

Püskürtme İnce Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin Kür Süresine Göre Değişiminin İncelenmesi

Doğukan GÜNER^{*1}, Hasan ÖZTÜRK¹

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 11.01.2017

Kabul tarihi: 14. 03.2017

Öz

Bu çalışma püskürtme ince kaplama (PİK) olarak tanımlanan polimer bazlı bir yüzey tahkimatı malzemesinin mekanik özelliklerinin direk çekme ve deformasyon deneyleri ile saptanmasını içermektedir. Dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan PİK'lerin çekme dayanımı, çekme modülü, yenilgide uzama yüzdesi, elastik modülü ve Poisson oranı gibi mekanik özellikleri bilinmesine rağmen bu değerlerin kür süresine bağlı olarak nasıl bir değişim gösterdikleri ilk kez bu çalışmada sunulmuştur. Ayrıca bu tip deneyler madencilik alanında sıklıkla yapılmadığı için deney düzeneğinin ve test numunelerinin hazırlanması, deneylerde dikkat edilmesi gereken koşullardan da detaylı bir biçimde bahsedilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen eşitlikler yardımıyla araştırmacı/ kullanıcı, polimer bazlı PİK malzemesinin istenen mekanik özelliğe ulaşabileceği süreyi kestirebilecek ve PİK'lerin uzun dönem mekanik davranışlarına ilişkin niceliksel fikir sahibi olabileceklerdir.

Anahtar Kelimeler: Püskürtme ince kaplama (pik), Kür süresi, yüzey tahkimatı, Direk çekme, deformasyon, Çekme dayanımı, Elastik modül, Poisson oranı

Investigation of the Effect of Curing Time on Mechanical Properties of Thin Spray-on Liners

Abstract

This study presents the investigation of mechanical properties of a polymer based surface support material known as thin spray-on liner (TSL) s, by performing direct tensile and deformability tests. Although mechanical properties such as tensile strength, tensile modulus (Young's modulus), elongation at break percentage, modulus of elasticity and Poisson's ratio of TSL's which are getting worldwide popularity are determined in the previous studies, the effect of curing time on these properties are presented in this study for the first time in the literature. Since these experiments are not widely conducted in the mining field, preparation of the test set-up and samples, and the test conditions that should be paid attention are mentioned in detail. With the help of the acquired equations, researchers/ companies will be able to estimate the time required for a polymer based TSL to reach the required mechanical properties and they will have a quantitative idea on TSL's behavior on the long run.

Keywords: Thin spray-on liner (tsl), Curing time, Surface support, Direct tensile, Deformability, Tensile strength, Modulus of elasticity, Poisson's ratio

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Doğukan GÜNER, dogukan@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

1990'lı yılların başında Kanada ve Güney Afrika'da yapılan eşzamanlı çalışmaların sonucunda püskürtme betona alternatif olarak yeni bir malzeme ortaya çıkmıştır. 90'lı yıllarda birkaç madende yapılan denemelerin son derece olumlu sonuçlar vermesi, maden kuruluşlarınca büyük heyecanla karşılanmıştır. 2001 yılında Avustralya'nın Perth eyaletinde yapılan "1st International Seminar on Mine Surface Support Liners: Membrane, Shotcrete and Mesh" adlı çalışmada "plastik, polimer ya da çimento bazlı yüzey tahkimatında kullanılan ince tabaka" tanımına uyan bu tip malzemelerin hepsinin "Püskürtme ince kaplama (PİK) (Thin Spray-on Liner (TSL))" şeklinde adlandırılmasına karar verilmiştir.

PİK'in tüm madencilik endüstrisi tarafından kabul gören tanımı ise; "genelde çimento, lateks, polimer bazlı reaktif olan veya olmayan, çok bileşenli kaya yüzeyine, genelde 6 mm ya da daha ince kalınlıkta, püskürtme yöntemiyle uygulanan malzeme"dir. Ayrıca yukarıda da bahsedildiği gibi PİK'ler püskürtme betonların yeni bir formu olarak bilinmektedir. Yıllardır dünyada kabul gören bir malzemeye (Püskürtme betona) alternatif olabilmek için pek çok özelliğin bu malzeme ile yarışır hatta daha üst düzeyde olması gerekmektedir.

1.1. Problemin Tanımı

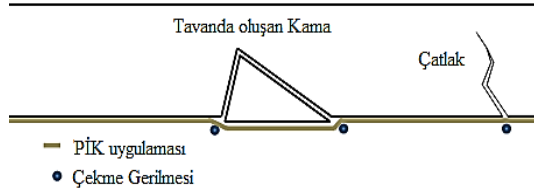
PİK'lerin pek çok avantajı olduğu söylenmesine rağmen hala bu yeni yüzey tahkimatı malzemesinin mekanik davranışı, tahkimat mekanizmasının henüz anlaşılabilmesi sebebiyle gizemini korumaktadır [1]. Araştırmacılar, PİK'lerin bu tahkimat mekanizmasını anlayabilmek için farklı laboratuvar deneyleri ve analitik-sayısal modelleme çalışmaları yapmaktadırlar [2]. PİK'lerin kaya saptamalarının yapışma mukavemetinin artırılması amaçlı kullanımı da mevcuttur[3]. PİK'lerin davranışının belirlenmesi amacıyla pek çok farklı deney düzenekleri oluşturulmuştur. Bu deneylerin başlıcaları aşağıda sıralanmıştır;

- Direk çekme dayanımı ve uzama [4-8],
- Tek eksenli basma dayanımı [8],
- Delme [9-11],
- Yapışma mukavemeti [7, 9,11,12],
- Çift yönlü makaslama [13],
- Plaka çekme [4,14,15],
- Düzlemsel blok tahkimat [16],
- Açıklık makaslama yük dayanımı [16],
- Kaplanmış karot basma testi [10,17,18,19].

PİK'ler nispeten yeni ürünler olduğundan, yukarıda belirtilen deneylere ait herhangi bir standart test yöntemi bulunmamaktadır. Ancak, bu testlerden bazıları (direk çekme ve yapışma mukavemeti) araştırmacılar tarafından kabul görmüştür. Çünkü yapılan arazi çalışmalarında çekme yenilmesi mekanizmasının PİK'lerde yaygın olarak görülen yenilme tipi olduğu anlaşılmıştır [20].

Literatürde PİK'ler elastik malzemeler olarak kabul görmektedir ve araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda PİK'lerin elastik malzeme özelliklerini tahmini değerler olarak kullanmaktadırlar [21-25]. Ancak PİK'lerin mekanik malzeme özellikleri kür süresine bağlı olarak değişim göstermektedir [4]. Bu mekanik özelliklerin değişimini zamana bağlı değişkenler olarak tanımlamak PİK'lerin mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için son derece önem arz etmektedir.

Çekme testi mevcut PİK deneyleri arasında en yaygın yapılan deneydir. Yeraltı açıklıklarında yüksek basınç altında, patlatma operasyonlarında, sismik faaliyetlerde ve geriliminde ani azalma olan bölgelerde çatlak oluşumu gözlenmektedir. Oluşan çatlakların ani genişlemesi dolayısıyla uygulanan PİK'lerde de gerilmeler meydana gelmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi çatlak, kendisine komşu ya da oluşması muhtemel süreksizlik düzlemi ile temas kurduğunda kama blokları oluşmaktadır. Süreksizliğin doğrultusuna ve makaslama dayanımı parametrelerine bağlı olarak kaya blokları denge koşulunu sağlayamayabilir ve özellikle tavan ve yan duvarlarda bilhassa yer çekiminin de etkisiyle düşebilir [7,26].



Şekil 1. Yeraltı açıklıklarında PİK'lerin gerilme mekanizması [7]

Çoğu araştırmacı çekme testi düzeneğini birincil PİK sınıflandırma yöntemi olarak kabul etmektedir [20]. Bu deneyler sonucunda çekme dayanımı parametresine ek olarak gerilme yenilmesine bağlı olan çekme modülü, uzama kapasitesi gibi farklı mekanik özellikler de bu test sonucunda bulunabilmektedir. Ancak literatürde farklı kür süreleri için yalnızca dayanım parametresi değerleri mevcuttur.

Literatürde basma deneyleri alanında pek az çalışma bulunmaktadır. Bunun temel sebebi PİK'lerin arazi uygulamalarında basma yüküne maruz kaldığının düşünülmemesidir. Ancak son dönemde yapılan çalışmalarda PİK'lerin tahkimat mekanizmasını anlamak için sayısal modellemeler yapılmaktadır, bu sayısal modellemelerde basma dayanımı elastite modülü, Poisson oranı gibi elastik girdi parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tip elastik parametrelerin bulunabilmesi için yapılması gereken test ise basma dayanım testidir.

1.2. Çalışmanın Hedefi

Bu çalışmada, yapı kimyasalları alanında üretici bir firmadan temin edilen PİK malzemesinin mekanik özellikleri, farklı kür süreleri için (1, 7, 14, 21, 28 gün direk çekme testi, 2, 7,14, 21, 28 gün deformasyon testi) saptanmıştır.

Bu özellikler;

- Çekme dayanımı
- Çekme modülü
- Tek eksenli basma dayanımı
- Elastisite modülü
- Poisson oranı'dır.

Bulunan bu değerlerin kür süresine bağlı olarak değişimlerinin belirlenmesi ile araştırmacılar, ileride yapacakları sayısal modelleme çalışmalarında bulunan değerleri direk girdi parametresi olarak kullanarak, PİK'lerin sayısal veya analitik modellemelerini gerçeğe daha uygun yapabileceklerdir. Ayrıca, malzemenin hedeflenen mekanik özelliğe ulaşabileceği zamanın da sunulan eşitlikler yardımıyla tahmin edilmesi mümkün olacaktır.

2. LABORATUVAR DENEYLERİ

2.1. Ürün Hakkında Bilgi

Deneylerde kullanılan PİK tek bileşenli polimer bazlı, toz halinde satılan, su ile karıştırılıp sprey ekipmanı yardımıyla kaya ya da kömür yüzeyine püskürtülüp yüzey tahkimatı ve bozunma/aşınma gibi pek çok soruna karşı koruma amaçlı kullanılan malzemedir. Şirketin verdiği bilgilere göre ürün; yüksek elastikiyeti, yüksek çekme dayanımı ve içerdği polimer bileşen sayesinde gelişmiş yüzey stabilitesi sağlamaktadır. Ayrıca, membran ve püskürtme betona muadil bir ürün olduğu iddia edilmektedir. Yapılan deneyler sırasında ürünün fark edilen en önemli özelliği ise çok çabuk kür olmasıdır. Karışım hazırlandıktan birkaç dakika sonra ürün kür olmaktadır. Bu özelliğinin yanı sıra ürünün hemen hemen tüm malzemelere yüksek yapışma kabiliyeti de göz ardı edilmemesi gereken özelliklerinden biridir. Bu çalışmada genel olarak PİK'lerin çekme ve basma dayanımı özellikleri üzerinde durulduğundan yapışma dayanımı kapsama alınmamıştır.

Üretici firmanın tavsiyesine göre; 1 metrekare'lik alanı 1 milimetre kalınlığında kaplamak için gerekli malzeme miktarı yaklaşık olarak 1 kg'dır. Ayrıca ürün tüketimi, uygulanacak yüzeyin pürüzlülük miktarına bağlı olarak artış gösterebilmektedir. Ürünün tavsiye edilen karışım oranı ise ağırlıkça bir birim toz için yarım birim su eklenmesidir. Karışım ve uygulama işlemi tek bir işçi tarafından yapılabilmektedir (Şekil 2). Ürüne ilişkin detaylı teknik bilgi Çizelge 1'de sunulmuştur. Ürünün polimer tozunun içeriği aşağıdaki gibidir;

- % 10,0 -% 15,0 kalsiyum oksit
- % 10,0 -% 15,0 Dolomit
- % 10,0 -% 15,0 Çimento, alümina, kimyasallar
- % 0,3 -% 3,0 Kaolen
- % 0,3 -% 3,0 Talk
- % 1,0 -% 3,0 Bor kalsiyum oksidi
- % 1,0 -% 3,0 Kalsiyum sülfat
- % 0,3 -% 1,0 kristal silika.



Şekil 2. PİK ürününün uygulaması ve uygulanmış hali [27]

Çizelge 1. PİK ürününe ait teknik bilgiler [27]

Form	Toz
Renk	Beyaz
Bulk Yoğunluğu (g/L)	690 ±90
Tüketim	0,9 kg/m ² /mm
Uygulama Kalınlığı	2 -10 mm
Uygulama Sıcaklığı	5-45°C
Tutuşabilirlik	Kendinden Sönümlü
pH Değeri	Yaklaşık 11

2.2. Laboratuvar Test Parametreleri

Laboratuvar testleri ve test numunelerinin hazırlanması yoğun emek, dikkat ve çok sayıda parametreyi dikkate almayı gerektiren uzun bir süreçtir. Polimer ve püskürtme beton için dikkate alınması gereken farklı durumlar ilerde bu alanda çalışma yapmayı düşünecek araştırmacıları aydınlatma açısından bu bölümde sıralanmıştır.

Kimyasal İçerik: PİKler toz- su veya toz- sıvı karışımlarından meydana gelmektedir. Bu toz karışımların kimyasal bileşenleri PİK'lerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Çimento bazlı PİK'lerin daha yüksek gerilme değerlerine kadar çıkabildiği öte yandan ise daha az esneme kabiliyeti olacağı beklenmektedir. Ayrıca içerdiği çimento sebebiyle yük-deformasyon eğrisinin gevrek davranış izleyeceği düşünülmektedir.

Yapılan laboratuvar testlerinin ışığında her kür süresi için yapılan testlerin başında bir deneme amaçlı test yapılması önerilmektedir.

Raf Ömrü: PİK'lerin püskürtme betona göre kendine has malzeme özellikleri bulunmaktadır. Püskürtme beton tavsiye edilen nem ve sıcaklık değerlerinde saklandığı tarihte uzun raf ömrüne sahiptir. Ancak PİK ürünlerinin raf ömrü birkaç ay, ya da en fazla bir senedir. Ayrıca mevcut PİK ürünleri 20-25 kg'lık paketler halinde piyasada bulunmaktadır ve üreticiler bu paketlerin açıldıktan sonra en fazla 2 hafta gibi bir süre içerisinde kullanılmasını önermektedirler.

Karışım oranı: Genel olarak her PİK ürününün kendine ait sabit bir karışım oranı bulunmaktadır. Uygulama yapan kişi bu oranlara sadık kalmalıdır. Arazi uygulamalarında PİK'ler özel bir donanım yardımıyla karıştırılır. Ancak laboratuvar uygulamaları arazi uygulamalarına göre çok küçük ölçekli olduğundan bu tip donanımlar kullanılamamıştır. Bu nedenle laboratuvar çalışmalarında farklı karışım teknikleri (aynı karışım oranına bağlı kalmak şartı ile) uygulanmıştır.

Laboratuvar şartları: Bu çalışmanın amaçlarından birisi de yapılan deneylerin arazi şartlarını birebir yansıtmasıdır. Ancak yapılan laboratuvar çalışmalarının da gösterdiği üzere PİK'ler sıcaklık ve nem gibi laboratuvar şartlarına son derece duyarlı ürünlerdir. Bu çalışmada, aynı ürünlerin farklı kür sürelerinde pek çok deney yapıldığından, sıcaklık ve nem gibi parametreler kür süresinin öneminin keşfedilebilmesi açısından mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. PİK'lerin ideal deney ortamı Yılmaz'a [7] göre 22-28°C sıcaklık ve %50-60 nem aralığında olmalıdır. Ayrıca hazırlanan numuneler direk hava akımı ve güneş ışığına maruz bırakılmamalıdır. Bu çalışmada kür süresinin etkisinin saptanması üzerinde durulduğundan yalnızca kür süresi parametresi değiştirilmiştir. PİK'lerin laboratuvar testlerinde sıcaklık ve nem faktörünün etkisine ilişkin gelecekte detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Büzüşme: Deney numunelerinin hazırlanması sırasında PİK tozu su ile karıştırılarak oluşturulduğundan boyutlarında azalma gözlemlenmiştir. Buharlaşma sebebiyle içeriğindeki suyu kaybeden numunelerde boyutlarında azalmanın yanı sıra farklı yönlerde bükülmeleri de gözlemlenmiştir. Büzüşme bu tip su bazlı numunelerde kaçınılmaz bir problemdir. Bükülen numuneler simetriklik özelliğini yitirdiğinden basma ve çekme deneylerinde elde edilen sonuçlar gerçeği yansıtmayacaktır. Bu nedenle bu problemin oluşabileceği göz önüne alınıp deney yapılması düşünülen numuneden fazla sayıda numune hazırlanması gerekmektedir. Şekil 3'te standart (üst) ve büzüşmüş (alt) test numuneleri sunulmuştur.



Şekil 3. Standart ve büzüşmüş test numuneleri

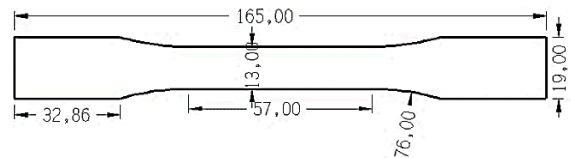
Numune hazırlama sürecinde her test numunesi standart kalıba dökülmesine karşın deney

öncesinde her numunenin boyutları tek tek ölçülmüş ve hesaplamalarda en son ölçülen boyutlar kullanılmıştır, %10'a kadar olan küçük boyut azalmaları belirtilen standartlar çerçevesinde kabul edilmiştir.

Numune boyutları: İdeal numune boyutlarının seçimine pek çok etmen etki etmektedir. Test numunesi arazi durumunu temsil edebilmeli, kolay hazırlanabilmeli, hazırlanması ekonomik olmalı ve test yapılan cihaza uyumlu olmalıdır.

Bazı test standardizasyonu yapan kuruluşlar ASTM, ISO vb. pek çok farklı malzeme için farklı test standartları ve numune boyutları belirlemişlerdir. Önceki araştırmalarda araştırmacılar ASTM-D638 test standardını [28] çekme deneylerinde kullanmışlardır. Dolayısıyla daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırma yapabilmek adına bu çalışmada da aynı test standardına ait numune boyutları seçilmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan numune boyutları Şekil 4'te sunulmuştur.

Basma deneylerinde ise ASTM D695 standardındaki [29] numune boyutları esas alınarak 2,54 cm çapında, boy çap oranı 2 den büyük silindirik numuneler oluşturulmuştur.



Şekil 4. Çekme deneyi numune boyutları (mm)

Ayrıca kalınlığın sabit olması da önemli bir parametredir. Numuneler sabit kalınlıkta hazırlanmalıdır.

Kür süresi: Kür süresi veya priz süresi malzemenin hazırlanıp döküldükten sonra katılaşarak plastik özelliğini kaybedinceye kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda katılaşma süresi olarak da bilinir. Bu terim genelde çimento ve termoplastik malzemeler için kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise kür süresi "numunenin teste hazır oluncaya kadarki bekleme süresi" olarak tanımlanmaktadır.

Numune sayısı: Test sonuçlarının istatistiksel olarak da doğrulanabilmesi için deneyler aynı koşullarda (kür süresi) birden çok kez tekrar edilmelidir. Literatürde numune sayısının 3 ile 5 arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada ise belirlenen kür süreleri için 5 geçerli deney yapılmıştır.

Aykırı değer tespiti: Deneyler sonunda elde edilen sonuçlar beklenen değer aralığının dışında (çok üstünde veya altında) çıkması durumunda bu değerler belirli yöntemler kullanılarak göz ardı edilebilir. Bu yöntem aykırı değer testi denilmektedir. Yapılan deneyler 5'er kez tekrarlandığından yaygın olarak kullanılan aykırı değer testleri bu çalışmada kullanılamamıştır.

Dean ve Dixon [30] tarafından bulunan Q test adı verilen kimya deneylerinde pratik olarak aykırı değer tespiti yapılabilen yöntem bu çalışmada aykırı değer tespitinde kullanılmıştır. Q değeri bir orandır ve bu oran şüphelenilen değer kendine en yakın değere olan farkının sonuç aralığına oranlanmasıyla bulunur. (Eşitlik 1)

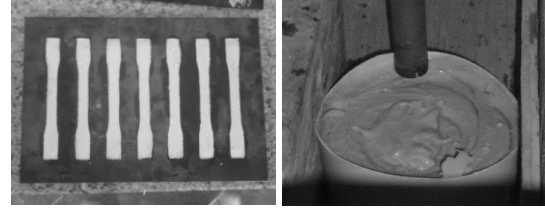
$$Q = \frac{X_{2. \text{ küçük}} - X_{\text{ küçük}}}{X_{\text{ büyük}} - X_{\text{ küçük}}} \quad (1)$$

Bulunan Q değerleri Q test çizelgesinde verilen değerlerin üzerinde olması durumunda şüphelenilen değer aykırı değer olarak saptanmaktadır. %90, %95 ve %99 güven aralığında bulunan Q değerleri sırasıyla 0,642, 0,710, 0,821'dir. Aykırı değer bulunması ve sonuçlardan elenmesi daha yüksek R-kare değerleri elde edilmesini sağlamaktadır. Bilindiği üzere yüksek R-kare değerleri de daha gerçekçi sayısal eşitlikler bulunmasını sağlamaktadır.

2.3. Laboratuvar Deneyleri

Homojen deney numuneleri elde edebilmek için tüm deney numuneleri mikserde hazırlanan tek bir karışım sonucunda kalıplara dökülmüştür. Dambıl ya da köpek kemiği olarak adlandırılan çekme deneyi numuneleri kalıp yöntemiyle, silindirik

basma deneyi numuneleri ise karot alma yöntemiyle oluşturulmuştur (Şekil 5).



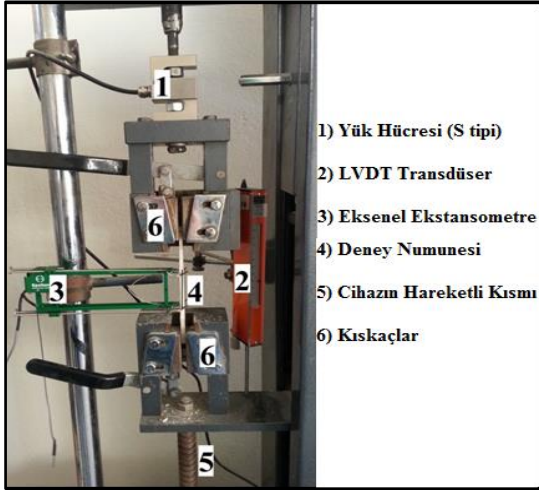
Şekil 5. Numunelerin oluşturulması

Daha önceden de belirtildiği üzere her kür süresi için en az 5 geçerli deney sonucu elde edebilmek için en az 50 geçerli deney gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Deney düzeneğinin kalibrasyonu, test edilmesi ve geçersiz deneylerin yerine yenisinin yapılabilmesi adına toplamda 80 numune hazırlanmıştır.

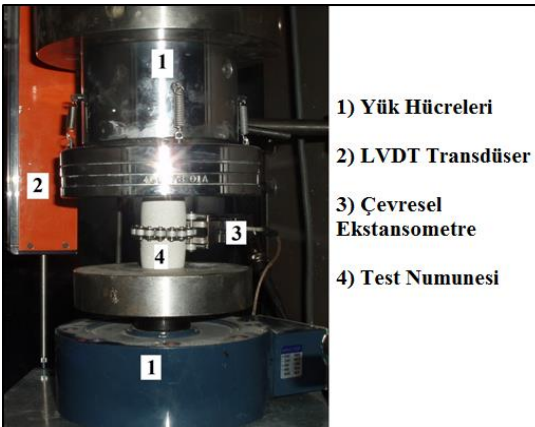
Laboratuvar deneyleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Direk çekme deneylerinin daha sağlıklı bir biçimde yapılması için test cihazına 500 kgf kapasiteli S tipi yük hücresi, 50 mm ölçüm aralığına sahip aksel ekstansometre bağlanmış ve veri toplama sistemi yardımıyla saniyede 8 veri kaydedilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Direk çekme deney düzeneği Şekil 6'da sunulmuştur.

Basma deneyleri 500 kN yük kapasiteli, deplasman kontrollü MTS cihazında gerçekleştirilmiştir. Yük ölçümü için 5000 kgf kapasiteli yük hücresi ve veri toplama sistemi MTS cihazına bağlanarak basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aksel ve çevresel ekstansometre ile çapsal değişim de kayıt altına alınarak Elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri de hesaplanmıştır. Basma deney düzeneği Şekil 7'de sunulmuştur.

Yapılan çekme deneyleri sonucunda 3 önemli parametre bulunmuştur. Bunlar; i) Çekme Dayanımı (σ) ii) Çekme modülü (Et) ve iii) Yenilmede uzama miktarı (%)'dir. Ayrıca Basma deneyleri sonunda ise; i) Elastik modülü ve ii) Poisson oranı parametreleri bulunmuştur.



Şekil 6. Direk çekme deney düzeneği



Şekil 7. Basma deney düzeneği

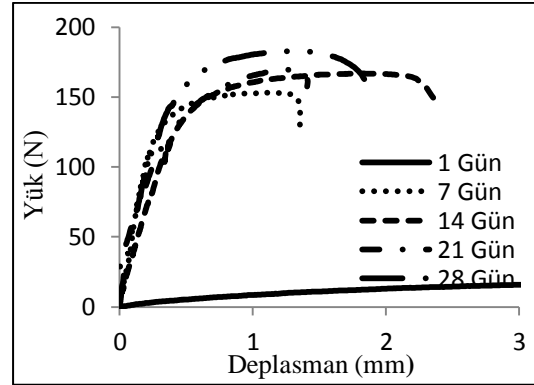
3. DENEY SONUÇLARI

Laboratuvar çalışmaları sonucunda toplamda 50 geçerli deney gerçekleştirilmiştir. Direk çekme ve basma deney sonuçları ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

3.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Standartlara uygun biçimde gerçekleştirilen 25 geçerli deney sonucunda her bir deney için gerilim-gerinim grafikleri çizilmiştir. Her bir numune için ortalama test süresi 4 dakika olarak ölçülmüştür. Deneylerde yük oranı sabit tutulmuştur

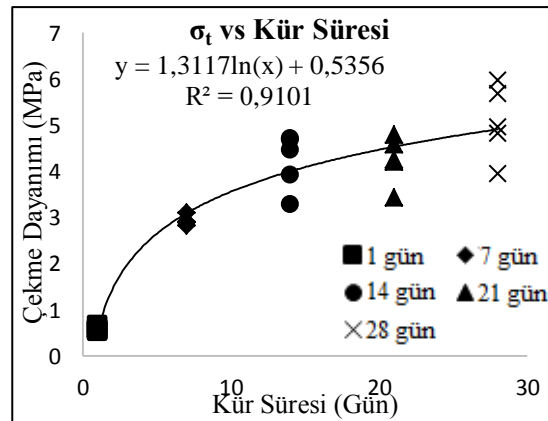
(6,5 mm/dak). Deneyler sonucunda elde edilen ham yük- deplasman eğrileri Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Farklı kür süreleri için elde edilen temsili yük deplasman grafikleri (çekme deneyi)

Laboratuvar çalışmaları sonucunda çekme dayanımı – kür süresi, çekme modülü-kür süresi ve çekme dayanımı-modülü grafikleri çizilmiştir.

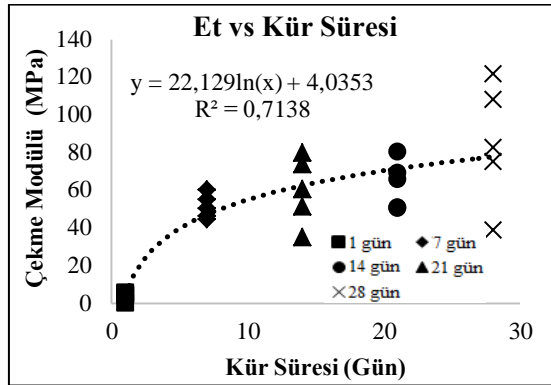
Çekme dayanımı ve kür süresi arasındaki ilişki Şekil 9'da gösterilmiştir. Grafikten de görülebileceği üzere çekme dayanımı kür süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu ilişki logaritmik bir eşitlik ile tanımlanmaktadır.



Şekil 9. Çekme dayanımı - kür süresi ilişkisi

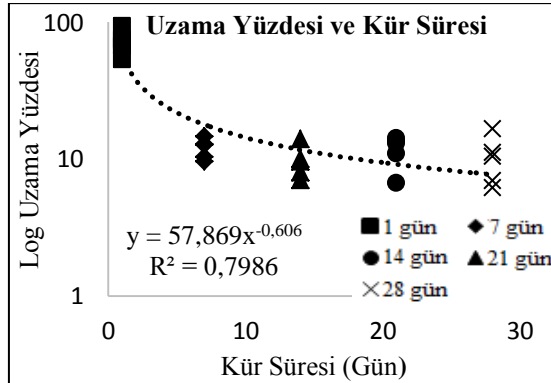
Yukarıdaki sonuçlara göre yüksek korelasyon katsayısı (0,91) elde edilmiştir. Başka bir deyişle çekme dayanımındaki artış %91 olasılıkla kür süresinde artış ile açıklanabilmektedir. Ancak kür

süresindeki artış çekme dayanımı sonuçlarındaki standart sapma değerlerini de arttırmaktadır. Bu durumun sebebi deneylerin laboratuvar ortamında küçük ölçekte yapılmasından kaynaklanabilir. Çünkü daha önceki araştırmalarda da benzer sorunlar göze çarpmaktadır. Elde edilen ortalama çekme dayanım sonuçları Çizelge 2’de sunulmuştur. Benzer grafik sonuçları çekme modülü ve uzama yüzdesi için de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Çekme modülü- kür süresi ilişkisi

Çekme dayanımında olduğu gibi çekme modülünün de kür süresine bağlı değişimi, logaritmik fonksiyonla tanımlanmıştır. Elde edilen ortalama çekme modülü değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.



Şekil 11. Çekme modülü - kür süresi ilişkisi

Polimer bazlı malzemeler için yüzdeye yenilmede uzama miktarı, sıklıkla kullanılan bir parametre olup, PİK’ler için literatürde ilk kez bu çalışmada

bulunmuştur. Beklendiği üzere malzemenin uzama yüzdesi kür süresi arttıkça azalmaktadır. Bu azalma en iyi üstel fonksiyon ile tanımlanmaktadır. Elde edilen ortalama yüzdeye yenilmede uzama değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

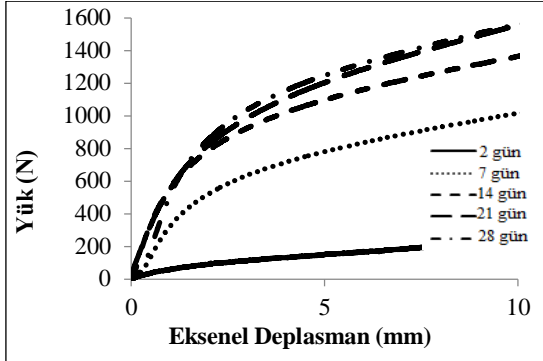
Çizelge 2. Çekme deney sonuçlarının kür süresine göre değişimi

Kür Süresi	Ort. σ_t (MPa)	Ort. E_t (MPa)	Ort. Uzama Yüzdesi
1 Gün	0,58 ± 0,05	4,51 ± 0,51	71,60± 14,4
7 Gün	2,93 ± 0,10	51,13 ± 6,41	11,99± 2,01
14 Gün	4,21 ± 0,61	59,92 ± 17,96	9,71± 2,68
21 Gün	4,26 ± 0,52	63,01 ± 12,85	11,62± 3,03
28 Gün	5,08 ± 0,79	93,08 ± 45,50	10,23± 4,15

3.2. Basma Deneyi Sonuçları

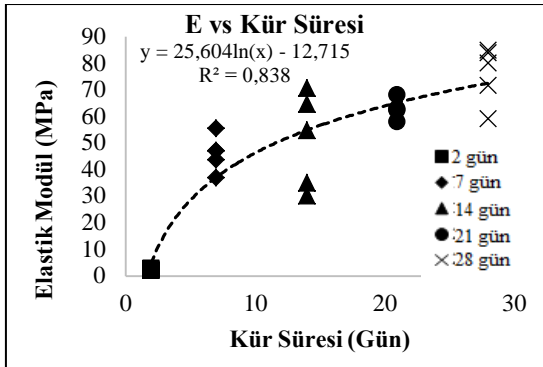
Yapılan ilk kalibrasyon deneylerinde ürünün basma yükü altında son derece yüksek gerinim gösterdiği saptanmıştır. Ürün, içeriğindeki kimyasalların etkisiyle sınırlı malzeme özelliği gösterdiğinden testler sonucunda yenilmemiştir. Bu nedenle basma dayanımı parametresi elde edilememiştir. Bu yüzden deneyler, numune 10 mm deformasyona ulaşınca sona erdirilmiştir (yaklaşık 7 dakika). Deneyler ASTM D695 standardına sadık kalınarak yapıldığından 1,5 mm/dak sabit yük oranı uygulanmıştır. Deneylerde saniyede 8 veri kayıt altına alındığından malzemenin doğrusal elastik davranış gösterdiği bölgeler hassas bir biçimde bulunmuştur. Şekil 12’de farklı kür süreleri için tipik yük-eksenel deplasman eğrileri sunulmuştur.

Şekil 12’den de görülebileceği üzere numunenin yük taşıma kapasitesi kür süresiyle doğrudan ilgilidir. Bu eğrilerin doğrusal elastik kısmı elastik modül bulunmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca malzeme bilineer yük-deplasman ve gerilim-gerinim davranışı göstermektedir. Görülen 2 farklı doğrusal kısımda ilk doğrusal elastik kısım standartlara göre elastik modülü bulmakta kullanılmaktadır.



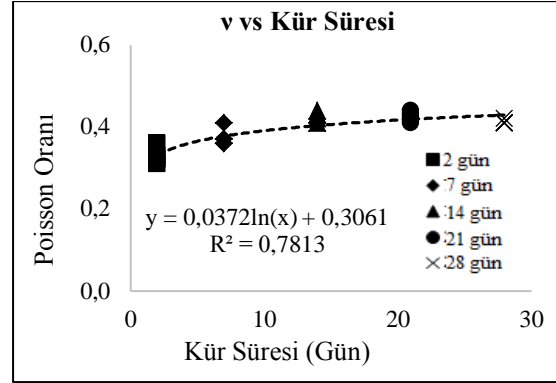
Şekil 12. Farklı kür süreleri için tipik yük-deplasman eğrileri

Şekil 13’de görüldüğü üzere elastik modül değeri, artan kür süresine göre artış göstermektedir. Başka bir deyişle elastik modül artışı %84 olasılıkla sadece kür süresindeki artış ile tanımlanabilir. Elde edilen ortalama elastik modül değerleri Çizelge 3’te sunulmuştur.



Şekil 13. Elastik modül- kür süresi ilişkisi

Basma deneylerine ilişkin ikinci özet grafiği ise Poisson oranı ve kür süresi ile ilintilidir. Deneyler sonunda çok benzer Poisson oranları elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0,31 ile 0,44 arasındadır. Ayrıca kür süresinin Poisson oranı üzerinde de etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Kür süresindeki artış Poisson oranında da az da olsa bir artışa neden olmaktadır. Bu ikili arasındaki ilişki logaritmik bir eşitlikle %78 olasılıkla açıklanabilmektedir. Şekil 14’de bu ilişki sunulmuştur. Ayrıca bu grafiğin çizildiği ortalama Poisson oranı değerleri de Çizelge 3’de bulunmaktadır.



Şekil 14. Poisson oranının kür süresine bağlı değişimi

Çizelge 3. Basma deney sonuçlarının kür süresine göre değişimi

Kür Süresi	Ort. E (MPa)	Ort. v
2 Gün	1,98 ± 0,33	0,33 ± 0,02
7 Gün	45,94 ± 6,67	0,37 ± 0,02
14 Gün	50,96 ± 17,88	0,43 ± 0,01
21 Gün	60,08 ± 6,74	0,42 ± 0,01
28 Gün	75,87 ± 10,77	0,41 ± 0,01

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Deney numunesi hazırlanışında PİK karışımları sahip oldukları farklı içerikler sebebiyle priz alma süresi farklılık göstermektedir. Ayrıca su bazlı ürünlerde büzüşme görülmektedir. 28 günlük kür süresi sonunda numune boyutlarında önemli ölçüde azalmalar olmaktadır. Arazi, uygulamalarında büzüşme nedeni ile uygulama kalınlığı azalmaktadır.
- Beklenildiği üzere çekme dayanımı ve çekme modülü kür süresiyle doğrudan bağlantılıdır. Kür süresi arttıkça çekme dayanımı ve modülü değerleri de artmaktadır.
- Sunulan ilgili logaritmik eşitlikler ve korelasyon katsayıları yardımıyla araştırmacı, kullanıcı

ürünün hedeflenen parametre değerine ulaşacağı tarihi kestirebilecektir.

- Kür süresindeki artış PİK'lerin uzama yüzdelerinde azalmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda malzeme daha gevrek bir hal almaktadır.
- Genel kanının aksine kür süresinin Poisson oranı üzerinde az miktarda etkisi bulunmaktadır. Deneylerde 7. kür günü sonunda Poisson oranı neredeyse sabit kalmıştır. Bu değer yaklaşık olarak 0,42'dir.

5. ÖNERİLER

Yukarıda bahsedilen sonuçların ışığında gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyeler aşağıda sıralanmıştır:

- Kalıp döküm yöntemi ile numune hazırlama yönteminde kalıp ayırıcı kimyasal madde kullanılmalı, numunenin kalıptan ayrılırken zarar görmemesi için esnek kalıplar tercih edilmelidir.
- Basma deney numuneleri hazırlanırken kalıba dökme yöntemi zaman alıcı ve tercih edilmemesi gereken bir işlemdir. Karot alma tekniği kolay ve etkili numune hazırlama yöntemidir.
- PİK'lerin uzun süreçteki performanslarını keşfetmek için 3 ay ya da 1 sene gibi daha uzun kür süreli deneyler gerçekleştirilmelidir.
- Basma ve çekme dayanımı deneyleri bu çalışmada detaylı bir biçimde incelenmesine rağmen, kür süresinin diğer önemli dizayn parametrelerine etkisini bulabilmek için yapışma mukavemeti gibi farklı deneyler de gerçekleştirilmelidir.
- Sıcaklık ve nem değişimi de PİK'ler için önemli parametrelerdendir. Bu alan üzerinde detaylı bir çalışma yapılırsa önemli sonuçlar ortaya çıkabilir.
- PİK'lerin seçiminde çekme dayanımına olabildiğince erken ulaşabilmesi önemli bir kriterdir. Bu nedenle üreticiler PİK'lerin dayanım kazanma süresini minimize edecek ürünler geliştirmelidir.
- Arazi uygulamalarında daha sert ve deformasyona dayanıklı PİK'lere ihtiyaç duyulmaktadır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje No: 08-11-2012-104) tarafından desteklenmiştir. Katkıları için teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. Tannat, D., 2001. Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 57-68.
2. Lau, V., Saydam, S., Cai, Y., Mitra, R., 2008. Laboratory Investigation of Support Mechanism for Thin Spray-on Liners. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) Goa, India, 1381-1388.
3. Kömürlü, E., Kesimal, A., 2014. Improved Performance of Rock Bolts using Sprayed Polyurea Coating. Rock Mechanics and Rock Engineering. DOI: 10.1007/s00603-014-0696-4.2179-2182.
4. Tannant, D.D., Swan, G., Espley, S., Graham, C., 1999. Laboratory test Procedures for Validating the use of Thin Sprayed-on Liners for Mesh Replacement. Canadian Ins. of Mining and Metallurgy Annual Meeting, Calgary. 1-8.
5. Archibald, J.F., Espley, S.J., St., Lausch, P., 2001. Field and Laboratory Response of Mineguard Spray-on Polyurethane Liners. Proc. Int. Symp. on Rock Support, Lillehammer, pp. 475-490.
6. Spearing, A.J.S., Gelson, J., 2002. Developments and the Future of Thin Reactive Liners since the Previous Conference in Australia. 2nd Int. Seminar on Surface Support Liners: Thin Sprayed Liners, Shotcrete, Mesh, Sandton, South Africa, Sect. 13,1-10.
7. Yılmaz, H., 2010. Tensile Strength Testing of Thin Spray-on Liner Products (TSL's) and Shotcrete. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 110. 559-569.

8. Ozturk, H., 2011. Püskürtülen İnce Kaplamaların Elastik Malzeme Özellikleri. Madencilik, Vol. 50, No. 2. 41-45.
9. Spearing, A.J.S., Champa, J., 2001. The Design, Testing and Application of Ground Support Membranes for use in Underground Mines Proc. MASSMIN.
10. Kuijpers, J., 2001. Evaluation of Membrane Support Behaviour. Surface Support Liners: Membranes, Shotcrete and Mesh. Australian Centre for Geomechanics, Perth. Sect.21.
11. Stacey, T.R., Kasangula, M., 2003. Results from Testing of TSL's Using a Simple, Low Cost Laboratory Test. 3rd Int. Seminar on Surface Support Liners: Thin Spray-On Liners, Shotcrete and Mesh, Quebec City, Canada. Sect. 17.
12. Lewis, B., 2001. Mondi Rock-Hold™ the Development of this Structural Membrane Support. Surface Support Liners: Membranes, shotcrete and Mesh. Australian Centre for Geomechanics, Perth.
13. Saydam, S., Yilmaz, H., Stacey, T.R., 2003. A New Testing Approach for thin Spray-on Liners: Double-sided Shear Strength (DSS). Test. 3rd International Seminar on Surface Support Liners: Thin Spray-on Liners, Shotcrete and Mesh, Quebec City, Canada. Section 18.
14. Archibald, J.F., 2001. Assessing Acceptance Criteria for and Capabilities of Liners for Mitigating Ground Falls. Mining Health and Safety Conference, Sudbury, Ontario. 2001.
15. Finn, D., 2001. Polymer Membrane Tests. Surface Support Liners: Membranes, Shotcrete and Mesh, Australian Centre for Geomechanics, Australia. Sect.20.
16. EFNARC, 2008. Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunneling. ENC 250TSL v7.2 25-07-08.
17. Espley, S., Tannant, D.D., Baiden, G., Kaiser, P.K., 1999. Design Criteria for Thin Spray-on Membrane Support for Underground Hardrock Mining. Canadian Ins. of Mining and Metallurgy Annual Meeting, Calgary.
18. Archibald, J.F., Degagne, D.O., 2000. Recent Canadian Advances in the Application of Spray-on Polymeric Linings, Mining Health and Safety Conference, Sudbury, Ontario.
19. Guner, D., Öztürk, H., 2016. Scale Effect of Thin Spray-on Liners for Pillar Reinforcement. Eighth International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Sweden.
20. Kuijpers, J.S., Sellers, E.J., Toper, A.Z., Rangasamy, T., Ward, T., Van Rensburg, A.J., Yilmaz, H., Stacey, R., 2004. Required Technical Specifications and Standard Testing Methodology for Thin Sprayed Linings. SIMRAC Final Report. Research agency: CSIR Division of Mining Technology. Project No: SIM 020206.
21. Mason, D.P., Stacey, T.R., 2008. Support to Rock Excavations Provided by Sprayed Liners. Int J. Rock Mech Min Sci; 45, 773–788.
22. Mason, D.P., Abelman, H., 2009. Support Provided to Rock Excavations by a System of Two Liners. Int. J. Rock Mech Min Sci; 46, 1197- 1205.
23. Fowkes, N., Teixeira, J.A., Stacey, R., 2008. Crack Repair using an Elastic Filler. J Mech Phys Solids 56(9), 2749–2758.
24. Tannant, D. D., Wang, C. G. 2002. Thin Rock Support Liners Modeled with Particle Flow Code. Geotech Spec Publ (117), 346–352.
25. Dirige, A., Archibald, J., 2009. Numerical Modeling Simulations of Spray-on Liners Support Potential in Highly Stressed and Rockburst Prone Rock Conditions. Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto.
26. Öztürk, H., 2012. Work of Adhesion of Thin Spray-On Liners. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1095-1102.
27. BASF web sayfası, son erişim tarihi 02.12.2016. <https://www.master-builders-solutions.basf.us/en-us/products/masterroc/1953?Product=MasterRocTSL865>.
28. ASTM, Standard D-638-10, 2010. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics-1. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA DOI: 10.1520/D0638-10
29. ASTM, Standard D-695-10, 20100 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
30. Robert, B., Dean, Wilfrid, J.D., 1951. Simplified Statistics for Small Numbers of

Püskürtme İnce Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin Kür Süresine Göre Değişiminin İncelenmesi

Observations. Anal. Chem., 1951, 23(4), 636–638.