

Poliamid-6 türü Mühendislik Polimerinin Dolgulu Kaya Saplama Malzemesi olarak Kullanılabilirliği

Usability of Polyamide-6 type Engineering Polymer as Grouted Rock Bolt Material

EREN KÖMÜRLÜ^{1*}, AYHAN KESİMAL¹, C. OKAY AKSOY²

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon

²Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Geliş (*received*) : 05 Eylül (September) 2016

Kabul (*accepted*) : 22 Kasım (November) 2017

ÖZ

Bu çalışmada Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin yeni kaya saplama malzemeleri olarak kullanılabilirliği laboratuvar ve arazi ölçekli deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Dolgulu kaya saplaması malzemesi olarak tahkimat özellikleri test edilen Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin yüksek gövde dayanımı, yüksek elastik deformasyon limiti ve yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Çimento dolgu içerisindeki düşük aderansı sebebi ile enjeksiyonu kırmadan uzayabilen poliamid saplamaların taşıma kapasitesinin önemli ölçüde saplama ucundaki mekanik ankraja bağlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın çıktısı olarak, dolgulu saplama uygulamalarına yönelik ucu kancalı poliamid saplamalar geliştirilmiştir. Statik ve dinamik yükler altında ideal tahkimat reaksiyonları sergilemekte olan Poliamid-6 saplamaların kaya mühendisliğinde sistematik uygulamalarının başlatılması önerilmiştir. Özellikle, tahkimat basıncında azalma olmaksızın yüksek deformasyona müsaade edilmesi istenen kaya sıkışması, kil şişmesi ve kaya patlaması gibi problemlerin yaşandığı kaya kütleleri içerisinde poliamid saplamaların ekonomik olarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya Saplama, Tahkimat, Polimer mühendislik malzemeleri, Poliamid, Maden Mühendisliği.

ABSTRACT

In this study, usability of Polyamide-6 type engineering polymer as a new rock bolt material was investigated carrying out a series of laboratory and field scale experimental studies. The Polyamide-6 type polymer tested as a grouted rock bolt material was assessed to have a good body strength, large elastic deformation limit and high energy absorbing capacity. The load bearing capacity of Polyamide-6 rock bolts which can elongate in the cement grout as a result of having low adhesion values was found to dominantly depend on the mechanical anchorage in front of the shank. As an outcome of this study, polyamide rock bolts have been designed with different mechanical anchors. It was suggested to start the systematical use of polyamide rock bolts having ideal support reactions under both static and dynamic load conditions in rock engineering. Especially, Polyamide-6 rock bolts were assessed to be economically usable in rock masses with squeezing, swelling or bursting problems, which need for non-decreasing support pressure while being highly deformed and good energy absorption capacity.

Keywords: Rock Bolts, Support, Polymer engineering materials, Polyamide, Mining Engineering.

* E. Kömürlü

e-posta: ekomurlu@ktu.edu.tr

GİRİŞ

Kaya saplamaları için hizmet süreleri uygulama alanına bağlı olarak değişmekte olup, 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 de mevcuttur (Kolymbas, 2005; Hoek, 2006; Holter, 2014). Özellikle, sülfürlük madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına maruz kalan kaya saplamaları 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 saplamalar yerine 1980'li yıllardan itibaren alternatif olarak polimer kompozit saplamaların üretilmesi gösterilebilir (Ranasooriya, vd. 1995; Li and Lindblad, 1999; Kömürlü, 2012; Hassell ve Villaescusa, 2005; Kömürlü ve Kesimal, 2013b).

Kaya saplamalarının paslanma ve zamana bağlı olarak taşıma kapasitelerinin azalması nedeni ile çelik yerine alternatif, korozyon problemi olmayan çeşitli polimer malzemelerin kaya saplaması malzemesi olarak kullanımı üzerine çalışmalar kapsamında ilk ürün olarak 1985 yılında İsviçre'li Weidmann tarafından lif katkılı polimer (FRP) kompozit malzemeler kaya mühendisliği uygulamalarına sokulmuştur (Firep, 2013).

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. Günümüzde, lif ve polimer matriks malzemeleri, karışım oranları, ekstra katkıları, üretim yöntemleri gibi etkenlere bağlı olarak geniş aralıkta değişebilen mekanik parametre değerlerine sahip kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Çeşitli üreticilerin teknik verilerine göre, kaya saplaması malzemesi olarak kullanılmakta olan karbon lifli polimer kompozit (CFRP) ve cam lifli polimer kompozit (GFRP) ürünlerin dayanım değerlerinin çoğu çelik malzemeninkine nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir (Kömürlü ve Kesimal, 2012a; Kömürlü ve Kesimal, 2015).

Kaya saplaması 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 adrens sağlayabilmektedir (Kömürlü vd., 2014).

Dolgulu (enjeksiyonlu) kaya saplamaları uygulamalarında yenilme, saplama gövdesinin yenilmesi, saplama enjeksiyon arayüzeyin başlayan veya enjeksiyon delik arayüzeyinden başlayan adesif yenilmeler, enjeksiyon malzemesinden başlayan kohesif yenilmeler veya zayıf kaya kütlesi şartlarında görülebilen kaya kütlesindeki yenilmeler şeklinde gerçekleşebilmektedir (Li vd., 2012; Mostafa vd., 2014; Oreste ve Cravero, 2008; Stimpson, 1991). Kaya saplaması malzemesinin montajının yapıldığı delik ve enjeksiyon malzemesi ile etkileşimi taşıma kapasitesi ve gerekli tahkimat basıncının sağlanacağı deformasyon miktarını etkilemektedir (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000). Bu sebeple, kaya saplaması üretiminde kullanılacak malzeme seçiminde gövde dayanımı gibi yüzeyinin enjeksiyon malzemesine yapışma performansı da belirleyicidir. Tahkimat performansının farklı yükleme koşulları altında değişiklik göstermesi nedeni ile, uygulama detayları ve zemin özelliklerine bağlı olarak statik yük taşıma kapasitesine ek olarak dinamik yüklenmelere karşı tahkimat sistemlerinin direnci dikkate alınmalıdır.

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. Kaya patlaması problemlerine yönelik, enerji emme kapasitesi yüksek olan ve dinamik ani yüklere karşı tasarlanan ilk kaya saplaması konik uçlu kaya saplamalarıdır. Karmaşık olmayan bir tasarıma sahip olan konik uçlu kaya saplamalarının 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 saplaması gövdesine sahip ilk kaya saplamaları 2008 yılında Garford saplaması (Avustralya) ve Roofex (İsveç) isimleri ile geliştirilmiştir. Bu saplamalar, yüksek yük taşıma kapasitesi ve deformasyon limiti sağlamakta, geleneksel kaya saplamalarına nazaran daha sünek tahkimat reaksiyonları sergilemekte ve bu sebeple kaya patlaması nedeni ile yenilmiş kaya kütlesinin askıda kalmasını sağlayarak göçük oluşumunu engelleyebilmektedirler. Şekil 1'de kaya patlaması yaşanan bir yer altı açıklığı görülmektedir. Şekil

2’de ise Roofex türü kaya saplamalarının yüksek deformasyon limiti dolayısı ile kinetik enerjinin absorbe edilmesi sonucu önlenen bir göçük şematik olarak gösterilmektedir. 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 yükseltilebilmektedir. 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).

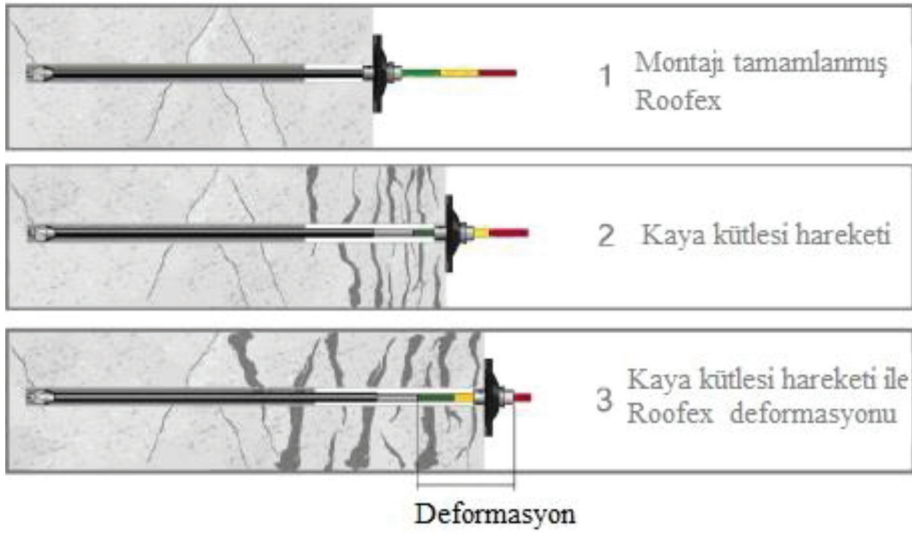
Kaya patlaması problemleri ile mücadele edilmesi için polimer malzemeler yüksek enerji emme kapasiteleri ve darbe dirençleri nedeni ile tercih edilmektedirler (Kömürlü, 2012; Wu ve Oldsen, 2010; Archibald ve Dirige, 2006). Mekanik özelliklerine bakıldığında aynı isime sahip olan polimerlerin üretim detaylarına bağlı olarak farklılıklar sergiledikleri görülebilmektedir. Polimer malzeme tercihinde tipik dayanım değerlerinin

göz önünde bulundurulması gibi farklı ürünlerin kıyaslanması adına ürün detaylarının dikkate alınması gereklidir. Mekanik özellikleri nedeni ile tercih edilen polimerler genellikle mühendislik polimerleri olup, Poliamid, ABS, Akriklik gibi türler en popüler olanlarıdır.

Kaya saplamalarının uygulanacağı zemindeki suyun kimyasal özelliklerine bağlı olarak polimer ürünler tercih edilmelidir. Kaya saplaması malzemesi tercihinde en önemli unsurlardan biri de malzemenin kimyasal direncidir. Özellikle asidik yeraltı suları ile temas durumunda çelik tahkimatlar korozyon nedeni ile kısa süre içerisinde dayanım değerlerini kaybetmektedirler. Kaya saplamalarının hizmet sürelerini uzatmak için, yüksek kimyasal dirence sahip malzemelerin tercih edilmesi avantaj sağlamaktadır. Gerek yüksek kimyasal direnci ve gerek dayanım değerleri nedeni ile Poliamid-6 türü polimer malzeme farklı mühendislik alanlarında çeşitli amaçlar ile kullanımı hızla yaygınlaşmakta olan bir mühendislik polimeridir (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 75-100 MPa aralığında çekme dayanımına sahip olup, lif katkılı Poliamid-6 kompo-



Şekil 1. Kaya patlaması yaşanan bir yer altı açıklığı.
Figure 1. An underground opening with rock burst.



Şekil 2. Roofex kaya saptaması tarafından müsaade edilen kaya kütlesi deformasyonu.

Figure 2. Rock mass deformation let by Roofex rock bolt.

zit ürünler için bu değer önemli ölçüde artmakta ve 150 MPa üzerinde çekme dayanımına sahip olan cam lif katkıli Poliamid-6 ürünler temin edilebilmektedir (Kömürlü, 2016).

Günümüzde poliamid malzemeler içme suyu taşıma ve depolama uygulamaları gibi kimyasal direncin çok önemli olduğu uygulamalarda kullanılmakta olup, mekanik özellikleri nedeni ile de makina elemanları üretiminde kullanımları mevcuttur (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).

Lif katkı kaya saptamalarının dayanım değerlerini artırıyor olsa da, birim deformasyon limitlerini saf polimer kullanımlarına kıyas ile daraltmaktadır. Lif katkıli polimer kompozit kaya saptamalarının kullanımları ile açıklık kesitinde aşırı daralmaların yaşanabildiği zemin içerisinde yenilmeden deformasyona müsaade edilememektedir. Örneğin, çeliğe nazaran deformasyon limitleri yüksek olsa da lif katkıli polimer kompozit saptamalar tipik olarak %2 - %3 dolaylarında birim deformasyona müsaade edebilmektedir ve %10 mertebelerine çıkan yeraltı açıklığı kesitindeki kapanmaların yaşandığı spesifik uygulama alanlarında lif içerikli polimer malzeme kullanımı uygun değildir (Li vd. 2009; Li vd., 2014; Kömürlü ve Kesimal 2016b). 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 ilgili zemin reaksiyonları karşısında arzu edilen tahkimat özelliğidir.

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 saptamaların kullanımı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, kaya patlaması problemi nedeni ile açığa çıkan yüksek enerjinin emilmesi açısından yüksek deformasyon limitine sahip polimer malzeme kullanımı incelenmiştir. Bu kapsamda, lif katkısız Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin kaya saptaması malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş ve tahkimat özellikleri elde edilen sonuçlar ışığında değerlendirilmiştir. Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin dolgu kaya saptaması uygulamalarında kullanılmasına yönelik polimer malzeme üzerine uygulanan mekanik testlere ek olarak çimento enjeksiyonu içerisinde Poliamid saptama çekme/çıkarma testleri gerçekleştirilmiş ve aderansın artırılarak yüksek taşıma kapasitesine sahip olunması için saptama ucunda bulunan meka-

nik ankraj (kanca) tasarımı yapılmıştır. Mekanik ankrajlı ve ankrajlı Poliamid saplamlar üretilerek yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma kapsamında yaygın bilinen Poliamid-6 türü mühendislik polimerlerinin kaya saplama malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Poliamid türü mühendislik polimerleri ile üretilmiş olan kaya saplamlarının tahkimat özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışma detayları sıradaki alt başlıklar ile verilmektedir.

Doğrudan çekme (Eksenel Yükleme Testleri)

35 mm çapında, 60 cm uzunluğundaki Poliamid-6 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 3). Yükleme hızı 10 mm/dakika olarak seçilen testlerde deformasyon tayini için LVDT kullanılmıştır.

Makaslama testleri

Poliamid çubuklara makaslama testleri yapılması için çubuk çapı ile aynı iç çapa sahip olan çelik halkalar kullanılmıştır. Şekil 4'de görüldüğü gibi ikiye ayrılmış olan ikişer adet çelik halka çubuk alt ve üst mesnetleri olarak yerleştirilmiştir, böylelikle düşey yönde hidrolik pres ile yükleme yapılması ile iki adet makaslama düzlemi oluşmuştur (Şekil 5 ve 6). Makaslama testlerinde yükleme hızı olarak 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 deney sonunda makaslama düzlemlerinin görüntüleri Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmektedir.

Sünme testleri

Üç noktadan eğilme ve doğrudan çekme etkileri altında iki farklı sünme testi gerçekleştirilmiştir. Üç noktadan eğilme altında sünme testinde, 35 mm çapa sahip ve 24 cm uzunluğundaki Poliamid-6 çubuk numunesi 20 cm alt mesnetler arası mesa-



Şekil 3. Poliamid saplama çekme testi.
Figure 3. Direct tension test of Polymade bolt.



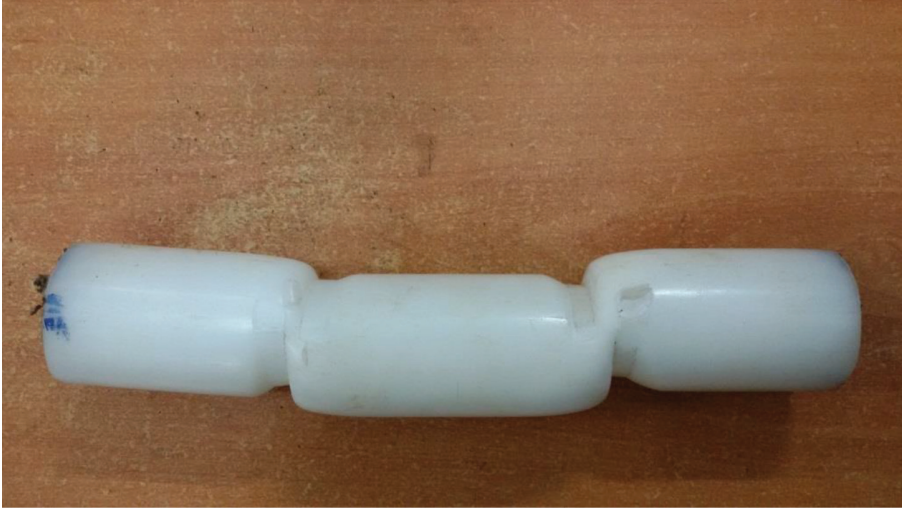
Şekil 4. Makaslama testlerinde kullanılan ayrılmış çelik halkalar.
Figure 4. Semi circular rings used in shear strength test.



Şekil 5. Makaslama halkalarının Poliamid rod ile kullanımları.
Figure 5. Shearing rings use with polyamide rod.



Şekil 6. Makaslama testi.
Figure 6. Shear test.



Şekil 7. Makaslanmış Poliamid numune.
Figure 7. Sheared polyamid sample.



Şekil 8. Makaslanmış Poliamid numune.
Figure 8. Sheared polyamid sample.

feye sahip olacak şekilde sabit yük altında bekletilmiştir. Üç noktadan eğilme altında sünme testinde 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 9). Eşitlik 1’de yer alan üç noktadan eğilme 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.

$$s_{if} = (8FL) / \pi D^3 \quad (1)$$

Eşitlik 1’de yer alan F yük (kN), D çap (cm), L alt mesnetler arası mesafe (cm) ve s_{if} eğilme altındaki çubuk numunesinin dış yüzeyinde oluşan çekme gerilmesini (MPa) ifade etmektedir.

Sünme testleri ayrıca doğrudan çekme altında da gerçekleştirilmiştir. Şekil 10’da görülen 53 kg ağırlığında 1 metre uzunluğundaki 10 cm çapında bir kolun dönme eksenine 8 cm mesafede delinen bir delikten çelik kablo geçirilerek bağlanmıştır. Doğru-

dan çekme altında sünme testinde kullanılan poli-
amid saplama numunesi 25 mm çapında ve 40 cm
uzunluğundadır. Poliamid numune üst çerçeveye ve
ağırlık koluna bağlanması için iki ucundan delinmiş
ve çelik kablolar ile asılarak sabit gerilme altında 150
gün süre ile bekletilmiştir. 53 kg çelik kolun ağırlık
merkezinin dönme eksenine yatayda yaklaşık 45 cm
mesafede olması ve dönme eksenine 8 cm mesafe-
ye saplamanın bağlanması nedeni ile doğrudan çek-
me yükünün yaklaşık 3 kN olduğu hesaplanmakta-
dır. Sünme deformasyonları ölçülmesi için saplama
üzerine iki adet kelepçe bağlanarak bu iki referans
kelepçe arasındaki mesafeler hassas dijital verniyeli
kumpas ile ölçülmüştür (Şekil 10).

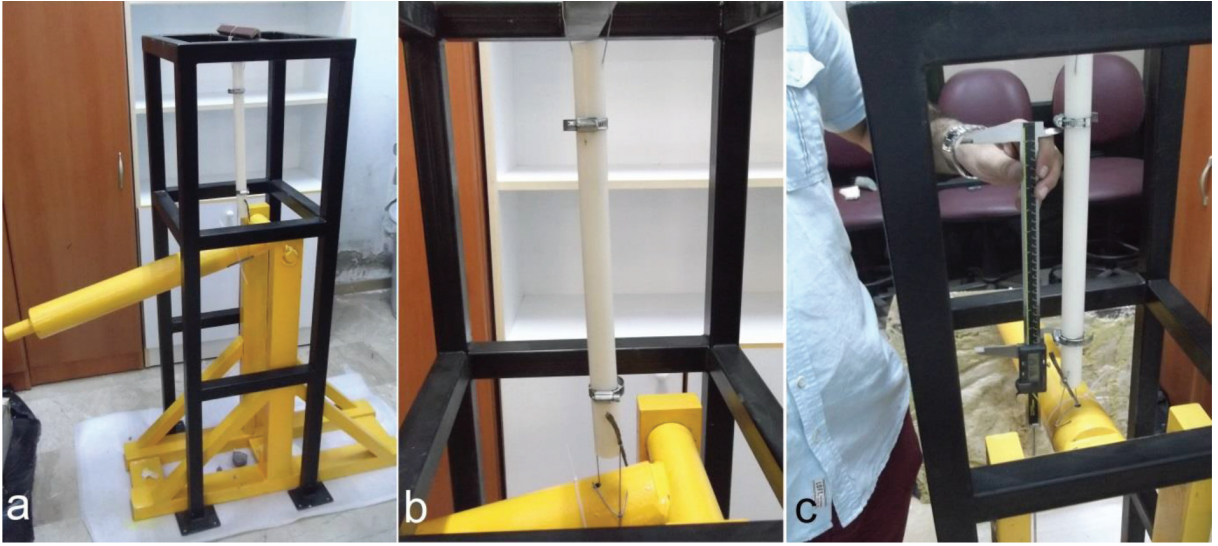
Çimento enjeksiyonu ile aderans ve çekme/ çıkarma testleri

30 mm çapa sahip poliamid çubuklara kaya sapla-
malarına yaygın uygulanan çimento/su enkesiyonu ile

aderans testi yapılmıştır. Cem II türü çimento ve su
karışımını su/çimento oranı kütlece %40 olacak şe-
kilde mikser içerisinde 8 dakika boyunca karıştırılarak
hazırlanmış ve çapı 100 mm ve derinliği 200 mm
olan kalıplar içine dökülmüştür. Çimento enjeksiyo-
nu ile doldurulan kalıplar içerisinde 30 mm çapında
poliamid çubuklar yerleştirilmiş ve taze enjeksiyon
şişleme ile sıkılarak homojenleştirme yapılmış,
poliamid numune ile enjeksiyonun homojen çevre-
lenmesi sağlanmıştır. Çimento/su karışımının 5 gün
kürlenmesi sonrasında Poliamid çubuklara çekme/
çıkarma testleri uygulanmış ve aderans ile yük taşıma
kapasiteleri belirlenmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi
taze enjeksiyon (çimento dolgu malzemesi) içerisinde
poliamid saplama numunelerinin oynamadan bekle-
tilmesi için saplamaların içerisinde geçirildiği delikli
sehpalar kullanılmıştır. Üçer adet ucu kancalı ve kan-
casız olmak üzere 6 adet poliamid saplama numune-
sine çimento enjeksiyonu içerisinde aderans (çekme/
çıkarma) testleri uygulanmıştır.



Şekil 9. Poliamid sünme testi (3 noktadan eğilme altında).
Figure 9. Polyamide creep test under three point flexure.



Şekil 10. Doğrudan çekme altında poliamid saplama sünme testi: a) saplama askı çerçevesi ve ağırlık kolu, b) gerilme altındaki saplama numunesi, c) saplama deformasyonunun dijital nervürlü kumpas ile ölçümü.
 Figure 10. Creep test under direct tension: a) hanging frame and load arm, b) polyamide sample under tension, c) measuring deformation by using digital vernier callipers.

Kanca montajı yapılması için poliamid saplama uçları 2 mm çapındaki ayaklı matkap ucu ile delinmiştir. Bir saplama üzerinde dörder adet delik delinmiş ve bu deliklere 90mm x 15 mm x 2 mm boyutlarında delikli çelik plakalar (kanca kanatları) vidalama yapılarak sabitlenmiştir. Kanca sabitleme için 2 mm çapındaki deliklere uygulanmak üzere 3 mm çapındaki vidalar kullanılmıştır. Plakalar üzerindeki delik çapı 4 mm olup, sabitleme vidalarının delik dışında kalan 6 mm çapındaki baş kısımların sıkıştırılması ile kancalar sıkı bir şekilde sabitlenebilmiştir. Enjeksiyon içerisinde daha iyi ankraj sağlaması için kanca plakaları 15°-20° aralığında, mengene kullanılarak eğildikten sonra saplama uçlarına sabitlenmiştir. Kancalı poliamid saplama ucunun montaj işlemlerine yönelik görseller Şekil 12’de verilmiştir. Poliamid saplama çimento enjeksiyonu ile temas uzunluğu ortalama 19 cm olup, her numune için saplama-enjeksiyon temas uzunluğu (kürlenmiş enjeksiyonun yüksekliği) ölçülerek not edilmiştir. Saplama çekme/çıkarma testlerinde yükleme hızı olarak 0.1 kN/saniye tercih edilmiştir.

Çimento enjeksiyonunun 5 gün süre ile kürlenmesi neticesinde numuneler doğrudan çekme testi düzeneğinin üzerinde bulunan delikten ters çevirilerek geçirilmiş ve Şekil 13’te görüldüğü gibi düzeneğe 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.

Arazi Testleri

Bu çalışma kapsamında, Rize ilinde bulunan Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş.’nin yeraltı galerilerinde montajları yapılan Poliamid saplamalara arazi ölçekli taşıma kapasitesi testleri gerçekleştirilmiştir. Arazi testlerinde kullanılan Poliamid saplama 40 mm çapında ve 2.4 metre uzunluğundadır. Kancasız ve 2 farklı kanca tasarımı ile 3 çeşit farklı poliamid saplama numuneleri dörder adet hazırlanmıştır. Arazi testlerinde ve laboratuvar testlerinde aynı tür kancalar vidalanarak kullanılmıştır. Kaya saplama 56 mm çapındaki deliklerin içerisine çimento/su enjeksiyonu dolgusu yapıldıktan sonra saplama montaj makinesi (Atlas Copco Boltec) ile itilmiştir. Dolgu içerisinde 8 gün saplama bekletildikten sonra, kürlenen dolgu içerisinde numuneleri çekmek için hidrolik saplama çekme (Pull-out test) cihazı kullanılmıştır. Saplama çekme cihazı tarafından numunelerin tutulabilmesi için 64 mm dış çapında ve 15 mm uzunluğunda bilezikler Şekil 15’te görüldüğü gibi 64 mm uzunluğunda ve 8 mm çapındaki bir çelik çubuğun saplama üzerinde açılan deliklere çakılması ile sabitlenmiştir. Yeraltında uygulanan saplama çekme testine yönelik çeşitli görseller Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 11. 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, f) delikli saplama tutma sehpası ve saplamaların oynamaması için bantlanmış delik, g) saplama tutma sehpası ve enjeksiyon içerisindeki poliamid saplamalar.

Figure 11. Preparing polyamide pull-out test specimens: a) mixer cement/water mortar made in, b) pouring cement grout mix to moulds, c) tamping with rods, d and e) polyamide bolt in the grout material, f) a banded hole of rock bolt holding table, g) rock bolt holding table with holes and bolts in grout.

BULGULAR

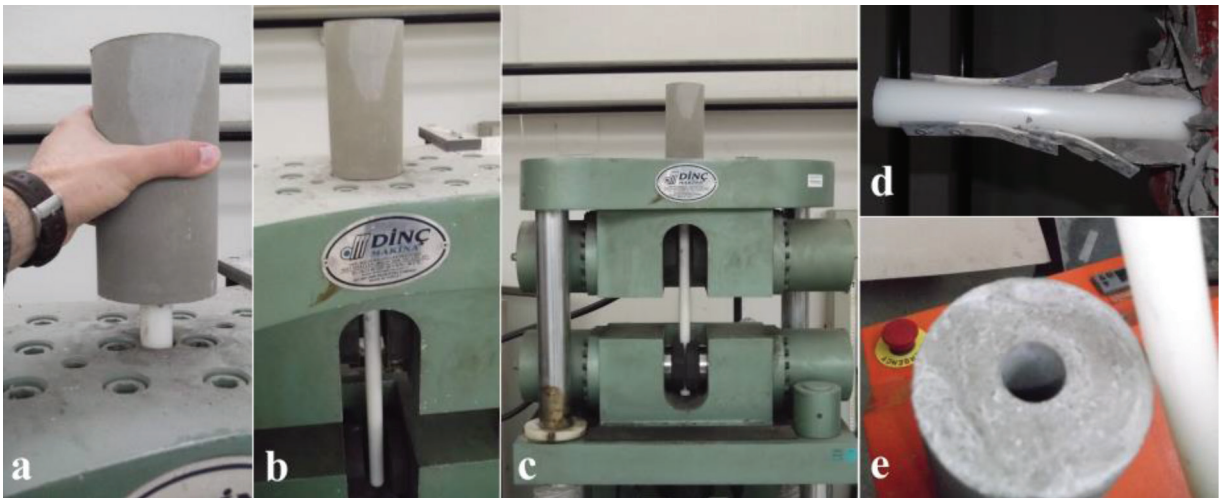
Poliamid çubuklara laboratuvarında uygulanan doğrudan çekme testi neticesinde %25 birim deformasyon

limitine gelinmesi ile test durdurulmuş ve test sonlandırılana kadar yük değerlerinde düşüş yaşanmadan Poliamid çubuk deformasyonuna devam etmiş, kopma yaşanmamıştır. Plastik davranış başlan-



Şekil 12. Poliamid saplama ucundaki kanca: a) ucu delinmiş poliamid saplama, b ve c) vidalanmış kanca, d) kancalı ve kancasız poliamid saplamalar.

Figure 12. Mechanical anchors in front of a polyamide bolt: a) a drilled polyamide bolt, b and c) screwed anchors, d) polyamide bolts with and without anchors.

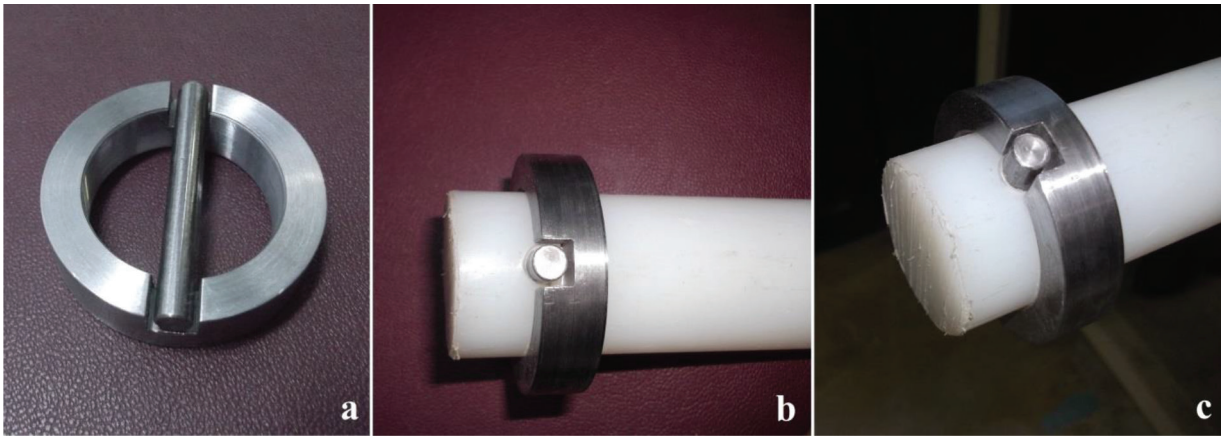


Şekil 13. Poliamid saplamalara uygulanan çekme çıkarma testi: a, b) Poliamid çubuğun test düzeneğine oturtulması, c) numunenin yüklenmesi, d) yenilmiş numune içindeki kanca, e) kancasız poliamid numunenin çimento içinden sıyılması.

Figure 13. Pull-out test carried out on polyamide bolts: a and b) Placing the cement grout material block with rock bolt, c) Specimen loading, d) Anchor in a failed specimen, e) Sliding of the bolt with no anchor in the cement grout material.



Şekil 14. Kancasız, 4 kanatlı ve 6 kanatlı kancalı saplamalar.
Figure 14. Rock bolts with no anchor, four-piece anchor, six-piece anchor.



Şekil 15. Saplama tutma bilezği tasarımı: a) Çelik çubuğun bilezik kanalına oturması, b ve c) montajları tamamlanmış saplama tutma bilezikleri
Figure 15. Bolt holding ring design: a) Steel rod placing in the trimmed ring, b and c) mounted holder ring setup.

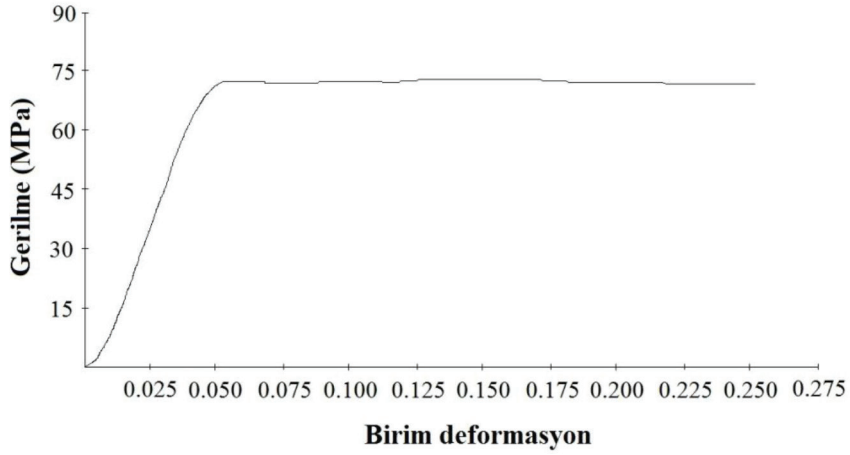
gücüne kadar olan bölümde yaklaşık %4 lineer elastik olarak deformasyon sergilenmiş ve ardından kısa bir aralıktaki elasto-platik deformasyonun tamamlanması ile başlayan plastik deformasyon gerilme değerlerinde azalma olmaksızın test sonuçlandırılana kadar devam etmiştir (Şekil 17). Lineer elastik deformasyon eğrisi baz alınarak hesaplanan poliamid malzemenin Elastisite modülü değeri 2 GPa olarak hesaplanmıştır.

Poliamid çubuk malzemesinin çekme dayanımı ise elde edilen sonuca göre 75 MPa olarak belirlenmiştir.

Makaslama testleri ile elde edilen sonuçlara göre, Poliamid çubuk 131 kN yük değerine ulaşılması neticesinde gerilme artışı yaşamadan plastik deformasyona (akmaya) başlamıştır ve sabit gerilme altında makaslama düzlemindeki 1.4 cm akma neticesinde poliamid numunenin platen yüzeyine yaklaşması ile



Şekil 16. Yeraltında saplama çekme testi: a) saplama çekme krikosu, b ve c) test edilmiş bazı saptamalar.
Figure 16. Pull test performed in the mine: a) bolt pulling jack, b and c) some tested polyamide bolts.



Şekil 17. Poliamid saplama çekme testinden elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği.
Figure 17. Stress and strain graph obtained from polyamide bolt direct tension test.

test sonlandırılmıştır. Makaslama testi sonucunda kopma veya çatlak oluşumu yaşanmaksızın makaslama gerilmeleri altında plastik deformasyon göstermiş olan poliamid numune Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir. Makaslama testinde kullanılan numune üzerinde iki adet makaslama 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 Çizelge 1'de verilmiştir.

Laboratuvar ölçekli poliamid saplama çekme/çıkarma testinden elde edilen kancalı ve kancasız tasarımlar için maksimum yük değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Poliamid saptamalarına uygulanan aderans testlerinde kancasız saptamaların delik içinden çimento enjeksiyonu kırmadan sıyrıldığı, yenilmenin

saplama ve enjeksiyon arayüzeyinde gerçekleşen adesif bir yenilme olduğu gözlemlenmiştir. Kancalı saptamalara uygulanan testler ise enjeksiyon malzemesinde yenilme nedeni ile tamamlanmıştır.

Yeraltında uygulanan saplama taşıma kapasitesi testinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3'te verilen değerler yeraltında saptama çekme testlerinde elde edilen maksimum yük değerleri olup, bu değerlere gelinmesi ile kancasız saptamaların enjeksiyon içerisinde azalan yük altında kaymaya başladığı görülmüştür. Kancalı saptamalar ise bu yük değerine ulaştıklarında kaymanın devam etmesi için enjeksiyon içerisindeki küreme sebebi ile gerçekleştiği yorumlanan ufak yük artışları ile sıyrılmıştır. Saptamaların taşıma kapasitesi olarak Çizelge 3'te verilmekte olan değerler saptamaların sıyrılmaya başladığı yük değerlerini ifade etmektedir.

Çizelge 1. Poliamid sünme testi ile elde edilen zamana bağlı deformasyon değerleri.

Table 1. Time-dependent deformation data obtained from polyamide creep tests.

Süre	3 nokta eğilme altında sehim (mm)	Doğrudan çekme altında deformasyon (mm)
2 dakika	0,004	0,06
4 dakika	0,008	0,10
6 dakika	0,012	0,13
8 dakika	0,014	0,18
10 dakika	0,016	0,22
12 dakika	0,016	0,23
15 dakika	0,018	0,26
100 dakika	0,036	0,39
1 gün	0,068	0,62
2 gün	0,072	0,65
5 gün	0,088	0,75
10 gün	0,090	0,83
15 gün	0,090	0,88
30 gün	0,092	0,91
60 gün	0,094	0,92
90 gün	0,096	0,93
120 gün	0,100	0,93
150 gün	0,100	0,93

KULLANILAN MALZEMENİN MALİYETİ

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

TARTIŞMA

Yüksek oranda plastik birim deformasyona izin verebilen Poliamid-6 malzemenin %4 değerinde elastik birim deformasyon gösterebildiği ve zemin deformasyonlarına bağlı olarak önemli tahkimat basınçları sağlayabileceği belirlenmiştir. 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 süneklığe 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 (Yi ve Kaiser, 1994; Li, 2010; Li ve Doucet, 2012; Stacey, 2016; Kömürlü ve Kesimal, 2016b).

Çizelge 2. Poliamid saplamlar için aderans (çekme/çıkarma) testlerinden elde edilen maksimum yük değerleri.
Table 2. Maximum load values obtained from adherence (Pull-out) test for polyamide bolt specimens.

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

Çizelge 3. Yeraltında saplama çekme testi sonuçları.
Table 3. Underground pull test results for polyamide bolts.

Numune adı	Maksimum Yük (kN)	Standart Sapma (kN)	Numune sayısı
Kancasız	3,2	0,3	4
Kancalı (4 kanatlı)	29,4	1,5	4
Kancalı (6 kanatlı)	42,7	2,1	4

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 1 metre uzaması ile 72 kJ seviyesine kadar enerji emme kapasitesine sahip olduğu hesaplanabilmektedir. Bu değer, günümüzde kaya patlamaları ile mücadele amaçlı kullanılan kaya saplamlarının sahip oldukları enerji emme kapasitelerinin oldukça üzerindedir (Li vd., 2014; Wang vd., 2013).

Dayanım değerleri farklı birçok poliamid ürün mevcuttur. Kimyasal içerik ve üretim detaylarına bağlı olarak çekme dayanımı 100 MPa üzerine çıkan Poliamid-6 malzemeler temin edilebilmektedir. 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 saplamlarının istenilen ölçüde sünme direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Dolgulu saplama olarak kullanımı incelenen Poliamid-6, daha uzun hizmet sürelerine sahip olunması durumu için ilerleyen çalışmalar ile incelenmelidir. Bu çalış-

ma, aksenal gerilmelerin yanı sıra, blok hareketlerinin engellenmesi nedeni ile yeraltında maruz kalınan makaslama gerilmelerine karşı da kaya saplamlarının sünme dirençleri ve tahkimat performanslarının sünme nedeni ile zamana bağlı olarak değişimlerinin incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

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).

Poliamid saplamlar gerek statik ve gerek dinamik yükler karşısında avantaj sağlamaktadır. Poliamid-6 türü mühendislik polimerleri, gövde dayanımı pek çok kaya saplama uygulamalarında istenilen tahkimat basıncının sağlanması için yeterli olabilecek malzemelerdir. Ancak, sıradan poliamid saplamlar için çelik saplamlara nazaran 1.7-2 kat daha kalın çapa sahip saplamların kullanımı gereklidir. Bu konuda, çeliğin paslanabilir bir malzeme olması ve yeraltı suları ile temas halinde dayanım değerlerini kaybetmesi dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, aynı çapa

sahip poliamid ve çelik saplamaları kıyasla poliamidlerin daha avantajlı olması da korozyon problemine bağlı olarak mümkündür. Özellikle sülfirik cevher içeren madenlerde olduğu gibi asidik yeraltı sularına sahip alanlarda çelik saplamalar nispeten daha yüksek oranda taşıma kapasitelerini kayıp etmektedirler (Kömürlü vd., 2014).

Saplama çapı artışı ile enjeksiyon malzemesi ile saplama temas yüzey alanı artmakta ve bu sebeple aderans değerleri iyileşmektedir. Ancak, kancalı olmayan ve nervürlü düz yüzeyli poliamid saplamalara laboratuvarında uygulanan çekme/çıkarma testlerinden elde edilen 2,5 kN/m değeri ve yeraltındaki 2.4 metre uzunluğundaki kancasız saplamalardan elde edilen 3,2 kN değeri çelik saplama uygulamalarında sahip olunması istenen tipik çimento enjeksiyonu ile adezyon değerleri dikkate alındığında oldukça düşüktür (Villaescusa vd., 2015; Villaescusa vd., 2008; Jalalifar, 2011; Pellet ve Egger, 1996). Poliamid hidrofobik yüzeyin çimento enjeksiyonu ile zayıf yapışma göstermesi ve düz yüzeyli nervürlü poliamid saplama kullanımı, saplama gövdesi deformasyonu nedeni ile enjeksiyonda yenilme yerine, saplama ve enjeksiyon arayüzeyinde kayma sağlayabilmektedir. Kancasız ve nervürlü numunelere uygulanan çimento enjeksiyonu içerisinde çekme/çıkarma testinde poliamid saplamanın enjeksiyon malzemesinde çatlamaya neden olmadan tamamen sıyrılması bu konuda doğru- layıcı niteliktedir.

Bu sebeple, poliamid saplama kullanımında aderansı artıracak mekanik ankraj kullanımı önerilmektedir. Saplama ucunda kanca kullanılarak sağlanan mekanik ankraj ile taşıma kapasitesinin önemli ölçüde artırıldığı görülmüştür. Bu çalışmada uygulanan kanca ile saplama çekme testlerinden elde edilen maksimum yük değerlerinde önemli oranda artış sağlanmıştır. İyi bir kanca dizaynı ve enjeksiyon uygulaması ile sağlanan mekanik ankraj sayesinde, saplama gövdesinin taşıma kapasitesi seviyesinde tahkimat basıncı sağlanabilecektir (Mostafa vd., 2014; Li, 2007). 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. Kancaların enjeksiyon içerisinde ankraj sağlamalarına ek olarak, yeraltında delik çeperlerine kancaların takılması sebebi ile de ek ankraj sağlanmaktadır.

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 (dolgu) arayüzeyindeki zayıf yapışma nedeni ile, kancanın enjeksiyon içerisindeki ankraji ile tahkimat basıncı sağlanması poliamid saplamalar için daha çok delik dışındaki plakanın reaksiyonu sonucu yaşanacaktır (Oreste, 2008; Jalalifar, 2011; Kömürlü, 2016). Bu sebeple, poliamid saplamaların tahkimat performansları açısından plaka tasarımı kritik özelliğe sahiptir.

Enjeksiyonun aynı zamanda kaya kütlesi içindeki delik yüzeyine yapışması nedeni ile aşırı zemin deformasyonu sonucu dolguda yenilme gerçekleşmesi olasıdır. Bu sebeple, poliamid kaya saplamalarına yönelik spesifik dolgu detaylarının önerilmesine yönelik yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, saplama uzunluğunun doğru karar verilmesi, kancanın yaslandığı bölgede kaya kütlesi hareketi ile enjeksiyonda kırılma yaşanmaması için önemlidir.

SONUÇLAR

Deneyel çalışmalardan elde edilen bulgulara göre, Poliamid-6 türü mühendislik polimerinin kaya saplaması malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu görülmüş ve yüksek konverjansa müsaade edilmesi gerekli yeraltı açıklıklarının duraylılığın sağlanması amaçlı sistematik uygulamalar için yeni poliamid kaya saplamalarının geliştirilmesi önerilmiştir.

Poliamid gövdeli saplamaların 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 saplamaları üretiminde poliamid malzeme kullanımı önerilmemektedir. Poliamid-6 türü malzeme üzerine gerçekleştirilen bu çalışma ile, kaya mühendisliğinde çeşitli problemler karşısında ilerlemelere olanak sağlanabilmesi için farklı mühendislik polimerleri kullanımına başvurulmasının önem taşıdığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

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.
- 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.
- Firep, 2013. Online company report: <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.
- Hoek, E., 2006. Kaya Mühendisliği (Turkish translation of "Rock Engineering"). Publication of The Chambers of Mining Engineers of Turkey, Ankara.
- 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.
- 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.
- Kolymbas, D., 2005. *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach for Tunnelling*, Springer, Berlin.
- Kömürlü, E., 2012. Kaya ve Taneli Malzemelerde Yanal Gerilmelerin Tahkimat Tasarımı Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi FBE, Trabzon, Türkiye.
- Kömürlü, E., 2016. Çeşitli Mühendislik Polimerlerinin Kaya Saplama Malzemesi olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi FBE, Trabzon, Türkiye.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2012a. New Engineering Materials for Underground Constructions. 16th International Metallurgy and Materials Congress, İstanbul, Turkey, Proceedings book: 307-319.
- Kömürlü, 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., 2013a. New Support Materials for Forepoling and Umbrella Applications. 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 tünelcilik ve tahkimat malzemeleri. *Madencilik*, 52 33-47.
- Kömürlü, 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 2014, Saporro, Japan, Proceedings book: 1389-1397.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2015. Improved Performance of Rock Bolts using Sprayed Polyurea Coating. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 2179-2182.
- Kömürlü, E. ve Kesimal, A., 2016a. Reinforcing Rock Columns using Heated Polymeric Ties: An Experimental Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1995-2003.
- Kömürlü, E., Kesimal, A., 2016b. Rock Bolting from Past to Present in 20 Inventions. *MT Bilimsel*, 9, 69-85
- 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, 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. 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, 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. ve 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.
- Mostafa, G., Kourosh, S. ve Hossein J., 2014. Analysis profile of the fully grouted rock bolt in jointed rock using analytical and numerical methods. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 609-615.
- Nexant, 2015. Nylon 6, Nylon-66: Process technology, Production costs, Regional Supply/Demand Forecasts and Economic Comparison of Alternative Production Routes. 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.
- 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.
- Piringer, O.G. ve Baner, A.L., 2008. *Plastic packaging: interactions with food and pharmaceuticals*. Wiley-VCH, Germany.
- 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.
- Stacey, T.R., 2016. Addressing the Consequences of Dynamic Rock Failure in Underground Excavations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 4091-4101.
- Stimpson, B., 1991. A simplified rock mass-rock bolt interaction analysis for horizontally layered strata. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 9, 27-51.
- Villaescusa, E., Varden, R. ve 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.
- Villaescusa, E., Thompson, A.G. ve Player, J.R., 2015. *Dynamic Testing of Ground Support Systems*, MRIWA Project M417 Report, Perth, WA, Australia.
- 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.
- 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.
- Yi, X. ve Kaiser, P.K., 1994. Impact testing for rock-bolt design in rockburst conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31, 671-685.