

**FARKLI PÜSKÜRTÜLEN İNCE KAPLAMALARIN SÜNME
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE SAYISAL
MODELLENMESİ**

Program Kodu: 1001

Proje No: 115M581

Proje Yürütücüsü

Doç. Dr. Hasan ÖZTÜRK

Bursiyer:

Doğukan GÜNER

Ekim 2018

ANKARA

Önsöz

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115M581 numaralı “*Farklı Püskürtülen İnce Kaplamaların Sünme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sayısal Modellenmesi*” başlıklı proje kapsamında, iki farklı PİK ürününün oda sıcaklığındaki sünme özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiş, sünme davranışlarını matematik-mekanik modele oturtulmuş ve sayısal olarak açıklık tahkimatı modellenmesinde zamana bağlı mekanik özelliklerinin değişimini incelenmiştir.

Projeyi kurumsal desteği ile finanse eden TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Çalışmanın İçeriği	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. PİK'lerin Geçmişi ve Günümüzdeki Durumu	4
2.2. PİK'lerin Kullanım Alanları	5
2.3. PİK'lerin Avantajları ve Dezavantajları	6
2.4. PİK'lere İlişkin Laboratuvar Çalışmaları	8
2.5. Sünme Davranışının Önemi	9
2.6. PİK'lerin Sayısal Modellemeleri	12
3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	14
3.1. Deneyleri Gerçekleştirilen PİK'ler hakkında bilgi.....	14
3.1.1. PİK-1	14
3.1.2. PİK-2.....	14
3.2. Deney Düzenineğinin Kurulması	15
3.3. Uygun Numune Seçimi ve Kontrol Deneyleri.....	18
3.4. Laboratuvar ölçekli PİK hazırlama kılavuzu	23
3.5. PİK 1 İçin Yapılan Laboratuvar Deneyleri	26
3.5.1. PİK-1'e Ait Çekme Deneyleri	27
3.5.2. PİK-1'e Ait Sünme Deneyleri	28

3.5.3. PİK-1' e Ait 500 Gün deneyleri	29
3.6. PİK-2 İçin Yapılan Laboratuvar Deneyleri.....	29
3.6.1. PİK-2'ye Ait Çekme Deneyleri	30
3.6.2. PİK-2'ye Ait Sünme Deneyleri	31
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	33
5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ MEKANİK MATEMATİK MODELLERE OTURTULMASI.....	46
5.1. Yapısal Modelleme Yaklaşımları	46
5.1.1. Viskoplastik Model	47
5.1.2. Viskoelastik Model	49
5.2. PİK-1'e Ait Yapısal Modelleme Sonuçları	50
5.2.1. PİK-1 Viskoplastik Model Sonuçları.....	50
5.2.2. PİK-1 Viskoelastik Model Sonuçları.....	51
5.3. PİK-2'ye Ait Yapısal Modelleme Sonuçları	52
5.3.1. PİK-2 Viskoplastik Model Sonuçları.....	52
5.3.2. PİK-2 Viskoelastik Model Sonuçları.....	52
6. YAPISAL MODELLERİN SAYISAL MODELLEME BİLGİSAYAR RUTİNİNE KODLANMASI VE MODEL DOĞRULAMASI.....	54
6.1. Alt Rutinlerin Oluşturulması	57
6.1.1. Anlık Modül Rutininin Oluşturulması.....	58
6.1.2. Sünme Rutininin Oluşturulması	60
6.2. Sünme Deneyleri Simülasyonu ve Modellerin Doğrulanması.....	61
7. PİK TAHKİMATLI DAİRESEL KESİTLİ AÇIKLIĞIN SAYISAL MODELLENMESİ	65
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Literatürde PİK'ler için yapılan laboratuvar çalışmaları	9
Şekil 2. 2. Tipik sünme eğrisi	10
Şekil 2. 3. PİK'in kamaları gergide tutma özelliği	11
Şekil 3. 1. Planlanan deney düzeneği masası	16
Şekil 3. 2. Numunelerin askıda bırakılma şekli	17
Şekil 3. 3. Deney düzeneğinin ölçekli çizimi.....	17
Şekil 3. 4. TİP I ve TİP IV numune geometrileri (mm)	18
Şekil 3. 5. Kalıp, kesme aparatları ve numune hazırlanışı	19
Şekil 3. 6. 4 Deney setine ait sonuçlar (hata çubukları standart sapmaları göstermektedir).....	21
Şekil 3. 7. Sünme deney düzeneğinin genel görünümü	22
Şekil 3. 8. PİK'in karıştırılması, plakaya dökülmesi ve kesme aparatıyla numune hazırlanışı	25
Şekil 3. 9. Standart ve büzüşmüş pik test numuneleri (Guner, 2014).....	26
Şekil 3. 10. PİK-1'e ait maksimum çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi.....	27
Şekil 3. 11. PİK-2 için yapılan 1-gün kontrol deneyi	30
Şekil 3. 12. PİK-2'ye ait maksimum çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi.....	31
Şekil 4. 1. PİK-1'e ait gerinim oranı esaslı sünme kopma zarfları	34
Şekil 4. 2. PİK-2'ye ait gerinim oranı esaslı sünme kopma zarfları.....	34
Şekil 4. 3. PİK-1'e ait kür süresi esaslı sünme kopma zarfları.....	35
Şekil 4. 4. PİK-2'ye ait kür süresi esaslı sünme kopma zarfları	36
Şekil 4. 6. sunulan eşitlik ile yapılan pik-1 kopma zamanı tahmini ve gerçek kopma zamanı ilişkisi.....	38
Şekil 4. 6. Sunulan eşitlik ile yapılan pik-2 kopma zamanı tahmini ve gerçek kopma zamanı ilişkisi.....	39
Şekil 4. 9. PİK-1'e etkiyen çekme gerilimine bağlı beklenen kopma zamanı davranışları.....	40
Şekil 4. 10. PİK-2'ye etkiyen çekme gerilimine bağlı beklenen kopma zamanı davranışları	41
Şekil 4. 11. PİK-1'e ait farklı kama bloklarını taşıma süreleri	42
Şekil 4. 12. PİK-2'ye ait farklı kama bloklarını taşıma süreleri.....	44
Şekil 5. 1. Çoklu Kelvin-Voight modelin reolojik olarak gösterimi	49

Şekil 6. 1. Abaqus yazılımının CAE ara yüzü ve model aşamaları	55
Şekil 6. 2. UFIELD alt rutininin temel ara yüzü.....	58
Şekil 6. 3. PİK-1'e ait anlık modül ve gerilim ilişkileri.....	59
Şekil 6. 4 PİK-2'ye ait anlık modül ve gerilim ilişkileri.....	59
Şekil 6. 5. Sünme alt rutininin temel arayüzü	60
Şekil 6. 6. Sünme deney numunesinin mesh yapısı.....	61
Şekil 6. 7. PİK-1 için kopma anında oluşan gerinim dağılımları (1-gün)	62
Şekil 6. 8. PİK-1 için sonlu elemanlar doğrulama modeli karşılaştırmaları (1-gün).....	62
Şekil 6. 9. PİK-2 için kopma anında oluşan gerinim dağılımları (2-gün)	63
Şekil 6. 10. PİK-2 için sonlu elemanlar doğrulama modeli karşılaştırmaları (2-gün).....	63
Şekil 6. 11. Ara gerilim değerlerinde elde edilen toplam gerinim-zaman davranışları.....	64
Şekil 7. 1. Model geometrisi ve sınır koşullarının şematik gösterimi.....	66
Şekil 7. 2. Tahkimatsız tünel davranışında sıkışma koşulları (Hoek ve Marinos, 2000).....	66
Şekil 7. 3. Sonlu elemanlar tünel modelinin mesh yapısı	68
Şekil 7. 4. Oluşturulan farklı tünel modellerinde zamana bağlı kapanma davranışları	69
Şekil 7. 5. Tahkimatsız tünel modeline ait gerilim ve gerinim dağılımları (%10 gerinim, GSI 36) 70	
Şekil 7. 6. PİK global tahkimat özelliği	74

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Literatürde PİK'ler için yapılan sayısal modelleme çalışmaları	13
Çizelge 4. 1. PİK-1 ve PİK-2 için elde edilen sünme kopma zarfları.....	37
Çizelge 7. 1. Tünel modellerinde kullanılan parametreler	67
Çizelge 7. 2. Model sonuçlarının karşılaştırılması (5mm pik uygulaması)	72
Çizelge 7. 3. Model sonuçlarının karşılaştırılması (10mm pik uygulaması)	73

ÖZET

PİK'ler, maden kazılarının tahkimatı için kaya yüzeyine püskürtme olarak uygulanan, hızlı kür alan, göreceli olarak ince (2-5 mm) kaplamalardır. Yüzeğe püskürtülerek uygulanan püskürtme beton ve polimer kaplamalar gibi tahkimat malzemelerinin çok düşük kaya yer değiştirmelerinde ve kaya düşmelerinde tahkimat direnci gösterme özellikleri bulunmaktadır. Kaya yer değiştirmesinin çok fazla olduğu durumlarda, daha esnek olan PİK'ler püskürtme betona oranla tüm kaya deformasyonları için üstün tahkimat özelliği sağlayabilir.

Bu çalışmada, PİK'lerin oda sıcaklığındaki sünme özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Sonrasında sünme davranışlarını matematik-mekanik modele oturtulmuş ve sayısal olarak açıklık tahkimatı modellenmesinde zamana bağlı mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

İki farklı PİK'in değişik sabit gerilmelerde gerinim-zaman (vizko-elastik sünme) davranışları her kür süresi ve sabit gerilim değeri için en fazla 2 ay sürecek şekilde deneylerle tespit edilmiştir. Sonrasında elde edilen deney sonuçları değerlendirilerek PİK'lerin yer altında oluşan kama bloklarını taşıma özelliklerine ilişkin pratik grafikler oluşturulmuştur. Buna ek olarak deney sonuçları viskoelastik ve viskoplastik matematik modellere oturtulduktan sonra, bulunan temel (constitutive) gerilim-gerinim ilişkileri ABAQUS adlı sonlu elemanlar sayısal modelleme programına yeni bir alt rutinle tanıtılmıştır. Oluşturulan alt rutinlerin doğrulaması yapıldıktan sonra PİK'lerin yeraltı açıklıklarındaki global stabilite durumuna olan etkisi gerçek zaman aralıklarına bağlı olarak incelenmiştir. Bu inceleme 4 farklı temsili kaya kütlesi sıkışma davranışına sahip dairesel kesitlerde gerçekleştirilmiştir.

Bütün bu çalışmalar sonucunda, literatürde ilk kez PİK'lerin sünme davranışları incelenmiş, PİK'lerin sünme davranışlarına karşı son derece duyarlı oldukları ortaya çıkarılmıştır. PİK'lerin önemli tahkimat mekanizmalarından olan blok taşıma özelliğinde blok ağırlığını geniş kaplama alanlarına dağıttığı için etkin olarak kullanılacak zaman dilimleri ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca oluşturulan alt rutinler ile gelecekte PİK'lerin sünme davranışlarına ilişkin farklı çalışmalar yapılabileceği vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen farklı sıkışma davranışlarına sahip temsili kaya kütlelerindeki dairesel kesit analizleri sonunda farklı PİK uygulama kalınlıklarına sahip PİK'lerin global stabilite durumuna etkisinin son derece düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: püskürtme İnce Kaplama, sünme, viskoelastik, tahkimat, zamana bağlı davranış.

ABSTRACT

TSL's are relatively thin (2–5 mm), fast-setting materials used to spray onto rock surface to support mining excavations. Materials sprayed onto the rock such as shotcrete or liners can generate support resistance at small rock deformations. In situations where large ground convergence occurs, more flexible thin liners may provide superior support over the full range of rock deformations.

In this study, creep behaviour of TSL's at room temperature were determined in laboratory environment. Then mathematical-mechanical creep models were found and the time-dependent mechanical behaviours in numerical excavation support modelling were investigated.

Under constant stress levels, strain-time (viscoelastic creep) behaviour of two TSL's were determined for each curing time, up to 2 months. Experimental results were evaluated and graphs were developed to show the ability of support performances of TSL's under the effect of wedge blocks. In addition, after developing the viscoelastic and viscoplastic mathematical models, the constitutive stress-strain-time relations were introduced to ABAQUS finite element program with a new subroutine. After verification of the implemented subroutines, the support performance of the TSL's on the global stability in the underground openings has been investigated with real time modelling. This study was carried out for a circular opening with 4 different representative rock mass squeezing behaviours.

As a result, creep behaviour of TSL's were investigated for the first time in the literature and It was revealed that TSL's are extremely sensitive to creep behavior. The effective block bearing time with different wedge dimension scenarios were determined. In addition, further studies can be carried out on the investigation of the time-dependent behavior of TSL's with generated subroutines. As a result of the numerical studies, performed in 4 different rock mass squeezing behaviours with different TSL thicknesses, it was concluded that the effect of TSL on the global stability was extremely small.

Keywords: Thin spray-on liner, creep, viscoelastic, support, time-dependent behaviour.

1. GİRİŞ

Kaya tahkimat elemanları öncelikli olarak kaya kütlelerinin ve büyük blokların hareketini önlemek için kullanılırken yüzey tahkimat elemanları yoğun eklemler içeren kaya kütlelerinde küçük ölçekli blok kaynaklı duraysızlıkların önlenmesi sürecinde kullanılmaktadır. Yüzey tahkimat elemanları yeraltı açıklıklarının tavan ve duvarlarını kapladıkları için “alansal tahkimat” (areal support) şeklinde de adlandırılmaktadır. Çelik hasır, saplamalar arası kullanılan kemer, polimer hasır, püskürtme beton ve püskürtme ince kaplama (PİK) alansal tahkimat elemanları olarak kabul edilmektedir.

Püskürtülen alansal tahkimatlar kaya kütleleri veya bloğunda oluşan birkaç milimetre deplasman-hareket anında aktif tahkimat elemanı şeklinde davranmaya başlar. Bu nedenle alansal tahkimat elemanları kaya kütlelerini arazi reaksiyon eğrisindeki büyük deplasman değerlerine ulaşmadan önce tahkime edebilir. Çelik hasır, saplamalar arası kullanılan kemer, polimer hasır gibi tahkimat elemanları ise aktif destek sağlayabilmek için önemli ölçüde deplasmana gerek duydıklarından pasif tahkimat elemanları olarak adlandırılmaktadır. Püskürtme beton veya donatılı püskürtme betonun PİK'lere göre daha fazla tahkimat dirençlerine sahip olmasına rağmen, PİK'ler zemin sıkışmasının yoğun olduğu bölgelerde tüm kaya deformasyonları üzerinde daha iyi destek sağlayabilir (O'Donnell ve Tannant, 1998). Geleneksel gevrek saplama ve püskürtme beton desteklerin aksine, PİK'lerin yüksek plastik davranışları, yüklerin daha geniş kaplama alanı üzerindeki dağılmasını sağlar. PİK'ler Çelik hasır ile birlikte uygulandığında, donatılı püskürtme betonun sahip olduğu mukavemet değerlerine erişirler (Tannant, 2001). Makaslama ve çekme yükleri etkisinde ani yenilme davranışı gösterebilen püskürtme betondan farklı olarak, poliüretan / poliüre veya çimento esaslı PİK'ler kaya ile birlikte deforme olabilir, hatta kaya yenildiğinde veya aşırı yer değiştirme değerlerine ulaştığında bile tahkimat davranışını sürdürebilir. Buna ek olarak PİK'lerin deformabilite yetenekleri maruz kaldıkları yükü asma köprü gibi taşıyabilmelerini sağlar (Stacey, 2001).

1.1. Problemin Tanımı

PİK'lerin önemli özellikleri ve operasyonel faydalarına rağmen, endüstrinin büyük çoğunluğu hala bu nispeten yeni alansal tahkimat ürününün uzun vadeli performansına şüphe ile yaklaşmaktadır. Bu durumun temel sebebi olarak PİK'lerin yaptıkları işin nicel şekilde tanımlanmasının zor olması düşünülmektedir. Araştırmacılar PİK'lerin tahkimat mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve uzun

vadedeki performanslarının anlaşılması için sayısal analitik ve laboratuvar çalışmaları yürütmektedir.

Literatüre katkı sunan araştırmacılar PİK'lerin ana bileşenini polimer esaslı olması sebebiyle sünme davranışlarının önemli bir tasarım parametresi olduğunu düşünmektedir. (Yılmaz vd., 2003; Kuijpers vd., 2004; Villaescusa, 2014). Ancak literatürde PİK'lerin zamana bağlı sünme davranışlarına ilişkin herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca literatürde yapılan sayısal ve analitik çalışmalarda PİK'lerin kopma dayanımı parametresi temel tasarım parametresi olarak kullanılmaktadır. Sünme davranışına duyarlı olduğu öngörülen bu malzemelerin tasarım parametrelerinin belirlenmesinde sünme deneylerinin önemli rol oynayacağı düşünülmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı dünya üzerinde yaygın olarak kullanılan 2 farklı PİK ürününün oda sıcaklığında, farklı kür sürelerinde sünme özelliklerini laboratuvar ortamında belirlemek, belirlenen sünme davranışlarını matematik-mekanik modele oturtmak ve sayısal olarak açıklık tahkimatı modellenmesinde zamana bağlı mekanik özelliklerinin değişimini incelemektir. Başka bir deyişle çalışmanın amacı, tasarım mühendisleri için hem ampirik hem analitik hem de sayısal tasarımlarına yardımcı olabilecek uzun dönem PİK'lerin tahkimat davranışlarını araştırmaktır.

1.3. Çalışmanın İçeriği

Proje; giriş, kaynak araştırması, laboratuvar çalışmaları, deney sonuçlarının değerlendirilmesi, mekanik matematik model, modellerin bilgisayar rutinine kodlanması, Abaqus yazılımında yapılan sünme modellerinin sunulması, sonuç ve öneriler olmak üzere sekiz bölümde toplanmıştır.

Giriş bölümünde; problemin tanımı, çalışmanın amacı ve içeriğine yer verilmiştir. Kaynak araştırması bölümünde; PİK'lerin kısa geçmişi, kullanımı, avantaj-dezavantajları, literatürdeki PİK'lere ilişkin laboratuvar deneyleri ve PİK'lerin sünme davranışının önemine ilişkin bilgiler yer almaktadır. Laboratuvar çalışmaları bölümünde; PİK'ler için aynı anda 8 deney yapılabilecek laboratuvar sünme deney düzeneğinin hazırlanması, kullanılan PİK'ler hakkında genel bilgi, sünme deneylerinde kullanılacak numune tipini ve numune hazırlama şeklini belirlenmesi, deneylerde kullanılacak sabit gerilme miktarları tayini için yapılan çekme deneyleri ve yurtdışından getirtilen iki farklı PİK'in en az 3'er farklı kür süresi için 4 farklı sabit gerilme seviyesinde sünme deneylerinin gerçekleştirilmesi kısmı yer almaktadır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi bölümünde; elde edilen deney verisini kullanarak PİK'lerin yenilme zarfları oluşturulmuş, gerinim-zaman ve sünme-uyumu grafiklerini sunulmuştur. Mekanik matematik model oluşturulması kısmında ise farklı PİK ve kür süreleri için 3 farklı mekanik matematik model oluşturulmuş ve temel

(constitutive) gerilim-gerinim ilişkileri bulunmuştur. Oluşturulan mekanik modeller bir sonraki bölümde Abaqus yazılımına Fortran ara yüzüyle kullanıcı alt rutini ile kodlanmıştır. Sonraki bölümde ise Abaqus yazılımında vizko elastik davranış gösteren kayalarda açılan dairesel kesitli ve iç yüzeyi belirli kalınlıkta gerilim gerinim ilişkisi bulunan PİK'le kaplı açıklıklar modellenmiş ve bu açıklıklar ve PİK'de oluşan zamana bağlı gerilim gerinim değişiklikleri incelenmiştir. Böylelikle zamana bağlı PİK'in tahkimat davranışını gözlemlenmiş, yenilme tipi, verimliliği ve yenilme zamanı gibi detaylar hakkında fikir sahibi olunmuştur. Son bölümde de elde edilen sonuçlar ve gelecek dönemlerdeki çalışmalara yön verebilecek öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

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

PİK'lerin tüm madencilik endüstrisi tarafından kabul gören tanımı ise; "genelde çimento, lateks, polimer bazlı reaktif olabilen, çok bileşenli, kaya yüzeyine genelde 6 mm ya da daha ince kalınlıkta, püskürtme yöntemiyle uygulanan malzeme" dir.

2.1. PİK'lerin Geçmişi ve Günümüzdeki Durumu

1970'li yılların başında Yeni Avusturya Tünelcilik Yönteminin (NATM) geliştirilmesiyle birlikte püskürtme beton, yer altı kazılarında yaygın olarak kullanılan yüzey tahkimat malzemesi haline gelmiştir (Mirzamani vd., 2011). Madencilik ve tünelcilik sektöründe artan yatırımlar ve hızlı teknolojik gelişmeler neticesinde püskürtme betonun mekanik, operasyonel özelliklerinin geliştirilmesi yönünde ihtiyaç gündeme gelmiştir. Pek çok araştırmacının bu alanda yaptığı çalışmalara rağmen püskürtme betonun bu özelliklerinde sağlanan gelişmeler kısıtlı seviyede kalmıştır.

1980'lerin sonunda MIROC (Kanada Madencilik Endüstrisi Araştırma Kurumu) büyük ölçekli özel şirketler için püskürtme betona alternatif olabilecek yeni bir malzeme üretilmesi için detaylı bir araştırma yapmıştır. Bu araştırmanın sonucunda MIROC, poliüretan bazlı Mineguard™ adını verdikleri ilk PİK ürününü geliştirmiştir.

MIROC'un ürettiği PİK'in detaylı laboratuvar testleri 90'lı yılların sonuna kadar devam etmiştir (Archibald vd., 1997; Archibald ve Lausch., 1999). Aynı yıllarda Güney Afrika'da, lateks bazlı Everbond adı verilen PİK malzemesi geliştirilmiştir (Wojno ve Kuijpers, 1997). Bu çalışmalar dünya madencilik sektörünün PİK'lere ilgi duymasını sağlamıştır. PİKlerin kullanım kolaylığı sağlaması, madencilik maliyetlerini azaltması gibi avantajlarının olması sebebiyle madencilik firmaları püskürtme beton yerine PİK'leri bir alternatif olarak görmeye başlamıştır. 2001 yılında, 55 farklı maden PİK'leri yüzey tahkimatı alanında kullanmaya başlamıştır (Tannant, 2001). PİK

üreticileriyle yapılan görüşmelerin sonucunda bu sayının 2016 yılında yaklaşık olarak 150'ye ulaştığı tahmin edilmektedir.

1990'ların başında püskürtme beton, tahkimat anlamında birincil olarak kullanılan yüzey tahkimat sistemi haline gelmiştir. Uzaktan kontrollü püskürtme beton uygulama sistemlerinin geliştirilmesiyle işçilerin tahkimatı yapılmamış bölgelere girme zorunluluğu ortadan kalkmıştır. Ancak büyük miktarlarda uygulanan püskürtme beton bileşenlerinin yer altına taşınması, uygulanacak yüzeylerin derinlerde olması ve aynı anda birbirinden farklı galerilerde uygulama gerektirmesi sebebiyle farklı lojistik temelli sorunlar da ortaya çıkmıştır. Yukarıda belirtilen sorunların çözülmesi açısından PİK'lerin kullanımına ihtiyaç doğmuştur (Swan ve Henderson, 1999). Türkiye'de 1 mm kalınlığında PİK'in yaklaşık birim maliyetinin 15 Euro/m² olduğu bilinmektedir. Güney Afrika'da yapılan bir çalışmada PİK ve püskürtme betonun maliyetleri karşılaştırılmıştır (Esterhuizen ve Bosman, 2009). Bu çalışma sonuçlarına göre 8 mm kalınlığında uygulanan PİK'in 5 cm kalınlığında uygulanan donatısız püskürtme betona göre daha ekonomik olduğu (taşıma maliyetleri hariç) vurgulanmıştır.

Şu ana kadar 40'dan fazla PİK ürünü piyasada satışa sunulmasına karşın günümüzde 17 farklı ürünün aktif olarak satışı devam etmektedir. Satışı devam eden ürünlerin firmaların taleplerini karşılamak için PİK'lerin mekanik ve lojistik özelliklerinde iyileştirme yapmak adına aktif olarak ar-ge çalışması yaptıkları bilinmektedir. Ülkemizde farklı yeraltı açıklıklarında, metal ve kömür madenlerinde bu yenilikçi ürünler deneme amaçlı olarak kullanılmasına rağmen şu anda aktif olarak hiçbir madende kullanılmamaktadır.

2.2. PİK'lerin Kullanım Alanları

PİK'ler geleneksel olarak Kanada ve Güney Afrika'da sert kayaç yapısına sahip genellikle derin yeraltı madenlerinde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak 2000'li yıllarda yeraltı kömür madenleri de PİK'lerin potansiyel faydalarını keşfetmişlerdir. Saydam'a göre PİK'ler tahkimat alanında çok farklı formlarda son derece geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu uygulama alanlarını Archibald ve Degagne, 2000, EFNARC, 2008 gibi bazı araştırmacılar belirtmişlerdir. Yeraltı açıklıklarında PİK'lerin uygulama alanları liste şeklinde sunulmuştur.

- Kaya saplamaları arası tahkimatta
- Erişimi zor ve/veya ulaşım kısıtlaması olan açıklıkların tahkimatında,
- Hasır yenileme alanında,
- Patlatma operasyonundan hemen sonra birincil tahkimat olarak,

- Uygulama hızı püskürtme betondan çok fazla olduğundan püskürtme beton öncesi tahkimatın sağlanmasında,
- Zayıf zonlarda geçici tahkimat olarak (TBM tünelleri),
- Kaya patlaması tehlikesini azaltmada,
- Topuk güçlendirmesinde,
- Ayna tahkimatında,
- Kuyu kaplamalarında ve stabilizasyonunda,
- Havalandırma kuyuları stabilizasyonunda,
- Onarım işlerinde,
- Kaya düşmelerini engellemede,
- Hava sızdırmazlığının sağlanmasında,
- Yüzey bozunmalarında (aşınma, bozunma, şişme, ufalanma),
- Yüzey alterasyonlarında (nem, ısı, rutubet, kimyasal kirlenme),
- Kömür madenlerinde gaz bariyeri olarak kullanılabilir.

2.3. PİK'lerin Avantajları ve Dezavantajları

Bu proje kapsamında yapılan kaynak taramasına göre PİK'lerin pek çok kayda değer avantajının bulunduğu görülmüştür. Literatürde bu avantajlar jeoteknik ve jeoteknik olmayan olmak üzere iki farklı alt gruba ayrılmıştır.

Jeoteknik avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Gereken saplama sayısını azaltması ve saplama optimizasyonunu mümkün kılması (Tannant, 2001; Lacerda vd., 2002),
- Milimetre boyutundaki küçük kaya deformasyonlarında, aktif tahkimat sağlaması ve kaya düşmelerini engellemesi (Spearing vd., 2000; Archibald, 2001),
- Patlatma hasarını azaltma (Spearing ve Champa., 2000; Lacerda vd., 2002),
- Çabuk kür olması ve istenen düzeydeki mekanik özelliklere erken ulaşması (Hannon A., 2009; Lacerda, 2004; Yılmaz, 2007, Guner ve Ozturk, 2016),
- Daha yüksek yapışma kapasitesi ve bağ mukavemeti (Tannant, 2001; Archibald & Drige, 2006; Pappas vd., 2003; Lukey vd., 2008),
- Uygulama sırasında seken parçacık sayısının ihmal edilecek kadar az olması (Smith, 2012; Spearing vd., 2009; Lacerda, 2004),

- Gaz, nem bozunmaları ve radyasyon kaçaklarına karşı bariyer oluşturması (EFNARC, 2008; Archibald & Drige, 2006; Potvin, 2002),
- Yüksek deplasmanlara ulaşabilme kapasitesi (Tannant, 2001; Archibald & Dridge, 2006; Pappas vd., 2003; Lukey vd., 2008; Kuijpers vd., 2004, Guner ve Ozturk, 2016).

Jeoteknik olmayan avantajlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Uygulama kolaylığı ve hızlı uygulama oranı (Pappas, 2003; Tannant, 2001; Lacerda, 2004; Yılmaz, 2010; Ozturk, 2011),
- Küçük ekipman ile uygulanabilirliği (Pritchard vd., 1998; Tannant, 2001; Laurance, 2001),
- Cevher zenginleştirme ekipmanlarına karşı herhangi bir tehlike arz etmemesi (Yılmaz, 2010),
- Çalışma yüzeyinin daha aydınlık olmasını sağlaması (rengi nedeniyle ışığı yansıtması) (Potvin, 2002; Tannant, 2001),
- Diğer yüzey tahkimat sistemlerine göre daha az miktarda malzeme taşınmasına ihtiyaç duyması (lojistik fayda) (Tannant, 2001; Archibald, 2001; Pappas, 2003),
- Yeraltı operasyonlarında döngü süresini kısaltması (Steyn vd., 2008; Archibald, 2001; Smith, 2012),
- Kaza riskini azaltması, daha güvenli bir çalışma ortamı sağlaması (Hannon, 2009; Archibald, 2001; Smith, 2012; Archibald & Dridge, 2006; Pappas, 2003),
- İşletme maliyetini azaltması (Tannant, 2001; Yılmaz, 2009; Smith, 2012; Spearing vd., 2009),
- Diğer yüzey tahkimatı sistemlerine göre daha ince kalınlıklarda uygulanabilmesi (Archibald, 2001; Tannant, 2001; Spearing vd., 2009; EFNARC, 2008; Pappas, 2003; Pritchard vd., 1998; Ozturk, 2011).

Yukarıda bahsedilen pek çok avantaja rağmen literatürde PİK'lerin bazı dezavantajları da yer almaktadır. PİK'lerin belli başlı dezavantajları aşağıda listelenmiştir.

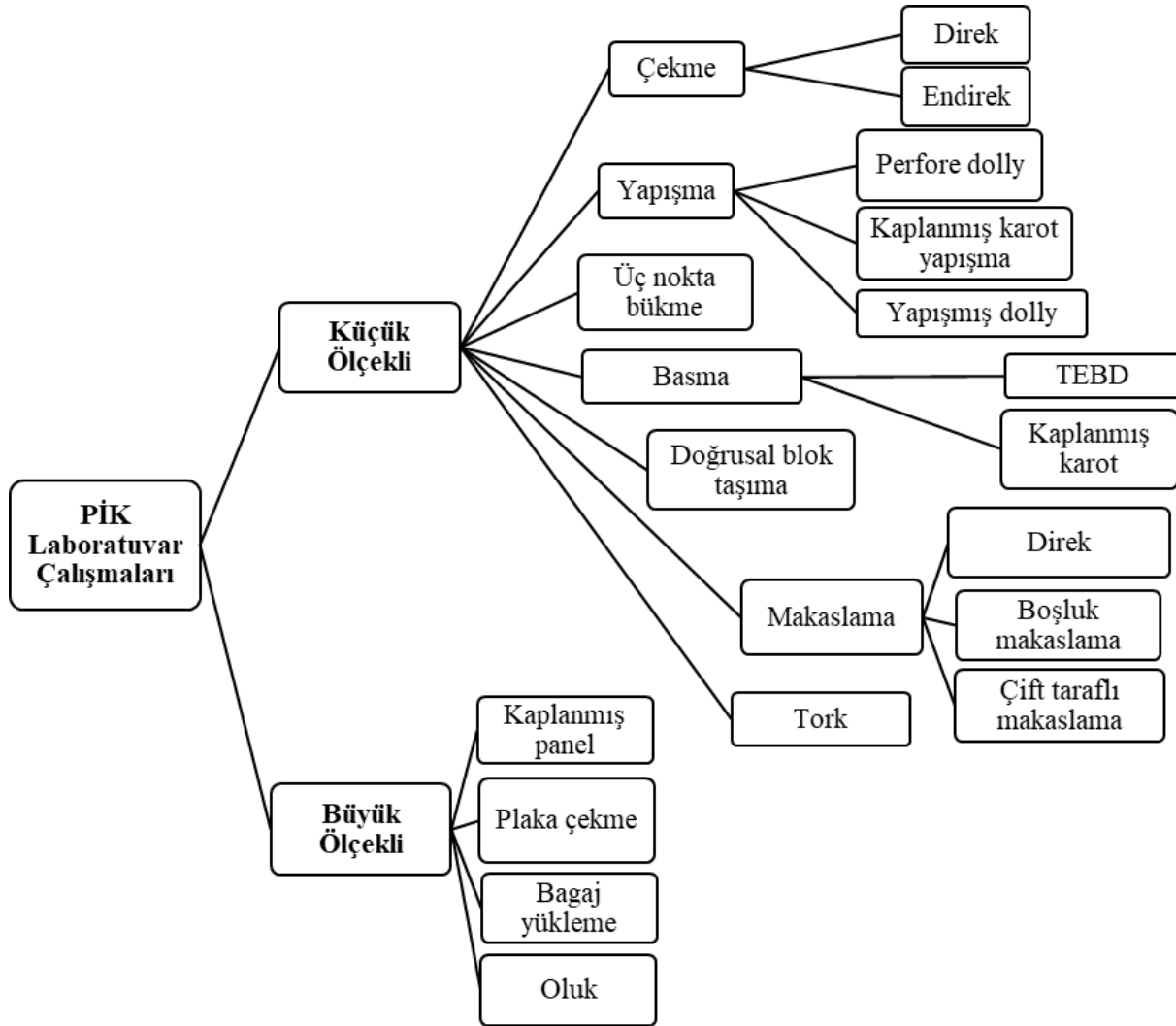
- PİK'lerin mekanik özellikleri karışım oranlarıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. İstenen karışım oranını ve süresini küçük ölçekli yeraltı uygulamalarında ayarlamak problem teşkil edebilir (Guner ve Ozturk, 2016),

- Patlatma operasyonları ya da makinelerin çarpması sonucunda PİK'lerde meydana gelen küçük yırtılmalar, PİK'lerin yapısı nedeniyle tüm yüzeye yayılabilmektedir (Jensen, 2013),
- Toz, dizel ekipmanların dumanı, yağ gibi etmenler PİK'lerin yapışma kapasitesini azaltır. Bu nedenle PİK uygulaması yapılmadan önce uygulama yüzeyinin temizlenmesi gerekmektedir. (Yılmaz, 2011; Archibald, 2001; Tannant, 2001; Spearing vd., 2001; Ozturk, 2005; Ozturk, 2012),
- PİK'leri direk solumak alerjik reaksiyonlara sebep olabilir (Archibald, 2001, Jensen, 2013)
- PİK'lerin tahkimat mekanizması henüz tam olarak anlaşılammıştır (Archibald, 2001; Kuijpers vd., 2004),
- PİK'ler kimyasal malzemeler olduğundan bu ürünlerin raf ömrü son derece kısıtlıdır (Guner ve Ozturk, 2016; Yılmaz, 2011),
- Bazı PİK'ler sünümlü ve viskoelastik özellik göstermektedir, bu duruma dair yapılmış detaylı bir çalışma bulunmamaktadır (Ozturk, 2012; Ozturk ve Tannant, 2007; Villaescusa, 2014).

2.4. PİK'lere İlişkin Laboratuvar Çalışmaları

2000'li yıllardan itibaren PİK'lerin mekanik özelliklerini ve PİK-kaya etkileşimini anlayabilmek için pek çok farklı laboratuvar ölçekli deney düzenekleri hazırlanmıştır. Literatürde PİK'lerin mekanik özelliklerini belirtmek için yapılmış tüm deneylerin şematik gösterimi Şekil 2. 1'de sunulmuştur.

Şematik sunumla belirtilen tüm bu deneylerin içerisinde yalnızca iki tanesi PİK araştırmacıları tarafından kabul görmüştür. Bunlar; direk çekme (uzama) ve çekme yapışma dayanımı testleridir (Kuijpers vd., 2004). Hazırlanan raporun başında da belirtildiği üzere literatürde PİK'ler için malzeme özelliklerinin zamana bağlı değişimini inceleme amacıyla tasarlanmış-yapılmış herhangi bir sünme deney düzeneği bulunmamaktadır.



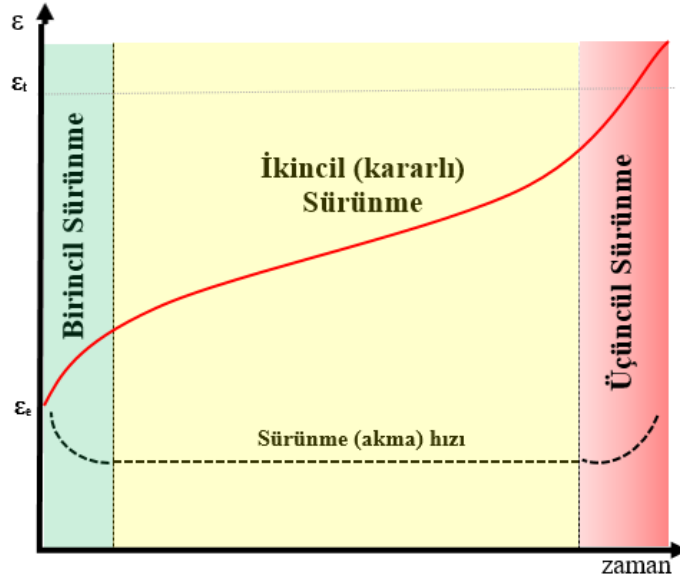
Şekil 2. 1. Literatürde PİK'ler için yapılan laboratuvar çalışmaları

2.5. Sünme Davranışının Önemi

Mühendislik malzemeleri çevresel etmenlere ve maruz kaldıkları yüklere bağlı olarak rijit katıdan viskoz sıvıya kadar çok çeşitli mekanik tepki verirler. Bu karakteristik özelliklerin kombinasyonlarından dolayı polimerler zaman ve sıcaklığa bağlı malzeme davranışına sahiptir. Bu davranışa genel olarak sünme (sürünme, akma) adı verilir (Findley vd., 1989). Sünme, uygulanan sabit yüklerin etkisinde malzemede meydana gelen zamana bağlı kalıcı deformasyon şeklinde tanımlanmaktadır. Hemen hemen tüm mühendislik malzemelerinde yüksek sıcaklık değerlerinde moleküller ve moleküler bağlar esnemekte ve hareket kabiliyeti artmaktadır. Böylelikle malzeme daha sünek davranmakta ve zamana bağlı malzeme özellikleri daha fazla önem kazanmaktadır. Mühendislik malzemelerinden farklı olarak polimer içerikli malzemeler oda

sıcaklığında bile zamana bağlı sünme davranışı gösterebilmektedir. Dolayısıyla sünme performansları bu tip malzemelerde birincil tasarım parametresi olarak kabul edilmektedir.

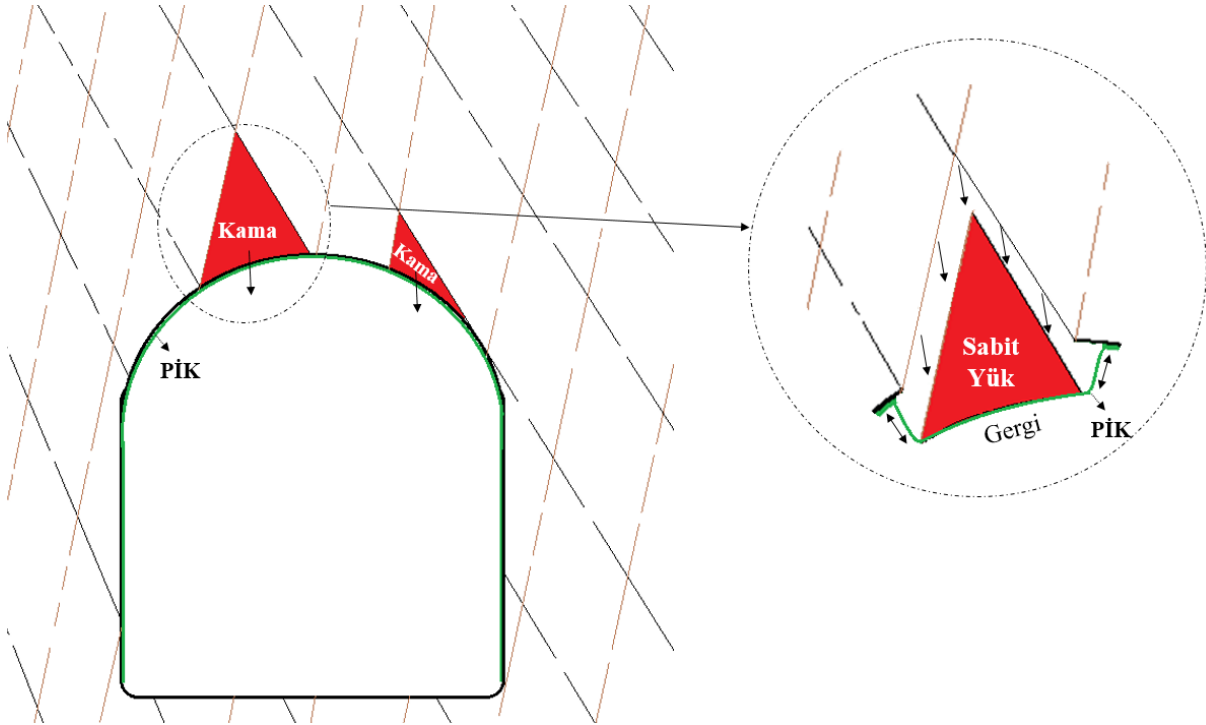
Sünme deformasyonu genel olarak gerinim, zaman ve sıcaklık parametrelerine bağlı olmakla birlikte bu deformasyonun gösterildiği sünme veya sürünme eğrisi olarak adlandırılan gerinim-zaman grafikleri 3 temel bölümden oluşmaktadır. Birincil sürünme kısmında gerinim oranı, $d\varepsilon/dt$, öncelikli olarak yüksek olup zamana bağlı olarak azalmaktadır. Gerinim oranının sabitleşmeye başladığı aşama ikincil aşama denmektedir. Gerinim oranının en düşük olduğu bu aşama aynı zamanda kararlı sürünme aşaması olarak da bilinmektedir. Üçüncül aşamada ise malzemenin gerinim oranı kopma yada yenilme gerçekleşinceye kadar artar (Şekil 2. 2).



Literatürde, polimerlerin, metallerin, seramiklerin ve hatta bazı kayaçların zamana bağlı malzeme özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Saha uygulaması veya kullanım aşamasında malzemenin maruz kaldığı yükleme koşulu, yönü gibi etmenlere bağlı olarak farklı sünme test düzenekleri ve standartları kullanılmaktadır. Polimer mühendisliği alanında çekme, basma ve eğilme sünme deneyleri yaygın olarak uygulanmaktadır. PİK'lerin arazi uygulamalarında en sık görülen yenilme mekanizması çekme yenilmesidir (Guner ve Ozturk, 2016). Bu nedenle sunulan çalışmada "plastikler için çekme sünme deneyi" test yöntemi kullanılmıştır (ASTM-2990, 2010).

Eklemlili kaya kütlesi kazılarında üç ve daha fazla süreksizliğin kesişmesiyle kama blokları oluşmaktadır. Oluşan bu bloklar yerçekimi ve diğer statik-dinamik kuvvetlerin etkisi altında ceplerinden kayma veya düşme potansiyeline sahiptir. Kamanın geometrisi, dayanım

karakteristiği, süreksizliklerin doğrultusu, uzunluğu, pürüzlülük profilleri gibi pek çok etmen oluşan kamaların stabilitesine doğrudan etki edebilmektedir. Oluşan küçük ölçekli kamaların global stabilite açısından büyük sorunlar teşkil etmediği düşünülmesine rağmen işçi yaralanmaları, ekipman kayıpları gibi pek çok farklı soruna yol açtığı bilinmektedir. Avusturalya'da yapılan bir araştırmaya göre yeraltı kamalarının sebep olduğu yaralanmaların %90'ına 1m³'den daha küçük bloklar sebep olmaktadır (Potvin, 2006). Kaya saplamaları, kama bloklarının düşmesini veya kaymasını önlemek için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Püskürtme yüzey tahkimat elemanları kama ağırlığını daha büyük kaplama bölgesinde dağıttığı için küçük ölçekli (<1m³) kama bloklarını tutma işleminde daha başarılı olabilmektedir. PİK'lerin oluşan kamaları gergide tutmalarına ilişkin görsel Şekil 2. 3'te sunulmuştur.



Şekil 2. 3. PİK'in kamaları gergide tutma özelliği

Şekil 3.'te de sunulduğu üzere PİK'lerin kama bloklarını tutarken gergi altında kaldıkları bilinmektedir. Bu durumu en iyi şekilde temsil edecek çalışmanın çekme sünme deneyi olduğu düşünölmektedir. Bu tip bir durumda PİK için en önemli kaygının gergi altında kama bloğunu tutabilme süresi olacağı öngörölmektedir. PİK'ler zamana bağlı davranış gösteren malzemeler oldukları için, tutma davranışı ve süresi doğrudan sünme özellikleri ile ilişkilendirilebilir.

Sünme literatüründe malzemenin gerçek hayatta maruz kaldığı davranışı canlandırmak adına belirli deneylerin ortasında yük boşaltma işlemi yapılarak malzemenin gerinim geri kazanım davranışlarına da bakılmaktadır. Ancak PİK'lerin arazi uygulamalarında PİK'in kama bloklarının etkisiyle sabit yük altında kaldıktan sonra bu yükün geri alınması gibi bir durum oluşmadığından yapılan deneylerde gerinim geri kazanım davranışı kapsam dışında bırakılmıştır.

Patlatma, kaya patlaması, deprem gibi etmenler kamaların PİK uygulamalarından sonra da oluşmasına sebep olabilir. Bu nedenle, kürlenme süresinin sünme özellikleri üzerindeki etkisi de ayrıca önemli bir araştırma konusudur. PİK'lerin sünme özellikleri, çalışmada takip edilen test standartlarına uygun olarak laboratuvar testleri ile karakterize edilmelidir.

2.6. PİK'lerin Sayısal Modellemeleri

Literatürde polimerler, kaya, zemin malzemeleri için yapılmış pek çok sayısal modelleme olmasına rağmen, PİK'ler üzerine yapılan modellemeler kısıtlıdır. PİK'lerin yapısal davranışını tam olarak anlamaya yönelik olarak yapılan bu araştırmalarda görülen en önemli eksiklik PİK'lerin çoğunlukla doğrusal ve elastik malzeme olarak kabul edilmesidir. Araştırmacılar Mason ve Stacey, 2008; Mason ve Abelman, 2009; Fowkes vd., 2008; Dirige ve Archibald, 2009 PİKlerin yapısal davranışının doğrusal elastik formda olduğunu kabul etmektedirler. Ancak yapılan laboratuvar ve arazi araştırmaları sonucunda PİK'lerin belirli yüke kadar elastik davranış gösterdiği ve daha sonra sünek ve visko-elastik davranışa geçtiği tespit edilmiştir (Ozturk, 2012; Tannant 2011; Guner ve Ozturk, 2016). Buna ek olarak PİK'lerin kürlenme süresinin de mekanik malzeme özelliklerine doğrudan etki ettiği bilinmektedir (Yılmaz, 2011; Guner, 2014). Ayrıca sabit yük altında sünme davranışı gösteren PİK'lerin bu özelliğine hiçbir araştırma konusunda henüz yer verilmemiştir. Bu nedenle PİK'ler için yapılan mevcut sayısal modelleme çalışmalarının PİK'lerin yapısal davranışını anlamaktan ziyade PİK'leri sınıflandırma amaçlı kullanılabileceği düşünülmektedir.

Kaynak taraması sonucunda literatürde sünme davranışına ilişkin hiçbir sayısal modelleme çalışması olmadığı için literatürde bulunan PİK'lere ait sayısal model çalışmalarının tek tek anlatılması yerine bir tablo şeklinde sunulmasına karar verilmiştir. Literatürde PİK'ler için yapılan sayısal modelleme çalışmaları özeti Çizelge 2. 1'de sunulmuştur.

Çizelge 2. 1. Literatürde PİK'ler için yapılan sayısal modelleme çalışmaları

Araştırmacı	Model Amacı	Yöntem
Tannant ve Wang (2003)	Çekme, Makaslama Dayanım, Tünel (daireesel)	Ayrık Elemanlar
Malan ve Napier (2008)	Çatlaklı yeraltı kazısı (kare)	Sınır Elemanlar
Harding (2008)	Çift yönlü makaslama Kaplanmış karot basınç	Sonlu Farklar
Richardson vd.(2009)	Bükülme Çift taraflı makaslama	Sonlu Farklar
Dirige ve Archibald (2009)	Yeraltı kazısı (atnalı)	Sonlu Farklar
Nater ve Mena-Cabrera (2010)	Yeraltı kazısı (kare)	Ayrık Elemanlar
Qiao (2015)	Yeraltı topuk	Ayrık Elemanlar
Guner ve Ozturk (2014, 2016)	Çekme Basınç	Ayrık Elemanlar
Komurlu ve Demir (2017)	Doğrusal blok taşıma	Sonlu Elemanlar
Lee vd. (2015, 2018)	Doğrusal blok taşıma	Sonlu Elemanlar

3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmalarının başlatılabilmesi için öncelikle PİK ürünlerinin temin işlemleri yapılmıştır. Proje kapsamında iki farklı PİK ürünü için yapılması planlanan sünme deneylerine malzeme temin sürecine 2015 yılı Kasım ayında başlanmıştır. PİK'lerin raf ömürlerinin son derece kısa olması (yaklaşık 12 ay) ve numune temin ve deney sürecinin uzunluğu sebebiyle öncelikle ilk olarak deneyleri yapılacak malzemenin temini işlemine başlanmıştır. PİK'lerin ülkemizde kullanımı ve üretimi olmadığından dünya üzerinde bu alanda kabul görmüş bir firma olan "Minova CarboTech GmbH" (Almanya) şirketinden Tekflex LP isimli ürünün talebi yapılmıştır. Ürün isminin sürekli tekrar edilmemesi adına gelişme ve sonuç raporlarında bu üründen "PİK-1" adı ile bahsedilmiştir. Diğer PİK ürünü için yapı kimyasalları alanında faaliyet gösteren ve dünya genelinde yaygın olarak bu ürünün satışını yapan BASF firmasıyla irtibata geçilmiş ve ürün temini PİK-1 deneylerinin tamamlanması ile yapılmıştır. Bu ürüne "PİK-2" ismi verilmiştir.

3.1. Deneyleri Gerçekleştirilen PİK'ler hakkında bilgi

3.1.1. PİK-1

Proje yöneticisinin daha önce bu alanda gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda bu ürünün gerek yaygın kullanımı gerek numune hazırlama sürecinin kolaylığı sebebiyle PİK-1 ürünü öncelikli olarak tercih edilmiştir.

Malzeme sıvı ve katı olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Stabilize reçine lateks sıvısı ve sıvıyla sertleşen özel çimentodan oluşan katı ile kütlece 2:1 oranında karıştırılarak kullanıma hazır hale getirilmektedir. Ürünün yüzde içeriği üretici tarafından paylaşılmamıştır. Karışım hazırlandıktan sonra 30 ile 60 dakika içerisinde sertleşmeye başlamakta olup, yüksek çekme ve kayaya yapışma dayanımı olduğu proje yöneticisinin daha önceki çalışmalarında tespit edilmiştir.

3.1.2. PİK-2

Proje ekibinin daha önceki çalışmalarında da kullandığı PİK-2 tek bileşenli polimer bazlı, toz halinde satılmaktadır. Ürünün tavsiye edilen karışım oranı ise ağırlıkça bir birim toz için yarım birim su şeklindedir. 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. Ürünün çabuk sertleşmeye başlaması arazi uygulamalarında avantaj olmasına rağmen, küçük ölçekli laboratuvar uygulamalarında numune hazırlama sürecinde farklı sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Ürünün toz bileşeni 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.

3.2. Deney Düzeneğinin Kurulması

Deneyde kullanılacak PİK-1'in talebi yapılırken aynı süreçte deney düzeneğinin ve deney odasının oluşturulması işlemlerine başlanmıştır (Aralık 2015). Bu kapsamda ODTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarında bir odada sadece bu deney düzeneğinin kurulması için kullanılmıştır.

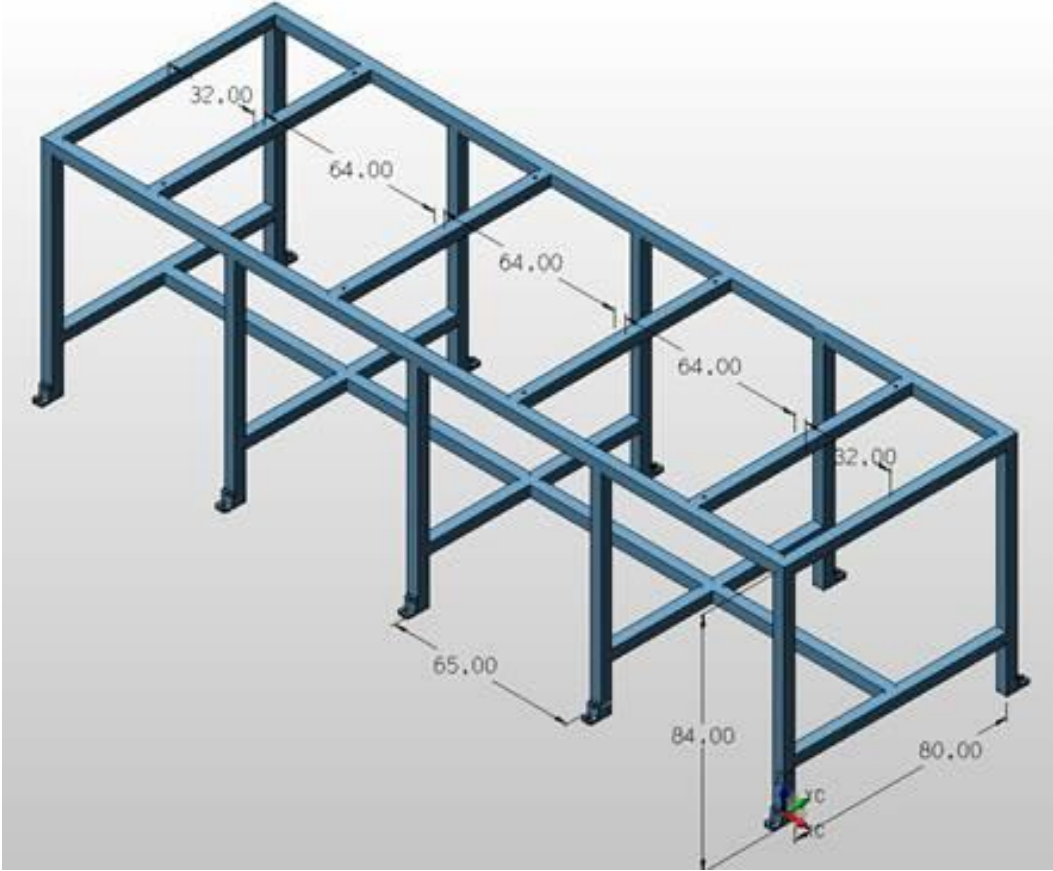
Deney düzeneğinin oluşturulmasında kullanılacak malzemelerin temini iki kısımda gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 8 adet LVDT, 16 manyetik tutucu ve kameralı kayıt cihazı siparişleri verilmiştir. Bu ürünler teslim alındıktan sonra 8 adet kadranlı komparatör, muhtelif sabit yükler, veri toplama cihazı, güç kaynağı ve bilgisayar alım işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Proje değerlendirme sürecinde hakemlerin de belirttiği gibi PİK'lerin sıcaklığa bağlı olarak malzeme davranışlarının değişebileceği öngörüsü dikkate alınarak, deney odasının deney süresi boyunca sabit oda sıcaklığında tutulması için oda boyutlarına uygun bir adet klima temin edilmiştir. Ürünlerin temin talebi yapılırken özel bir firmaya deney düzeneğinin kurulacağı masanın siparişi verilmiştir.

Proje başvurusu aşamasında deneyler için 4 adet 4 bacaklı demir deney masası yapılması öngörülmesine karşın deney masalarının herhangi bir sarsıntı veya titreşimden etkilenmelerini en aza indirmek ve maliyeti düşürmek adına tek bir masa oluşturulması ve masa ayaklarının farklı noktalardan zemine sabitlenmesine masayı üreten firma ile birlikte karar verilmiştir. Proje ekibi tarafından deney düzeneği masasının çizimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılması planlanan masa cm cinsinden ölçüleri ile birlikte Şekil 3. 1'de sunulmuştur.

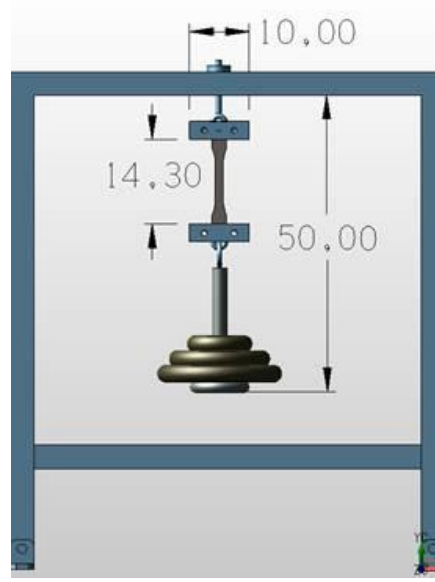
Numune boyu ve uzama miktarı, kıskaçların ve bağlanacak ağırlıkların boyutu tekrar gözden geçirildiğinde masanın yüksekliğinin daha kısa olmasında bir sorun olmayacağına karar verilerek masanın 84 cm yüksekliğinde olmasına karar verilmiştir. Ayrıca tüm deneylerin tek bir masa

düzeneğinde yapılmasına karar verilmesinde deney odasının boyutları da göz önünde bulundurulmuştur. Bu aşamada deneylerin farklı zamanlarda bitmesiyle birlikte askıda olan yüklerin yere düşmesinin, devam eden deneylere etki etmemesine de önem verilerek düzenekler arasındaki en uygun mesafe bulunmuştur.



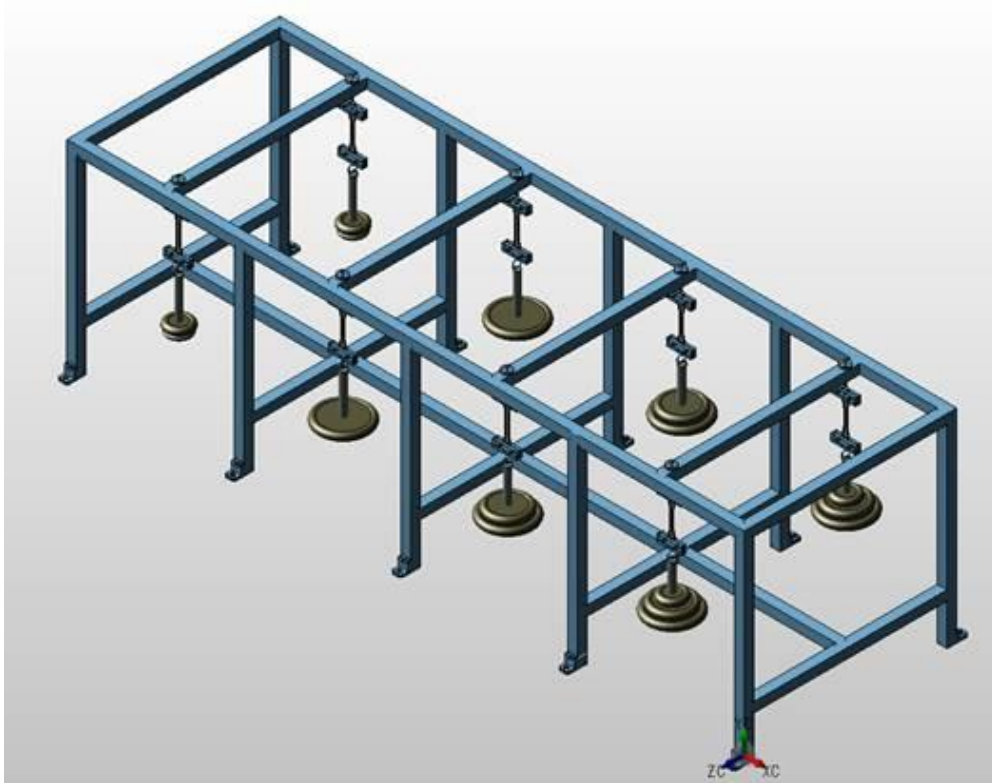
Şekil 3. 1. Planlanan deney düzeneği masası

Projede aynı anda dört çift olmak üzere toplam 8 deneyin yapılması planlanmıştır. Köpek kemiği numunelerinin sabit yük altında bırakılması süreci deneyin en önemli aşamalarından birisidir. Bağlanan yükün 3 boyutlu ortamda numunenin tam merkez hizasında olması gerekmektedir. Bu nedenle bu düzeneğin de çizimi yapılmıştır. Numuneye sabit yük bağlanması durumunu temsil eden çizim Şekil 3. 2'de sunulmuştur.



Şekil 3. 2. Numunelerin askıda bırakılma şekli

Proje ekibinin yaptığı çalışmalar sonunda kurulması planlanan deney düzeneğinin Şekil 3. 3'de sunulan nihai çizimi 2016 yılı Ocak ayı içerisinde masayı üretecek firmaya teslim edilmiş olup 15 iş günü içerisinde şirket masayı teslim etmiştir.



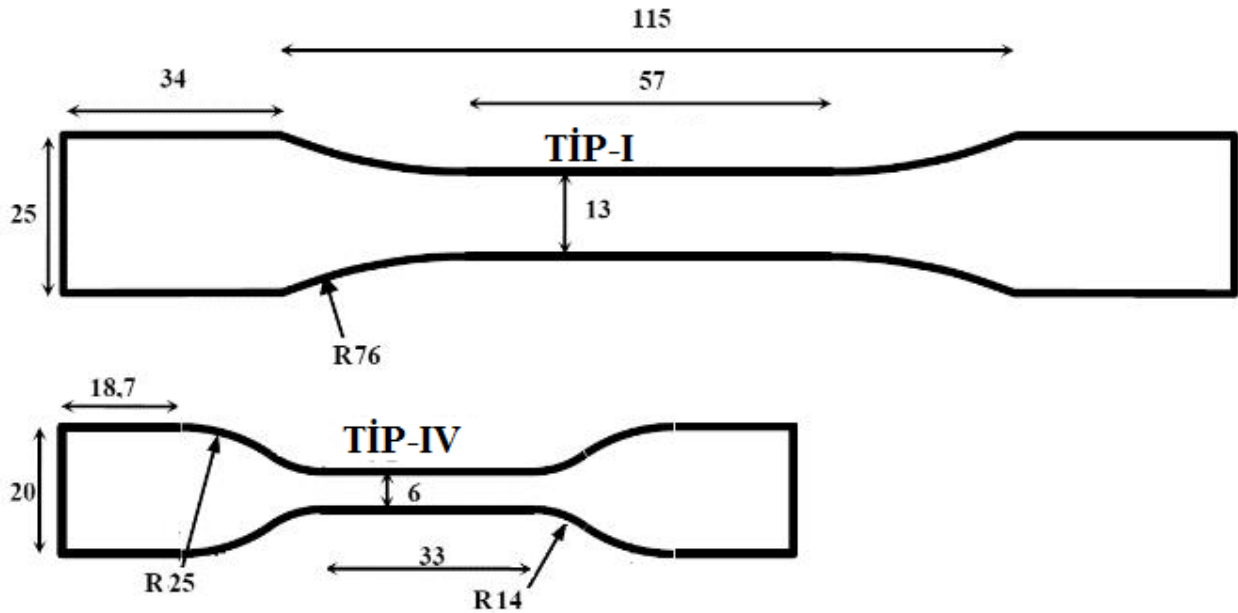
Şekil 3. 3. Deney düzeneğinin ölçekli çizimi

Hazırlanan düzenekte sürekli ölçüm alınması amacıyla LVDT ve veri toplama sisteminin bağlantısı yapılmış, ürünlerin içerisinde çıkan kalibrasyon sertifikaları yardımıyla tüm LVDT'lerin kalibrasyonu proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiş, deney düzeneğine monte edilmiştir. Deneylerin uzun süreli olması nedeniyle elektronik düzenekte meydana gelebilecek sorunları deneye yansıtmamak amacıyla temin edilen göstergeli komparatörler de düzeneğe yerleştirilen LVDT'ye simetrik olarak yerleştirilmiştir.

3.3. Uygun Numune Seçimi ve Kontrol Deneyleri

PİK'ler için literatürde en yaygın yapılan laboratuvar çalışması çekme deneyidir. Çekme deneyi numunelerinin hazırlanmasında araştırmacılar ASTM D-638 standardına sadık kalarak numune hazırlamaktadır. Mevcut standartta iki farklı numune geometrisi ve iki farklı numune hazırlama tekniği önerilmiştir. Sünme deneylerinde de aynı numune tipi kullanıldığından deneylere başlamadan önce gelecek araştırmacılara kaynak olması ve optimum numune hazırlama tekniğinin bulunması adına numune seçimi bölümünde 48 çekme deneyi yapılmıştır.

İlgili standartta yer alan ve daha önceki çalışmalarda kullanılan 2 farklı numune tipi Şekil 3. 4'de sunulmuştur. Sünme deneyleri için yalnızca TİP-I numune önerilmesine karşın gelecekte bu alanda araştırma yapacaklara fikir vermesi adına TİP-IV için de numune seti hazırlanmıştır.



Şekil 3. 4. TİP I ve TİP IV numune geometrileri (mm)

Numune geometrisine ek olarak 2 farklı numune hazırlama tekniği de ilgili standartta ve daha önceki çalışmalarda yer almaktadır. Kalıba dökme tekniğinde hazırlanan karışım numune

geometrisi şeklinde hazırlanmış kalıplara dökülmekte, kalıplar titreştirilerek içerisindeki boşlukların kaybolması sağlanmakta ve sonrasında kür alması için önceden hazırlanmış ortamda beklemeye alınmaktadır. Kesme aparatı kullanma tekniğinde ise karışım 5mm kalınlığında çerçeveye sahip pleksiglas levhaya dökülmekte, ıspatula yardımıyla homojen olarak dağıtılmakta, döküm işlemi sonrasında levha titreştirilerek içerisinde kalan boşlukların yüzeye çıkartarak malzemenin homojen olması sağlanmakta, sonrasında kür alması için önceden hazırlanmış ortamda beklemeye alınmaktadır. Numunenin hazırlanması işleminde kesme aparatı kullanarak numune hemen deney öncesinde hazırlanmaktadır. Proje kapsamında temin edilen kesme aparatları ve kesme aparatı kullanılarak numune hazırlanması Şekil 3. 5'de sunulmuştur.



Şekil 3. 5. Kalıp, kesme aparatları ve numune hazırlanışı

Bu bölümde yapılan çekme deneylerinde 4 farklı kombinasyonda PİK numuneleri hazırlanmıştır. Her kombinasyon için en az 12 geçerli deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının sunumunda her set için kısaltmalar kullanılmıştır. İlgili kısaltmalar şu şekildedir;

- TİP-I geometri ve döküm tekniği ile hazırlanmış numuneler: T-I-M
- TİP-I geometri ve kesme aparatı tekniği ile hazırlanmış numuneler: T-I-D
- TİP-IV geometri ve döküm tekniği ile hazırlanmış numuneler: T-IV-M
- TİP IV geometri ve kesme aparatı tekniği ile hazırlanmış numuneler: T-IV-D

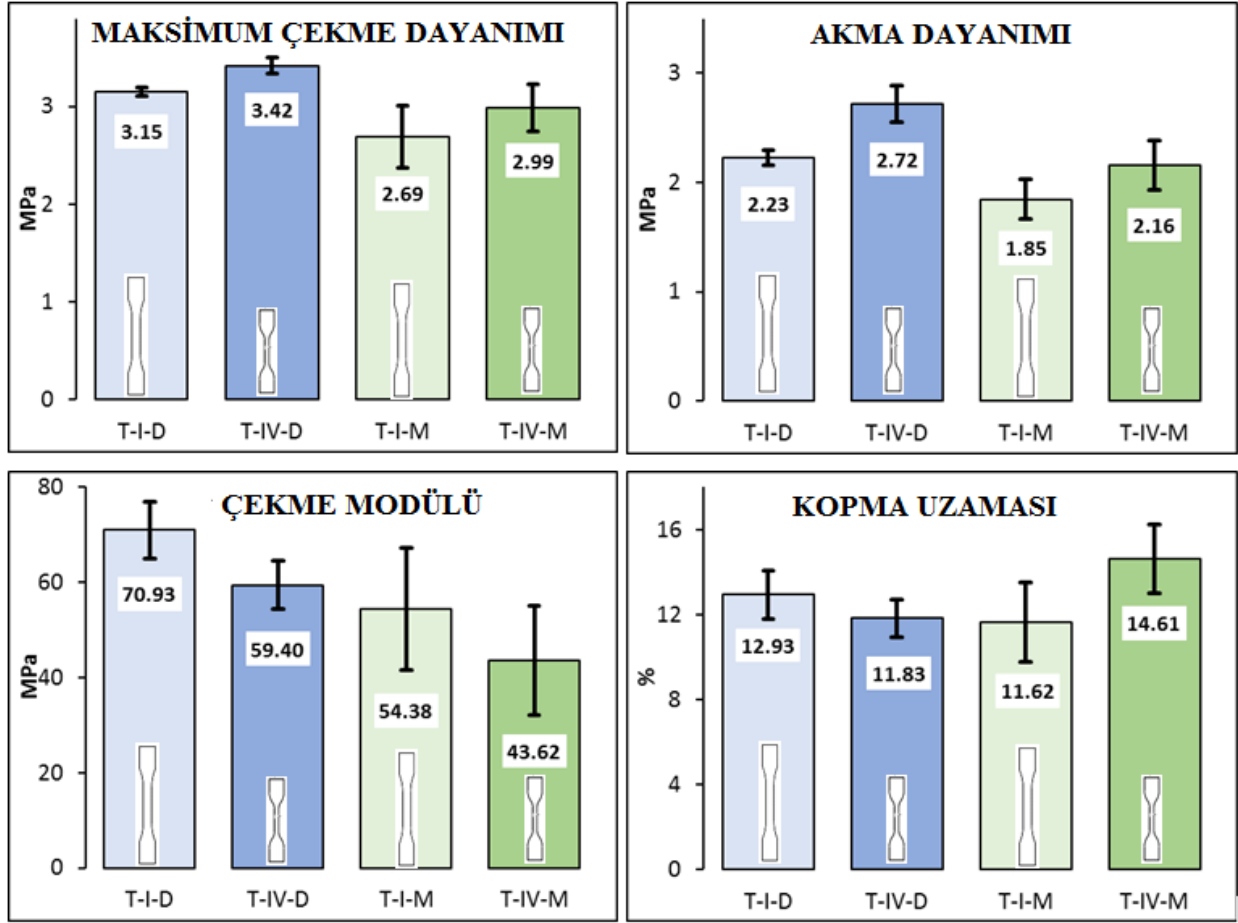
PİK-1'in temin işlemi daha önce yapıldığı için uygun numune hazırlama çalışmalarında PİK-1 kullanılmıştır. PİK karışımı hazırlama sürecinde üreticinin ve daha önceki tecrübelerin ışığında kütlice 2:1 oranında sıvı-katı karışımı 6 dakika süresince dakikada 120 devire sahip mikser ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım numune kalıplarına ve 5 mm kalınlığındaki levhaya dökülmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda numuneler hazırlanmış ve çekme deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri EK-1'de sunulmuştur.

Yapılan deneylerde 4 farklı mekanik malzeme özelliği parametreleri bulunmuş ve deney setleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu parametreler;

- Maksimum çekme dayanımı (σ_t), MPa
- Akma dayanımı (σ_t), MPa
- Çekme modülü (E_t), MPa
- Kopma uzaması, %'dir.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi için 48 gerilim-gerinim grafiği oluşturulmuştur. Elde edilen grafikleri temsilen her sete ait birer gerilim-gerinim eğrisi EK-1'de sunulmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen tüm değerler EK-1'de, sonuçların daha iyi anlaşılması için elde edilen parametreler çubuk grafik şeklinde şekil 3. 6'da sunulmuştur. Grafiklerdeki hata çubukları tekrar eden deneyler arasındaki standart sapma değerlerini göstermektedir.

Kesme aparatıyla hazırlanan numunelerin çekme dayanımları, modül değerleri daha yüksek olmakla birlikte daha düşük standart sapma değerlerine sahiptir. Başka bir deyişle kesme aparatıyla hazırlanan numunelerde yapılan deney tekrarlarında birbirine son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir. Kalıba dökme tekniğinde görece daha zayıf sonuçlar alınmasının sebebi olarak kalıpların keskin köşelerinin olması ve kalıpların gauge kısımlarına karışımın dökülmesi sırasında gözle görülen boşlukların kalmasının olduğu düşünölmektedir. Öte yandan kesme aparatıyla hazırlanan numunelerde karışım son derece geniş bir plakaya dököldüğu için son derece az hava kabarcıkları gözlemlenmiştir. Bu gözlem deney sonuçlarıyla da teyit edilmiştir. Ayrıca geniş plakaya dökölen PİK'in istenen bölgesinden numune alınabilmesine olanak verdiği için numune hazırlanırken kesme aparatının kullanılmasının kesinlikle daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. 6. 4 Deney setine ait sonuçlar (hata çubukları standart sapmaları göstermektedir)

Buna ek olarak TİP-IV geometrisinde hazırlanan numunelerde TİP-I geometrisine göre daha yüksek dayanım-modül ve daha düşük standart sapma değerlerine sahiptir. TİP-IV'e ait gauge kesitinin boyutlarının daha küçük olması sebebiyle toprak veya hava kabarcıklarının numunenin en ince kısmı olan bu kesitte bulunma olasılığının daha düşük olması sebebiyle daha yüksek sonuçların elde edildiği düşünülmektedir.

Bu başlıkta sunulan numune geometrisi ve hazırlama tekniği çalışmasında çekme deneyleri için kesme aparatıyla hazırlanmış TİP-IV numunelerin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme sünme deneylerinde ise TİP-IV numune geometrisi önerilmediğinden kesme aparatıyla hazırlanan TİP-I geometrisine sahip numunelerin daha doğru bir tercih olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle laboratuvar çalışmalarında TİP-I geometrisinin kullanılması ve numunelerin kesme aparatıyla hazırlanmasına karar verilmiştir.

Numune hazırlama sürecine karar verildikten sonra sünme deney düzeneğinin doğru bir biçimde çalıştığından emin olmak adına kontrol deneyleri yapılmıştır. Kontrol deneyi süresince veri toplama sistemi, klima, güç kaynağı, kameralar, LVDT ve komparatörlerin sorunsuz çalıştığı gözlemlenmiştir. Proje başvurusunda da belirtildiği gibi PİK-1'in 7 gün sonundaki dayanım değerleri kullanılarak bu dayanımın %80, %60, %40 ve %20'sine tekabül eden sabit yükler hesaplanarak %1'lik farkı geçmeyecek şekilde yükler deney düzeneklerine tutturulmuştur. Bu kontrol deneyinde dayanımın %80, %60 ve %40'ına sahip deneyler 3 haftayı bulmadan sonuçlanmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3. 7'de sunulmuştur.



Şekil 3. 7. Sünme deney düzeneğinin genel görünümü

Proje başvurusu ve ilk ara raporda da belirtildiği gibi kadranlı göstergeler, uzun süreli elektrik kesintisi veya düzenekle meydana gelebilecek planlanmamış duraksamalarda ölçüm almaya devam edebilmek için Şekil 3. 7'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Ayrıca LVDT'nin okuduğu değerlerin kontrol edilmesi işleminde de kadranlı göstergeler kullanılmıştır.

Deney sırasında numunenin kısıkaçlardan kayması durumu oluşması muhtemel sorunlardan birisi olarak öngörülmektedir. Bu tehlikeyi engellemek için kısıkaçlara numune konumuna dik olarak çentikler açılmıştır. Numunelerin deney öncesi kısıkaçlara tutturulduğu noktalar işaretlenmiş, deney sonrası konumlarında değişim olup olmadığı kontrol edilmiş, numunenin kaymasının tamamen engellediği görülmüştür.

PİK-1 için yapılan sünme kontrol deneylerinin sonunda önemli bulgular elde edilmiştir. Proje ekibi yalnızca 7 gün kürlenen numuneler ile deney yapılmasının yetersiz olabileceği kanaatine

varmıştır. 2 Farklı PİK ürünü için 5000'er saat olarak planlanan deney süresinin uzun olduğu, deneylerin büyük kısmının çok daha erken sonlanacağı anlaşıldığından iş-zaman çizelgesinde belirtilen zaman aralığında PİK-1 ve PİK-2 için yapılacak deneylerin farklı kür süreleri için tekrarlanmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda en az 3 farklı kür süresi için (1, 7 ve 14 gün) deneylerin yapılması planlanarak proje başvuru aşamasında sunulan iş-zaman çizelgesinin dışına çıkmadan daha fazla deney sonucu ile projenin sunulmasının bilimsek olarak daha faydalı bir çalışma olacağına karar verilmiştir.

3.4. Laboratuvar ölçekli PİK hazırlama kılavuzu

PİK-1 ve PİK-2 için yapılan tüm deneylerde karışım oranı, karıştırma süresi, karıştırma hızı, ortam koşulları gibi parametreler sabit tutulmuştur. Ara raporların değerlendirmesini yapan hakemlerin önerisi uyarınca laboratuvar ortamında PİK'lerin hazırlanmasına ilişkin detaylı bir prosedür sunulması kararlaştırılmıştır.

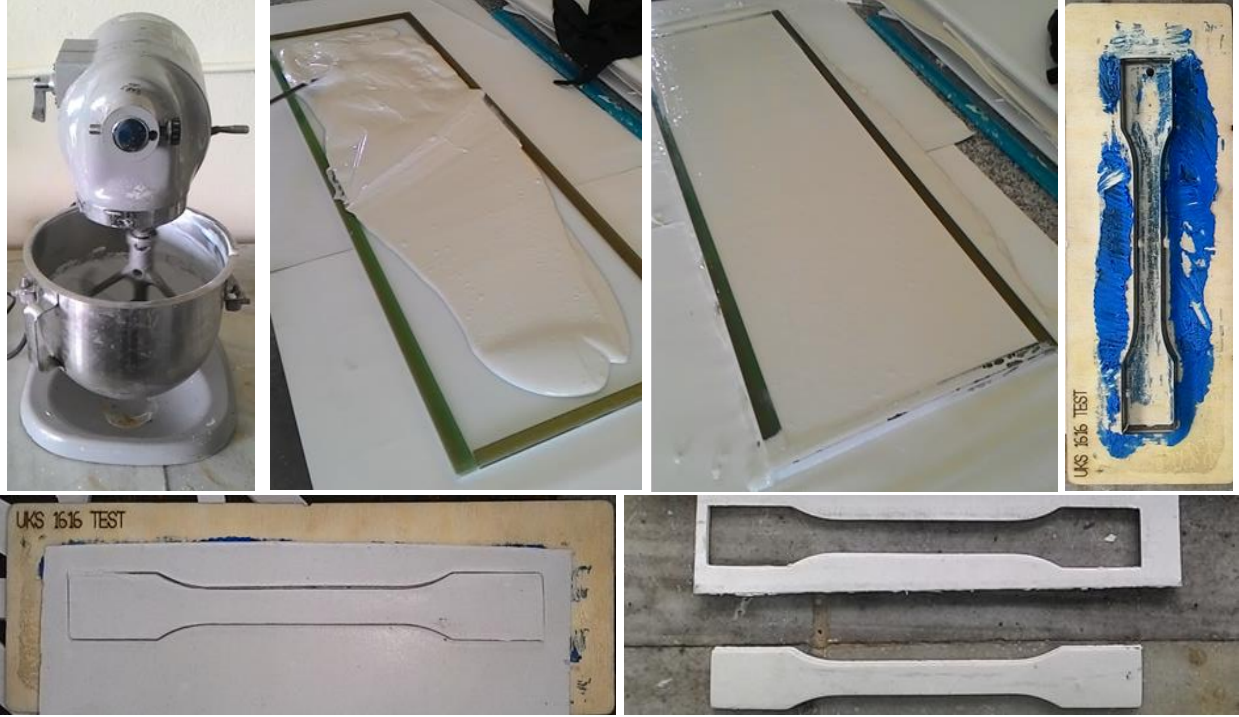
Öncelikli olarak deneylerde kullanılacak PİK'lerin raf ömürleri kısıtlı olduğundan raf ömrüne ve saklama koşullarına uyulması büyük önem arz etmektedir. Uygun koşullarda saklanmayan veya raf ömrünü aşan PİK'ler numune hazırlama sürecinde kolaylıkla anlaşılmaktadır. Bu tip ürünler karıştırma işlemi sırasında ani topaklar oluşmasına yol açmaktadır. PİK'lerin ortalama raf ömrü 12 ay olmakla birlikte ortalama 15-20 kg olarak satılan paketler açıldıktan hemen sonra hava almayacak biçimde kapatılmaz ve oda sıcaklığında saklanmaz ise 15 gün gibi kısa bir süre içerisinde bozulmaya başladıkları (toz bileşenlerin nem aldığı, sıvı bileşenlerin katılaştığı) tespit edilmiştir.

PİK'lerin toz bileşenlerinin parçacık boyutlarının mikron düzeyinde olması sebebiyle karışım hazırlama sürecinde mutlaka maske ve eldiven kullanılması buna ek olarak ürünü kullanmadan önce mutlaka güvenlik bilgi formunun okunması gerekmektedir.

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 kalma şartı ile) uygulanmıştır. Karışım oranındaki %10'luk hata veya değişimin mekanik malzeme özelliklerinde %40'lara varan etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, hazırlanan numunelerle yapılacak deney sonuçları birbiriyle karşılaştırılacaksa, karışım oranına kesinlikle sadık kalınmalı buna ek olarak karışım miktarları da sabit tutulmalıdır.

Daha önceki çalışmalarda araştırmacılar PİK'leri karıştırmak için farklı prosedürler izlemişlerdir. Proje ekibinin PİK alanında yaptığı daha önceki çalışmalarda karıştırıcının özelliklerinin de son derece önemli olduğu vurgulanmıştır. El mikseri ile karıştırma işleminin yapılması kesinlikle önerilmemektedir. Toz ve sıvı bileşenler eklendikten sonra bazı PİK ürünleri (PİK-2) 5 dakika gibi kısa bir süre içinde katılaşmaya başlamaktadır. Bu kısa süre zarfında karışımın homojen bir biçimde hazırlanması gerekmektedir. Mikserin karıştırma paletinin, karıştırma kabının tüm yüzey alanını eşit biçimde tarayarak karıştırma işlemini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle farklı hız ayarlarına sahip laboratuvar ölçekli çimento mikseri karıştırma işlemi için en uygun ekipman olarak tavsiye edilmektedir.

Proje ekibinin önceki bilgileri ve bu çalışmada edindiği tecrübeler ışığında karıştırma işleminin PİK ürününden bağımsız olarak 6 dakikayı aşmaması gerektiği saptanmıştır. Bu süreç içerisinde öncelikli olarak daha yavaş devirde (60-70 devir/dakika) 3 dakika karışım yapılması, sonrasında karıştırma kabının iç yüzeyine yapışan taze karışımın ıspatula yardımıyla karışıma dahil edilmesi ve son aşamada yüksek devirde (120-130 devir/dakika) 3 dakikayı aşmayacak şekilde karıştırılarak nihai PİK karışımının hazırlanması önerilmektedir. Önerilen değerin üzerindeki karışım hızları PİK'lerde baloncuk oluşmasına sebep olmakta ve kalıba döküm aşamasında bu hava boşluklarının karışımdan atılmasının çok mümkün olmadığı saptanmıştır. Buna ek olarak 60 devir/dakikadan daha düşük hızlarda PİK'lerin toz karışımlarının topaklandiği gözlemlenmiştir. Proje kapsamında numune hazırlama sürecine ait (karıştırma, plakaya döküm, kesme aparatıyla numune hazırlama) görseller Şekil 3. 8'de sunulmuştur.



Şekil 3. 8. PİK'in karıştırılması, plakaya dökülmesi ve kesme aparatıyla numune hazırlanışı

PİK'lerin karışım işlemi sonrasında kalıba-plakaya dökme işlemi vakit kaybetmeden yapılmalıdır. Bilindiği üzere yüksek yapışma mukavemeti PİK'lerin önemli özelliklerinin başında gelmektedir. Kalıp veya plakanın kesinlikle alüminyum, çelik, cam, kaya gibi malzemelerden olmaması gerekmektedir. Tercihen esnek pleksiglas kullanılması önerilmektedir. Taze karışımın döküleceği pleksiglastan yapılan kalıp veya plakanın PİK ile etkileşimi düşük olmasına rağmen (ürünlere göre değişkenlik göstermekte) PİK'in kürlenme süresinde kalıba yapışması olasılığının engellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle kalıp ayırıcı sprej, mineral yağı, vazelin gibi yüzey kayganlaştırıcı özelliği olan bir malzemeyi (özellikle kalıba dökme yöntemini kullanacakların) keskin köşelere çok ince bir tabaka şeklinde uygulamaları önerilmektedir.

Kalıba döküm işleminin yapılacağı ortamın sıcaklık ve nem değerlerinin laboratuvar koşullarında olması tavsiye edilmektedir. Plakaya döküm işleminde hedeflenen numune kalınlığından 1-2 mm daha kalın çerçeveye sahip plakalar kullanılması tavsiye edilmektedir. Plakaya döküm işleminde karışımı yaymak ve karışım kalınlığını sabit tutmak için kullanılacak geniş spatulanın tek doğrultuda kullanılması önerilmektedir.

Yapılan kaynak taraması ve projede görev alan ekibin tecrübeleri ışığında kalıba döküm tekniği ile hazırlanan içeriğinde su olan numunelerin kürlenme süresinde boyutlarında azalma gözlemlenmiştir. Buharlaşıma 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 deneylerde elde edilen sonuçlarda büyük standart sapma değerleri görülmüştür. Kalıba döküm tekniğinden vazgeçilmesinin önemli bir sebebi de bu büzüşme problemdir. PİK-2 su bazlı olduğundan, kalıba dökme tekniği ile hazırlanan kontrol numunelerinde büzüşme ve bükülme problemleriyle karşılaşmıştır. Şekil 3. 9'da tipik standart (üst) ve büzüşmüş (alt) test numuneleri sunulmuştur.



Şekil 3. 9. Standart ve büzüşmüş pik test numuneleri (Guner, 2014)

Numune kalınlığı, PİK'lerin arazideki uygulama kalınlıkları göz önüne alınarak belirlenmektedir. PİK'lerin arazide genel uygulama kalınlığı 3-5 mm olduğundan araştırmacılar genelde 3-5 mm arasındaki kalınlıklarda numunelerini hazırlamışlardır. Benzer olarak bu çalışmada da 4 mm kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Kontrol deneylerinde farklı kalınlıkta numunelerle de deneyler yapılmış olup, ince numunelerin görece daha yüksek dayanım değerlerine ulaştıkları tespit edilmiştir. Buna ek olarak hazırlanan numunelerin kalınlığının sabit olması da önemli bir parametredir. Numuneler sabit kalınlıkta hazırlanmalı, özellikle numunenin en ince kısmı olan gauge bölgesinin sabit kalınlıkta olduğu deney öncesi kontrol edilmelidir.

3.5. PİK 1 İçin Yapılan Laboratuvar Deneyleri

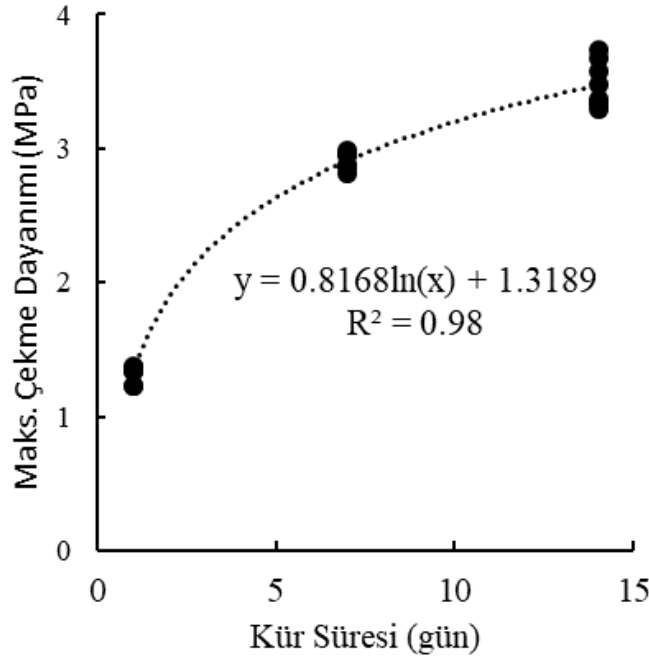
Bu başlıkta PİK-1 için gerçekleştirilen 1, 7, 14 ve 500 gün kür süresine sahip çekme ve sünme deneyleri yer almaktadır. Projenin hiçbir aşamasında 500 gün deneylerinin yapılacağına dair bilgi verilmemesine karşın tüm laboratuvar deneyleri tamamlandıktan sonra PİK-1 ürününün 1 yılı aşkın süre sonunda sünme davranışının incelenmesi ve bu çalışmanın çıktılarının uluslararası bir konferansta sunulmasına karar verilmiştir. 500 gün deney sonuçları farklı bir başlık altında değerlendirilecektir.

3.5.1. PİK-1'e Ait Çekme Deneyleri

Proje başvuru sürecinde sünme deneyleri uygulama yüklerinin belirlenmesi için çekme numunelerinin hazırlanması ve deneylerin yapılması işlemlerinin farklı zaman dilimlerinde belirtilmesine rağmen, aynı karışım sonucunda hazırlanan, aynı kür ortamında ve aynı süre diliminde bırakılan numuneyi tekrar hazırlamanın deney sonucuna etki edebileceği proje ekibince öngörülmüştür. Bu nedenle yüklerin belirlenmesi için yapılan çekme deneyleri ve sünme deneylerinin başlatılması işlemi aynı gün içerisinde alınmıştır. Hazırlanan numuneler içerisinde her kür süresi için öncelikli olarak seçilen en az 6 numune ile çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri yapılan PİK-1 numuneler EK-2-A'da sunulmuştur.

Yapılan çekme deneyleri sonucunda her numuneden elde edilen yenilme yükü ve hesaplanan maksimum çekme dayanımı değerleri standart sapma değerleriyle birlikte EK-2-A'da sunulmuştur.

PİK'lerin literatürde bulunan çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi logaritmik fonksiyonlarla tanımlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen maksimum çekme dayanımı değerlerinin kür süresiyle ilişkilerinin kaynak taramasındaki çalışmalarla uyumluluk göstermiştir. Şekil 3. 10'da görüldüğü üzere çekme dayanımı parametresi kür süresiyle keskin olarak değişmektedir, bu değişimi en iyi tanımlayan fonksiyon ise logaritmik fonksiyondur. Bu noktada sünme deneylerinin farklı kür süreleri için gerçekleştirilmesi kararının isabetli olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 10. PİK-1'e ait maksimum çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi

Çizelge 2’de de sunulduğu üzere PİK-1’e ait 1, 7 ve 14 gün kür süresine sahip numuneler yaklaşık olarak sırasıyla 70, 161 ve 186 N ortalama yüklerinde yenilmişlerdir. Sünme deneylerinde kullanılacak sabit yüklerin belirlenmesinde bu değerler dikkate alınmıştır.

3.5.2. PİK-1’e Ait Sünme Deneyleri

Deney düzeneğinin kurulumu aşamasında da bahsedildiği gibi sünme deney düzeneği aynı anda 8 deneyi gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Sünme deneylerinde ASTM 2990 standardı takip edilmiştir. Bu standarda göre her yük seviyesi için en az 2 deney tekrarı önerildiğinden her kür süresi için 4 farklı yük seviyesinde 8’er deney yapılmıştır. Sünme deney düzeneğine bağlanan sabit ağırlık seviyeleri EK-2-B’de sunulmuştur. Numunenin maruz bırakılacağı sabit yük hesap edilirken numunenin alt kısmını tutan kısaçlar ve diğer tüm aparatlar da hesaba katılmıştır.

PİK-1’e ait sünme deneyleri her kür süresi için 1000 saat olacak şekilde tasarlanmıştır. PİK-1 için toplam deney süresi yaklaşık olarak 6 ay’dır. Gerçekleştirilen 24 Sünme deneyinin 22’si planlanan süre dahilinde tamamlanmıştır. Sadece 1 gün kür süresinde %20 gerilim (0,26 MPa) altında yapılan deneylerde kopma gözlemlenememiştir. Bu yük seviyesinde numunelerin son 30 günde aldıkları deplasman değeri ortama 0.3 mm’dir. Bu değer 7 gün kür süresi için yapılan aynı gerilim yüzdesine ait deneylerde yaklaşık olarak 2 mm’dir. Tahminlerimize göre PİK-1’e ait, 1 gün kürlenmiş ve %20 gerilim altında yapılan sünme deneylerinin tamamlanma süresi yaklaşık olarak 8-10 aydır. Projede planlanan deney takvimine sadık kalmak adına bu deneyler 60 gün sonunda sonlandırılmıştır. Sünme deneyi öncesi ve sonrasına ait numune fotoğrafları EK-2-B’de sunulmuştur.

PİK-1 için yapılan sünme deneyleri sonunda sünme gerinimi-zaman ve sünme uyumluluğu-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Sünme uyumluluğu parametresi vizko-elastik davranış gösteren polimerler için sıklıkla kullanılan malzeme özelliği parametresidir. Numuneye uygulanan yüke bağlı olarak numunelerin kopma süreleri birkaç dakika ile 2 ay arasında değişmektedir. Bu nedenle deneyin ilk 100 dakikasına ait grafik ve 2 aylık deney süresine ait grafik (logaritmik) ayrı ayrı sunulmuştur. **Error! Reference source not found.**’de gerinim-zaman grafikleri,

’da ise sünme uyumluluğu-zaman grafikleri sunulmuştur. Ayrıca deneylerde elde edilen ham grafikler EK-2-B’de sunulmuştur.

Şekil 18’e göre PİK-1, çekme dayanımının %80 ine tekabül eden gerilimde 1-gün kür süresinde %50’den fazla gerinim değerlerine ulaşabilirken, kopma 100 dakika içerisinde gerçekleşmiştir. Öte yandan aynı kür süresinde çekme dayanımının %20 ine tekabül eden gerilim altında PİK ürünü 2

aylık deney süresi boyunca kopmamıştır. Uzama kabiliyetinin kür süresiyle ters orantılı olarak değişim gösterdiği açık şekilde görülmektedir. 7-gün kür süresine sahip çekme dayanımının %80 ine tekabül eden gerilim değerinde numuneler 12 dakika içerisinde kopmuştur. Beklendiği gibi numunenin maruz bırakıldığı sabit yük değerleri azaldıkça kopma sürelerinde artış gözlemlenmiştir.

Deney sonuçlarına ait değerlendirmelere ve detaylı analizlere bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

3.5.3. PİK-1' e Ait 500 Gün deneyleri

Raporun önceki kısımlarında da bahsedildiği üzere PİK-1 ürünü için 500 gün kür süresi almış numunelerde sünme deneyleri yapılması kararlaştırılmıştır. PİK-2 ürünü için bu tip bir deney yapılmadığından 500 gün deneylerinin ayrı bir başlıkta sunulması uygun görülmüştür. Sünme deneylerinden hemen önce yapılan direk çekme deneyleri sonunda maksimum çekme dayanımı 3.7 MPa olarak bulunmuştur. Sünme deneylerinde sırasıyla 2.96, 2.22, 1.48, ve 0.74MPa gerilim değerleri numunelere uygulanmıştır. Çekme ve sünme deney numunelerinin fotoğrafları EK-2-A ve EK-2-B'de sunulmuştur.

PİK-1'e ait diğer kür süreleri için yapılan deneylerde de olduğu gibi sünme gerinimi-zaman ve sünme uyumluluğu-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Numuneye uygulanan yüke bağlı olarak numunelerin kopma süreleri 2 dakika ile 7 gün arasında değişmektedir. Bu nedenle deneyin ilk 100 dakikasına ait grafik ve 2 aylık deney süresine ait grafik (logaritmik) ayrı ayrı EK-2-B'de sunulmuştur. Ayrıca deneylerde elde edilen ham grafikler EK-2-B'de sunulmuştur. sunulmuştur.

500-gün deney sonuçlarına göre PİK-1 ürününün farklı yük seviyelerinde önceki deneylere benzer davranış gösterdiği ortaya çıkmıştır. Kopma anında numunelerin ulaştığı toplam gerinim değerlerinin 14 gün deneylerinden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Buna ek olarak numuneler 14 gün deneylerine göre daha kısa sürede yenilmiştir. Deney sonuçlarının analizine sonraki bölümde yer verilmiştir.

3.6. PİK-2 İçin Yapılan Laboratuvar Deneyleri

PİK-2 için gerçekleştirilen 2, 7, ve 14 gün kür süresine sahip çekme ve sünme deneylerine bu başlıkta yer verilmiştir. Gerçekleştirilen kontrol deneylerinde PİK-2'nin 1 gün kür süresi sonunda boyca %400 uzamasına rağmen kopmadığı görülmüştür. Yaklaşık 1 MPa gerilme değerine ulaşan numune direk çekme ve sünme deney düzeneği limitlerini aştığından, PİK-2 için 1 gün kür süresi yerine 2 gün kür süresi deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir. Şekil 3. 11'de görüldüğü üzere numune boyunun yaklaşık 4 katına ulaşmasına rağmen akma davranışını sürdürmüş,

kopmamıştır. Deney bitirildikten sonra numune elastik deformasyonu dolayısıyla kısmen eski haline dönmesine rağmen deney öncesi boyunun yaklaşık 2 katında sabit kalmıştır. Deney düzeneği en fazla %100 gerinim miktarını ölçebilecek şekilde tasarlandığından (LVDT kapasitesi, Masa yüksekliği) 1 gün kür süresi için sünme deneyleri gerçekleştirilememiştir.



Şekil 3. 11. PİK-2 için yapılan 1-gün kontrol deneyi

PİK'lerin malzeme özelliklerinin kür süresine bağlı olarak ilk birkaç günde daha keskin bir değişim gösterdiği bilindiğinden, 1. deney setinin 2-gün kür süresine sahip numuneler için yapılmasına karar verilmiştir.

3.6.1. PİK-2'ye Ait Çekme Deneyleri

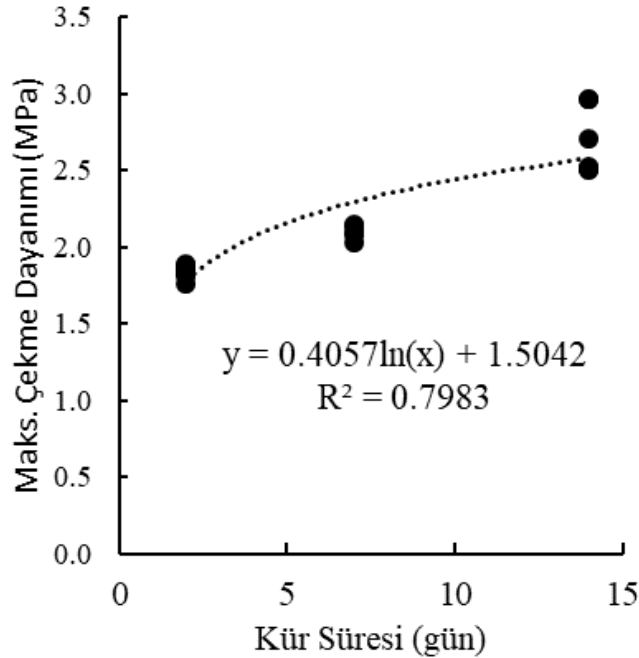
PİK-2 ürününden hazırlanan numuneler içerisinde her kür süresi için öncelikli olarak seçilen en az 5 numune ile standartlara uygun bir biçimde oda sıcaklığında çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylere ilişkin sonuçlar bu başlıkta sunulmuştur Çekme deneyleri yapılan PİK-2 numuneleri Ek'te sunulmuştur.

Yapılan çekme deneyleri sonucunda her numuneden elde edilen yenilme yükü ve hesaplanan maksimum çekme dayanımı değerleri standart sapma değerleriyle birlikte Ek'te sunulmuştur.

2-gün için yapılan çekme deneylerinde numunenin ortalama 1.84 MPa çekme dayanımına ulaştığı, ve bu değer kür süresi arttıkça artış gösterdiği görülmüştür. 14-gün sonunda yapılan

deneylerde çekme dayanımı değeri 2.67 MPa değerlerine ulaşabilmiştir. PİK-2 ürününün çekme dayanımının ve uzama kapasitesinin PİK-1'e göre daha düşük olduğu ortaya çıkmıştır. PİK-1'de olduğu gibi bu çalışmada da elde edilen maksimum çekme dayanımı değerlerinin kür süresiyle ilişkilerinin kaynak taramasındaki çalışmalarla uyumluluk göstermiştir. Şekil 3. 12'de de görüldüğü üzere çekme dayanımı parametresi kür süresi ne bağlı olarak değişmektedir. Mevcut değişim PİK-1 ürününe göre daha hafif olmakla beraber, bu değişimi en iyi tanımlayan fonksiyon logaritmik fonksiyondur.

EK-3-A'da da sunulduğu üzere PİK-2'ye ait 2, 7 ve 14 gün kür süresine sahip numuneler yaklaşık olarak sırasıyla 93, 107 ve 137 N ortalama yüklerinde yenilmişlerdir. PİK-2'nin sünme deneylerinde kullanılacak sabit yüklerin belirlenmesinde bu değerler dikkate alınmıştır.



Şekil 3. 12. PİK-2'ye ait maksimum çekme dayanımı-kür süresi ilişkisi

3.6.2. PİK-2'ye Ait Sünme Deneyleri

Çekme deney sonuçlarında elde edilen maksimum çekme dayanımlarının sırasıyla %80, %60, %40 ve %20'si olacak şekilde sünme deneylerinde uygulanacak yükler hesap edilmiştir. PİK-1 için olduğu gibi bu üründe de her kür süresi için 8 sünme deneyi gerçekleştirilmiştir. Sünme deney düzeneğine bağlanan sabit ağırlık seviyeleri EK-3-B'de sunulmuştur. Numunenin maruz bırakılacağı sabit yük hesap edilirken numunenin alt kısmını tutan kısaçklar ve diğer tüm aparatlar da hesaba katılmıştır.

PİK-2'ye ait sünme deneyleri her kür süresi için 1000 saati aşmayacak şekilde tasarlanmış, toplamda PİK-2 deney süresi yaklaşık olarak 6 ay olarak öngörülmüştür. Gerçekleştirilen 24 Sünme deneyinin 18'i planlanan süre dahilinde tamamlanmıştır. Sadece %20 gerilim altında yapılan tüm kür sürelerine ait deneylerde kopma gözlemlenememiştir. Bu yük seviyesinde numunelerin son 30 günde aldıkları deplasman değişimleri ihmal edilecek düzeydedir. Projede planlanan deney takvimine sadık kalmak adına bu deneyler 60 gün sonunda sonlandırılmıştır. Sünme deneyi öncesi ve sonrasına ait numune görselleri EK-3-B'de sunulmuştur. PİK-2 için yapılan sünme deneyleri sonunda sünme gerinimi-zaman ve sünme uyumluluğu-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Numuneye uygulanan yüke bağlı olarak numunelerin kopma süreleri birkaç dakika ile 2 ay arasında değişmektedir. Bu nedenle deneyin ilk 100 dakikasına ait grafik ve 2 aylık deney süresine ait grafik (logaritmik) ayrı ayrı sunulmuştur. **Error! Reference source not found.** gerinim-zaman grafikleri, sünme uyumluluğu-zaman grafikleri ve deneylerde elde edilen ham grafikler sunulmuştur.

Gerinim-zaman grafiklerine göre PİK-2, çekme dayanımının %80 ine tekabül eden gerilimde 1-gün kür süresinde %20 civarında gerinim değerlerine ulaşabilirken, kopma yalnızca 3 dakika içerisinde gerçekleşmiştir. Öte yandan tüm kür sürelerinde çekme dayanımının %20 ine tekabül eden gerilim altında PİK ürünü 2 aylık deney süresi boyunca kopmamıştır. Uzama kabiliyetinin kür süresiyle ters orantılı olarak değişim gösterdiği açık şekilde görülmektedir. 7-gün kür süresine sahip çekme dayanımının %80 ine tekabül eden gerilim değerinde numuneler 15 dakika içerisinde kopmuştur. Beklendiği gibi numunenin maruz bırakıldığı sabit yük değerleri azaldıkça kopma sürelerinde artış gözlemlenmiştir.

PİK-2 ürününün sünme deneyleri sırasında gerinim geri kazanım davranışı gözlemlenmiştir. Sabit yük altında gerinim bırakılan numunelerde kopma davranışının ilk 2000 dakika içerisinde gerçekleşmemesi durumunda numunenin gerinim değerinde hafif düşüş olmuştur. Gözlenen bu gerinim geri kazanım davranışına, mikro moleküler fazda malzemede bulunan polimer zincirlerin sabit yük altında hizalanmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçlarına ait değerlendirmelere ve detaylı analizlere bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

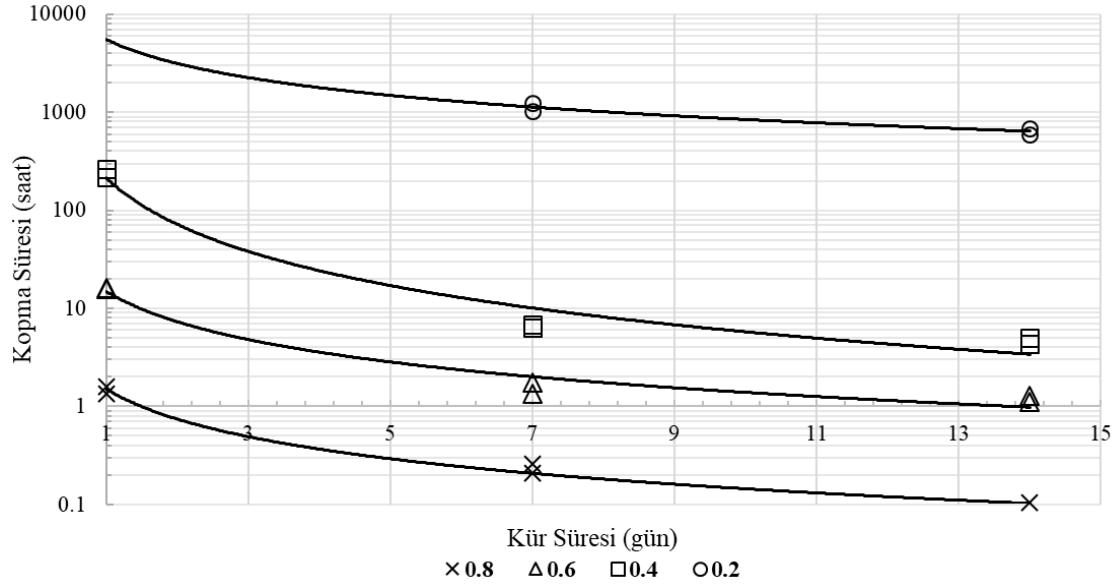
Bu bölümde proje kapsamında gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının değerlendirilmesi yer almaktadır. Öncelikli olarak yapılan PİK-1 ürününe ait 1, 7, ve 14 gün deneylerinde 24 numunenin 22'si belirlenen test süresinde (2 ay) kopma davranışı göstermiştir. Ürün çekme dayanımının % 40'ına tekabül eden yüklerde bile 10 günden kısa sürede kopmuştur. PİK-1'in sünme davranışına son derece yatkın olduğu sonucuna kolaylıkla varılabilmektedir. PİK-1'in mekanik malzeme özelliklerinde kür süresine bağlı olarak PİK-2'ye göre daha keskin değişime uğradığı, buna ek olarak daha yüksek çekme dayanımına ve uzama kapasitesine sahip olduğu sünme deneyleri öncesinde her kür süresi için yapılan çekme deneylerinde görülmüştür.

PİK-2 sünme deneylerinde dayanım değerinin %20'sine tekabül eden sünme deneylerinde kopma davranışı 2 aylık test süresinin uzatılmasına rağmen meydana gelmemiştir. Ayrıca 14 gün kür süresine sahip numunenin dayanım değerinin % 40'ına sahip yük altında yaklaşık 2 ay gergi altında kalabildiği görülmüştür. PİK-2 ürününün de sünme davranışına yatkın olduğu sonucuna varılmıştır.

Deney sonuçları değerlendirildiğinde PİK-2 ürününün görece daha düşük çekme ve uzama kapasitesi olmasına rağmen, PİK-1'e göre akma davranışına görece daha az duyarlı olduğu ve bu durumun arazi uygulamalarında, kama blokların gergi durumuna getirdiği kaplamalarda, PİK-2 ürününün daha verimli olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

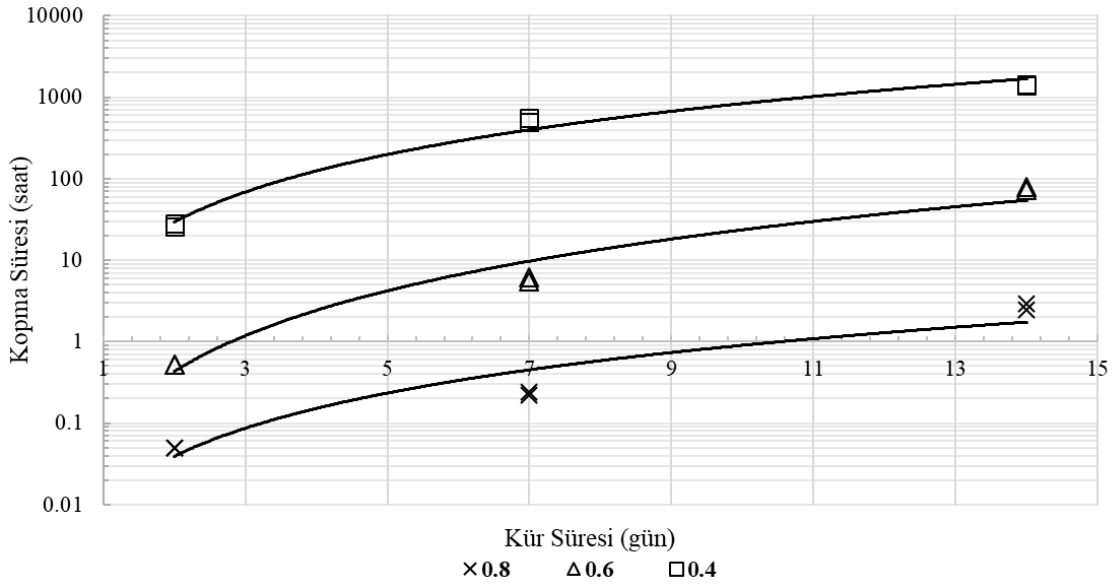
Sünme deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sünme kopma zarfları son derece büyük önem arz etmektedir. Bu zarflar ürünlerin uzun dönem performanslarının değerlendirilmesinde ve kullanım ömürlerinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle deney sonuçlarının değerlendirilmesinde öncelikle sünme kopma zarflarının sunulmasına karar verilmiştir.

Öncelikli olarak sunulan sünme kopma zarflarında PİK'lerin maruz kaldıkları gerilim değerlerinin, deneyin gerçekleştirildiği günkü çekme dayanımlarına oranları esas alınmıştır. Bu oranlar deneylerin başlatıldığı günkü çekme dayanımlarının sırasıyla %80, %60, %40 ve %20'sine tekabül etmektedir. Şekil 4. 1 ve Şekil 4. 2'de sırasıyla PİK-1 ve PİK-2 ürünü için oluşturulan farklı % gerinim değerlerine ait sünme kopma zarfları sunulmuştur.



Şekil 4. 1. PİK-1'e ait gerinim oranı esaslı sünme kopma zarfları

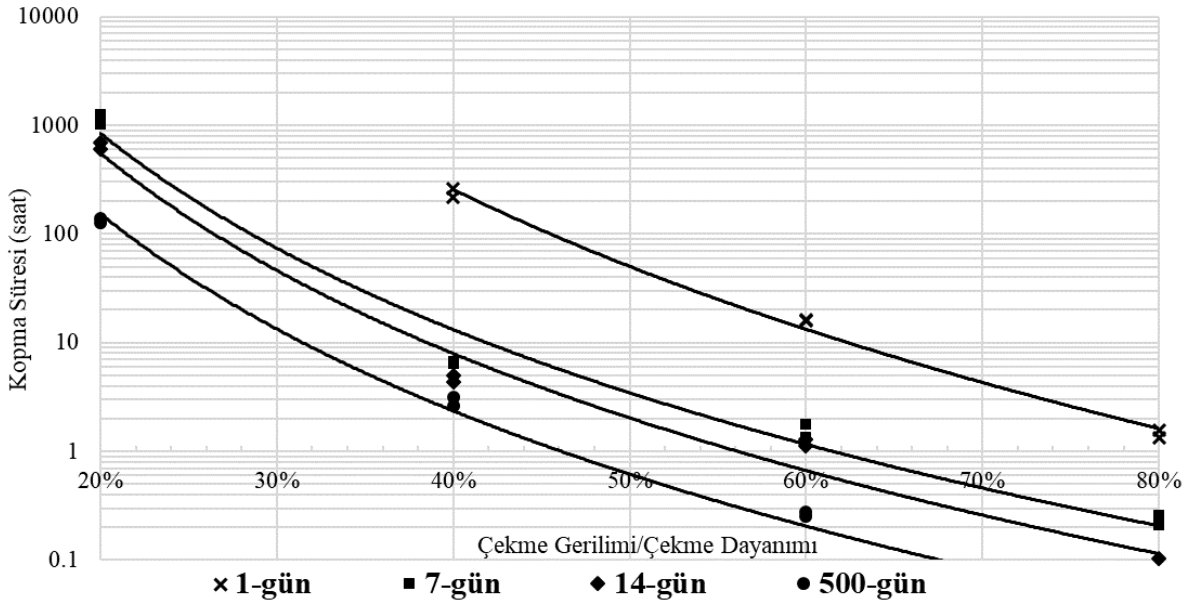
Şekil 26'ya göre PİK-1 için sunulan zarflarda gerinim oranlarına bağlı olarak keskin değişimler gösterilmiştir. Kür süresi parametresi artış gösterdikçe ürünün beklenen kopma süresinde azalma olmaktadır. Buna ek olarak beklenildiği üzere gerinim oranı değerinin azalmasıyla birlikte kopma süresi değerlerinin de arttığı görülmektedir. Farklı gerinim oranı değerlerinde kür süresi ve kopma süresi arasındaki ilişkiyi en düzgün tanımlayan eşitlik üstel fonksiyon olmuştur. İlgili eşitlikler Çizelge 6'da sunulmuştur.



Şekil 4. 2. PİK-2'ye ait gerinim oranı esaslı sünme kopma zarfları

PİK-2 ürünü çekme dayanımının % 20'si altında yapılan deneylerin hiçbirinde kopmadığı için Şekil 27'de 3 farklı gerinim oranı için sünme kopma zarfı sunulabilmiştir. PİK-2 ürünüde PİK-1'e göre gözlemlenen en büyük fark kür süresi artışına bağlı olarak malzemenin kopma süresinin de artış göstermesidir. PİK-1 deneylerinde en erken kopma gözlemlenen ürün 14 gün kür süresine ve dayanım değerinin %80'i gerilime sahip numune olurken, PİK-2 deneylerinde en erken kopan ürün aynı gerinim yüzdesinde 2 gün kür süresine sahip numunede olmuştur. Gözlemlenen bu davranış PİK-2 ürününün kürlendikçe sünme duyarlılığının azaldığı şeklinde yorumlanmıştır. Sünme duyarlılığının azalmasının PİK'lerin arazi uygulamalarında avantaj olarak değerlendirileceği düşünülmektedir.

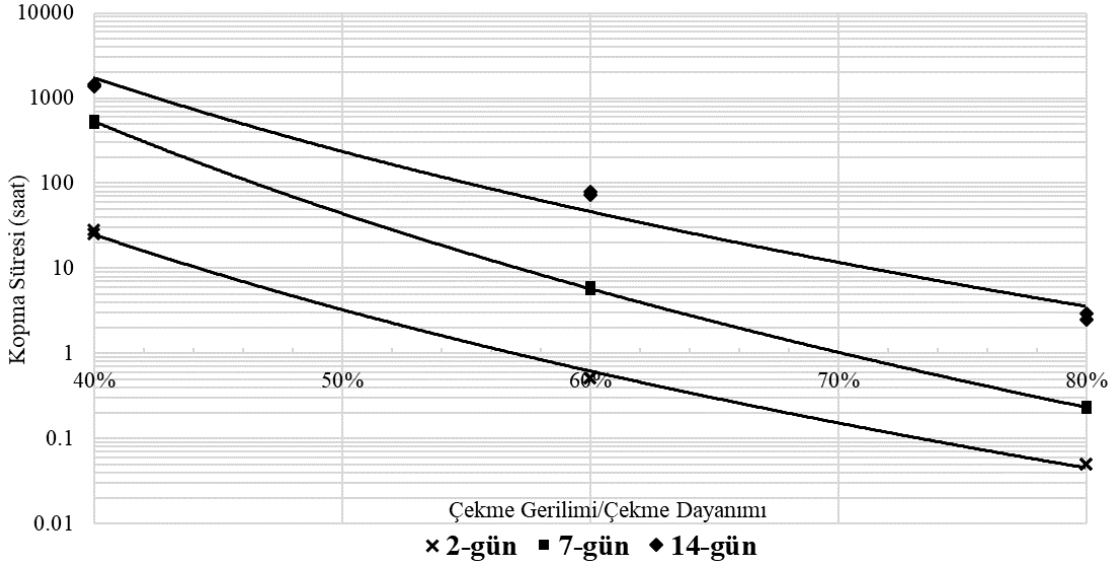
Deney sonuçlarının değerlendirmesinde bir diğer sünme kopma zarfı türü olarak kür süresi esaslı sünme zarfları sunulmuştur. Şekil 4. 3'de PİK-1 için oluşturulan kür süresi esaslı sünme kopma zarfları yer almaktadır. PİK-1 için sunulan kür süresi esaslı sünme kopma zarflarında beklentinin aksine kür süresindeki artışın kopma süresine olumsuz yönde etki ettiği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4. 3. PİK-1'e ait kür süresi esaslı sünme kopma zarfları

Çekme gerilimi/çekme dayanımı parametresinin aynı olduğu farklı kür sürelerinde aslında uygulanan çekme gerilimi değerleri artmaktadır. Ancak kür süresine bağlı olarak çekme dayanımı da artış gösterdiğinden bu oran sabit kalmaktadır. Projede kür süresinin artışının sünme davranışına etkisi de araştırıldığından farklı kür süreleri için sabit çekme gerilim değerleri uygulamak yerine çekme dayanımına bağlı olarak çekme gerilimi / çekme dayanımı oranı sabit

tutularak sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 500 gün sonunda gerçekleştirilen deneylerde ürün yük altında uzama kabiliyetini kaybettiğinden, çekme gerilimi çekme dayanımı oranının %40 olduğu deneylerde bile birkaç saat içerisinde kopmuştur.



Şekil 4. 4. PİK-2'ye ait kür süresi esaslı sünme kopma zarfları

PİK-2 için Şekil 4. 4'te sunulan zarflarda farklı kür süreleri için oldukça benzer kopma davranışı gözlemlenmiştir. Farklı gerilim oranlarında bu davranış ilişkisini en iyi temsil eden fonksiyon üstel fonksiyon olarak bulunmuş ve bu ilişkiler Çizelge 4. 1'de sunulmuştur. Kür süresi arttıkça malzemenin kopma süresi de artmaktadır. Sunulan çizelgede bulunan sünme kopma zarfları kullanılarak PİK'lerin kopma süreleri saat olarak tahmin edilebilecektir.

Çizelge 4. 1. PİK-1 ve PİK-2 için elde edilen sünme kopma zarfları

Gerilim Seviyesi	PİK-1		PİK-2	
	Eşitlik	R ²	Eşitlik	R ²
80%	kopma süresi=1.5015kür süresi 1.017	0.92	kopma süresi = 0.010kür süresi ^{1.947}	0.91
60%	kopma süresi= 14.89kür süresi 1.03	0.97	kopma süresi = 0.078kür süresi ^{2.483}	0.97
40%	kopma süresi=212.63kür süresi 1.567	0.97	kopma süresi = 7.0117kür süresi ^{2.077}	0.99
20%	kopma süresi=5521.5kür süresi 0.817	0.99	-	-

Kür Süresi	Eşitlik	R ²	Eşitlik	R ²
1&2-gün	kopma süresi=0.3175gerilim s. 7.308	0.99	kopma süresi = 0.006gerilim s. 9.108	0.99
7-gün	kopma süresi=0.0542gerilim s. 5.998	0.98	kopma süresi = 0.019gerilim s. 11.160	0.99
14-gün	kopma süresi= 0.0292gerilim s. 6.12	0.98	kopma süresi = 0.488gerilim s. 8.915	0.98
500-gün	kopma süresi=0.0094 gerilim s 6.03	0.99		

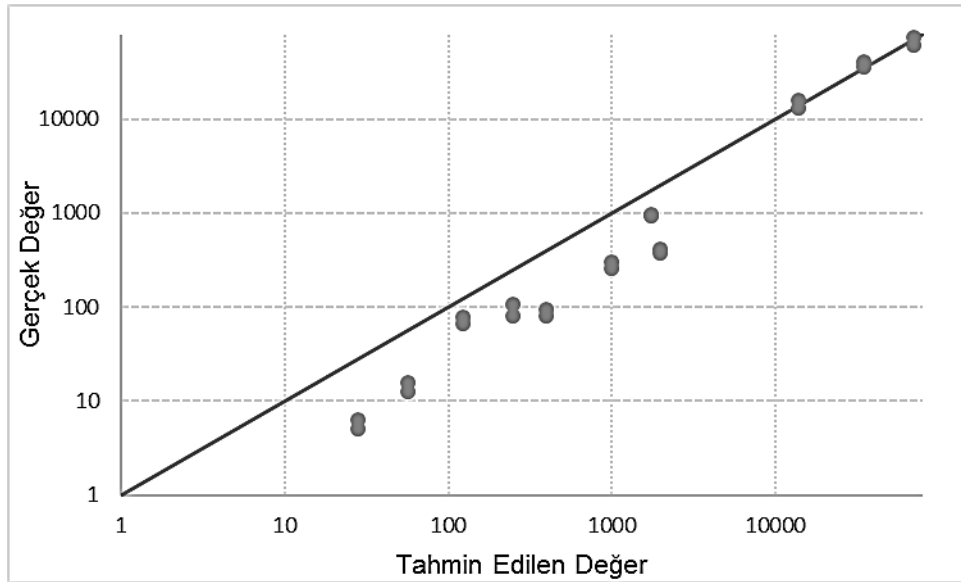
Ayrıca ara raporlarda sunulan kür süresi-sünme gerinimi ve kür süresi kopma zamanı ilişkileri EK-2-C ve EK-3-C'de sunulmuştur. EK-2-C'de sunulan grafiklerde de görüldüğü üzere, PİK-1 dayanımının %80'ine tekabül eden sabit yüklerin etkisinde son derece benzer davranışlar göstermiştir. Bu gerilim miktarı için 1 gün kür süresine sahip numune, diğer kür sürelerine göre çok daha fazla deplasman alabilmiştir. Bunun temel sebebi malzemenin kür aldıkça daha katı (stiff) hale geçmesidir. Bu deneyler 100 dakika içerisinde tamamlandığından deney süresince malzemenin kür alması durumunun ihmal edilebileceği kanaatine varılmıştır. %60 gerilim miktarı için oluşturulan grafikte, deney başladıktan sonraki ilk 100 dakikalık süreçte numunelerin benzer davranış gösterdikleri tespit edilmiştir. 7 ve 14 gün sonunda gerçekleştirilen deneyler için gerek sünme gerinimi gerek kopma süreleri birbirlerine son derece yakındır. EK-3-C'de sunulan PİK-2'ye ait kür süresi-sünme gerinimi ilişkilerinde ise PİK-1 e göre sünme gerinimi değerlerinde kür süresine bağlı olarak daha keskin değişimler gözlemlenmiştir.

Buna ek olarak sunulan kopma zarfı eşitliklerinin birleştirilmesi sonucunda tüm veriyi içeren "Table curve 3D" yazılımı ile 3 boyutlu bir grafik hazırlanmıştır. Hazırlanan grafiğe eğilim yüzeyi adı da verilmektedir (trend surface). Bu grafik kopma- süresi, kür süresi ve çekme gerilmesi oranı arasındaki ilişkinin daha net olarak görülmesine olanak sağlamıştır. PİK-1 için hazırlanan eğilim yüzeyi grafiği EK-2-C'de sunulmuştur.

Tüm bu çalışmalara ek olarak Çizelge 6'da sunulan eşitliklerin istatistik paket programları yardımıyla tek bir eşitliğe indirgenmesi işlemi de gerçekleştirilmiştir. Bu eşitlik;

$$Kopma\ Zamanı\ (dakika) = \frac{125.5}{Kür\ Süresi(gün)} \times \left(\frac{Çekme\ Gerilimi}{Çekme\ Dayanımı} \right)^{-5.136}$$

Şeklinde tanımlanmıştır. Tasarım mühendisleri, sadece bu eşitlik yardımıyla PİK-1'in kopma zamanını tahmin edebileceklerdir. Şekil 4. 5'da PİK-1 için bu eşitlik kullanılarak tahmin edilen kopma zamanı değerleri ve gerçek kopma zamanı değerleri sunulmuştur. 7 gün üzerindeki değerlerde son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir.



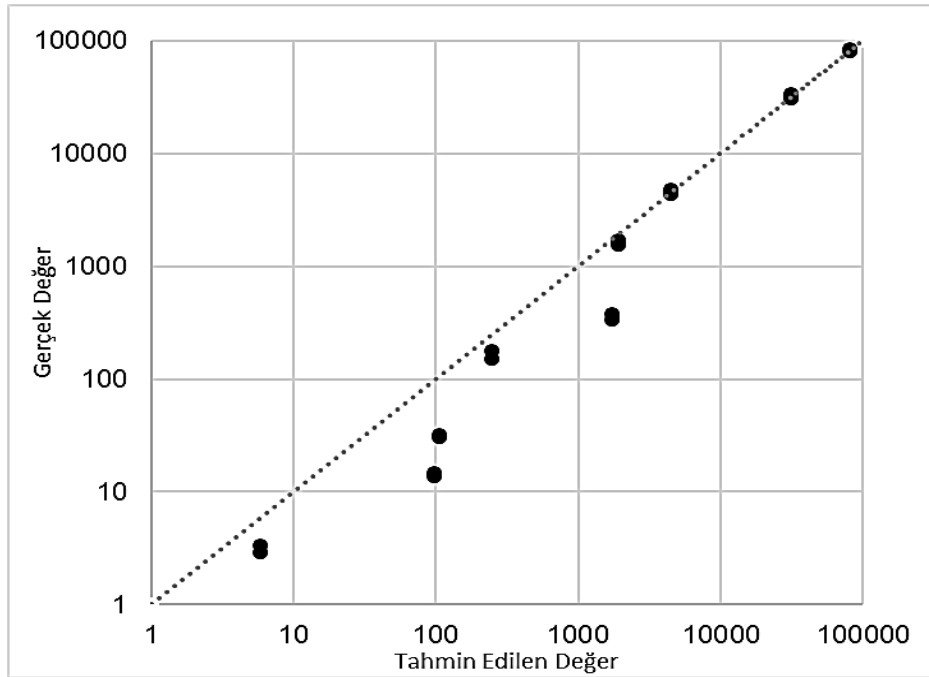
Şekil 4. 5. sunulan eşitlik ile yapılan pik-1 kopma zamanı tahmini ve gerçek kopma zamanı ilişkisi

Yukarıda sunulan çalışmanın bir benzeri PİK-2 sonuçları için de gerçekleştirilmiştir. Bu grafik kopma-süresi, kür süresi ve çekme gerilmesi oranı arasındaki ilişkinin daha net olarak görülmesine olanak sağlamıştır. PİK-2 için hazırlanan eğilim yüzeyi grafiği EK-3-C'de sunulmuştur.

Yukarıda sunulan eğilim yüzeyi grafiğinin istatistik paket programları yardımıyla tek bir eşitliğe indirgenmesi işlemi sonucunda elde edilen eşitlik ise;

$$Kopma Zamanı (dakika) = e^{19,36 - \frac{8,5}{\sqrt{kür süresi (gün)}} - 14,46 \left(\frac{\text{Çekme Gerilimi}}{\text{Çekme Dayanımı}} \right)}$$

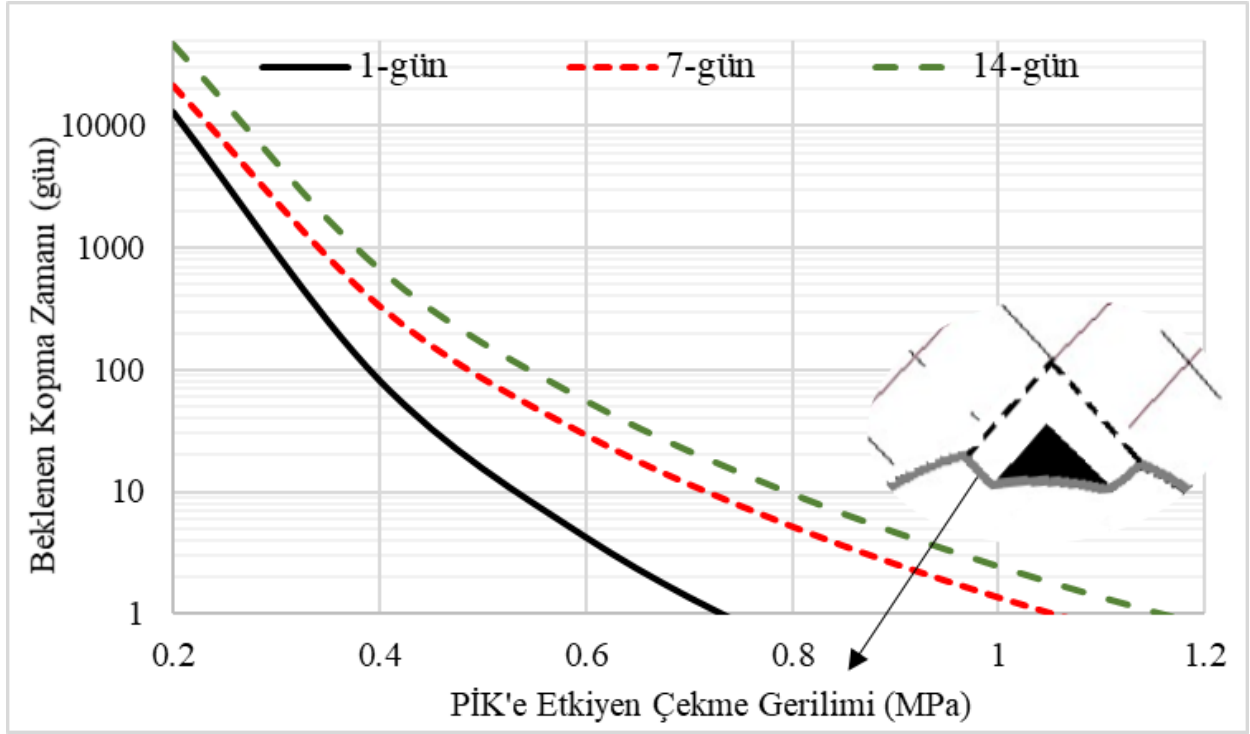
Şeklinde tanımlanmıştır. Tasarım mühendisleri, sadece bu eşitlik yardımıyla PİK-2'nin kopma zamanını tahmin edebileceklerdir. Şekil 4. 6'da bu eşitlik kullanılarak tahmin edilen kopma zamanı değerleri ve gerçek kopma zamanı değerleri sunulmuştur.



Şekil 4. 6. Sunulan eşitlik ile yapılan pik-2 kopma zamanı tahmini ve gerçek kopma zamanı ilişkisi

Laboratuvar sonuçlarının değerlendirilmesinde bir sonraki aşama olarak PİK'lere etki eden çekme gerilmelerini esas alarak farklı kür süreleri için kopma zamanı davranışları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle çekme gerilmesi- çekme dayanımı değerleri PİK'e etkileyen çekme gerilmesi değerlerine çevrilmiştir.

PİK-1 için yapılan çekme deneylerinde 14 gün kür süresine sahip numunelerin yaklaşık 3.5 MPa çekme dayanımına sahip oldukları bilinmektedir. Ancak Şekil 34'te sunulan sonuçlara göre PİK-1'e etkileyen çekme gerilmesi değeri 0.8 MPa değerini aşması durumunda, 10 günlük bir süre içerisinde malzemenin kopacağı öngörülmektedir.

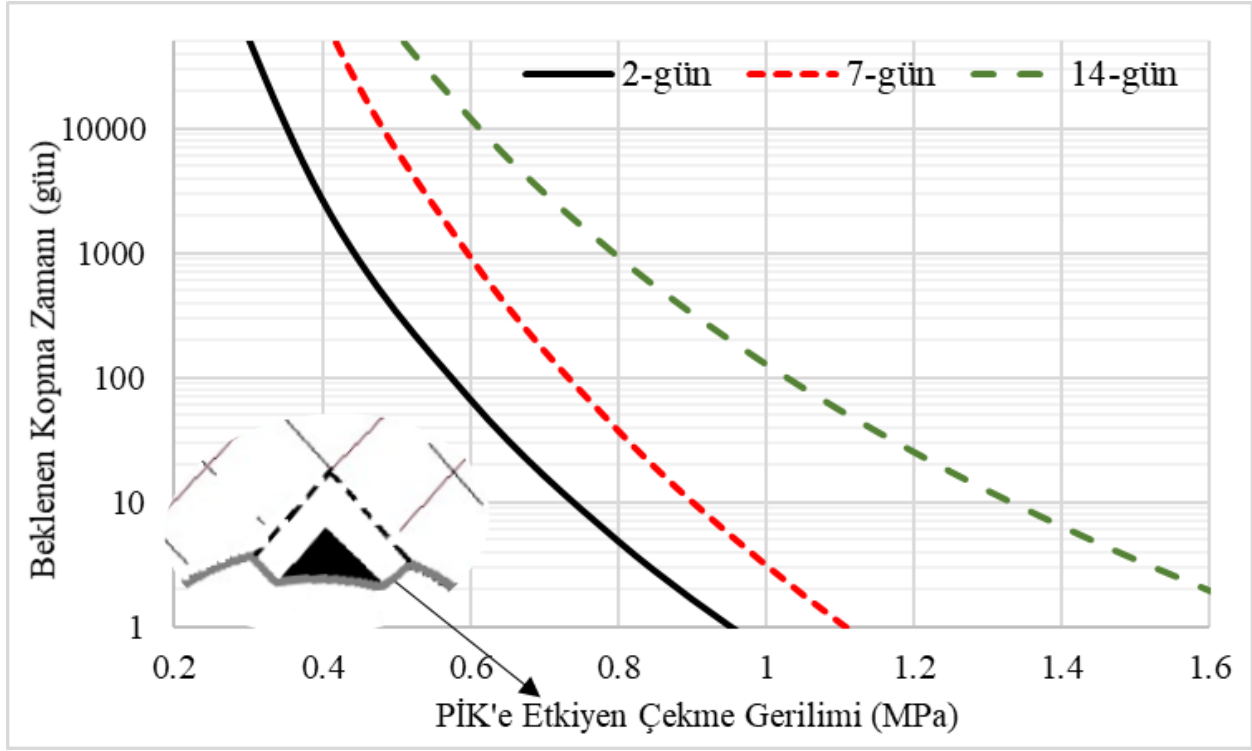


Şekil 4. 7. PİK-1'e etkiyen çekme gerilimine bağlı beklenen kopma zamanı davranışları

Sunulan kopma zamanı davranışlarına göre PİK-1 ürününün kür aldıkça sünme davranışına karşı daha fazla direnç gösterdiği anlaşılmaktadır. Buna karşın 7 ve 14 gün davranışları arasında son derece benzerlik bulunmaktadır. PİK-1 için gerçekleştirilen 500 gün deney sonuçları bu bölümde sunulmasına karşın 14 gün değerlerine benzer sonuçlar elde edildiğinden, bu ürün için 14 gün sonrasına ait bir tahmin yapılması gerektiğinde araştırmacılar ve tasarım mühendisleri 14-gün deneylerini kullanmasında herhangi bir sakınca bulunmamaktadır.

Aynı çalışma PİK-2 ürünü için de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4. 8). PİK-2 için 1 gün kür süresine sahip deneyler yapılamadığından 2 gün sonuçlarına grafikte aynı şekilde yer verilmiştir. Sunulan kopma davranışlarındaki en belirgin özellik ise 7 gün ve 14 gün sonuçlarında diğer üründe görülemeyen farkın oluşmasıdır. PİK-2'ye etkiyen çekme gerilmesinin 1 MPa gibi görece yüksek değerlere ulaşmasına rağmen 14 gün kür süresi sonunda ürünün bu gerilmeyi yaklaşık 100 gün kadar taşıyabileceği öngörülmüştür.

2 ürün için sunulan PİK'e etkiyen çekme gerilimine bağlı kopma zamanı davranışlarına göre PİK-2 ürününün daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle 14 gün sonuçlarına ait davranışlarda PİK-2 ürününün daha büyük ölçekli blokları daha uzun süre taşıyabileceği tahmin edilmektedir.



Şekil 4. 8. PİK-2'ye etkiyen çekme gerilimine bağlı beklenen kopma zamanı davranışları

Laboratuvar deneylerinin değerlendirilmesi kısmına ait son değerlendirme aşamasında PİK'lerin yer altı uygulamalarında gerji altında taşıyabileceği blokların boyutları esas alınarak farklı bir çalışma yapılmıştır. Bu bölümde düzgün dörtyüzlü ve küp geometrisine sahip olduğu varsayılan kama blokların eşit kenarlar uzunluklarının PİK performansına etkisi incelenmiştir

Bu aşamada belli başlı kabuller yapılarak Şekil 4. 9 ve Şekil 4. 10'de sunulan abaklar elde edilmiştir. Öncelikle kama bloklarının ağırlıklarının direk olarak PİK'te gergiye sebep olduğu (direk çekme) ve süreksizlik setlerinin oluşturduğu bu kama bloklarının eklem yüzeylerinde herhangi bir sürtünme direnci olmadığı varsayımı yapılmıştır. Bir diğer varsayım ise kopmanın blok çevresine çok yakın şekilde gerçekleştiğidir. Arazi uygulamalarında PİK'lerin yer yer koparak yenilmeden önce soyuldukları gözlemlenmiştir. Daha güvenli tarafta kalmak adına "debonded zone" adı verilen bu bölgenin kama çevresine eşit alınmasına karar verilmiştir. Dolayısıyla PİK'lerin maruz kaldığı maksimum çekme yükü "T" şu şekilde hesaplanmıştır;

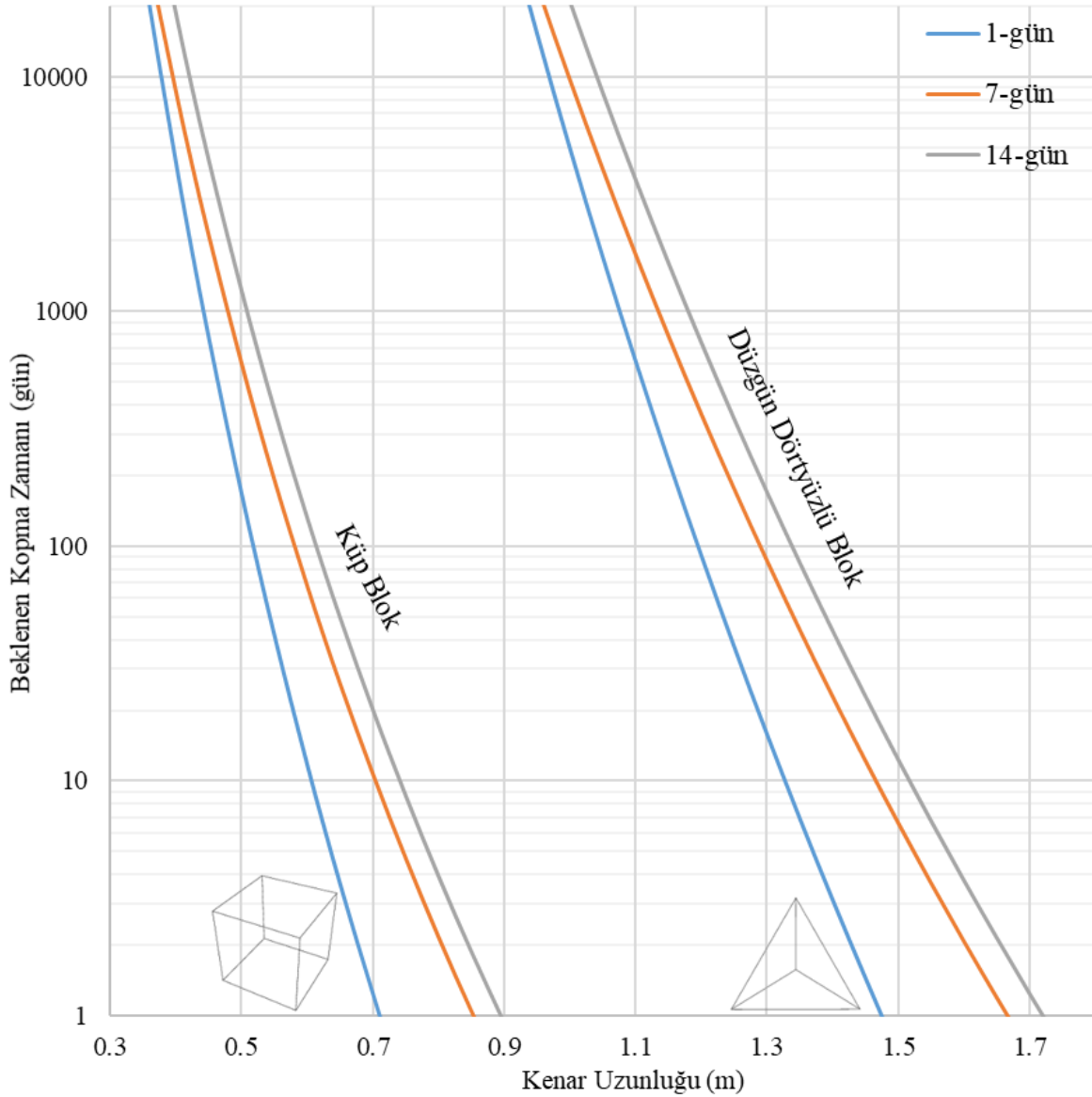
$$T (N) = K\ç x t_{PİK} x \sigma_{PİK} \quad (1)$$

Kç: Kamanın PİK'e temas eden yüzey çevresi (küp için 4 x kenar uzunluğu, düzgün dörtyüzlü için 3 x kenar uzunluğu)

t_{PIK} = PİK'lerin uygulama kalınlığı

σ_{PIK} = PİK'in çekme dayanımı

Yapılan hesaplamalarda PİK'lerin uygulama kalınlığı deneylerde de olduğu gibi 4 mm, kaya kütlesi yoğunluğu ise 2600 kg/m^3 alınmıştır. Oluşturulan abaklar Şekil 3ve Şekil 37'de sunulmuştur.

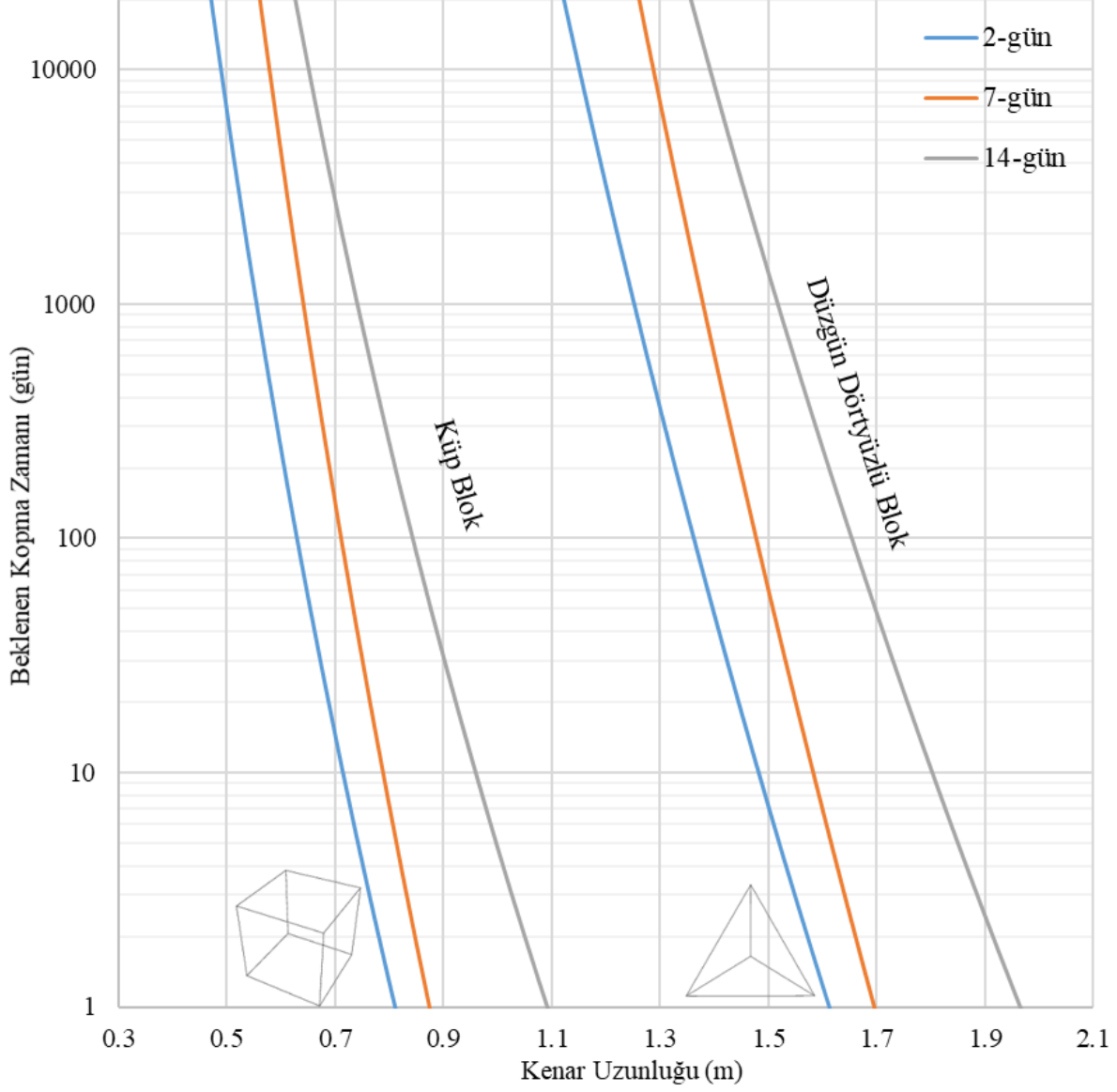


Şekil 4. 9.PİK-1'e ait farklı kama bloklarını taşıma süreleri

Şekil 36'da sunulan 3 farklı kür süresine ait eğrilerde PİK-1'in 1 metre kenar uzunluğuna sahip düzgün dörtgenli blokları taşıyabileceği tahmin edilmektedir. Öte yandan PİK-1 ürününün 1m^3

bloğu taşıma gibi bir yetisinin olmadığı da açıkça görölmektedir. Bu ürünün 14 gün ve sonrasındaki kür süresinde 5 seneye kadar taşıyabileceği en büyük küp bloğun hacminin 0.125 m^3 olabileceği düşünölmektedir. Sunulan abak yardımıyla tasarım mühendisleri PİK-1 ürününü uyguladıkları bloklu yeraltı açıklıklarında oluşun kama bloklarını efektif olarak taşıyabilecekleri süreleri tahmin edebileceklerdir. Buna ek olarak PİK uygulama kalınlığındaki artışın sunulan eğrileri sağ tarafa kaydıracağı (PİK'in yük taşıma kapasitesini arttırarak) unutulmamalıdır.

Yukarıda sunulan abak çalışmasının benzeri PİK-2 ürünü için de yapılmıştır (Şekil 37). Sunulan eğrilerde PİK-2'nin PİK-1'e göre daha büyük boyutlu blokları daha uzun süre taşıyabileceği açıkça görölmektedir. Projenin PİK-1 için yapılan bu bölümü, kaya mekaniği alanındaki önemli dergilerden olan International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (IJRMMS) dergisinde yayınlanmıştır. (Guner ve Ozturk, 2018)



Şekil 4. 10. PİK-2'ye ait farklı kama bloklarını taşıma süreleri

Şekil 4.12'de sunulan 3 farklı kür süresine ait eğrilerde 14 gün kür süresine sahip PİK-2'nin 1.5 metre kenar uzunluğuna sahip düzgün dörtgenli blokları 3 seneye kadar taşıyabileceği tahmin edilmektedir. Öte yandan PİK-2 ürününün de 1m^3 bloğu taşıma gibi bir yetisinin olmadığı da açıkça görülmektedir. Bu ürünün 14 gün ve sonrasındaki kür süresinde 5 seneye kadar taşıyabileceği en büyük küp bloğun hacminin 0.35 m^3 olabileceği düşünülmektedir.

Laboratuvar alışmaları sonunda çekme ve sünme deneyleri gerçekleştirilen dünya genelinde yaygın kullanıma sahip 2 farklı PİK ürününün de sünme davranışına karşı hassas oldukları ortaya çıkmıştır. Her iki PİK ürünü de çekme dayanımlarının yarısı civarında yüklere maruz kaldıklarında efektif kullanılabilirliklerini yitirmişlerdir. Bu çalışmayla birlikte PİK'lerin sünme davranışının önemi ortaya çıkmıştır. Tasarım mühendislerinin PİK'lerin çekme dayanımı parametresini tasarımlarında kullanmaktan ziyade mutlaka ürünün sünme davranışını göz önünde bulundurarak zamana bağlı tasarımlar gerçekleştirmeleri gerekmektedir.

Sonuçların değerlendirilmesi kısmında sunulan tüm eşitliklerde sadece çekme yenilmesi göz önüne alınmıştır. Diğer yenilme davranışlarının da ayrıca çalışılması gerekmektedir. PİK'lerin farklı uygulama koşullarında ve farklı sıcaklık-nem değerlerinde bulunan sonuçların değişkenlik gösterebileceği dşnlmektedir. PİK'lerin arazi uygulamalarında püskürtme işlemi yüksek basınçla ve yüzeye 1-3 metre mesafeden yapılmaktadır. Bu nedenle laboratuvar koşullarında hazırlanan PİK'lerin deformasyon davranışlarının arazi uygulamalarından küçük ölçekte farklılıklar gösterebileceği dşnlmektedir. Bu alışma PİK'lerin sünme davranışları için literatürde yapılan ilk çalışma olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle çalışma ıktılarının PİK reticisi ve kullanıcıları arasında önemli bir farkındalık yaratabileceği dşnlmekte ve bu çalışmanın ardından bu alanda farklı çalışmaların yapılacağı ngrlmektedir.

5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARININ MEKANİK MATEMATİK MODELLERE OTURTULMASI

Bu bölüm 2 PİK ürününe ait farklı kür süreleri ve yük seviyelerinde gerçekleştirilen sünme deney sonuçlarının doğrusal olmayan viskoelastik ve viskoplastik yapısal modelleme yaklaşımlarına oturtulması çalışmalarını içermektedir.

5.1. Yapısal Modelleme Yaklaşımları

Viskoelastik ve viskoplastik davranış arasındaki temel fark genellikle yük boşaltma sürecinde görülmektedir. Viskoelastik malzemeler, yük boşaltma aşamasında önemli miktarda gecikmiş geri kazanım gösterirler. Öte yandan viskoplastik malzemelerde için kalıcı artık plastik gerinim kalmaktadır (Krishnaswamy vd. 1992). Yeraltı kazı koşullarında, kama bloklarının yuvalarından kaydığı durumlarda, PİK'ler aktif tahkimat durumuna geçer ve bu durumun tersine döndürülmesi yani PİK'lerin tekrar pasif tahkimat durumuna gelmesi söz konusu değildir (Tannant, 2001). Diğer bir deyişle, PİK'lerin madencilik uygulama pratiğinde "yük boşaltma" durumu mümkün değildir. Bu nedenle, adımli yükleme ve yük boşaltma bu çalışmanın kapsamına alınmamıştır. Viskoplastik modeller, metallerin yüksek sıcaklıkta malzeme davranışlarını araştırmak için daha yaygın olarak kullanılırlar. Bu durumun temel sebebi, sünme tepkisi sırasında malzeme davranışı üstel fonksiyonlar olarak sabit bir değere asimptotik olarak yaklaşmamasıdır.

Polimerik malzemelerde zamana bağlı modelleme, mikro mekanik yaklaşım ve makro mekanik yaklaşım olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Mikro mekanik yaklaşımlar, malzemenin moleküler seviyesine odaklanarak ayrı ayrı kristal ve amorf fazları ile ilgilenir. Makro mekanik modeller ise pratik yapısal uygulamalarda, basit yükler altında ve deneysel davranışların simüle edilmesinde, zamana bağlı davranışları tanımlayan matematiksel denklemlerde sıklıkla tercih edilmektedir (Liu, 2007).

Bu modelleme çalışmasında, aşağıda belirtilen üç ana koşulun sağlanması amaçlanmıştır;

- i) Yapısal model, değişken aralıklardaki tek eksenli gerilme koşullarında PİK davranışını tahmin edebilmelidir.
- ii) Modelleme parametreleri deneysel olarak ölçülen değerleri kullanarak kolaylıkla elde edilebilmelidir.

iii) Oluşturulan model, sayısal modelleme uygulamalarında da kullanılacağından basit, kolay adapte edilebilir olmalıdır.

Viskoelastik ve viskoplastik modellemede, yapısal ilişkiler genellikle integral-diferansiyel form kullanılarak formüle edilir (Lockett, 1972). Malzemenin t zamandaki gerinimi, kalıtsal integral formülasyonu ile şu şekilde ifade edilebilir;

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \psi(t - \tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

Burada $\psi(t - \tau)$ malzemenin sünme uyumluluğu fonksiyonu ve $d\sigma(\tau)/d\tau$ ise gerilim oranı anlamına gelmektedir. Gerçekleştirilen sünme deneylerinde tek eksenli yükleme koşulları altında gerilim miktarları sabit tutulduğundan eşitlik (2) şu şekilde sadeleştirilebilir;

$$\varepsilon(t) = \sigma \psi(t) \quad (3)$$

Malzeme $t = 0$ anında sabit gerilime maruz kaldığında, elastik gerinim (zamandan bağımsız), ardından plastik veya viskoz gerinim bileşeni oluşur. Mekanik olarak, bu elastik kısım tek yay elemanı ile temsil edilebilir. Modelleme bölümünde bahsi geçen tüm gerinim değerlerinin mühendislik gerinimi olduğuna dikkat edilmelidir.

5.1.1. Viskoplastik Model

Power-law fonksiyonları, sabit gerilim altında yapılan sünme deneylerinde elde edilen verileri kullanarak viskoplastik model oluşturmada yaygın olarak kullanılmaktadır (Lockett, 1972). Uyarlaması görece daha basittir ve daha az bağlantı parametresi gerektirir. Power-law modellerinde sünme gerinim değerleri azalan oranda artış gösterdiği için bu model türüne viskoplastik model denmektedir. PİK-2 için yapılan deneylerde numunenin ilk 2000 dakika içerisinde kopmadığı durumlarda gerinim değerinde küçük ölçekli geri kazanımlar gözlemlendiğinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu gerinim geri kazanımı ve akabinde oluşan asimptotik davranış tipik power-law fonksiyonuyla verimli olarak modellenemeyeceğinden, parçalı power-law fonksiyonlarının viskoplastik modelleme aşamasında kullanılmasına karar verilmiştir.

Tipik power-law fonksiyonlarında zamana bağlı sünme uyumluluğu eşitliği $\psi(t)$ elastik ve (ψ_e) viskoz ($\psi_v(t)$) bölümlerden oluşmaktadır, bu eşitlik şu şekilde tanımlanabilir;

$$\psi(t) = \frac{1}{E_0} + C_0 t^{C_1} \quad (4)$$

E_0 parametresi başlangıca ait anlık elastic modül, C_0 ve C_1 parametreleri malzeme sabitleri olarak bilinmekte olup bu değerlerin herbiri gerilim parametresine doğrudan bağlıdır. Viskoplastik malzemelerin yapısal eşitlikleri (4) ve (2) numaralı eşitliklerin birleştirilmesiyle elde edilebilir;

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \left[\frac{1}{E_0} + C_0 (t - \tau)^{C_1} \right] \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Gerçekleştirilen her sünme deneyi için gerilim değerleri (σ_n) deney boyunca sabit tutulduğundan eşitlik (5) şu hali alır.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_n}{E_0} + \sigma_n C_0 t^{C_1} \quad (6)$$

Yukarda belirtildiği gibi parçalı power-law modelinin gerektiği durumlarda ise eşitlik (6) iki farklı bölüme ayrılır;

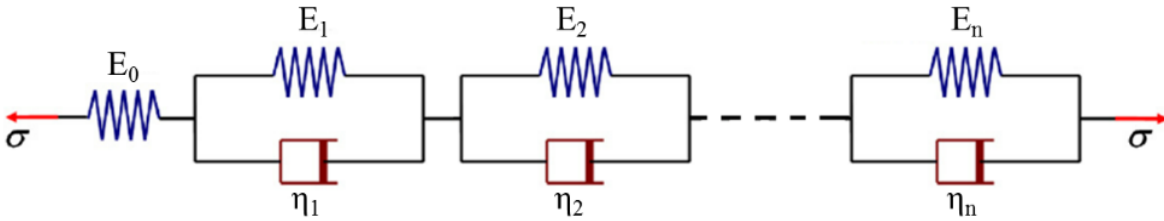
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_n}{E_0} + \sigma_n C_0 t^{C_1} \quad t \leq t_{cr} \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_n}{E_1} + \sigma_n C_2 t^{C_3} \quad t > t_{cr}$$

t_{cr} gerilim geri kazanımının başladığı zamandır (kritik zaman), bu değer PİK-2 için gerçekleştirilen tüm çalışmalarda sabit olarak alınmıştır. PİK-2 ürünlerinde kopma davranışının kritik zamandan önce gerçekleşmesi durumunda power-law modelleri yalnızca 3 gerilime bağlı parametre ile modellenebilmesi mümkündür. Ters durumda ise 6 gerilime bağlı parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. PİK-2 için gerçekleştirilen 12 viskoplastik modelin 5'inde parçalı power-law modeli kullanılmıştır. PİK-1 deneylerinde gerilim geri kazanımı gözlemlenmediği için parçalı modelleme kullanılmamıştır. Viskoplastik model parametrelerinin bulunmasında eşitlik (7) istatistik tabanlı yazılıma tanımlanmıştır. Her iki PİK ürünü için elde edilen model sonuçlarına bir sonraki bölümde yer verilmiştir. Her deneyin 2 tekrarı olduğundan modelleme aşamasında deney tekrarları arasında keskin davranış farkları olmamasına rağmen deney tekrarlarının ortalama değerleri alınarak modelleme işlemlerinde kullanılacak deney verileri elde edilmiştir.

5.1.2. Viskoelastik Model

Viskoelastik terimi, hem katıların elastik hem de sıvıların akış davranışını tanımlamaktadır. Bazı kremler, merhemler, jeller viskoelastik özellik göstermektedirler. Biyolojik sıvılardan kan ve tükürük viskoelastik özellik gösterir. Yarı katı ürünler hem katı, hem de sıvının özelliklerini gösterir. Katı madde, sadece akış ile karakterize edilemez, ancak hem elastisite hem de akış özelliği ile tanımlanabilir. Viskoelastik malzeme davranışını gerçeğe uygun modellemek için yay, dashpot elemanları ve bunların değişken kombinasyonları sıklıkla kullanılmaktadır. Viskoelastik modelleme bölümünde pek çok farklı reolojik model türleri olmasına karşın, yapılan ön çalışmalar sonucunda doğrusal olmayan çoklu Kelvin-Voight modelleme yaklaşımının incelenmesine karar verilmiştir. Deney sürelerinin birkaç dakika ile 2 ay arasında değişkenlik göstermesi sebebiyle çoklu Kelvin-Voight modellerinde eleman sayılarının sabit tutulamayacağına karar verilmiştir. Modelde seri olarak bağlanan her bir Kelvin elemanı fiziksel olarak zaman aralıklarını temsil etmektedir. Böylelikle uygulanan model yaklaşımının uzun test süreleri için de gerçek malzeme davranışına oldukça yakın sonuçlar verebileceği öngörülmüştür. Kelvin-Voight Model yaklaşımı temel olarak doğrusal viskoelastik model olarak kabul edilmesine rağmen, doğrusal elastik kısmı temsil eden yay ve çoklu Kelvin elemanlarının seri olarak bağlanması ile bu modelin doğrusal olmayan, zamana bağlı malzeme davranışlarını da verimli bir şekilde modelleyebileceği düşünülmektedir. Çoklu Kelvin-Voight Model yaklaşımının reolojik olarak gösterimi (elastik + viskoz akış) Şekil 5. 1'de sunulmuştur.



Şekil 5. 1. Çoklu Kelvin-Voight modelin reolojik olarak gösterimi

Doğrusal olmayan viskoelastik modellerde sünme uyumluluğu eşitliği $\psi(t)$; elastik (ψ_e) ve viskoz kısımdan ($\psi_v(t)$) aşağıda sunulan fonksiyon şeklinde tanımlanabilir;

$$\psi(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \{1 - e^{[-t/(\eta_i/E_i)]}\} \quad (8)$$

Sunulan fonksiyonda E_0 anlık elastik modül, η_i ve E_i ise dashpot viskozitesi ve i . Kelvin elemanının yay katılığını göstermektedir. Ayrıca η_i/E_i ise gecikme zamanı anlamına gelmektedir (τ_i).

Viskoelastik malzemenin yapısal denklemi eşitlik (8)'in eşitlik (2) ile birleştirilmesiyle aşağıdaki şekilde elde edilebilir;

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \{1 - e^{-(t-\tau)/\tau_i}\} \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (9)$$

Sünme deneylerinde gerilim değerleri (σ_n) sabit tutulduğundan eşitlik (9) aşağıdaki gibi daha basite indirgenebilir;

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v(t) = \frac{\sigma_n}{E_0} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_n}{E_i} [1 - e^{(-t/\tau_i)}] \quad (10)$$

Gerçekleştirilen ön modelleme çalışmaları sonucunda hesaplamaları daha basite indirmek adına gecikme zamanlarının (τ_i) sabit tutulmasına karar verilmiştir. Benzer durum bu alanda daha önceden yapılan çalışmalarda da uygulanmıştır (Zhang ve Moore, 1997; Liu, 2007). Birincil gecikme zamanı, τ_1 , 0,2 dakika, ve akabindeki her gecikme zamanı bir öncekinin 10 katı olacak şekilde alınmıştır. Kelvin elemanı sayısına ise iterasyon yöntemi ile modelleme hatasının 10^{-3} ve altındaki değerlere ulaştığı sayıların alınmasına karar verilmiştir. Örneğin 5 Kelvin elemanı olan bir modelde gecikme zamanları 0,2, 2, 20, 200 ve 2000 dakika şeklinde alınmıştır. Bu gecikme zamanlarının yer aldığı Kelvin elemanlarının bir önceki eleman ile kendi gecikme zamanı arasında kalan süredeki yapısal malzeme davranışını simüle etmektedir.

Viskoelastik model parametrelerinin bulunmasında eşitlik (10) istatistik tabanlı yazılıma tanımlanmış, Levenberg-Marquardt algoritması ile model parametreleri her kür süresi ve her sabit gerilim değeri için bulunmuştur. Her iki PİK ürünü için elde edilen model sonuçlarına bir sonraki bölümde yer verilmiştir. Viskoplastik model aşamasında kullanılan ham deney verileri bu modelleme aşamasında da kullanılmıştır.

5.2. PİK-1'e Ait Yapısal Modelleme Sonuçları

5.2.1. PİK-1 Viskoplastik Model Sonuçları

Viskoplastik modelleme aşamasında malzeme davranışını belirleyen model sabitleri sayısının az olması sebebiyle bu model tipi literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Model sabiti sayısının az olması modelin daha pratik bir biçimde elde edilmesini sağlarken, malzemenin maruz kaldığı gerilim değerleri değiştikçe malzeme davranışı da değiştiğinden tahmin edilen malzeme davranışında yetersiz kalabilmektedir. PİK-1 deneylerinde gerilim geri kazanımı gözlemlenmediği için parçalı modelleme tekniğinin kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Bu nedenle her farklı kür

süresi ve gerilim değeri için yalnızca 3 malzeme sabiti değerinin bulunması yeterli olmuştur. Viskoplastik model parametrelerinin bulunmasında eşitlik (7) istatistik tabanlı yazılıma tanımlanmıştır. Farklı kür süreleri için elde edilen model sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması EK-4-A'da sunulmuştur. Bu modellerin oluşturulmasında kullanılan malzeme sabitleri de EK-4-A'da sunulmuştur.

Çekme dayanımı değerinin %80'inde deneyi gerçekleştirilen numunelerde gerinim-zaman ilişkileri asimptotik değerlere ulaşmadığından Viskoplastik model sonuçları ile deney sonuçları kusursuz biçimde modellenebilmiştir. Diğer sabit yük seviyesinde gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında ise makul sonuçlar elde edilmiştir.

Anlık elastik modül (E_0) değerlerinin hem viskoelastik hem de viskoplastik modelleme aşamalarında malzemenin sabit gerilim altında bırakıldıkları anda meydana gelen gerinimi temsil ettiklerinden sabit tutulmuştur. Bu nedenle anlık elastik modül (E_0) değerleri modelleme parametresinden ziyade deney sonuçlarından elde edilen malzeme özelliği olarak düşünülmelidir.

EK-4-A'da sunulan Viskoplastik model sonuçlarında da görülebildiği üzere gerilim değeri düşük numunelerde yapılan modellerde mevcut modelleme tekniği yetersiz kalmıştır. Bu sebeple farklı bir modelleme tekniği olan viskoelastik modelleme aşamasının da projede kullanılmasına karar verilmiştir.

5.2.2. PİK-1 Viskoelastik Model Sonuçları

PİK-1 için gerçekleştirilen viskoelastik model çalışmalarında viskoplastik modele göre daha fazla model parametresi için içine girdiği için beklenildiği gibi gerçeğe son derece yakın sonuçlar elde edilmiştir. Farklı kür süreleri için elde edilen model sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması EK-4-A'da sunulmuştur. Viskoelastik modellerin oluşturulmasında kullanılan malzeme sabitleri de EK-4-A'da sunulmuştur. Viskoplastik modellerin aksine düşük gerilim değerleri altında yapılan deney sonuçlarının viskoelastik yapısal modellemesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Başka bir deyişle PİK-1 için Çoklu Kelvin-Voight modelleme yaklaşımı tüm gerinim-zaman eğrisinin modellenbilmesinde viskoplastik yaklaşımlara göre daha başarılı olmuştur.

EK-4-A'da sunulduğu gibi model sabitleri sayısı modelden modele farklılık göstermektedir. Bu durumun temel sebebi deney sürelerinin ve dolayısıyla gecikme zamanlarının (retardation time) değişkenlik göstermesidir. Örneğin 1 gün kür süresinde 0.53 MPa sabit gerilim altında yapılan deneyler 2.000 dakika ile 20.000 dakika arasında tamamlandığı için 6 seri Kelvin elemanı kullanılarak modellenmiştir. E_7 değerinin bulunmasının mekanik açıdan anlam teşkil

etmemektedir. Sonraki aşamada modellerin bilgisayar rutinlerine kodlanması kısmında bu durumun karışıklık yaratmaması adına tüm modellerin Kelvin elemanı sayılarının en yüksek kelvin eleman sayısı olan 7 olacak şekilde rutine kodlanması, daha az Kelvin elemanına sahip modellerde bulunan son Kelvin elemanının hesaplanmayan elemanlar yerine kullanılması uygun görülmüştür.

5.3. PİK-2'ye Ait Yapısal Modelleme Sonuçları

5.3.1. PİK-2 Viskoplastik Model Sonuçları

PİK-2 için yapılan viskoplastik modellerde kısa sürede kopma gerçekleşen numunelerde oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Deney süreleri arttıkça malzemenin gerinim değişiminde asimptotik davranış gözlemlendiğinden tekli power-law modellerinde istenen uyum yakalanamamıştır. Bu nedenle deney süresi 2000 dakikayı geçen setlerde parçalı power-law modeli kullanılmıştır. PİK-2 için yapılan 12 modelin 5'inde parçalı power-law modeli kullanılmıştır. Bu modellerde gerinim geri kazanım davranışları da yakalanmıştır. Farklı kür süreleri için elde edilen model sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması EK-4-B'de sunulmuştur. Bu modellerin oluşturulmasında kullanılan malzeme sabitleri de EK-4-B'de sunulmuştur.

Özellikle Çekme dayanımı değerinin %80'ine tekabül eden gerilim değerlerinde neredeyse kusursuz sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan gerinim oranları azaldıkça deney süreleri uzadığından ve gerinim değerleri asimptotik davranışa yakınsadığından tipik Power-law modelleri gerinim davranışlarını gerçek değerlerinden fazla olarak modellemektedir. Deney süresinin 2000 dakikayı aştığı durumlarda devreye giren parçalı power-law fonksiyonları ise gerinim geri kazanım davranışını makul ölçülerde modelleyebilmiştir. Ancak gerinim değerlerinde gerçeğe uygun olmayan keskin azalma davranışı kısmını modellemede yetersiz kalmıştır.

5.3.2. PİK-2 Viskoelastik Model Sonuçları

PİK-2 için yapılan viskoelastik model çalışmalarında daha fazla model parametresi işin içine girdiği için beklenildiği üzere daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ancak çoklu Kelvin-Voight modelleme ile gerinim geri kazanım davranışının modellenmesi mümkün olamamıştır. Farklı kür süreleri için elde edilen model sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırması EK-4-B'de sunulmuştur. Viskoelastik modellerin oluşturulmasında kullanılan malzeme sabitleri EK-4-B'de sunulmuştur. Çoklu Kelvin-Voight modelleme yaklaşımı tüm gerinim-zaman eğrisinin modellenmesinde viskoplastik yaklaşımlara göre daha başarılı olmuştur. Gerinim değerlerinin azaldığı kısımlarda ise oluşturulan modeller gerinim değerinin sabit asimptotik değere ulaştığı varsayımını yapmaktadır.

EK-4-B'de sunulan ilgili çizelgede de görüldüğü üzere model sabitleri sayısı modelden modele farklılık göstermektedir. Bu durumun temel sebebi deney sürelerinin ve dolayısıyla gecikme zamanlarının değişkenlik göstermesidir. Örneğin 2 gün kür süresinde 1.46 MPa sabit gerilim altında yapılan deneyler 2 dakika ile 20 dakika arasında tamamlandığı için 3 seri Kelvin elemanı kullanılarak modellenmiştir. E_4 ve E_5 değerlerinin bulunmasının mekanik açıdan anlam teşkil etmemektedir. Sonraki aşamada modellerin bilgisayar rutinlerine kodlanması kısmında bu durumun karışıklık yaratmaması adına tüm modellerin Kelvin elemanı sayılarının 5 olacak şekilde rutine kodlanması, daha az Kelvin elemanına sahip modellerde bulunan son Kelvin elemanının hesaplanmayan elemanlar yerine kullanılması uygun bulunmuştur.

2 farklı PİK ürünü için gerçekleştirilen yapısal modelleme sonuçlarına göre Viskoelastik modelleme yaklaşımının daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeple yapılan çalışmanın sonraki aşamaları olan modellerin bilgisayar rutinine kodlanması ve sayısal modelleme aşamalarında Viskoelastik model yaklaşımında elde edilen değerlerin kullanılmasına karar verilmiştir.

6. YAPISAL MODELLERİN SAYISAL MODELLEME BİLGİSAYAR RUTİNİNE KODLANMASI VE MODEL DOĞRULAMASI

Yapısal modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen 2 farklı PİK ürününe ait davranışın sayısal modelleme çalışmalarında kullanılabilmesi için, sayısal modelleme işleminin yapılacağı programa tanımlanması gerekmektedir. Proje kapsamında makine, malzeme, ve inşaat mühendisliği alanlarında sıklıkla kullanılan Abaqus isimli yazılımın kullanılması kararlaştırılmıştır.

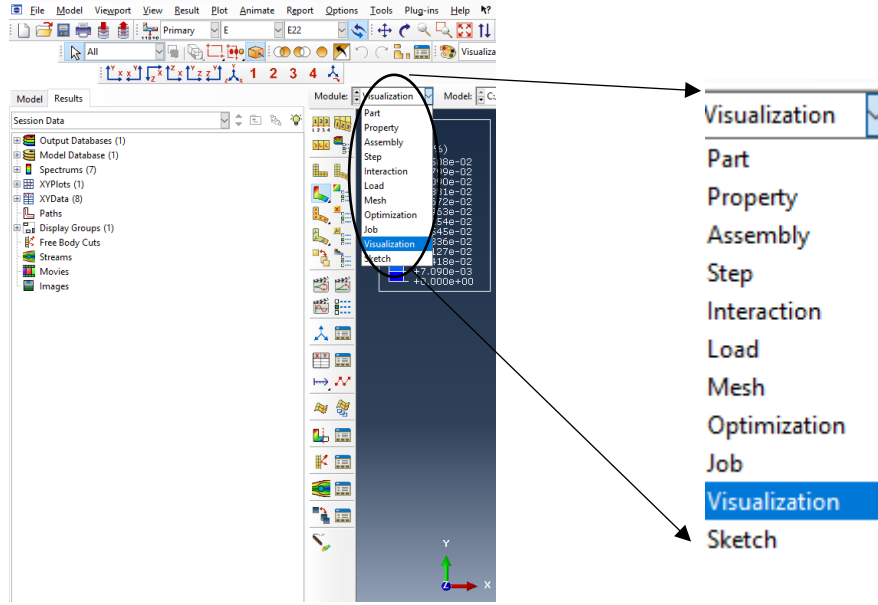
Kullanılan yazılımın ara yüzüne tanımlanmış farklı sünme modelleri olmasına rağmen makro ölçekte PİK'lerin sünme davranışlarının modellenmesi aşamasında mevcut modeller yetersiz kalmıştır. Bu durum proje başlangıcında öngörüldüğü için, oluşturulan yapısal modellerin bilgisayar rutinine kodlanması sürecine farklı bir aşama olarak iş paketlerinde ve iş planlarında yer verilmiştir.

Statik ve dinamik problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılan Abaqus yazılımında yapılacak her tanımlama, farklı belirli birimler altında toplanmıştır. Bu birimler kendi içinde mantıksal alt tanımlama komutları içerir. Yazılım, kullanıcının ihtiyacı olan modelleme, analiz, çözüm yönetimi ve sonuç değerlendirmesi aşamalarını, ABAQUS/CAE adı verilen bir ara yüzde barındırmaktadır. Bu ara yüzde, doğrudan ve dolaylı yollardan dışarıdan geometri okunabilmekte, sadeleştirilebilmekte ve direkt olarak geometri oluşturulabilmektedir. Buna ek olarak, tek bir CAE dosyasında çoklu modeller oluşturulabilmektedir.

ABAQUS/Standard, genel amaçlı sonlu elemanlar modülü olarak bilinmektedir. Kullanıcıya geniş bir çerçevede farklı uygulamalarda çözüm olanakları sağlamaktadır. Bu modülde statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunların bağlanmış (coupled) çözümlenmeleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu modül geniş ve gelişmiş eleman, malzeme ve temas (contact) modellemesi yapabilen kapalı (Implicit) sonlu elemanlar çözücüsüdür.

Abaqus/Explicit, zamana bağlı dinamik veya quasi-statik, yüksek derecede geometrik ve malzeme doğrusalsızlığı içeren problemlerin sayısal benzetimleri için geliştirilmiş, açık veya belirtik (explicit) çözüm yöntemini kullanan bir Sonlu Elemanlar (SE) çözücüdür. Düşürme testi simülasyonları, çarpışma (kaza) ve ürün benzetimleri gibi yüksek derecede doğrusalsızlığın bulunduğu devinim problemlerinin çözümü için uygundur. Gelişmiş malzeme modelleri ve eleman kütüphanesi bulunmaktadır. Beton, toprak, kil, kaya, sünger, lastik, köpük, dökme demir, karma (kompozit) malzeme modelleri mevcuttur. Ayrıca, tam ve yarı otomatik temas modelleme kabiliyetine sahiptir.

Abaqus yazılımının CAE arayüzü son derece kullanıcı dostudur. Şekil 6. 1'de yazılımın arayüzü ve model aşamaları sunulmuştur.



Şekil 6. 1. Abaqus yazılımının CAE ara yüzü ve model aşamaları

Modelleme işleminde kullanılan kısımlara ilişkin genel bilgiler sıralı olarak aşağıda sunulmuştur.

Program modülündeki ilk bölüm olan "Part" kısmında, iki ya da üç boyutlu geometrik parçaların oluşturulması ve oluşturulan parçaların davranış tiplerinin atanması (deforme olabilir, ayrık-analitik rijit vb.) işlemleri yapılmaktadır. Bu kısımda modele ait iki boyutlu çizim, CAD tabanlı çizim programlarında olduğu gibi kolaylıkla yapılabilmektedir. Sonrasında elde edilen 2D geometriye uzatma, döndürme eğerek-döndürme işlemleri yapılarak üçüncü boyut kazandırılabilir.

Property bölümünde, malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. Malzeme özellikleri bu bölümde son derece detaylı bir biçimde tanımlanabilmektedir (genel, mekanik, termal, elektriksel vb.). Ayrıca modelde kullanıcı tanımlı malzeme-davranış özellikleri tanımlanacaksa bu bölümde ilgili kısımların seçilmesi (USDFLD, DEPVAR vb.) gerekmektedir. Malzeme tanımlandıktan sonra kesit oluşturularak ilgili kesite atama işlemi ve kesit-geometri eşleştirmesi de bu bölümde yapılmaktadır. Bu bölümde aynı geometri üzerinde çoklu malzemeler tanımlanarak, kompozit malzemeli modellerin oluşturulması (geometri parçalanarak veya Assembly bölümünde çoklu geometri birleştirilerek) mümkündür.

Assembly bölümünde, parçalar birbirlerine göre konumlandırılarak montaj işlemi gerçekleştirilmektedir. Karmaşık geometriye sahip modeller bu bölümde part bölümünde

oluşturulan görece basit kısımların birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu bölümde parçalar kopyalanarak çoğaltılabilir ve parçalar daha küçük elemanlara ayrılabilir. Buna ek olarak analizi daha büyük önem arz eden kısımlarda mesh yoğunluğunu arttırmak veya analize fazla etkisi bulunmayan kısımlarda mesh yoğunluğunu azaltarak işlem hızını arttırmak için parçalar bölümlere ayrılabilir.

Step bölümünde ise analizin tipi, adımları, çıktıları, analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi gibi önemli kısımlar tanımlanır. Genellikle bir modelde birden fazla analiz adımı tanımlanmaktadır. Örneğin sünme analizi yapılabilmesi için öncelikle ilk step kısmında elastik bir analiz ve hemen sonrasında ise sünme kısmını temsil eden ikinci step'in yer alması gerekmektedir. Analizin süresi ve zaman adımları bu kısımda belirlenmektedir. Zaman adımı içerisinde yeteri kadar iterasyonun yapılamadığı, çözümün elde edilemediği durumlarda, analiz program tarafından sonlandırılmaktadır (aborted). Analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi, sonuçları doğrudan etkilemektedir. Modellenen sistemde kullanılan eleman sayısı ve eleman tipi ile uyumlu analiz çözücü ve çözüm tipi değişebilmektedir.

Interaction kısmında modelde temas halinde bulunan parçalar arası etkileşim parametreleri belirlenmektedir. Temas yüzeyleri, master-slave olarak belirlenmekte ve yüzeyler arasındaki sürtünme, sönümlenme gibi değişken özellikler tanımlanabilmektedir. Buna ek olarak farklı geometrik kısımların aktive-deaktive edilmesi (örneğin tünel tahkimatı) işlemleri de bu kısımda yapılabilmektedir.

Load kısmında, yükleme tipi, miktarı, yüklemeye başlanacak step ve farklı steplerde yüklerde oluşacak değişimler ve sınır şartları tanımlanabilmektedir. Mekanik, akustik, akışkan, kütle aktarımı, bu bölümde kullanılacak yükleme tipleridir. Modelin başlangıç sınır şartları bu bölümde gerçekleştirilmektedir. Bu noktada kullanıcının gireceği yük miktarının birimi kullanıcıya bırakılmıştır. Başka bir deyişle bu bölümde tanımlanacak yükleme miktarına ait birimlerin, Part ve Property bölümlerinde oluşturulan birimlerle uyumlu olması gerekmektedir.

Mesh bölümünde, öncelikle geometri üzerine istenen sayıda ve sabit-değişken aralıklarda node atanır. Modele ait geometrinin yapısı nedeniyle bazı bölgelerde node'ların yoğunluğunun değişimi gerekebilme olup bu işlem Seed Edges komutundan yapılmaktadır. Bilindiği üzere node'lar birleşerek gridleri meydana getirmektedir. Bu gridlere eleman tipi ataması yapılarak, modeli oluşturan elemanlar elde edilir. Kübik, prizmatik ve kama elemanlar, yazılımda kullanılan eleman şekilleridir. Modelde kullanılan nokta ve eleman sayısı, sonuçları etkilemektedir. Mesh kısmından, Job kısmına geçmeden önce ayırıklaştırılan modelin kontrol edilmesi, problemin çözüm

aşamasında mesh ile ilgili bir sorunla karşılaşılması için gereklidir. “Verify Mesh” araç çubuğunda, mesh durumu kontrol edilmeli, hatalı node’lar ve hata oranlarına bakılmalıdır.

Job bölümünde, çözüm yönetimi ve izleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca model için oluşturulmuş bir alt rutin bulunuyorsa bu bölümde yazılıma tanımlanmalıdır. Bölümde bulunan görüntüleme kısmı sayesinde, çözüm sırasında hangi aşamada bulunduğu, ne kadar iterasyon yapıldığı gibi programın verdiği uyarılar ve hatalar takip edilebilir.

Sonuçların görsel olarak incelenmesi Visualization bölümünde yapılmaktadır. Noktalara, elemanlara, yüzeylere ve tüm geometriye ait sonuçlar, bu bölümde elde edilmektedir. İstenen çıktılara ait değerler, grafikler ya da renk skalaları kullanılarak oluşturulan görseller yardımıyla incelenir. Report araç çubuğu kullanılarak, çıktılar sayısal olarak istenilen formatta kaydedilebilmektedir.

6.1. Alt Rutinlerin Oluşturulması

Yazılımda bu rutini oluşturma sürecine kullanıcı alt rutini (user subroutine) adı verilmektedir. Alt rutinler C, C ++ veya Fortran kodu olarak yazılmalıdır ve analizin yürütüldüğü bir modele dahil edilmelidir. Oluşturulan kodun yazılımda tanımlanabilmesi için öncelikle “Intel Parallel Studio” yazılımı ile Abaqus’ün birbirine bağlanmış olması gerekmektedir. Proje çalışanlarının Fortran diline olan aşinalığı sebebiyle alt rutin kodlama işleminde Fortran dili tercih edilmiştir.

Yapısal modelleme işlemleri sonucunda oluşturulan viskoelastik modellerin viskoplastik model sonuçlarına göre daha temsili sonuçlar vermesi sebebiyle projenin sonraki aşamalarında viskoelastik model (çoklu Kelvin-Voight) yaklaşımı ile çalışılmasına karar verilmiştir.

Laboratuvar ve yapısal modelleme çalışmalarında her PİK ürünü için en az 3 farklı kür süresinde ve 4 farklı gerilim seviyesinde gerinim-zaman ilişkileri bulunmuştur. Kullanıcı alt rutini aşamasında PİK ürünlerinin değişken kür sürelerinde son derece farklı davranışlar sergilemesinden dolayı her kür süresi için farklı rutinlerin hazırlanmasına karar verilmiştir.

Elde edilen yapısal modellerin alt rutine kodlanması aşamasının önemli bir amacı ise deneylerin yapılmadığı aralıklardaki gerilim değerleri (intermediate stress levels) durumlarında da malzemenin davranışını simüle edebilmektir. Bu nedenle her bir kür süresi için 4 farklı gerilim değerinde yapılan yapısal modellerden elde edilen Kelvin sabitleri arasındaki ilişkiler bulunmuştur. Sonrasında rutine bu değişimler tanımlanmış ve değişken gerilim aralıkları için de alt rutinin gerçeğe uygun sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Alt rutin oluşturma işleminde temel olarak eşitlik (10)’da verilen çoklu Kelvin-Voight model kullanılmıştır.

6.1.1. Anlık Modül Rutininin Oluşturulması

Kullanılan yazılımda sünme modeli oluşturulması için öncelikli olarak elastik malzeme davranışının tanımlanması gerekmektedir. Deneylerde numuneler sabit yük altında bırakıldıkları anda meydana gelen anlık gerinim değişimi kısmına elastik gerinim (ϵ_e) denilmektedir. Bu elastik gerinim değeri numunenin kür süresine bağlı olduğu gibi aynı kür süresi altında yapılan deneylerde uygulanan gerilim değerine de bağlıdır. Elastik gerinim davranışını kontrol eden parametreye, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, anlık modül (E_0) denilmektedir. Yapısal modellerde sunulan anlık modül değerleri uygulanan gerilim değeriyle orantılı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yazılıma sünme modeli alt rutini tanımlanmadan önce PİK'in elastik malzeme parametresi olan anlık modül değerlerinin değişken bir şekilde farklı bir alt rutin ile tanımlanması gerekmektedir.

Bu bağlamda yazılımda "UFIELD" adı verilen önceden tanımlanmış alan değişkenlerini belirtmek için kullanıcı alt rutini hazırlanmıştır. Alt rutinin temel ara yüzü Şekil 6. 2'de sunulmuştur.

```
SUBROUTINE UFIELD(FIELD,KFIELD,NSECPT,KSTEP,KINC,TIME,NODE,  
1 COORDS,TEMP,DTEMP,NFIELD)
```

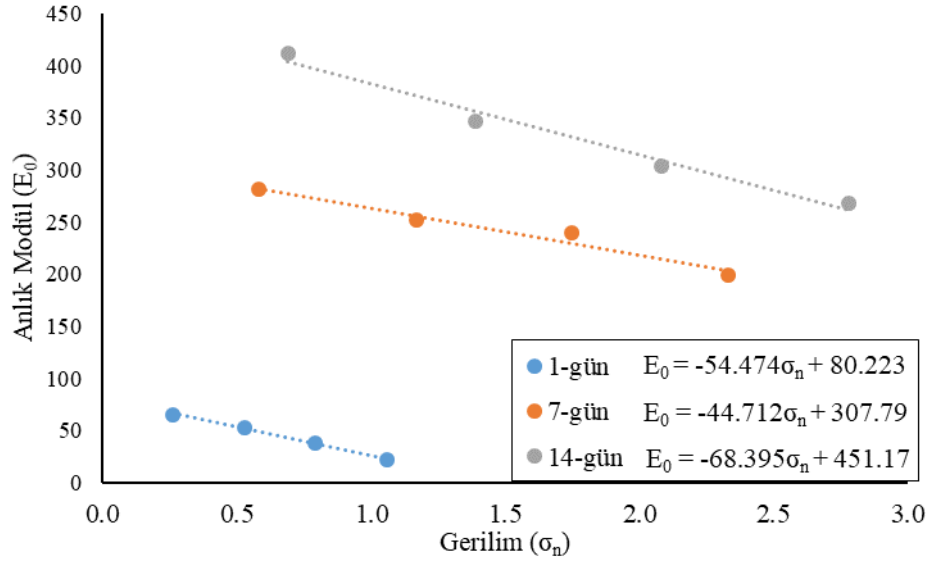
```
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
```

```
DIMENSION FIELD(NSECPT,NFIELD), TIME(2), COORDS(3),  
1 TEMP(NSECPT), DTEMP(NSECPT)
```

KULLANICI TARAFINDAN TANIMLANMASI GEREKEN KISIM FIELD

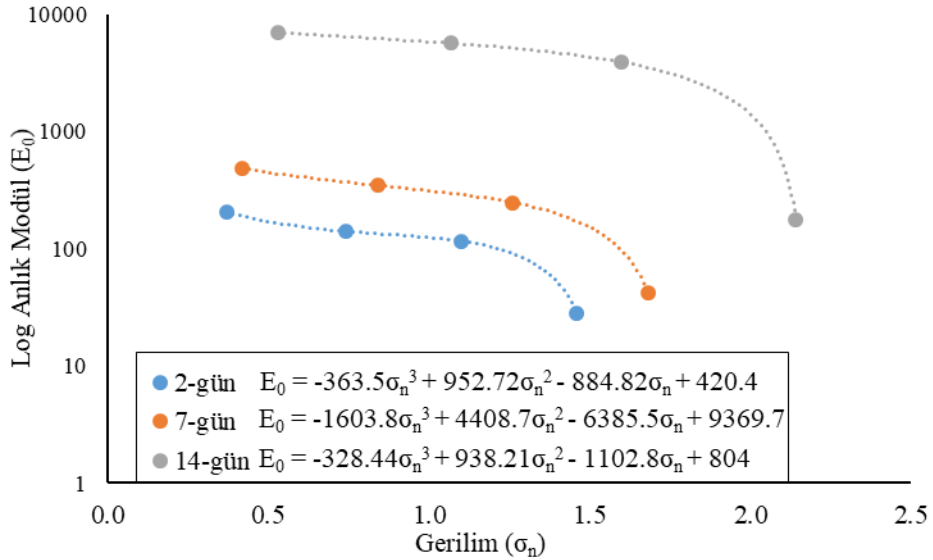
Şekil 6. 2. UFIELD alt rutininin temel ara yüzü

Kullanıcı tarafından tanımlanması gereken field kısmına anlık modül değerinin, uygulanan gerilim değerine (σ_n) bağlı değişimi girilerek hedeflenen elastik gerinim davranışı elde edilmiştir. Bir önceki bölümde elde edilen anlık modül değerlerinin uygulanan gerinim değerlerine bağlı olarak değişimleri Şekil 6. 3 ve Şekil 6. 4'de sunulmuştur. Bu değişimleri tanımlayan fonksiyonlar alt rutine kodlanarak bu aşama tamamlanmıştır.



Şekil 6. 3. PİK-1'e ait anlık modül ve gerilim ilişkileri

Şekil 6. 3'de görüldüğü gibi PİK-1 için anlık modül ve gerilim değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmasına karşın, Şekil 6. 4'te sunulan PİK-2'ye ait grafikte daha karmaşık bir ilişki bulunmaktadır. Grafiklerde sunulan ilişkiler alt rutine kodlanarak anlık modül değişimi davranışları simüle edilmiştir.



Şekil 6. 4 PİK-2'ye ait anlık modül ve gerilim ilişkileri

Kullanılan yazılım sonlu eleman çözümlemesini zaman adımlarıyla yaptığı için malzemenin elastik gerinim aldığı sabit yükün bağlandığı zaman için bir zaman adımı tanımlanması gerekmektedir.

Bu zaman adımının sünme zaman adımlarına göre son derece kısa tutulması önerilmektedir. Bu nedenle numunenin anlık gerinim aldığı bu zaman adımı 0.01 dakika olarak alınmıştır.

6.1.2. Sünme Rutininin Oluşturulması

PİK'lerin elastik gerinim davranışları yazılıma tanıtıldıktan sonra sünme davranışının tanımlanması için gerekli alt rutin kısmına geçilmiştir. Bu aşamada her bir kür süresi ve PİK ürünü için farklı olmak üzere toplamda 6 model oluşturulmuştur. Yapısal model kısmında elde edilen çoklu Kelvin-Voight model parametreleri bu aşamada kullanılmıştır. Sünme alt rutinin Abaqus yazılımına tanımlanan temel ara yüzü Şekil 6. 5'de sunulmuştur.

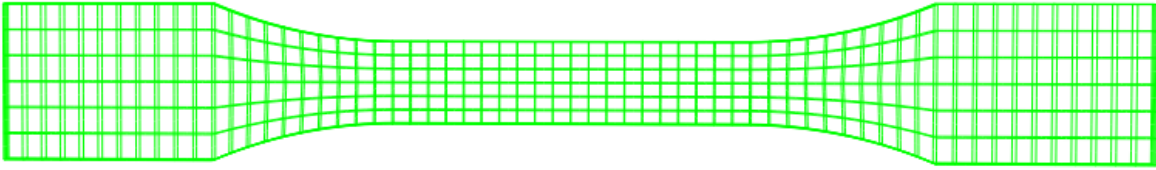
```
SUBROUTINE CREEP(DECRA, DESWA, STATEV, SERD, EC, ESW, P, QTILD,  
 1 TEMP, DTEMP, PREDEF, DPRED, TIME, DTIME, CMNAME, LEXIMP, LEND,  
 2 COORDS, NSTATV, NOEL, NPT, LAYER, KSPT, KSTEP, KINC)  
  
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'  
  
  CHARACTER*80 CMNAME  
  
  DIMENSION DECRA(5), DESWA(5), STATEV(*), PREDEF(*), DPRED(*),  
 1 TIME(3), EC(2), ESW(2), COORDS(*)  
  
  KULLANICI TARAFINDAN TANIMLANMASI GEREKEN KISIMLAR  DECRA,  DESWA  
  
  RETURN  
  END
```

Şekil 6. 5. Sünme alt rutininin temel arayüzü

Arayüzde kullanıcı tarafından tanımlanması gereken “DECRA” parametresi eşdeğer sünme gerinimini, “DESVA” ise hacimsel şişme gerinimini temsil etmektedir. Kullanıcının bu iki parametreden birini mutlaka tanımlaması gerekmektedir. Tanımlanan alt rutinlerin deney sonuçları ile karşılaştırılması ile modelin doğrulanma işlemi yapılmış ve bu doğrulama aşamaları sonraki bölümde sunulmuştur. PİK-1 ve PİK-2 için 1 ve 2 gün kür süresine ait oluşturulan alt rutinler EK-5'te sunulmuştur.

6.2. Sünme Deneyleri Simülasyonu ve Modellerin Doğrulanması

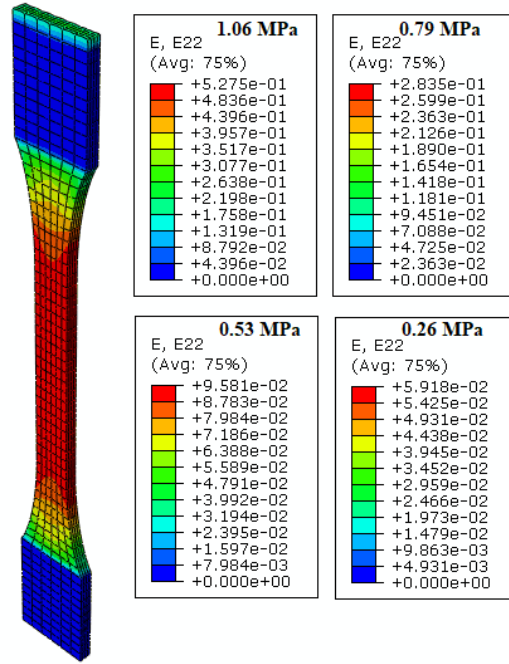
Deneylerin simülasyonunda hazırlanan sünme numuneleri ile aynı boyutlarda PİK'ler oluşturulmuştur. Önceki bölümde açıklanan modelleme prosedürüne uygun olarak sünme deneyi modelleri hazırlanmış ve oluşturulan alt rutin ile çözümlene yapılmıştır. Deneylerin simülasyonunun yapılmasının temel amacı oluşturulan alt rutin modelinin malzemenin gerçek davranışına uygun bir biçimde hareket ettiğini gözlemlemek ve deneylerin yapılmadığı gerilim değerlerinde de gerçekçi sonuçlar elde edebilmektir. Bu bağlamda oluşturulan sünme numunesinin mesh yapısı Şekil 6. 6'da sunulmuştur. Sunulan meshlenmiş geometri 20 node'lu dörtgen ve 1488 elemandan oluşmaktadır.



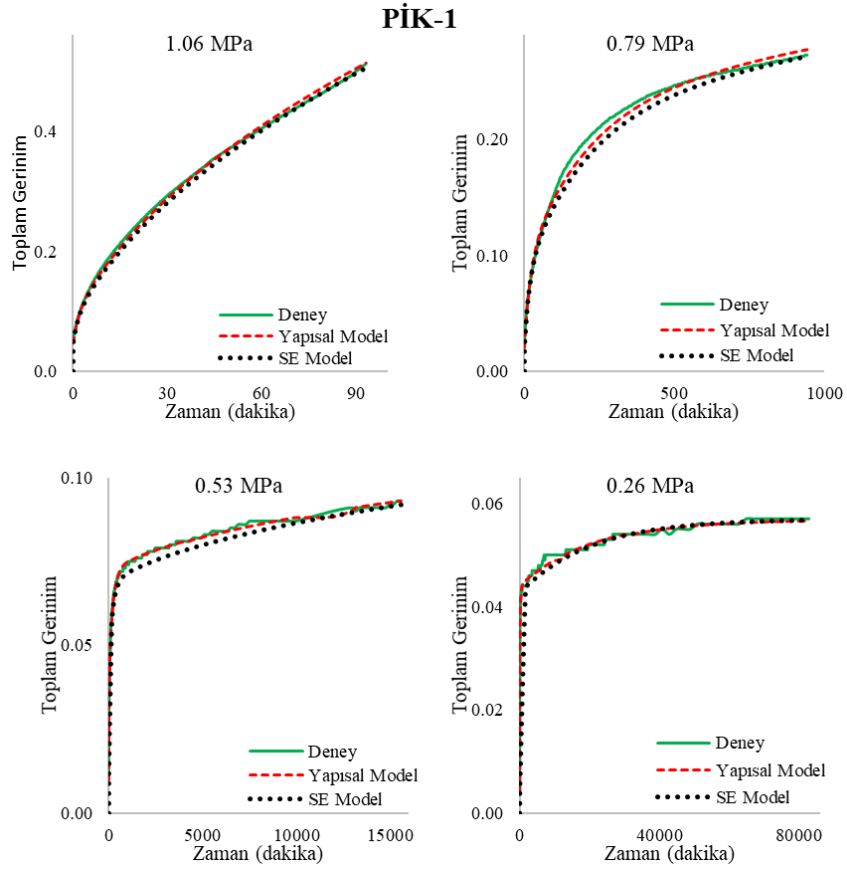
Şekil 6. 6. Sünme deney numunesinin mesh yapısı

Sünme deneyleri simülasyonunda öncelikli olarak deneylerin yapıldığı gerilim miktarlarında deney simülasyonları yapılmıştır. Her ürünün her kür süresi için farklı alt rutin ile modeller çalıştırılmıştır. Analizler sonunda deney verisiyle, yapısal model ve sonlu elemanlar model sonuçları karşılaştırılmış ve son derece tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. 2 farklı PİK için sırasıyla 1 ve 2 gün kür süresine ait deneylerde yapılan Sonlu elemanlar (SE) doğrulama modellerinde ait kopma anında oluşan toplam gerilim değerleri ve gerilim dağılımlarını gösteren program çıktıları Şekil 6. 7 ve Şekil 6. 9'da sunulmuştur. Sunulan numune geometrisine ait deneylerde kopma anındaki gerilim değerleri ve program çıktısında okunan değerler son derece yakın sonuçlar vermektedir. E22 değeri numunenin Y eksenini yani sabit gerilimin uygulandığı doğrultuda aldığı toplam gerilim değerini göstermektedir. Programa girilen Poisson oranı değeri sabit ve 0.4 olarak alınmıştır. E11 doğrultusunda numune bu girdiye uygun olarak gerilim almıştır.

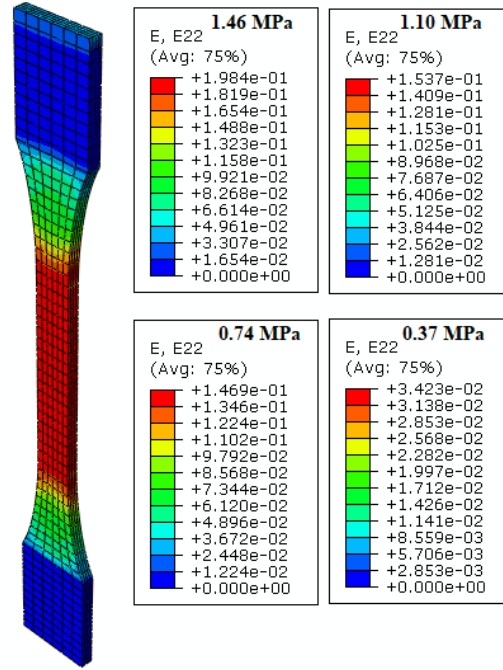
Buna ek olarak deney anında kaydedilen, yapısal modellerde sunulan ve SE model çıktısı olarak alınan tüm gerilim zaman davranışları da karşılaştırılmıştır. PİK-1 ve PİK-2 için 4 farklı gerilim değeri altında yapılan bu karşılaştırmalar ise Şekil 6. 8 ve Şekil 6. 10'da sunulmuştur.



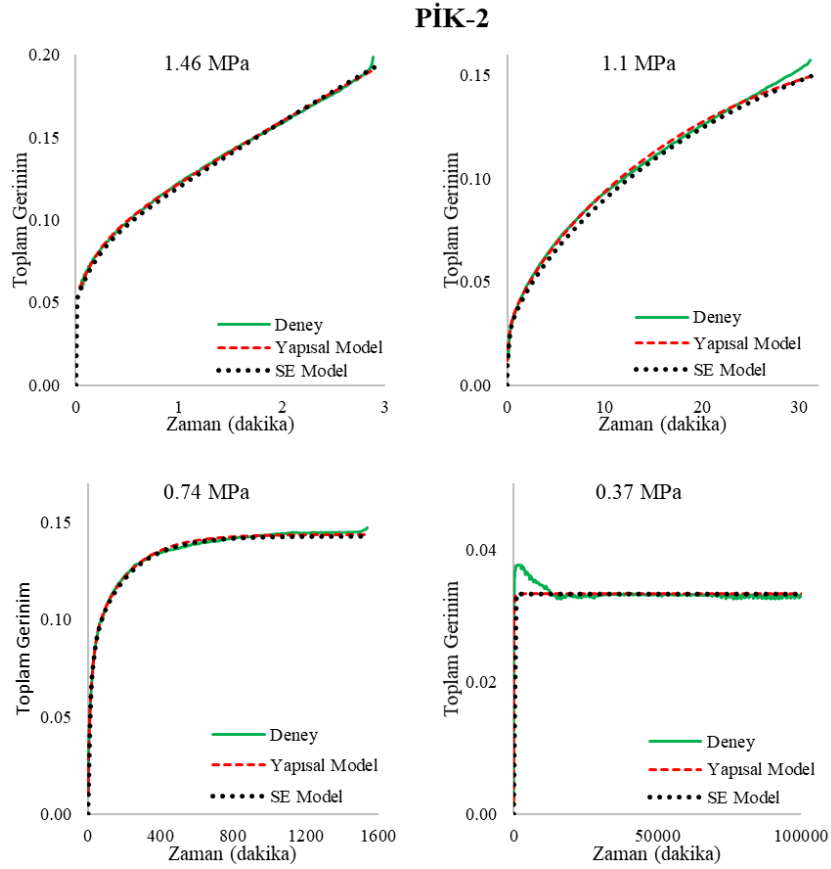
Şekil 6. 7. PİK-1 için kopma anında oluşan gerinim dağılımları (1-gün)



Şekil 6. 8. PİK-1 için sonlu elemanlar doğrulama modeli karşılaştırmaları (1-gün)

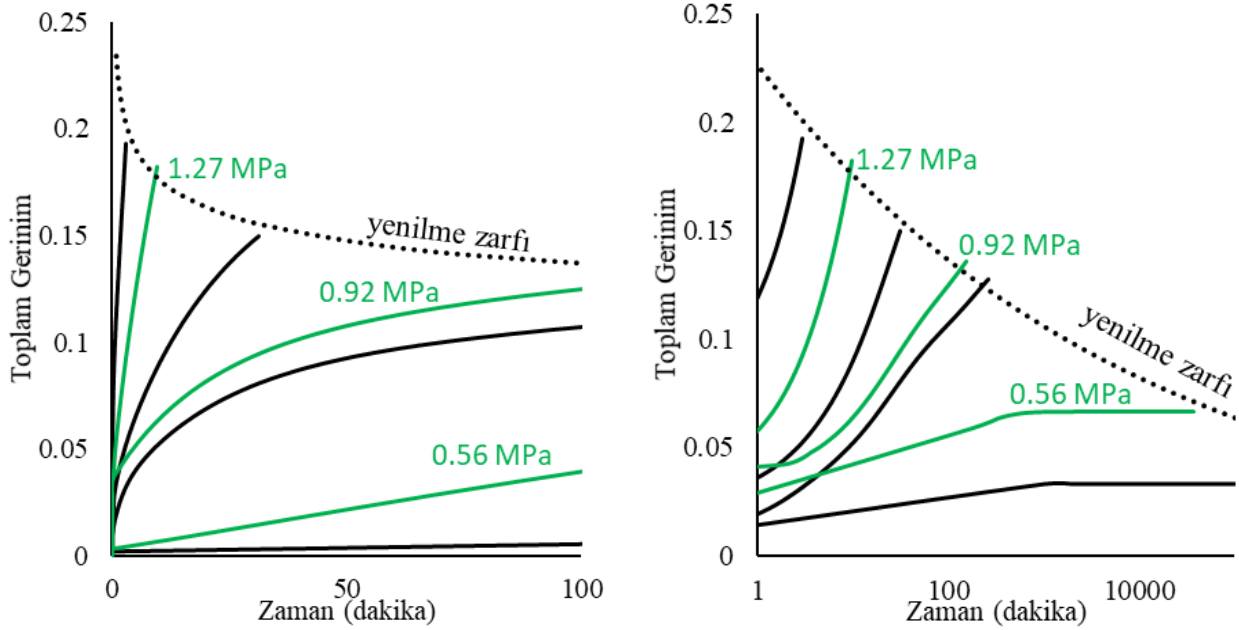


Şekil 6. 9. PİK-2 için kopma anında oluşan gerinim dağılımları (2-gün)



Şekil 6. 10. PİK-2 için sonlu elemanlar doğrulama modeli karşılaştırmaları (2-gün)

Yapısal modelleme ve altrutin oluşturma işlemlerine her iki PİK ürünü için yapılmasına karşın PİK-2'nin sünme direncinin daha yüksek olması sebebiyle öncelikli olarak PİK-2 için sayısal modelleme çalışmalarına devam edilmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda yapılan model doğrulama çalışmalarına ek olarak deney yapılmayan sabit gerilim değerlerinde de gerilim değişimlerin tutarlı olduklarından emin olmak adına ek doğrulama modelleri yapılmıştır. Ek doğrulama modellerine numuneye sırasıyla 1,27, 0,92 ve 0,56 MPa sabit gerilim değerleri uygulanmıştır. Uygulanan bu gerilim değerleri altında modellerin gerilim- zaman grafikleri Şekil 6. 11'de sunulmuştur. Sunulan şekilde numunelerin yenilme süreleri birkaç dakika ile 2 ay arasında değiştiği için davranışın daha iyi anlaşılması adına aynı grafiğin ilk 100 dakikası ve tüm grafik (log skalasında) yan yana sunulmuştur. Buna ek olarak deneyler sonunda elde edilen yenilme zarfı da grafiklerde görülmektedir.



Şekil 6. 11. Ara gerilim değerlerinde elde edilen toplam gerilim-zaman davranışları

Gerçekleştirilen doğrulama modelleri sonucunda yazılan al rutinlerin gerçeğe uygun bir biçimde çalıştığından emin olunmuş ve sayısal modelleme kısmına geçilmiştir.

PİK'lerin zamana bağlı blok taşıma özelliğine ilişkin projenin önceki kısımlarında sunulan sonuçlara ek olarak, PİK'lerin yeraltı açıklıklarındaki global kaya kütesine olan tahkimat katkısının incelenmesi adına oluşturulan altrutin ile sonraki bölümde tünel modellemeleri gerçekleştirilmiştir.

7. PİK TAHKİMATLI DAİRESEL KESİTLİ AÇIKLIĞIN SAYISAL MODELLENMESİ

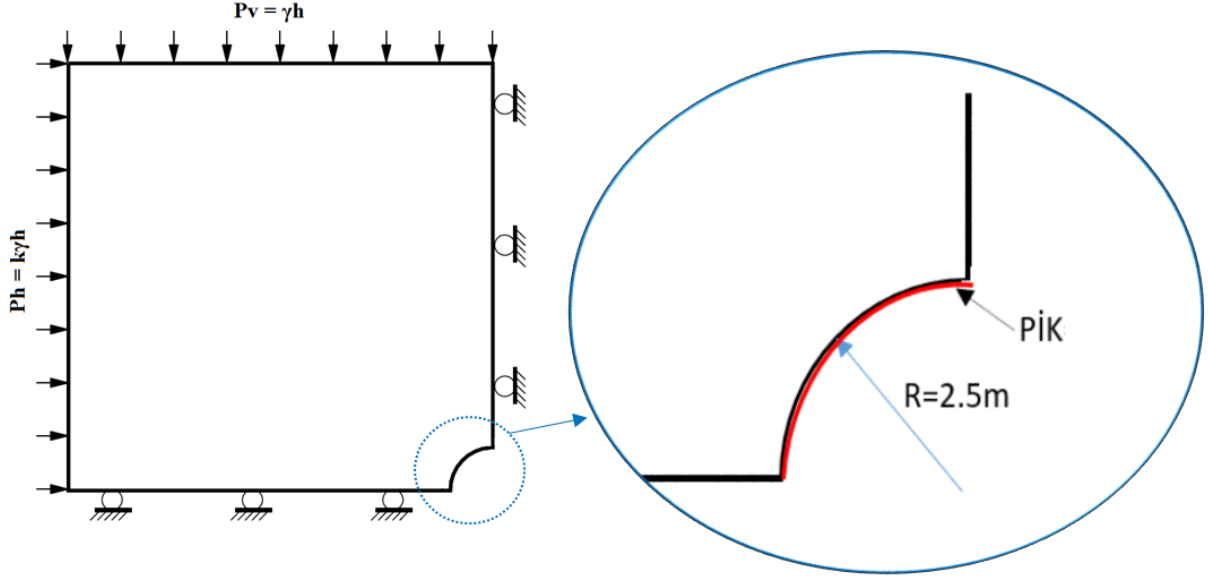
Projenin son bölümünde sonlu elemanlar çözümü kullanan Abaqus yazılımına, zamana bağlı davranış gösteren 4 farklı kaliteye ve sıkışma davranışına sahip kayaçlarda açılan dairesel kesitli tünel modelleri tanıtılmıştır. Bu tünellerin zamana bakılı sıkışma davranışları literatüre uygun biçimde 12 aylık süre içerisinde %1, %2.5, %5 ve %10 sıkışmaya sahip olacak şekilde programa tanımlanmıştır. Sonrasında PİK deneyinin gerçekleştiği günde PİK tahkimatı modelde aktive edilmiş ve malzemenin 12 aylık süre boyunca tünel sıkışmasına karşın oluşturduğu tahkimat davranışı incelenmiştir.

Yapılan sayısal modellemelerin temel amacı zamana bağlı davranış gösteren PİK'lerin global boyutta kaya kütlelerini tahkime edebilme özelliğinin incelenmesidir. PİK'lerin kama bloklarını taşımada etkin bir rol oynayabileceği deney sonuçlarının analizi kısmında detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Blok ölçekli tahkimat özelliğine ek olarak global ölçekte kaya kütlelerinin gerinimine olabilecek etkisinin incelenmesi de önem taşımaktadır.

Modelleme aşamasında analizi yapılacak dairesel kesitli tünelin 5 m çapına sahip, 400 m derinlikte ve düşey ve yatay arazi gerilmelerinin eşit olduğu ($k=1$, hidrostatik) kabulleri yapılmıştır. Tünel kesitindeki simetri koşulları düşünülerek sayısal modelleme çalışmalarında yalnızca tünelin çeyreğini modellenmiştir. Sonlu eleman mesh boyutları seçilirken sınır etkisinin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle model geometrisi, tünel çapından en az 5 kat büyük şekilde oluşturulmuştur.

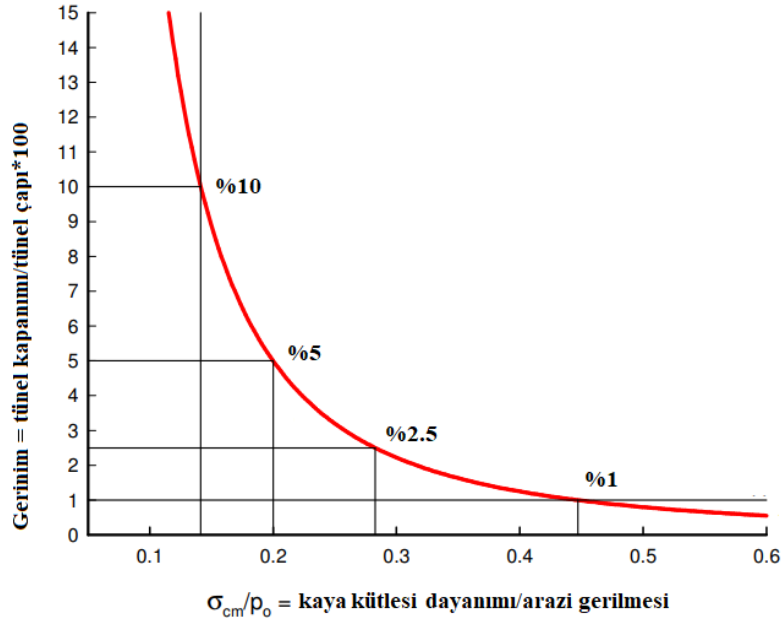
Oluşturulan modellerde tünelin uzunluğu boyunca simetriklik olduğundan düzlem birim deformasyon şartları düşünülmüştür. Başka bir deyişle model düzlemine dik yöndeki birim deformasyonlar sıfır kabul edilmiştir. Plane strain olarak bilinen bu yöntemde problemlerin çözüm sürelerinde önemli ölçüde kısalma gözlemlenmektedir.

Oluşturulan modelde aynı zamanda simetri eksenleri de olan sağ ve alt sınırlarda tek yönlü harekete izin verilmiştir (roller supports). Başka bir deyişle modelin sağ kenarına eklenen sınır koşulu yalnızca y düzleminde harekete, alt kenara eklenen sınır koşulu ise yalnızca x düzleminde harekete izin vermektedir. Buna ek olarak Dikey zemin basıncı modelin üst kenarına, yatay zemin basıncı ise modelin sol kenarına uygulanmıştır. Ortam hidrostatik olduğu için yatay ve düşey gerilmeler eşit olarak sınırlara uygulanmıştır. Oluşturulan geometri ve sınır koşulları Şekil 7. 1'de sunulmuştur.



Şekil 7. 1. Model geometrisi ve sınır koşullarının şematik gösterimi

Oluşturulan modelde öncelikli olarak 4 farklı zemin davranışı ayrı ayrı simule edilmiştir. Farklı zemin davranışlarının seçiminde Hoek ve Marinos'un (2000) tahkimatsız tünellerin sıkışma davranışlarına ilişkin sunulan grafikteki kritik noktalar esas alınmıştır (Şekil 7. 2).



Şekil 7. 2. Tahkimatsız tünel davranışında sıkışma koşulları (Hoek ve Marinos, 2000)

Sunulan grafikte %10 gerinim değeri aşırı sıkışma problemi limitini %1 gerinim değeri ise düşük sıkışma problemi şeklinde tanımlanmıştır. Oluşturulan zamana bağlı tünel kapanması davranışı gösteren modellerde tünelin 12 aylık gerçek zaman simülasyonlarında bu kritik 4 değer esas alınmıştır.

Tünellerin zamana bağlı kapanma davranışlarının programda simüle edilmesinde zamanla sertleşen sünme yasası (time hardening creep law) kullanılmıştır. Bu davranışın temel eşitliği şu şekildedir;

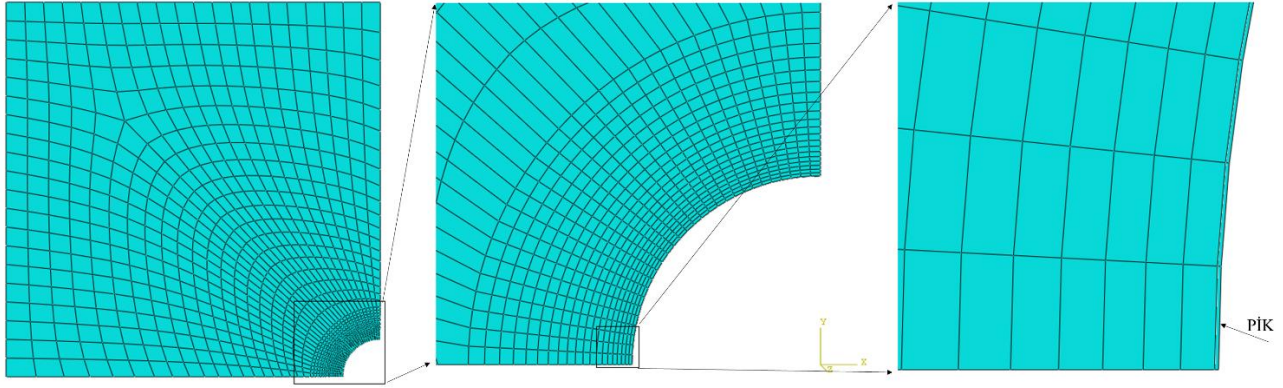
$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A(\sigma^{cr})^n t^m \quad (11)$$

Eşitlikte bulunan ε^{cr} ve σ^{cr} sırasıyla sünme gerinim oranı ve sünme gerilimi anlamına gelmektedir. t zamanı, A,n,m ise kullanıcı tarafından tanımlanan sünme davranışı parametrelerini göstermektedir. Literatürde yer alan tipik tünel kapanma davranışına uygun bir model türü olması ve modelleme işlemi kolaylığı sebebiyle malzeme davranışı olarak zamanla sertleşen sünme yasası kullanılmıştır. A,n,m sabitlerinin bulunması için öncelikle literatürde bulunan teorik tünel kapanma grafikleri kullanılmış, eşitlik (11)'de sunulan sünme gerinim oranı davranışı kullanılarak bu grafiklere oturtulmuştur. Oluşturulan 4 farklı tünele ait malzeme özellikleri ve model sabitleri Çizelge 7. 1'de sunulmuştur.

Çizelge 7. 1. Tünel modellerinde kullanılan parametreler

Sabit Tutulan Parametreler						
Poisson Oranı	0.45	Tünel Çapı (m)	5			
Derinlik (m)	400	TEBD (MPa)	60			
Birim Ağırlık (MN/m³)	0.025	σ_h / σ_v	1			
Değişken Parametreler						
ε_{final} (%)	E_{rm} (MPa)	σ_{rm} (MPa)	A	n	m	GSI
1	3840	4.5	1.9E-5	0.62	-0.67	54
2.5	2445	2.8	4.5E-5	0.841	-0.74	46
5	1510	2.0	14.1E-5	0.89	-0.84	40
10	1010	1.5	27.0E-5	1.03	-0.89	36

Oluşturulan modellerde CPE-4 kodlu çift doğrusal düzlemlı, 2 boyutlu ve dörtgen mesh sistemi tercih edilmiştir. Tünel geometrisi 1225 elemandan PİK ise 30 elemandan oluşmaktadır. Ayrıca sınır elemanlarından tünel cidarına yaklaştıkça doğrusal olarak artan mesh geometrisi atanmış, tünel cidarında 30 eleman olacak model hazırlanmıştır. Oluşturulan modelin farklı boyutlardaki mesh gösterimi Şekil 7. 3'de sunulmuştur.

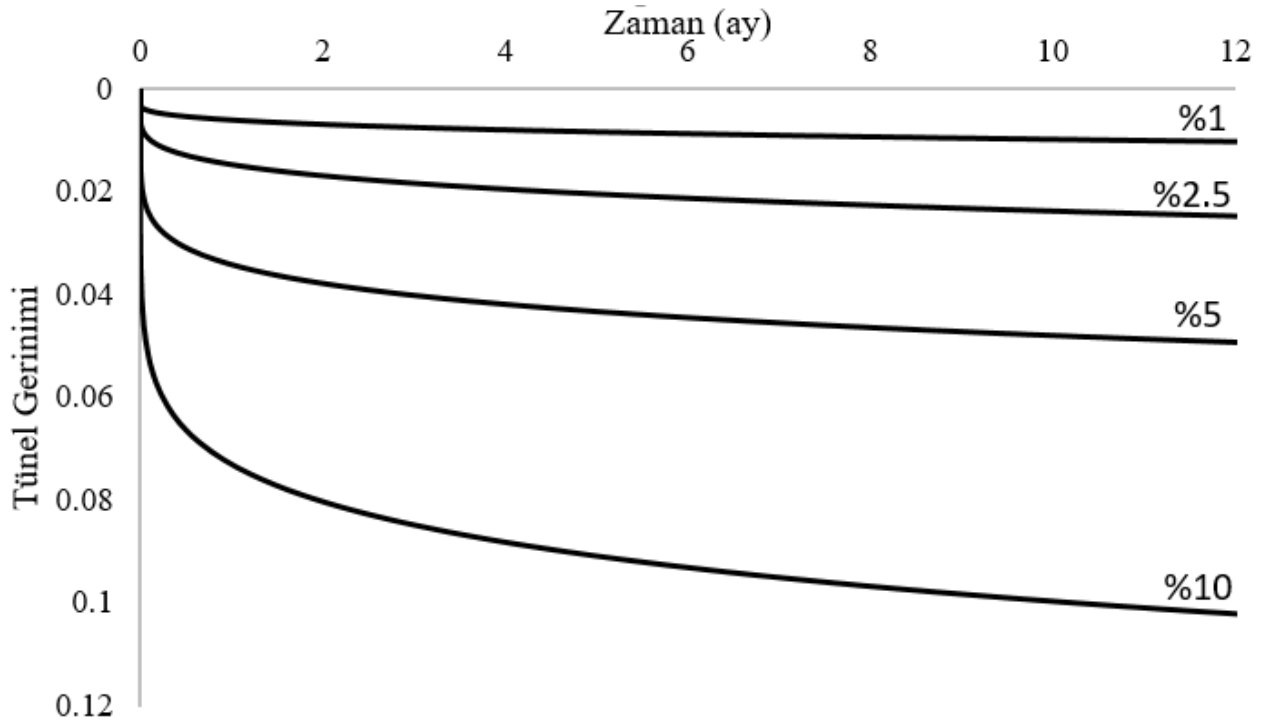


Şekil 7. 3. Sonlu elemanlar tünel modelinin mesh yapısı

Modelleme aşamasında öncelikli olarak tahkimatsız tünel davranışlarının oturtulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada Çizelge 11'de sunulan parametreler kullanılmıştır. Oluşturulan modeller başlangıç, elastik ve vizko şeklinde 3 aşamalı olarak programa tanımlanmıştır. Programın iterasyon aşamaları gerçek zamanlı olacak şekilde (saat) modeller oluşturulmuştur.

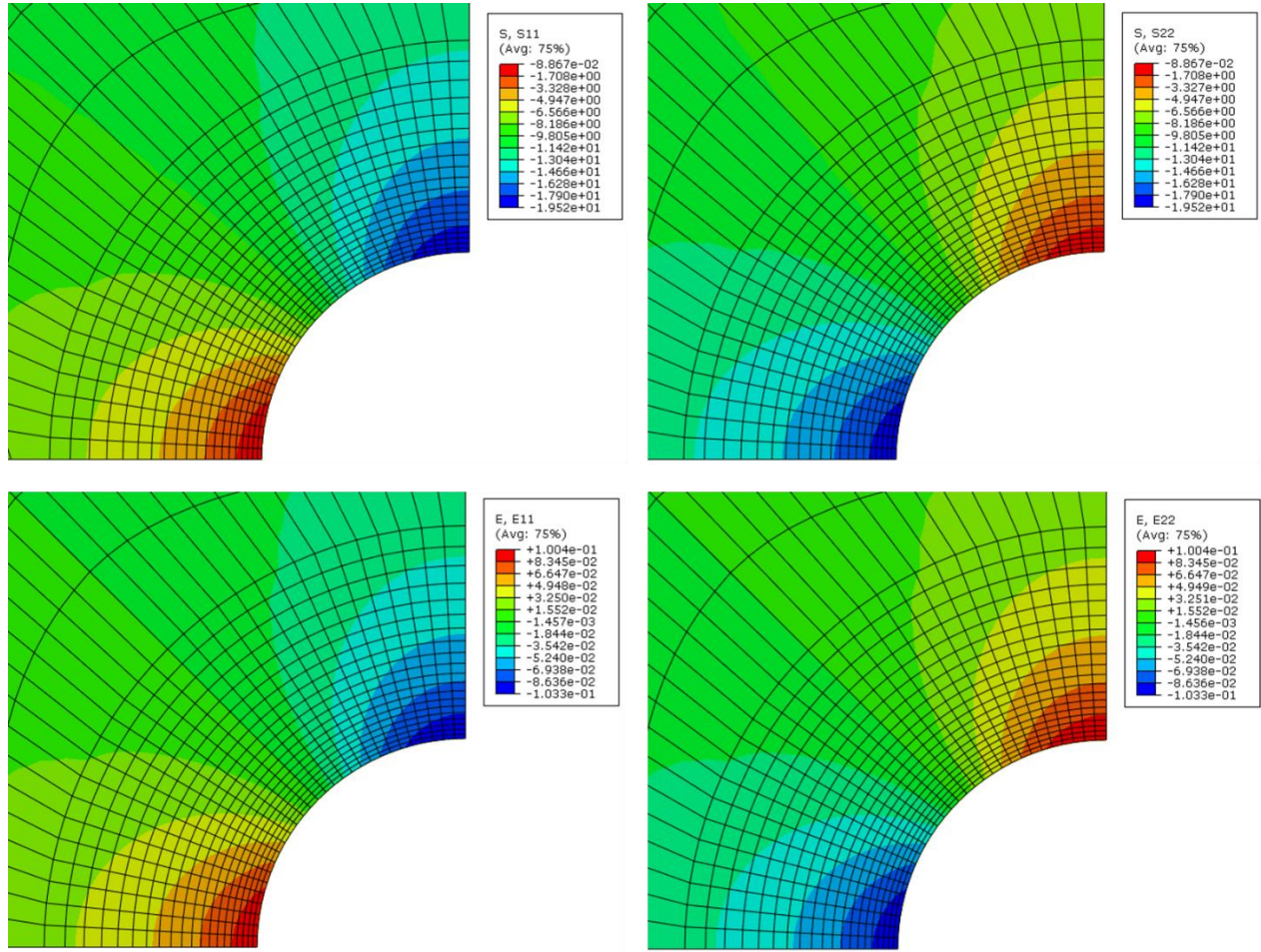
Başlangıç kısmında modele sınır koşullarının tanımlaması yapılmıştır. Elastik kısımda ise, bu kısım vizko kısmına göre son derece kısa tutulmaktadır, kaya kütleinin doğrusal elastik davranışı modellenmiş olup sonrasında modelin asıl kısmı olan vizko kısmına geçilmiştir. Elastik kısım sonunda kaya kütleinin aldığı gerilim ve gerinim değerleri analitik çözüm yöntemleriyle karşılaştırılmış ve %99.9 benzerlikte sonuçlar elde edilmiştir. Vizko aşamasında yazılıma tanımlanan zamanla sertleşen sünme yasası (time hardening creep law) kullanılmıştır. Bu aşamanın doğrulanması kısmında ise model sabitlerini bulmak için kullanılan teorik zamana bağlı tünel kapanması davranışı ile tünel cidarlarında oluşan zamana bağlı gerinim eğrileri karşılaştırılmıştır.

Tahkimatsız tünel için yapılan analizler sonunda tünel cidarlarında elde edilen deplasman değerlerini kullanarak bulunan tünel kapanması davranışının 12 aylık süre zarfında değişimi (program çıktısı) Şekil 7. 4'de sunulmuştur.



Şekil 7. 4. Oluşturulan farklı tünel modellerinde zamana bağlı kapanma davranışları

Tahkimatsız olarak açılan tünellerde vizko aşaması boyunca tavan ve yan duvarda programa tanımlandığı şekilde gerinim alması sağlanmıştır. Örnek olarak 12 aylık simülasyon sonunda %10 gerinim değerine ulaşmış tahkimatsız tünel modelinin gerilim ve gerinim değerlerine ait kontur grafikleri Şekil 7. 5'de sunulmuştur. Bu kontur grafiklerinde de görüldüğü üzere tünel tavanında oluşan gerilim ve gerinim değerlerinin sırayla yaklaşık 20 MPa (S11) ve %10 (E11) olduğu görülmektedir. Hidrostatik koşullarda model oluşturulduğu için benzer değerler yan duvarda da gözlemlenmiştir.



Şekil 7. 5. Tahkimatsız tünel modeline ait gerilim ve gerinim dağılımları (%10 gerinim, GSI 36)

Tahkimatsız yapılan analizlerin ardından alt rutinleri oluşturulmuş PİK davranışının tünel tahkimatına etkisinin incelenmesi adına tahkimatlı analizlere geçilmiştir. PİK'lerin farklı kür süreleri için oluşturulmuş alt rutinler olmasına karşın, 7 ve 14 gün modelleri bu aşamada kullanılmamıştır. Tahkimatsız tünel davranışlarında 7 ve 14 gün sonunda mevcut açıklıkların 1 sene sonunda alabileceği gerinim değerinin yaklaşık %70'ini almıştır. Bu nedenle 7 veya 14 gün kür süresine sahip deneylerin modelde aktive edilme sürelerinin de gerçeğe uygun olarak 7 veya 14 gün olması gerekmektedir. 4 farklı sıkışma davranışına sahip tünellerin zemin reaksiyon eğrisi göz önüne alındığında bu kür süreleri için oluşturulan ara rutinlerin kullanılmasının işlevsiz olacağı fikrine varılmıştır.

Tahkimat analizinin simüle edilebilmesi için tahkimatı aktif olarak göreve başladığı ana kadar geçen zamanda gerçeğe uygun olarak modelin tahkimatsız davranması gerekmektedir. Yapılan analizlerde Abaqus yazılımının da önerdiği "model değiştirme yöntemi" (model change method)

kullanılmıştır. Bu yöntem kaya mühendisliği alanında sıkça kullanılan programlarda olduğu gibi tahkimatın farklı aşamalarda aktive edilmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak modelde PİK ve tünel arasındaki yapışma davranışı, bağlı (TIE) olarak modellenmiştir. Başka bir deyişle PİK'lerin gerinime bağlı olarak tünel yüzeyinden soyulması, kayması gibi bir durum değerlendirmeye alınmamıştır.

Model 5 aşamadan oluşmaktadır. Tahkimatsız analizlerde olduğu gibi ilk aşamada sınır koşulları tanımlanmış, ikinci aşamada kaya kütlelerinin elastik davranışı sağlanmıştır. Üçüncü aşamada kaya kütlelerinin, tahkimatın aktive edildiği ana kadar vizko şekilde davranması sağlanmıştır. 4. aşamada PİK'in anlık gerinim değerini alabilmesi adına PİK elastik şekilde modellenmiş olup, son aşamada ise tünel ve PİK birlikte 12 ay gerçek zamanda modellenmiştir.

Bu aşamada proje başvuru kısmında belirtilmemesine rağmen PİK kalınlığının tahkimat davranışına etkisinin de incelenmesine karar verilmiştir. Bu nedenle 5 ve 10 mm olacak şekilde iki farklı kalınlıkta PİK uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tahkimatlı oluşturulan modellerde hedef, tünel tavan ve duvarında oluşan gerinim değerlerindeki değişimleri gözlemlemektir. 4 farklı tünel davranışı için tahkimatlı ve tahkimatsız koşullarda 12 ay sonunda elde edilen gerinim değerleri ve PİK'in yüzde gerinime olan etkileri Çizelge 7. 2'de sunulmuştur. Çizelge 'de yatay, düşey ve maksimum gerinim değerleri birbirine son derece yakın olmasına rağmen ayrı ayrı sunulmuştur. Sunulan tahkimat davranışları 5 mm kalınlığına sahip PİK uygulamasına aittir.

Gerçekleştirilen analizler sonunda PİK ürününün en kötü kaya kütlesi özelliklerine ve en yüksek sıkışma yüzdesine sahip tünel modellerinde bile gerinim değerlerini yaklaşık olarak sadece % 0.12 azaltabildiği görülmüştür. Kaya kütlelerinin kalitesi arttıkça beklenildiği üzere PİK'lerin tahkimat desteklerinde de azalma görülmektedir.

Çizelge 7. 2. Model sonuçlarının karşılaştırılması (5mm pik uygulaması)

Tavan									
Model	ϵ_{11}		Fark (%)	ϵ_{22}		Fark (%)	ϵ_{max}		Fark (%)
	PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li	
%1	-1.1154	-1.1151	0.03	1.00423	1.00389	0.03	1.00665	1.0063	0.03
%2.5	-2.6273	-2.6256	0.07	2.48396	2.48227	0.07	2.48979	2.48809	0.07
%5	-5.2394	-5.2351	0.08	5.01678	5.01248	0.09	5.02847	5.02416	0.09
%10	-10.276	-10.263	0.12	9.98432	9.97203	0.12	10.0074	9.9951	0.12

Yanduvuar									
Model	ϵ_{11}		Fark (%)	ϵ_{22}		Fark (%)	ϵ_{max}		Fark (%)
	PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li	
%1	1.00591	1.00556	0.03	-1.1171	-1.1167	0.03	1.00664	1.0063	0.03
%2.5	2.48799	2.48629	0.07	-2.6314	-2.6297	0.07	2.48977	2.48807	0.07
%5	5.02485	5.02055	0.09	-5.2474	-5.2431	0.08	5.02842	5.02411	0.09
%10	10.0002	9.98793	0.12	-10.292	-10.279	0.12	10.0073	9.99497	0.12

PİK'in 5 mm uygulanması sonucu modellerde gözlemlenen sembolik değişimlerin ardından, arazi uygulamasında kalın olarak kabul edilen 10 mm kalınlığına sahip modellerde de aynı analizler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modellerde tünel tavanı ve yan duvarında 12 ay sonunda görülen asal, düşey ve maksimum gerinim değerleri Çizelge 7. 3'te sunulmuştur.

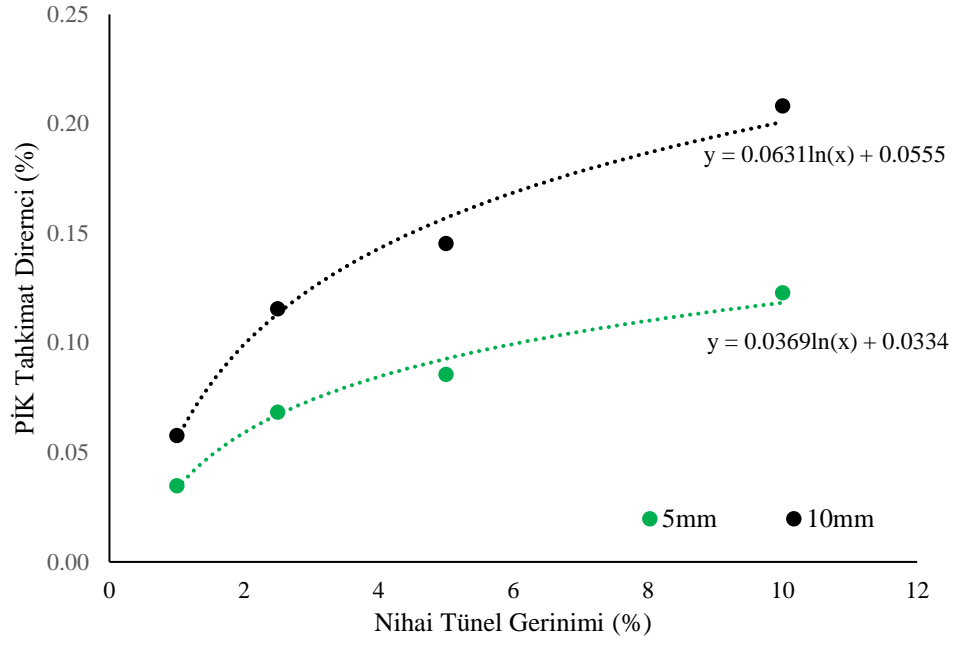
Çizelge 7. 3. Model sonuçlarının karşılaştırılması (10mm pik uygulaması)

Tavan									
Model	ϵ_{11}		Fark (%)	ϵ_{22}		Fark (%)	ϵ_{max}		Fark (%)
	PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li	
%1	-1.1154	-1.1148	0.05	1.00423	1.00365	0.06	1.00665	1.00607	0.06
%2.5	-2.6273	-2.62437	0.11	2.48396	2.4811	0.12	2.48979	2.48692	0.12
%5	-5.2394	-5.23194	0.14	5.01678	5.0095	0.15	5.02847	5.02118	0.15
%10	-10.276	-10.2548	0.20	9.98432	9.96354	0.21	10.0074	9.98658	0.21

Yanduvar									
Model	ϵ_{11}		Fark (%)	ϵ_{22}		Fark (%)	ϵ_{max}		Fark (%)
	PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li		PİK'siz	PİK'li	
%1	1.00591	1.00533	0.06	-1.1171	-1.1164	0.05	1.00664	1.00606	0.06
%2.5	2.48799	2.48512	0.12	-2.6314	-2.6284	0.11	2.48977	2.4869	0.12
%5	5.02485	5.01756	0.15	-5.2474	-5.2400	0.14	5.02842	5.02113	0.15
%10	10.0002	9.97942	0.21	-10.292	-10.270	0.20	10.0073	9.98645	0.21

10 mm PİK kalınlığında yapılan analizler sonunda da PİK ürününün global olarak tünel stabilitesine katkı sağladığı gözlemlenememiştir. En kötü kaya kütlesi özelliklerine ve en yüksek sıkışma yüzdesine sahip tünel modellerinde bile gerinim değerlerini yaklaşık olarak sadece % 0.21 azaltabildiği görülmüştür. 12 ay sonunda yapılan karşılaştırmalar dışında davranışsal olarak tahkimatsız ve PİK tahkimatına sahip modellerin karşılaştırması da yapılmış ancak ayırt edici sonuçlar elde edilememiştir.

PİK'in farklı tünel davranışlarında ve farklı uygulama kalınlıklarında kaya kütlesi gerinimini azalabilme özelliği grafiksel olarak Şekil 7. 6'da sunulmuştur.



Şekil 7. 6. P1K global tahkimat özelliği

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

TÜBİTAK tarafından desteklenen 115M581 nolu “*Farklı Püskürtülen İnce Kaplamaların Sünme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sayısal Modellenmesi*” başlıklı proje kapsamında, öncelikli olarak PİK’lerin tahkimat mekanizmasını, laboratuvar ve sayısal çalışmalarını içeren kapsamlı bir kaynak taraması yapılmıştır. Ardından sünme deney düzeneği hazırlanmış, uygun numune hazırlama şekli ve geometrisi tayin edilerek iki farklı PİK ürününün oda sıcaklığındaki sünme özellikleri laboratuvar ortamında en az 3 farklı kür süresi ve 4’er farklı sabit gerilim değerleri için belirlenmiştir. Belirlenen bu özellikler yardımı ile PİK’lerin askıda kalan kama bloklarını taşıma davranışlarının zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Sonrasında PİK’lerin sünme davranışları matematik-mekanik modele oturtulmuş ve sayısal olarak farklı kaya kütlesi özelliklerine sahip dairesel açıklık tahkimatı modellenmesinde zamana bağlı tahkimat özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda yürütülen proje çalışmasının farklı aşamalarında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Numune hazırlama sürecine ilişkin sonuçlar ve öneriler;

- PİK’lerin karışım süresi ve hızı mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yüksek hızlı karıştırma hava kabarcıklarına, yavaş hızda karıştırma işlemi ise topaklanmaya sebep olabilir.
- Deneyleri gerçekleştirilen PİK ürünleri için optimum karıştırma süresi ve karıştırma hızı 6 dak. ve 120 dev/dak. olarak bulunmuştur.
- PİK’lerin farklı kimyasal bileşenleri nedeniyle numunelerde büzüşme davranışları gözlemlenebilir, Saha uygulamalarında, bu davranış ihmal edilmemeli ve yapılan çalışmalarda PİK’lerin nihai kalınlık değerleri kullanılmalıdır.
- Kesme aparatı tekniği, kalıba döküm tekniğine göre daha homojen ve temsili PİK numunelerinin hazırlanmasında tercih edilmelidir. Kesme aparatı ve kalıba döküm tekniği ile hazırlanan numunelerin elastik malzeme özellikleri incelendiğinde, kesme aparatıyla hazırlanan numunelerde tekrarlanan testler arasında daha az standart sapma değerleri elde edilmiştir.

Laboratuvar deneylerine ilişkin elde edilen sonuçlar ve öneriler;

- Sünme deneyleri gerçekleştirilen PİK ürünleri sünme davranışına karşı son derece duyarlıdır. Bu nedenle kopma dayanımı parametresi kesinlikle bir tasarım parametresi

olarak kabul edilmemelidir. Ayrıca mevcut sünme davranışları kür süresine bağlı olarak keskin değişimler göstermektedir.

- Sunulan sünme uyumluluğu grafiklerine göre her iki PİK ürünü de doğrusal olmayan sünme davranışı göstermektedir.
- Yaklaşık 18 ay süren laboratuvar çalışmalarına göre numunelerin kopma anında aldıkları sünme gerinimi değerlerinin ve kopma zamanlarının son derece değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Kopma anında numunelerin aldığı toplam gerinim miktarları % 60 ile %3 arasında değişmekte olup, kopma süresi ise kür süresi ve uygulanan gerilim değerine bağlı olarak 2 dakika ile 2 ay arasında değişmektedir.
- PİK-1 için aynı gerilim oranlarında kür süresi arttıkça kopma zamanı azalırken PİK-2 için tam tersi bir davranış gözlemlenmiştir. Numunelerin kopma anındaki gerinim değerleri kür süresiyle ters orantılı olarak değişmektedir.
- PİK-1 ürününe ait 1, 7, ve 14 gün deneylerinde 24 numunenin 22'si belirlenen test süresinde (2 ay) kopma davranışı göstermiştir. Ürün çekme dayanımının % 40'ına tekabül eden yüklerde bile 10 günden kısa sürede kopmuştur. PİK-2'ye ait kopma anındaki dayanım değerinin %20'sine tekabül eden sünme deneylerinde kopma davranışı 2 aylık test süresinin uzatılmasına rağmen meydana gelmemiştir. Ayrıca 14 gün kür süresine sahip numunenin dayanım değerinin % 40'ına sahip yük altında yaklaşık 2 ay gergi altında kalabildiği görülmüştür. PİK-2 ürününün görece daha düşük çekme ve uzama kapasitesi olmasına rağmen, PİK-1'e göre akma davranışına görece daha az duyarlı olduğu ve bu durumun arazi uygulamalarında, kama blokların gergi durumuna getirdiği kaplamalarda, PİK-2 ürününün daha verimli olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Sünme duyarlılığının azalmasının PİK'lerin arazi uygulamalarında avantaj olarak değerlendirileceği düşünülmektedir.
- Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sünme kopma zarfları ürünlerin uzun dönem performanslarının değerlendirilmesinde ve kullanım ömürlerinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle PİK ürünlerinin farklı kür süreleri için ayrı ayrı kopma zarfları oluşturulmuştur. Sunulan bu kopma zarfları ile araştırmacılar ve tasarım mühendisleri PİK'lerin maruz kaldıkları gerilim değerlerini kullanarak kopma zamanını tahmin edebileceklerdir.
- PİK'lerin yer altı uygulamalarında gergi altında taşıyabileceği blokların boyutları esas alınarak yapılan çalışmada, belli kabuller yapılarak, düzgün dörtyüzlü ve küp geometrisine sahip olduğu varsayılan kama blokların eşit kenarlar uzunluklarının PİK performansına

etkisi incelenmiş ve abaklar oluşturulmuştur. Buna göre PİK-1'in 1 metre kenar uzunluğuna sahip düzgün dörtyüzlü blokları taşıyabileceği tahmin edilmektedir. Bu ürünün 14 gün ve sonrasındaki kür süresinde 5 seneye kadar taşıyabileceği en büyük küp bloğun hacminin 0.125 m^3 olabileceği düşünülmektedir. Öte yandan 14 gün kür süresine sahip PİK-2'nin 1.5 metre kenar uzunluğuna sahip düzgün dörtyüzlü blokları 3 seneye kadar taşıyabileceği tahmin edilmektedir. Bu ürünün 14 gün ve sonrasındaki kür süresinde 5 seneye kadar taşıyabileceği en büyük küp bloğun hacminin 0.35 m^3 olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca PİK'lerin 1 m^3 bloğu taşıma gibi bir yetisinin olmadığı da açıkça görülmektedir.

Yapısal modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve öneriler;

- Viskoplastik modelleme yönteminde gerilim değeri yüksek model çalışmalarında son derece tutarlı sonuçlar elde edilmesine karşın, düşük gerilim değerlerinde gerilim-zaman ilişkisi asimptotik bir yaklaşım sergilediği için bu yöntem yetersiz kalmıştır.
- PİK-2 ürününün sünme deneyleri sırasında gerilim geri kazanım davranışı gözlemlenmiştir. Bu nedenle tipik viskoplastik modelleme yerine parçalı modeller ile zamana bağlı gerilim davranışları simüle edilmiştir.
- Viskoplastik modelleme yöntemi, viskoelastik modelleme yöntemine göre daha pratik olmasına rağmen viskoelastik yöntemde daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sebeple yapılan çalışmanın sonraki aşamaları olan modellerin bilgisayar rutinine kodlanması ve sayısal modelleme aşamalarında Viskoelastik model yaklaşımından elde edilen değerler kullanılmıştır.
- Viskoelastik yöntemde model sabitleri sayısı modelden modele farklılık göstermektedir. Bu durumun temel sebebi deney sürelerinin ve dolayısıyla gecikme zamanlarının (retardation time) değişkenlik göstermesidir.

Yapısal modellerden altrutin oluşturulması aşamasına ilişkin sonuçlar ve öneriler;

- Deney sonuçlarından elde edilen anlık modül değerleri aynı kür süresi için değişkenlik gösterdiğinden bu değişimler farklı fonksiyonlar ile tanımlanması, durumun modellenebilmesi adına USDFLD alt rutini oluşturulması gerekmektedir.

- Kullanıcı alt rutini aşamasında PİK ürünlerinin değişken kür sürelerinde son derece farklı davranışlar sergilemesinden dolayı her kür süresi için farklı rutinler oluşturulmuştur.
- Alt rutinlerin doğrulanması işleminde deney simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlardan elde edilen davranışlar deney ve yapısal model sonuçları ile karşılaştırılmış ve alt rutinin çalıştığından emin olunmuştur. Ayrıca deneylerin yapılmadığı gerilim değerleri için de simülasyonlar yapılarak farklı gerilim aralıklarında da alt rutinin gerçeğe uygun sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Sonlu elemanlar dairesel kesitler analizleri aşamasında elde edilen sonuçlar ve öneriler;

- Zamanla sertleşen sünme yasası ile değişken kaya kütlesi davranışları yazılıma pratik biçimde tanımlanabilmektedir. Bu modelleme davranışı tünellerin zamana bağlı kapanma davranışlarında gerçekçi sonuçlar vermekte olup bu alanda çalışan araştırmacılara önerilmektedir.
- Tünelde zamana bağlı oluşan sıkışma davranışları PİK'lerin global ölçekteki tahkimat mekanizmasına doğrudan etki etmektedir. Yüksek sıkışma davranışına sahip tünellerde PİK'lerin tahkimat anlamında yaptıkları iş daha yüksektir.
- 5 mm uygulama kalınlığına sahip PİK'lerin en kötü kaya kütlesi özelliklerine ve en yüksek sıkışma yüzdesine sahip tünel modellerinde bile gerilim değerlerini yaklaşık olarak sadece % 0.12 azaltabildiği görülmüştür. Arazi uygulamasında kalın olarak kabul edilen 10 mm kalınlığına sahip modellerde de etkin bir tahkimat davranışı gözlemlenememiştir.
- PİK'lerin global ölçekte sağladıkları tahkimat desteğinden ziyade, blok boyutunda sağladıkları tahkimat mekanizmasının sayısal olarak modellenmesi çalışması ile PİK'lerin zamana bağlı tahkimat davranışlarının daha iyi anlaşılabilceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Archibald, J. F., Lausch P. 1999. "Thin spray-on linings for rock failure stabitization". Proc. 37th US Rock Mechanics Symp., Vail. Rock Mechanics for Industry, Balkema, Rotterdam, 617-624.

Archibald, J. F. Espley S.J. St. Lausch P. 1997. "Field and laboratory response of mineguard spray-on polyurethane liners". Proc. Int. Symp. on Rock Support, Lillehammer, pp. 475-490.

Archibald, J. F., ve Degagne D.O. 2000. "Recent Canadian advances in the application of spray-on polymeric linings", Mining Health and Safety Conference, Sudbury, Ontario.

Archibald, J. F., ve Dirige PA. 2006. "Thin spray-on lining applications for rockburst, blast and fire damage mitigation". Proceedings of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium.

ASTM Standard D-2990. 2010. "Standard test methods for tensile, compressive, and flexural creep and creep-rupture of plastics". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. DOI: 10.1520/D2990-09.

ASTM Standard D-638-1., 2010. "Standard test method for tensile properties of plastics-1," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA DOI: 10.1520/D0638-10

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.

EFNARC, 2008. "Specification and guidelines on thin spray-on liners for mining and tunneling". http://www.efnarc.org/pdf/ENC%20250TSL%20v7.2%2025-07-08_r1.pdf. ENC 250TSL v7.2 25-07-08. Son erişim tarihi: 15 Ekim 2018.

Esterhuizen, A. P., Bosman, J. D. 2009. "Practical experience with the use of thin sprayed liners at two rivers platinum mine", 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville

Findley, W. N., Lai. J. S., Onaran K.1989. Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials. New York: Dover Publications.

Guner, D. (2014). Experimental and numerical analysis of effect of curing time on mechanical properties of thin spray-on liners (yüksek lisans tezi, ODTÜ).

Guner, D., Ozturk H. 2016. "Experimental and numerical analysis of the effects of curing time on tensile mechanical properties of thin spray-on liners." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49.8. 3205-3222.

Guner, D., Ozturk H. 2018. "Creep behaviour investigation of a thin spray-on liner". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108, 58-66.

Hannon, A., 2009 "Thin Sprayed Liners (TSLs) and a safe working place". *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Hard Rock Safe Safety Conference, Sun City*. pp. 99-114

Harding, W. 2008 "Numerical modelling of thin spray-on liners using FLAC". *Research Project, University of New South Wales, Australia*

Hoek, E., Marinos P. 2000. "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses." *Tunnels and tunnelling international* 32.11: 45-51.

Jensen, P., 2013. "Managing the engineering, health & safety aspects of thin spray-on liner application". (Yüksek lisans tezi, Luleå University of Technology. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering).

Komurlu, E., Demir D. A. 2017. "A Numerical modelling study on performance of thin spray-on (TSL) liners, 25th International Congress and Exhibition of Tukey (IMCET 2017).

Krishnaswamy, P., Tuttle, M. E., Emery, A. F., Ahmad J. 1992. "Finite element modeling of the time-dependent behavior of nonlinear ductile polymers". *Polymer Engineering & Science*, 32(16), 1086-1096.

Kuijpers, J. S., Sellers, E. J., Toper, A. Z., Rangasamy, T., Ward, T., Van Rensburg, A. J., Yilmaz, H., Stacey T. R. 2004. "Required technical specifications and standard testing methodology for thin sprayed linings". *SIMRAC Final rapor*. Research agency: CSIR Division of Mining Technology. Project No: SIM 020206, Report No-0404; 2004 <http://www.mhsc.org.za/sites/default/files/SIM%20020206%20Fin%20Report.pdf>. Son erişim tarihi: 16 Ekim 2018.

Lacerda, L., Rispin M. 2002. "Current ground support membrane applications in north american underground mines". *2nd Int. seminar on Surface Support Liners: Thin Sprayed Liners, Shotcrete, Mesh. Crowne Plaza Sandton, RSA*.

Lee, C., Chang, S. H., Lee, K., Kim D. 2015. "Numerical study on contact behavior of TSL (Thin Spray-on Liner)". Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 17(6), 665-674.

Lee, C., Kim, D., Chang, S. H., Choi, S. W., Park, B., Lee D. 2018. "Numerical approach to assessing the contact characteristics of a polymer-based waterproof membrane". Tunnelling and Underground Space Technology, 79, 242-249.

Liu, H. 2007. Material modelling for structural analysis of Polyethylene (Yüksek lisans tezi, University of Waterloo).

Lockett, F. J. 1972. Nonlinear viscoelastic solids. Academic Press.

Lukey, C. S., Baafi, E., Porter, I., Nemcik J. 2008. "Polymer-based alternative to steel mesh for coal mine strata reinforcement". 13th Australian Tunnelling Conference Melbourne, PP. 327-330.

Malan, D. F., Napier J. A. L. 2008. Numerical modelling of tunnel liner and fracture interaction. 6th. International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, SA.

Mirzamani, B., Tavassoli, M., Oraee K. 2011. "Designing shotcrete as primary support in tunnels". Proc. 30th International Conference on Ground Control in Mining, pp. 320-325.

Nater, P., Mena-Cabrera A. 2010. "Thin sprayed liners—an approach with numerical models." Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering. 445.

O'Donnell, J. D. P., Tannant D. D. 1998. "Field pull tests to measure insitu capacity of shotcrete". Canadian Institute of Mining and Metallurgy Annual General Meeting, Montreal; 1998.

Ozturk, H., Tannant D. D. 2007. "factors affecting adhesive strength of different thin spray-on liners". Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 100(1100):1-7.

Ozturk, H. 2012. "Work of adhesion of thin spray-on liners" Rock Mechanics and Rock Engineering. 1095-1102.

Ozturk, H. 2011. "Püskürtülen ince kaplamaların elastik malzeme özellikleri". Madencilik, Vol.50, No.2, 41-45.

Pappas, D. M., Barton, T. M., Eric S. W. 2003. "The long-term performance of surface support liners for ground control in a underground limestone mine". 3rd Int. Seminar on Surface Support Liners: Thin Spray-On Liners, Shotcrete and Mesh, Quebec City, Canada. Sect.22.

Potvin, Y. 2002. "Towards a common understanding of tsl applications in mines". 2nd Int. Seminar on Surface Support Liners: Thin Sprayed Liners, Shotcrete, Mesh. SAIMM, Sandton, RSA, Sect.A1,1-9.

Potvin Y. 2006. "Australian rockfall research reveals industry advancement". Canadian Mining Journal.

Pritchard, C., Swan, G., Henderson A. 1998. "Tekflex as a spray-on screen replacement in an underground hard rock mine" 18th Conference On Ground Control in Mining. 90-97.

Qiao, Q. 2015. Experimental and numerical analysis of thin spray-on liner materials for use in underground mines. (Doktora tezi, University of Wollongong)

Richardson, J., Mitra, R., Saydam S. 2009. Investigation of thin spray-on liners using numerical modeling". ARMA, American Rock Mechanics Association, Asheville

Smith, N. 2012. "The use and application of thin spray liners (TSLs) in mining". Seventh International Symposium, Rockbolting and Rock Mechanics in Mining. Aachen, Germany,197-204.

Spearing, A., J., S., Champa J. 2000. "The design, testing and application of ground support membranes for use in underground mines" Proc. MASSMIN.

Stacey, T. R. 2001. "Review of membrane support mechanisms, loading mechanisms, desired membrane performance, and appropriate test methods". J S Afr Inst Min Metall. 2001;101(7):343–351.

Swan, G., Henderson A. 1999. "Water-based Spray-on liner implementation at Falconbridge Limited. Proceedings" CIM/AGM, Calgary

Tannant, D. D., Wang, C. 2003, "Thin tunnel liners modelled with particle flow code". Engineering Computations, Vol.21, pp. 318-341.

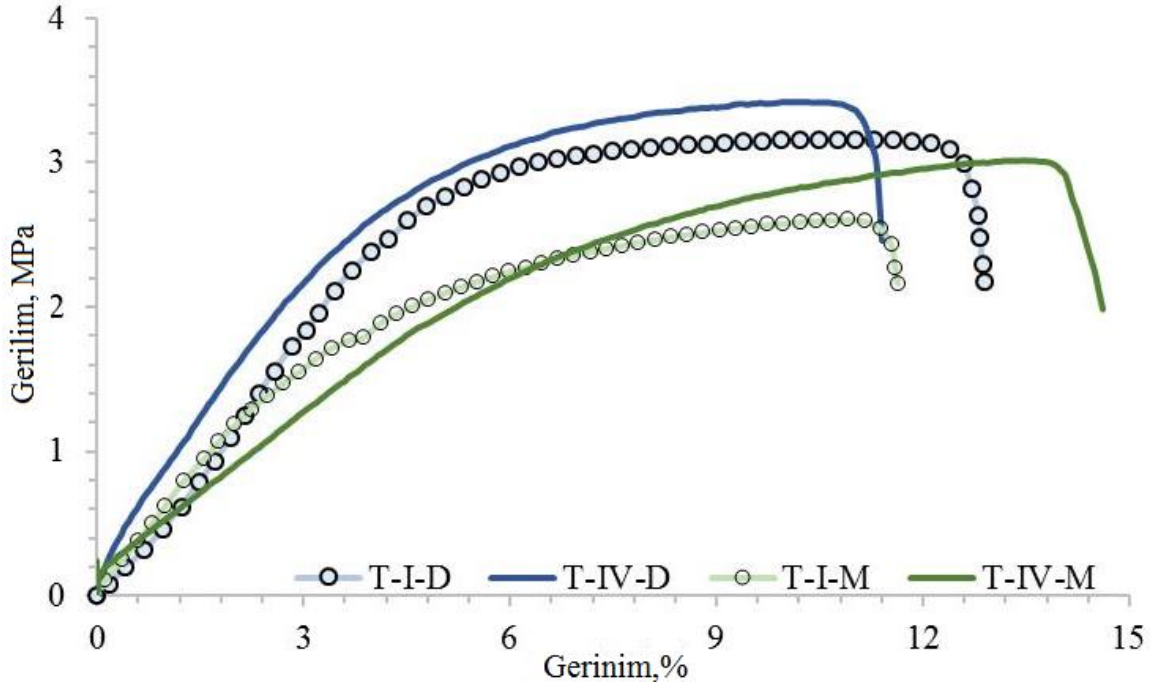
Tannat, D. D. 2001, "Thin spray-on liners for underground rock support". 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, 57-68.

- Villaescusa, E. 2014. Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping. London: CRC Press.
- Wojno, L., Kuijper J. S. 1997. "Spray-on, user friendly and flexible support for mine excavations." Proc. Int. Symp. An Rock Support, Lillehammer. 671-683.
- Yilmaz, H., Saydam, S., Topper A. Z. 2003. "Emerging support concept: thin spray-on liners". Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi,. 2003:65–72.
- Yilmaz, 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, pp. 559-569
- Yilmaz, H. 2011. Development of testing methods for comparative assessment of Thin Spray-on Liner (TSL) shear and tensile properties. (Doktora tezi, University of the Witwatersrand).
- Yilmaz, H. 2007. "Shear-bond strength testing of thin spray-on liners". J. S. Afr. Inst. Min. Metall., vol. 107, no. 8. pp. 519-530.
- Zhang, C., Moore I. D. 1997. "Nonlinear mechanical response of high density polyethylene. Part II: Uniaxial constitutive modeling". Polymer Engineering & Science, 37(2), 414-420.

EKLER

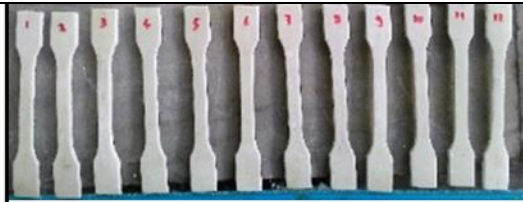
EK-1 NUMUNE GEOMETRİSİ VE HAZIRLAMA TEKNİĞİ TAYİNİ İÇİN YAPILAN ÇEKME DENEYLERİ.....	85
EK-2 PİK-1 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	90
A. PİK-1 ÇEKME DENEYLERİ.....	90
B. PİK-1 SÜNME DENEYLERİ.....	94
C. KÜR SÜRESİ- SÜNME GERİNİMİ-KOPMA ZAMANI İLİŞKİLERİ.....	113
EK-3 PİK-2 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	115
A. PİK-2 ÇEKME DENEYLERİ.....	115
B. PİK-2 SÜNME DENEYLERİ.....	118
C. KÜR SÜRESİ- SÜNME GERİNİMİ-KOPMA ZAMANI İLİŞKİLERİ.....	132
EK-4 YAPISAL MODELLEME SONUÇLARI.....	134
A. PİK-1 MODELLERİ.....	134
B. PİK-2 MODELLERİ.....	140
EK-5 HAZIRLANAN ALT RUTİNLER.....	146

EK-1 NUMUNE GEOMETRİSİ VE HAZIRLAMA TEKNİĞİ TAYİNİ İÇİN YAPILAN ÇEKME DENEYLERİ



Farklı deney setlerine ait gerilim-gerinim eğrileri

T-I-D				
Test No:	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Dayanımı (MPa)
1	3,08	62,24	13,32	2,11
2	3,20	67,74	15,69	2,14
3	3,08	80,38	12,78	2,15
4	3,17	74,46	12,87	2,21
5	3,10	63,77	13,97	2,23
6	3,20	73,67	11,30	2,25
7	3,17	69,80	13,63	2,31
8	3,15	62,48	12,54	2,32
9	3,18	72,83	11,55	2,21
10	3,20	78,54	12,61	2,24
11	3,15	71,04	12,66	2,27
12	3,12	74,21	12,22	2,31
Ort.	3,15	70,93	12,93	2,23
Std. S.	0,05	5,96	1,16	0,07



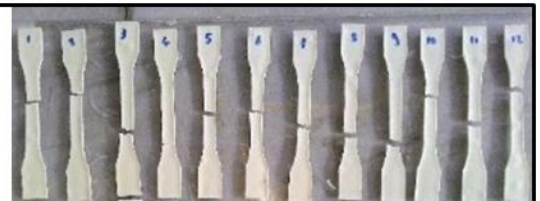
T-I-D



Test No:	T-I-M			Akma Dayanımı (MPa)
	Maks, Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (%)	
1	3,33	69,83	13,71	2,10
2	2,53	55,35	12,14	1,75
3	2,49	42,34	9,71	1,92
4	2,47	44,30	10,10	1,77
5	2,48	43,74	11,35	1,93
6	2,66	63,95	8,89	1,94
7	2,36	49,27	10,12	1,64
8	2,79	76,33	11,21	1,70
9	2,51	46,51	11,35	1,54
10	3,10	67,70	11,75	1,82
11	3,12	58,27	13,98	2,17
12	2,47	35,01	15,14	1,87
Ort,	2,69	54,38	11,62	1,85
Std, S,	0,32	12,89	1,87	0,18



T-I-M



T-IV-D

Test No:	Maks, Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Dayanımı (MPa)
1	3,34	53,58	11,75	2,74
2	3,43	49,40	12,65	2,62
3	3,56	55,97	12,11	3,02
4	3,46	59,08	12,05	2,75
5	3,53	68,15	13,41	2,68
6	3,27	66,94	10,65	2,46
7	3,42	60,84	10,47	2,75
8	3,46	59,91	12,41	2,99
9	3,33	61,02	11,19	2,57
10	3,40	57,70	12,17	2,74
11	3,41	59,98	12,25	2,74
12	3,38	60,25	10,82	2,54
Ort,	3,42	59,40	11,83	2,72
Std, S,	0,08	5,12	0,88	0,17

**T-IV-D**

T-IV-M				
Test No:	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Dayanımı (MPa)
1	2,66	31,26	16,36	1,85
2	2,85	52,01	14,09	1,85
3	2,94	58,45	14,69	1,98
4	3,16	38,25	14,50	2,23
5	3,12	56,80	13,41	1,96
6	2,64	35,58	12,10	2,40
7	2,88	28,27	14,11	2,23
8	3,01	38,90	13,40	2,29
9	2,97	36,68	14,17	2,20
10	3,52	57,72	18,40	2,24
11	2,85	33,79	15,79	2,06
12	3,22	55,75	14,25	2,61
Ort.	2,99	43,62	14,61	2,16
Std. S.	0,24	11,52	1,62	0,23



T-IV-M



EK-2 PİK-1 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

A. PİK-1 ÇEKME DENEYLERİ

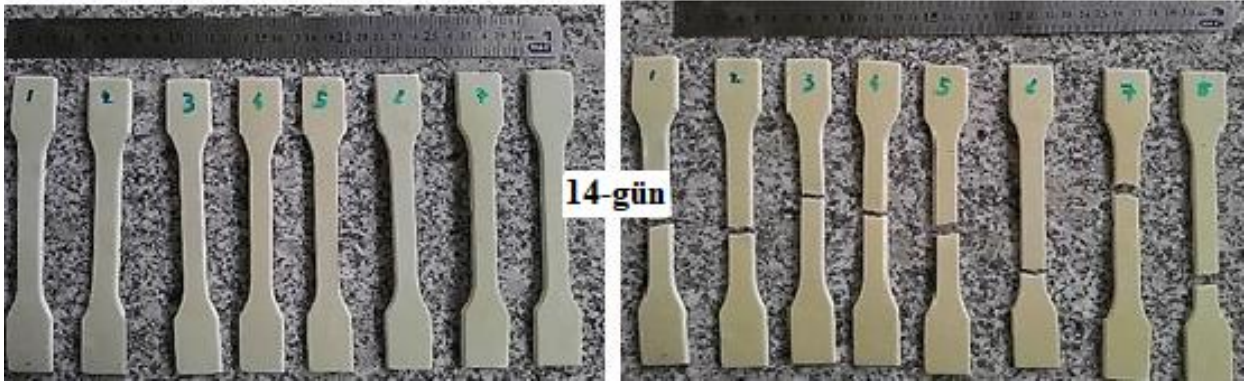
Deney No.	1-Gün	
	Yenilme Yüğü (N)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)
1	68,38	1,23
2	71,42	1,34
3	69,75	1,34
4	71,51	1,35
5	70,04	1,23
6	69,45	1,38
7	70,73	1,36
8	-	-
Ort.	70,14	<u>1,32</u>
Std. Sap.	1,08	0,06



7-Gün		
Deney No.	Yenilme Yüğü	Maks. Çekme Dayanımı
	(N)	(MPa)
1	166,08	2,99
2	161,87	2,96
3	151,47	2,82
4	164,42	2,95
5	161,08	2,88
6	160,20	2,86
Ort.	160,88	<u>2,91</u>
Std. Sap.	5,10	0,07

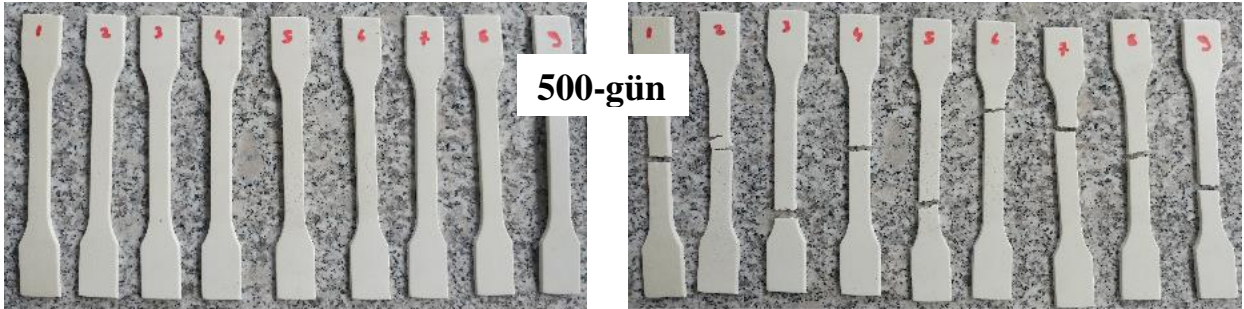


14-Gün		
Deney No.	Yenilme Yüğü	Maks. Çekme Dayanımı
	(N)	(MPa)
1	185,51	3,48
2	197,38	3,67
3	190,12	3,58
4	180,41	3,34
5	180,90	3,33
6	173,24	3,29
7	186,88	3,37
8	189,82	3,73
Ort.	185,51	<u>3,47</u>
Std. Sap.	7,65	0,15



500-Gün

Deney No.	Yenilme Yüğü (N)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)
1	188,11	3,55
2	196,40	3,71
3	192,57	3,63
4	185,17	3,49
5	198,31	3,74
6	191,30	3,61
7	198,95	3,75
8	209,15	3,95
9	206,60	3,90
Ort.	196,28	<u>3,70</u>
Std. Sap.	8,00	0,15

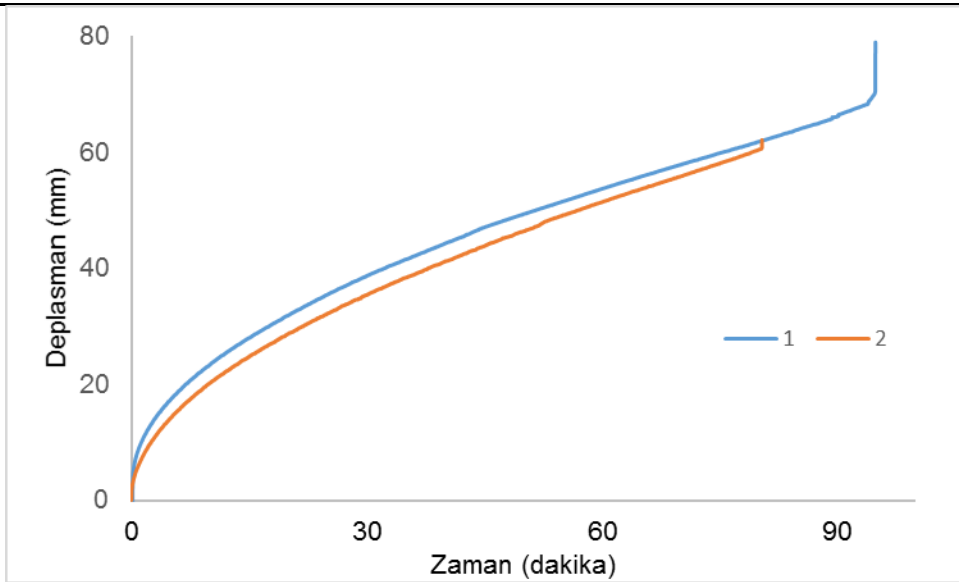


B. PİK-1 SÜNME DENEYLERİ

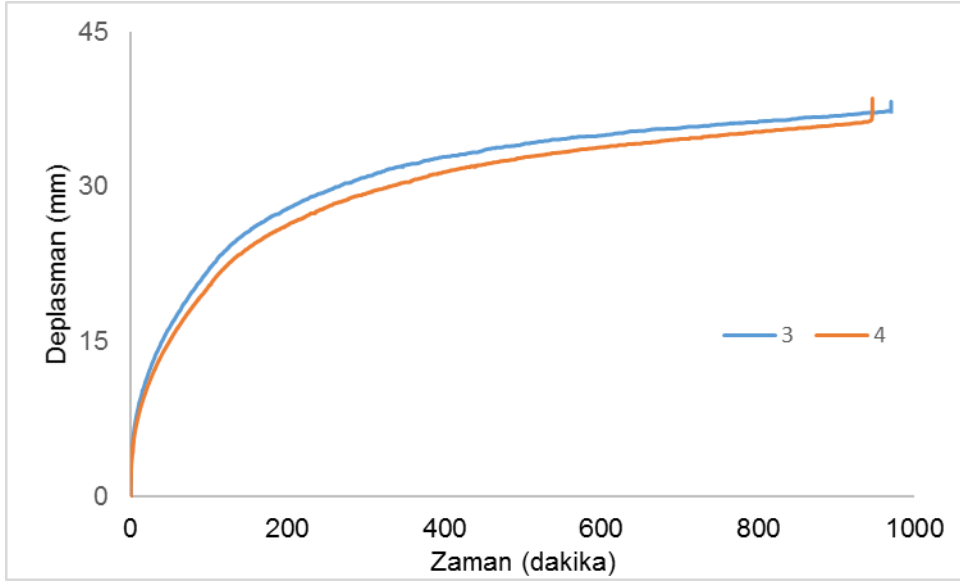
1 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

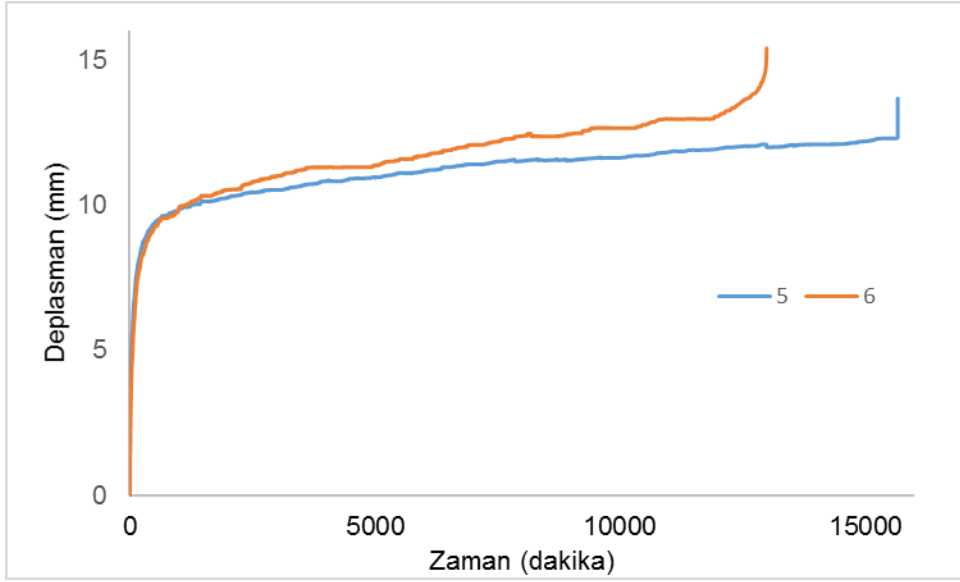
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	1-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	56,1	1,06
2	60	42,1	0,79
3	40	28,1	0,53
4	20	14,0	0,26



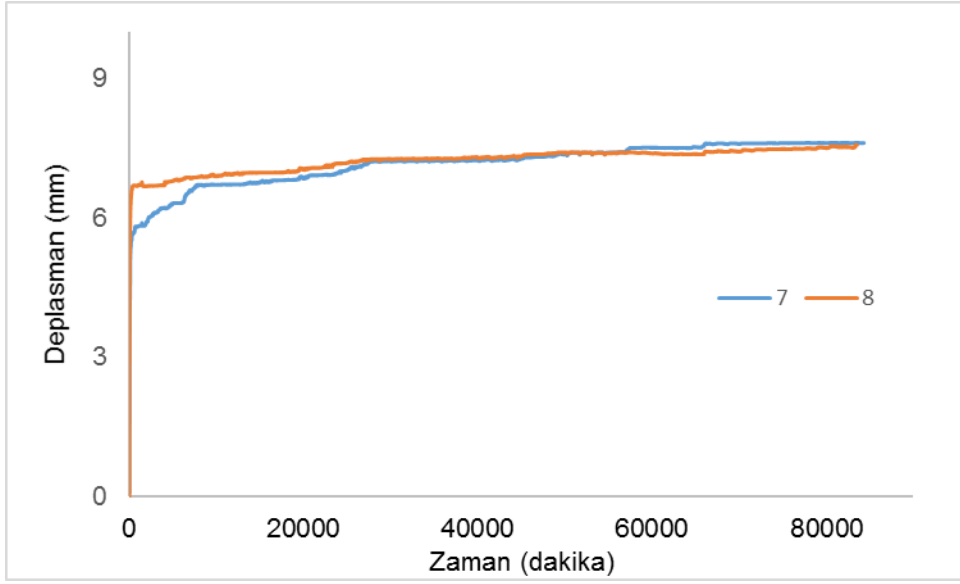
PİK-1'in %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (1-Gün)



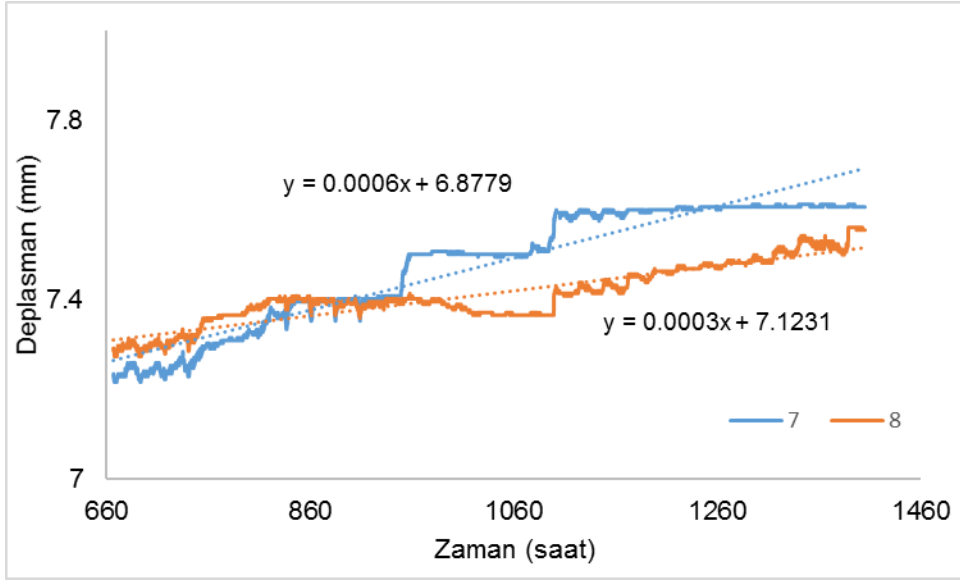
PİK-1'in %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (1-Gün)



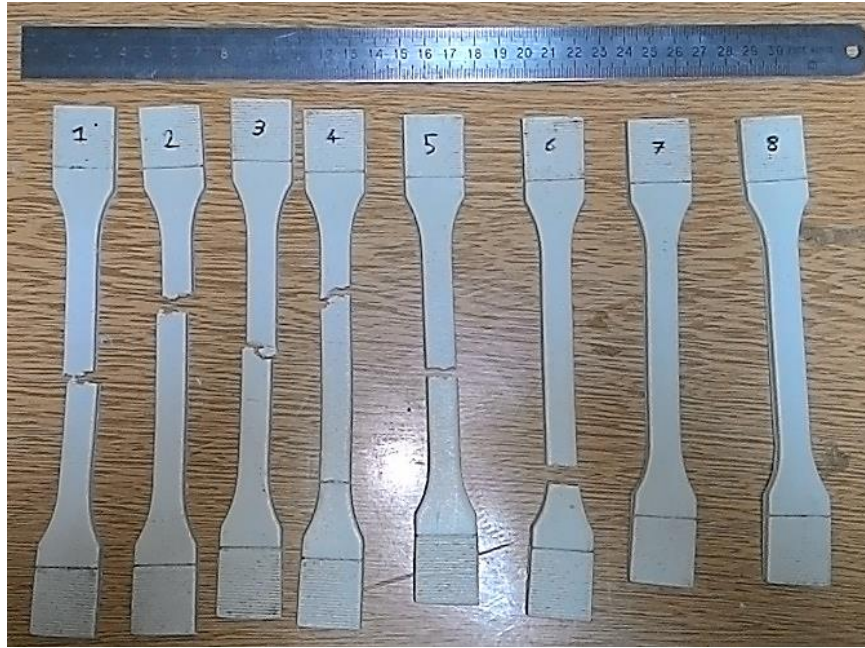
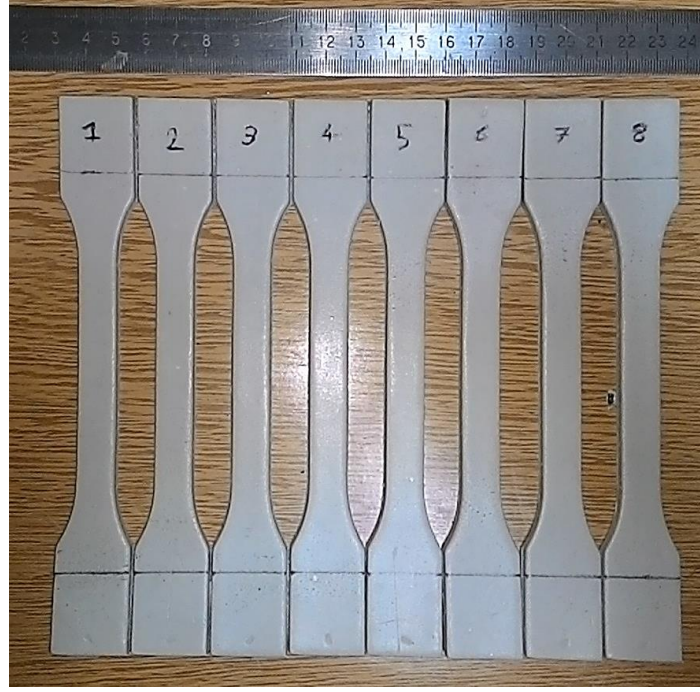
PİK-1'in %40 Gerilim Altındaki Deplasman-Zaman Grafiği (1-Gün)



PİK-1'in %20 Gerilim Altındaki Deplasman-Zaman Grafiği (1-Gün)



PİK-1'in %20 Gerilim Altında Son 30 Gün Deplasman-Zaman Grafiği (1-Gün)

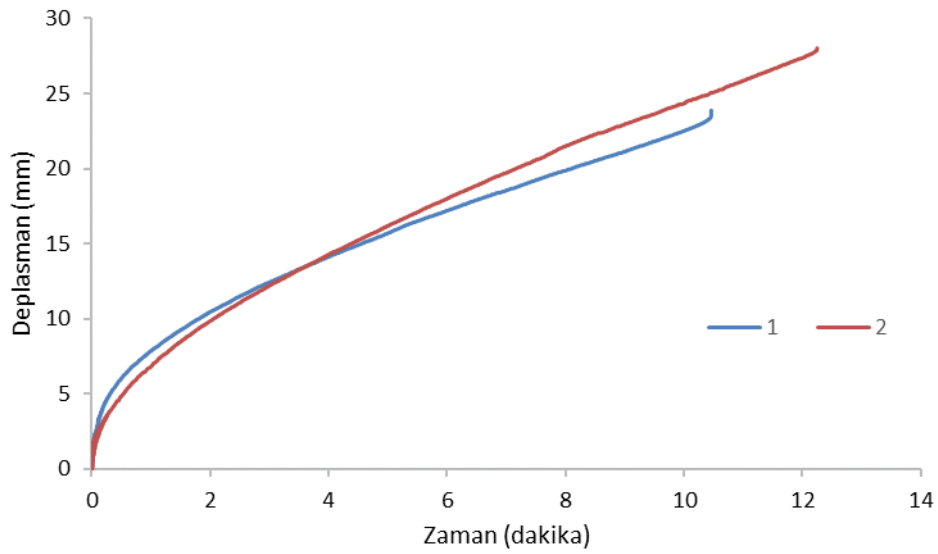


PİK-1 için Sünme Deney Numunelerinin Fotoğrafları (1-Gün)

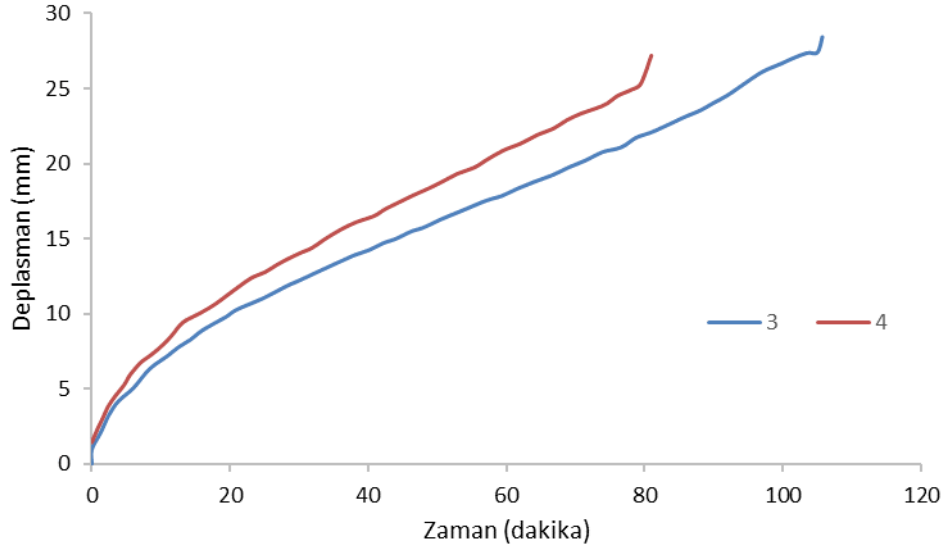
7 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

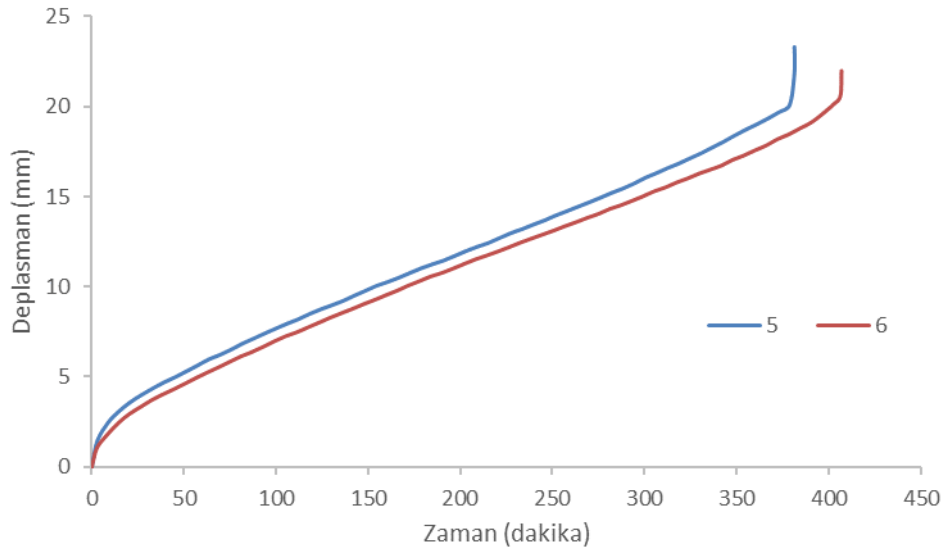
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	7-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	128,7	2,33
2	60	96,5	1,75
3	40	64,4	1,16
4	20	32,2	0,58



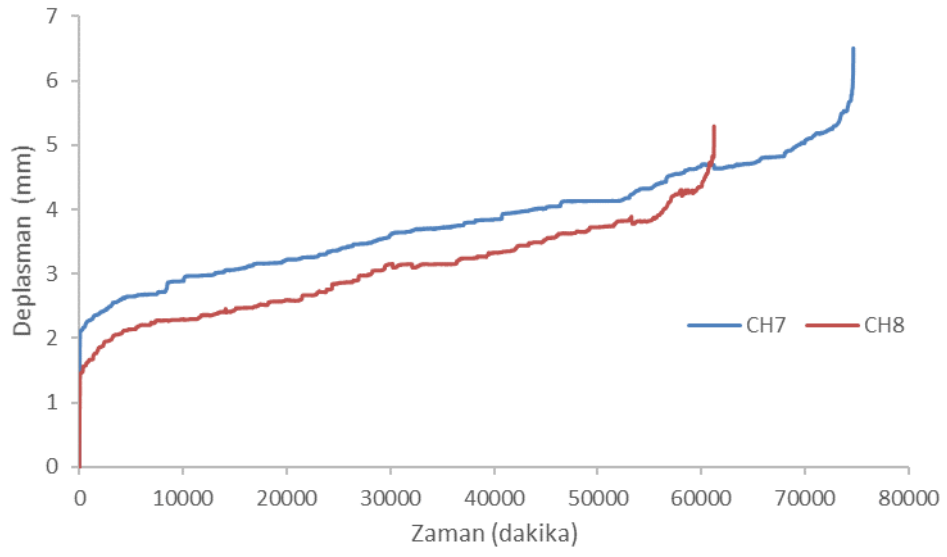
PIK-1'in %80 gerinim altındaki deplasman-zaman grafiği



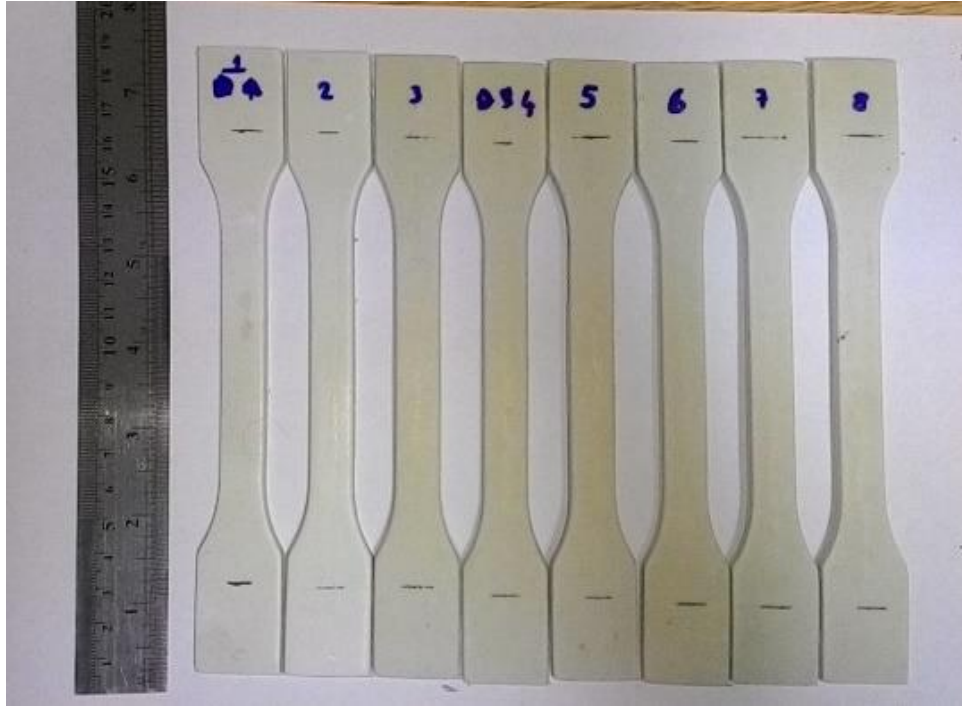
PIK-1'in %60 gerinim altındaki deplasman-zaman grafiği



PIK-1'in %40 gerinim altındaki deplasman-zaman grafiği



PİK-1'in %20 gerinim altındaki deplasman-zaman grafiği

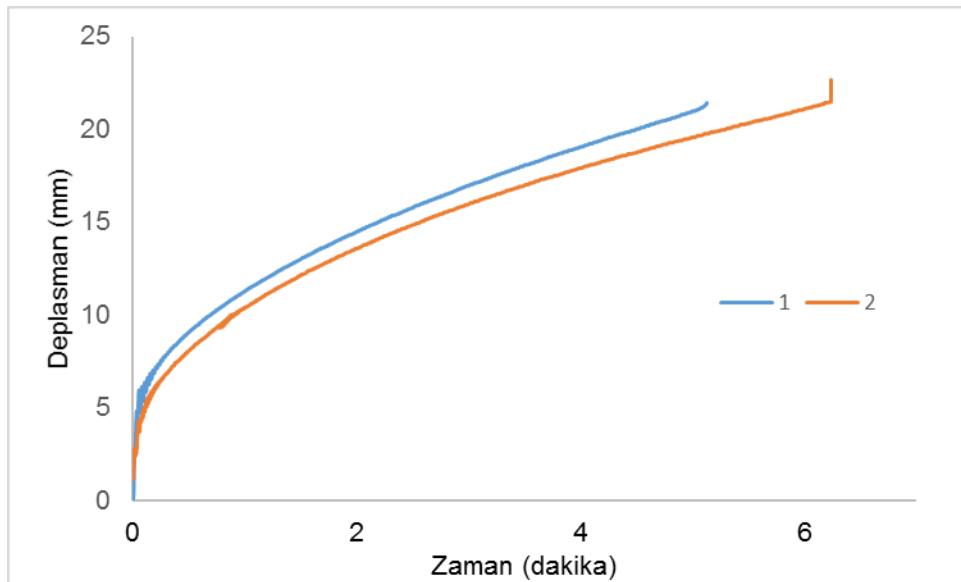


PİK-1 için sünme deney numunelerinin fotoğrafları (7-gün)

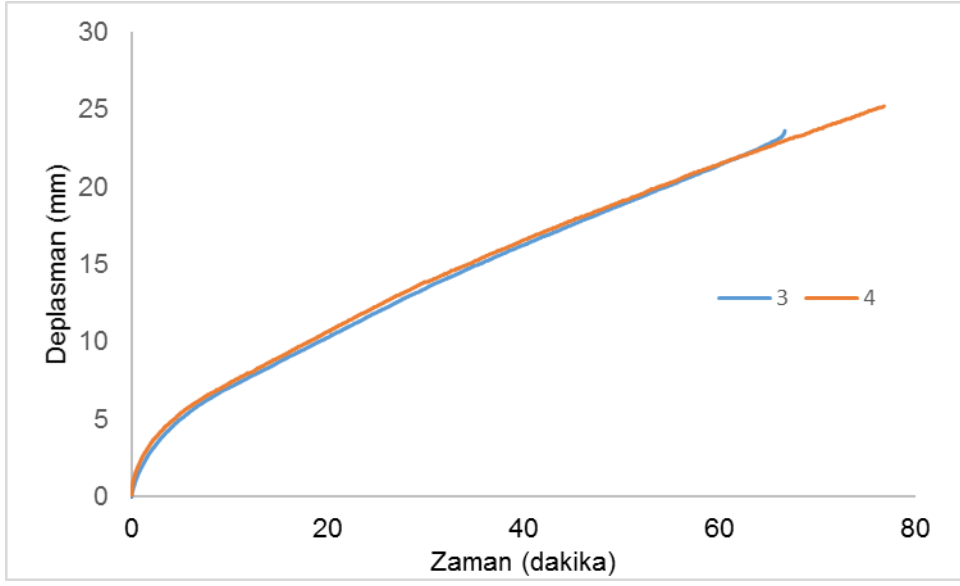
14 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

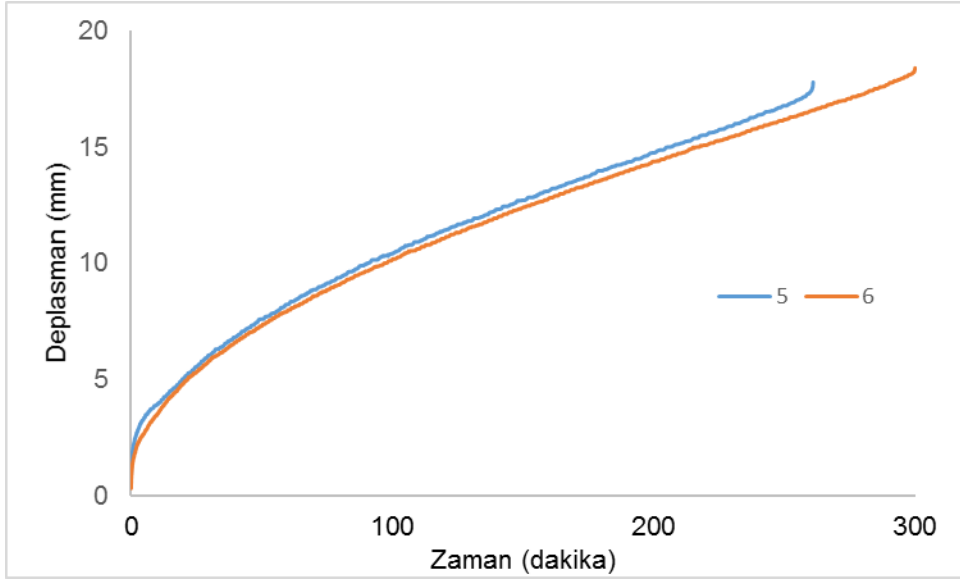
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	14-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	148,4	2,78
2			
3	60	111,3	2,08
4			
5	40	74,3	1,39
6			
7	20	37,1	0,69
8			



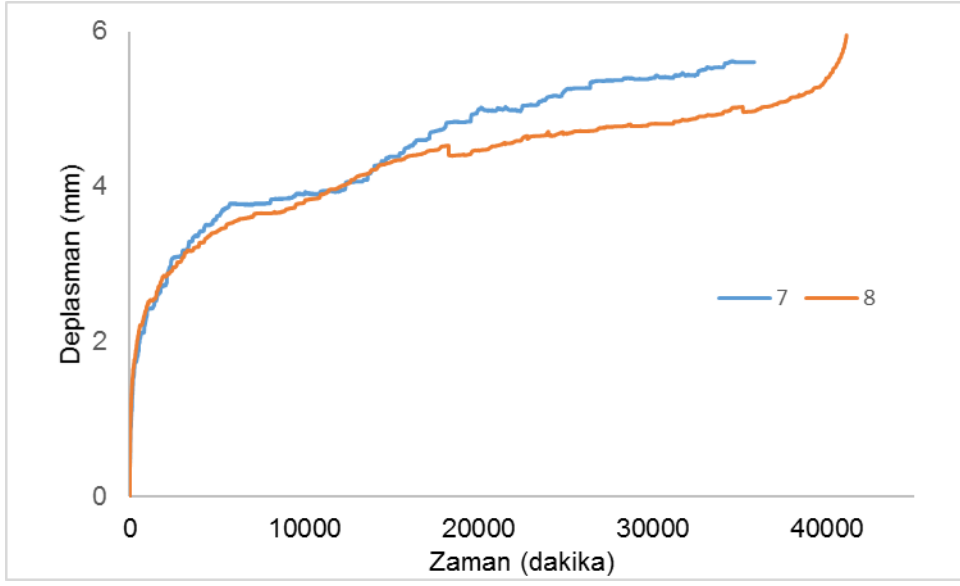
PİK-1'in %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



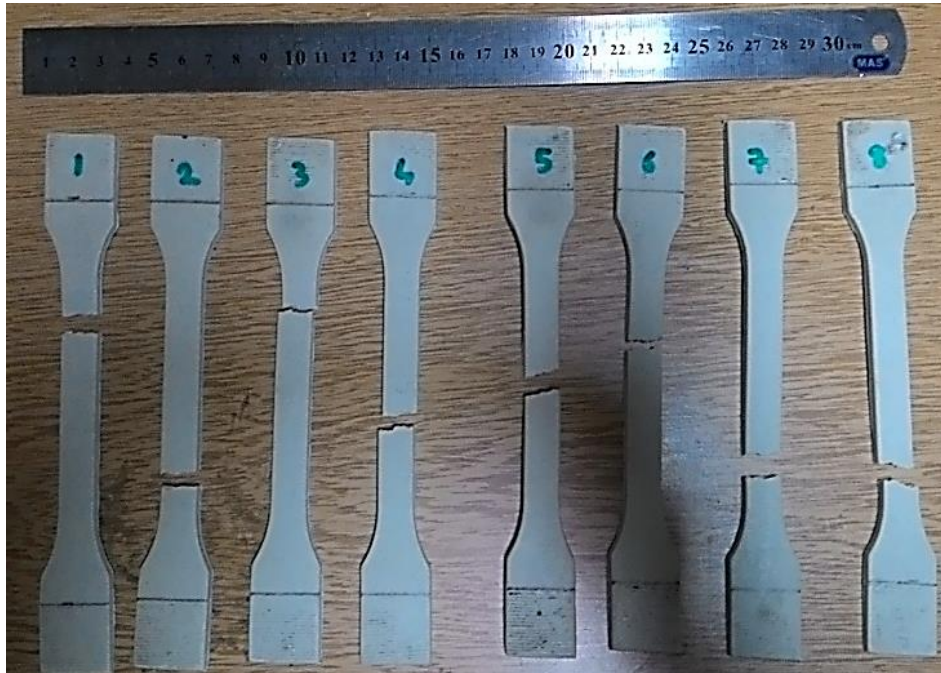
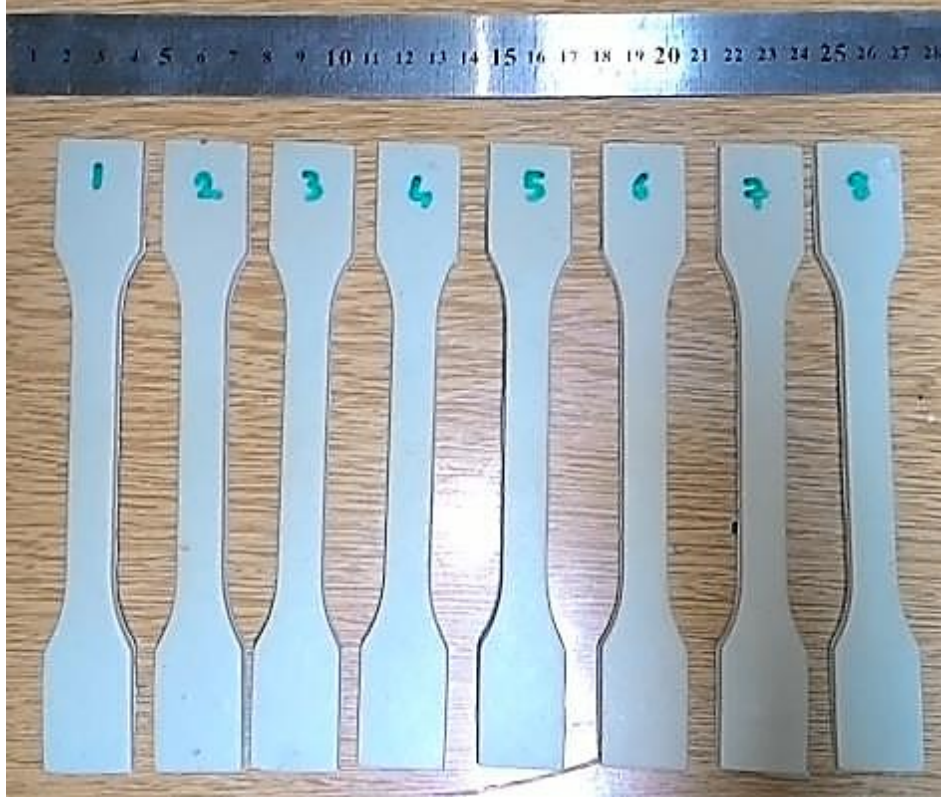
PIK-1'in %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



PIK-1'in %40 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



PİK-1'in %20 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)

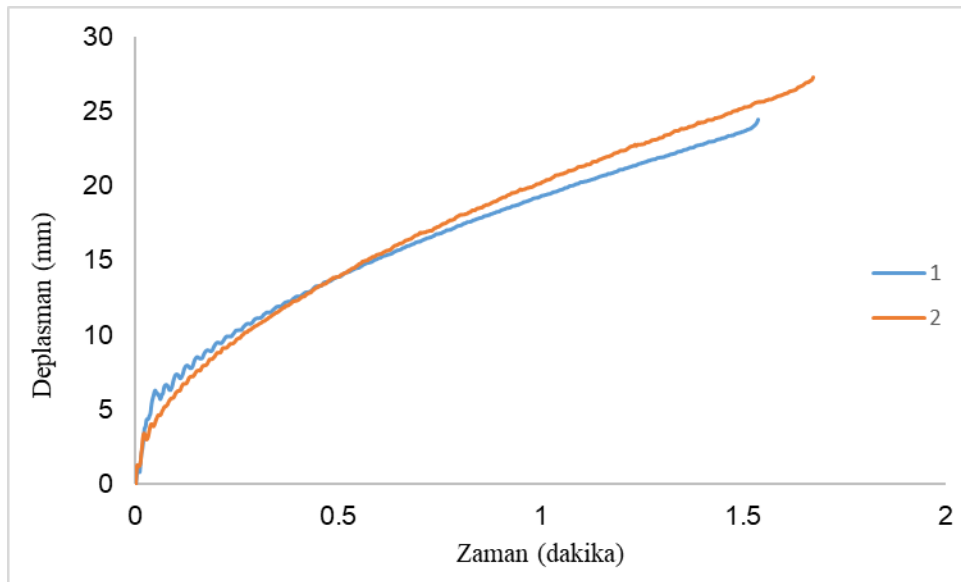


PIK-1 için sünme deney numunelerinin fotoğrafları (14-Gün)

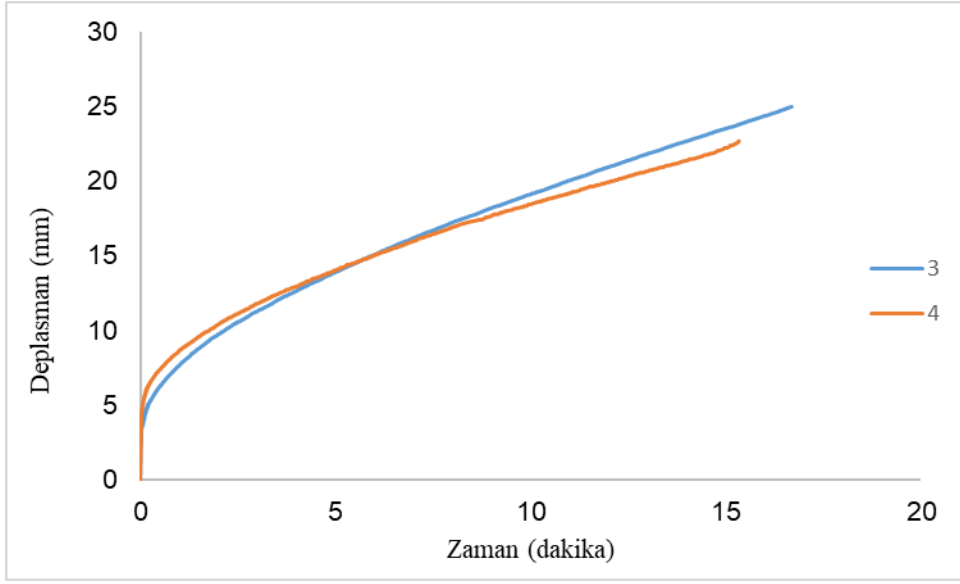
500 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

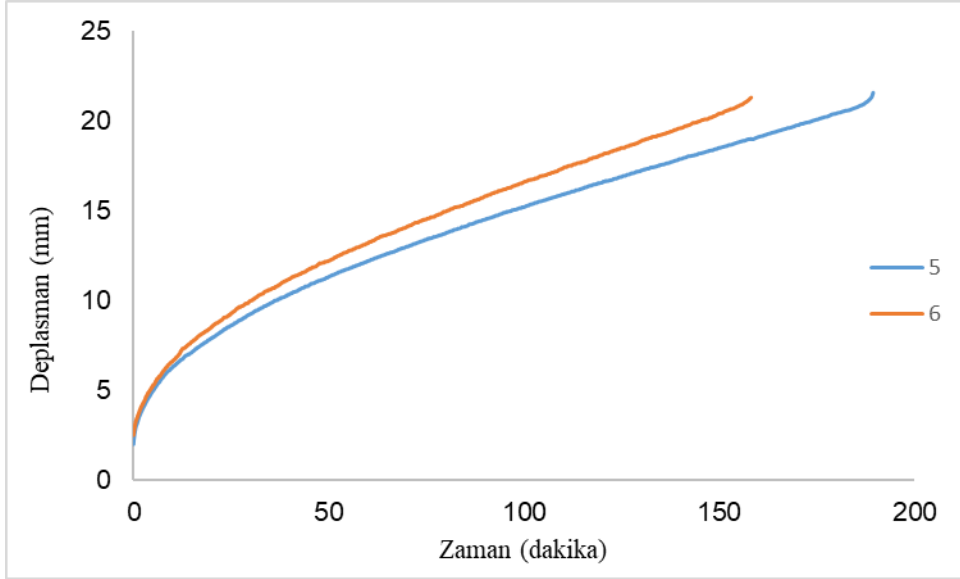
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	14-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	157,0	2,96
2	60	117,8	2,22
3	40	78,5	1,48
4	20	39,3	0,74



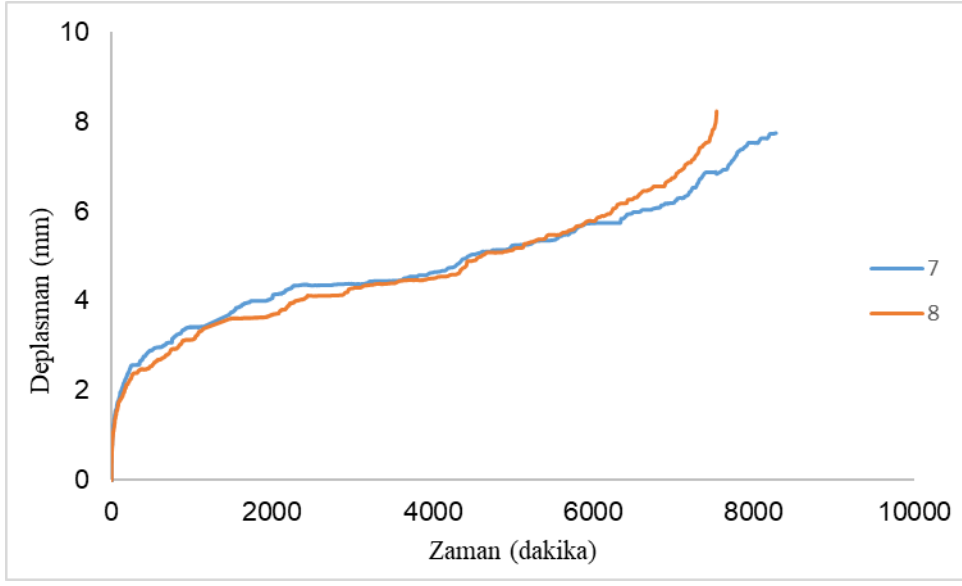
PİK-1'in %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (500-Gün)



PİK-1'in %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (500-Gün)



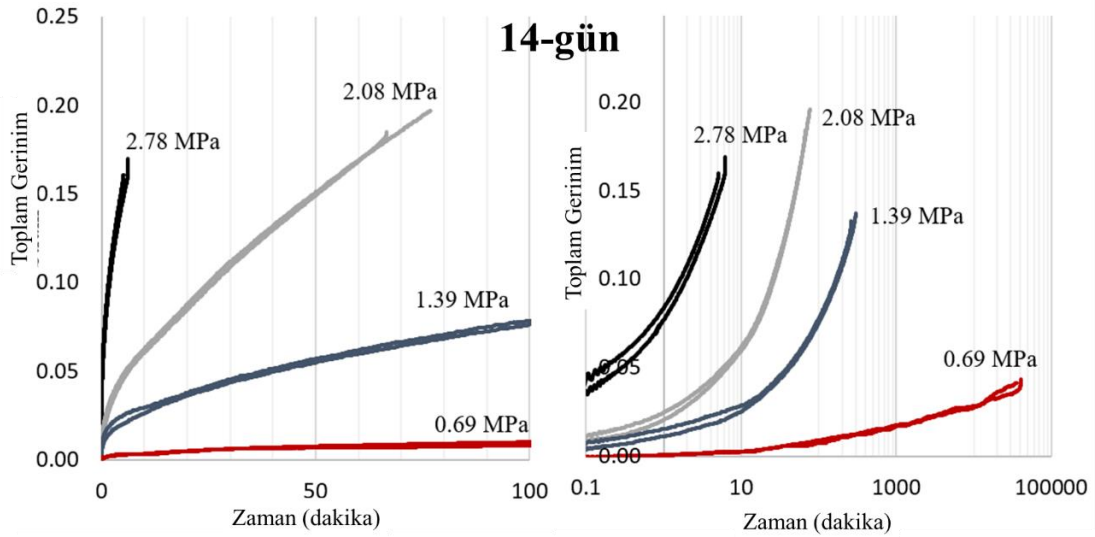
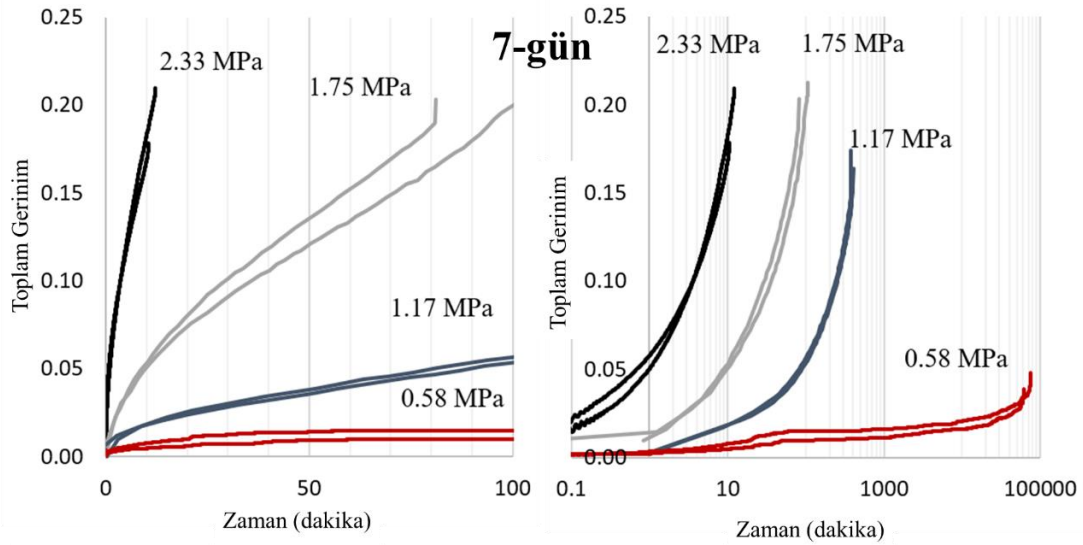
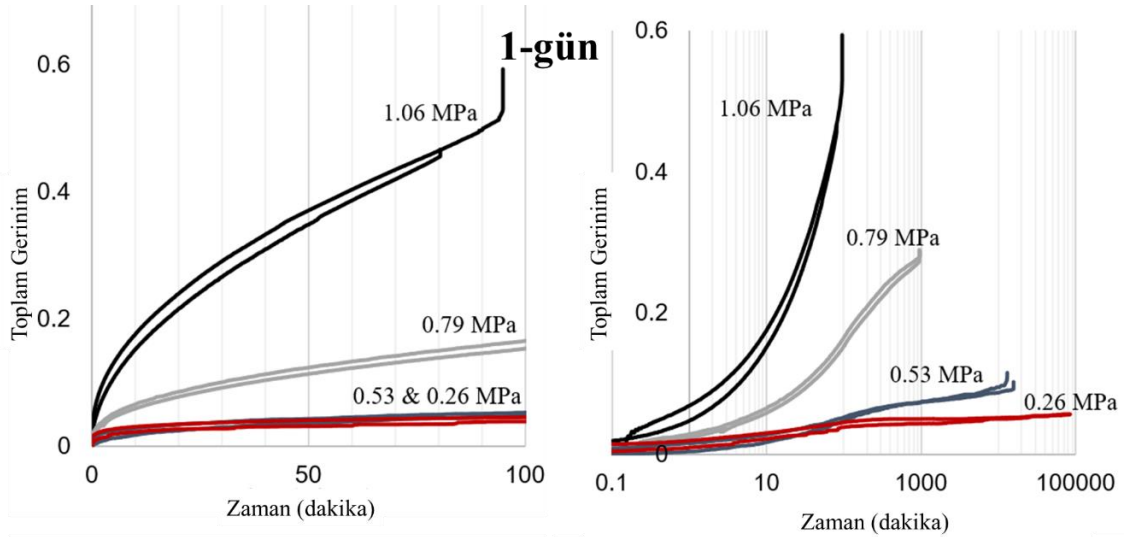
PİK-1'in %40 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (500-Gün)



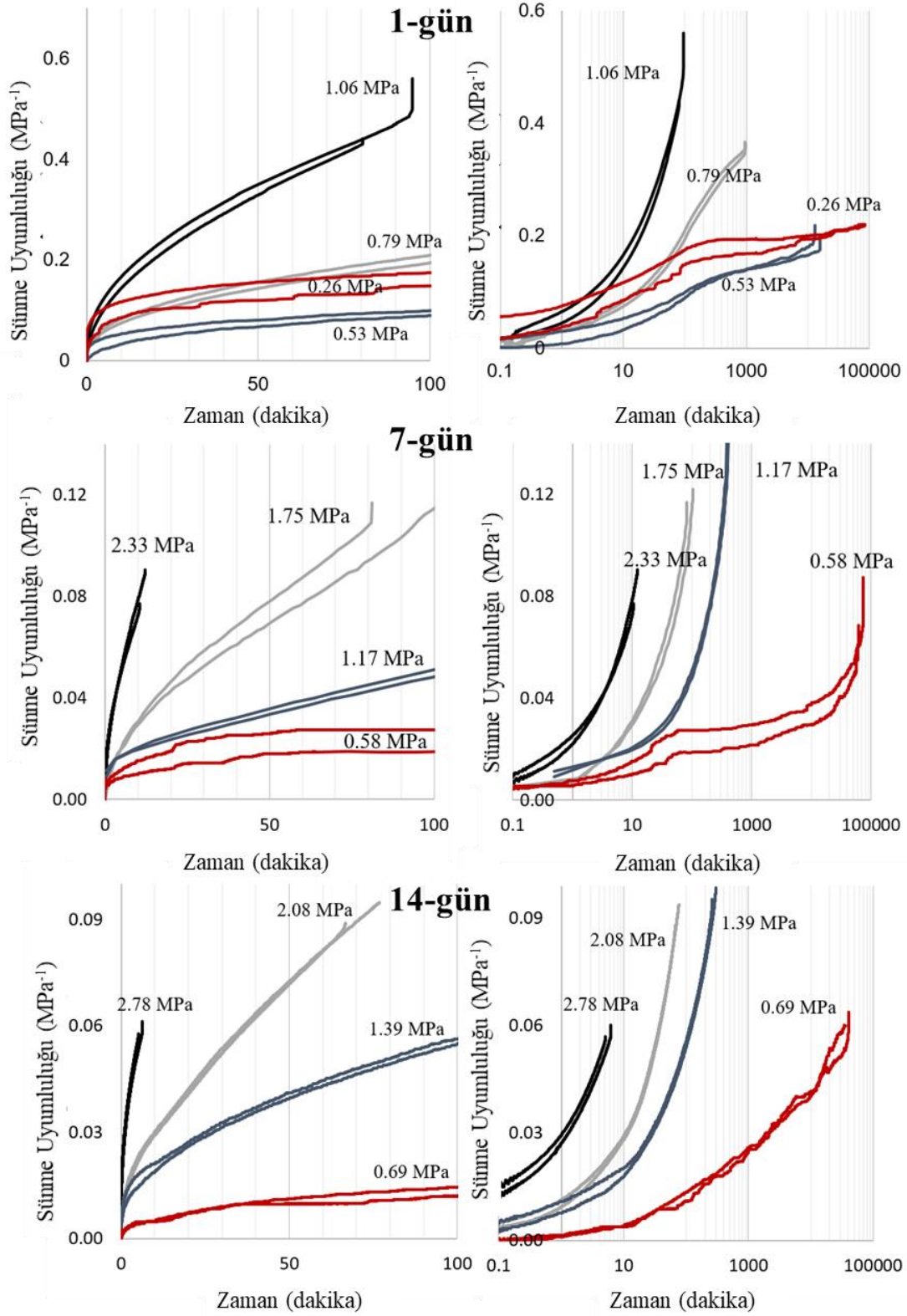
PİK-1'in %20 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (500-Gün)



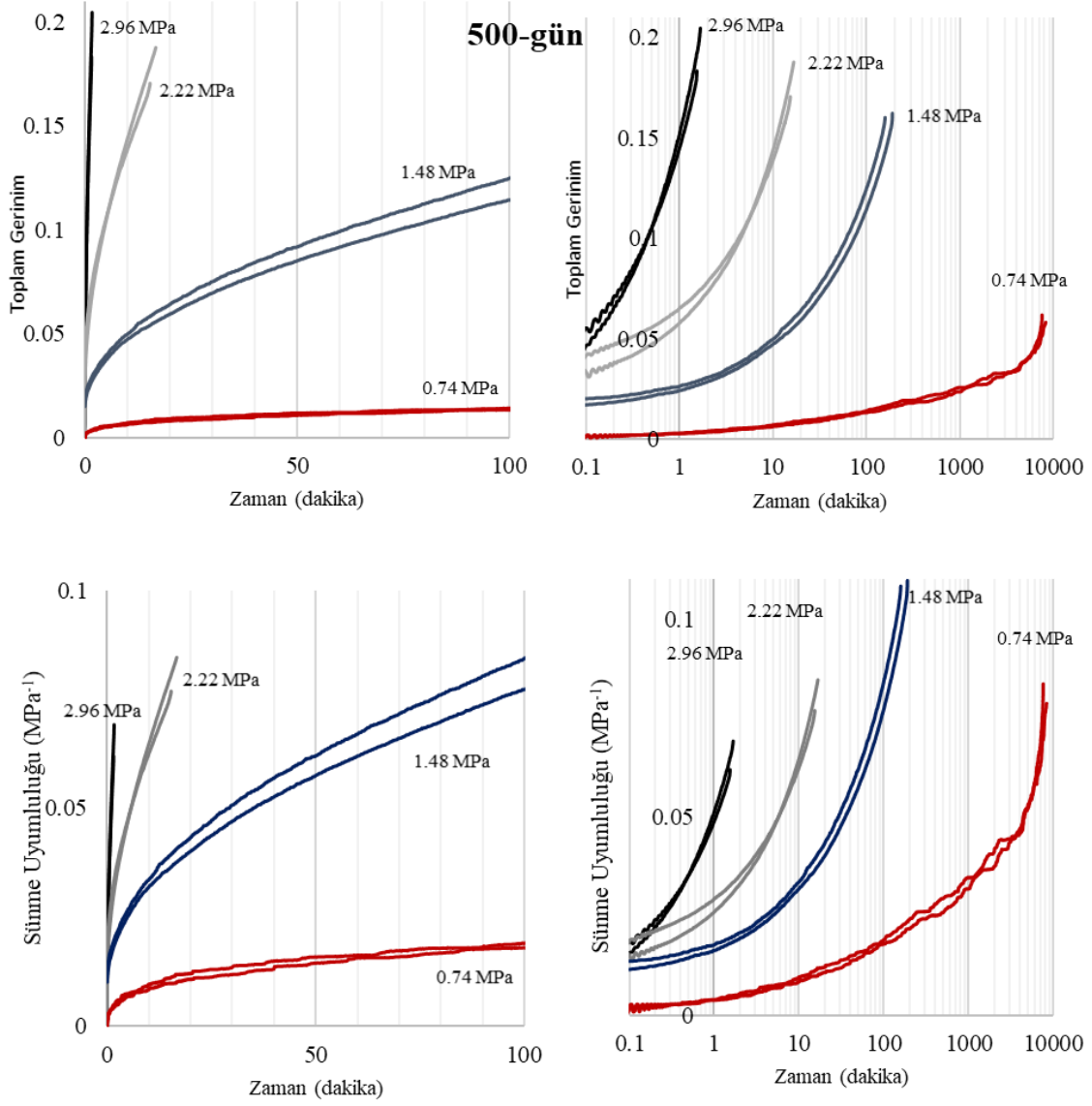
PİK-1 için sünme deney numunelerinin fotoğrafları (500-Gün)



PİK-1 sünme deneylerinden elde edilen gerinim-zaman grafikleri

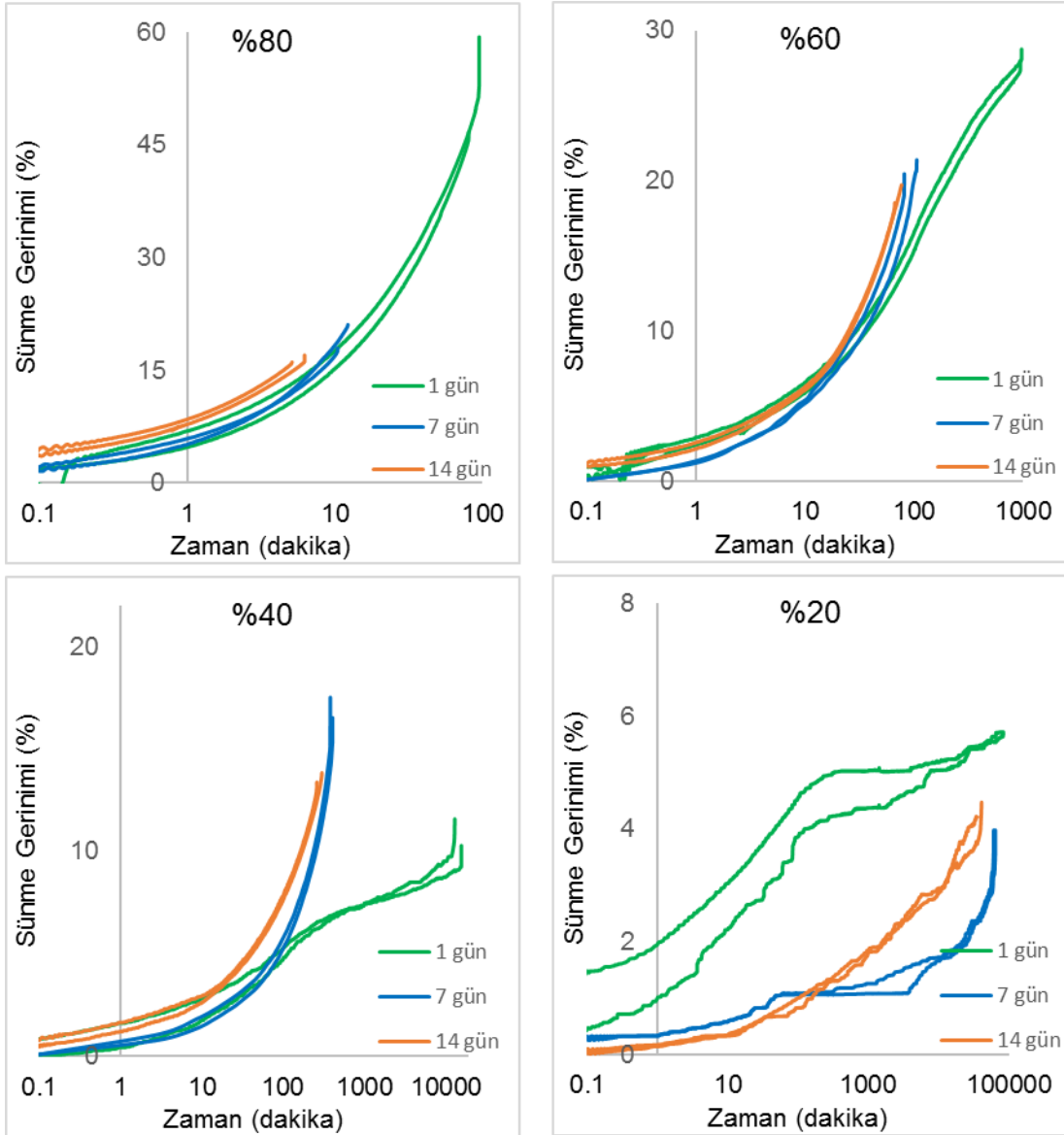


PIK-1 sünme deneylerinden elde edilen sünme uyumluluğu-zaman grafikleri

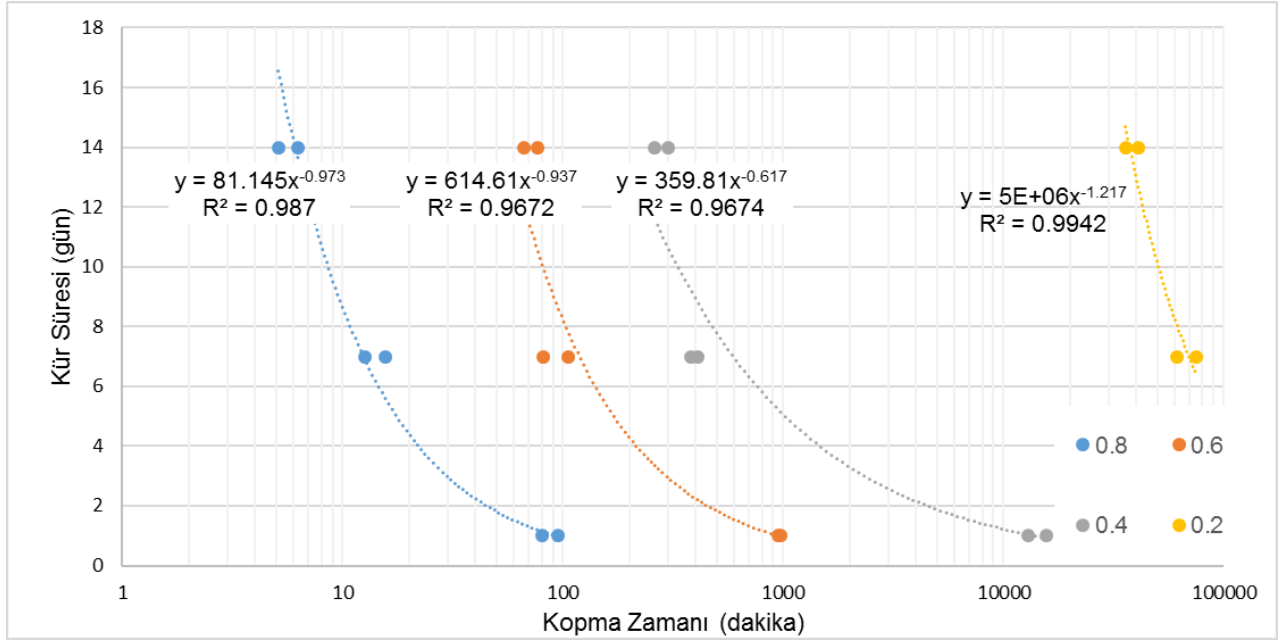


PİK-1, 500-gün deneylerinden elde edilen gerinim-zaman ve sünme uyumluluğu grafikleri

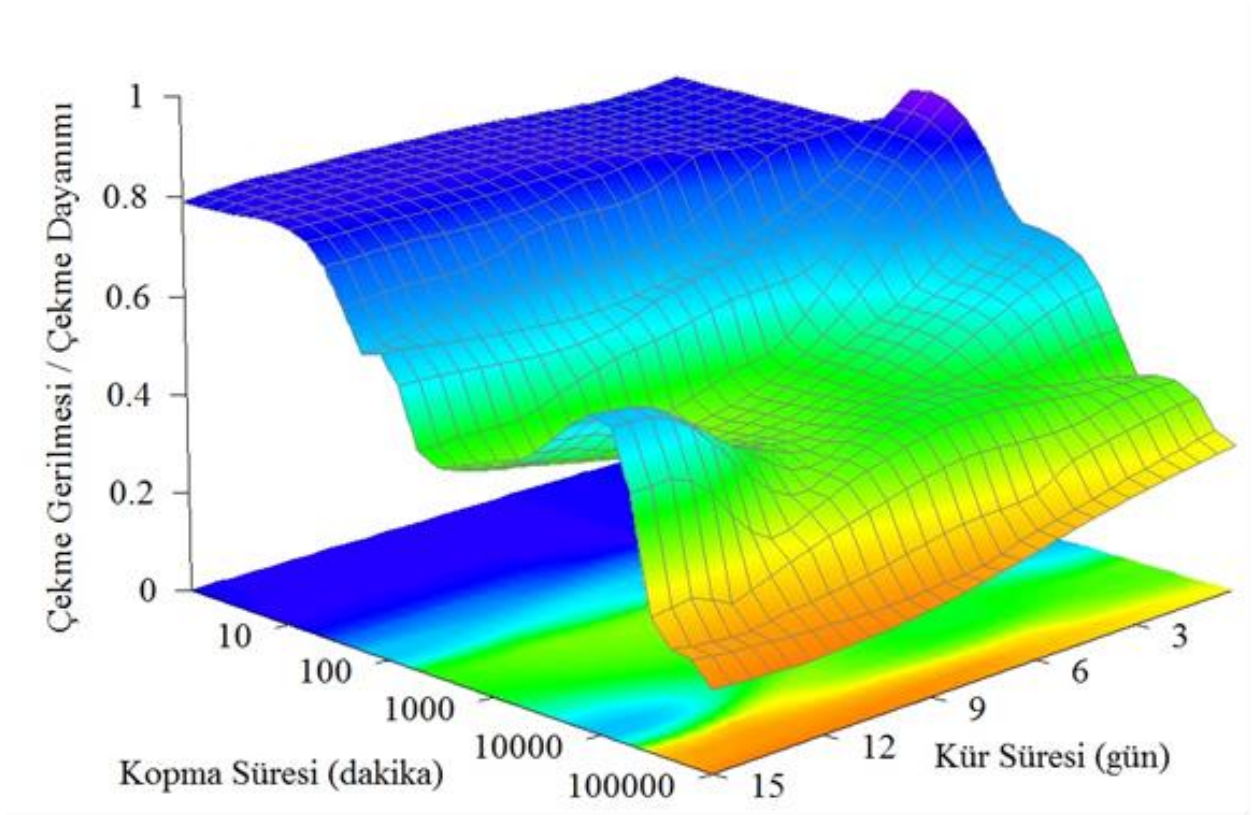
C. KÜR SÜRESİ- SÜNME GERİNİMİ-KOPMA ZAMANI İLİŞKİLERİ



PIK-1 için Kür Süresi- Sünme Gerinimi İlişkileri



PIK-1 için Kür Süresi-Kopma Zamanı ilişkileri

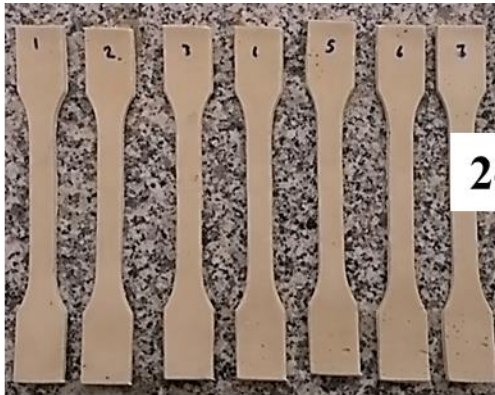


PIK-1 için oluşturulan eğilim yüzeyi grafiği

EK-3 PİK-2 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

A. PİK-2 ÇEKME DENEYLERİ

2-Gün		
Deney No.	Yenilme Yüğü (N)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)
1	90,45	1,76
2	95,65	1,89
3	93,78	1,84
4	94,67	1,88
5	92,41	1,81
6	92,31	1,82
7	93,39	1,85
Ort.	93,24	<u>1,84</u>
Std. Sap.	1,71	0,04



2-gün



7-Gün

Deney No.	Yenilme Yüğü (N)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)
1	108,40	2,15
2	107,71	2,09
3	105,16	2,08
4	104,18	2,03
5	110,17	2,13
Ort.	107,13	<u>2,10</u>
Std. Sap.	2,44	0,05



14-Gün

Deney No.	Yenilme Yüğü (N)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)
1	127,73	2,50
2	131,06	2,51
3	129,39	2,51
4	149,11	2,96
5	144,01	2,96
6	140,87	2,70
7	135,87	2,52
Ort.	136,86	<u>2,67</u>
Std. Sap.	8,07	0,21

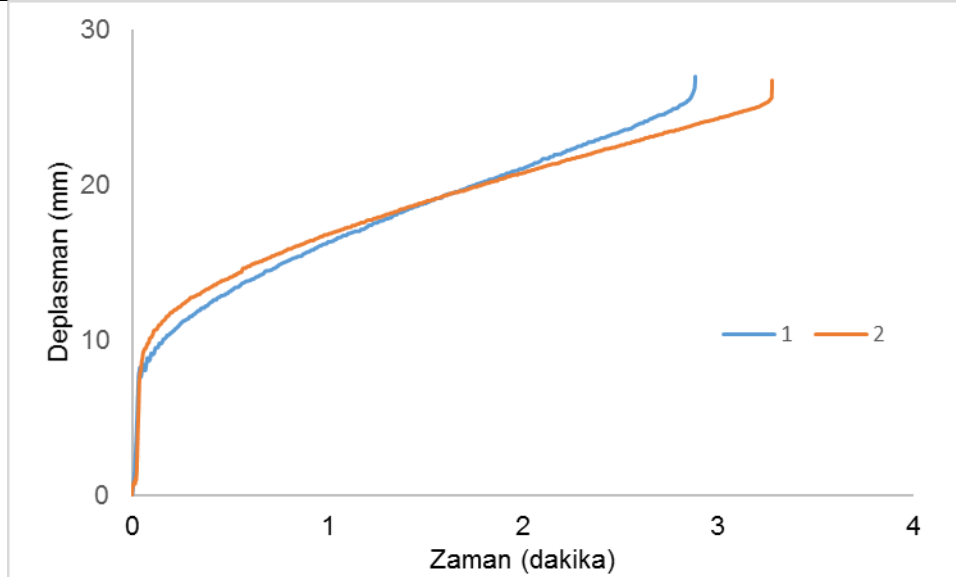


B. PİK-2 SÜNME DENEYLERİ

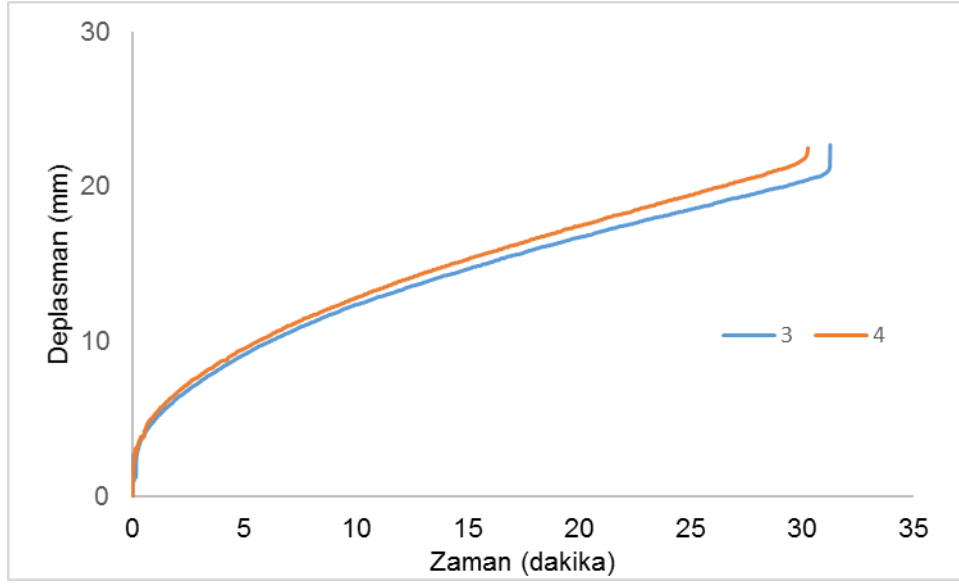
2 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

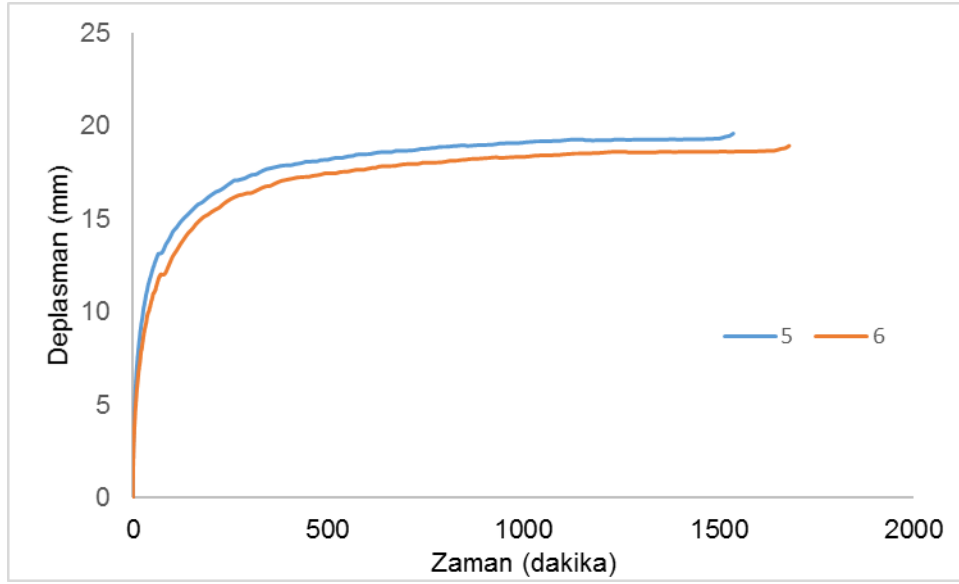
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	2-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	74,6	1,46
2	80	74,6	1,46
3	60	55,9	1,10
4	60	55,9	1,10
5	40	37,3	0,74
6	40	37,3	0,74
7	20	18,6	0,37
8	20	18,6	0,37



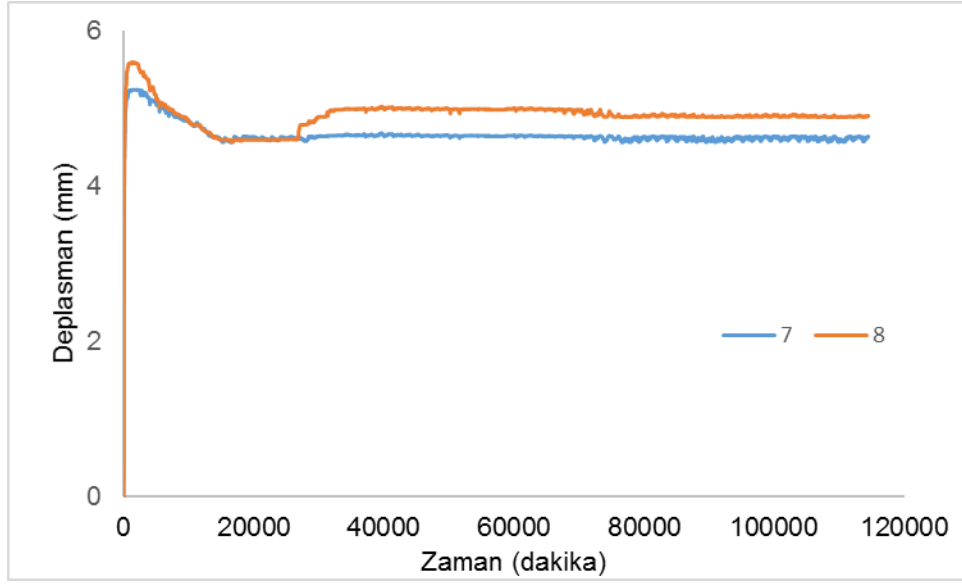
PİK-2'nin %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (2-Gün)



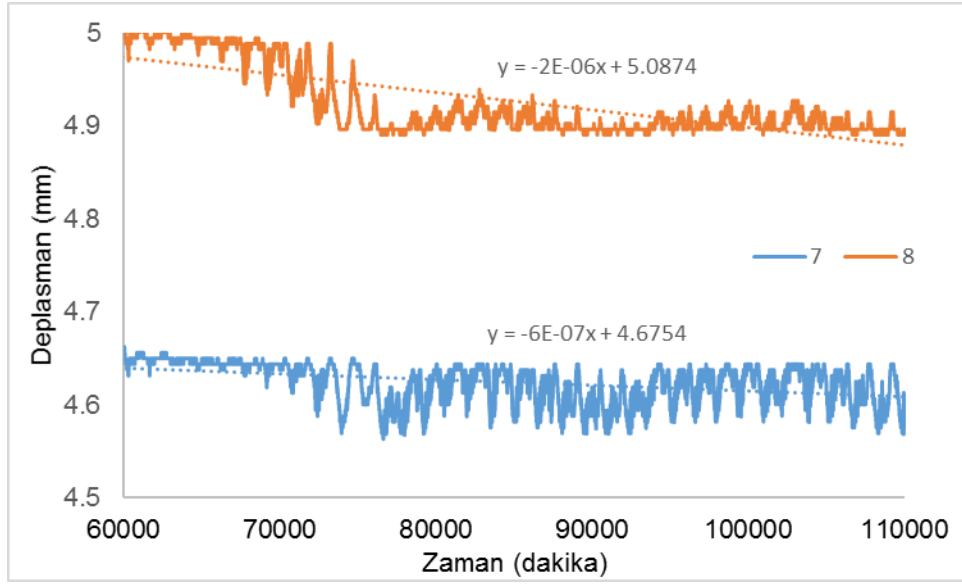
PİK-2'nin %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (2-Gün)



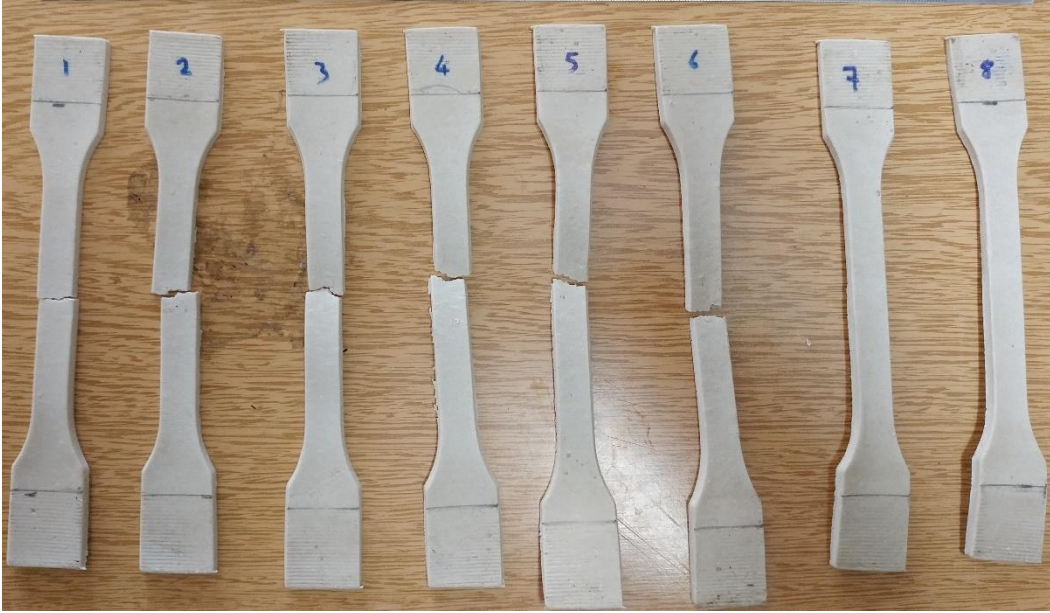
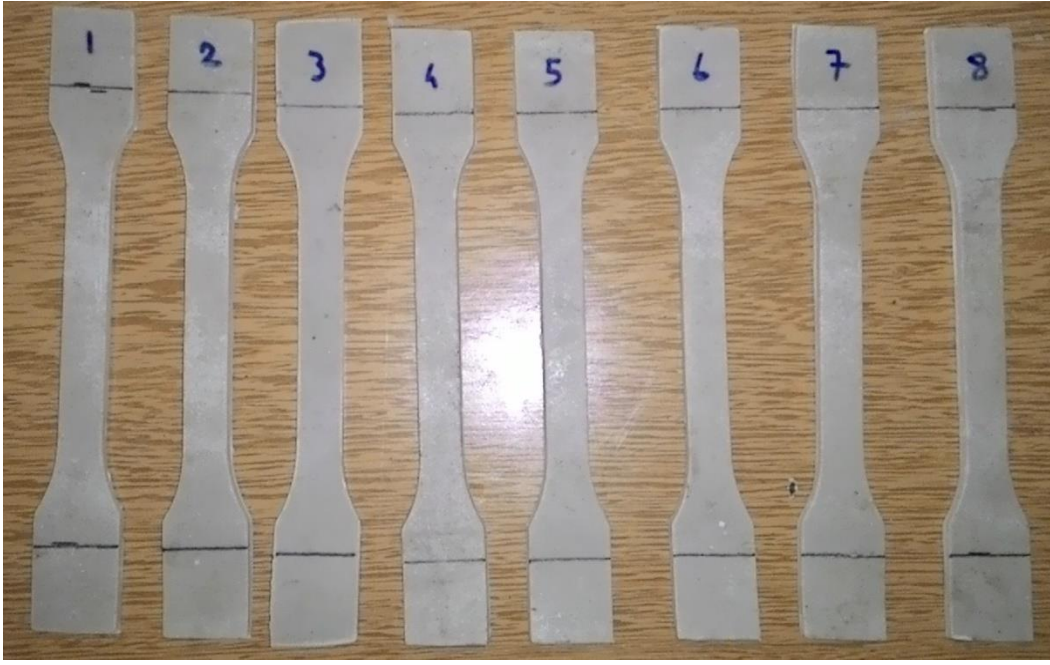
PİK-2'nin %40 Gerilim Altındaki Deplasman-Zaman Grafiği (2-Gün)



PİK-2'nin %20 Gerilim Altındaki Deplasman-Zaman Grafiği (2-Gün)



PİK-2'nin %20 Gerilim Altında Son 30 Gün Deplasman-Zaman Grafiği (2-Gün)

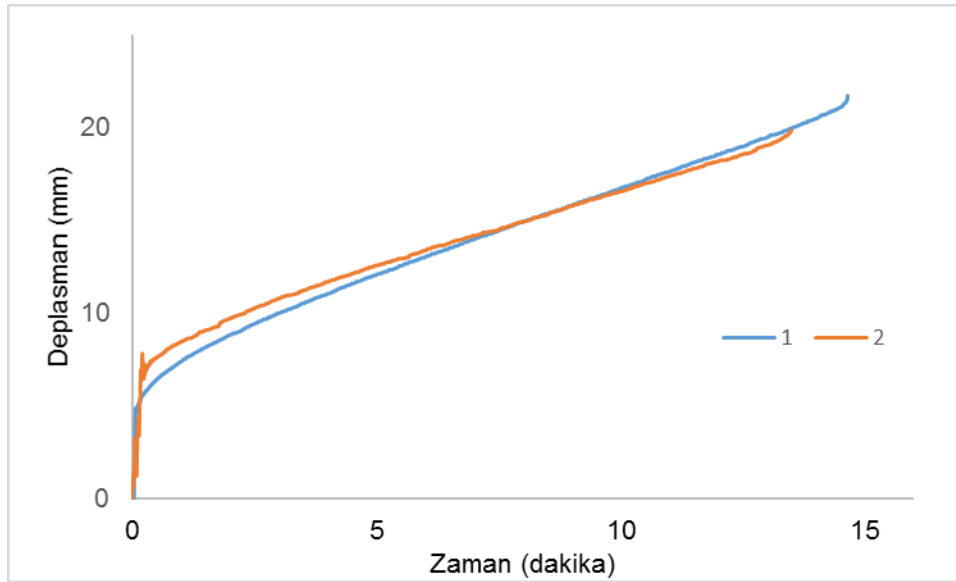


PİK-2 için Sünme Denev Numunelerinin Fotoğrafları (2-Gün)

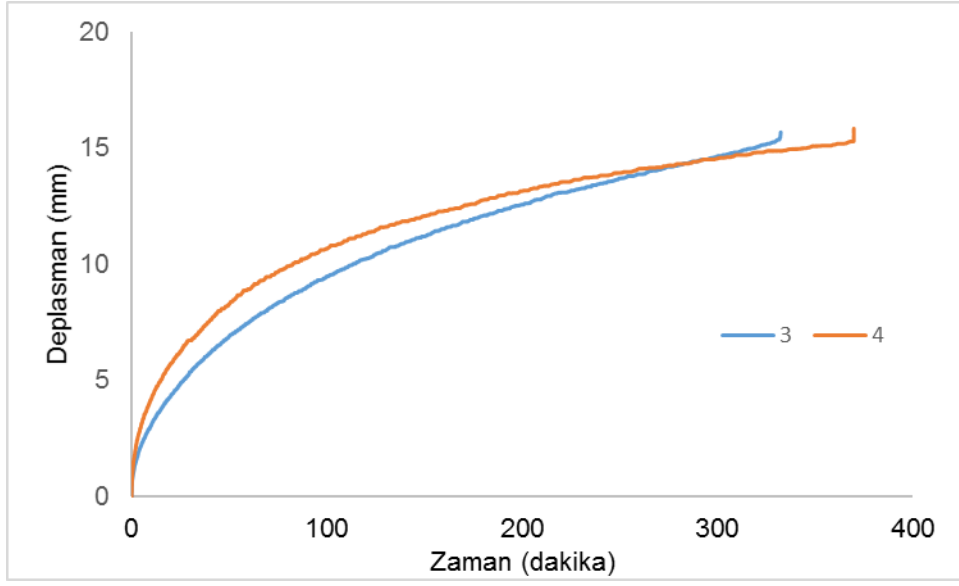
7 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

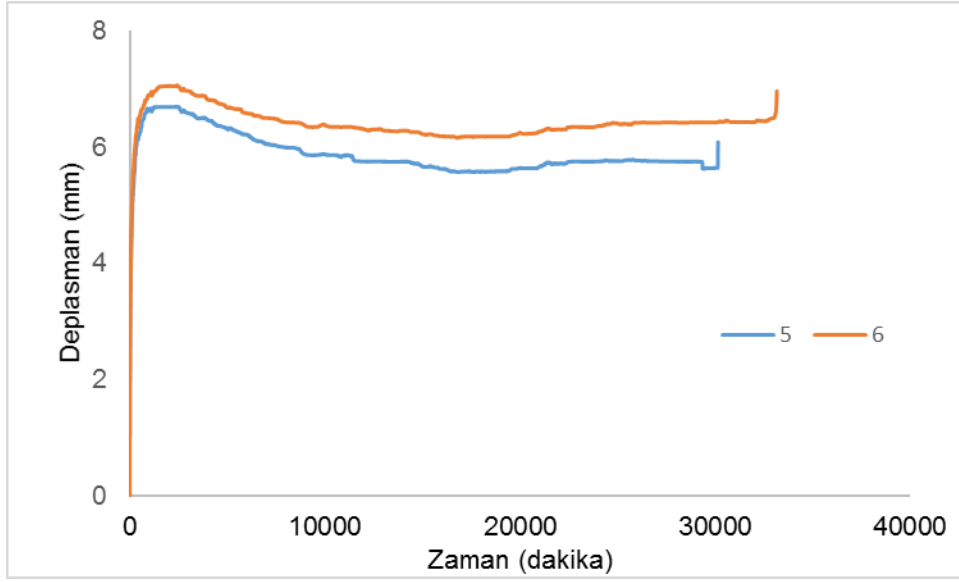
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	7-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	85,7	1,68
2	60	64,3	1,26
3	40	42,9	0,84
4	20	21,4	0,42



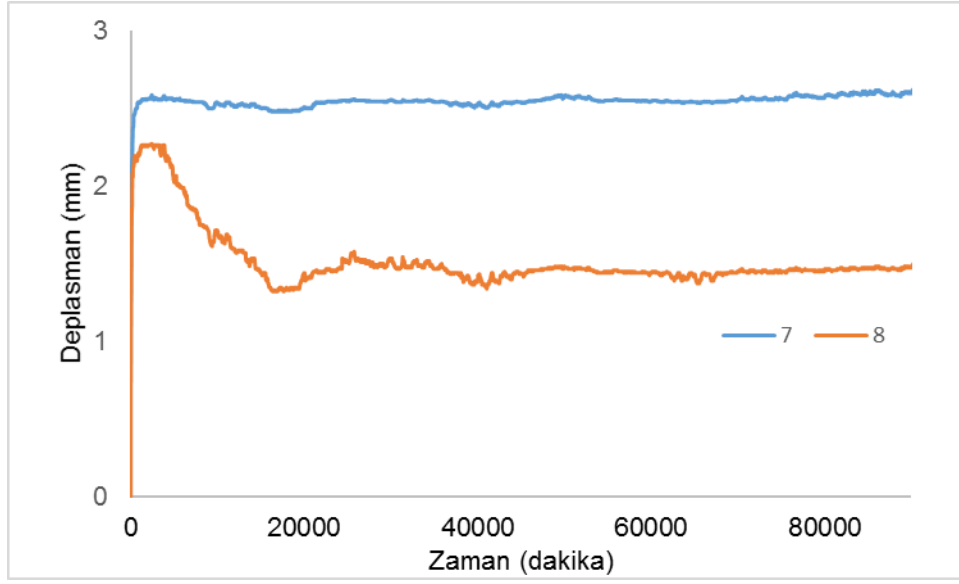
PIK-2'nin %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (7-Gün)



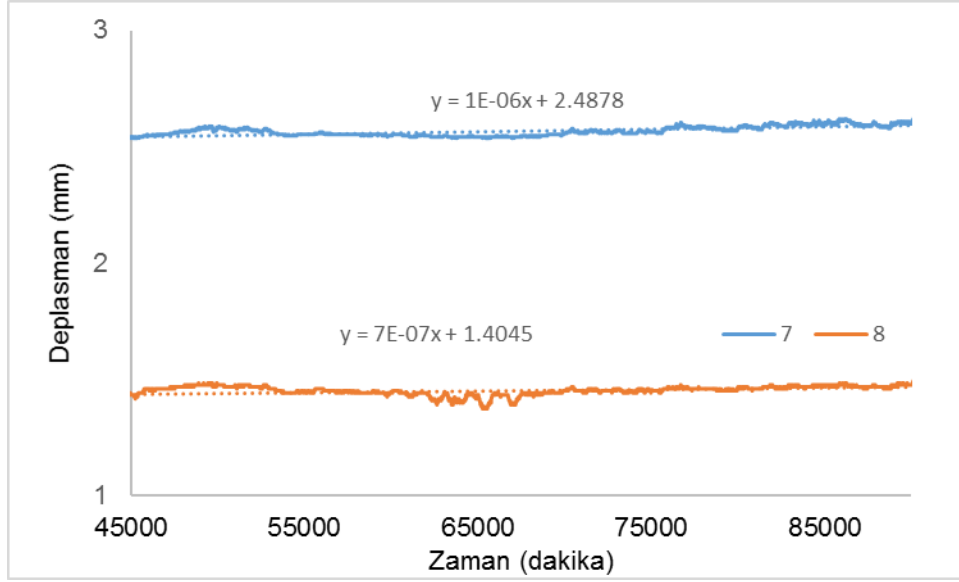
PIK-2'nin %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (7-Gün)



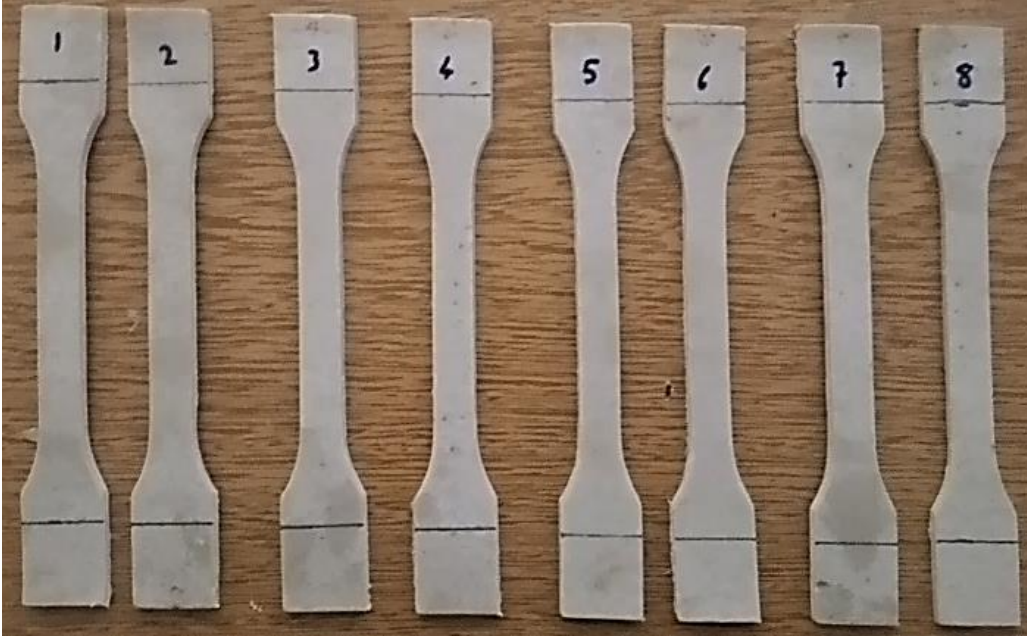
PIK-2'nin %40 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (7-Gün)



PİK-2'nin %20 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (7-Gün)



PİK-2'nin %20 Gerilim Altında Son 30 Gün Deplasman-Zaman Grafiği (7-Gün)

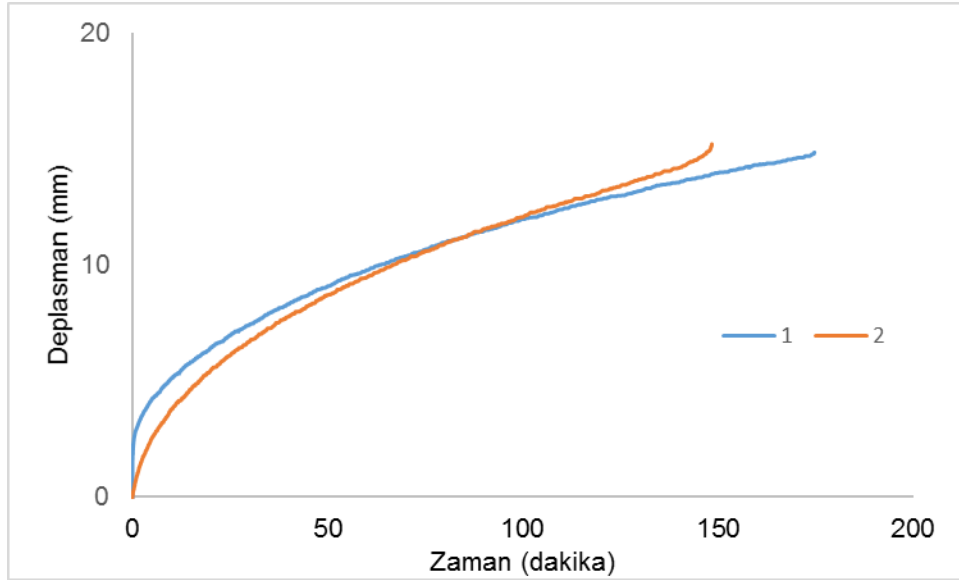


PİK-2 için sünme deney numunelerinin fotoğrafları (7-Gün)

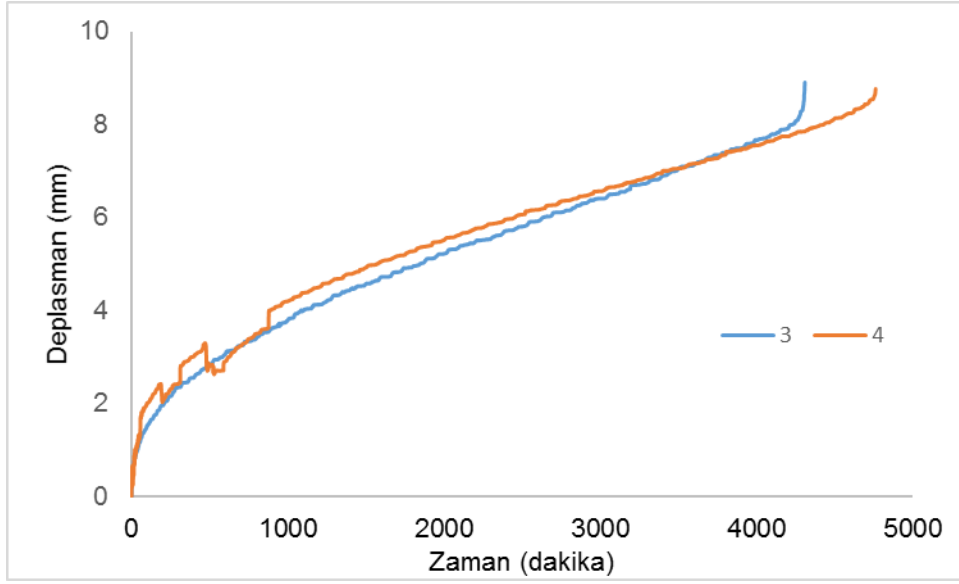
14 GÜN

Sünme deneylerinde uygulanan sabit yük miktarları

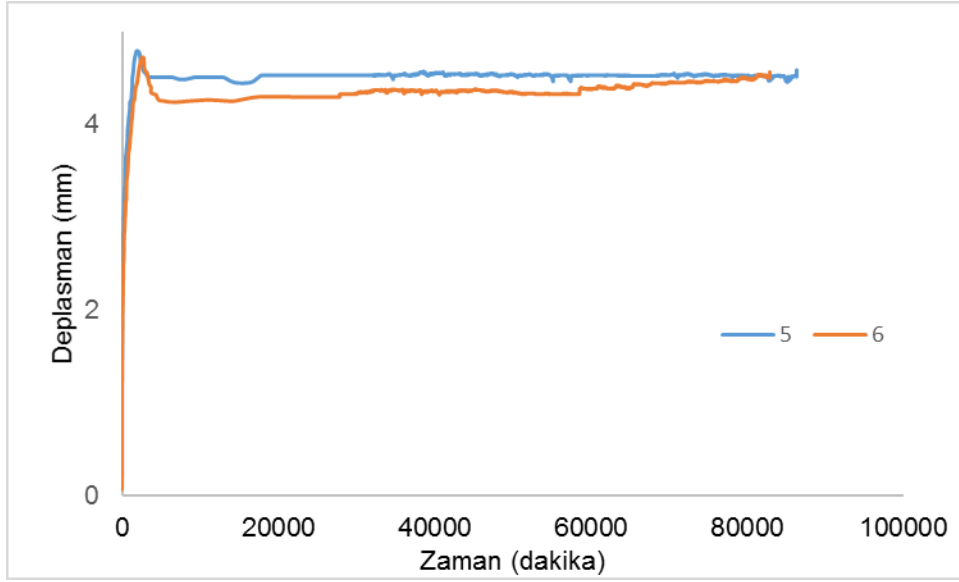
Sünme Deney No.	Gereken Yük (%)	14-Gün	
		Bağlanan Yük (N)	Oluşan Gerilim (MPa)
1	80	109,5	2,14
2	60	82,1	1,60
3	40	54,7	1,07
4	20	27,4	0,53



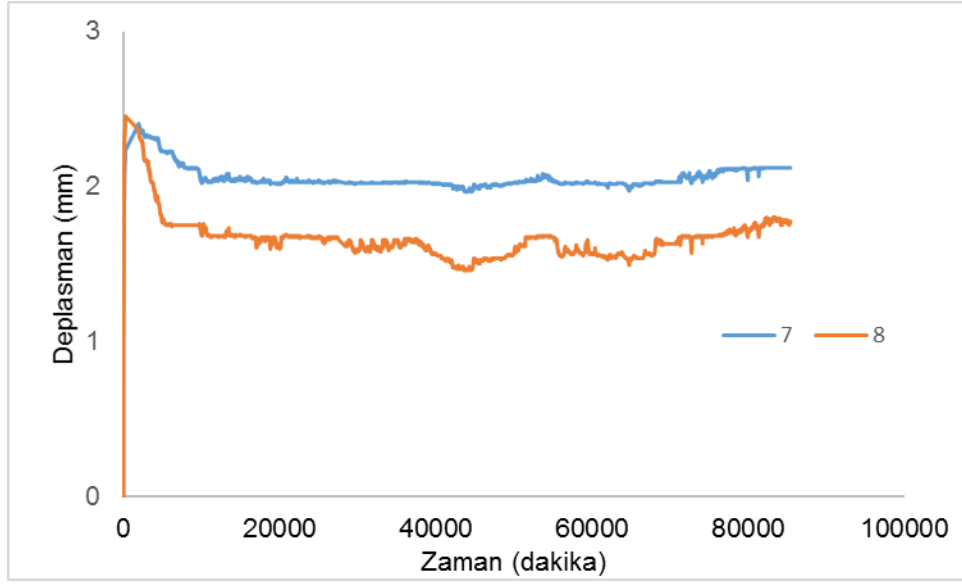
PİK-2'nin %80 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



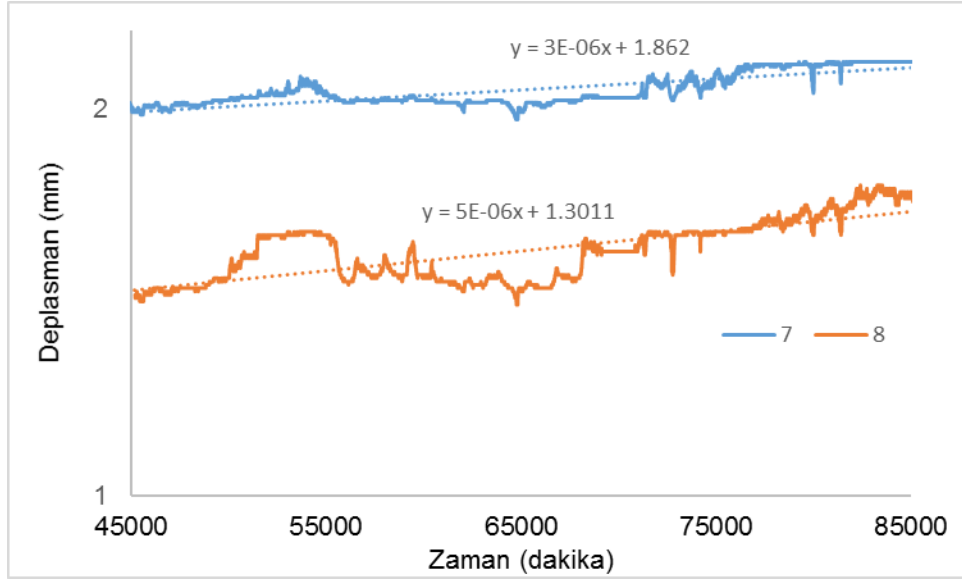
PİK-2'nin %60 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



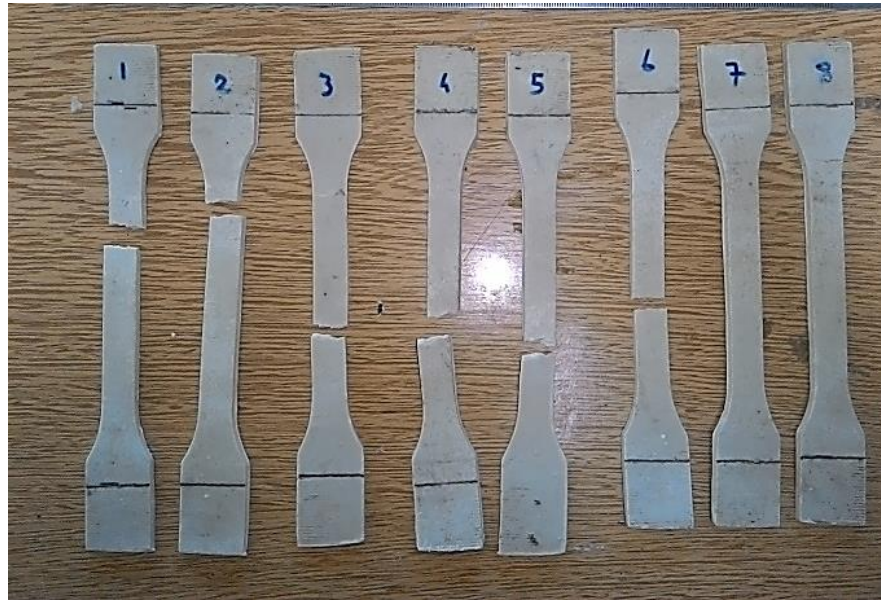
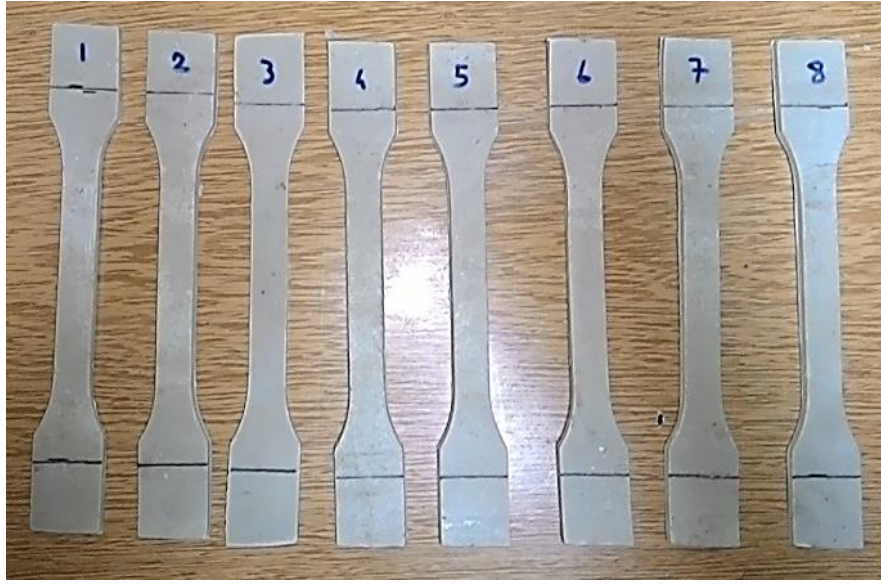
PİK-2'nin %40 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



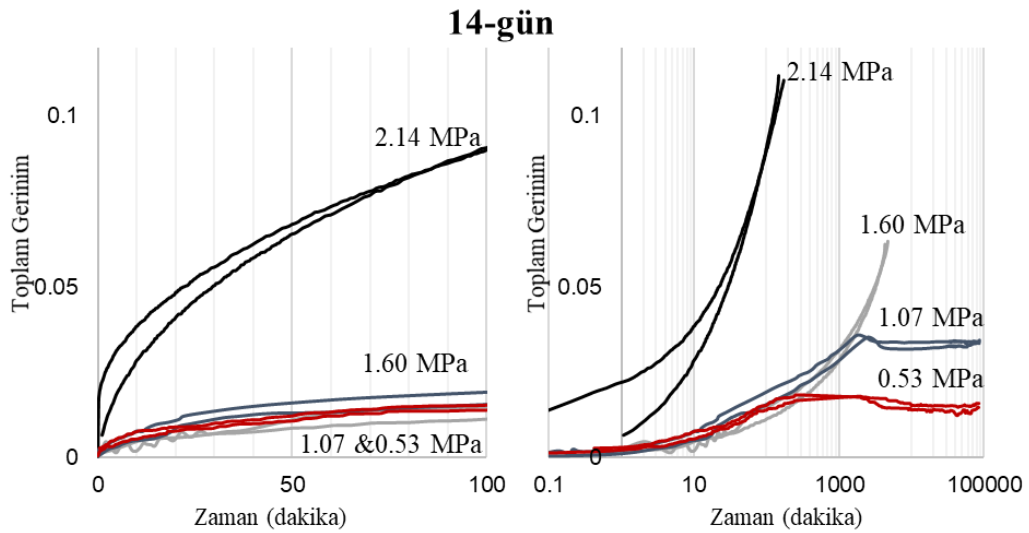
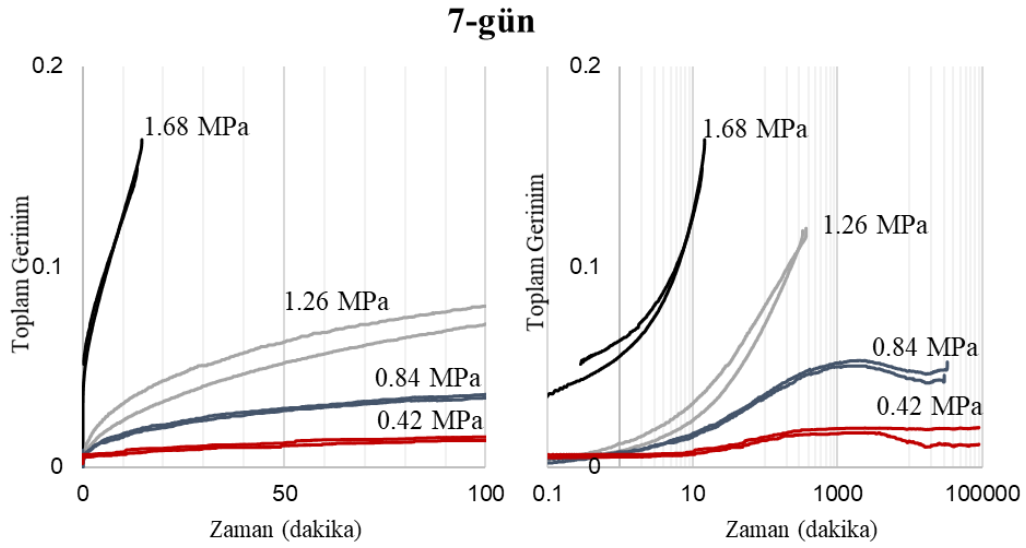
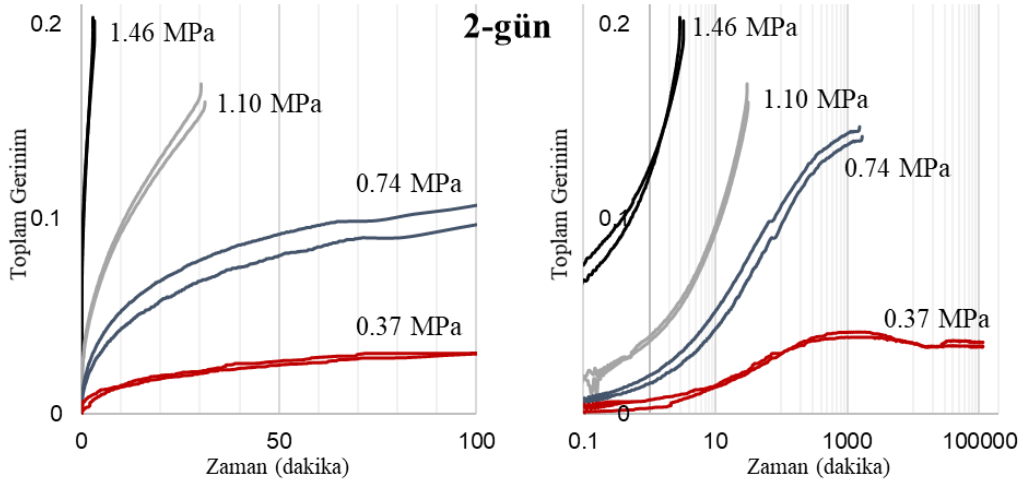
PİK-2'nin %20 Gerilim Altında Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



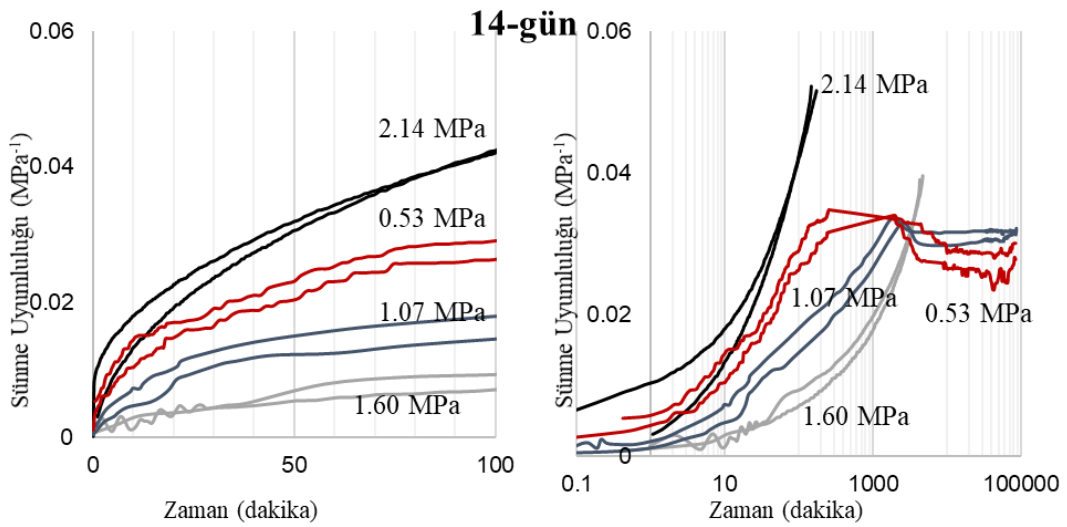
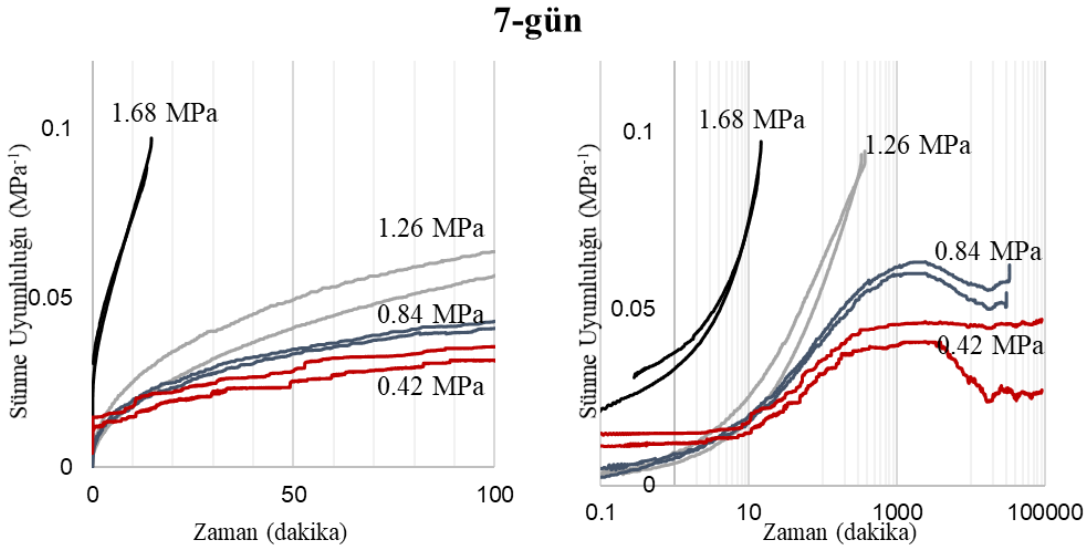
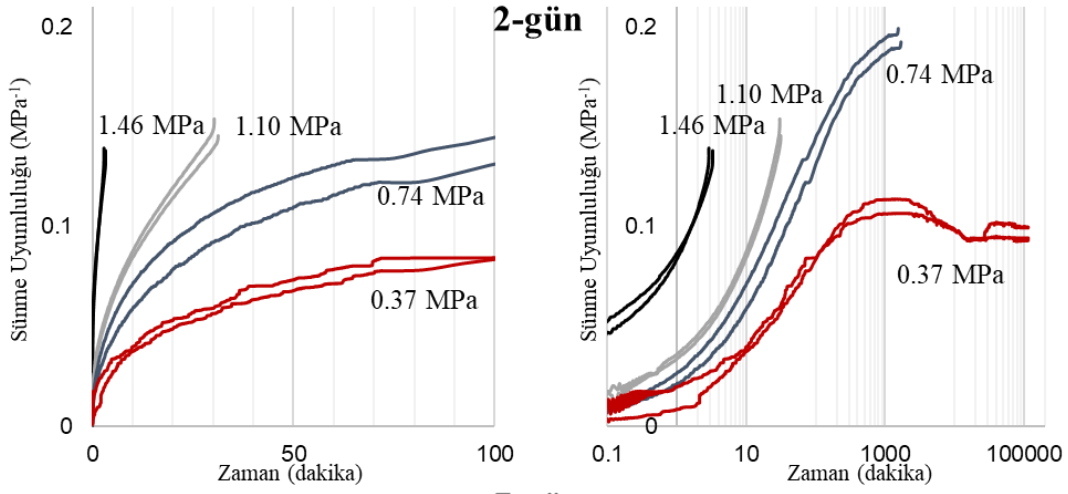
PİK-2'nin %20 Gerilim Altında Son 30 Gün Deplasman-Zaman Grafiği (14-Gün)



PİK-2 için sünme deney numunelerinin fotoğrafları (14-Gün)

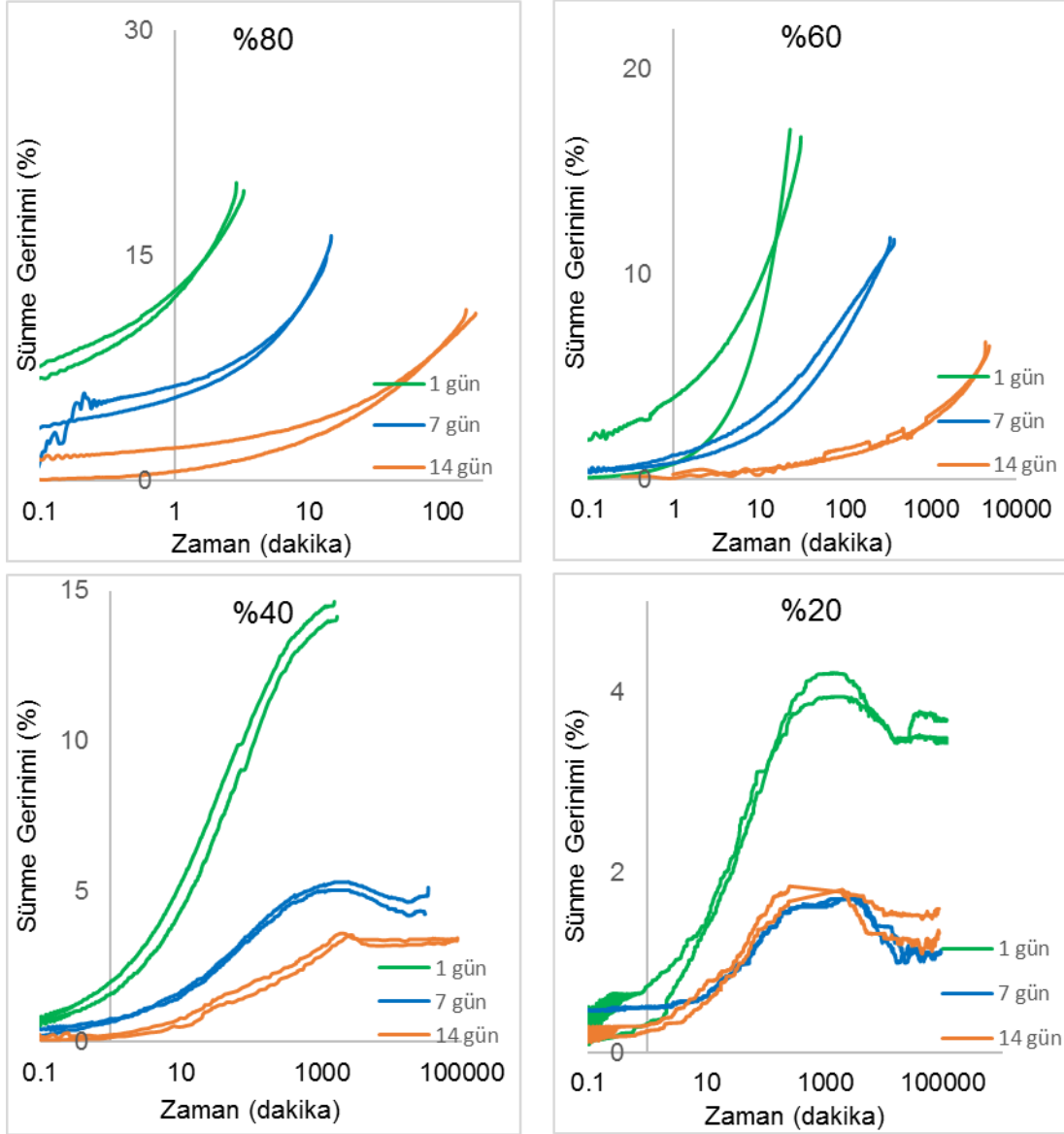


PİK-2 sünme deneylerinden elde edilen gerinim-zaman grafikleri

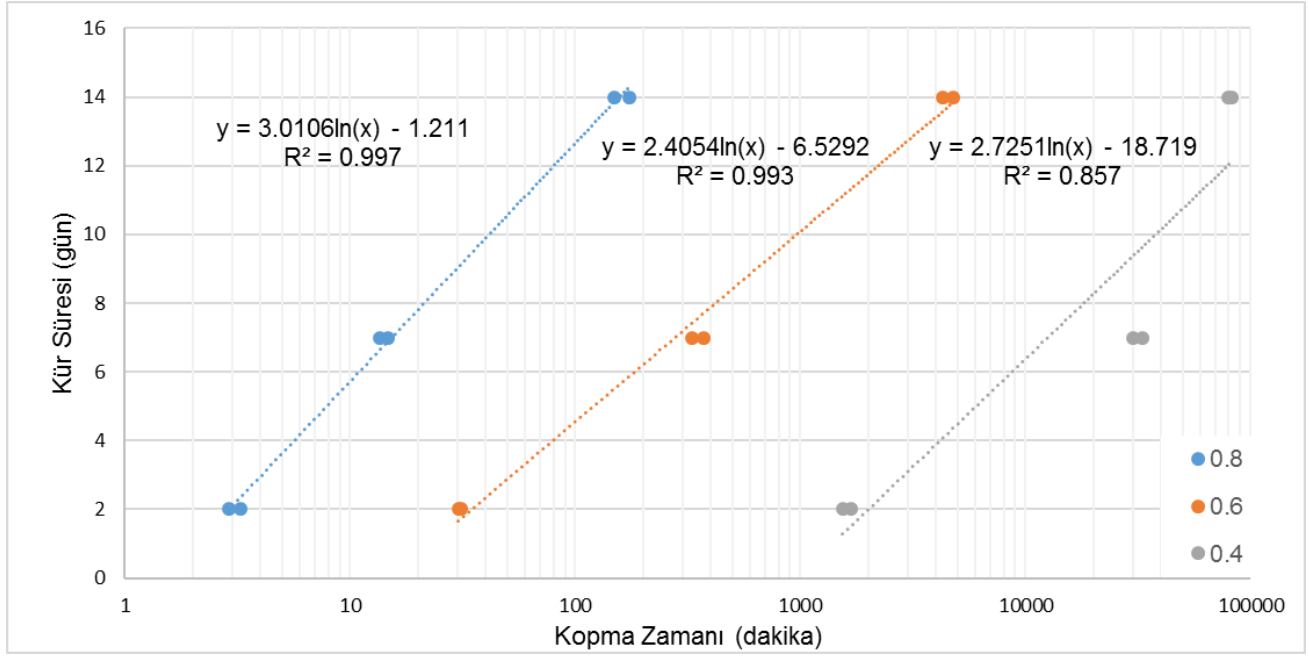


PİK-2 sünme deneylerinden elde edilen sünme uyumluluğu-zaman grafikleri

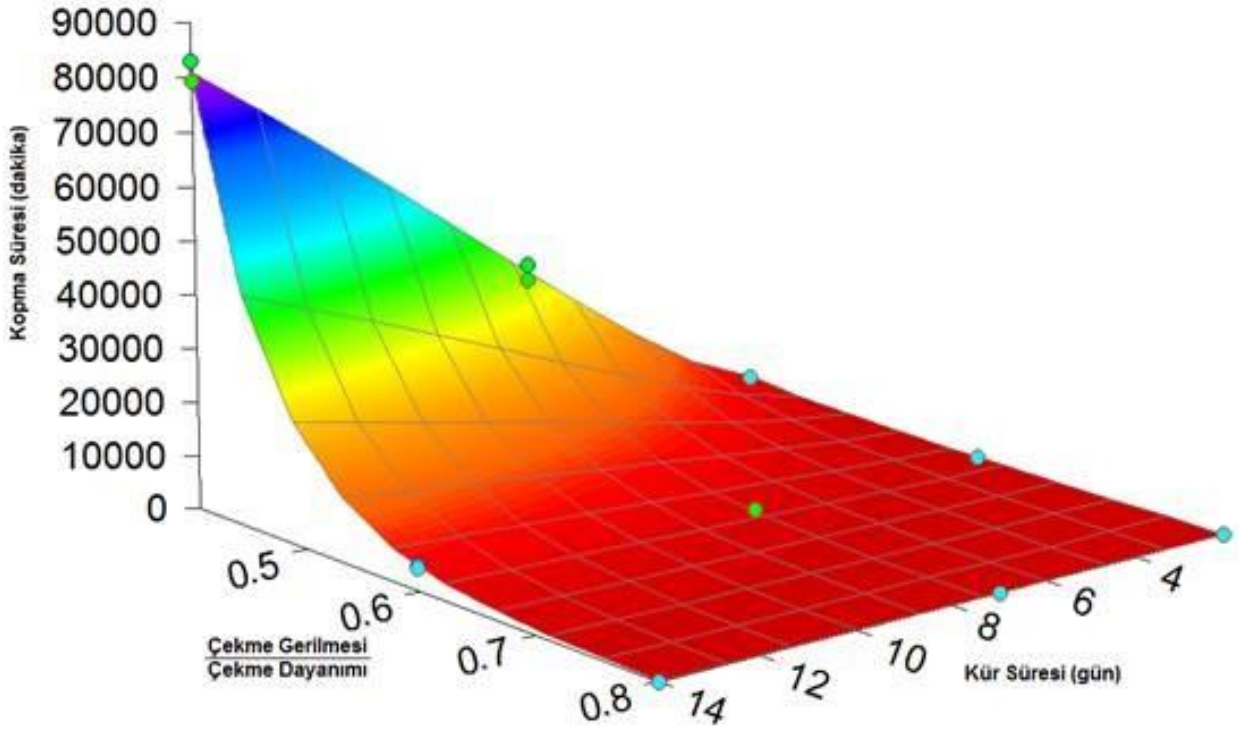
C. KÜR SÜRESİ- SÜNME GERİNİMİ-KOPMA ZAMANI İLİŞKİLERİ



PİK-2 için Kür Süresi- Sünme Gerinimi İlişkileri



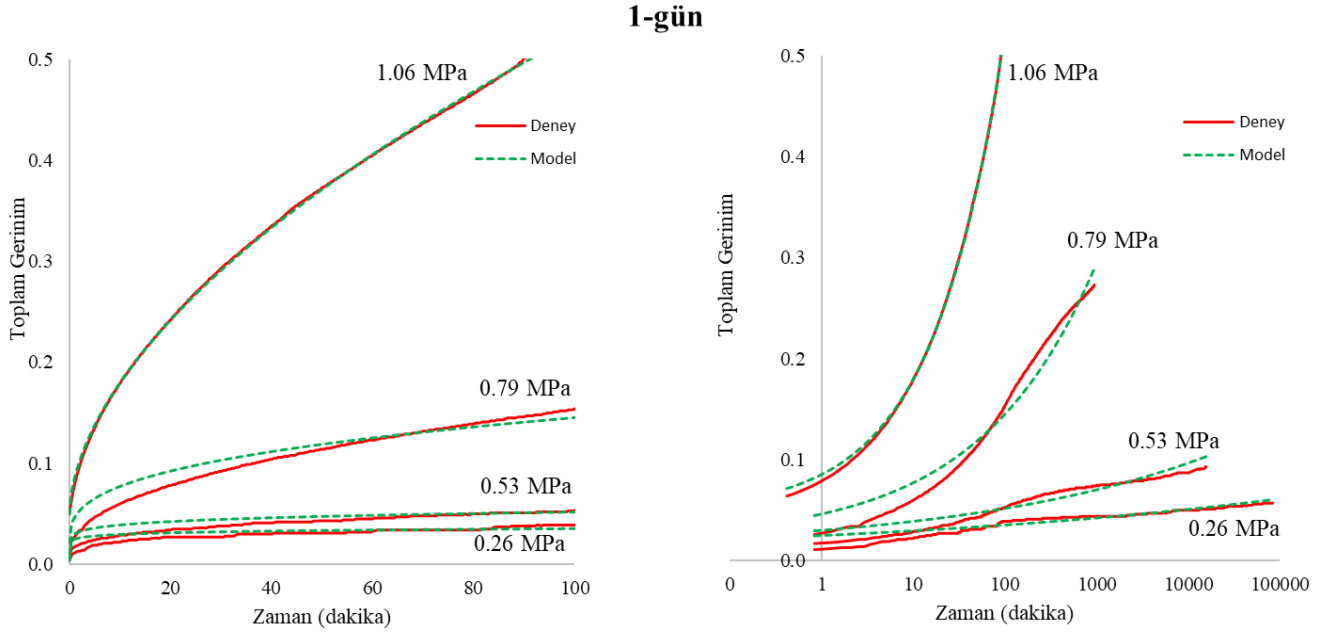
PİK-2 için Kür Süresi-Kopma Zamanı ilişkileri



PİK-2 için oluşturulan eğilim yüzeyi grafiği

EK-4 YAPISAL MODELLEME SONUÇLARI

A. PİK-1 MODELLERİ

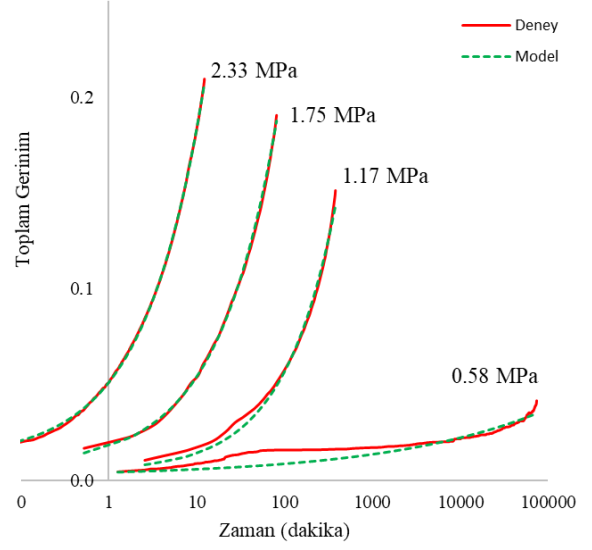
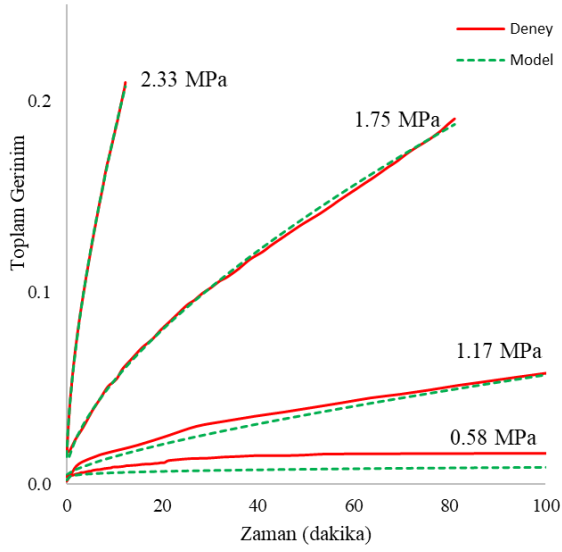


PİK-1 Viskoplastik model sonuçları-deneysel sonuçları karşılaştırması (1-gün)

PİK-1 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (1 gün)

Kür Süresi (gün)	σ_n (MPa)	E0 (MPa)	C0 (MPa ⁻¹)	C1
1	0,26	65	0,0806	0,088
	0,53	52	0,0378	0,159
	0,79	38	0,0325	0,343
	1,06	21	0,0338	0,561

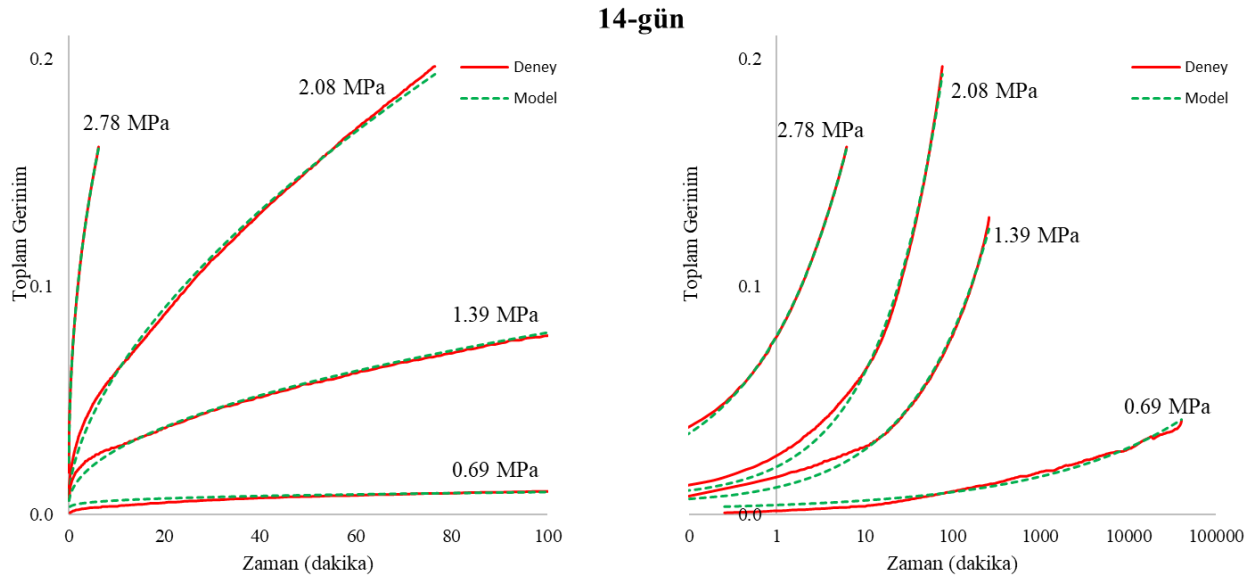
7-gün



PİK-1 Viskoplastik model sonuçları-deneysel sonuçları karşılaştırması (7-gün)

PİK-1 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (7-gün)

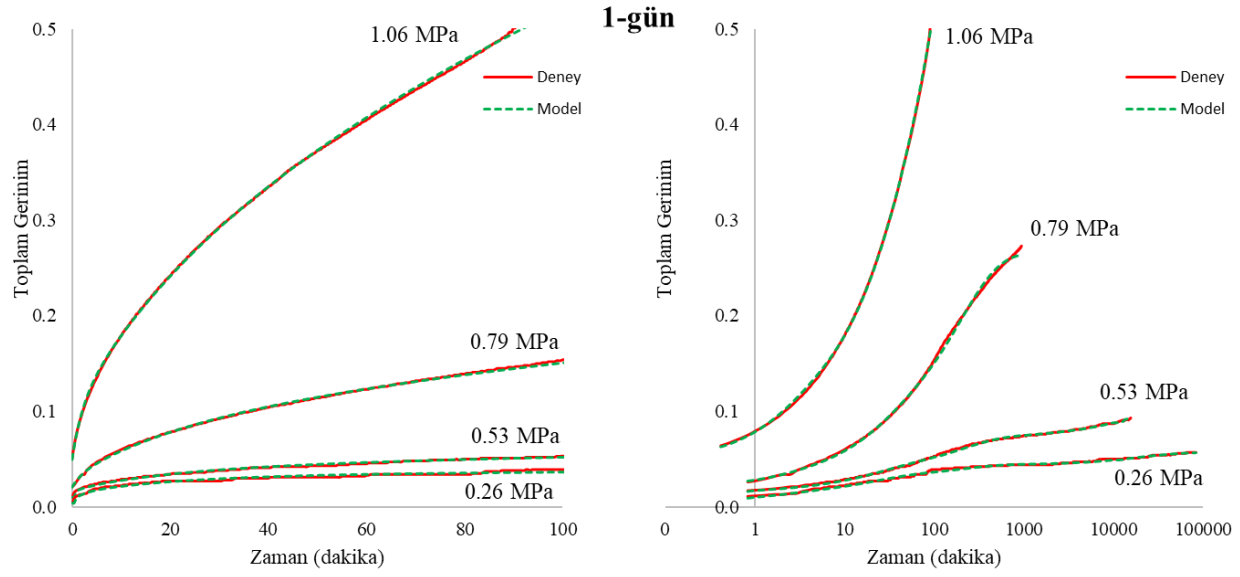
Kür Süresi (gün)	σ_n (MPa)	E0 (MPa)	C0 (MPa ⁻¹)	C1
7	0,58	281	0,0038	0,242
	1,17	252	0,0015	0,733
	1,75	239	0,0061	0,644
	2,33	198	0,0169	0,639



PİK-1 Viskoplastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (14-gün)

PİK-1 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (14-gün)

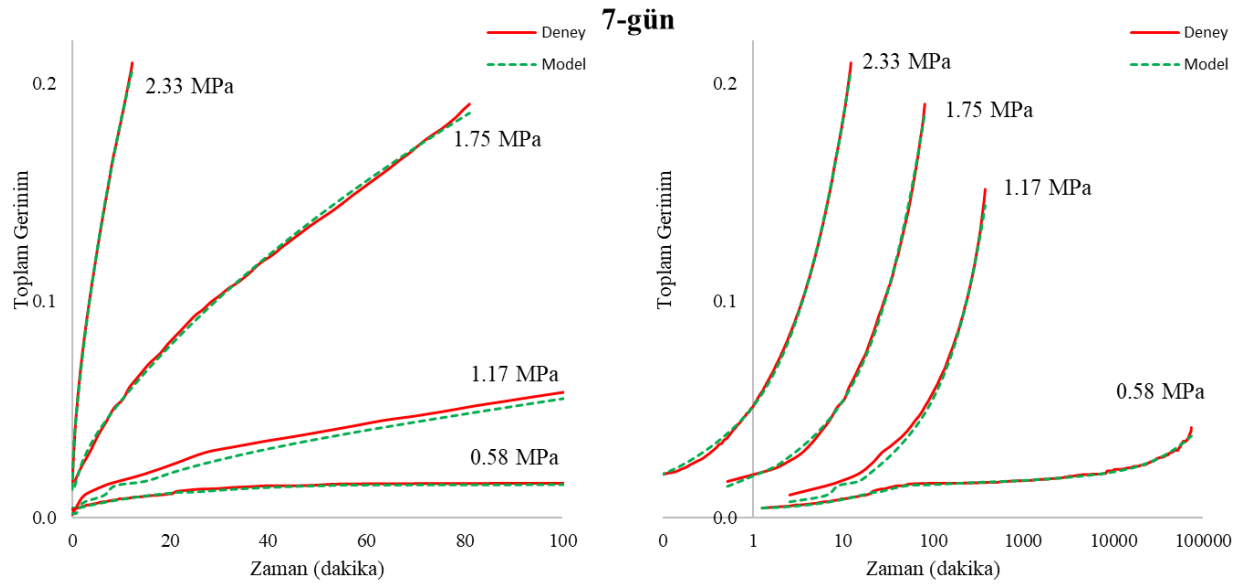
Kür Süresi (gün)	σ_n (MPa)	E0 (MPa)	C0 (MPa ⁻¹)	C1
14	0,69	412	0,0034	0,267
	1,39	347	0,0056	0,493
	2,08	303	0,0067	0,597
	2,78	268	0,0245	0,434



PİK-1 Viskoelastik model sonuçları-deneysel sonuçları karşılaştırması (1-gün)

PİK-1 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (1-gün)

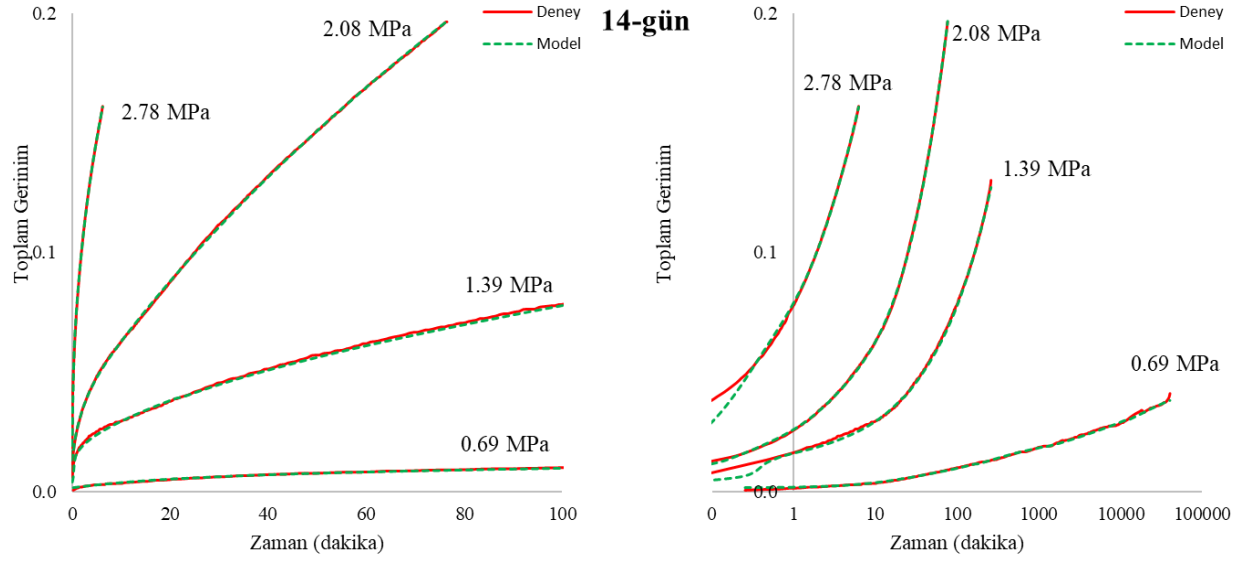
Kür	σ	E0 (MPa)						
		E0 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E4 (MPa)	E5 (MPa)	E6 (MPa)
1	0,26	65	6,57E+1	4,07E+1	1,51E+1	2,09E+1	3,59E+3	2.04E+1
	0,53	52	9,18E+1	2,21E+2	2,60E+1	1,58E+1	1,59E+2	1.63E+1
	0,79	38	1,95E+7	7,21E+1	1,75E+1	4,19E+0	-	-
	1,06	21	1,45E+8	2,10E+1	1,05E+1	1,30E+0	-	-



PİK-1 Viskoelastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (7-gün)

Çizelge 5. 1. PİK-1 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (7-gün)

Kür Süresi (gün)	σ	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
7	0,58	281	2,98E+2	7,27E+8	4,94E+1	1,02E+3	3,30E+2	1,68E+9	9,10E+0
	1,17	252	2,14E+8	2,64E+2	8,92E+1	3,50E+8	1,64E+0	-	-
	1,75	239	7,41E+2	1,23E+2	6,77E+1	4,25E+0	-	-	-
	2,33	198	1,60E+2	1,15E+2	6,68E+0	-	-	-	-

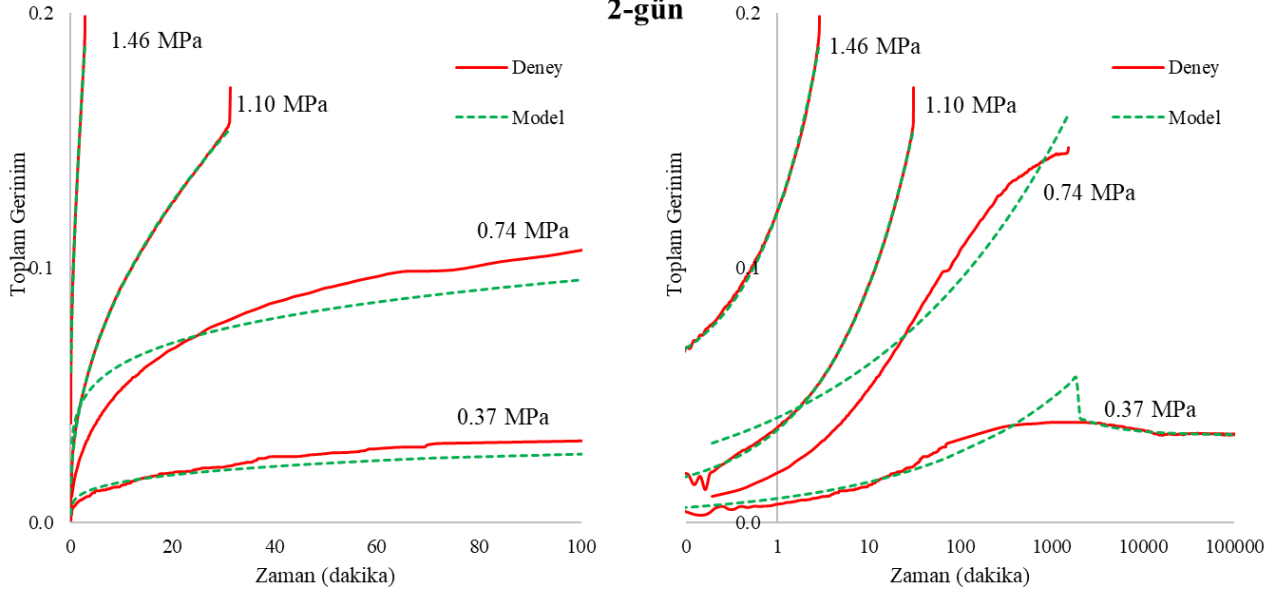


PİK-1 Viskoelastik model sonuçları-deneysel sonuçları karşılaştırması (14-gün)

PİK-1 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (14-gün)

Kür	σ	E0 (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	E4 (MPa)	E5 (MPa)	E6 (MPa)
Süresi	(MPa)							
(gün)								
	0,69	412	1,13E+10	9,62E+9	1,64E+2	7,73E+1	1,01E+2	3,59E+1
14	1,39	347	1,44E+2	2,95E+2	8,93E+1	2,11E+1	3,70E+0	-
	2,08	303	2,35E+2	1,12E+2	1,39E+2	4,47E+0	-	-
	2,78	268	7,15E+1	6,27E+1	1,07E+1	-	-	-

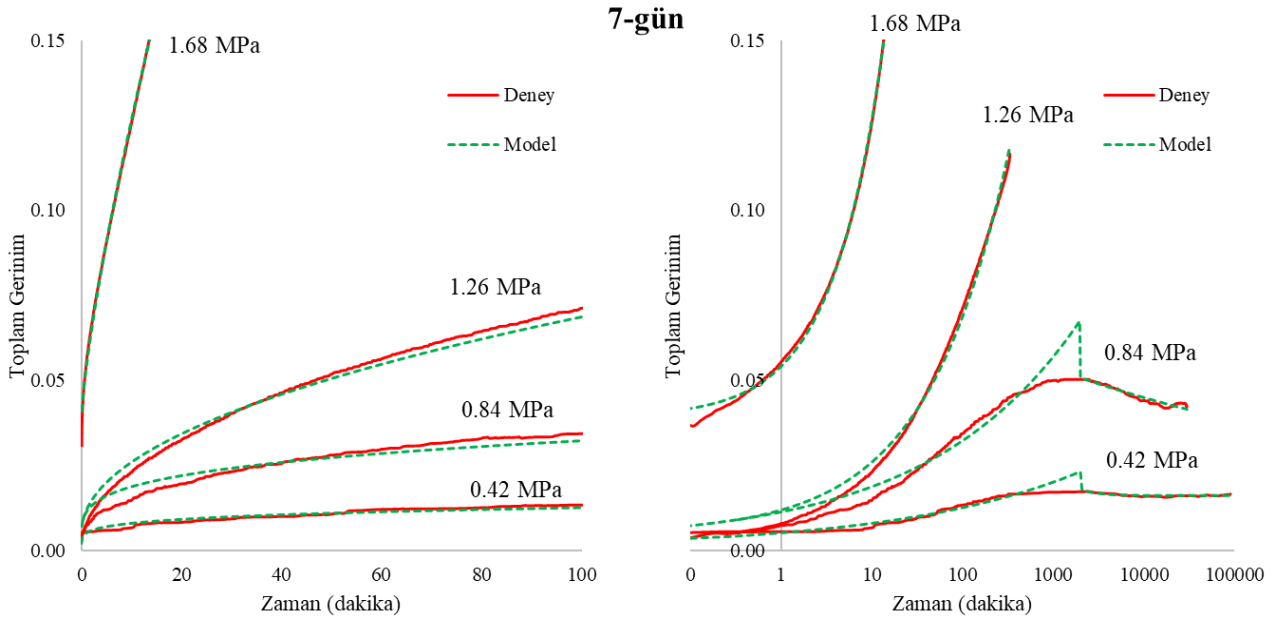
B. PİK-2 MODELLERİ



PİK-2 Viskoplastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (2-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (2-gün)

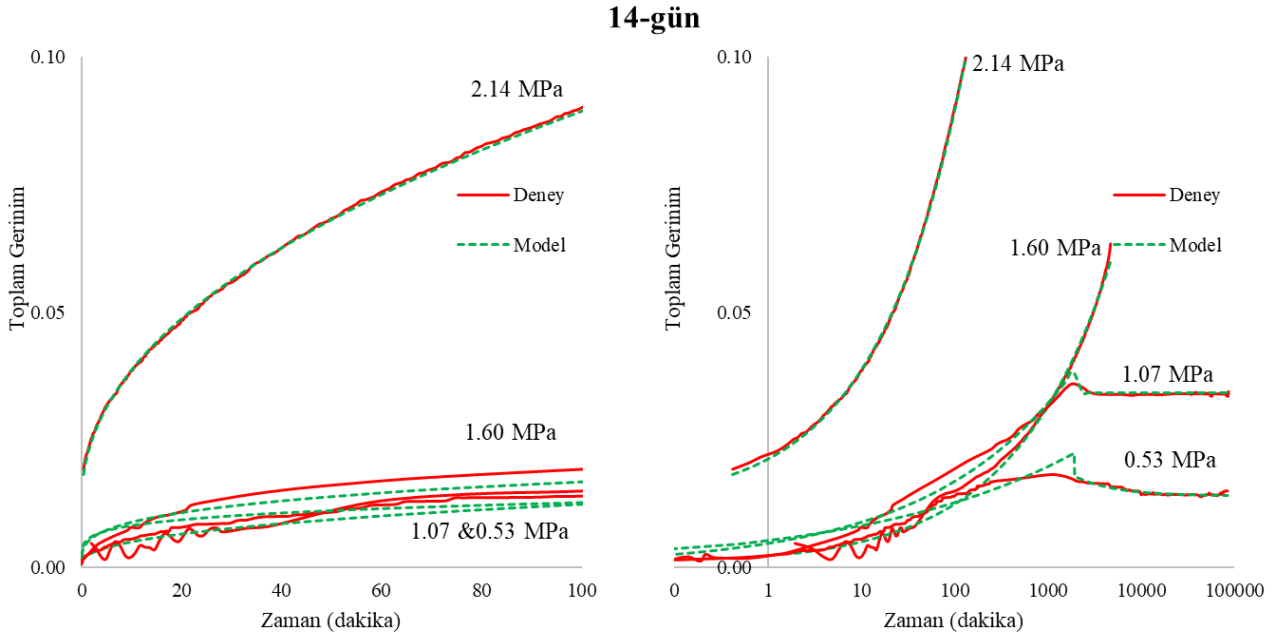
Kür Süresi (gün)	σ_n	E_0	C_0	C_1	E_1	C_2	C_3
	(MPa)	(MPa)	(MPa ⁻¹)		(MPa)	(MPa ⁻¹)	
2	0,37	205	0,021	0,26	10,70	30,20	-0,97
	0,74	140	0,049	0,20	-	-	-
	1,10	116	0,025	0,49	-	-	-
	1,46	28	0,048	0,63	-	-	-



PİK-2 Viskoplastik model sonuçları-deneysel sonuçları karşılaştırması (7-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (7-gün)

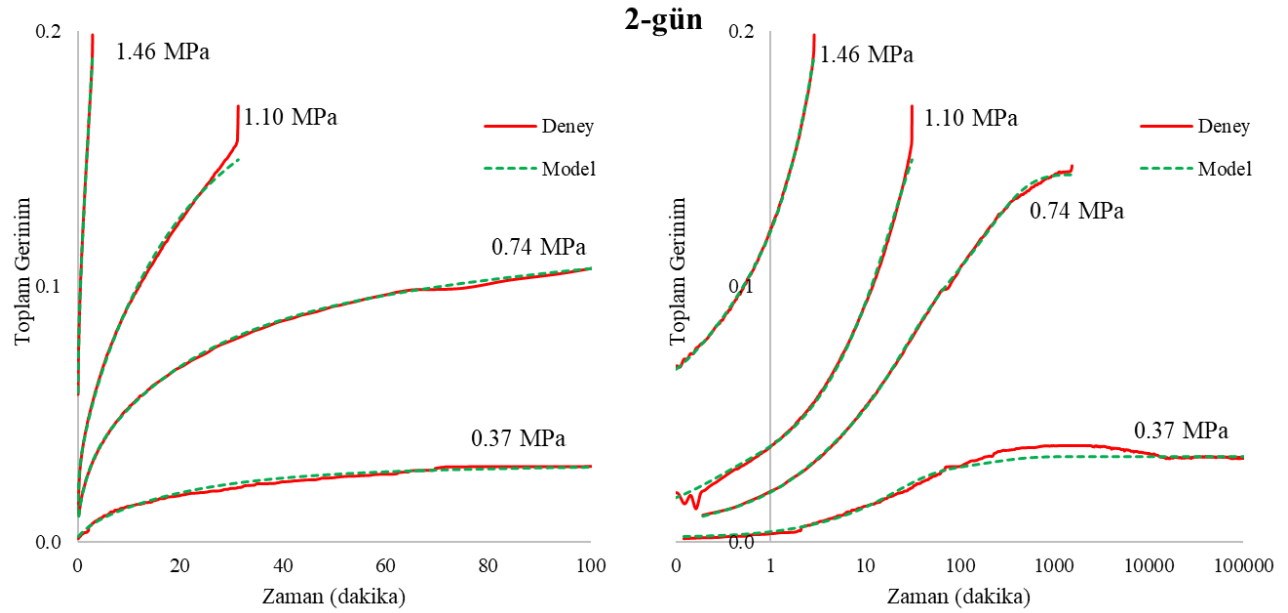
Kür Süresi (gün)	σ_n	E_0	C_0	C_1	E_1	C_2	C_3
	(MPa)	(MPa)	(MPa ⁻¹)		(MPa)	(MPa ⁻¹)	
7	0,42	482	0,011	0,21	25,90	88858	-2,22
	0,84	345	0,011	0,26	74,30	0,10	-0,10
	1,26	247	0,005	0,48	-	-	-
	1,68	42	0,009	0,77	-	-	-



PİK-2 Viskoplastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (14-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoplastik model sabitleri (14-gün)

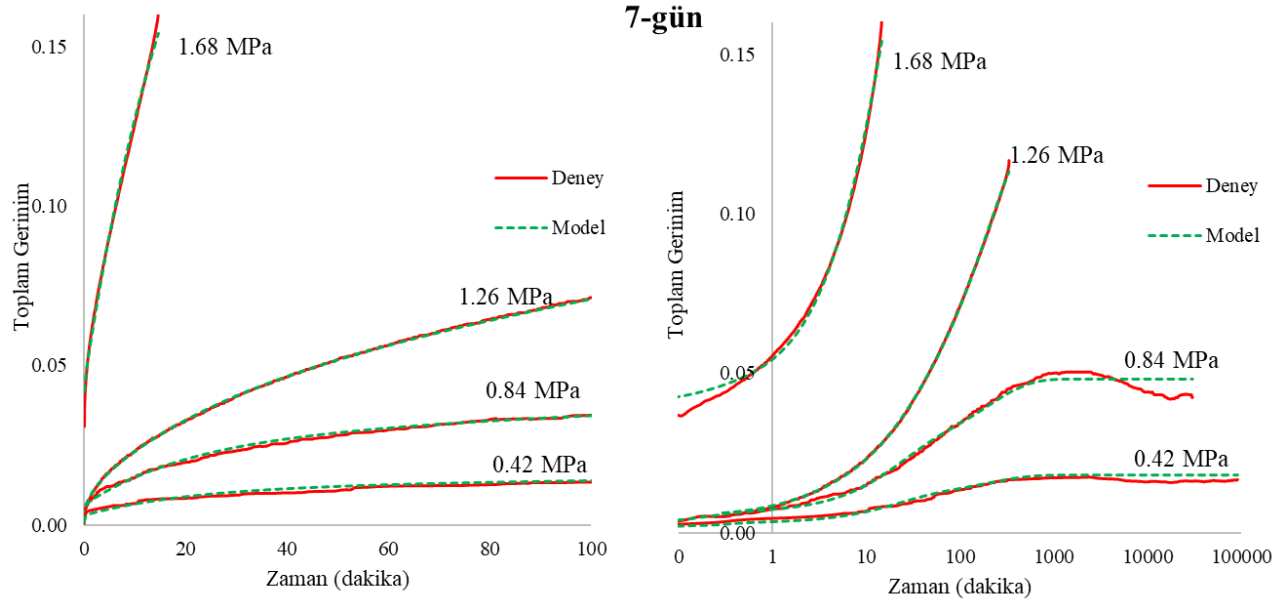
Kür Süresi (gün)	σ_n	E_0	C_0	C_1	E_1	C_2	C_3
	(MPa)	(MPa)	(MPa ⁻¹)		(MPa)	(MPa ⁻¹)	
14	0,53	6985	0,010	0,19	37,90	13,37	-0,99
	1,07	5620	0,004	0,28	31,30	0,00	-1,03
	1,60	3870	0,001	0,42	-	-	-
	2,14	177	0,004	0,46	-	-	-



PİK-2 Viskoelastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (2-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (2-gün)

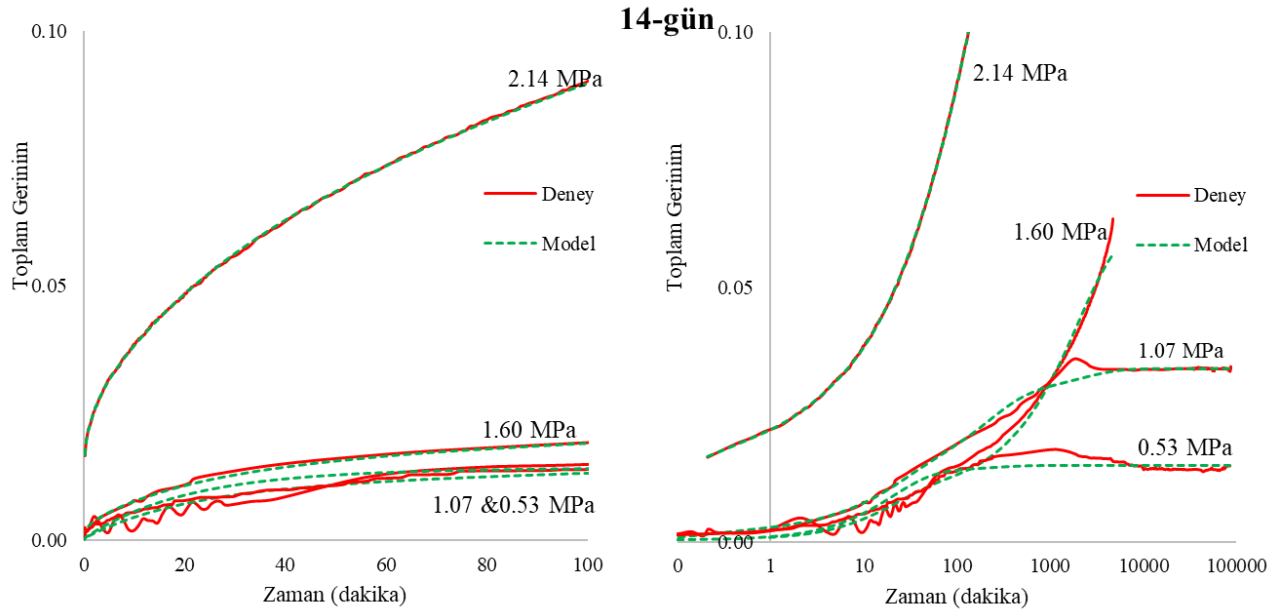
Kür Süresi	σ_n	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4
(gün)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
2	0,37	205	3,26E+07	1,41E+02	1,65E+01	5,68E+01
	0,74	140	1,77E+02	4,14E+01	1,31E+01	1,23E+01
	1,10	116	6,59E+01	9,47E+01	7,78E+00	-
	1,46	28	5,10E+01	1,25E+02	1,94E+00	-



PİK-2 Viskoelastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (7-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (7 gün)

Kür Süresi (gün)	σ_n (MPa)	E_0 (MPa)	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	E_4 (MPa)
7	0,42	482	1,94E+02	2,45E+08	5,11E+01	6,15E+01
	0,84	345	2,17E+02	2,17E+08	4,38E+01	3,70E+01
	1,26	247	2,99E+09	2,72E+02	5,90E+01	1,24E+01
	1,68	42	4,20E+02	1,46E+09	7,92E+00	-



PİK-2 Viskoelastik model sonuçları-deney sonuçları karşılaştırması (14-gün)

PİK-2 için elde edilen viskoelastik model sabitleri (14-gün)

Kür Süresi	σ_n	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
(gün)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
14	0,53	6985	1,51E+03	2,36E+09	4,01E+01	3,77E+02	8,00E+09
	1,07	5620	6,28E+02	8,86E+02	1,11E+02	6,81E+01	1,93E+02
	1,60	3870	2,10E+09	2,14E+09	1,65E+02	7,97E+02	3,27E+01
	2,14	177	3,70E+02	3,04E+02	1,07E+02	1,88E+01	-

EK-5 HAZIRLANAN ALT RUTİNLER

PIK-1 Alt rutini

```
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
  1 TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
  2 KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
  CHARACTER*3 FLGRAY(15)
  DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
    1 T(3,3),TIME(2)
  DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
  DOUBLE PRECISION S11, S22, S33, S12, S23, S31
  call GETVRM('S',ARRAY,JARRAY,FLGRAY,JRCD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,
  1 LACCFLA)
  sss= MAX(ARRAY (1) , ARRAY(2), ARRAY (3))
  FIELD(1) = (54.474*sss)+80.223
  RETURN
  END

  SUBROUTINE CREEP(DECRA,DESWA,STATEV,SERD,EC,ESW,P,QTILD,
  1 TEMP,DTEMP,PREFDEF,DPRED,TIME,DTIME,CMNAME,LEXIMP,LEND,
  2 COORDS,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,KSTEP,KINC)
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  CHARACTER*80 CMNAME
  DIMENSION DECRA(5),DESWA(5),STATEV(*),PREFDEF(*),DPRED(*),
  1 TIME(3),COORDS(*),EC(2),ESW(2)
C DEFINE CONSTANTS
  IF (QTILD .LT. 0.53) THEN
    E1=10**(0.5372*QTILD + 1.6779)
    E2= 669.26*QTILD - 133.31
    E3= 40.481*QTILD + 4.5748
    E4= -18.889*QTILD + 25.811
    E5= -12704*QTILD + 6892
    E6= -15.444*QTILD + 24.436
  ELSE IF (QTILD .GE. 0.53 .AND. QTILD .LE. 0.79) THEN
    E1=10**(20.493*QTILD - 8.8985)
    E2=-574.35*QTILD + 525.8
```

```

E3=-32.808*QTILD + 43.418
E4=-44.669*QTILD + 39.475
E5=-595.44*QTILD + 474.58
E6=-46.4*QTILD + 40.842
ELSE IF (QTILD .GT. 0.79) THEN
E1=10**(3.2214*QTILD + 4.7458)
E2=-189.04*QTILD + 221.41
E3=-25.926*QTILD + 37.981
E4=-10.696*QTILD + 12.636
E5= -10.696*QTILD + 12.636
E6=-10.696*QTILD + 12.636
ENDIF
      T1= (1/(E1*0.2))*(EXP(-TIME(3)/0.2))
T2= (1/(E2*2.0))*(EXP(-TIME(3)/2.0))
      T3= (1/(E3*20))*(EXP(-TIME(3)/20))
          T4= (1/(E4*200))*(EXP(-TIME(3)/200))
T5= (1/(E5*2000))*(EXP(-TIME(3)/2000))
T6= (1/(E6*20000))*(EXP(-TIME(3)/20000))
DECRA(1) = DTIME* QTILD* (T1+T2+T3+T4+T5+T6)
      RETURN          END

```

PiK-2 Alt rutini

```
SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
  1 TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
  2 KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
  CHARACTER*3 FLGRAY(15)
  DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
  1 T(3,3),TIME(2)
  DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
  DOUBLE PRECISION S11, S22, S33, S12, S23, S31
  call GETVRM('S',ARRAY,JARRAY,FLGRAY,JRCD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,
  1 LACCFLA)
  sss= MAX(ARRAY (1) , ARRAY(2), ARRAY (3))
  FIELD(1) = (-152.88*sss + 262.52)
  RETURN
  END

  SUBROUTINE CREEP(DECRA,DESWA,STATEV,SERD,EC,ESW,P,QTILD,
  1 TEMP,DTEMP,PREDDEF,DPRED,TIME,DTIME,CMNAME,LEXIMP,LEND,
  2 COORDS,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,KSTEP,KINC)
  INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
  CHARACTER*80 CMNAME
  DIMENSION DECRA(5),DESWA(5),STATEV(*),PREDEF(*),DPRED(*),
  1 TIME(3),COORDS(*),EC(2),ESW(2)
C DEFINE CONSTANTS
  IF (QTILD .LT. 0.74) THEN
    E1=10**(-14.234*QTILD + 12.78)
    E2=10**(-1.4394*QTILD + 2.6816)
    E3=10**(-0.2729*QTILD + 1.3187)
    E4=10**(-1.7929*QTILD + 2.4181)
  ELSE IF (QTILD .GE. 0.74 .AND. QTILD .LE. 1.1) THEN
    E1=10**(-1.1885*QTILD + 3.1263)
    E2=10**(1.0002*QTILD + 0.8763)
    E3=10**(-0.6277*QTILD + 1.5812)
    E4=10**(-0.5572*QTILD + 1.5036)
  ELSE IF (QTILD .GT. 1.1) THEN
    E1=10**(-0.31*QTILD + 2.1599)
```

```

E2=10**(0.3357*QTILD + 1.6073)
E3=10**(-1.6736*QTILD + 2.7317)
E4=10**(-1.6736*QTILD + 2.7317)
ENDIF

T1= (1/(E1*0.2))*(EXP(-TIME(3)/0.2))
T2= (1/(E2*2.0))*(EXP(-TIME(3)/2.0))
T3= (1/(E3*20))*(EXP(-TIME(3)/20))
T4= (1/(E4*200))*(EXP(-TIME(3)/200))

DECRA(1) = DTIME* QTILD* (T1+T2+T3+T4)
RETURN
END

```

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. HASAN ÖZTÜRK
Proje No:	115M581
Proje Başlığı:	Farklı Püskürtülen İnce Kaplamaların Sünme Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Sayısal Modellenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/09/2018
Onaylanan Bütçe:	180436.0
Harcanan Bütçe:	141924.0
Öz:	<p>Püskürtme İnce Kaplamalar (PİK?ler), maden kazılarının tahkimatı için kaya yüzeyine püskürtme olarak uygulanan, hızlı kür alan, göreceli olarak ince (2-5 mm) kaplamalardır. Yüze püskürtülerek uygulanan püskürtme beton ve polimer kaplamalar gibi tahkimatların çok düşük kaya yerdeğıştirmelerinde bile tahkimat direnci gösterme özellikleri vardır. Kaya yerdeğıştirmesinin çok fazla olduğu durumlarda, daha esnek olan PİK?ler püskürtme betona oranla daha üstün tahkimat özelliği göstermektedir.</p> <p>Bu çalışmada PİK?lerin oda sıcaklığındaki sünme özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir.Sonrasında sünme davranışlarını matematik-mekanik modele oturtulmuş ve sayısal olarak açıklık tahkimatı modellenmesinde zamana bağlı mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir.</p> <p>İki farklı PİK?in değişik sabit gerilmelerde gerinim-zaman (vizko elastik sünme) davranışları her kür süresi ve sabit gerilim değeri için en fazla 2 ay sürecek şekilde deneylerle tespit edilmiştir. Sonrasında elde edilen deney sonuçları değerlendirilerek PİK?lerin kama bloklarını taşıma özelliklerine ilişkin pratik grafikler oluşturulmuştur. Buna ek olarak deney sonuçları viskoelastik ve viskoplastik matematik modellere oturtulduktan sonra, bulunan temel (constitutive) gerilim-gerinim ilişkileri ABAQUS adlı sonlu elemanlar sayısal modelleme programına yeni bir alrutinle tanımlanmıştır. Oluşturulan alrutinlerin doğrulaması yapıldıktan sonra PİK?lerin yeraltı açıklıklarındaki global stabilite durumuna olan etkisi zamana bağlı olarak incelenmiştir. Bu inceleme 4 farklı sıkışma davranışına sahip dairesel kesitlerde yapılmıştır.</p> <p>Bütün bu çalışmalar sonucunda, literatürde ilk kez PİK?lerin sünme davranışları incelenmiş, PİK?lerin sünme davranışlarına karşı son derece duyarlı oldukları ortaya çıkarılmıştır. PİK?lerin önemli tahkimat mekanizmalarından olan blok taşıma özelliğinde blok ağırlılığını geniş kaplama alanlarına dağıttığı için etkin olarak kullanılabilen zaman dilimleri ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca oluşturulan alrutinler ile gelecekte PİK?lerin sünme davranışlarına ilişkin farklı çalışmalar yapılabileceği vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen farklı sıkışma davranışlarına sahip dairesel kesit analizleri sonunda farklı PİK? uygulama kalınlıklarına sahip PİK?lerin global stabiliteye etkisinin son derece düşük olduğu sonucuna varılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Püskürtme İnce Kaplama, sünme, viskoelastik, tahkimat, zamana bağlı davranış.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none">1- Creep behaviour investigation of a thin spray-on liner (Makale - İndeksli Makale),2- TENSILE/CREEP TEST SPECIMEN PREPARATION PRACTICES OF SURFACE SUPPORT LINERS (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),3- CREEP BEHAVIOUR OF A POLYMER-BASED UNDERGROUND SUPPORT LINER (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),4- Isothermal Creep Behaviour Investigation ofThin Spray-on Liners (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),5- TIME-DEPENDENT MATERIAL BEHAVIOUR OF AGED SURFACE SUPPORT LINER (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),