmiştir.



Şekil 2.16. a) Askıdaki polimer saplamalı bloklar, b ve c) blok üzerine konan 15 kilogram yük, d) blok üzerindeki 39 kilogram yük

### 2.2.6. Darbe Testleri

Polimer ve çelik saplama sürtünme yüzeylerinin darbe etkilerine karşı, kaya patlama problemlerinde olduğu gibi ani yüklenme durumundaki taşıma kapasiteleri değerlendirilmektedir. Bu test için bloklara montajı yapılmış kaya saplamalarının blok içine montajı yapılmayan kısımlarında delikler delinmiş ve bu deliklere yüksek dayanımlı çelik halat ile ağırlıklar bağlanmıştır. Delikler tüp kesitlerinin merkezinden ve karşılıklı tüp duvarlarından geçecek şekilde delinmiştir. Ağırlıklar belirli bir yükseklikten düştüklerinde bağlı oldukları halatın hareketi durdurması sebebi ile sahip olunan kinetik enerji sürtünme yüzeyinde kayma şeklinde harekete neden olmuştur. Darbe dayanımı testleri numunelere bağlanmış ağırlıkların serbest düşme hareketi ve halat boyu yüksekliğindeki hareket

tamamlandıktan sonra ani durma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu test, yüzeydeki sürtünmelere bağlı olarak bloklar saplamalardan sıyrılmaya kadar 1 metre uzunluğundaki halat ucuna takılan ağırlıklar her basamakta 4 kilogram artırılarak uygulanmıştır.

Darbe dayanımı numuneleri montajları öncesi saplamaların delik içine tam teması için split set konik uçlarının ve polimer tüplerinin açılı kesilmiş olan uçlarının sınırları çizilmiştir. Darbe dayanımı numunelerinin montajları tamamlandığı zaman çizilmiş uç sınırlarından daha fazla bir uzunluğun delik içinden dışarı çıkmaması, darbe esnasında yalnızca delik içine temas eden 8 cm uzunluğundaki kısmın yük taşıma kapasitesinin test edilmesi için delik boyu olan 8 cm uzunluğundaki kısım saplamalar üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 2.17). İşaretlenmiş bu aralık blok içinde kalana kadar numunelerin montajları gerçekleştirilmiştir. Darbe dayanımı numunelerinin montajları diğer test numunelerinin montajları gibi 100 mm/dakika yükleme hızı ile uygulanmıştır.

Sürtünme yüzeyi uzunluğu 8 cm olmak üzere darbe dayanımı testlerinde kullanılan bloklar 15 cm x 25 cm x 8 cm boyutlarındadır. Farklı ağırlıkların 1 metre yükseklikten düşmesi ile polimer ve çelik saplamaların kaya bloğu sürtünme yüzeyi ile darbe etkisinden kaynaklı deformasyon miktarları ve tamamen sıyrılmaları için gerekli enerji miktarları hesaplanmıştır. Şekil 2.18'de görüldüğü üzere ağırlıkların takıldığı kanca yukarı çekilip plastik bir kelepçe yardımı ile askıya alınmış ve test edilen ağırlıkların asılması ardından plastik kelepçe kesilerek saplamalara çelik halat ile bağlı olan yükün düşmesi sağlanmıştır.





Şekil 2.17. a) Çelik split setlerin blok içinde sürtünme yüzeyi temas konumunun çizilmesi, b) çelik split set montajı, c) Polimer tüplerin blok içindeki temas konumu sınırlarının çizilmesi, d) montajı tamamlanmış çelik ve polimer tüpler



Şekil 2.18. a) Darbe testi deney düzeneği, b) plastik kelepçenin kesilmesi, c) ağırlığın düşmesi, d) kaya saplamasının sıyrılmış olduğu numune

### 2.2.7. Doğrudan Çekme Testi

Bu çalışmada kullanılan 4 cm dış çapa ve 6 mm tek taraflı et kalınlığına sahip PP-R kompozit tüplerin aksenal yük altında taşıma kapasitesinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü olarak doğrudan çekme testleri uygulanmıştır (Şekil 3.7). Doğrudan çekme

testlerinde de PP-R kompozit tüplere uygulanan diğer testlerde olduğu gibi yarık genişliği 8 mm boyutundadır. Yükleme hızı 10 mm/dakika olan doğrudan çekme testlerinde kullanılan PP-R kompozit tüpler 50 cm uzunluğundadır.

### 2.2.8. Arazi Testleri

Kastamonu ili Küre İlçesinde bulunan yeraltı bakır madeninde gerçekleştirilen arazi testleri kapsamında 1.5 metre uzunluğunda PP-R kompozit tüpler sürtünmeli kaya saplaması olarak hazırlanmış, montajları gerçekleştirilmiş ve saplama çekme testi (pull-out test) ile taşıma kapasiteleri incelenmiştir. Laboratuvar çalışmalarında olduğu gibi arazi çalışmalarında da 40 mm dış çapa, 8 mm yarık genişliğine ve 6 mm tek taraflı et kalınlığına sahip PP-R kompozit tüpler uçları 45° açı ile kesilerek kullanılmıştır. Yeraltında uygulanmak üzere hazırlanan saplamaların yarıkları freze ile uzun kenarları boyunca oluşturulmuştur (Şekil 2.19). Laboratuvar testlerinde kullanılan aynı PP-R kompozit malzeme ile üretilmiş olan tüpler arazi çalışmalarında test edilmişlerdir.

Saplama çekme testlerinde tutma halkası olarak 63 mm dış çapa ve 41 mm iç çapa sahip başka bir PP-R kompozit tüp 32 mm uzunluğunda kesilmiştir. Bu boyutlar saplama çekme testi düzeneğinin tutma başlığı boyutlarına uygun olarak seçilmiştir. 63 mm dış çapa sahip halka, 40 mm dış çapa sahip zemine montajı yapılan PP-R kompozit tüpe yapıştırma ve çivileme ile sabitlenmiştir. Bu halka çekme testi düzeneği tutma başlığı ile kavranarak eksenel yükleme yapılabilmektedir.

Şekil 2.20'de görüldüğü gibi, plastik malzemeler için özel yapıştırıcı 40 mm çapındaki tüp üzerine uygulanmış ve 63 mm çapındaki tüp bu yapıştırıcı dökülen yüzeye geçirilerek yapıştırılmıştır. 63 mm ve 40 mm çaplara sahip iç içe yapıştırılmış olan tüpler birlikte 3 mm kalınlığındaki ayaklı matkap ucu kullanılarak delinmişlerdir. Her bir saplama numunesi için dörder adet oluşturulan bu deliklere 4 mm çapında paslanmaz çelik çiviler çakılmıştır.

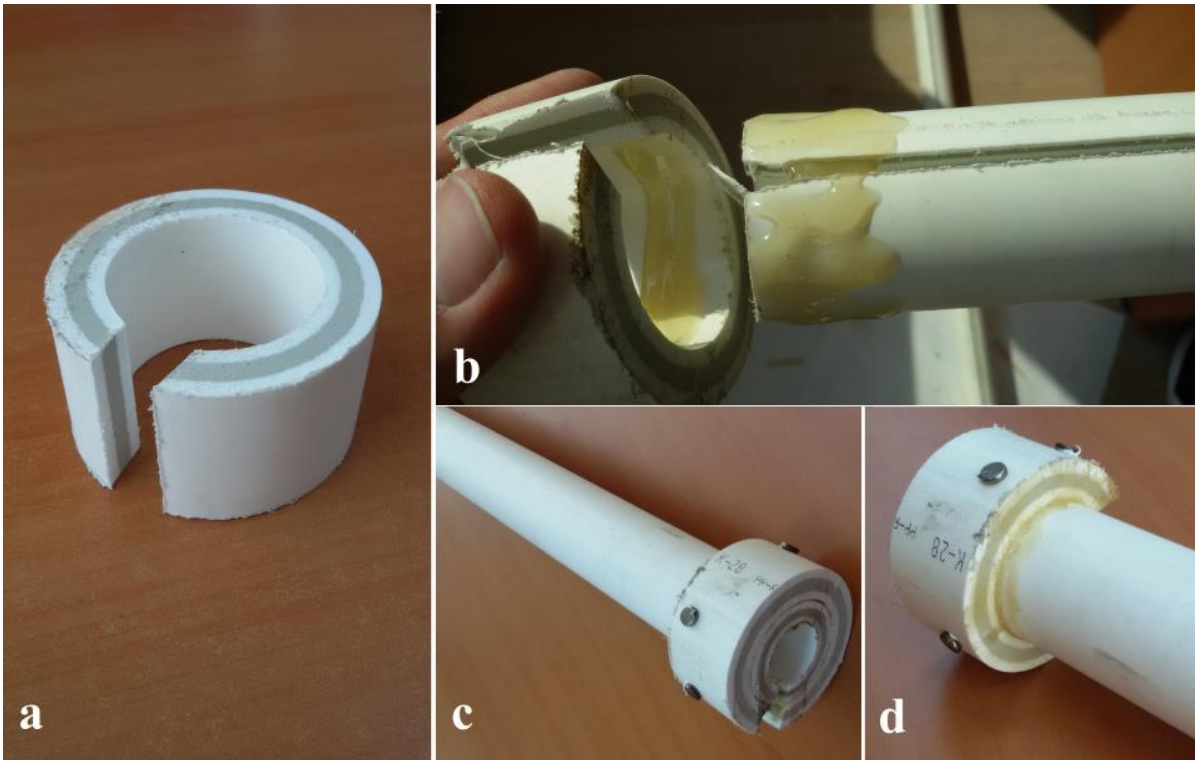
Hazırlanan PP-R kompozit saplamalar yeraltında 35 mm ve 37 mm çaplarındaki iki farklı delici bit ile delinen deliklere kaya saplaması delme ve montaj makinesi ile itilmişlerdir. İki farklı delici bit çapı kullanılmasındaki sebep itme esnasında karşılaşılan bükülmenin giderilmesi için çapın artırılmasıdır (Şekil 2.21). Ayrıca, bükülme probleminin giderilmesi için PP-R kompozit tüplerin içine 18 mm çapında demir yerleştirilerek deliğe itme işlemi



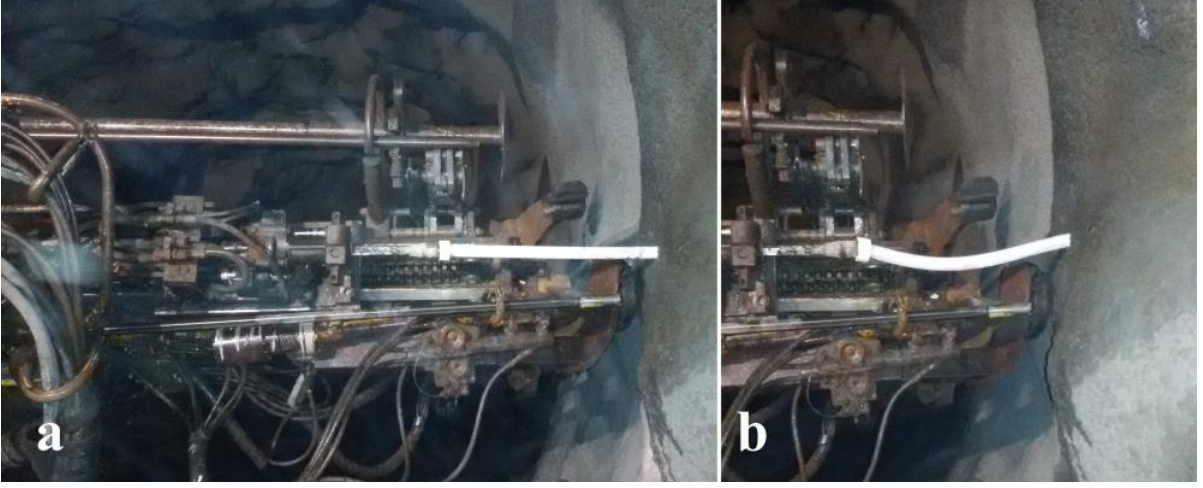
gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.22). Toplamda 24 adet PP-R kompozit saplama yeraltı testlerinde kullanılmıştır.



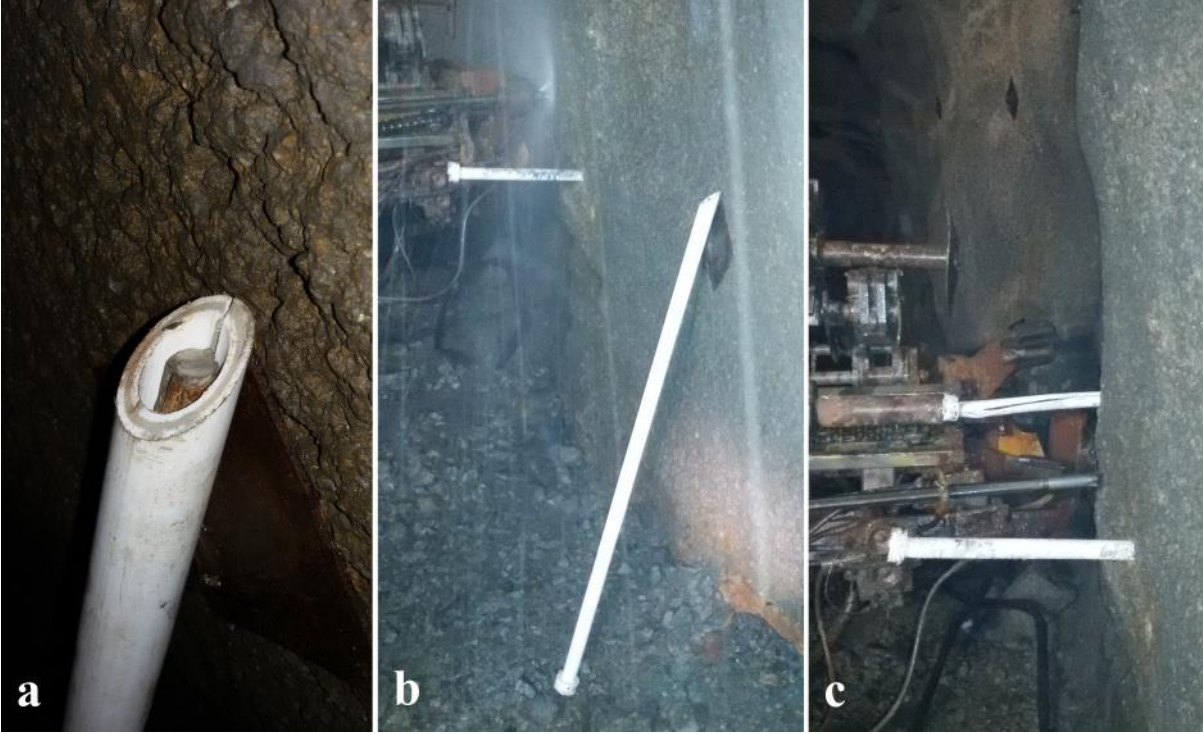
Şekil 2.19. Yeraltı testlerinde kullanılmak için hazırlanmış PP-R kompozit saplamalar



Şekil 2.20. Saplama tutma halkası (a), ve saplama ile birleştirilmesi (b, c, d)



Şekil 2.21. PP-R kompozit tüpün deliğe itilmesi (a), bükülme (b)



Şekil 2.22. PP-R kompozit tüplerin yeraltında montajı: a) Tüp içindeki demir ribar, b ve c) montajları yapılmakta olan bazı PP-R kompozit tüpler

### 2.3. Poliamid Saplamalara yönelik Testler

Bu çalışma kapsamında, popüler bir mühendislik polimeri olan Poliamid-6 türü termoplastik malzemenin kaya saptaması malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Polipropilen malzemelere nazaran dayanım

değerleri daha yüksek olması nedeni ile nispeten daha yüksek taşıma kapasitesi sağlayabilecek Poliamid-6 türü mühendislik polimerleri ile üretilmiş olan kaya saplamalarının tahkimat özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışma detayları sıradaki alt başlıklarda verilmektedir.

### 2.3.1. Doğrudan Çekme (Eksenel Yükleme Testleri)

35 mm çapında, 60 cm uzunluğundaki Poliamid-6 türü çubuklara (tutma/kavrama bölümleri dışında kalan serbest kısım 32 cm) eksenel yük altında taşıma kapasitesinin belirlenmesi için deformasyon kontrollü olarak doğrudan çekme testleri uygulanmıştır (Şekil 2.23). Yükleme hızı 10 mm/dakika olarak seçilen testlerde deformasyon tayini için LVDT kullanılmıştır.



Şekil 2.23. Poliamid saplama çekme testi



### 2.3.2. Makaslama Testleri

Poliamid çubuklara makaslama testleri yapılması için çubuk çapı ile aynı iç çapa sahip olan çelik halkalar kullanılmıştır. Şekil 2.24'te görüldüğü gibi ikiye ayrılmış olan ikişer adet çelik halka Poliamid çubukların alt ve üst mesnetleri olarak yerleştirilmiş, böylece düşey yönde hidrolik pres ile yükleme yapılması ile iki adet makaslama düzlemi oluşmuştur (Şekil 2.25 ve 2.26). Makaslama testlerinde yükleme hızı çekme testlerinde olduğu gibi 0.5 kN/saniye seçilmiştir. İki makaslama düzlemi arasındaki mesafe 8 cm ve bir makaslama düzlemi oluşturmak için yarı halka çiftleri içindeki mesafe 4 mm olarak seçilmiştir. Makaslama testlerinde kullanılan numuneler ve makasama düzlemlerinin görüntüleri Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de verilmektedir.



Şekil 2.24. Makaslama testlerinde kullanılan ayrılmış çelik halkalar



Şekil 2.25. Makaslama halkalarının poliamid rod ile kullanımları



Şekil 2.26. Makaslama testi



Şekil 2.27. Makaslanmış poliamid numune



Şekil 2.28. Makaslanmış poliamid numune

### 2.3.3. Sünme Testleri

Sünme testi kapsamında, 35 mm çapa sahip ve 24 cm uzunluğundaki Poliamid-6 çubuk numunesi 20 cm alt mesnetler arası mesafeye sahip olacak şekilde üç noktadan eğilme etkisi ile sabit yük altında bekletilmiştir. Kullanılmakta olan test düzeneğinde, ağırlık asılan koldaki yük değerinin 10 katı kadar bir yük numune üzerine etkimektedir. Yük koluna 30 kilogram ağırlık asılması neticesinde yaklaşık 3 kN değerinde sabit yük altında Poliamid çubuk numunesi bekletilmiştir. Sehimlenmeler 0,002 mm hassasiyete sahip deformasyon saati ile ölçülmüştür (Şekil 2.29). Eşitlik 2.1'de yer alan üç noktadan eğilme etkisi altındaki katı

dairesel kesitli silindirik numunelerin dolaylı çekme dayanımı değeri yaklaşımına göre numuneye etkileyen maksimum çekme gerilmesi 37 MPa olarak hesaplanmaktadır. Bu değer yaklaşık olarak Poliamid-6 için ölçülen çekme dayanımı değerinin yarısı kadardır.

$$\sigma_{tf}=(8FL)/\pi D^3 \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de yer alan F yük (kN), D çap (cm<sup>2</sup>), L alt mesnetler arası mesafe (cm) ve  $\sigma_{tf}$  eğilme etkisi altındaki çubuk numunesinin dış yüzeyinde oluşan çekme gerilmesini (MPa) ifade etmektedir.



Şekil 2.29. Poliamid sünme testi

#### 2.3.4. Çimento Enjeksiyonu ile Aderans ve Çekme/Çıkarma Testleri

30 mm çapa sahip poliamid çubuklara kaya saptaması uygulamalarında yaygın kullanılmakta olan çimento/su enkesiyonu ile aderans testi uygulanmıştır. Cem II türü

çimento ve su karışımını su/çimento oranı kütlece %40 olacak şekilde mikser içerisinde 8 dakika boyunca karıştırılarak hazırlanmış ve çapı 100 mm ve derinliği 200 mm olan kalıplar içine dökülmüştür. Çimento enjeksiyonu ile doldurulan kalıplar içerisine 30 mm çapında poliamid çubuklar yerleştirilmiş ve taze enjeksiyon şişleme ile sıkılarak homojenleştirme yapılmış, enjeksiyon ile poliamid numunelerin homojen çevrenmesi sağlanmıştır. Çimento/su karışımının 5 gün kürlenmesi sonrasında poliamid çubuklara çekme/çıkarma testleri uygulanmış ve aderans ile yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Şekil 2.30'da görüldüğü gibi taze enjeksiyon içerisinde poliamid saplama numunelerinin oynamadan bekletilmesi için saplama için içerisinden geçirildiği delikli sehpa kullanılmıştır. Üçer adet ucu kancalı ve kancasız olmak üzere toplam 6 adet poliamid saplama numunesine çimento enjeksiyonu içerisinde aderans (çekme/çıkarma) testleri uygulanmıştır.

Saplama ucundaki kancaların hazırlanması için poliamid saplama uçları 2 mm çapındaki ayaklı matkap ucu ile delinmiştir. Bir saplama üzerinde dörder adet delik delinmiş ve bu deliklere 90 mm x 15 mm x 2 mm boyutlarında delikli çelik plakalar vidalama yapılarak sabitlenmiştir. Kanca sabitleme için 2 mm çapındaki deliklere uygulanmak üzere 3 mm çapındaki vidalar kullanılmıştır. Plaka üzerindeki delik çapı 4 mm olup, sabitleme vidalarının delik dışında kalan 6 mm çapındaki baş kısımlarının sıkıştırılması ile kancalar sıkıca sabitlenmiştir. Enjeksiyon içerisinde daha iyi ankraj sağlaması için kanca plakaları mengene kullanılarak 15°-20° aralığında eğildikten sonra saplama uçlarına sabitlenmiştir. Kancalı poliamid saplama ucunun hazırlanması işlemlerine yönelik görseller Şekil 2.31'de verilmiştir. Poliamid saplama ucunun çimento enjeksiyonu ile temas uzunluğu ortalama 19 cm olup, her numune için saplama-enjeksiyon temas uzunluğu (kürlenmiş enjeksiyonun yüksekliği) hassas olarak ölçülerek not edilmiştir.

Çimento enjeksiyonunun 5 gün süre ile kürlenmesi neticesinde numuneler doğrudan çekme testi düzeneğinin üzerinde bulunan delikten ters çevirilerek geçirilmiş ve Şekil 2.32'de görüldüğü gibi düzenek üzerine oturtulmuştur. Doğrudan çekme testi düzeneğinin düşey yönde hareketli olan alt kavrama/tutma bölümü ile poliamid saplama numuneleri tutularak deformasyon kontrollü çekme/çıkarma testleri uygulanmıştır.

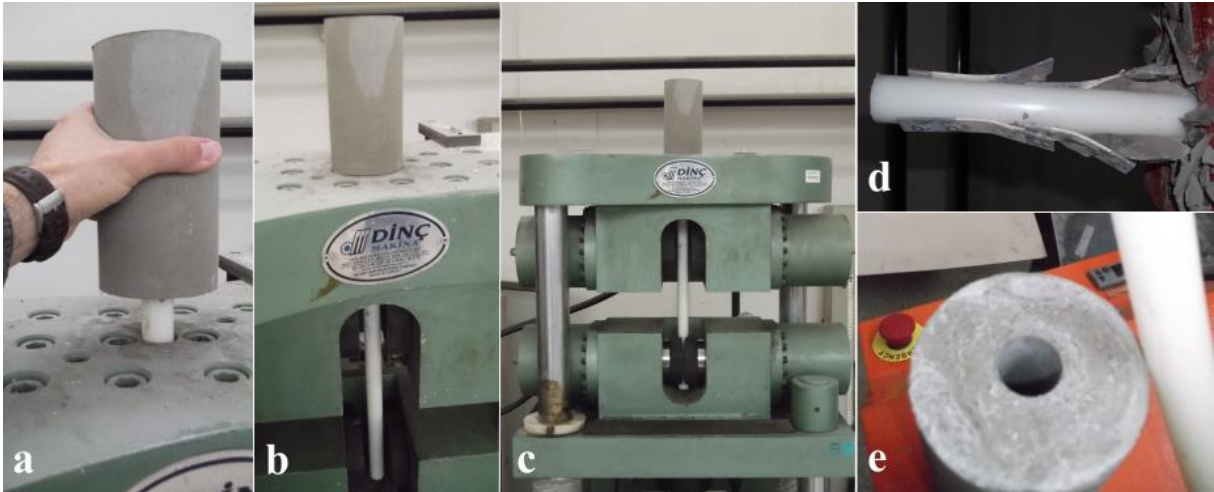




Şekil 2.30. Poliamid çekme/çıkarma numunelerinin hazırlanması: a) çimento/su karışımının hazırlandığı mikser, b) çimento enjeksiyonunun kalıplara dökülmesi, c) şişleme, d ve e) enjeksiyon içine yerleştirilmiş poliamid saplama ve tekrar şişleme, f) delikli saplama tutma sehvası ve saplamaların oynamaması için bantlanmış delik, g) saplama tutma sehvası ve enjeksiyon içerisindeki poliamid saplamalar.



Şekil 2.31. Poliamid saplama ucundaki kanca: a) ucu delinmiş poliamid saplama, b ve c) vidalanmış kanca, d) kancalı ve kancasız poliamid sapsamalar



Şekil 2.32. Poliamid sapsamalara uygulanan çekme çıkarma testi: a, b) Poliamid çubuğun test düzeneğine oturtulması, c) numunenin yüklenmesi, d) yenilmiş numune içindeki kanca, e) kancasız poliamid numunenin çimento içinden sıyrılması.

#### 2.4. Çalışmalarda Kullanılan Polimerlerin Maliyetleri

Tüketilen malzeme miktarına göre, kaya saplamalarının poliüre ile kaplanma maliyeti yaklaşık metre başına 0,6 Amerikan Doları olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, iyi polimerleşme ve çelik yüzeyine yapışma açısından profesyonel ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Bu uygulamada kullanılan profesyonel poliüre püskürtme ekipmanının maliyeti yaklaşık 25000 Amerikan Dolarıdır. İşçilik maliyetleri ise oldukça düşüktür; iki kişinin 100 adet üzerinde kaya saplamasını rahatlıkla bir saat içerisinde kaplayabileceği görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında test edilen cam lif katkılı PP-R kompozit boruların fiyatı perakende alımlar için 3,3 Amerikan Doları/metre değerindedir. 2 – 2,4 metre uzunluğunda tipik bir çelik split set fiyatının 7 - 8 Amerikan Doları aralığında olduğu göz önünde bulundurulduğunda, PP-R kompozit boruların çelik split setler ile benzer maliyetlere sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Poliamid-6 türü malzemenin çubuk olarak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş halde kilogram fiyatı 5 Amerikan Doları değerindedir ve çapı 35 mm olan katı kesitli poliamid kaya saplamaları 4,8 Amerikan Doları/metre fiyatı ile temin edilebilmektedir.

### 3. BULGULAR

Tez kapsamında incelenen üç farklı polimer malzeme için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular sıradaki altbaşlıklar halinde verilmiştir.

#### 3.1. Poliüre Püskürtme Membran Kaplamalı Kaya Saplamlarına yönelik Bulgular

Polimer kaplanmamış split-set numuneler için ilk hafta sonunda maksimum taşıma kapasiteleri  $40 \pm 5$  kN değerindeyken, altıncı ay sonuna gelindiğinde büyük oranda düşüş yaşanarak 25 kN ve daha düşük değerler ölçülmüştür. Şekil 3.1’de 6 aylık süreçte korozyona uğramış olan ve 18 kN çekme testi sonucuna sahip bir kaya saplaması görülmektedir. Poliüre kaplamalı split-setler için ise, saplama ve delik temas yüzeyinde meydana gelen adezif bir yenilme olmamıştır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi tüm testler çelik kırılması nedeni ile sonlandırılmıştır. Korozyondan kaynaklı yük değerlerinde düşüş yaşanmamış ve ortalama 81 kN seviyesinde çelik kırılmaları gerçekleşmiştir. Split set testlerine yönelik sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Split set numuneleri için çekme testi sonuçları (P: poliüre kaplamalı, K: kaplamasız,  $F_u$ : maksimum yük,  $S.D$ : standart sapma)

Numune Türü	$F_u$ (kN)	$S. D.$ (kN)	Numune Sayısı
P (1 Hafta)	82,4	6,6	5
P (5 Hafta)	83,8	5,8	5
P (6 Ay)	78,2	5,4	5
K (1 Hafta)	40,4	3,7	5
K (5 Hafta)	33,4	4,9	5
K (6 Ay)	21,4	3,2	5



Şekil 3.1. Korozyona uğramış split-set



Şekil 3.2. Kırılmış split-set çeliği



Deneilerin gerçekleştirildiği bölgede rutin olarak uygulanan 30'un üzerinde çekme testi sonuçlarına göre, kaplamasız ribarların enjeksiyon ve montaj detaylarına bağlı olarak ilk 6 aylık periyot içerisinde genellikle 80 kN ve 120 kN aralığında değişen taşıma kapasiteleri olduğu görülmüştür. Maksimum yüke ulaşılması esnasında çelik ribarların delik içinden sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Kaplamalı ribarlar için ise taşıma kapasiteleri test ekipmanının maksimum yük değeri olan 200 kN mertebesine ulaşılması sebebiyle belirlenememiştir. Bu nedenle, tüm numuneler için (1 hafta, 5 hafta, 6 ay) kaplamalı ribarların taşıma kapasitesinin 200 kN değerinin üzerinde olduğu söylenebilir (Tablo 3.2). Bu ribarlara ek olarak, 6 adet ekstra ribar boylarının yarısı kaplanmış olarak test edilmiştir ve sonuç tamamı kaplanmış ribarlar ile aynı olmuştur; maksimum yük esnasında herhangi bir yenilme yaşanmamıştır. Korozyondan koruma amaçlı olarak uygulanan poliüre, kaya saplamalarının taşıma kapasiteleri açısından da oldukça önemli oranda artış sağlamıştır.

Tablo 3.2. Dolgulu ribarlar için çekme testi sonuçları

Numune Türü	Test Süreleri	$F_u$ (kN)
P	1 hafta, 5 hafta, 6 ay	>200
K	1 ay – 6 ay	80-120

### 3.2. Polipropilen Kompozit Sürtünmeli Kaya Saplamalarına yönelik Bulgular

Montaj esnasında elde edilen yük deformasyon ilişkileri Tablo 3.3-3.5'te itme testi, makaslama testi ve darbe testi numuneleri için verilmiştir. Sonuçlara göre polimer tüplerin montajları esnasındaki değerler arasındaki sapmaların çelik tüplere nazaran daha yüksek olduğu görülmüştür. Polimer tüplerin montajı esnasındaki yük-deformasyon ilişkilerinin farklı numunelere göre gösterdiği geniş aralıktaki değişim Şekil 3.3'te verilmektedir.

Polimer tüplerin itme testlerinde elde edilen yük-deformasyon eğrileri ve ilişkilerinin çelik saplamalarınkine nazaran farklı olduğu görülmüştür. Çelik tüpler maksimum yük değerine ulaştıktan sonra kayma esnasında benzer gerilmeler altında deformasyona devam ederken, polimer tüplerin delik içinde kaymaya devam etmesi için önemli ölçüde yük artışı yaşanmıştır. Tablo 3.6'da kaymaya başlanan yük (PL) ve 35 milimetre deformasyon sonrası testler sonlandırıldığında ölçülen yükler (ML) verilmektedir. Ek olarak, Şekil 3.4 ile çelik ve polipropilen tüpler için itme testlerinden elde edilen bazı yük deformasyon grafikleri verilmiştir.

Ayrıca, itme testlerinde kaymaya başlama (plastik deformasyon) için ölçülen yük değerleri (PL) ile montaj esnasındaki ulaşılan maksimum yük (IL) değerleri arasındaki oranlar da Tablo 3.6'da verilmektedir. Kısa dönem testlerinden elde edilen değerleri içeren Tablo 3.6'daki aynı parametreler için uzun dönem testlerinden elde edilen değerler Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.3. İtme testi numuneleri montajlarında ölçülen maksimum yükler (P: Polimer, S: Çelik)

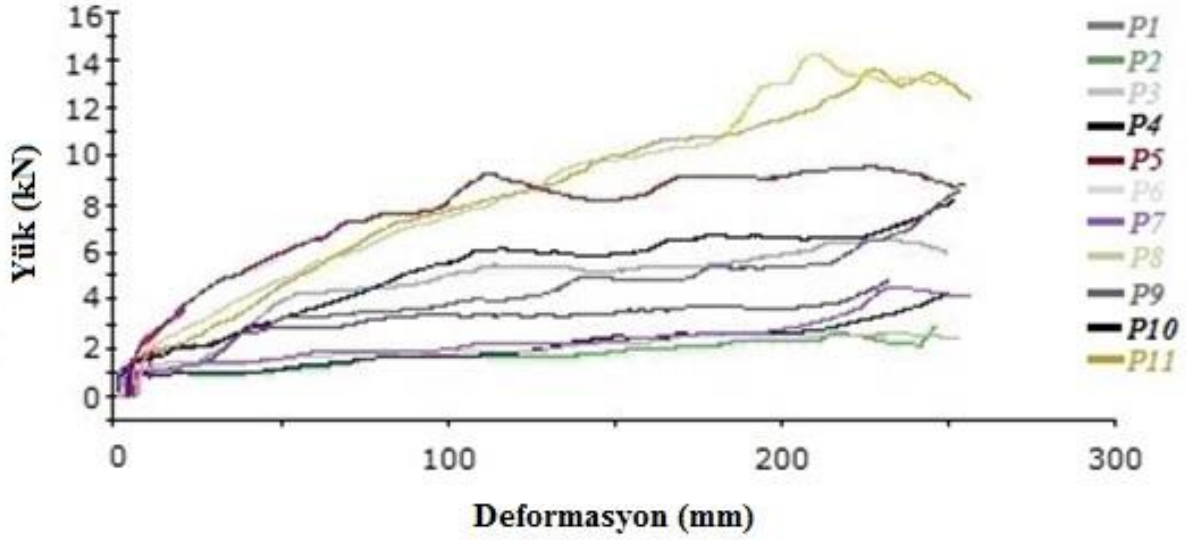
Numune ismi	Yük (kN)	Numune ismi	Yük (kN)
P1	4,87	S1	7,99
P2	2,99	S2	4,73
P3	6,57	S3	8,23
P4	4,32	S4	10,89
P5	9,83	S5	14,64
P6	2,65	S6	10,05
P7	4,60	S7	8,14
P8	14,33	S8	9,30
P9	8,64	S9	9,44
P10	8,26		
P11	13,70		
Ortalama	7,34	Ortalama	9,27
Standart sapma	4,03	Standart sapma	2,66

Tablo 3.4. Makaslama testi numuneleri montajları esnasında ölçülen maksimum yükler

Numune ismi	Yük (kN)	Numune ismi	Yük (kN)
P1	7,51	S1	9,44
P2	2,51	S2	8,81
P3	6,43	S3	7,73
P4	5,40	S4	10,12

Tablo 3.5. Darbe testi numuneleri montajlarında maksimum yükler

Numune ismi	Yük (kN)
P1	2,54
P2	5,70
P3	4,75
S1	7,60
S2	6,81
S3	7,49



Şekil 3.3. İtme testi polimer numunelerinin montajları esnasındaki yük-deformasyon ilişkileri

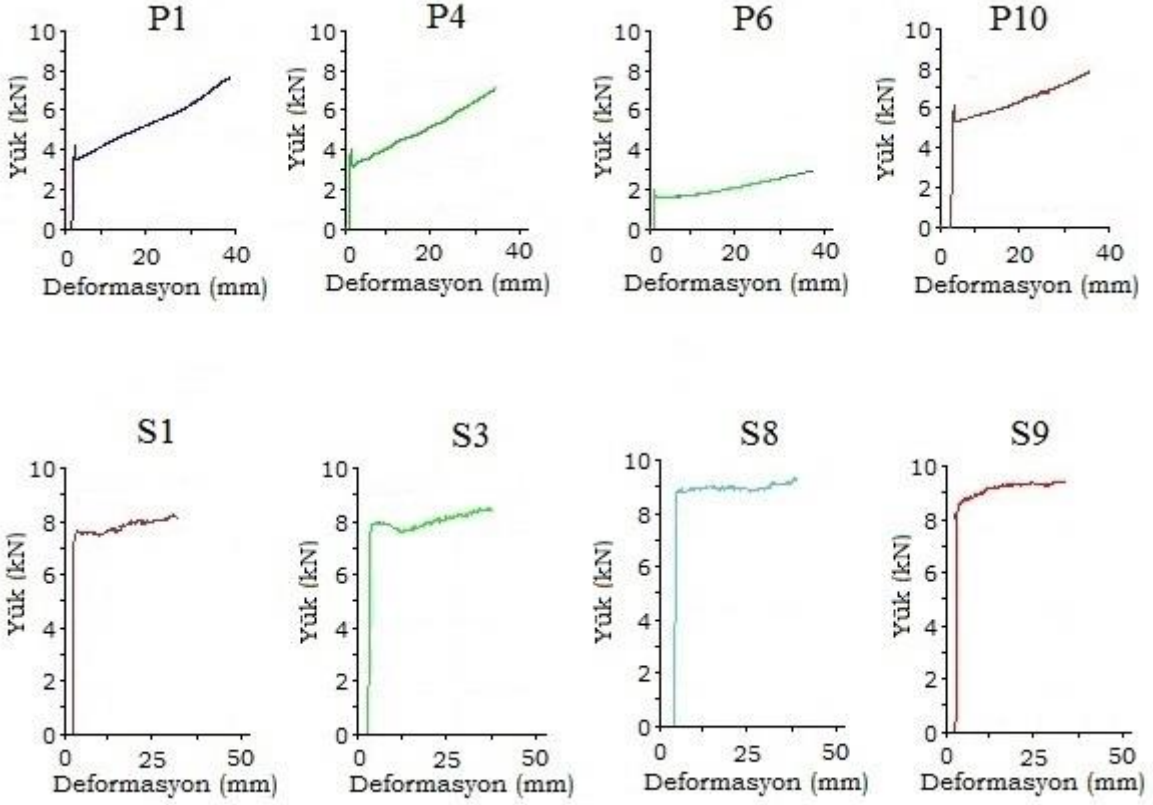
Tablo 3.6. Kısa dönem itme testi sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik)

Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)	Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)
P1	4,18	86	3,93	7,72	S1	7,55	95	6,28	8,60
P4	4,07	94	6,46	7,03	S3	7,94	96	4,41	8,50
P5	6,05	62	4,81	4,06	S8	8,86	95	7,38	9,32
P6	2,00	76	3,78	2,91	S9	8,67	92	6,60	9,37
P8	8,71	61	5,53	7,70					
P10	6,16	75	6,41	7,95					
Ortalama	5,20	76	5,15	6,23	Ortalama	8,23	95	6,17	8,95

Tablo 3.7. Uzun dönem itme testi sonuçları (P: Polipropilen, S: Çelik)

Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)	Numune ismi	PL (kN)	PL/IL (%)	Katılık (kN/mm)	ML (kN)
P2	1,56	52	2,93	3,35	S2	3,59	76	2,38	3,91
P3	3,50	53	4,68	5,34	S4	6,92	64	3,65	6,04
P7	2,79	61	3,01	7,08	S6	6,96	69	3,31	7,59
P9	4,68	54	3,18	4,15	S5	8,08	55	3,09	7,88
P11	6,63	48	4,03	9,23	S7	4,82	59	2,94	3,96
Ortalama	3,83	54	3,57	5,83	Ortalama	6,07	65	3,07	5,88





Şekil 3.4. Kısa dönem itme testleri yük-deformasyon eğrileri

Makaslama testlerinden elde edilen maksimum yük ve plastik deformasyon öncesi yük deformasyon ilişkilerine yönelik ölçülen veriler Tablo 3.8’de verilmiştir. Tablolarda yer alan katılık değerleri saplamaların taşıma kapasitelerinin %50 değerlerine ulaştıkları gerilme ve deformasyon değerleri dikkate alınarak verilmiştir. Çelik tüp montajı yapılmış olan kısa dönem (paslanmamış) numunelerin makaslama testleri kaya bloğu kırılması nedeni ile sonlandırılmıştır. Polipropilen ve çelik saplamaların makaslama testlerinden elde edilen tipik yük-deformasyon ilişkilerini gösteren test sonuçları Şekil 3.5’te verilmiştir. Test sonuçlarına göre, polimer tüpler yenilme esnasında sünek malzeme özelliği göstermişlerdir. Uzun dönem makaslama testi numuneleri için testler blokların kırılması ile son bulmuştur. Makaslama testleri ile ölçülen katılık değerlerine göre polipropilen kompozit saplamaların çeliğe alternatif olabileceğine dair bulgu elde edilmiştir. Aynı zamanda, korozyona uğramış çelik split setlerin de aksel yüklemeye testlerinden elde edilen sürtünme yüzeyindeki yük deformasyon ilişkileri paslanma neticesinde çelik saplamaların katılık değerlerinde önemli bir azalma yaşandığını göstermiştir. Çapsal daralma testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri ve yüke bağlı çapsal daralma ilişkileri sırası ile Tablo 3.9 ve Şekil 3.6’da verilmektedir.

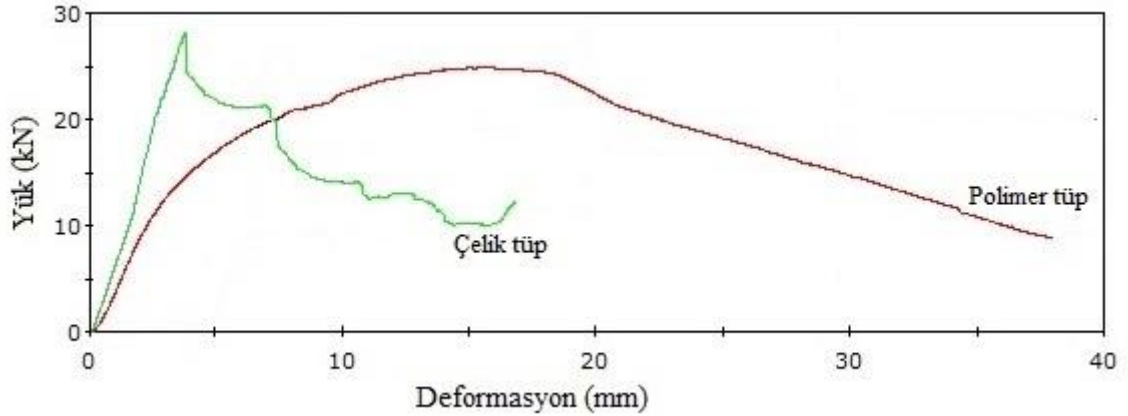
Tablo 3.8. Makaslama testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri

Kısa dönem			Uzun dönem		
Numune adı	Yük (kN)	Katılık (kN/mm)	Numune adı	Yük (kN)	Katılık (kN/mm)
P1	24,88	4,85	P3	20,63	3,95
P2	25,41	4,70	P4	19,16	4,36
S1	28,37	6,67	S3	21,67	4,51
S2	30,55	6,51	S4	20,04	5,02

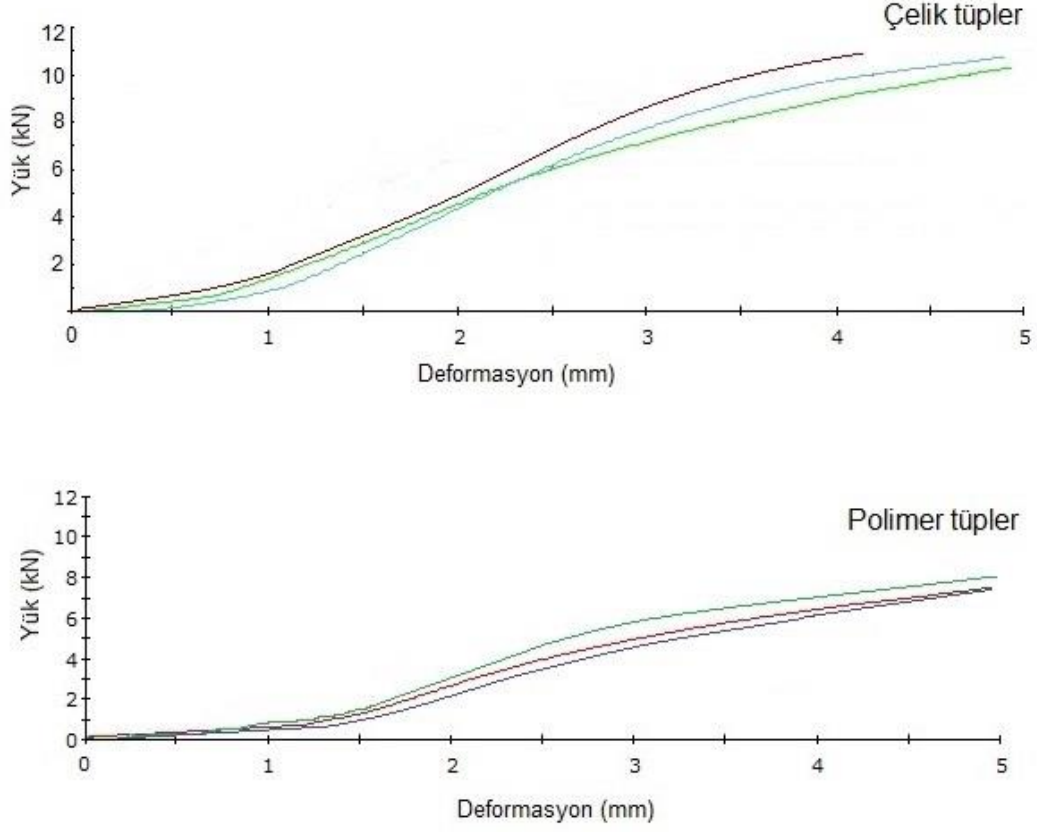
Tablo 3.9. Çapsal daralma testi verileri

Kısa dönem				Uzun dönem			
Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)	Numune adı	Yük (kN)
P1	7,14	S1	11,13	P1	8,03	S1	7,69
P2	6,87	S2	10,30	P2	6,71	S2	6,83
P3	7,39	S3	11,08	P3	7,14	S3	7,60
Ortalama	7,13	Ortalama	10,84	Ortalama	7,29	Ortalama	7,37

Ani yükleme (darbe) testlerinden elde edilen sürtünme yüzeyindeki deformasyon (sıyırılma) değerleri Tablo 3.10'da verilmektedir. Sünme testi sonuçlarına göre ise çelik ve polipropilen kompozit tüplerin 6 ay süre ile 540 N (sürtünme yüzeyi için 2,16 kN/m) sabit yük altında beklemeleri sonucu sürtünme yüzeylerinde veya saplama malzemelerinde deformasyon gözlemlenmemiştir. PP-R kompozit saplamalara uygulanan doğrudan çekme testi ile elde edilen taşıma kapasitesi ve elastik deformasyon aralığı için katılık (yük/deformasyon oranı) değerleri Tablo 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Çelik ve polimer tüpler için kısa dönem makaslama testi yük-deformasyon eğrileri



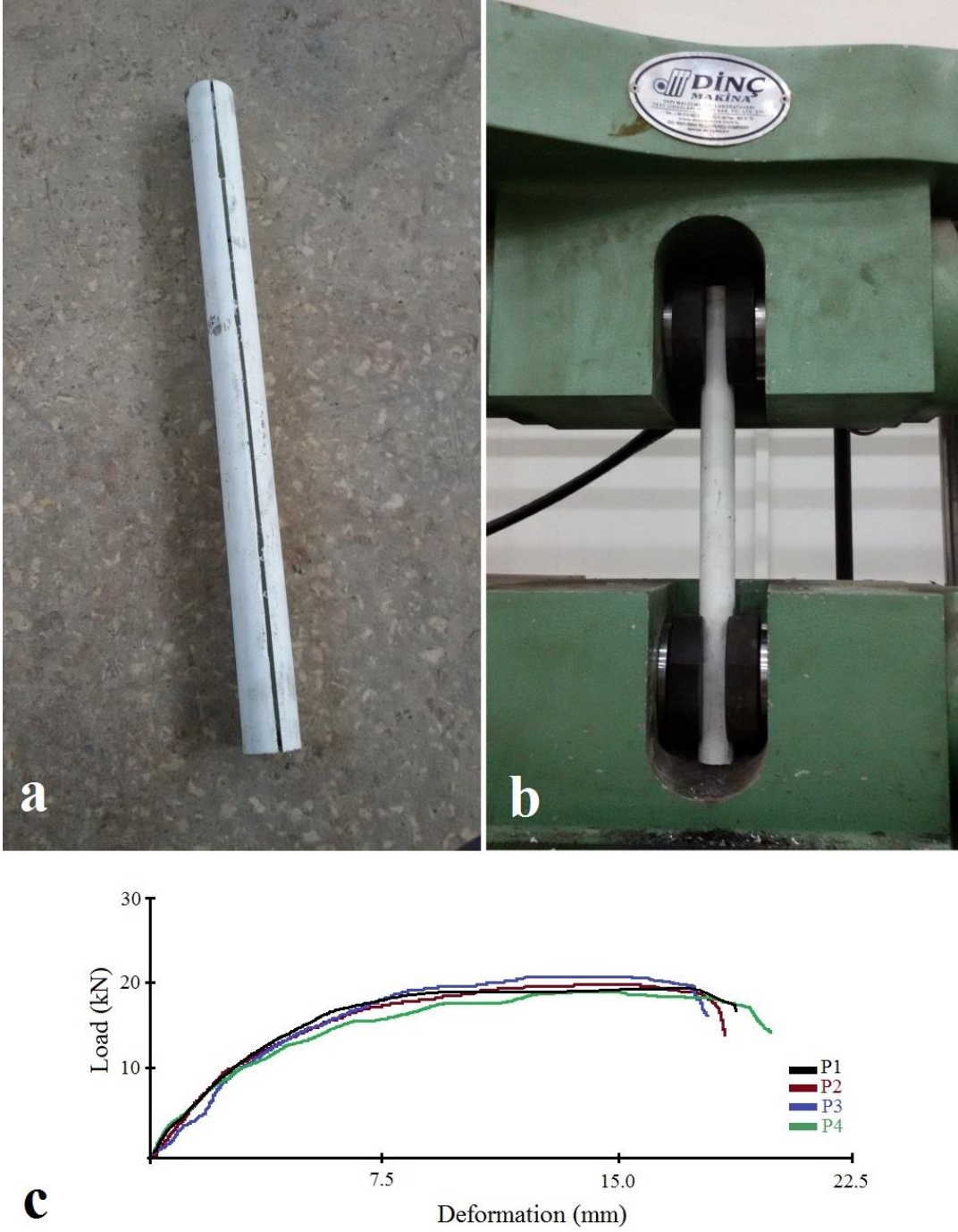
Şekil 3.6. Çapsal daralma testi numuneleri için yük-deformasyon grafikleri (kısa dönem)

Tablo 3.10. Ani yük testi sürtünme yüzeyindeki deformasyon verileri (T.F = tamamen saplamanın kaya bloğundan sıyrılması)

Kütle	Polimer tüp			Kütle	Çelik tüp		
	Polimer tüp 1	Polimer tüp 2	Polimer tüp 3		Çelik tüp 1	Çelik tüp 2	Çelik tüp 3
4 kg	2,0 cm	0,5 cm	1,6 cm	4 kg	0	0 cm	0 cm
8 kg	1,8 cm	0,7 cm	2,2 cm	8 kg	1,8 cm	0 cm	1,1 cm
12 kg	1,8 cm	1,2 cm	2,1 cm	12 kg	2,3 cm	1,0 cm	2,0 cm
16 kg	T.F.	3,3 cm	T.F.	16 kg	TF	0,6 cm	2,8 cm
20 kg	-	T.F.	-	20 kg		3,5 cm	T.F.
24 kg	-	-	-	24 kg		T.F.	

Tablo 3.11. PP-R kompozit saplama doğrudan çekme (eksenel yük) testi sonuçları

Numune adı	Yük (kN)	Katılık (kN/mm)	Deformasyon (mm)
P1	19,14	4,06	18,95
P2	19,68	4,25	18,41
P3	20,72	3,89	17,85
P4	18,69	3,54	19,52
Ortalama	19,56	3,94	18,68



Şekil 3.7. PP-R tüplere uygulanan doğrudan çekme testi (a, b) ve yük deformasyon eğrileri (c)

Arazi testlerinde, 40 mm dış çapa sahip olan PP-R kompozit tüplerin 35 cm – 40 cm uzunluğundaki bölümlerinin 35 mm çapındaki deliklere girmesi ile montaj esnasında bükülme yaşanmış, bu sebeple saplamaların montajlarına 37 mm çapındaki deliklerde devam edilmiştir. Delik çapının 35 mm'den 37 mm'ye çıkarılması ile saplamaların delik içine giren

kısımlarının uzunluğu 90 cm seviyelerine kadar çıkmıştır. Delik içerisine giren bölümün uzunluğunun artışı ile montajın devam ettirilmesi için gereken kuvvetin artması nedeni ile saplamaların dışarda kalan kısımlarında yine bükülme görülmüştür. Bu durumun çözümü için PP-R kompozit tüpler içerisine 18 mm çapında demir ribar konularak deliklere itilmişlerdir. Ancak, 1,5 metre uzunluğundaki tüplerin tamamı bu uygulama ile delik içerisine yerleştirilememiş ve 40-45 cm aralığında bir bölüm dışarda kalmıştır (Şekil 2.22). Montajı tamamlanamayan 1,5 metre uzunluğundaki saplamalara çekme testi uygulanamamıştır, ancak saplama montaj makinesinin tutma kolu ile saplamaların deliklerinden çıkarılmaya çalışılması neticesinde 1,1 metre uzunluğundaki PP-R yüzeyin delik içerisinde sürtünme ile yük taşıma kapasitesinin saplama gövde dayanımı değerine erişilmesi için yeterli olduğu görülmüş ve Şekil 3.8’de görüldüğü gibi PP-R saplama gövdesinde yenilme gerçekleşmiştir.

Birim uzunluk için sürtünme ile yük taşıma kapasitesi değerlerinin elde edilebilmesi için saplama boyu 0,9 metreye düşürülerek saplama montajlarına devam edilmiştir. 0,9 metre uzunluğundaki saplamaların montajlarında ufak bükülmeler gözlemlenmiş olsa da tamamlanabilmiş ve saplama çekme çıkarma testleri gerçekleştirilmiştir. 0,9 metre uzunluğa sahip saplamaların montajları 1,5 metre uzunluğundaki saplamalarda olduğu gibi tüp içerilerine demir ribar yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Ortalama olarak 14 kN değerine ulaşılması ile saplama tutma halkasındaki sıyrılma nedeni ile 0,9 metre uzunluğa sahip saplamalara uygulanan testler sonlandırılmıştır. Montaj esnasında tam aksenal yüklenememe nedeni ile saplama tutma halkalarının birleşim yerlerinde gözle görünen plastik deformasyon neticesinde tutma halkasının taşıma kapasitesinin azalmış olması bu sonuç üzerinde etkin role sahiptir. Şekil 3.9’da saplama tutma halkası birleşiminde yenilme görülmektedir.

Saplama boyu 0,6 metreye düşürülerek saplama montajlarına devam edilmiştir. 0,6 metre uzunluğundaki saplama montajlarında bükülme problemi gözlemlenmemiş ve saplama çekme testlerinde delik ve saplama sürtünme arayüzeyine ait taşıma kapasitesi değerleri ölçülebilmştir. Elde edilen verilere göre, 0,6 metre uzunluğundaki saplama/delik arayüzeyinin sürtünme ile yük taşıma kapasitesi ortalama 15 kN olarak belirlenmiştir. Laboratuvar testlerine paralel olarak sıyrılma yaşanması neticesinde yük değerlerinde ufak bir aralıkta azalma ardından bir numune haricinde sıyrılmanın devamı için tekrar yük artışı gözlemlenmiştir. Saplama çekme testlerinden elde edilen verilere yönelik detaylar Tablo 3.12’de verilmiştir.

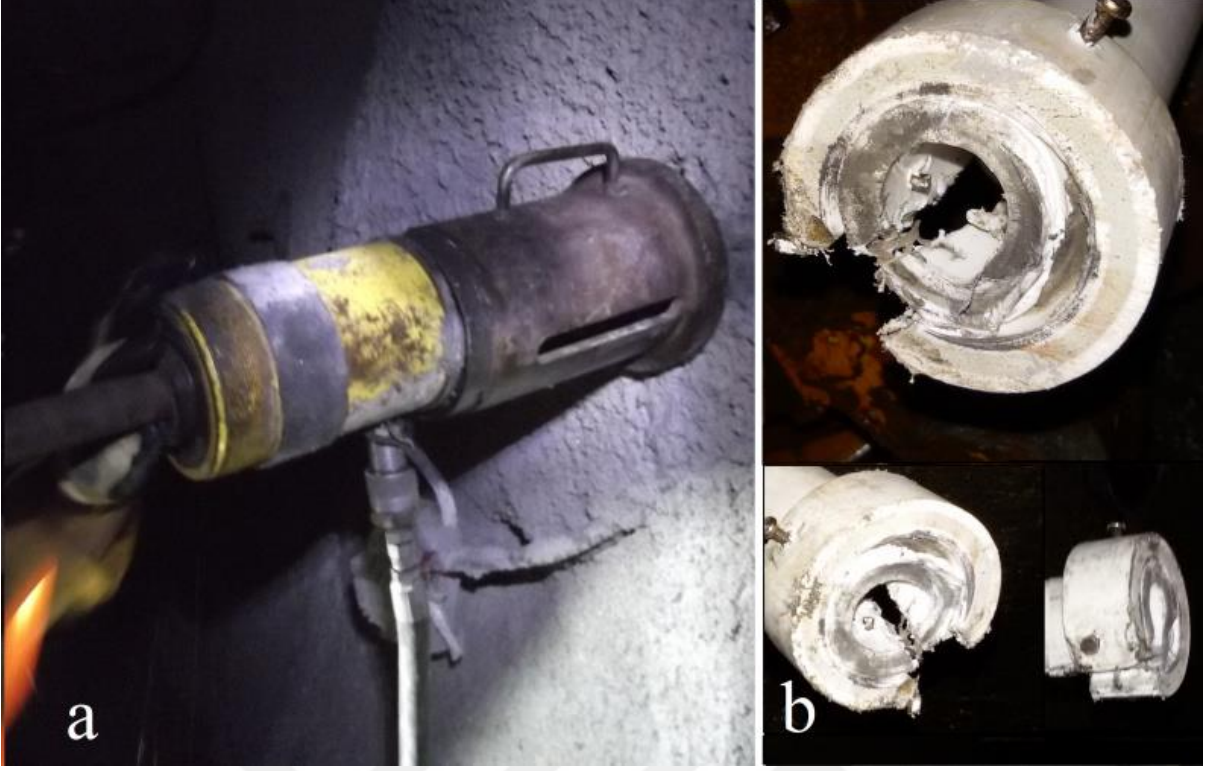
Tablo 3.12. Saplama çekme testi sonuçları (U: içine demir konmayan saplama, R: içine demir yerleştirilerek montajı yapılan saplama, 1,5: 1,5 metre uzunluktaki saplama, 0,9: 0,9 metre uzunluktaki saplama, 0,6: 0,6 metre uzunluktaki saplama)

Numune adı	Numune sayısı	Saplama çekme testi gözlemi	Çekme testi sonucu	Standart sapma
U-1,5-35	4	Bükülme problemi nedeni ile tamamlanamayan montaj	-	-
U-1,5-37	5	Bükülme problemi nedeni ile tamamlanamayan montaj	-	-
R-1,5-37	5	Bükülme problemi nedeni ile tamamlanamayan montaj	-	-
R-0,9-37	5	Saplama tutma halkası birleşiminde yenilme	14 kN (>14 kN)	1,1 kN
R-0,6-37	5	Sürtünme arayüzeyinde yenilme	15 kN	0,7 kN



Şekil 3.8. Delik içerisinden çekme kuvveti ile gövdesi yenilmiş PP-R kompozit tüpler

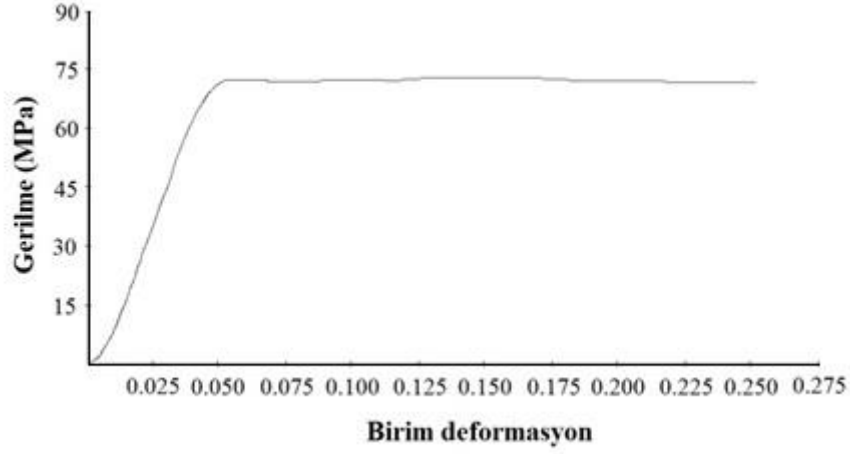




Şekil 3.9. a) Saplama çekme testi, b) saplama tutma halkası birleşiminde yenilme

### 3.3. Poliamid Saplama Numunelerine yönelik Bulgular

Poliamid çubuklara uygulanan çekme testi neticesinde %25 birim deformasyon limitine gelinmesi ile test durdurulmuş ve test sonlandırılana kadar yük değerlerinde düşüş yaşanmadan poliamid numuneler deformasyonuna devam etmiş, kopma yaşanmamıştır. Plastik davranış başlangıcına kadar olan bölümde yaklaşık %4 lineer elastik olarak deformasyon sergilenmiş ve ardından kısa bir aralıktaki elasto-platik deformasyonun tamamlanması ile başlayan plastik deformasyon gerilme değerlerinde azalma olmaksızın test sonuçlandırılana kadar devam etmiştir (Şekil 3.10). Lineer elastik deformasyon eğrisi baz alınarak hesaplanan poliamid malzemenin Elastisite modülü değeri 2 GPa olarak belirlenmiştir. Poliamid çubuk malzemesinin çekme dayanımı ise elde edilen sonuca göre 75 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10. Poliamid saplama çekme testinden elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği

Makaslama testleri ile elde edilen sonuçlara göre, Poliamid çubuk 131 kN yük değerine ulaşılması neticesinde gerilme düşüşü yaşamadan plastik deformasyona (akmaya) başlamıştır ve sabit gerilme altında makaslama düzlemindeki 1.4 cm akma neticesinde poliamid numunenin platen yüzeyine değmesi ile test sonlandırılmıştır. Makaslama testi sonucunda kopma veya çatlak oluşumu yaşanmaksızın plastik deformasyon göstermiş olan poliamid numune Şekil 2.27 ve Şekil 2.28’de görülmektedir. Makaslama testinde kullanılan numune üzerinde iki adet makasla düzleminin oluşması sebebi ile çubuk kesit alanının iki ile çarpılması ile elde edilen makaslama dayanımı değeri 68 MPa olarak hesaplanmaktadır.

Poliamid sünme testi deneyinden elde edilen zamana bağlı sehim değerleri Tablo 3.13’te verilmiştir.



Tablo 3.13. Poliamid sünme testi ile elde edilen zamana bağlı sehim değerleri

Süre	Sehim (mm)
2 dakika	0,004
4 dakika	0,008
6 dakika	0,012
8 dakika	0,014
10 dakika	0,016
12 dakika	0,016
15 dakika	0,018
100 dakika	0,036
1 gün	0,068
2 gün	0,072
5 gün	0,088
10 gün	0,090
15 gün	0,090
30 gün	0,092
60 gün	0,094
90 gün	0,096
120 gün	0,100
150 gün	0,100

Poliamid saplama çekme/çıkarma testinden elde edilen kancalı ve kancasız tasarımlar için maksimum yük değerleri Tablo 3.14’te verilmiştir. Poliamid saptamalara uygulanan aderans testlerinde kancasız saptamaların delik içinden sıyrıldığı, saplama ve enjeksiyon arayüzeyinde gerçekleşen adezif yenilme gözlemlenmiştir. Kancalı saptamalara uygulanan testler ise enjeksiyon malzemesinde yenilme nedeni ile tamamlanmıştır.

Tablo 3.14. Poliamid saptamalar için aderans (çekme/çıkarma) testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri

Numune adı	Maksimum Yük (kN)
Kancasız 1	0.6
Kancasız 2	0.5
Kancasız 3	0.5
Kancalı 1	11.7
Kancalı 2	12.1
Kancalı 3	11.5

## 4. İRDELEME

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular sıradaki altbaşlıklar halinde irdelenmiş ve diğer araştırmacıların bulguları ile tartışılmıştır.

### 4.1. Poliüre türü Püskürtme Membran Kaplama ile ilgili İrdeleme

Poliüre kaplamalı kaya saptamalarının kaplamasız saptamalara nazaran taşıma kapasitelerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Poliürenin çelik, beton ve çimentolu enjeksiyon malzemeler ile yüksek adezyona sahip olduğu bilinmekte olup, bu çalışma kapsamında dolgulu ribarlara yönelik gerçekleştirilen testler ile doğrulanmıştır (Jain ve Gupta, 2012; Ozturk, 2012a; Kömürlü ve Kesimal, 2012c; Zhu vd., 2009). Split-set türü sürtünmeli saptamalardan elde edilen sonuçlar ışığında ise poliürenin delik yüzeyi ile yüksek aderans sağladığı görülmüştür. Poliürenin çeliğe nazaran daha yüksek sürtünme performansı sağlaması deformasyon özellikleri nedeni ile delik yüzeyinin şeklini alması ve daha iyi temas sağlamasından kaynaklı olduğu görüşüne varılabilir (Qiao ve Wu, 2011; Windsor ve Thompson, 1992; Pellet ve Egger, 1996).

Split-set türü sürtünmeli kaya saptamaları enjeksiyonun kürlenmesi beklenmediğinden uygulandıkları andan itibaren tahkimat basıncı sağlayabilirler, ancak doğrudan zemin ile temas halinde olmaları nedeni ile korozyon problemleri mevcuttur. Sürtünmeli kaya saptamaları genelde maden galerilerinde olduğu gibi kısa süreli tahkimat uygulamaları için kullanılmaktadırlar (Tamrock, 1997; Hoek, 2006; Hemphill, 2013).

Montaj esnasındaki sürtünmeler nedeni ile saptama yüzeyi (çelik veya galvaniz yüzey) çizilmekte ve bu durum erken korozyon oluşumuna sebebiyet vermektedir. Diğer taraftan, çelik tüp (split-set) iç yüzeyinde sürtünme ve çizilme olmadığından galvaniz tabaka bu yüzeyden başlayacak bir korozyon oluşumunu önleyebilecektir. Çatlak direnci son derece yüksek olan poliüre tabaka ile delik içindeki sürtünmelerin çelik yüzeyi üzerindeki olumsuz etkileri giderilebilecektir.

Poliüre kaplamalı split-setlere yönelik test sonuçlarında yeraltında bekleme süresine bağlı olarak düşme yaşanmamış, kaplamasız kaya saptamaları ise taşıma kapasitelerinin yarısını ilk 6 aylık süreç içerisinde kaybetmiştir. Altıncı ay sonundaki %400 mertebesine ulaşan kaplamalı ve kaplamasız kaya saptamalarına ait taşıma kapasiteleri arasındaki fark,

poliüre kaplamanın madencilik faaliyetleri için kullanılabilir, ve otoyol, demiryolu gibi uzun hizmet süresine sahip tüneller için incelenmeye değer olduğunu göstermektedir. Taşıma kapasitesi konusundaki sağlanan bu önemli iyileşme, poliürenin yüzey, mekanik özellikleri ve korozyonu önlemesinden kaynaklanmaktadır.

Poliüre polimerleşme tepkimeleri kaplama yöntemine bağlı olarak değişmekte olup, iyi polimerleşme ve adezyon elde etmek için profesyonel ekipmanların kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı fazdaki birleşenlerin eşit oranda ve iyi bir şekilde karışması, sıvı fazda kalma süresi göz önünde bulundurularak uygulamanın gerçekleştirilmesi önemlidir (BASF, 2009; Kömürlü ve Kesimal, 2013b).

#### **4.2. Polipropilen Kompozit Gövdeli Sürtünmeli Kaya Saplamları için İrdeme**

Polipropilen random kopolimer (PP-R) kompozit sürtünmeli saplamların itme testlerinde ve montajları esnasında çelik saplamalardan ölçülen yük değerlerine nazaran daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Polimer saplamlar için montaj esnasındaki ve itme testleri sırasındaki ölçülen yükler arasında önemli ölçüde fark olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile elde edilen bulguların da doğruladığı üzere delik içerisinde çapsal daralma nedeni ile gerilmeye maruz kalan saplamların zaman içerisinde gerilme rahatlaması etkisi neticesinde yüzeye uyguladıkları normal gerilmelerin azalması sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinde düşüşe neden olmaktadır (Kömürlü vd., 2015). Bu konuda polimer saplamların tüp kalınlıklarının artması ve/veya kompozit gövde içerisindeki cam lif katkınının daha yüksek oranda olduğu ürünlerin seçimi avantaj sağlayacaktır (Ariyama vd., 1997; Deng ve Zhou, 2006).

Montaj testlerinde ulaşılan maksimum yük değeri artışı ile itme ve montaj testleri esnasındaki yük değerleri arasındaki farkın yükseldiği gözlenmiştir. Bu durum yüzeye etkiyen normal gerilme artışı ile gerilme rahatlamasından kaynaklı yüzeydeki normal gerilme değerinin daha çok azalması açısından beklenen bir durumdur (Razavi-Nouri, 2012). Montaj ve itme testleri sonuçlarına göre polimer yüzeylerin delik değişimi ile sürtünme katsayılarında önemli ölçüde farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, polimer saplamların zemin özelliğine bağlı olarak çeliğe nazaran tahkimat performanslarının daha çok etkilenmesi beklenmektedir. Polimer(PP-R) saplamların montaj ve itme testlerinden elde edilen standart sapma değerlerinin çelik saplamların değerlerine nazaran daha yüksek olması, sürtünme yüzeylerinin bağıl sertlikleri arasındaki farkın artması neticesinde yüzey pürüz şekillerine

bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin artışını doğrulamaktadır (Mikhin ve Lyapin, 1970; Kömürlü vd., 2014; Basavaraju ve Ranganatha, 2013).

Pratikte gerek kaya kalitesine gerekse delici özelliklerine bağlı olarak delik çapı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle farklı kaya türlerinde delik çapı ölçümü yapılması ile farklı bitler kullanılarak istenilen delik çapına sahip olunması ve/veya farklı delik çapları için yarık boyutlandırımı yapılarak plastik gövdeli sürtünmeli kaya saplamalarının tahkimat performanslarının artırılabilmesi göz önünde bulundurulmalıdır.

Çapsal daralma testlerinden elde edilen verilere göre kullanılan polimer tüp yüzeylerindeki gerilmelerin çelik tüplere göre daha düşük değerlerde olduğu ve polipropilen yüzeyin delik yüzeyi ile sahip olduğu sürtünme katsayısının istenilen seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Deliklerin 36 mm olarak planlanması ancak delgi işleminden sonra delik çaplarının delici bitlere nazaran 1 mm dolaylarında daha geniş olması nedeni ile 37 mm çapındaki delikler içinde plastik tüplerin yarık yüzeyleri istenilen ölçüde kapanmamış ve bu nedenle sürtünme yüzeyine etkileyen gerilmeler istenilen seviyenin altında kalmıştır. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere yarık kenarlarının yalnız tüp dış çeperinde temas halinde olduğu, tüp iç kısmında temas halinde olmadığı gözlemlenmiştir.

Paslanma neticesinde çelik saplamalar için çapsal daralma testlerinde ölçülen yük değerlerinde önemli bir düşüş ve bu neden ile uzun dönem testlerinde sürtünme ile yük taşıma kapasitesinde korozyonun olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile çelik saplamaların paslanma problemi karşısında, polimer tüplerin gerilme rahatlaması problemlerinin sürtünme ile yük taşıma kapasitelerini ne oranda değiştirdikleri kısa ve uzun dönem itme testleri sonuçlarına bağlı olarak incelenmiştir.



Şekil 5.1. Polimer tüp yarık temas yüzeyleri

Literatürden ulaşılan bilgiler polipropilen malzemelerin gerilme rahatlaması etkisinin kısa dönemde daha yüksek olduğunu ve delik içindeki çapsal daralma ve sabit birim deformasyon seviyesine bağlı olarak sürtünme yüzeyine etkileyen gerilme değerlerindeki azalmanın pratik olarak saatler mertebesinde durduğu bilinmektedir (Kömürlü ve Kesimal, 2015; Meredith ve Hsu, 1962; Yamaguchi vd., 2015; Phillips ve Statton, 1970). Bu nedenle kısa dönem testleri numunelerine kıyasla daha yüksek oranda taşıma kapasitesini kayıp eden polimer tüplerden elde edilen sonuçlar açısından kaya bloklarının 6 ay süre ile su içerisinde ıslanma ve kaya malzemesinin deformasyon özelliklerinin değişmiş olması etkin bir role sahiptir (Vasarhelyi ve Van, 2006). Çelik saplamaların gerilme rahatlaması sürelerinin polimer tüplere nazaran daha uzun olması nedeni ile uzun dönem itme testleri sonuçları üzerinde korozyona ek olarak olumsuz bir etkinin yaşanmış olması da mümkündür. Testlerde kullanılan çelik saplamaların musluk suyu ile temas halinde paslanmış olması ve sülfirik cevher içeren madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına sahip alanlarda çelik saplamaların daha yüksek oranda taşıma kapasitelerini kayıp ettikleri dikkate alınmalıdır (Kömürlü vd., 2014).

Delik içi sürtünme yüzeyindeki sünme etkisine yönelik blok asma testlerinden elde edilen sonuçlara göre herhangi bir kayma ve yüzeyde deformasyon gözlenmemiştir. Polimer (PP-R) saplamların taşıma kapasitelerinin %20 dolaylarında yüke maruz kalan sürtünme yüzeylerinin 6 ay süre sonundaki sünme dirençlerinin istenilen seviyede olduğu görülmüştür. Bu çalışma, aksenal gerilmelerin yanı sıra, blok hareketlerinin engellenmesi nedeni ile yeraltında maruz kalınan makaslama gerilmelerine karşı olan sünme dirençleri ve tahkimat performanslarının sünme nedeni ile zamana bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Makaslama testleri uygulanan polimer tüplerin, maksimum yük seviyelerine ulaştıktan sonra kısa süre içerisinde kırılmak veya kopmak yerine yüksek deformasyon limitlerine izin verdikleri ve bu esnada yüksek çatlak ilerleme direnci nedeni ile önemli ölçüde yük taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. Polimer tüplerin göstermiş oldukları bu sünek malzeme özelliğinin kaya patlaması problemi olan alanlarda enerji absorpsiyonu kapasitesini artıracak ve olumlu etkilere sahip olacağı öngörülmektedir (Yi ve Kaiser, 1994; Li, 2010; Li ve Doucet, 2012; Li vd., 2014). Kaya patlaması problemlerine karşı gövde dayanımı açısından görülen avantajın yanısıra delik ve saplama sürtünme yüzeylerine uygulanan ani yük testleri sonuçları sürtünme yüzeyine uygulanan normal gerilme ile birlikte değerlendirildiğinde polimer tüplerin çelik numunelere nazaran daha avantajlı olduğu yönündedir. Bu çalışma kapsamındaki numunelerden elde edilen test sonuçları ışığında polimer ve çelik tüp montajı yapılmış numunelerin benzer seviyede ani yük taşıma kapasitelerine sahip olduğu görülmüştür.

Çapsal daralma testleri ile elde edilen bulgular polimer tüplerin mekanik özelliklerinde su ile temas nedeni ile bir değişim olmadığını doğrulamıştır. Çelik tüplerin paslanma problemine karşılık polimer tüplerin yüksek kimyasal dirençleri nedeni ile avantajlı olduklarını söylemek mümkündür. Ancak, polimer malzeme ve tüp kalınlığının tahkimat reaksiyonları açısından değerlendirilmesi sürecinde polimer gövdelerin gerilme rahatlaması problemlerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sürtünmeli kaya saplamlarının genellikle madencilikte bir yılı bulmayan kısa hizmet süreleri için kullanıldıkları düşünüldüğünde çalışmanın 6 aylık inceleme sürecinin önemli ölçüde fikir verdiği kabul edilebilir. Ancak, birkaç yılı bulan hizmet süreleri için daha uzun süreli incelemeler gereklidir (Hoek, 2006; Hassell ve Villaescusa, 2005).

Paslanma problemi nedeni ile çelik tüplerin taşıma kapasitelerini ve tahkimat katılıkları (rijitliklerini) uzun dönemde önemli ölçüde kayıp ettiği ve uzun süreli korozyon sonucu polimer tüplerin avantajlı olduğuna yönelik bulgular elde edilmiştir. Tüplerin duvar (et) kalınlığı artışı ile çapsal daralma neticesinde yüzeye etkiyen gerilme ve taşıma kapasitesi artışı beklenmektedir (Bawden, 2011; Davis, 1979). Polimer tüplerin kısa dönem taşıma kapasitelerinin çelik tüplere nazaran daha düşük olması, 6 mm olarak tercih edilen polimer tüp kalınlığının artırılması gerektiğini göstermiştir. Kalınlık artışı ile beklenen montaj yükündeki artış açısından 6 mm tüp duvar (et) kalınlığındaki polimer saplamalardan ölçülen montaj testi esnasındaki maksimum yük değerleri göz önüne alındığında et kalınlığı artışının müsaade edilebileceği sonucuna varılmaktadır. Ancak, polimer tüplerin gerilme rahatlaması problemi nedeni ile kısa dönem taşıma kapasitelerinin aynı montaj yüküne sahip çelik tüplerinkine nazaran daha düşük olması beklenmektedir.

Polimer tüplerin itme (eksenel yükleme) ve makaslama testlerinden elde edilen katılık değerleri çelik tüplerden elde edilen değerlere nazaran kısa dönem için düşük ancak yakın değerler vermiştir. Çelik tüplerin korozyon problemi sonucu polimer saplamaların uzun dönem testlerinde çelik tüplere nazaran daha yüksek katılık değerleri sağladığı görülmüştür. Tüp kalınlığı artışı, yüzeye etkiyen normal gerilme değerlerindeki artış neticesinde polimer tüplerin tahkimat katılığı değerlerindeki artış için de gereklidir (Dupont ve Bapna, 1994; Zhai vd., 2014; Johnson vd., 2003). Eksenel yükleme testlerinde kullanılan polimer tüp yüzeylerinde çiziklerin görülmesi kaymaya başlanması ile delik pürüz ve mineral tanelerine takılma olması nedeni ile yük değerlerinde artış yaşanmış olduğunu doğrulamaktadır. Polimer tüplerin kaymaya devam etmesi için yük artışına gerek olması duraysızlıkların önlenmesi ve ideal tahkimat reaksiyonlarına sahip olunması açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Madencilik uygulamalarında kullanılan çelik split set uzunlukları genellikle 0.9 m ve 3.0 metre aralığında değişmektedir (Jennmar, 2015; Split Set, 2001; Hoek, 2006; Kömürlü vd., 2015). Plastik saplama dökümü/üretimi için bir kalıp geliştirirken, saplama ucunda bulunan ve çelik split set uygulamalarında genellikle 15 cm-20 cm uzunluklarındaki konikliğin delik içerisindeki takılmaları önleyerek montaj konusunda sağladığı avantaj dikkate alınmalıdır (Sinha, 1989; DSI, 2015). Ek olarak, saplama gövdesi boyunca sabit çapa sahip bir tüp yerine ön ucundan arka ucuna doğru hafifçe birkaç milimetre artan çapa sahip olan saplamaların kullanımlarının montaj esnasındaki bükülme problemlerinin önlenmesi için avantaj sağladığı, bu sebeple çelik split setlerin artan çap değerlerine sahip oldukları göz önünde bulundurulmalıdır (Corona et al., 2006).



Çelik ve plastik malzemelerin deformasyon özelliklerinin farklı olması nedeni ile kaya saplaması robotunun itme aparatlarının diğer bir önem arz eden konu olduğu görülmüştür. PP-R gövdeli sürtünmeli kaya saplamalarının montajı esnasındaki elastik deformasyonun itme kuvveti ve makine tarafından sağlanan darbe etkisini absorbe edici özelliği ve artan yük değerleri ile bükülme neticesinde montaj yapılırken delik içinde sürtünme arayüzeyindeki deformasyonun kısıtlandığı gözlenmiştir. Bu tez kapsamında tasarlanmış PP-R kompozit sürtünmeli saplamaların 1 metre uzunluğa kadar, kısa split setlerin yerine rahatlıkla kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan 6 mm tek taraflı et kalınlığına sahip olan PP-R gövdeli sürtünmeli saplamalar yerine et kalınlığı 7mm, 8 mm gibi daha yüksek değerlere sahip ürünlerin kullanılması durumunda montaj uzunluğunun artması beklenmektedir. Kalın duvarlı saplamaların kullanımı montaj esnasındaki bükülmeler açısından avantaj sağlayacağı gibi gövde taşıma kapasitesini de artıracaktır. Yukarıda değinildiği üzere saplama itme aparatlarının da PP-R gövdeli sürtünmeli kaya saplamaları için revize edilerek ekipmanların montaj performansı artırılabilir. İlerleyen çalışmalar ile 1 metreden daha uzun boya sahip PP-R sürtünmeli kaya saplamaları uygulamalarının gerçekleştirileceği öngörülse de, plastik gövdeli sürtünmeli kaya saplamalarının uzun saplama kullanımı gerektirmeyen zeminlerde, kısa split setlerin yerine kullanımı önerilmektedir. Bu konuda belirleyici bir diğer etken ise gövde taşıma kapasitesidir. PP-R kompozit gövdeli sürtünmeli kaya saplamaları, gövdelerine nazaran düşük yük taşıma kapasitesi olan kısa sürtünme arayüzeyine sahip split setlere alternatif olarak kullanılabilir bulunmuştur.

Yaygın kullanılan, 39 mm nominal çapa sahip çelik split setler için korozyon olmadığı durumlarda tipik gövde taşıma kapasitesi 70 kN ve 90 kN aralığında değişmektedir (Komurlu and Kesimal, 2015; Stander, 2004; Ferreira and Franklin, 2008). Kritik bir sürtünme yüzeyinden daha uzun çelik split set gövdelerinde yenilme yaşanmaktadır. Çoğu zaman 2,5 metre boyutlarına kadar uygulamada yaygın kullanılan split setler için eksenel yükler karşısında yenilme sürtünme arayüzeyinde gerçekleşmektedir (Kömürlü vd., 2014; Li vd., 2014). Çelik split-setlerin korozyon problemi ile dayanım değerlerinde azalmanın yaşanması su problemi olan yeraltı açıklıklarında polimer malzeme kullanımını avantajlı hale getirmektedir.

Polimer ve delik arayüzeyinde sağlanan yüksek taşıma kapasitesine cevap verebilmek için gövde taşıma kapasitesini artırmak amaçlı farklı Polimer malzemelerin kullanımları değerlendirilmelidir. Farklı tür polimer malzemelere uygulanan dayanım testlerine göre, PP-R

yerine Poliamid türü mühendislik polimerinin kullanımı ile duvar kalınlığına bağlı olarak çelik split setlerin sağladığı gövde dayanımı değerlerine ulaşılacağı görülmüştür.

### 4.3. Poliamid Saplamlar için İrdeleme

Poliamid-6 türü saplamaların çekme ve makaslama testlerinden elde edilen verilere göre, PP-R malzemeye nazaran daha yüksek saplama gövdesi taşıma kapasitesi değerlerine sahip olmak amaçlı Poliamid-6 türü saplama malzemesi kullanımı uygun bulunmuştur. Bu sebeple, Poliamid-6 yüzeylerin sürtünme ile yük taşıma kapasitelerinin incelenerek PP-R gövdeli sürtünmeli kaya saplamalarına nazaran daha uzun boylarda kullanılabilen ve daha iyi tahkimat performansı sağlayabilen saplamaların üretimine yönelik çalışmaların ilerletilmesi önem arz etmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, Poliamid-6 saplamalar kullanılarak PP-R saplamalara kıyasla katılık değerlerinin artırılacağı görülmüştür. Sünme testlerinden elde edilen verilere göre, sürtünmeli kaya saplamalarının hizmet sürelerine uygun olarak 6 aya kadar gerilmeye maruz kalınması durumunda Poliamid-6 saplamaların istenilen ölçüde sünme direncine sahip olduğu görülmüştür. Dolgulu saplama olarak kullanımı incelenen Poliamid-6, sürtünmeli saplamalarınkine nazaran daha uzun hizmet sürelerine sahip olunması durumu için ilerleyen çalışmalar ile incelenmelidir. 280 C° derecede erimeye başlayan Poliamid-6 malzemenin yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda mekanik özelliklerindeki değişim ve yangın durumunda açığa çıkabilecek gazlar ayrıca çalışılması önerilen başka konulardır. Bu noktada, Poliamid-6'nın 75 C° dereceye kadar ısıtılması durumunda mekanik özelliklerinde kayda değer bir değişimin olmadığı belirtilmelidir (Kömürlü ve Kesimal, 2016a).

Yüksek oranda plastik birim deformasyona izin verebilen Poliamid-6 malzemenin, %3 değerinde elastik birim deformasyon gösterebildiği, 35 mm çapındaki Poliamid-6 saplama için katılık değerlerinin elastik aralıkta 25 MPa/mm gibi polimer malzemeler için yüksek değerlerde olduğu ve Poliamid-6 saplamaların kullanımı ile zemin deformasyonlarına bağlı olarak önemli tahkimat basınçlarının sağlanabileceği belirlenmiştir. %3 elastik deformasyon limitinin aşılması neticesinde gerilme değerlerinde azalma yaşanmaksızın %25 üzerinde birim deformasyon seviyesine kadar yükleme devam ettirilmiştir. Poliamid-6 numunelerin, maksimum yük seviyelerine ulaştıktan sonra kısa süre içerisinde kırılmak veya kopmak yerine yüksek deformasyon limitlerine izin verdikleri ve bu esnada önemli ölçüde yük taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür.

Yüksek sünekliğe sahip malzeme özelliği ile maksimum gerilme seviyelerine çıkılması neticesinde kopmadan sabit gerilme altında %25 üzerinde birim deformasyona müsaade ederek yüksek enerji emme kapasitelerine sahip olduğu belirlenen Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin kaya patlamaları, kaya sıkışmaları ve şişen killi zeminlerde yaşanan problemler karşısında avantaj sağlayan tahkimat malzemeleri olarak kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir (Stacey, 2016; Kömürlü ve Kesimal, 2016b). Örnek olarak, 35 mm çapında olan 72 kN yük altında gerilme değerlerinde düşüş yaşanmadan % 25 üzerinde birim deformasyona müsaade ettiği belirlenen, bu test kapsamında test edilmiş olan Poliamid-6 türü mühendislik polimeri ile üretilmiş 4 metre uzunluğundaki saplama gövdesinin 72 kJ seviyesine kadar enerji emme kapasitesine sahip olduğu hesaplanabilmektedir. Bu değer, günümüzde kaya patlamaları ile mücadele amaçlı kullanılan kaya saptamalarının sahip oldukları enerji emme kapasitelerinin çok üzerindedir (Li vd., 2014; Wang vd., 2013).

Dayanım değerleri farklı birçok poliamid ürünler mevcut olup, kimyasal içerik ve üretim detaylarına bağlı olarak çekme dayanımı 100 MPa üzerine çıkan Poliamid-6 malzemeler mevcuttur. Bu çalışmada test edilen, çekme dayanımı 75 MPa olan poliamid pahalı olmayan, sıradan bir Poliamid-6 malzemedir. Sünme testlerinden elde edilen verilere göre, çeşitli madencilik faaliyetlerine yönelik bir kaç aylık hizmet süreleri dahilinde gerilmeye maruz kalınması durumunda Poliamid-6 saptamaların istenilen ölçüde sünme direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme dayanımının yarısı kadar bir gerilmeye maruz kalan Poliamid-6 saptamanın 5 aylık süreç içerisinde boy uzamasının %0,1 mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Poliamid saptamalar gerek statik ve gerek dinamik yükler karşısında avantaj sağlamaktadır. Poliamid-6 türü mühendislik polimerleri, gövde dayanımı pek çok kaya saptaması uygulamalarında istenilen tahkimat basıncının sağlanması için yeterli olabilecek malzemelerdir. Ancak, sıradan poliamid saptamalar için çelik saptamalara nazaran nispeten 1.7-2 kat daha kalın çapa sahip saptamaların kullanımı gereklidir. Bu konuda, çeliğin paslanabilir bir malzeme olması ve yeraltı suları ile temas halinde dayanım değerlerini kayıp etmesi dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, aynı çapa sahip poliamid ve çelik saptamaları kıyasla poliamidlerin daha avantajlı olması korozyon problemine bağlı olarak mümkündür. Özellikle sülfirik cevher içeren madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına sahip alanlarda çelik saptamalar daha yüksek oranda taşıma kapasitelerini kayıp etmektedirler (Kömürlü vd., 2014).

Saplama apı artışı ile enjeksiyon malzemesi ile saplama temas yüzey alanı artmakta ve bu sebeple aderans değerleri istenilen seviyelerde olmaktadır. Ancak, kancalı olmayan ve nervürsüz düz yüzeyli poliamid saplamalara uygulanan imento enjeksiyonu çekme/çıkarma testlerinden elde edilen 2.5 kN/m değeri elik saplama uygulamalarında sahip olunması istenen tipik elik/imento enjeksiyonu adezyon değerleri ile kıyaslandığında oldukça düşüktür (Villaescusa vd., 2015; Villaescusa vd., 2008; Jalalifar, 2011; Pellet ve Egger, 1996).

Bu sebeple, poliamid saplama kullanımında aderansı artıracak, nervür/yüzey Şekilleri ve mekanik ankraj kullanımı önerilmektedir. Bu kapsamda, saplama ucunda kanca kullanılarak sağlanan mekanik ankraj ile taşıma kapasitesinin önemli ölçüde artırıldığı görülmüştür. Bu çalışmada uygulanan kanca ile çekme/çıkarma testlerinden elde edilen maksimum yük değerlerinde önemli oranda artış sağlanmıştır. İyi bir kanca dizaynı ve enjeksiyon uygulaması ile sağlanan mekanik ankraj sayesinde, saplama ve enjeksiyon arayüzeyindeki sıyrılma nedeni ile yaşanacak olan adezif yenilmeler yerine, saplama gövdesinin taşıma kapasitesi seviyesinde tahkimat basıncı sağlanabilecektir (Li, 2007; Li vd. 2009). Kanca performansının iyileştirilmesi için dolgu malzemesi ve uygulama kalitesi belirleyicidir. Özellikle yeraltında dolgunun içerisinde minimum boşluğa sahip olunacak Şekilde deliğe iyi yerleştirilmesi, dolgu karışımının iyi sağlanması, dolgu içeriğindeki birleşenler ve kullanım detayları önemlidir. Bu çalışmada poliamid numuneler için hazırlanan 5 gün kr süreli dolgu malzemesinin saplama çekme/çıkarma testinde 11.8 kN yük altında yenilmesi ile tasarlanmış olan kancanın enjeksiyon malzemesine bağlı olarak bu seviyeden daha yüksek ankraj yükleri sağlayacağı görülmüştür. Saplama gövdesinin yenilme yükünden daha yüksek ankraj sağlayacak bir kanca tasarımı ve iyi bir dolgu uygulaması ile saplama gövdesinin taşıyabileceği maksimum yük seviyesine kadar yenilmenin önlenmesi sağlanmalıdır. Saplama enjeksiyon arayüzeyindeki zayıf yapışma nedeni ile, kancanın enjeksiyon içerisindeki ankrajı ile tahkimat basıncı sağlanması poliamid saplamalar için daha çok delik dışındaki plakanın reaksiyonu sonucu yaşanacaktır (Oreste, 2008). Bu sebeple, poliamid saplamaların tahkimat performansları açısından plaka tasarımı kritik özelliğe sahiptir.

## 5. SONUÇLAR

Üç farklı polimerin (Poliüre, PP-R ve Poliamid-6) yeni kaya saplama malzemeleri olarak kullanılabilir olduğu belirlenmiş olan bu tez çalışmasının çıktısı olarak, püskürtme poliüre membran kaplamalı sürtünmeli ve dolgulu ribar türü kaya saplama malzemeleri, PP-R kompozit gövdeli sürtünmeli kaya saplama malzemeleri ve dolgulu saplama uygulamalarına yönelik kancalı Poliamid-6 saplama malzemeleri geliştirilmiştir. Bu çalışma ile, malzeme bilminde yaşanan yeniliklerin takip edilerek yeni geliştirilen polimerlerin kaya mühendisliğine kazandırılması neticesinde tahkimat uygulamalarında önemli ilerlemelere olanak sağlanabileceği görülmüştür. Test edilen üç farklı polimer için elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara göre, poliürenin çelik kaya saplama malzemelerinin korozyona karşı korunması ve taşıma kapasitelerinin artırılmasına yönelik ekonomik olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı polimer malzemelerin de bu amaçla kullanımlarının incelenebilir olduğunun dikkate alınması ve gelişen malzeme biliminin takip edilmesi önemli yeni ilerlemelere olanak sağlayabilecektir.

2. Bu çalışma ile elde edilen, paslanma problemi olmayan plastik tüplerin kullanımına yönelik deneysel veriler ışığında PP-R kompozit tüplerin sürtünmeli kaya saplama malzemesi olarak kullanılabilir olduğu ortaya konmuş ve çelik split setlerin yerine kullanımı için yeni ürünlerin geliştirilmesi önerilmiştir.

3. Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin kaya saplama malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu görülmüş ve yüksek konverjansa müsaade edilmesi gerekli yeraltı açıklıklarının duraylılığın sağlanması amaçlı sistematik uygulamaları için yeni poliamid kaya saplama malzemelerinin geliştirilmesi önerilmiştir. Poliamid gövdeli saplama malzemelerinin yük taşıma kapasiteleri açısından saplama ve çimento enjeksiyonu arayüzeyinin yapışma özelliklerinden çok kanca ve plakaların ankraj performanslarının kritik önem taşıdığı görülmüştür. Bu sebeple, delik içerisinde mekanik ankraj sağlayamayacak kaya saplama malzemeleri üretiminde poliamid malzeme kullanımı önerilmemektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Akkriş, D., 2014. Advantages of the frictional rock bolt swellex, 11th Regional Rock Mechanics Symposium of Turkey, Afyonkarahisar, Turkey, Proceedings book: 247-252.
- Akono, A.T., Randall, N.X. ve Ulma, F.J., 2012. Experimental determination of the fracture toughness via microscratch tests: Application to polymers, ceramics, and metals. J Mater Res, 27, 485-493.
- Archibald, J.F. ve Dirige, P.A., 2006. Thin Spray-On Lining Applications for Rockburst, Blast and Fire Damage Mitigation, Proceedings of the 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, Colorado, Proc. number: 06-1005.
- Ariyama, T., Mori, Y. ve Kaneko, K., 1997. Tensile properties and stress relaxation of polypropylene at elevated temperatures, Polymer Engineering & Science, 37, 81-90.
- Aziz, N., Pratt, D. ve Williams, R., 2003. Double Shear Testing of Bolts, Coal 2003: Coal Operators' Conference, Australia, Proceedings book: 154-161.
- Bawden, W.F., 2011. Ground control using Cable and Rock Bolting, SME Mining Engineering Handbook, SME, USA, pp. 611-625.
- Basavaraju, M. ve Ranganatha, S., 2013. Effect of Soft Material Hardness and Hard Material Surface Morphology on Friction and Transfer Layer Formation; Dry Condition, International Journal of Recent Technology and Engineering, 2, 40-46.
- BASF, 2009. Solutions for tunnelling and mining injections (Brochure of injection products), Zurich.
- Bengisu, M.T. ve Akay, A., 1999. Stick-slip oscillations: Dynamics of friction and surface roughness, J Acoust Soc Am, 105, 194-205.
- Brady, B.H.G. ve Brown, E.T., 2005. Rock Mechanics for Underground Mining, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Carranza-Torres, C. ve Fairhurst, C., 2000. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Tunnelling and Underground Space Technology, 15, 187-213.
- Corona, E., Lee, L. H. and Kyriakides, S., 2006. "Yield anisotropy effects on buckling of circular tubes under bending." International Journal of Solids and Structures, 43, 7099-7118.
- Czichos, H., 1986. Introduction to friction and wear, Friction and Wear of Polymer composites (ed. By Friedrich K), Elsevier, Amsterdam, pp.1-23.

- Davis, W.L., 1979. Split-set Rock Bolt Analysis, Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16, 1-10.
- Deb, D. ve Das, K.C., 2014. A new doubly enriched finite element for modelling grouted bolt crossed by rock joint, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 70, 47–58.
- Deng, M. ve Zhou, J., 2006. Effects of temperature and strain level on stress relaxation behaviors of polypropylene sutures, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 17, 365-369.
- DSI, 2015. Online product catalogue of Power set self drilling friction bolts. [www.dywidag.co.uk](http://www.dywidag.co.uk).
- Dupont, P.E. ve Bapna, D., 1994. Stability of sliding frictional surface with varying normal force, Journal of Vibration and Acoustic, 116, 237-242.
- Ferreira, P. H. ve Franklin, D., 2008. Resin bolting in South Africa platinum mines with a focus on development and stoping operations, Third International Platinum Conference ‘Platinum in Transformation’, Southern Africa, Proceedings book: 113-122.
- Firep, 2013. <http://en.firepworld.com/company/profile>
- Hassell, R. ve Villaescusa, E., 2005. Overcoring Techniques to Assess in Situ Corrosion of Galvanised Friction Bolts, 24th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, USA, Proceedings book: 349-356.
- Heerden, V.D., 2007. Rock Support in Southern African Hard Rock Mines, Proceedings of The Fourth Southern African Conference on Base Metals, Swakopmund, Namibia, Proceedings book: 77-91.
- Hemphill, G.B., 2013. Practical Tunnel Construction, John Wiley&Sons, New Jersey.
- Hoek, E., 2006. Kaya Mühendisliği (Turkish translation of “Rock Engineering”), Publication of The Chambers of Mining Engineers of Turkey, Ankara.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. ve Bawden, W.F., 1995. Support of Underground Excavations in Hardrock. Rotterdam, Balkema.
- Holter, K.G., 2014. Loads on sprayed waterproof tunnel linings in jointed hard rock: A study based on Norwegian cases, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 1003-1020.
- Hutchinson, D.J. ve Diederichs M.S., 1996. Cablebolting in underground mines. Bitech, Vancouver.
- Jalalifar, H., 2011. An analytical solution to predict axial load along fully grouted bolts in an elasto-plastic rock mass, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 111, 809-814.



- Jain, A., Gupta, V., 2012. Construction and characterization of stainless steel/polyurea/E-glass composite joints, Mechanics of Materials, 46, 16–22.
- Jenmar, 2015. Selected Ground Control Products Catalogue, [www.jenmar.com](http://www.jenmar.com).
- Johnson, J., Williams, T., Sunderman, C., Signer, S. ve Bayer, D., 2003. Field Test With Strain-Gauged Friction Bolts At The Gold Hunter Mine, Mullan, Idaho, USA, 22nd International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia.
- Kaiser, P.K., 1999. Lessons learned for deep tunnelling from rockbursts in mining, seminar notes from GEAT'99, Switzerland.
- Kaiser, P.K., Yazici, S., Nosé, J., 1992. Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 29, 293-306.
- Kolymbas, D., 2005. Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach for Tunnelling, Springer, Berlin.
- Komurlu, 2011. Future Directions of Engineering Rock Mechanics, The ISRM 50th Anniversary Celebration Competition report.
- Kömürlü, E., 2012. Kaya ve Taneli Malzemelerde Yanal Gerilmelerin Tahkimat Tasarımı Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi FBE, Trabzon, Türkiye, 181 s.
- Komurlu, E. ve Kesimal, A., 2012a. New Engineering Materials for Underground Constructions, 16th International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, Turkey, Proceedings book: 307-319.
- Komurlu, E. ve Kesimal, A., 2012b. Using sprayed polymer as tunnel support, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, South Korea, Proceedings book: 1486-1499.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2012c. Poliüretan malzeme ile güçlendirilmiş zemin dayanımının incelenmesi, 14. ulusal zemin mekaniği ve temel mühendisliği kongresi, Isparta, Bildiriler kitabı: 631-642.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2013a. New Support Materials for Forepoling and Umbrella Applications, of 3rd International Symposium on Underground Excavations for Transportation, November 29-30, İstanbul, Turkey, Proceedings book: 423-435.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2013b. Geçmişten günümüze tüneller ve tahkimat malzemeleri, Madencilik, 52, 33-47.
- Komurlu, E., Kesimal, A. ve Colak, U., 2014. Polyurea type Thin Spray-on Liner Coating to Prevent Rock Bolt Corrosion. 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, Proceedings book: 1389-1397.
- Komurlu, E. ve Kesimal, A., 2015. Improved Performance of Rock Bolts using Sprayed Polyurea Coating, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 2179-2182.

- Komurlu, E. ve Kesimal, A., 2016a. Reinforcing Rock Columns using Heated Polymeric Ties: An Experimental Study, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, 1995-2003.
- Komurlu, E. ve Kesimal, A., 2016b. An Experimental Study on Usability of Friction Rock Bolts with Plastic Body. International Journal of Geomechanics, Accepted: 19 April 2016.
- Komurlu, E., Kesimal, A. ve Colak, U., 2014. Polyurea type Thin Spray-on Liner Coating to Prevent Rock Bolt Corrosion, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, October, Saporro, Japan, Proceedings book: 1389-1397.
- Komurlu, E., Kesimal, A. ve Colak, U., 2015. Effect of polyurea type thin spray-on liner on support performance of rock bolts, The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, 53, 13-18.
- Kovari, K., 2003a. History of the sprayed concrete lining method-part II: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 71-83.
- Kovari, K., 2003b. History of the sprayed concrete lining method-part I: milestones up to the 1960s, Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 57-69.
- Li, C.C., 2007. A Practical Problem with Threaded Rebar Bolts in Reinforcing Largely Deformed Rock Mass, Rock Mechanics and Rock Engineering, 40, 519-524.
- Li, C. ve Lindblad, K., 1999. Corrosivity classification of the underground environment, Rock Support and Reinforcement Practice in Mining (Ed. by Villaescusa, Windsor and Thompson), AA Balkema, Rotterdam, pp 69-76.
- Li, B., Qi, T., Zhengzheng, W. ve Yang, L., 2012. Back analysis of grouted rock bolt pullout strength parameters from field tests, Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 345-349.
- Li, C.C., 2010. Field Observations of Rock Bolts in High Stress Rock Masses, Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, 491-496.
- Li, C.C. ve Doucet, C., 2012. Performance of D-Bolts Under Dynamic Loading, Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 193-204.
- Li, C.C., Stjern, G. ve Myrvang, A., 2014. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6, 315-327.
- Li, Y., Ma, N., Yang, K., Shi, J., 2009. Research on FRP bolt-end failure mechanism. Mining Science and Technology, 19, 522-525.
- Lyons, A., 2013. Construction materials reference book (ed. by Doran&Cather), Routledge, USA.

- Meredith, R. ve Hsu, B.S., 1962. Stress Relaxation in Nylon and Terylene: Influence of Strain, Temperature, and Humidity, Journal of Polymer Science, 61, 253-270.
- Mikhin, N.M. ve Lyapin, K.S., 1970. Hardness dependence of the coefficient of friction, Soviet Physics Journal, 13, 317-321.
- Molique, R.S., 1994. Frictional Behaviour of Polymers: the transition from static to kinetic conditions, MSc. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Mechanical Engineering, USA.
- Muynck, W.D., Belie, N.D. ve Verstraete, W., 2009. Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete, Cement and Concrete Composites, 31, 163-170.
- Muller, L., 1990. Removing the misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method, Tunnels & Tunnelling, 22, 15-18.
- Nexant, 2015. Nylon 6, Nylon-66: Process technology, Production costs, Regional Supply/Demand Forecasts and Economic Comparison of Alternative Production Routes. [www.chemsystems.com](http://www.chemsystems.com).
- Oreste, P., 2008. Distinct analysis of fully grouted bolts around a circular tunnel considering the congruence of displacements between the bar and the rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 45, 1052–1067.
- Oreste, P.P. ve Cravero, M., 2008. An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls, Rock Mechanics and Rock Engineering, 41, 835–868.
- Ortlepp, D., 1992. Invited lecture: the design of support for the containment of rockburst damage in tunnels—an engineering approach. In: Kaiser PK, McCreath DR (eds) Proceedings of the international symposium rock support, Sudbury, ON, Canada, Balkema, pp 593–609.
- Ozturk, H., 2012a. Püskürtülen İnce Kaplamaların Elastik Özellikleri, Madencilik, 50, 41-45.
- Ozturk, H., 2012b. Work of adhesion of thin spray-on liners, Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, 1095-1102.
- Özturk, H. ve Tannant, D.D., 2010. Thin spray-on liner adhesive strength test method and effect of liner thickness on adhesion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 47, 808-815.
- Pellet, F. ve Egger, P., 1996. Analytical Model for the Mechanical Behaviour of Bolted Rock Joints Subjected to Shearing, Rock Mechanics and Rock Engineering, 29, 73-97.
- Perez, H.T., 1952. Tunneling costs drop way down when bolts holdup tunnel roof. Constr. Methods Equipment (March) 48.

- Phillips, W.L. ve Statton, W.O., 1970. Stress-relaxation hardening of Nylon 66 filaments, Journal of Material Science, 5, 1021-1026.
- Piringer, O.G. ve Baner, A.L., 2008. Plastic packaging: interactions with food and pharmaceuticals, Wiley-VCH, Germany.
- Qiao, J. ve Wu, G., 2011. Tensile properties of fly ash/polyurea composites, Journal of Material Science, 46, 3935-3941.
- Qingliang, C., Huaqiang, Z., Zhihong, X. ve Shiping, 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, 323–328.
- Ranasooriya, J., Richardson, G.W. ve Yap, L.C., 1995. Corrosion behaviour of friction rock stabilisers used in underground mines in Western Australia, 6th AusIMM Underground Operators Conference, Kalgoorlie, Australia, Proceeding book: 9-16.
- Razavi-Nouri, M., 2012. Creep and stress relaxation behavior of polypropylene, metallocene-prepared polyethylene and their blends, Iranian Journal of Chemical Engineering, 9, 60-69.
- Schubert, W., 2013. 50 years of NATM, isrm online video, [www.isrm.net](http://www.isrm.net)
- Sinha, R. S., 1989. Underground Structures: Design and Instrumentation, Elsevier, Netherlands, Amsterdam.
- Soni, A., 2000. Analysis of swellex bolt performance and a standardized rockbolt pull test datasheet and database, Msc. thesis, University of Toronto Graduate Department of Civil Engineering, Canada.
- Split Set, 2001. Split Set Stabilizers SS-39 Product Brochure. International Rollforms, Inc., Printed in USA.
- Srivastava, L.P. ve Singh, M., 2015. Effect of Fully Grouted Passive Bolts on Joint Shear Strength Parameters in a Blocky Mass, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 1197-1206.
- Stacey, T.R., 2016. Addressing the Consequences of Dynamic Rock Failure in Underground Excavations. Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI 10.1007/s00603-016-0922-3
- Stander, M.C.B., 2004. “The Effectiveness of Split Sets as Primary Support System at Mponeng Mine.” In: The Miner’s Guide through the Earth’s Crust, South African National Institute of Rock Engineering, pp 15-21.
- Stephan, A., Frohlich, A., Klupfel, A., 1918. Verfahren zum abfangen und sichern des hangenden und der stosse im bergbau ohne stutzung von unten. Patentschrift Nr. 302909, Klasse 5c. Gruppe 4, Pat 25. Juli 1913y Ausgegeben 7. Januar 1918, Kaiserliches Patentamt Berlin

- Strygin, B.I., 1965. Stresses in metal rock bolts and the choice of their diameter, Journal of Mining Science, 1, 326-331.
- Tamrock Corp., 1997. Underground Drilling and Loading Handbook, Tampere.
- Tannant, D.D., 2001. Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2001), Ankara, Turkey, Proceedings book: 57-73.
- Ulusay, R., 2010. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara.
- Vasarhelyi, B. ve Van, P., 2006. Influence of water content on the strength of rock, Engineering Geology, 84, 70–74.
- Villaescusa, E., Thompson, A.G., Player, J.R., 2015. Dynamic Testing of Ground Support Systems, MRIWA Project M417 Report, Perth, WA, Australia.
- Villaescusa, E., Varden, R., Hassel, R., 2008. Quantifying the performance of resin anchored rock bolts in the Australian underground hard rock mining industry, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, 94-102.
- Wang, G., Wu, X., Jiang, Y., Huang, N. ve Wang, S., 2013. Quasi-static laboratory testing of a new rock bolt for energy-absorbing applications, Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 122–128.
- Windsor, C.R., 1992. Cable bolting for underground and surface excavations. Rock support in mining and underground construction, Int. symp. on rock support. Balkema, Rotterdam, pp. 349-376.
- Windsor, C.R. ve Thompson, A., 1992. A new friction stabilizer assembly for rock and soil reinforcement applications, Rock Support (Ed. by Kaiser PK, McCreath DR), AA Balkema, Rotterdam, pp 523-530.
- Wu, Y.K. ve Oldsen, J., 2010. Development of a New Yielding Rock Bolt – Yield-Lok Bolt, Proceedings of 44th US Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT.
- Yamaguchi, K., Thomas, A.G. ve Busfield, J.J.C., 2015. Stress relaxation, creep and set recovery of elastomers, International Journal of Non-Linear Mechanics, 68, 66–70.
- Yazici, S., Kaiser, P.K., 1992. Bond strength of grouted cable bolts. Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 29, 279-292.
- Yi, X. ve Kaiser, P.K., 1994. Impact testing for rockbolt design in rockburst conditions, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 31, 671-685.
- You, Y.J., Kim J.J, Kim, S., Park, Y., 2015. Methods to enhance the guaranteed tensile strength of GFRP rebar to 900 MPa with general fiber volume fraction, Construction and Building Materials, 75, 54-62.

- Zhai, C., Bevand, S., Gan, Y., Hanaor, D., Proust, G., Guelorget, B. ve Retraint, D., 2014. Measurement of normal contact stiffness on fractal rough surfaces, 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, NSW, Australia, Proceedings book: 1-6.
- Zhu, Y., Liechti, K.M. ve Chandar, K.R., 2009. Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces, International Journal of Solids&Structures 46, 31-51.



## ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Kırıkkale’de doğdu ilköğrenimini Ankara’da tamamladıktan sonra Cumhuriyet Anadolu Lisesi’nden (Ankara) mezun oldu. Lisans eğitimini tamamladığı Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden 2010 yılında mezun oldu ve aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinde FBE Maden Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamlayarak, aynı yıl aynı üniversite ve anabilim dalında doktora eğitimine başladı.

8 adeti SCI indeksli makale olan, çoğu uluslararası olmak üzere ilk yazar olarak 38 adet bilimsel makale ve bildiri yazarıdır. Alanında önde gelen dergilerde (Rock Mechanics and Rock Engineering, Geomechanics and Engineering, International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering) hakemlikler yapmıştır. 2016 yılında Mayeb Yayıncılık (Madencilik ve Yerbilimleri Basım Yayın ve Dağıtım Şirketi) tarafından basılan “Madencilik El Kitabı” içerisinde “Kaya Mekaniği” ve “Tahkimat” bölümlerinin yazarlığını yapmıştır. Ülkemizdeki madencilik ve yerbilimleri alanındaki akademik dergilerinden olan MT Bilimsel (Madencilik Türkiye Bilimsel) dergisi yardımcı editörlük görevini Ekim 2015 itibari ile yürütmektedir. Ayrıca, 1. Türkiye Tarihi Madenler Konferansı Bildiriler Kitabı Editörlüğü görevini üstlenmiştir.

2014 Ekim ayı itibari ile Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) Tarihi Alanları Koruma Komisyonunda ve Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Derneği (ISSMGE) Asya Kıtası Tarihi eserleri koruma teknik komitesi (ATC 19) üyesi olarak görev almaktadır. Türkiye, Avustralya, Japonya, Güney Kore, İngiltere gibi ülkelerde bilimsel etkinliklere katılmış ve sözlü sunumlar gerçekleştirmiştir. Doktora çalışmaları kapsamında 2014-2015 yıllarında 1 yıl süre ile Tübitak tarafından burslu olarak Avustralya’da bulunan Queensland Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırmalara katılmıştır.

Doktora tezi konusu olan “Çeşitli Mühendislik Polimerlerinin Kaya Saplama Malzemesi olarak Kullanımları” üzerine olan çalışmaları kapsamında 2013 Uluslararası Tünelcilik Ödülleri’nde Yılın Ürün ve Ekipman İnovasyonu kategorisinde finalist olmuş, Türkiye Maden Mühendisleri Odası tarafından verilen Madencilikte İlkler 2014 Ödülünü kazanmış ve uluslararası doktora tezi çalışmaları için Kanada merkezli Golder Associates



firması tarafından düzenlenen Golder Foundation 2014-2015 ödülleriinde 2.lık ödölünü kazanmış bulunmaktadır.

Maden Mühendisi kimliğinin yanı sıra müzisyen kimliği de bulunmakta olan tez yazarının bugüne kadar çoğunluğu Ankara'da olmak üzere 50 üzerinde canlı sahne performansı bulunmakta olup, 2008 yılında yurtdışında (İsveç'te) basılmış ve uluslararası dağıtıma sahip "Çöl Gecesi" adlı albümü yayınlanmıştır. Aynı yıl Amerika'da yayınlanmış olan "Shredding across the World" gitarist albümünde yer almıştır. 2009 yılında "Tarihte Bugün" adlı single çalışması yayınlanmıştır. 3 tiyatro oyunu için müzik bestelemiştir. Ulusal kültür sanat dergisi "Rock Station" da 2006-2008 yıllarında 3 yıl süre ile gitar-teknik konusunda köşe yazarlığı yapmıştır.

Tez yazarının doktora çalışmaları süresince yayınlanmış olan makale ve bildirilerinin listesi aşağıda verilmiştir:

#### SCI,SSCI,AHCI INDEXLERİNE GİREN DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

Kömürlü E., Kesimal A., Demir S., Experimental and Numerical Analyses on Determination of Indirect (Splitting) Tensile Strength of Cemented Paste Backfill Materials under Different Loading Apparatus, Geomechanics and Engineering, 10 (2016) 775-791.

Kömürlü E., Kesimal A., An Experimental Study on Reinforcing Rock Columns Using Heated Polymeric Ties, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49 (2016) 1995-2003.

Kömürlü E., Cihangir F., Kesimal A., Demir S., Effect of Adhesive Type on the Measurement of Modulus of Elasticity using Electrical Resistance Strain Gauges, Arabian Journal for Science and Engineering, 41 (2016) 433-441.

Kömürlü E., Kesimal A., Demir S., Experimental and numerical study on determination of indirect (splitting) tensile strength of rocks under various load apparatus, Canadian Geotechnical Journal, 53 (2016) 360-372.

Kömürlü E., Kesimal A., Evaluation of Indirect Tensile Strength of Rocks Using Different Types of Jaws, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (2015) 1723-1730.

Kömürlü E., Kesimal A., Improved Performance of Rock Bolts using Sprayed Polyurea Coating, Rock Mechanics and Rock Engineering, 48 (2015) 2179-2182.

Kömürlü E., Kesimal A., Sulfide-rich mine tailings usage for short-term support purposes: An experimental study on paste backfill barricades, Geomechanics and Engineering, 9 (2015) 195-205.

Kömürlü E., Kesimal A., Hasanpour R., In situ horizontal stress effect on plastic zone around circular underground openings excavated in elastic zones, Geomechanics and Engineering, 8 (2015) 783-799.

## DİĞER DERGİLERDE YAYIMLANAN MAKALELER

Kömürlü E., Kesimal A., Rock Bolts from Past to Present in 20 Inventions, MT Bilimsel, 9 (2016) 69-85.

Kömürlü E., Özkan F.S., 2000 yaşında bir mega yapı: Titüs tüneli", Tünel Teknolojisi, 5 (2016) 34-37.

Kömürlü E., Kesimal A., Plastik Gövdeli Sürtünmeli Kaya Saplamalarının Kullanılabilirliği, Madencilik, 54 (2015) 41-59.

Kömürlü E., Kesimal A., Experimental study of polyurethane foam reinforced soil used as a rock-like material, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 7 (2015) 566-572.

Kömürlü E., Kesimal A., Çolak Ü., Poliüre Türü Püskürtülen İnce Kaplamaların Kaya Saplamaları Performansları Üzerindeki Etkileri, Madencilik, 53 (2014) 13-18.

Kömürlü E., Kesimal A., Geçmişten Günümüze Tünelcilik ve Tahkimat Malzemeleri, Madencilik, 52 (2013) 33-47.

Kömürlü E., Özkan F.S., Tarihten Günümüze Elmaslar, Madencilik Türkiye, 34 (2013) 76-83.

Kömürlü E., Toptaş S., Şehirsel Bölgelerde Yapılan Dik Temel Kazılarının Duraylılığının İncelenmesi, MT Bilimsel, 1 (2012) 13-57.

## HAKEMLİ KONGRE/SEMPOZYUM BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR

Kömürlü E., Kesimal A., Özkan F.S., Use of Various Loading Apparatus in Indirect (Brazilian) Tensile Strength test of Rock Materials, National Engineering Geology Symposium of Turkey (MühJeo 2015), Trabzon, Türkiye, 3-4 Eylül 2015, Bildiriler kitabı: 238-245.

Üçüncüoğlu A.G., Kömürlü E., A General view on mining history of Gumushane city in Ottoman Era", 1st Conference on Historical Mining Sites of Turkey, Trabzon, Türkiye, 3-4 Aralık 2015, Bildiriler kitabı: 99-105.

Kömürlü E., Kesimal A., Rock Bolting from Past to Present in 20 Inventions, 1st Conference on Historical Mining Sites of Turkey, Trabzon, Türkiye, 3-4 Aralık 2015, Bildiriler kitabı: 68-87.

Kömürlü E., Kesimal A., Notes from a trip to Titus tunnel, a Roman tunnel in Turkey, 1st Conference on Historical Mining Sites of Turkey, Trabzon, Türkiye, 3-4 Aralık 2015, Bildiriler kitabı: 103-104.

Kömürlü E., Cihangir F., Kesimal A., Demir S., A Numerical Study on Deformation Measurement of Rock Materials using Electrical Resistance Strain Gauges: Investigation of Adhesive Type and Thickness Effect, 24th International Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2015), Antalya, Türkiye, 14-17 Nisan 2015, Bildiriler kitabı: 407-412.

Kömürlü E., Kesimal A., Çolak Ü., Polyurea type Thin Spray-on Liner Coating to Prevent Rock Bolt Corrosion, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japonya, 14-16 Ekim 2014, Bildiriler kitabı: 1389-1397.

Kömürlü E., Kesimal A., New Support Materials for Forepoling and Umbrella Applications, 3rd International Symposium and Exhibition on Underground Excavations for Transportation, İstanbul, Türkiye, 29-30 Kasım 2013, Bildiriler kitabı: 423-435.

Kömürlü E., Kesimal A., Bekar H., Effects of Fly Ash Usage on Concrete Flexural Strength Reinforcing Efficiency of Steel Fiber, 23th International Congress and Exhibition of Tukey (IMCET 2013), Antalya, Türkiye, 16-19 Nisan 2013, Bildiriler kitabı: 597-609.

Kömürlü E., Kesimal A., Erçikdi B., An Investigation of Uncemented Paste Backfill Applicability. And, Consolidation Effects on Inaccuracy of Paste Backfill in situ Strength Estimation by Laboratory Tests, 23th International Congress and Exhibition of Tukey (IMCET 2013), Antalya, Türkiye, 16-19 Nisan 2013, Bildiriler kitabı: 1017-1024.

Kömürlü E., Kesimal A., Jaw Effect of Indirect Tensile Strength Test Disk Failure Mechanism, 7. Asya Kaya Mekaniği Sempozyumu, Seul, Güney Kore, 15-17 Ekim 2012, Bildiriler kitabı: 624 -637.

Kömürlü E., Kesimal A., Using Sprayed Polymer as Tunnel Support, 7th Asian Rock Mechanics Symposium, 7. Asya Kaya Mekaniği Sempozyumu, Seul, Güney Kore, 15-17 Ekim 2012, Bildiriler kitabı: 1486-1499.

Kömürlü E., Kesimal A., Poliüretan Malzeme ile Güçlendirilmiş Zemin Dayanımının İncelenmesi, 14. Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi, Isparta, Türkiye, 4-5 Ekim 2012, Bildiriler kitabı: 631-642.

Kömürlü E., Kesimal A., Polymer Fiber and Steel Fiber Comparison as Concrete Additive, 16th International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, Türkiye, 13-15 Eylül 2012, Bildiriler kitabı: 1129-1137.

Kömürlü E., Kesimal A., New Engineering Materials for Underground Constructions, 16th International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, Türkiye, 13-15 Eylül 2012, Bildiriler kitabı: 307-319.

Kömürlü E., Kesimal A., Effect of Polymer Fiber on the Shotcrete Tunnel Support, 10. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 8-9 Aralık 2011, Bildiriler kitabı: 47-55.