



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POLİMER MALZEMELERİN HASAR BİRİKİMİNE BAĞLI MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Önder Çağdaş ÖZENSOY**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ**

AKSARAY, 2022

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 202304006 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Önder Çağdaş ÖZENSOY tarafından hazırlanan “(POLİMER MALZEMELERİN HASAR BİRİKİMİNE BAĞLI MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ)” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Prof.Dr. Necmettin Şahin

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nazlı Özsolak

Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Önder Çağdaş ÖZENSOY

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında bana yol gösteren ve gerektiğinde bilgilerini benden esirgemeyen araştırma projesi danışmanım Sayın Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ'ye testleri gerçekleştirme konusunda yardımını aldığım değerli Petlas Lastik Fabrikası Lastik Deney Şefliği çalışanları ve benim buralara gelmemdeki en büyük paya sahip, maddi ya da manevi tüm desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen her zaman yanımda olan benim için çok değerli olan aileme teşekkür ediyorum.

Önder Çağdaş ÖZENSOY

AKSARAY,2022



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	11
2.1 Deneysel Prosedür	16
2.2 Lastiğin Yapısı	19
2.3 Lastiğin Temel Görevleri	23
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	24
3.1 Polipropilenin Hasar Etkileşimi ve Döngüsel Davranışı.....	24
3.2 Araştırma Sonuçları.....	24
3.3 Tek Eksenli Çekme Çevrim Testleri	24
3.4 Gevşeme testleri	30
3.5 Lastik İçin Uygulanan Standart Testler	35
3.5.1 Genel dayanıklılık testi	35
3.5.2 Topuk dayanıklılık testi	37
3.5.3 Karkas dayanıklılık testi	38
3.5.4 Topuk düşürme testi	39
3.5.5 Yuvarlanma direnci testi	42
3.5.6 Parçalanma enerjisi (plunger) testi	45
3.5.7 Binek lastikleri ece r30 onay testi.....	46
3.6 Lastik Hasar Testi Sonuçları	53
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ.....	63

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMER MALZEMELERİN HASAR BİRİKİMİNE BAĞLI MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Önder Çağdaş ÖZENSOY

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ÖZET

Son yıllarda mühendislik yapılarında polimerik malzemelerin uygulamaları oldukça artmıştır. Bu nedenle polimerik malzemelerin elastik olmayan deformasyon mekanizmasını anlamaya yönelik çalışmaların sayısı da oldukça çok artmıştır. Polimerik malzemelerin gözlemlenen özellikleri ışığında ortaya konacak modellerin; lineer olmayan yüksek hız ve sıcaklık bağımlılığı, lineer olmayan boşaltma davranışı, hidrostatik yükleme altında akma, çevrimsel yumuşama ve sıfır gerilme seviyesinde toparlanma gözönünde bulundurulması gerekir.

Polipropilen (PP) son yarım yüzyıldır bir çok sahada taşıyıcı eleman olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin seçimindeki temel etkenler, viskoelastik özelliklere sahip olması, düşük maliyet ve çok iyi dizayn kriterleridir. PP birçok olumlu özelliği ile uygulamalarında kullanılmasına rağmen, plastik deformasyon, yorulma ve hasar sonucunda ekipmanların beklenen ömür süresinden önce devre dışı kalması uygulamalar açısından sınırlandırmalar meydana getirmektedir.

Bu tez çalışmasında başta PP olmak üzere diğer polimerik malzemelerin mekanik davranışlarını deneysel ve teorik araştırmaların gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca uygun olarak ilk etapta tek eksenli monotonik yükleme şartları altında bir kısım testler gerçekleştirilmiştir. Kısa dönem elastik ve elastik olmayan deformasyon davranışlarını ortaya koymaya amaçlayan bu deneyler; yükleme-boşaltmada şekil değiştirme hız hassaslığı, çevrimsel yükleme, gevşeme, yükleme geçmişi bağımlılığını belirlemek üzere katlamalı gevşeme testlerini içermektedir.

Bu çalışmada bir binek lastiğinin seri üretime alınmadan önce sağlaması gereken standart statik ve dinamik nitelik testlerinin uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla belli bir ebata sahip olan bir lastik seçilmiş olup bu lastiğe genel dayanıklılık, topuk dayanıklılık, karkas dayanıklılık, topuk düşürme, yuvarlanma direnci, parçalanma enerjisi (plunger) ve ECE R30 Onay (Yüksek Hız) testleri uygulanmıştır.

Çalışmanın ana amacı katı polimerik malzemelerin özellikle PP'nin deformasyon davranışlarını anlamak ve bu deformasyon davranışlarını modellemeye uygun sonuçlar ortaya koymaktır.

Anahtar Kelimeler: Polipropilen, Lastik, Polimer Malzemeler, Mekanik Özellik, Hasar, Yorulma, Elastik, Gevşeme, Yükleme, Deformasyon

Aralık, 2022; 63

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIORS OF POLYMER MATERIALS DUE TO DAMAGE ACCUMULATION

Önder Çağdaş ÖZENSOY

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necmi DÜŞÜNCELİ

ABSTRACT

In recent years, the applications of polymeric materials in engineering structures have increased considerably. For this reason, the number of studies to understand the inelastic deformation mechanism of polymeric materials has increased considerably. In the light of the observed properties of polymeric materials, the models to be revealed; Nonlinear high velocity and temperature dependence, nonlinear discharge behavior, flow under hydrostatic loading, cyclic softening and recovery at zero stress level should be considered.

Polypropylene (PP) has been used as a carrier element in many fields for the last half century. The main factors in the selection of this material are its viscoelastic properties, low cost and very good design criteria. Although PP is used in applications with its many positive features, the failure of equipment before the expected life time as a result of plastic deformation, fatigue and damage creates limitations in terms of applications.

In this thesis, it is aimed to carry out experimental and theoretical researches on the mechanical behavior of other polymeric materials, especially PP. In accordance with this purpose, some tests were carried out under uniaxial monotonic loading conditions in the first stage. These experiments aiming to reveal short-term elastic and inelastic deformation behaviors; It includes convolutional relaxation tests to determine strain velocity sensitivity in loading-unloading, cyclic loading, relaxation, and loading history dependence.

In this study, the application of standard static and dynamic property tests, which should be provided before a passenger tire is put into mass production, has been applied. For this purpose, a tire with a certain size was selected and general durability, bead durability, carcass durability, bead drop, rolling resistance, plunger and ECE R30 Approval (High Speed) tests were applied to this tire.

The main purpose of the study is to understand the deformation behavior of solid polymeric materials, especially PP, and to produce results suitable for modeling these deformation behaviors.

Keywords: Polypropylene, Tire, Polymer Materials, Mechanical Property, Damage, Fatigue, Elastic, Relaxation, Loading, Deformation

December, 2022; 63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Instron 3366 çekme test cihazı	18
Şekil 2.2. Polipropilen numune.....	18
Şekil 2.3. Lastik kesiti örneği.	22
Şekil 2.4. Lastik test numunesi.	22
Şekil 3.1. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=1 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.	25
Şekil 3.2. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=2 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.	26
Şekil 3.3. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25 MPa gerilme seviyelerinde N=2 ve 200 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.	26
Şekil 3.4. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=5 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi..	27
Şekil 3.5. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=5 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.	27
Şekil 3.6. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=100 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi	28
Şekil 3.7. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=200 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi	28
Şekil 3.8. Gerilim-Gerinim eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa. N=1, 2, 5, 20, 100 ve 200 histerisiz miktarı.	29
Şekil 3.9. Döngü sayısı ile maksimum gerilim $\sigma_{\max}$ azalışı. $\epsilon_{\max} = 0.09$	29
Şekil 3.10. Döngü sayısı ile minimum gerinim $\epsilon_{\min}$ artışı. $\sigma_{\min} = 1$ MPa.	30
Şekil 3.11. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri	33
Şekil 3.12. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri	33
Şekil 3.13. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri	34
Şekil 3.14. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri	34
Şekil 3.15. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri	35
Şekil 3.16. Topuk düşürme ünitesi	41
Şekil 3.17. Topuk düşürme çenesi	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Basınç çizelgesi.	36
Çizelge 3.2. Yükleme çizelgesi.....	36
Çizelge 3.3. Topuk düşürme test basınçları çizelgesi.	40
Çizelge 3.4. Çene aparatı ve bağlantı mesafesi bilgileri çizelgesi.....	41
Çizelge 3.5. Yük-Basınç çizelgesi	43
Çizelge 3.6. Hız çizelgesi	43
Çizelge 3.7. Warm up süresi	44
Çizelge 3.8. Basınç çizelgesi	46
Çizelge 3.9. Basınç çizelgesi	47
Çizelge 3.10. Hız kategorisi-test yükü çizelgesi.	48
Çizelge 3.11. Tambur çapı- hız kategorisine göre testte kullanılacak azami hız değerleri.....	49
Çizelge 3.12. 1.70 m $\pm$ % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı çizelgesi.....	50
Çizelge 3.13. 2 m $\pm$ % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı çizelgesi.....	51
Çizelge 3.14. 1.70 m ve 2 m $\pm$ % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı.	52
Çizelge 3.15. Genel dayanıklılık testi deney öncesi ve sonrası ölçümler.....	53
Çizelge 3.16. Test gerçekleşme limitleri.....	53
Çizelge 3.17. Topuk dayanıklılık deney öncesi ve sonrası ölçümler.....	54
Çizelge 3.18. Test gerçekleşme limitleri.....	54
Çizelge 3.19. Karkas dayanıklılık deney öncesi ve sonrası ölçümler.....	54
Çizelge 3.20. Test gerçekleşme limitleri.....	54
Çizelge 3.21. Topuk düşürme testi ölçümleri.	55
Çizelge 3.22. Yuvarlanma direnci testi deney öncesi ölçümler.....	55
Çizelge 3.23. Test gerçekleşme limitleri.....	55
Çizelge 3.24. Parçalanma enerjisi (plunger) testi deney öncesi ölçümler.	56
Çizelge 3.25. Test gerçekleşme limitleri.....	56
Çizelge 3.26. Binek lastikleri ece r30 onay (yüksek hız)testi deney öncesi ve sonrası ölçümler.....	56
Çizelge 3.27. Test gerçekleşme limitleri.....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

ASTM	American Society for Testing and Materials
daN	DekaNewton
dk	Dakika
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
ECE R30	Avrupa Ekonomi Komisyonu Binek Araçlar Lastik Onayı
ETRTO	Avrupa Lastik İmalatçıları Organizasyonu
FEA	Sonlu Elemanlar Analizleri
h	Saat
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
J2	Plastisite/Akış Teorisi
kg	Kilogram
km	Kilometre
kPa	Kilopascal
LDPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
LSR	Midibüs ve Kamyonet Radyal Lastiği
LVR	Hafif Ticari Radyal Lastik
m	Metre
mm	Milimetre
n	Çevrim Sayısı
PEEK	Polieterketon
PEI	Polietermid
PEX	Çapraz Bağlı Polietilen
PMMA	Polimetil Metakrilat
POM	Polioksimetilen
PP	Polipropilen
PSI	Pounds Per Square Inch
S	Sırt
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi
TBR	Kamyon Otobüs Radyal Lastiği
UHMWPE	Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
X RD	X-Ray Difametre
Y	Yanak
°C	Santigrat
ϵ_{min}	Minimum Gerinim
ϵ_{max}	Maksimum Gerinim
σ_{min}	Minimum Gerilme
σ_{max}	Maksimum Gerilme
δ	Özkütle

1. GİRİŞ

Polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesi ve biyomekanik uygulamalar son yılların en güncel konularından ikisidir. Her iki konuda birçok açıdan açıklanmaya muhtaç alanlara sahiptir. Bu konularla ilgili yapılan araştırma sonuçları uluslararası sahada çok dikkat çekicidir. Bulunan sonuçlar uluslararası düzeyde dikkat çekici ve çözüme yönelik katkılar sağlayacaktır. Çalışma konusunun gelişim açık ve güncel olmasından dolayı, literatürdeki boşluğu doldurmaya yardımcı olacağı için önemli sonuçlar doğuracaktır. Bu sonuçlar ilk başta araştırmacıları konu hakkında daha uzman ve deneyimli hale getirmekle yararlı sonuçlar doğuracaktır.

İnsanların daha emniyetli, huzurlu ve kolay yaşamasını sağlamak için var olan mühendislik bilimi, üretime yönelik yarar sağlamak ve uygulamak üzere çalışır. Çalışmaları son aşamaya ulaştıran üretici, üretim hızının yüksek olmasını ve maliyetin düşük olmasını talep eder. Farklılaşan ihtiyaç parametreleri ile kullanılacak olan malzemelerde de değişiklik ihtiyacı doğar. Zamanla değişen isteklerin malzemede test yapmayı mecbur kılar. Test yapmaktan kasıt; a) Tasarım kriterlerini ortaya koymak b) Güvenirlilik limitlerini netleştirmek, c) Güvenlik, d) Üretim elverişliliğini sağlamak, e) Kalite kontrol, f) Sabit ve özel şartları bir çerçevede oluşturmak, g) İmalat proseslerinin gözden geçirilmesi h) Sonuçları doğrulamak i) Yeni bileşen türleri için bir temel ortaya koymak. Polimerik malzemeler son zamanlarda birçok imalat sahasında maliyeti azaltan, üretim hızını artıran ve otomasyon üretime sahip olduğu için daha çok tercih edilmektedir. Polimerik malzemelerin özellikle mekanik özelliklerinin belirlenmesi ayrıntılı olarak ele alınmalıdır. Bu nedenle uygulanacak olan testlerdeki yanılgılar; testin belirlenmesi, testi uygulayan kişi ve test numunesiyle ilişkilidir (Jourdan vd., 1989).

Polimerik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar deneysel ve bu deney sonuçlarını açıklamaya yönelik modelleme çalışmalarını içermektedir. Deneysel çalışmalar temel olarak çekme/basma şartları altında yükleme-boşaltma, sünme, gevşeme, toparlanma ve kırılma davranışını anlamak üzere yoğunlaşır. Literatürde polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi ise iki temel üzerinde oluşur, makro ve mikroyapısal. Makro modeller genel olarak elastik ve akışkansız yapıyı benzetmek için elektrik devresi kurarak ve viskoelastisite kuramlarıyla gerçekleşir. Bu fikrin temeli Standart Lineer Katı modellemelerini, Maxwell ve Kelvin modellemelerini içerir.

Mikro modeller ise, malzemenin iç yapısının parametrelerini kabul eden matematiksel ifadeleri ve malzeme yapısını tıpkı bir kompozit malzemede olduğu gibi iki farklı elemandan oluştuğunu düşünerek çözüm odaklı yaklaşımları içerir (Dusunceli, 2010a).

Polimerik malzeme türlerinden biri olan polipropilen (PP) günümüz teknolojik cihazlarının yaygın ana hammaddesinden biridir. Son elli yıldan beri sürekli artan oranlarda kullanılmaktadır. Bu malzemenin yük taşıyıcı olarak yaygın kullanılmasının en önemli iki temel özelliği imalatın kolay, dayanım ve hijyen özelliklerinin yüksek olmasıdır. PP'nin genel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen literatürde özel mekanik özelliklerini belirlemek üzere ortaya konan çalışmaların büyük çoğunluğu son yirmi yıla dayanmaktadır. Mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik çalışmaların öncülüğünü ise Baral vd. (2019) yapmaktadır ve ağırlıklı olarak çekme/basma ve çevrimsel yükleme deneyleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. İlerleyen yıllarda Sweeney vd. (2009) ile işbirliği içerisinde modelleme çalışmalarına da yönelmiştir. Ho (2001) çalışmalarında, PP numuneler kullanarak gerçekleştirdiği deneylerde çekme özelliklerine içyapı değişkenlerinin etkilerini araştırmışlardır. X ray diframetre (X RD) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyleri ile çekme sonrası modüller, akma gerilmesi, en büyük gerilme, kopma uzaması ve kopma enerjisi arasındaki ilişkileri ortaya koymuşlardır. Das ve Roy (2019) PP'nin geniş gerinim seviyesinde çekme sonrası kopma davranışını ve çevrimsel yükleme davranışını modelleyebilmek üzere beş ayrı malzeme modeli üzerinde çalışmıştır. Bu modeller Arruda-Boyce, Hasan-Boyce, Bergstrom-Boyce ve J_2 plastisite modelleridir (Bergström vd., 2002). Modelleme çalışmasını tek eksenli çekme yüklemesi için küçük gerinim seviyesinde, orta gerinim seviyesinde ve geniş gerinim seviyesinde ayrı ayrı incelemiştir. Her bir seviyede seçmiş olduğu modellerin zayıflıklarını ortaya koymuştur. Aynı şekilde model karşılaştırmasını çevrimsel yükleme davranışını modellemek üzere de yapmıştır. Mevcut malzeme modellerinin eksiklerini ortaya koyduktan sonra, bu davranışların tümünü birden açıklayabilecek kabiliyette bir modeli, mevcut modellerden yararlanarak hibrit model şeklinde ortaya koymuştur. Drozdov (2010) çalışmalarında PP numuneler kullanarak tek eksenli çekme, basma, çevrimsel yükleme ve zımba (small punch) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler çeşitli kimyasal ortamlarda farklı yaşlanma şartlarında hazırlanarak, farklı kristallik dereceleri ve içyapılarda elde edilmiştir. Ortaya konan tek eksenli çekme ve çevrimsel

yüklemeye deney sonuçlarını modellemek üzere bir hibrit model ortaya konulmuştur. Daha sonra aynı modelin zımbalama (çok eksenli yüklemeye hali için) deney sonuçlarını açıklayıp açıklayamayacağı incelenmiş, simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ariyama (1994) polimer numuneleri değişik yaşlandırma etkilerine tabi tutarak, çekme şartları altında mekanik özelliklerin değişimlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Ayrıca yaşlandırmanın iç yapıda ne tür değişiklikler gerçekleştirdiğini SEM (taramalı elektro mikroskop) analizi ile incelemiştir. Ge vd. (2019) polimer numuneler ile tek eksenli çekme/basma ve çevrimsel yüklemeye şartlarını içeren deneyler ortaya koymuşlardır. Bu testler esnasında sadece bir gerinim hızı seviyesi için incelemeler yapılmıştır. Çevrimsel yüklemeye esnasında meydana gelen gerinim yumuşamasının, çevrimsel gerinimin artması ile arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca malzemenin viskoplastik akış bölgesinde çekmede basmaya göre daha mukavim özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Son olarak da çevrimsel yüklemeye gerinim yumuşaması ile çekme-basma dayanımını karşılatırmışlardır. Ivey vd. (2017) çalışmasında karbon-fiber epoksi ile güçlendirilmiş polimerler'in basınç altında dayanımını ve akma gerilmesi seviyesi altındaki sünme davranışını incelemiştir. Basınç dayanımı deneyleri sonucunda, değişik doldurma oranlarında güçlendirilmiş polimerler'in elde edileceğini ve bunun dayanım açısından fayda sağlayacağı sonucunu çıkarmışlardır. Bir diğer açıdan sünme ve toparlanma deformasyonunun numune kenar kalınlığı ve radyusuna (yüzey şekli) bağlı olduğu sonucunu çıkarmışlardır. Bu çalışma optimum kenar geometrisinin elde edilemesi noktasında literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Amoedo ve Lee (1992) polimer malzeme hakkında yapmış olduğu derlemede, çapraz bağlanmanın yorulma, kırılma, akma ve deformasyon davranışı üzerine incelemeler yapmıştır. Akma, kırılma ve yorulmayla ilgili çevrimsel hasardan dolayı implant oluşturmada en büyük sınırlandırmaların yaşandığından söz etmiştir. Sonuç olarak yüksek çapraz bağlı polimerler'in implant ve taşıyıcı eleman olarak ortopedik uygulamalarda kullanımının daha da yaygınlaşacağından söz etmiştir. Çapraz bağlama işleminin aşınma direncini artırmakla beraber, çekme kopma mukavemeti, modülleri, çatlak ilerlemesini ve tokluğu olumsuz yönde etkilemektedir sonucuna varmışlardır. Mourad vd. (2009) termomekanik ve dinamik analiz ile polimerler'in viskoelastik özelliklerini frekans ve sıcaklığın fonksiyonu olarak incelemiştir. Burada ön ısıtma işleminin; kristallik derecesini etkilediği, viskoelastik özelliklerin yüklemeye frekansı ve sıcaklığa karşı hassas olduğu sonuçlarını çıkarmışlardır. Ayrıca ön ısıtma işleminin, dinamik

depolama (storage) modülünü ve gevşeme sıcaklığını arttırdığı sonuçlarını elde etmişlerdir. Brusselle-Dupend ve Cangemi (2008) konvansiyonel ve yüksek çapraz bağlı polimerlerin hasar mekanizmalarını ve tek eksenli çekmede kırılma davranışını incelemişlerdir. Gerçekleştirilen SEM analizlerinden konvansiyonel ve yüksek çapraz bağlı polimerlerin kırılma davranışlarında benzer mekanizmaların işlediği sonucunu çıkarmışlardır. Fairhurst vd. (2019) bir dizi çekme/basma ve çevrimsel yükleme testi gerçekleştirerek polimerlerin gerilme-gerinim davranışını incelemiştir. Kopma gerilmesi seviyesindeki azalmanın basma şartlarına göre çekmede daha yüksek olduğu sonucunu gözlemlemiştir. Daha sonra J₂ plastisite modelinden faydalanarak sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla hesaplamalar yapmıştır. Bu hesaplamalarla çevrimsel yükleme davranışını modellemeye çalışmıştır. Caelers vd. (2016) daha önceki çalışmasından ortaya koymuş olduğu hibrit model üzerinde bir takım modifikasyonlar yaparak, konvansiyonel polimerlerin yanı sıra yüksek çapraz bağlı polimerlerin çevrimsel yükleme özellikle boşaltma davranışını ve geniş gerinim seviyesinde kopma davranışını modellemiştir. Modeli ayrıca aşınma, yorulma ve kırılma davranışlarını da açıklayabilmek için denemiştir. Li vd. (2019) yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), ultra yüksek yoğunluklu polietilen UHMWPE ve çapraz bağlı polietilen (PEX) numunelere ile basma şartları altında yükleme davranışlarının farklı şekil değiştirme hızlarına ve sıcaklığa bağlı olarak incelemişlerdir. UHMWPE ile PEX'in oldukça benzer davranışlara sahip olduğunu fakat HDPE'nin davranışlarında ise bir kısım dikkat çekici farklılıklar olduğunu gözlemlemiştir. HDPE oldukça yüksek akma gerilmesine ve düz bir plastik akışa (sabit gerilme altında) sahiptir. UHMWPE ve PEX ise daha düşük akma gerilmesi seviyesine ve akma sonrası plastik akış gözlemlenmeksizin gerinim pekleşmesine geçiş yapmaktadır. Ge vd. (2019) polimerlerin kısa ve uzun dönemdeki sünme davranışını incelemişlerdir. Zaman-sıcaklık süperpozisyon ilkesini kullanarak sünme deneyi sonuçlarını modellemeye çalışmışlardır. Yapmış oldukları deneylerde sünme deformasyonunun zamanın ilk aralığında daha yoğun olduğunu tespit etmişlerdir. Bergström vd. (2003) polimerlerin çekmede gerilme-gerinim davranışını belirlemek ve modellemek üzere çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kimyasal ve mekanik açıdan şartlandırılmış numuneler kullanılmıştır. Gerilme-gerinim davranışlarının mekanik ve kimyasal ön şartlandırmalara duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Tespit edilen mekanik özelliklerden, elastisite modülü ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi ifade etmek üzere bir amprik bağıntı ortaya koymuştur. Day vd. (2020) polimerlerin kırılma davranışı

üzerinde akma ve plastik akışın etkilerini ortaya koymak üzere deneysel çalışmalar ortaya koymuşlardır. Bu amaçla monotonik yükleme şartları altında çekme ve basma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde akma sınırına kadar çekme ve basma eğrilerinin çakışık olduğunu tespit etmişlerdir. Pekleşme, plastik akış ve kırılma davranışlarının ise birbirinden oldukça farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Çekme şartlarında daha mukavim özellikler gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Baykal vd. (2016) polimerlerin mekanik davranışını kristalleşme morfolojisine bağlı olarak çok eksenli yükleme şartları altında incelemişlerdir. Deneyler sekiz tip konvansiyonel ve çapraz bağlı UHMWPE kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çapraz bağlama işlemi sonrasında dayanımın arttığı fakat esnekliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çapraz bağlama işleminin pekleşme davranışını artırmakta olduğunu gözlemlenmiştir. Lewis ve Carroll (2001) polimerlerin çapraz bağlanma işlemi sonrası çekme ve basma şartlarında sünme davranışını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda çapraz bağlama işleminin sünme davranışını olumsuz yönde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Bunun nedeninin çapraz bağlama esnasında düşen kristallik derecesi olduğunu vurgulamışlardır. Meyer ve Pruitt (2001) polimerlerin çevrimsel yükleme ve gevşeme davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada iki farklı işlemde geçirilmiş numune kullanılmış ve malzeme içyapısına bağlı olarak mekanik davranışta farklılıklar olduğu sonucuna varmışlardır. Kalıcı plastik gerinimin, çevrime bağlı olarak artan gerinim seviyesi ile arttığını gözlemlemişlerdir. İç yapıyla ilgili yapılan SEM analizlerinde ise çevrim sayısı ve kalıcı plastik gerinim artışının, lameler düzenlemeyi arttırdığı sonucunu belirlemişlerdir. Mourad vd. (2009) gerinim hızına bağlı olarak kırılma davranışını incelemek üzere UHMWPE ve polioksümetilen (POM) numunelerle karşılaştırmalı bir çalışma ortaya koymuşlardır. “Quasi-statik” çekme deneyi sonuçlarından POM ve Polimerlerin mekanik davranışının gerinim hızına karşı hassas olduğunu gözlemlemişlerdir. Chen vd. (2019) polimerlerin dinamik cevapları ve kırılma davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Düz numuneler çentikli ve çentiksiz olarak imal edilmişlerdir. Polimerlerin çekme özelliklerinin hem gerinim hızı seviyesine hem de gerilmenin üç eksenli olmasına karşı hassas olduğunu ortaya koymuşlardır. Çentiksiz numunelerde akma gerilmesinin gerilme hızıyla arttığı fakat ortalama kopma gerilmesinin azaldığı sonucunu çıkarmışlardır. Kırılma davranışını modellemek üzere Johnson-Cook modelini kullanmışlardır. Bu modelin kırılma davranışını modellemede oldukça başarılı olduğu sonucunu göstermişlerdir.

Yukarıda kısaca bilgi verilen çalışmalarda da görüldüğü üzere Polimerlerin mekanik davranışı henüz bir çok açıdan açıklanmaya muhtaçtır. Çalışmalara bakıldığında bunların genel olarak yük altında şekil değiştirme hızına bağlı davranışını incelemek üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar sayesinde akma sınırı viskoplastik akış sınırları ve dayanım sınırlarını belirlemek mümkün olmuştur. Bunun dışında yükleme elemanı olarak kullanılan malzeme ekipmanın normal faaliyetlerini sürdürmesi esnasında çok komplikle yüklere maruz kalmaktadır. Bu komplike yapıyı oluşturan deformasyon türlerinden biri de çevrimsel yükleme davranışıdır. Çalışmaların bir çoğunun hasar ve kırılma davranışını incelediği görülmüştür. Bu amaçla geniş gerinim seviyesinde kopma davranışı incelenmiştir. Çalışmalar bir diğer açıdan, ekipmanın ısısal ve kimyasal etkileşimlerini ortaya koymak açısından kimyasal, termal ve mekanik ön şartlandırmaya maruz kalmış numunler üzerinde deneyler yaparak sonuçların karşılaştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer yandan bir kaç tane sünme davranışını inceleyen çalışma vardır ki bu çok az sayıdır. Oysa sabit yük altında zamanla meydana gelen deformasyon (sünme) polimerik malzemelerde oda sıcaklığında bile meydana gelmektedir. Ekipman içerisinde çalışan yük elemanlarında bu durumu kaçınılmaz olarak ortaya çıkacaktır. Yapılan araştırmada gevşeme davranışı ile ilgili çalışmayla karşılaşılmanmıştır, buda çok büyük bir eksiklik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak polimerlerin mekanik davranışı bir çok açıdan incelemeye açıktır. Bunlar yukarıda da bahsedildiği gibi gerinim hızı etkilerinin değerlendirilmesi yanı sıra özellikle sünme, gevşeme ve yükleme geçmişi bağımlılıklarının belirlenmesidir. Bu tez çalışmasında deneysel olarak gevşeme davranışları ile yükleme geçmişine bağlı davranışın incelenmesi literature katılacak en önemli katkılardan olacaktır.

Polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının genel özellikleri; yükleme ve boşaltmada davranışın lineer olmaması, hidrostatik basınçın akma davranışını etkilemesi, sıfır gerilmede belirgin toparlanma ve sünme ile gevşeme davranışının elastik bölgede dahi gözlemlenmesidir. Bu özellikler metalik malzeme ile polimerik malzeme arasındaki en bariz farklılıklar bu özelliklerdir (Drozdov ve Dusunceli, 2012, 2013; Dusunceli, 2010a, 2010b, 2012; Dusunceli ve Colak, 2006; Dusunceli vd., 2017). Diğer yandan polimerik malzemeler oda sıcaklığında sünme ve gevşeme özellikleri gösterirler. Başta bu özellikler olmak içyapı değişimlerinin etkileri de gözönüne alındığında polimerik malzemelerin mekanik davranışları çok karmaşık bir

yapı sergilemektedir. Bu karmaşık yapıyı çözebilmek en başta değişik durumları da içine alan çok sayıda deney gerçekleştirmek zorunluluğu doğurmaktadır. Bu sonuçların uygun bir model ile ifade edilmesi ayrı bir zorluk ortaya çıkarmaktadır. Biyomedikal polimerik malzeme türlerinden biri olan ve yaygın olarak kullanılan Polimerlerin mekanik davranışının incelenmesi daha çok hasar davranış üzerine, yükleme-boşaltma ve çevrimsel yükleme davranışı üzerine hem deneysel hem de matematiksel olarak birkaç makalede incelenmiştir. Öte yandan sünme davranışının üzerine sadece deneysel çalışmalar yapılmıştır ki bu da sınırlı sayıdadır. Yapılan literatür araştırması sonucunda özellikle gevşeme davranışının hiç incelenmediği görülmüştür ki bu özellik implantların monte edilmesi ve sabitlenmesi esnasında uygulanacak gerilmenin tespitinde ve ticari sonlu elemanlar programları ile analizler yapabilmek için gerekli parametrelerin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Diğer yandan sünme davranışının modellenenebilmesi üzerine de yoğun bir çalışma yoktur. Bu projede gevşeme davranışının belirlenmesi ve modellenmesi ile sünme davranışının modellenmesi önemli farklılıklardan olacaktır. Diğer yandan yükleme geçmişinin etkilerini araştırmak üzere katlamalı gevşeme ve sünme deneylerinin yapılması ve modellenmesi de literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Son olarak çevrimsel yüklemenin deneysel olarak araştırılması ve modellenmesi sonucunda bilhassa çevrimsel sünme davranışının araştırılması literatür açısından çarpıcı bir farklılık ortaya çıkaracaktır. Bütün bu tutumlar tek bir değişken grup ve tek bir model ile izah yoluna gider. Bunun başarılması ise literatür açısından ve bilhassa pratik dizayna yönelik yapısal hesaplamalarının kolaylaştırılması açısından önem arz etmektedir.

Lastik bir taşıtın yer ile teması olan tek temas noktasıdır. Lastikler, araçların yük ağırlığını taşır ve içten yanmalı motorların meydana getirdiği döndürme kuvvetini zemine aktararak hareket kuvvetine dönüştürür. Fren kuvvetini durma esnasında, Dönüşlerde ise direksiyon kontrolünü sağlamak için aerodinamik kuvveti üretir. Lastikler esnek yapısı sayesinde sürücünden kaynaklı ve yol bozukluklarından kaynaklı ortaya çıkan kuvveti emerek sürüş konforu sağlar. Yol zeminin şekline göre (asfalt, toprak) ve zeminin durumu (yağmur, çamur, kar, buz) ne olursa olsun, güvenli bir şekilde yol tutuşu sağlamak lastiğin görevidir. Lastik firmalarının ürün geliştirme birimleri her geçen gün lastik iyileştirme çalışmaları yaparken diğer yandan bu yenilikleri tespit etmek amacıyla lastik test ünitelerini de geliştirme yoluna gitmektedirler. Testlerin bu denli önemli olmasının sebebi sektör itibari ile insan sağlığı

ile direk ilişkili olmasıdır. Günümüzde güvenlik en önemli öncelik bu nedenle lastikler seri üretime verilirken güvenlik ve konfor ile ilgili tüm hususlar dikkate alınıyor. Bu yüzden lastikler yoğun bir test prosedüründen geçmek zorundadır. Her yeni lastiğin yüzlerce kilometrelik testleri tamamlaması gerekir. Lastik, içinde basınçlı hava tutabilecek şekilde tasarlanmış, janta monte edilerek aracın yer ile temasını sağlayan, dışarıdan basit, sanki uniform bir yapıdaymış gibi görünmesine rağmen, içinde kauçuk, kord bezi, çelik teller ve birçok kimyasal bulunduran kompozit yapıda, yüksek teknoloji gerektiren bir süreç ile üretilen, aracın en önemli parçalarından biridir.

Lastik teknolojisinde, hava tutan (pnömatik) lastiğin icadından bu yana büyük gelişmeler meydana gelmiştir.

1888 yılında ilk hava tutan lastik geliştirilmiştir. 1898 yılında ilk otomobil lastiği geliştirilmiştir. 1910 yılında kord bezinin kullanıldığı ilk lastik geliştirilmiştir. 1937 yılında çelik kordlu lastik icat edilmiştir. 1946 yılında çelik radyal lastik geliştirilmiştir. 1947 yılında iç lastiksiz (tubeless) lastiğin icadı gerçekleşmiştir. 1956 yılında kış lastikleri Avrupa'da yaygınlaşmaya başlamıştır. 1973 yılında kevlar (aramid kord) kullanan lastikler ve stepne gereksinimini ortadan kaldıran ilk lastik-jant sistemi geliştirilmiştir. 1979 yılında Yakıt tüketimini azaltan, düşük yuvarlanma direncine sahip lastikler yaygınlaşmaya başlamıştır.

Dünyada meydana gelen firma birleşmeleri, yeni teknoloji ve pazar arayışları büyük firmaların daha geniş bir pazara hakim olma düşüncesi ve taşıt üreticilerinin istekleri, lastik teknolojisinde gelişmelere özellikle 1980'li yıllardan sonra ivme kazandırmıştır.

1980'den sonraki bu gelişmeler kısaca şöyle özetlenebilir:

-Lastik yuvarlanma direncinin düşürülmesine bağlı olarak yakıt tüketimi ve egzoz gazlarının azaltılması.

-Kuru, ıslak ve karlı zeminlerde çekiş ve direksiyon hakimiyetinin artırılması.

-Lastik ağırlığının ve buna bağlı olarak araç toplam ağırlığının azaltılması.

-Lastik sesinin azaltılması.

-Geçici olarak kullanılan küçük ebatlı stepne lastikler geliştirilmesi.

- Kullanılmış lastiklerin geri kazanımı.
- Patlak çalışabilir (run-şat) lastiklerin geliştirilmesi.
- Lastik basıncı takip uyarı ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi.
- Lastik ömrünün artırılması.
- Lastiğin süspansiyon yeteneğinin geliştirilmesi.
- Lastik yük taşıma kapasitesinin artırılması.
- Lastikte biyolojik olarak yok olabilen malzemelerin kullanımı.

Çalışmanın ana amacı polimerik malzemelerin tek eksenli monotonik yükleme şartları altında mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Ortaya konacak deneysel sonuçlar ile hem literatüre katkıda bulunmak hem de pratik amaçlı uygulamalara yönelik dizayn kriterlerini ortaya koyabilmek amaçlanmaktadır. Bu amacı yerine getirmek üzere, poliropilen (PP) malzemeden üretilmiş numunelere ile tek eksenli monotonik yükleme şartları altında çevrimsel çekme deneyleri ile gevşeme deneyleri gerçekleştirilecektir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında polimerlerin mekanik davranışının matematiksel olarak ifade edilmesi araştırmalarına destek olunacaktır.

Çalışmanın konusu; polimerik malzemelerin değişik yükleme şartları altında mekanik özelliklerini belirlemektir. Bu amaca uygun olarakta teknolojiye yaygın olarak kullanılan polipropilen (PP) malzeme seçilecektir. PP malzemeden elde edilen numunler ile;

1. Çekme davranışlarının belirlenmesi,
2. Gerinim hızına bağlı davranışının incelenmesi,
3. Mekanik davranışın elastik, viskoelastik ve viskoplastik akış bölgelerini belirlemek üzere değişik gerinim seviyelerinde yükleme-boşaltma davranışlarının belirlenmesi,
4. Yük altında hasar davranışının değişik gerinim ve gerilme hızları için belirlenmesi,
5. Çevrimsel yükleme şartları atındaki mekanik davranışın belirlenmesi,
6. Sabit gerinim seviyesinde gerilme değişimini belirlemek üzere gevşeme

davranışın belirlenmesi,

7. Yükleme geçmişinin mekanik davranış üzerindeki etkisini belirlemek üzere, birden çok gerilme/gerinim seviyelerinde katlamalı gevşeme deneylerinin gerçekleştirilmesi,



2. MATERYAL VE METOT

Polimerik malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar deneysel ve bu deney sonuçlarını açıklamaya yönelik modelleme çalışmalarını içermektedir. Deneysel çalışmalar temel olarak çekme/basma şartları altında yükleme-boşaltma, sünme, gevşeme, toparlanma ve kırılma davranışını anlamak üzere yoğunlaşır. Literatürde polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi ise iki temel üzerinde oluşur, makro ve mikroyapısal. Makro modeller genellikle elastik ve viskoz yapıyı tanımlamak için elektrik benzeşim devreleri oluşturularak ve viskoelastisite teorileri kurularak meydana gelir. Bu yaklaşımın temeli Kelvin, Maxwell ve Standart Lineer Katı modellemelerine dayanır. Mikro modeller ise malzeme yapısını, tıpkı bir kompozit malzemede olduğu gibi iki farklı elemandan oluştuğunu kabul ederek, malzemenin iç yapısına ait parametreleri içeren matematiksel ifadelerle çözüm odaklı yaklaşımlar sunar (Colak ve Dusunceli, 2006; Mijovic, 1994).

Polimerik malzeme endüstriyel ve biyomekanik teknolojisinin yaygın ana hammaddesinden biridir. Son yıllarda sürekli artan oranlarda kullanılmaktadır, bu durum malzeme davranışını açıklamaya yönelik çalışmalarında yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Bu konuda öne çıkan çalışmalar: (Drozdov, 2010; Khan ve Krempl, 2006; Kitagawa ve Takagi, 1990; Krempl ve Ho, 2000; Lai ve Bakker, 1995; Wang ve Li, 2015; Zhang ve Moore, 1997). Yukarıda isimleri verilen çalışmalardan kısaca bahsedecek olursak: Kitagawa vd. (1990) sonlu uzamalarda tek yönlü sıkıştırma ve burulma testi sonuçlarına göre PE için viskoelastik bir model meydana getirilmiştir. Metallerin plastisitesine dayanan “overstress” teori ile viskoelastik modellemeyi oluşturmuştur. Plastisiteye dayanmasına rağmen “overstress” model üç boyutlu lineer elastiklik için yüksek oranda uyumlu olduğu gözlemlenmiştir ifadelerinin olduğu bulgulara ulaşılmıştır. Lai ve Bakker (1995) PMMA’nın zamana bağlı davranışını tanımlamak üzere tek boyutlu viskoelastik-viskoplastik integral model oluşturmuştur. Schapery termodinamik teorisine göre viskoelastik deformasyon yapılmıştır. Yükleme geçmişine göre plastik deformasyonun toplanabilir olduğu görülmüştür. Yoğun yükleme koşulları göz önünde bulundurularak, plastik deformasyona zamanın etkisi modellemeye dahil edilmiştir. Sünme, iki adımlı sünme toparlanma ve sabit hızlı yükleme ve boşaltmada model iyi tepkiler vermiştir. Ayrıca model yükleme geçmişi bağımlılığını da çok iyi açıklamıştır (Zhang ve Moore, 1997). Sünme testi verileri kullanılarak HDPE için doğrusal olmayan bir viskoelastik model (altı Kelvin

elemanından oluşan yay sistemi) oluşturulmuştur. Metallerin tek eksenli viskoplastik davranışını karakterize eden Bodner viskoplastik modeli kullanılarak ikinci bir model oluşturulmuştur. Modelin malzeme fonksiyonları sabit şekil değiştirme hızı testlerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Model sonuçları boşaltma anı dışında yükleme, katlamalı gevşeme ve katlamalı sünme test sonuçlarıyla uyumluluk göstermiştir.

Khan ve Krempl (2006) oda sıcaklığında Nylon 66, PEI (polietermid) ve PEEK (polieterketon) üzerinde gerçekleştirilen testlerden hareketle sünme, gevşeme ve çevrimsel yükleme gibi hız bağımlı özelliklerinin “overstress” modeli ile modellenebileceğini kanıtlamıştır. Burada “overstress” teorisine dayanan viskoplastisite teori malzemenin katı polimer davranışını modellemek amacıyla uyarlanmıştır. Kitagawa vd. (1990) ve Ariyama ve Kaneko (1995) tarafından monotonik yükleme şartları için uygulanan “overstress” modeli çevrimsel yükleme ve boşaltma durumları için incelemiştir. Elde edilen sonuçlardan katı polimer davranışını modellemede “overstress” teorisinin faydalı olduğu görülmüştür.

Krempl ve Ho (2000) bir büyütme faktörü tanıtarak viskoplastisiteye dayanan overstress modeli geliştirmiştir. Böylece, büyütme fonksiyonunun artması ve azalması boyunca PMMA'nın hıza bağlı yumuşama ve sertleşme davranışını modellemiştir.

Drozdov (2010) LDPE numune kullanarak oda sıcaklığında gerçekleştirilen sabit şekil değiştirme hızında çekme, sünme ve gevşeme deneyi sonuçlarından faydalanılarak bir mikro modelleme çalışması yapmıştır. Model yarı kristal polimerler için küçük gerinimlerde zamana bağlı viskoelastik-viskoplastik davranışlarını ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Viskoelastik modelleme için, termal aktif süreçler mevcut olduğu için Eyring Denklemi kullanılmıştır. Oluşturulan model ile geleneksel “quasi-statik” deneylerdeki yarı kristal polimerlerin zamana bağlı davranışları açıklanarak, onlardan farklı beş güvenilir malzeme parametresi oluşturulmuştur. Viskoplastik modelleme, düzensiz ağ etkileri ve bağların referans konumlarında yer değiştirmesi dikkate alınarak meydana getirilmiştir.

Bergstrom vd. (2002) Polimerlerin geniş gerinim seviyesinde çekme sonrası kopma davranışını ve çevrimsel yükleme davranışını modelleyebilmek üzere beş ayrı malzeme modeli üzerinde çalışmıştır. Bu modeller Arruda-Boyce, Hasan-Boyce, Bergstrom-Boyce ve J_2 plastisite modelleridir. Modelleme çalışmasını tek eksenli çekme yüklemesi için küçük gerinim seviyesinde, orta gerinim seviyesinde ve geniş

gerinim seviyesinde ayrı ayrı incelemiştir. Her bir seviyede seçmiş olduğu modellerin zayıflıklarını ortaya koymuştur. Aynı şekilde model karşılaştırmasını çevrimsel yükleme davranışını modellemek üzere de yapmıştır. Mevcut malzeme modellerinin eksiklerini ortaya koyduktan sonra, bu davranışların tümünü birden açıklayabilecek kabiliyette bir modeli, mevcut modellerden yararlanarak hibrit model şeklinde ortaya koymuştur. Bergstrom vd. (2003, 2004) çalışmalarında UHMWPE numuneler kullanarak tek eksenli çekme, basma, çevrimsel yükleme ve zımba (small punch) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Numuneler çeşitli kimyasal ortamlarda farklı yaşlanma şartlarında hazırlanarak, farklı kristallik dereceleri ve içyapılarda elde edilmiştir. Ortaya konan tek eksenli çekme ve çevrimsel yükleme deney sonuçlarını modellemek üzere bir hibrit model ortaya konulmuştur. Daha sonra aynı modelin zımbalama (çok eksenli yükleme hali için) deney sonuçlarını açıklayıp açıklayamayacağı incelenmiş, simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Avanzi (2008) bir dizi çekme/basma ve çevrimsel yükleme testi gerçekleştirerek polimerlerin gerilme-gerinim davranışını incelemiştir. Kopma gerilmesi seviyesindeki azalmanın basma şartlarına göre çekmede daha yüksek olduğu sonucunu gözlemlemiştir. Daha sonra J₂ plastisite modelinden fayadalanarak sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla hesaplamalar yapmıştır. Bu hesaplamalarla çevrimsel yükleme davranışını modellemeye çalışmıştır. Bergstrom vd. (2004) daha önceki çalışmasından ortaya koymuş olduğu hibrit model üzerinde birtakım modifikasyonlar yaparak, konvensiyonel polimerlerin yanı sıra yüksek çapraz bağlı polimerlerin çevrimsel yükleme özellikle boşaltma davranışını ve geniş gerinim seviyesinde kopma davranışını modellemiştir. Modeli ayrıca aşınma, yorulma ve kırılma davranışlarını da açıklayabilmek için denemiştir. Kurtz vd. (1998) polimerlerin çekmede gerilme-gerinim davranışını belirlemek ve modellemek üzere çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kimyasal ve mekanik açıdan şartlandırılmış numuneler kullanılmıştır. Gerilme-gerinim davranışlarının mekanik ve kimyasal ön şartlandırmalara duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir. Tespit edilen mekanik özelliklerden, elastiste modülü ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi ifade etmek üzere bir amprık bağıntı ortaya koymuştur. Drozdov ve Christiansen (2007) yüksek yoğunluklu polietilenin çevrimsel yükleme altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çevrimsel yüklemeyle bağlı gerinim miktarını viskoplastik model ile modellemiştir. Rauchs (2010) hiperelastik malzeme kanununu kullanarak sonlu elemanlar modellemesi gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar modeli tek eksenli çevrimsel yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Regrain vd.

(2009) yarıkristalin polimerik malzemelerin kristallik oranına bağılı davranışını modellemek üzere çok fazlı mikro modelin sonlu elemanlar uygulamasını gerçekleştirmiştir. Polyamid 6'nın çekme yüklemesi ve sünme deney sonuçlarını kullanarak sonlu elemanlar modelinin doğrulmasını gerçekleştirmiştir. Avanzini (2008) çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin çevrimsel yükleme altındaki davranışını incelemiştir. Çevrimsel yükleme davranışını modellemek üzere J_2 plastisite teorisinden faydalanarak bir sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Hasanpour ve Rad (2008) üç boyutlu viskoelastik-plastik model geliştirerek, modelin sonlu elemanlar uygulamasını gerçekleştirmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modeli politetrafloretilen'in tek eksenli sünme ve gevşeme deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Uchida vd. (2010) yarıkristalin polimerik malzemenin deformasyon davranışını açıklamak üzere micromekanik elasto-viskoplastik model ortaya koymuştur. Geliştirilen modelin sonlu elemanlar deformasyon modeli uygulaması yaparak, tek eksenli çekme deneyi sonuçları ile doğrulamıştır. Keng (2007) malzemelerin çevrimsel yükleme altındaki davranışını açıklamak üzere bilinen viskoplastik teorilerden bir derleme yaparak sonlu elemanlar modeli ortaya koymuştur. Sonlu eleman modelinin doğrulamasını çeşitli metal ve polimerik malzemeye ait çevrimsel yükleme deney sonuçlarını kullanarak yapmıştır. Kuwan ve Jar (2008) yüksek yoğunluklu polietilenin tek eksenli çekme deneyi sonuçlarını kullanarak sonlu eleman modeli ortaya koymuştur. Demiray vd. (2006) elastomer davranışını açıklamak üzere iki ve üç boyutlu mikro mekanik hiperelastik model ortaya koymuştur. Modelin sonlu elemanlar uygulamasını gerçekleştirerek, modeli karmaşık yükleme deney sonuçlarını kullanarak doğrulamıştır. Arriaga vd. (2007) çeşitli polimerik malzemelere ait tek eksenli çekme ve eğme deneyi sonuçlarını kullanarak sonlu eleman modeli ortaya koymuştur. Model yaygın kullanılan ticari sonlu eleman programlarına uygulanarak, belirlenen deney dataları için doğrulanmıştır. Hasanpour vd. (2009) elastomerin mekanik davranışını açıklamak üzere mikromekanik viscoelastik model ortaya koymuştur. Geliştirilen modelin sonlu elemanlar uygulaması için kod yazılmıştır. Modelin doğrulaması elastomerik burcun üç boyutlu gerilme analizi için kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan literatür çalışmasından görüldüğü üzere polimerik malzeme mekanik davranışının belirlenmesi ve modellenmesi güncel konulardandır. Çalışmalar viskoelastik ve viskoplastik teorilerin ortaya konması şeklinde yoğunlaşmıştır. Pratik

uygulamalara yönelik gerilme ve kırılma analizlerine yönelik çalışmalar ise oldukça yeni ve sınırlı sayıdadır. Günümüzde ticari sonlu elemanlar programları mekanik davranış analizi bilhassa metalik malzemeler için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer yandan polimerik malzemeler için aynı programların kullanımı viskoelastik özelliklerden dolayı henüz geliştirilme aşamasındadır. Literatürdeki sonlu elemanlar modelleme çalışmalarında genel olarak bakıldığında malzemenin sadece bir ya da iki yükleme durumunu göz önüne alarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Bütün yükleme durumlarını içeren modellerin oluşturulması önemli bir gerekliliktir. Yapılacak olan bu çalışmada polimerik malzemenin bütün yükleme durumlarındaki (yükleme-boşaltma, çevrimsel yükleme, sünme, gevşeme vs.) cevaplarını tek bir model ile açıklamaya yönelik model geliştirilmesi amaçlanacaktır. Diğer yandan sonlu elemanlar model çalışmaları genel olarak tek ya da iki boyutlu oluşturulmuştur. Bu çalışmada geliştirilecek olan modelin üç boyutlu deformasyon analizi yapabilecek kapasitede olması sağlanacaktır. Polimerik malzeme davranışını belirlemeye yönelik geliştirilen sonlu eleman modelinin ticari sonlu elemanlar programlarında kullanılabilmesi göz önünde bulundurulacak ve bu amaca uygun alt programlar (subroutine) yazılması gerçekleştirilecektir.

Çalışmanın ana noktasında polimerik malzeme davranışını belirlemeye yönelik geliştirilmiş olan viskoplastisite teorisinin örtük geri dönüşlü Euler metodu kullanılarak sonlu elemanlar için bütünleştirilmesi (implementation) yapılacaktır. Genellikle, sonlu eleman analizleri tasarım kuralları çerçevesinde kullanılarak bir ürünün mukavemet, zaman, malzeme ve maliyetlerinin optimum seçiminde kullanılmaktadır. Eskiden, FEA (Sonlu elemanlar analizleri) ürün hayata geçirildikten sonra yapılmaktaydı. Ancak, son yıllarda, ürün piyasaya çıkmadan tasarım aşamasındayken analizler yapılarak gerekli tasarım şartları şekillendirilebilmektedir (Makaracı, 2001).

İlk olarak, Viskoplastisite Teorisinin bünye Denklemleri ve alan değişkenlerine ait zaman ilişkileri verilecektir. Zaman formundaki denklemler nümerik yöntemler kullanarak sonlu farklar ilişkilerine dönüştürülecektir. Gerilme güncelleştirilmesi buna göre verilecektir. Sonlu elemanlar prosedürü için gerekli zaman entegrasyonu ile uyumlu malzeme jakobiyen matrisi yani tutarlı tanjant operatörü elde edilecektir.

Polimerik malzeme davranışını açıklamaya yönelik viskoplastisite modelinin ticari sonlu elemanlar programına kullanıcı malzeme alt yordamı (subroutine) olarak

adaptasyonu neticesinde, polimerik malzemenin çeşitli şartlar altında pratik hesaplamak için mekanik davranışları modellenmesi ve sayısal olarak geçerliliği gösterilecektir. Buna göre, ticari sonlu elemanlar programı modelinde kapalı (implicit) döngü zaman entegrasyonu kullanılarak her durumda sayısal kararlılık ve yakınsama sağlanılacaktır. Dolayısıyla sürünme ve gevşeme gibi uzun zaman alan gerçek deneylerin simülasyonlarının çok kısa sürede büyük zaman adımları kullanılarak gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır.

Ortaya konan sonlu elemanlar modeli daha önceden belirlenen deneysel sonuçlar vasıtasıyla doğrulanacaktır. Bu deneysel veriler sırasıyla:

1. Tek eksenli gerinim/gerilme kontrollü (basma/çekme) yüklemesi ve boşaltması,
2. Çok eksenli gerinim/gerilme kontrollü (basma/çekme) yüklemesi ve boşaltması,
3. Tek eksenli- gerinim/gerilme kontrollü şekil değişim hızı bağımlılığı,
4. Çok eksenli-gerinim/gerilme kontrollü şekil değişim hızı bağımlılığı,
5. Çevrimsel yüklemeler
6. Gevşeme (relaxation)
7. Sürünme (creep)'dir.

2.1 Deneysel Prosedür

Polimerlerin elastik olmayan deformasyon davranışının modellenmesi, birçok uygulamada polimerlerin artan kullanımı oranı ile birlikte günümüzde daha çok ilgi görmektedir. Buna ilaveten, polimerik davranışın karmaşıklığı ve sınırlı deneysel sonuçlar, yapısal model geliştirmeyi zorlaştırmaktadır. Uygun bir yapısal model geliştirmek için polimerlerde gözlenen aşağıdaki özellikler dikkate alınmalıdır: yüksek düzeyde doğrusal olmayan gerinim hızı ve sıcaklık bağımlılığı, doğrusal olmayan boşaltma, hidrostatik basınçtan etkilenen akma, döngüsel yumuşama ve sıfır gerilimde önemli geri kazanım.

Yüksek performanslı termoplastiklerin, kritik yük taşıma uygulamalarında değiştirdikleri metallerle aynı öngörülebilirliği ve güvenilirliği sergilemeleri beklenir, bu nedenle bilgisayarlı stres analizinde kullanılacak yapısal modelin bulunmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Araştırmanın temel amacı, polimerik malzemelerin hasar birikimine bağlı olarak mekanik davranışlarını anlamak ve hasarın sünme ve gevşeme davranışı üzerindeki etkisini tanımlayabilecek kurucu denklemler geliştirmektir. Ardından, araştırmanın son aşaması, ticari bir sonlu eleman analiz programlarında viskoelastik ve viskoplastik modellerin uygulanması olacaktır. Bu tür modellerin uygulanması için gerekli hesaplama prosedürleri literatürde henüz geliştirilmemiştir. Bu çalışma, bu tür hesaplama prosedürlerinin geliştirilmesi ile ilgilidir.

Çalışmanın ilk bölümü, oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar değişen sıcaklık aralığındaki çekme çevrimi testlerinde izotaktik polipropilenin mekanik davranışının deneysel araştırması ile ilgilidir. Amacımız, karışık bir deformasyon programı (sabit bir maksimum gerinim ile sıfır minimum stres arasındaki salınımlar) ile döngüsel testlerde mekanik tepkisinin evrensel (sıcaklıktan bağımsız) özelliklerini incelemektir. Bu amaçla, çeşitli çaprazkafa hızları ile çeşitli sıcaklıklarda üç seri çekme çevrimi testi (100 çevrim) gerçekleştirilir. Ana sonuç, döngü başına minimum gerinim ϵ_{min} 'in (artık gerilimi karakterize eder) döngü sayısı n 'ye bağımlılığının evrensel olmasıdır: $\epsilon_{min}(n)$ işlevi sıcaklıktan bağımsızdır ve gerinim oranından zayıf bir şekilde etkilenir.

Bu çalışmanın ana sonucu, kısa süreli döngüsel testlerde (100 döngü) deneysel olarak gözlemlenen $\epsilon_{min}(n)$ bağımlılıklarının çakışmasının, polipropilenin ortam sıcaklığındaki uzun vadeli tepkisinin, yüksek sıcaklıklarda sayısal simülasyon sonuçlarına dayanarak tahmin edilmesine izin vermesidir. (yarı kristal polimerin mikro yapısı, deneysel zaman ölçeği içinde denge durumuna ulaştığında).

Çalışmanın ikinci kısmı, sonlu gerinimlerle tek eksenli çekme yüklemesinde yarı kristal bir polimerin mekanik davranışının deneysel ve sayısal araştırmasını sunar.

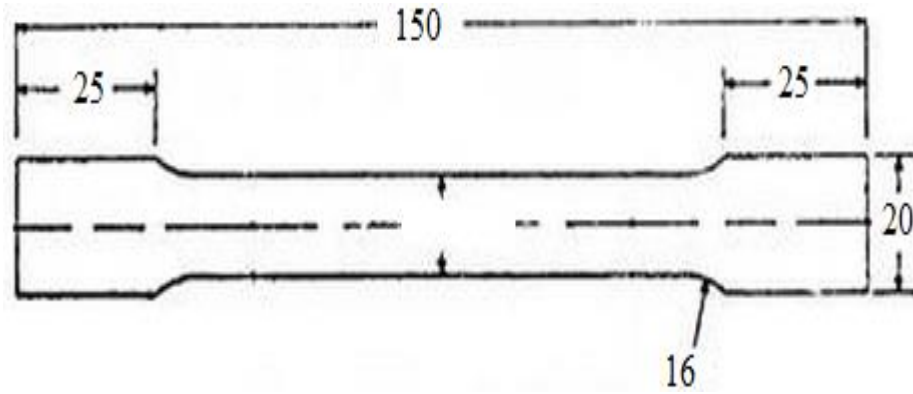
Yarı kristal polimer malzemelerin mekanik davranışı, polimerler birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanıldığı için önemli bir araştırma konusudur. Polimerik malzemelerin pozitif özelliklerini aşınmaya karşı direnç, maliyetinin düşük olması, mukavemet, fazla yük taşıma kabiliyeti ve basit işlenebilirlik olarak sıralayabiliriz.

Son yıllarda, polimerik malzemelerin davranışlarını incelemek üzere pek çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmaların çoğu, gerinim hızı bağımlılığına, yükleme yollarında basit sürünme ve gevşemeye ve bunların modellenmesine odaklanmıştır. Sadece birkaçı, boşaltma yollarındaki sünme ve gevşeme davranışını

araştırdı. Boşaltma yollarındaki polimerlerin sürünme ve gevşeme davranışları, yükleme koşullarındakilerden farklıdır.



şekil 2.1. Instron 3366 çekme test cihazı



şekil 2.2. Polipropilen numune

Not: şekil 2.2 üzerindeki ölçüler mm cinsindendir.

Çekme ve basma deneyleri, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın test yöntemleridir. Üniversal test cihazında çekme ve basma deneylerinin haricinde, üç nokta eğme testleri de yapılmaktadır.

İnstron çekme-basma cihazı zemin modelleri genellikle güçlü metal ve alaşımlar, gelişmiş kompozitler, hava-uzay ve otomotiv yapıları, cıvatalar, bağlantı elemanları ve çelik plakaların testlerinde kullanmak amacıyla tasarlanmış olup, dayanıklılık için üretilmiştir ve değişen ihtiyaçlar için esneklik sağlamaktadır.

İnstron çekme-basma cihazı ile hava-uzay kompozitleri, metal alaşımları ve kristalin polimerler gibi güçlü malzemeleri test ederken çok önemli bir etken olan gövde sertliğidir. Daha doğru modül ve gerginlik değerleri üreterek, ayrıca test sırasında depolanan enerjiyi minimuma indirerek daha iyi performans sağlamak için önceden yüklü yataklar ve hassas top vidaları, ince bir çapraz kafa ve taban kirişi, düşük gerilimli tahrik kayışları kullanılmıştır.

- Yük kapasitesi: 100 kN
- Dikey Test Alanı: 1430 mm
- Yük ölçüm doğruluğu: +/-% 0.5; 1/500 yük hücre kapasitesinin altında okunur
- Yük, uzama ve gerilim kanallarında aynı anda 1 kHz hıza ulaşan veri edinimi
- 0.00005 -3000 mm/dak hız aralığı
- Test alanına rahat erişim için düşük taban yüksekliği
- Özelleştirilebilen Kontrol Paneli
- Bluehill® 3 Yazılımı ile uyumludur
- Yük hücreleri ve ekstensometreler için otomatik transdüzer tanıma
- Ekstra yüksek ve geniş seçenekler mevcuttur

2.2 Lastiğin Yapısı

Lastik başlıca dört bölgeden oluşur.

- Sırt
- Omuz
- Yanak
- Topuk

Sırtın yanak ile birleştiği alana, lastiğin omuz bölgesi denir. Lastiğin yapısına göre sırtın altında kuşak ya da darbe katları yer alır. Lastiğin yapısı anlatılırken basit bir

benzetmeden faydalanacağız. Lastik mühendisliği ile asma köprü mühendisliği arasındaki benzeşim (anoloji) ileride yapısal sınıflandırmayı açıklarken de işe yarayacak. Hemen herkes İstanbul'da iki kıtayı birbirine bağlayan asma köprülerin ya kendisini veya resmini görmüştür. Burada araçların üstünden geçtiği platform, lastikteki sırt, kuşak ve darbe katlarından oluşan yapıya benzetilebilir. Nasıl köprüdeki platform araçların ağırlığını taşıyabilecek yapıda ise sırt kuşak ve darbe katından oluşan yapı da lastikteki basınçlı hava aracılığı ile arabamızın yükünü dengeleyebilecek dayanıklıdır. Ancak lastikteki platform köprüye nazaran çok daha esnektir. Bu anolojide köprü üstündeki araçların ağırlığı ile oluşan kuvvet lastikteki basınçlı havanın ürettiği kuvvete benzemektedir. Şimdi bu "platformun" bileşenlerine bakalım:

Sırt, lastiğin zemine temas ettiği kauçuk bölümüdür. Yola tutunmayı, çekişi, su atmayı, soğumayı sağlayan kanal ve bloklardan oluşmuştur. Üretim sırasında kuşakların üstüne yerleştirilir. Lastiğin sırt deseni üretim sürecindeki pişirme sırasında Sırt karışımının kalıp içinde şekillenmesi ile olur.

Kuşak, radyal lastiklerde sırt ile gövde arasında -gövdenin üst kısmında- bulunan, lastiği çevresel olarak sararak yapıyı kuvvetlendiren çelik, naylon vb. maddelerden oluşan lastik bileşenine kuşak denir. Ana fonksiyonu, lastiğin sırt bölgesinde denge sağlamak, düzensiz aşınmayı engellemek, sürüş ve çekişe katkıda bulunmaktır.

Darbe katı, çelik kuşaklar üzerinde spiral şeklinde eksiz naylon darbe katı vardır. Yüksek hızlarda dengeli sürüş ve kuşağın dış etkilere karşı korunmasını sağlar.

Eksiz naylon şerit, düzgün sürüş ve mukavemet sağlar. Bunu asma köprü platformunun üstündeki beton ve/veya asfalttan oluşan kaplamaya benzetebiliriz.

Omuz, lastiğin sırtından yanak kısmına geçiş yaptığı kalın kauçuktan yapılmış üst yanak bölgesidir. Sırt ısını dışarı atabilmek için pencere yapıdadır. Yanak ile sırt arasındaki kalın geçiş bölgesidir. Dışarıdan gelecek yanal darbelere karşı gövdeyi korur. Asma köprünün düşey yöndeki taşıyıcı halatlarının platform ile bağlantı yaptığı noktalar ve bu bölgeleri trafik kazalarına karşı koruyan bariyerler benzer bir görev yaptıkları için köprünün "omuzları" gibi düşünülebilir. Bu bağlantı noktaları ve etrafındaki bariyerler tıpkı lastikte olduğu gibi köprünün "sırtı" ile "yanakları" arasında yer almaktadır.

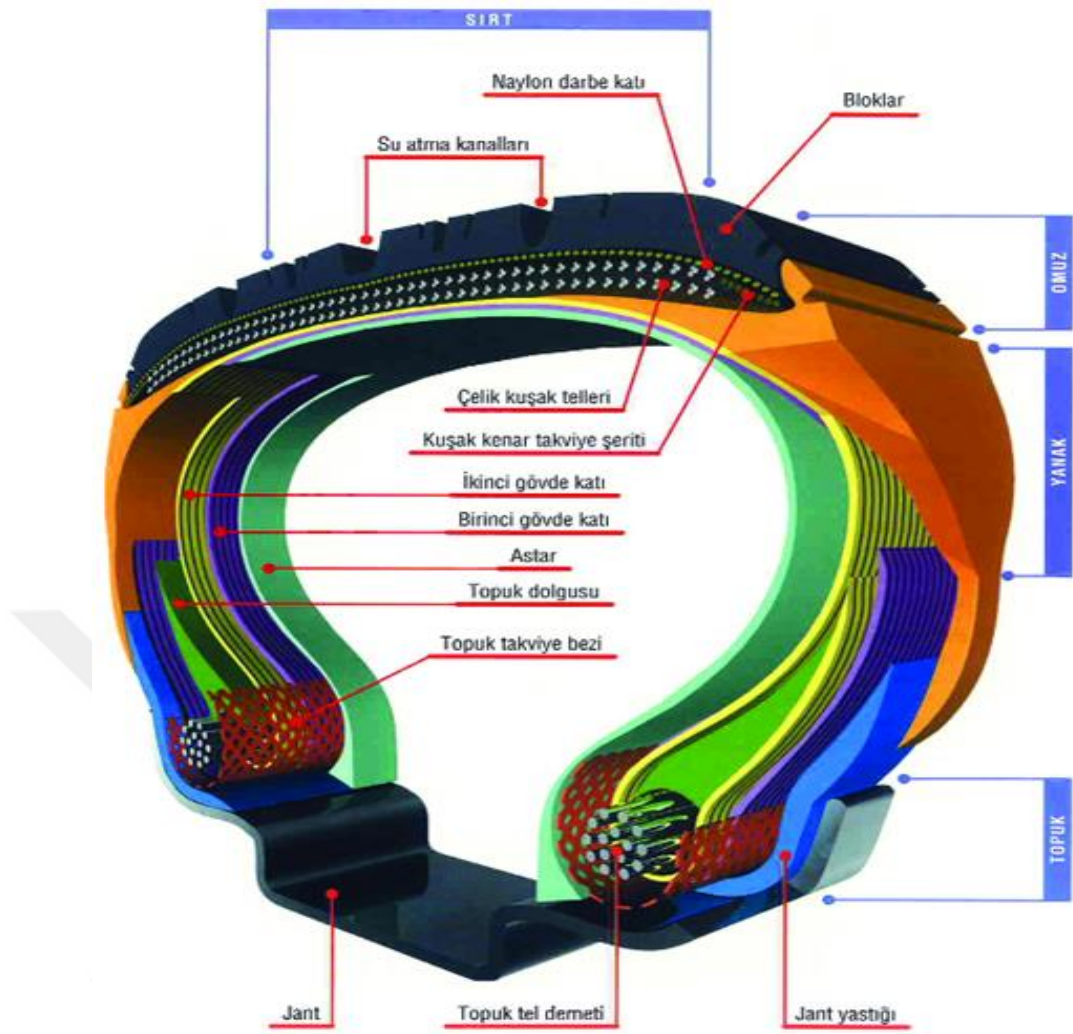
Karkas (gövde), hava basıncını lastik içinde tutan, yükü taşıyan ve sarsıntıları karşılayan kısımdır. Radyal lastiklerde kuşak, çapraz lastiklerde ise sırt veya darbe katının altında yer alır. Topuk tellerinin etrafında dönerek yanak bölgesinde biter. Çelik, naylon, rayon vb. kordlardan oluşan, lastiğin ana bileşenidir. Asma köprüünün, araçların üstünden gittiği platformunu, taşıyıcı ana halatlara bağlayan çok sayıdaki düşey yönde olan çelik halatlar da gövde katındaki kord (tekstil veya çelik) iplikçiklerine benzetilebilir.

Astar, lastiğin hava geçirgenliğini önlemek amacıyla kullanılır, hava geçirmesine karşı çok daha dirençli kauçuk cinsleri astar karışımında kullanılır. Köprü benzetmemizde yağışlı havalarda köprü üzerinde oluşan suyun platformun çelik yapısına ulaşmasını engelleyen izolasyon katmanları benzer bir görev yapmaktadır.

Yanak, lastiğin çevresi boyunca sırt ve topuk bölgeleri arasında kalan, yola temas etmeyen kauçuk kısmıdır. Lastiğin yanak kısmında, mukavim ve hava etkilerine karşı dayanıklı karışım kullanılır. Gövdeyi yandan gelecek sürtünmelere karşı korur ve lastiğe esneklik sağlar. Yüksek ve ultra yüksek performans grubu lastiklerde, direksiyon hakimiyetinin artırılması için çelik veya naylon topuk bölgesi takviyelerin kullanıldığı da olur.

Tüm markalama ve ebat yazıları yanak üzerindedir. Benzetmemizdeki asma köprü platformunu, taşıyıcı ana halatlara bağlayan çok sayıdaki düşey yönde olan çelik halatlar, köprüünün "yanakları"nı oluşturmaktadır. Lastikte albeni sağlayan beyaz harşer, bilgi aktaran şekil, gösterge ve yazılar yanakta yer aldığı gibi, köprüünün güzel görünmesini sağlayan aydınlatma sistemi de köprüünün yanaklarına yerleştirilmiştir.

Topuk, lastiğin janta temas eden bölgesinde bulunan lastik bileşenlerinin tümüdür. Yan yana gelmiş ve kauçuk karışımı ile birbirine bağlanmış topuk teli demeti, topuk dolgusu ve jant yastığı başlıca topuk bileşenleridir. Topuk, lastiğin janta iyi oturmasını ve sıkıca bağlanmasını sağlar. Benzetmemizdeki asma köprüünün, çok kalın olan iki adet taşıyıcı "yatay" yöndeki çelik halatlar tıpkı lastik topuk telleri gibi aslında birçok çelik halattan oluşmuştur. Köprüde olduğu gibi lastikte de iki adet topuk teli demeti bulunmaktadır. Köprüünün yükünü, boğazın iki yakasında karaya sağlamca monte edilmiş direklerle aktaran köprüünün topuklarıdır. Köprüünün taşıyıcı direklerinin fonksiyonu lastiğin takıldığı janta benzemektedir.



Şekil 2.3. Lastik kesiti örneği (URL-1)



Şekil 2.4. Lastik test numunesi

2.3 Lastiğin Temel Görevleri

Lastik, üzerindeki belirli bir yükü, gerekli yüksek basınçlı havayı muhafaza ederek taşır. Lastiğin tasarlandığı geometride bu görevini yapabilmesi için, uygun basınçta hava ile şişirilmesi çok önemlidir.

Motorun ürettiği ve aktarma organlarının tekerleğe ilettiği torkun, aracı hareket ettiren kuvvete dönüşebilmesi için araç lastiklerinin, zemin yüzeyinde yeterli sürtünme kuvvetini oluşturabilmesi gerekir. Benzer şekilde, fren sisteminin aracı durdurabilmesi, lastik ile zemin yüzeyi arasında oluşacak sürtünme kuvveti sayesinde olur. Bunların yapılabilmesi için gerekli sürtünme kuvvetleri, lastiğin özel tasarlanmış deseni ve yere değen kısmındaki karışımın özellikleri ile yaratılır (Lastiğin değişik kısımları farklı özellikte karışımlardan yapılır).

Sürücü kontrolü ile aracın, yüksek hızda düz hatta seyretmesini, ayrıca slalom benzeri manevralar esnasında ve virajlarda, lastik ile yol yüzeyi arasında gerekli yanıl sürtünme kuvvetlerini üreterek, kayma ve savrulmaları önler.

Lastik bu görevini yaparken aracın amortisör sistemine yardımcı olur. Lastik bu görevini diğer görevlerini ihmal etmeden yapabilmesi için bir denge içinde tasarlanması gerekir. Örneğin çok konforlu olması istenilen bir lastik viraj hakimiyetinde zaaf gösterebileceği gibi tersi de mümkün olabilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Polipropilenin Hasar Etkileşimi ve Döngüsel Davranışı

Son beş yılda, birçok literatürde polimerik malzemelerin döngüsel deformasyon ve yorulma davranışları deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Ancak, mevcut deneysel ve simüle edilmiş sonuçlar esas olarak stres kontrol programı ile ilgiliydi. Sadece birkaç yayın, yükleme hızı, yükleme yolları, yükleme geçmişi ve sürünme-gevşeme etkileşimi ile döngüsel testlere odaklandı. Bileşenlerin gerçek ömrünü belirtmek için döngüsel testler, sürünme-yorulma etkileşimini ve karmaşık geçmişleri içermelidir.

PP numunelerinin döngüsel davranışını araştırmak için aşağıdaki deneyler yapıldı.

1. Tek eksenli çekme çevrimi testleri (çeşitli gerinim oranları ile maksimum ve minimum gerinimler $\epsilon_{\max} > \epsilon_{\min} > 0$ arasındaki salınımlar). Deneysel program, düşük devirli yorulma testleri için tipik olan devir sayısı ($N = 100$) ve akma gerilmesini aşmayan maksimum şekil değiştirme $\epsilon_{\max}$ ile devirli deneyleri içerir.
2. Tek eksenli çekme çevrimsel yükleme-sürünme testi. Bu testler, ardışık yükleme-sürünme-döngüsel yükleme ve farklı stres seviyelerinde sürünme testini içerir.

3.2 Araştırma Sonuçları

İzotaktik polipropilen Moplen HP 400R (özkütle 0.90 g/cm³, eriyik akış hızı 25 g/10 dak, erime sıcaklığı 161 °C) Albis Plastic Scandinavia AB'den (İsveç) satın alındı. 10.1 mm x 4.2 mm kesit alanına sahip mekanik testler için dambıl numuneleri (ASTM standardı D-638), enjeksiyon kalıplama makinesi Arburg 320C kullanılarak kalıplanmıştır. Mekanik testler, elektro mekanik sensörleri bulunan Instron-3366 makinesi tarafından, boyuna gerilimleri kontrol etmek için yapılmıştır. Çekme kuvveti 5 kN yük hücresi ile ölçülmüştür. Eksenel kuvvetin hasar görmemiş numunelerin kesit alanına oranı mühendislik gerilmesi σ olarak belirlenmiştir. Her test, oda sıcaklığında yeni bir örnek üzerinde yapılmış olup ve bu işlem iki kere tekrarlanmıştır.

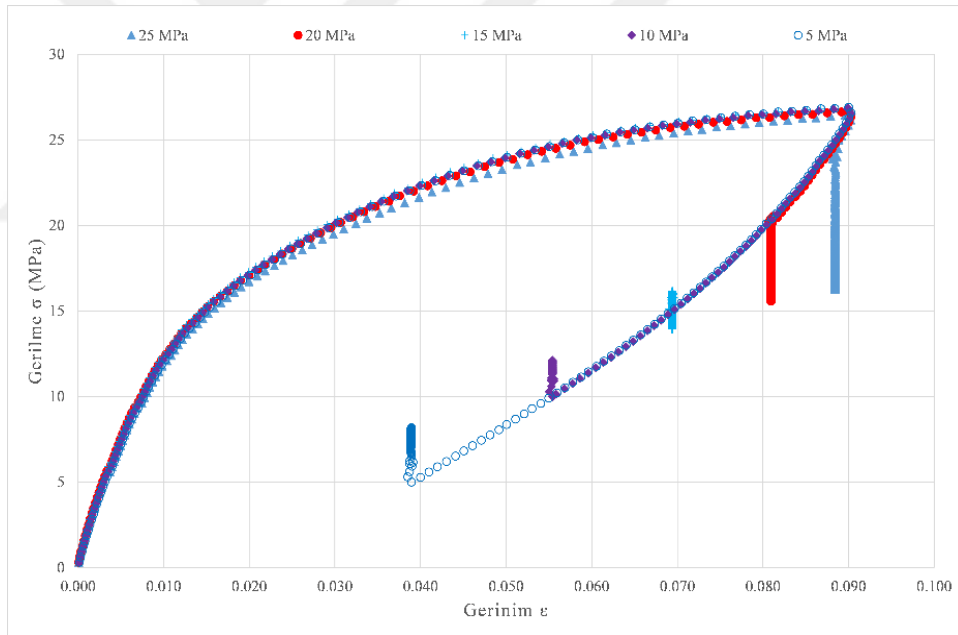
3.3 Tek Eksenli Çekme Çevrim Testleri

İlk seri, gerinim kontrollü bir programla üç çekme çevrimi testinden oluşuyordu: minimum gerinim $\epsilon_{\min} = 0.05$, 0.06 ve 0.07 arasındaki salınımlar ve maksimum gerinim $\epsilon_{\max} = 0.09$ çaprazkafa hızı 100 mm/dak, gerinim hızı $\dot{\epsilon} = 1.7' \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Bir testte, bir numune maksimum gerinim $\epsilon_{\max}$ 'a kadar gerildi, minimum gerinime $\epsilon_{\min}$ 'e geri çekildi, $\epsilon_{\max}$ 'a kadar yeniden yüklendi, $\epsilon_{\min}$ 'e kadar boşaltıldı, vb. Her test $N = 100$ yükleme-boşaltma döngüsü içeriyordu ($\epsilon_{\min} = 0.05$, geri çekmedeki

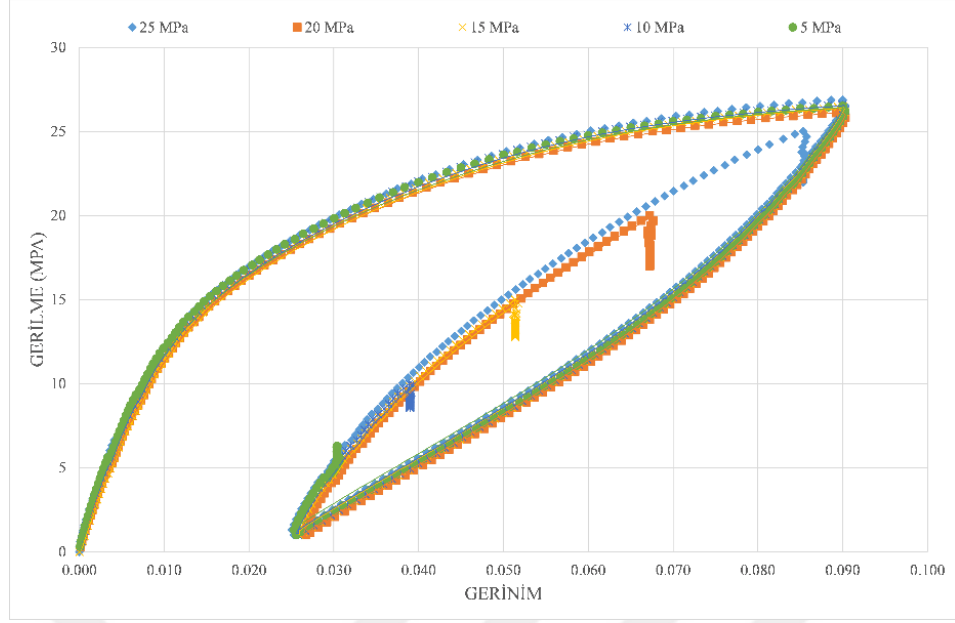
gerilimler 44 döngüden sonra negatif oldu ve numunelerin burkulmasını önlemek için testler sonlandırıldı).

Maksimum gerinim $\epsilon_{\max} = 0.09$, iki gereklilik arasında bir uzlaşma olarak seçilmiştir: (i) minimum gerinim $\epsilon_{\min} < \epsilon_{\max}$ 'ın mekanik tepki üzerindeki etkisini analiz etmek için bu gerilim mümkün olduğunca büyük olmalıdır ve (ii) $\epsilon_{\max}$ olmalıdır deformasyonun akma sonrası bölgesindeki viskoplastik davranışın analizini hariç tutmak için polipropilenin akma gerilimi $\epsilon_y \approx 0.1$ 'den daha düşük.

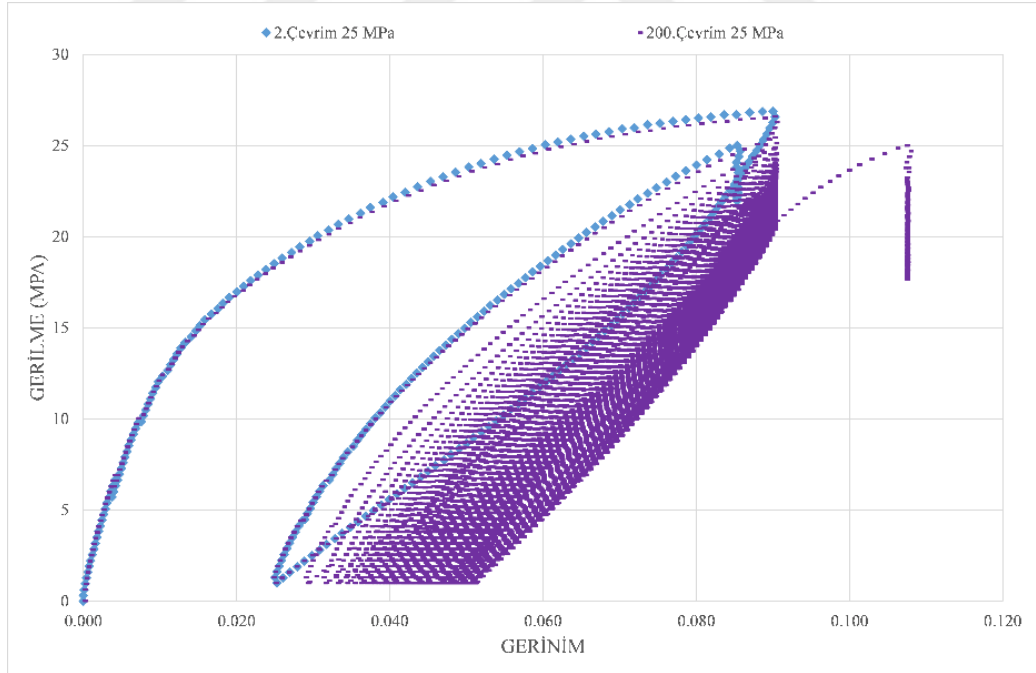
Testin sonuçları Şekil 3.1.'de gösterilmektedir. Yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme eğrileri, tipik polimerik malzeme davranışı ile aynıdır. Bu gözlemler belirtilmiştir: a) Yükleme-boşaltma eğrileri oldukça doğrusal değildir, malzeme davranışları viskoelastik-viskoplastiktir. b) Döngüsel yüklemeden sonra minimum gerilim ve maksimum gerilim döngü sayısı ile azalır. Minimum gerilimlerde azalma, maksimum gerilimlerde azalmadan daha fazladır.



Şekil 3.1. Maksimum $\epsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde $N=1$ çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.



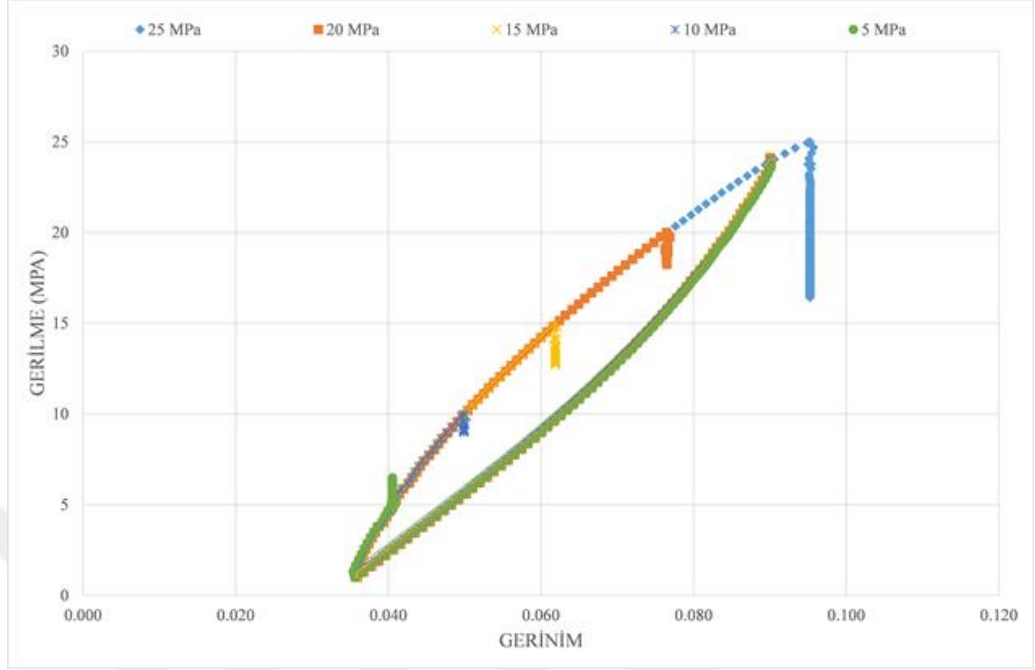
Şekil 3.2. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde $N=2$ çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.



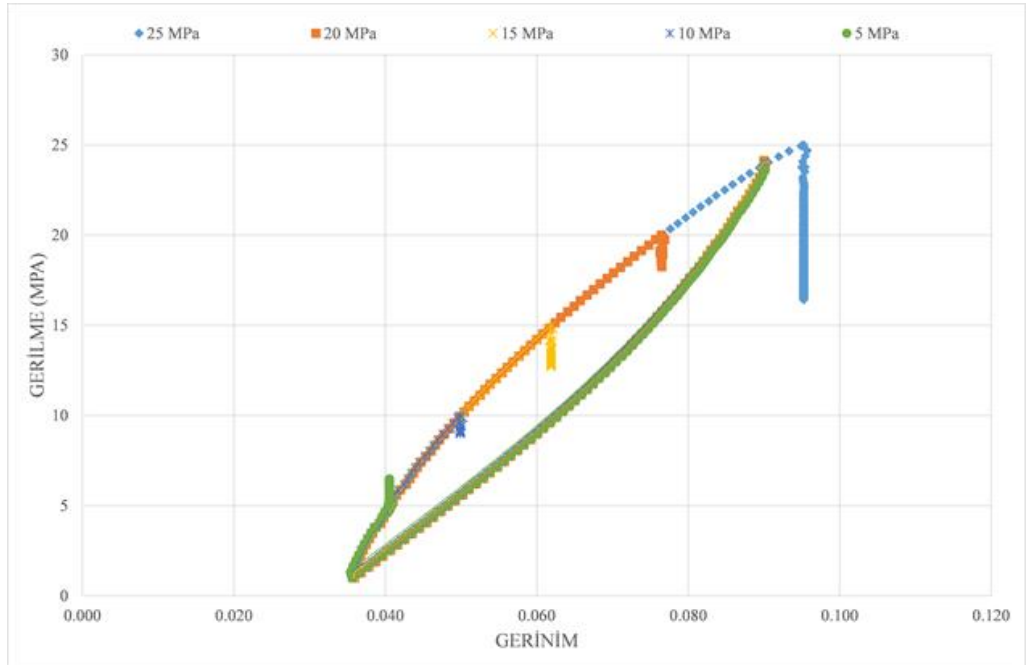
Şekil 3.3. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25 MPa gerilme seviyelerinde $N=2$ ve 200 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.

Gerinim hızının PP'nin döngüsel davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için iki farklı gerinim hızında 10 mm/dak ve 1 mm/dak olmak üzere iki tip test gerçekleştirilmiştir.

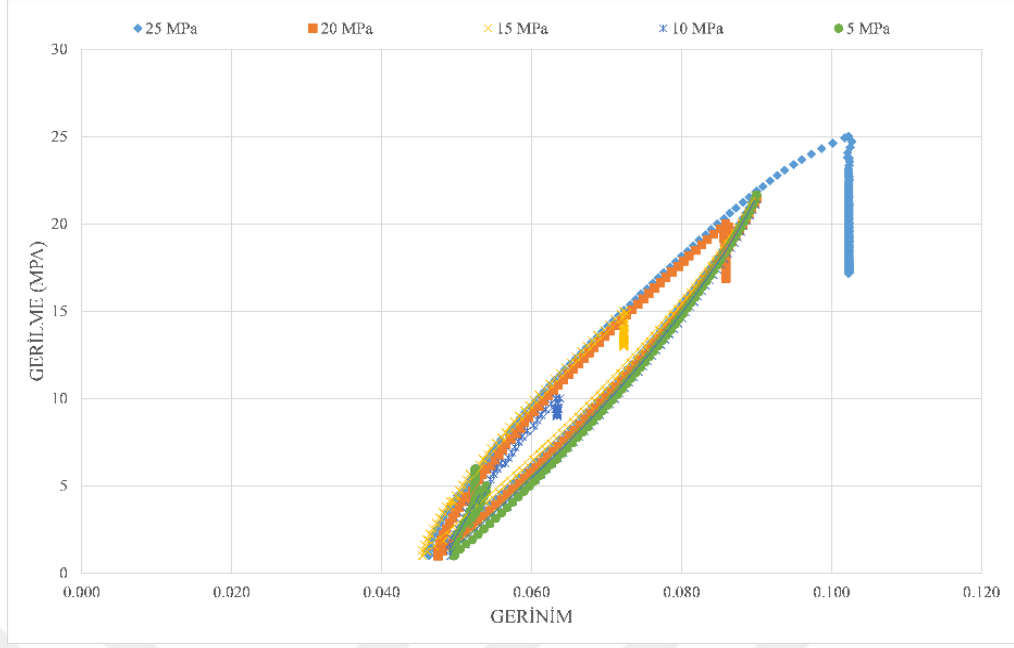
Döngü sayısı 10 mm/dk'da 100'dür ve maksimum gerilim 0.09'dur ve minimum gerilimler 0.06 ve 0.07'dir. Bu test sonuçları Şekil 3.2.'de verilmiştir.



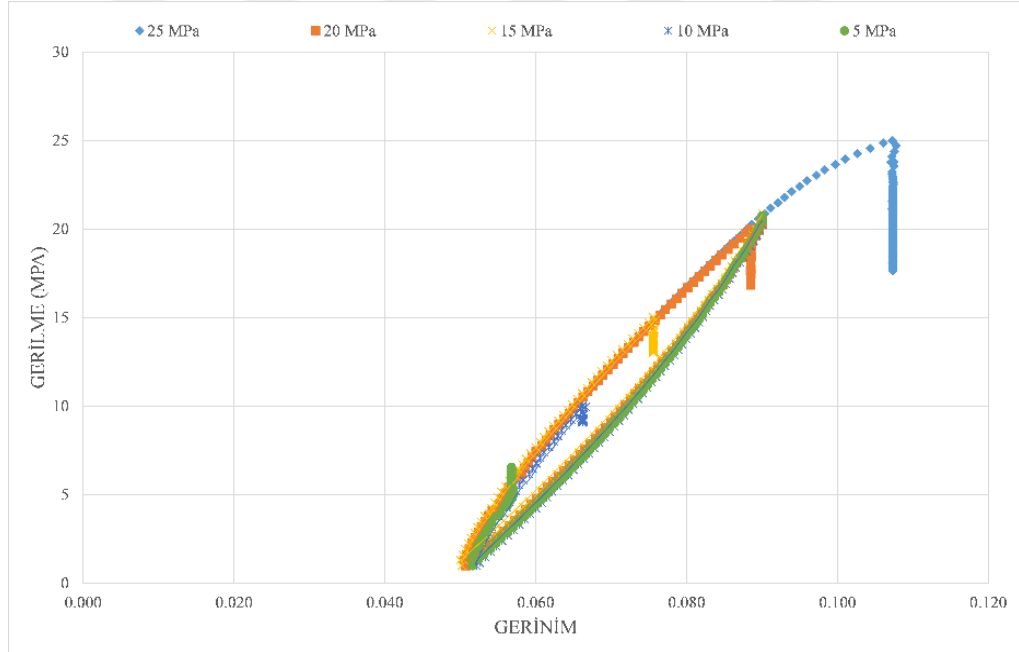
Şekil 3.4. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=5 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.



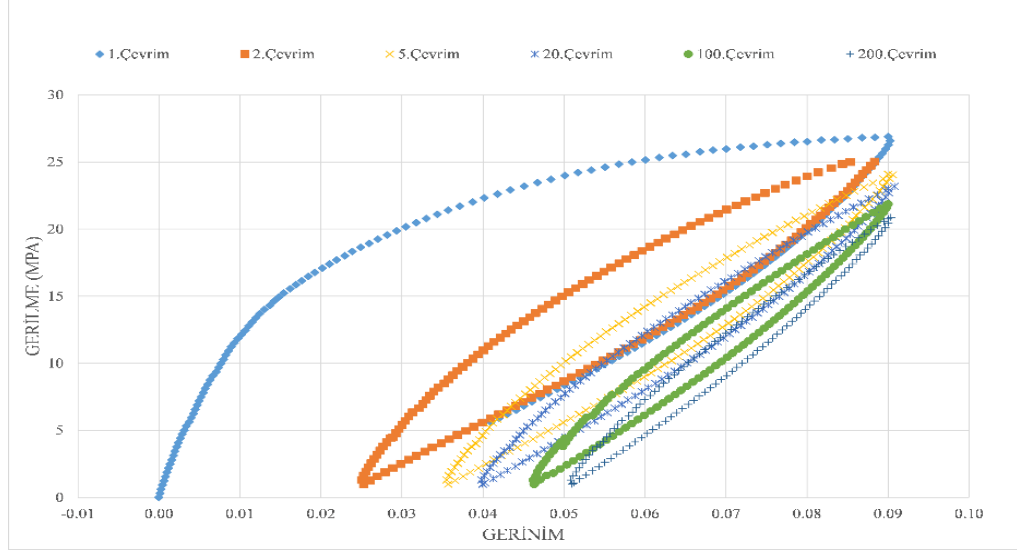
Şekil 3.5. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=20 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.



Şekil 3.6. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=100 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.

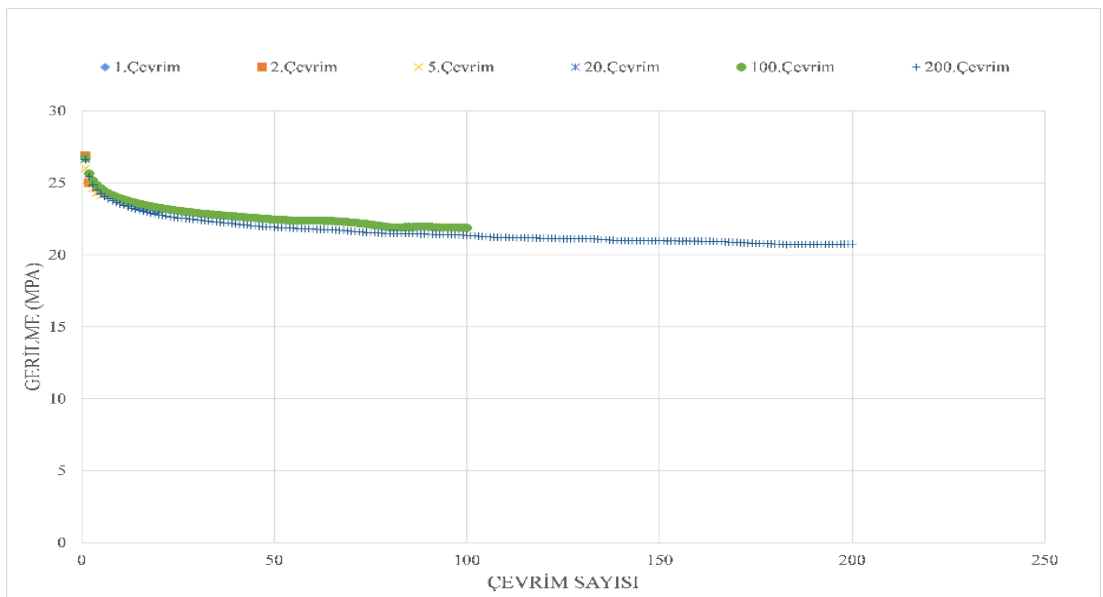


Şekil 3.7. Maksimum $\varepsilon=0.09$ gerinim seviyesinde sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 MPa gerilme seviyelerinde N=200 çevrim sayısı için gerilmeye karşılık gerinim değişimi.

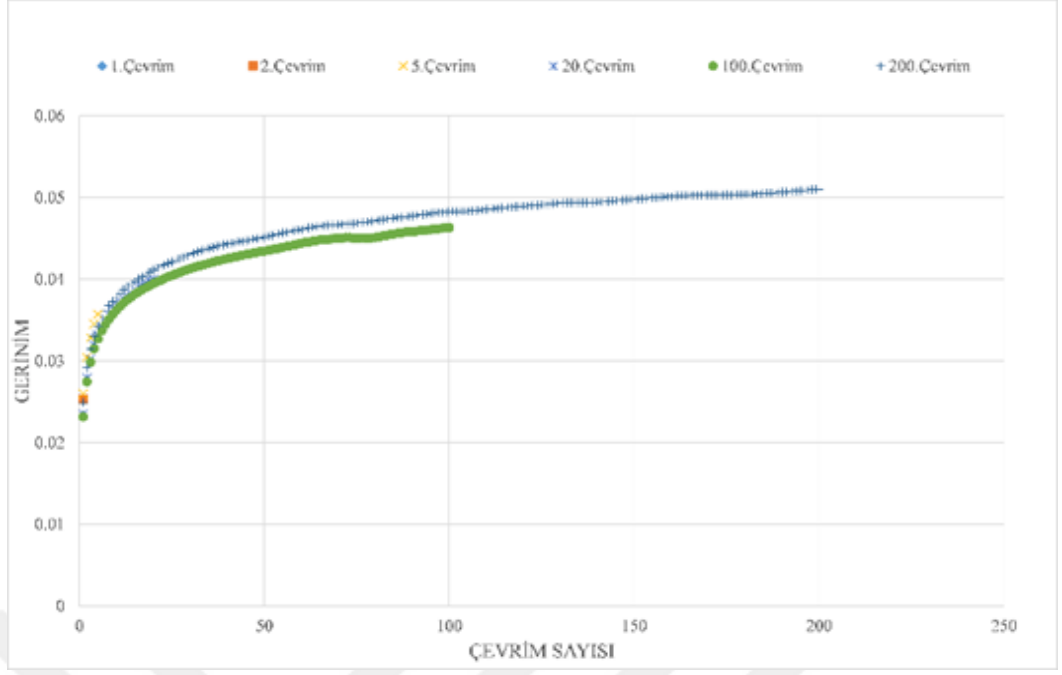


Şekil 3.8. Gerilim-Gerinim eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa. $N=1, 2, 5, 20, 100$ ve 200 histerisiz miktarı.

Yeniden yükleme ve Döngü yükleme-boşaltma sırasında döngü adetine bağlı olarak minimum gerinim seviyesindeki $\epsilon_{\min}$ artış gelişimi, maksimum gerilme $\sigma_{\max}$ seviyesinde Şekil 3.9. ve 3.10.'da sıralı olarak belirtilmiştir. Grafikler Gerilme (MPa)-Döngü adetine ve Gerinim-Döngü adetine bağlı olacak biçimde düzenlenmiştir. Şekil 3.9.'dan maksimum gerilme $\sigma_{\max}$ seviyesinin yükselen döngü adeti (n) ile başlangıçta bariz olarak azalır, 175 döngü adetinden sonra bağlı olarak sabit bir değere ulaşmaktadır. Minimum gerinim $\epsilon_{\min}$ seviyesi ise yükselen döngü sayısı (n) ile monotonik şekilde yükselmektedir.



Şekil 3.9. Döngü sayısı ile maksimum gerilim $\sigma_{\max}$ azalışı. $\epsilon_{\max} = 0.09$.



Şekil 3.10. Döngü sayısı ile minimum gerinim $\epsilon_{\min}$ artışı. $\sigma_{\min} = 1$ MPa.

En son testler, aynı programla iki döngüsel testi (10 döngü) içermiştir, bkz. Şekil 3.7., Şekil 3.8. ve Şekil 3.9. Bu sonuçlar, tüm gerinim hızı seviyeleri için şunu ortaya koymaktadır: Artan döngü sayısı ile stresin azalma miktarı artar.

3.4 Gevşeme Testleri

Yukarıda açıklandığı gibi, polipropilenin zamana bağlı tepkilerini değerlendirmek için, numunelere, birikimli hasara uğratılmak için farklı döngü sayılarında bir maksimum gerinim $\epsilon_{\max}$ seviyesinden bir minimum gerilme $\sigma_{\min}$ seviyesine kadar yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme işlemi yapılmıştır. Bu tarz bir yüklemenin sonrasında boşaltma eğrisi ve yeniden yükleme eğrisi üzerinde farklı 5 gerilme seviyesinde ($\sigma_0=25$ MPa, 20 MPa, 15 MPa, 10 MPa ve 5 MPa) gevşeme testleri uygulanıldı.. Numuneler başlangıçta çekme hızı 10 mm/dk ($1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) ile yüklendi-boşaltıldı ve yeniden yüklendi test başlangıç noktasına gelindiği zaman gerinim değeri sabit tutuldu, gerilmedeki σ düşme zamanının t bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Kısa süreli gevşeme test süresi, ASTM E-328 standardına baz alınarak $t_{\text{gevşeme}} = 20$ dakika olarak belirlenmiştir (ASTM, 2013).

Her bir gevşeme testi seviyesi için sonuçlar sırasıyla Şekil 3.11., Şekil 3.12., Şekil 3.13., Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.'te belirtilmiştir. Malzemenin uzun dönem davranışları hakkında bir tahminde bulunabilmek için gevşeme test süresi yaygın olarak uygulanan yarı logaritmik şekilde zaman olarak belirtilmiştir. $\log = \log_{10}$ 'dur.

Özellikle boşaltma eğrisi üzerinde yapılan gevşeme deneylerinde yarı kristalli polimerler klasik gevşeme deney sonuçlarından daha farklı davranışlar gösterirler, bu sıradışı zamana bağlı davranış ilk olarak Kitagawa vd. (1995) ve Kitagawa vd. (1999)'da raporlanmıştır. Bu tarz davranışta gevşeme eğrilerinin şekillerinde belirgin değişiklikler meydana gelmiştir. Bir maksimum gerinim $\epsilon_{\max}$ seviyesine kadar yüklenen ve çeşitli gerilme σ_0 seviyelerine kadar yük boşaltması yapıp başlatılan testler: (i) gerilme seviyesi farkı $\delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_0$ küçük ise çekme gerilme seviyesi σ zamanla monotonik şekilde düşer. Burada $\sigma_{\max}$, gerilme altındaki maksimum gerilme seviyesini ve σ_0 ise testin başlatıldığı gerilme seviyesini gösterir. (ii) $\delta\sigma$ belirgin seviyede büyük ise ($\sigma_{\max}$ 'un 0.3 ila 0.7 katı arasında.) önce gerilme seviyesi maksimum bir seviyeye kadar zamanla yükselir, daha sonrasında düşer. (iii) $\delta\sigma$ kıyaslanabilir seviyedeysse ($\sigma_{\max}$ 'un 0.8 katını aşılıyor ise.) gerilme değeri zaman ile monotonik şekilde yükselir. Şekil 1'de boşaltma eğrisi üzerindeki gevşeme deneyleri: (i) $\delta\sigma = 3$ MPa'da, standart gevşeme oluşturdu, (ii) $\delta\sigma = 8$ MPa'da standarttan karmaşık gevşemeye doğru bir yöneliş görüldü ve bu özkütlesi $\delta\sigma = 23$ MPa'da monoton şekilde yükseldi.

Şekil 3.2., Şekil 3.4., Şekil 3.5., Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de gevşeme deney bulguları belirtilmiştir. Yeniden yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme deneylerinde klasik yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme deneyi bulgularından başka olarak $\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa gerilme seviyesinde başlatılmış olan gevşeme testlerinde ($\delta\sigma = 23$ ve 18 MPa) önce gerilme değeri artmış, sonrasında ise azalmıştır ve karışık gevşeme olarak sonuçlanmıştır.

Şekil 3.2., Şekil 3.4., Şekil 3.5., Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'nin karşılaştırılmasından:

- i) Karışık gevşeme rejimi sırasında, gevşeme diyagramlarındaki pik noktasının özkütlesi döngü sayısı ile düşerken, sonrasındaki aşamada pik noktası döngü sayısından etkilenmez ($\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa'da gözlemdi).
- ii) Döngü adetindeki (deformasyon birikimi) büyüme, pik noktasının seviyesinin daha büyük sürelerle net bir şekilde kaymasına sebep olmaktadır.

- iii) Nispeten küçük σ_0 'da döngü sayısındaki artış, karmaşık gevşemeden ters gevşemeye geçişe teşvik eder. Şekil 3.11. ve 3.12.'de görüldüğü üzere $\sigma_0=5$ ve 10 MPa'da, gevşeme eğrilerindeki pik noktaları $N = 20$ döngüde yok olmuştur.
- iv) Döngü adetindeki yükseliş, gevşeme eğrilerinin önemli ölçüde doğrusallaşmasına sebep olmuştur. Lineer olmayan özellik sergileyen tepe noktasının varlığı $N > 20$ 'de yok olmuştur.
- v) Görünür gevşeme oranı gevşeme eğrilerinin eğiminden belirlenir ve çevrim oranı ile düşer.

İlk döngüsel deformasyon periyodundan sonra (yaklaşık 10 döngü), döngü başına maksimum stres $\sigma_{\max}$ pratik olarak döngü sayısından n (veya yükleme süresi t) bağımsız hale gelir. Bu olayın döngüsel deformasyon tarafından indüklenen viskoelastik tepkideki bozulmadan kaynaklanıp kaynaklanmadığını incelemek için oda sıcaklığında üç seri kısa süreli gevşeme testi yapıldı.

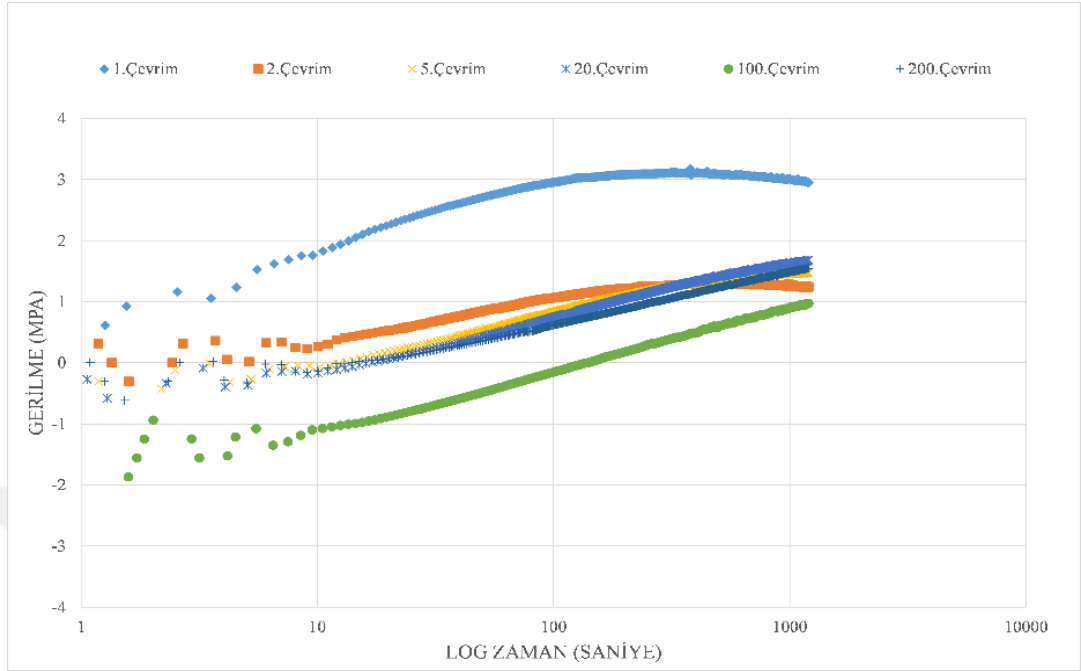
İlk seride, numuneler çapraz kafa hızı $=100$ mm/dak ile $\sigma_0=15, 20$ ve 25 MPa sabit gerilmelere kadar gerildi. Daha sonra, gerinimler sabitlendi ve zamanın bir fonksiyonu olarak stres σ ölçüldü.

Diğer seride, numuneler gerilim kontrollü bir programla iki aşamalı döngüsel deformasyona tabi tutuldu: maksimum gerilim $\sigma_{\max}=10$ MPa ve minimum gerilim $\sigma_{\min}=1$ MPa arasında çapraz kafa hızı $=100$ mm/dak olan salınımlar (80 döngü) ardından maksimum gerilim $\sigma_{\max}=25$ MPa ve minimum gerilim $\sigma_{\min}=1$ MPa (Deformasyon öncesi 1) arasında aynı çaprazkafa hızına sahip salınımlar (200 döngü) gelir. Kilitlemekten sonra, döngü başına maksimum gerinim 0.036 ve döngü başına minimum gerinim 0.012 'ye eşittir. Daha sonra numuneler test makinesinin dışında 10-20 dakika dinlenmeye bırakıldı ve aynı başlangıç gerilmeleri σ_0 ile çekme gevşeme testleri yapıldı.

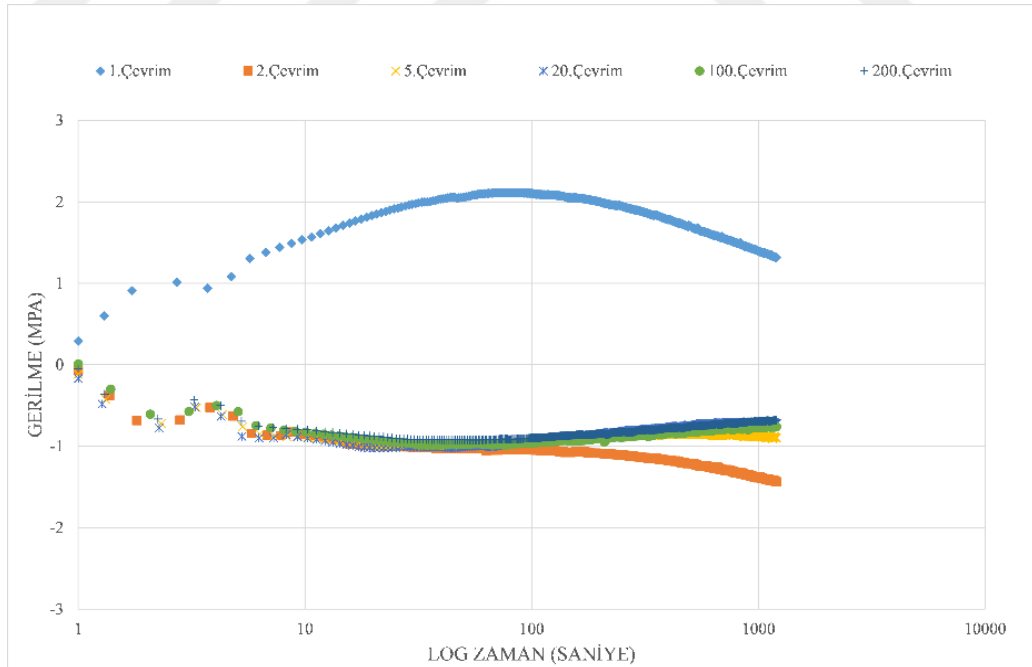
Üçüncü seri testlerde, numuneler ikinci serideki ile aynı ön yükleme programına tabi tutuldu, ancak gevşeme testlerinden önceki dengeleme süresi 1 güne kadar uzatıldı (Deformasyon Öncesi 2).

Yükleme yapılmamış ve önceden yüklenmiş numuneler üzerindeki gevşeme testlerindeki gözlemler Şekil 3.11.'de gösterilmektedir. Bu şekil, polipropilenin

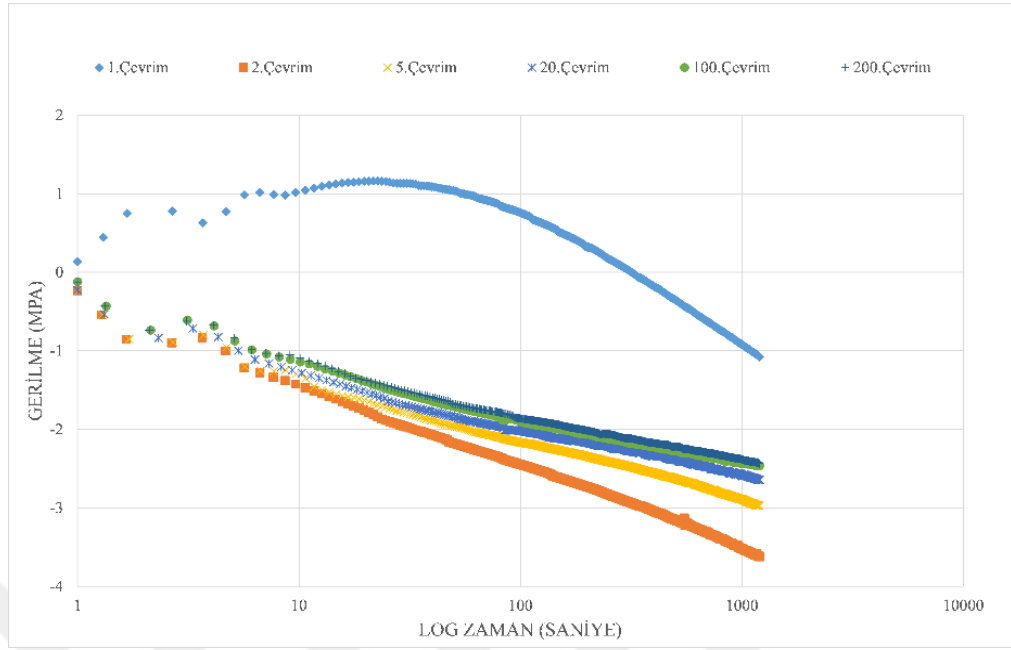
zamana bağılı tepkisi üzerinde çevrimsel ön yükleme ve dengeleme süresinin hiçbir etkisini ortaya koymaz.



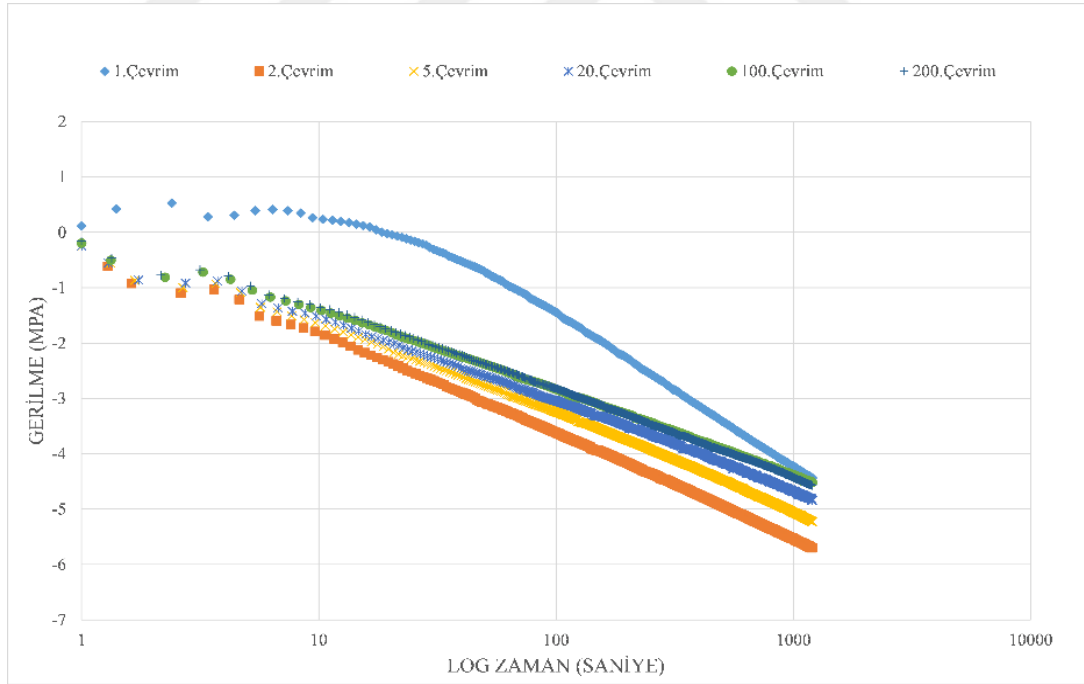
Şekil 3.11. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri. Numune $\varepsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli döngü sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100$ ve 200 $\sigma_0 = 5$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



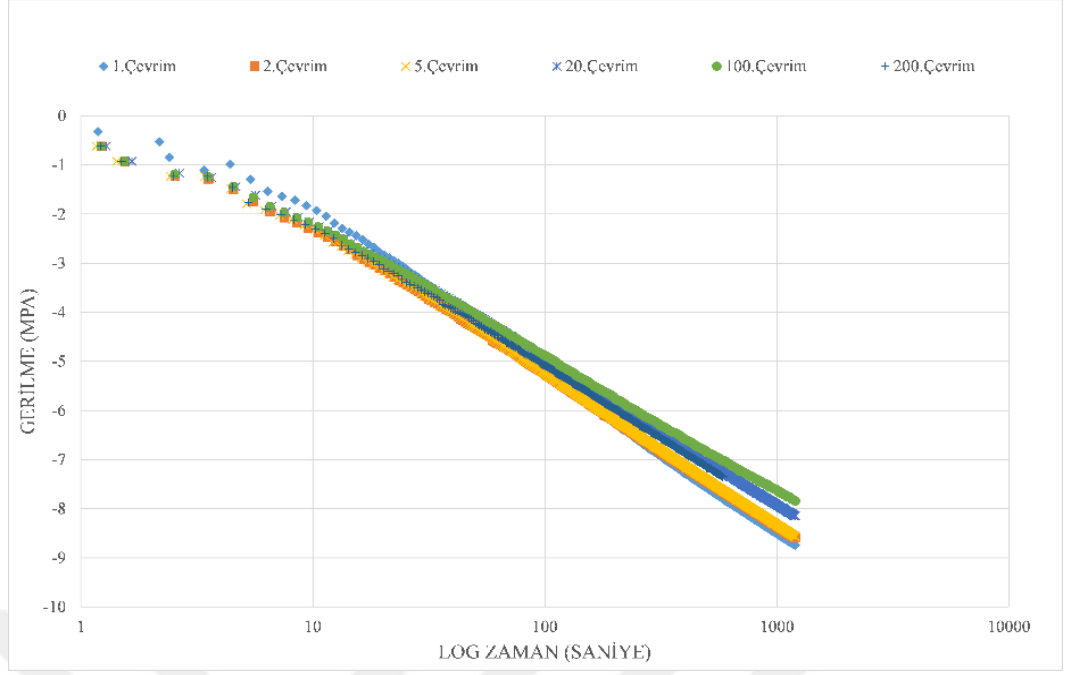
Şekil 3.12. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri. Numune $\varepsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli döngü sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100$, ve 200 $\sigma_0 = 10$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 3.13. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri. Numune $\varepsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli döngü sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100$, ve 200 $\sigma_0 = 15$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 3.14. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri. Numune $\varepsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli döngü sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100$, ve 200 $\sigma_0 = 20$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 3.15. $\Delta\sigma$ -log(zaman) gevşeme eğrileri. Numune $\varepsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli döngü sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100$, ve 200 $\sigma_0 = 25$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.

3.5 Lastik İçin Uygulanan Standart Testler

3.5.1 Genel dayanıklılık testi

Amaç: Binek araçları için tasarlanmış havalı lastiklerin genel performansını görmek için sabit hızda ve değişken yükte yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek lastik dayanıklılık testlerini kapsar.

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 38 ± 3 °C'de 3 saat

Jant: ETRTO Standardında belirtilen; Lastiğe ait jant, deney jantı olarak kullanılır.

Basınç: Deney basıncı olarak; Çizelge-1'de verilmiş olan, basınç kullanılır.

Yük: ETRTO Standardında belirtilen Lastiğe ait yükün; Çizelge 3.2.'de süre bazında verilen yükün %'si deney yükü olarak kullanılır.

Hız: 81 km/saat

Yol Tekerleği: 1.7 m çapındaki yol tekerleği kullanılır (2 m çapındaki yol tekerleği kullanıldığında deney yükü % 90/88 artırılır.)

Çizelge 3.1. Basınç çizelgesi

BASINÇ ÇİZELGESİ	
MAXİMUM BASINÇ (psi)	TEST BASINCI (psi)
35	26
36	28
41	32
44	36
49	41

Çizelge 3.2. Yükleme çizelgesi

Y Ü K L E M E ÇİZELGESİ										
SÜRE (saat)	4	6	24	4	4	4	4	4	4	4
MAX.YÜKÜN (%)	85	90	100	105	115	125	135	145	155	165

Deneyin Yapılması:

- Teste başlamadan önce, basınç kontrolü yapılır ve deney öncesi ölçümler alınır.
- Test şartları uygulanarak; lastik ve jant kompleksi makine dingiline takılır ve tamburun dış yüzeyine doğru bastırılır.
- 4., 10. ve 34. saatlerde basınç ve özür kontrolü yapılır. 4 psi'nin üzerinde basınç kaybı var ise nedeni araştırılır.
- Her yük arttırımında ortam sıcaklığı ölçülür ve deney formuna kayıt edilir.
- Test, lastik özür verdiğiğinde veya 62. saati tamamladığında test biter.
- Nitelik Denetim testleri için, testler seri üretim alt limitinde durdurulur.

Tekrar Başlatma Programı:

- Elde olmayan nedenlerden dolayı 30 dakikayı aşan duruşlarda; duruş anındaki lastik basıncı ölçülüp kayıt edilir.
- Duruş 1. step yükünde olur ise; lastik 1. step yükünde 1 saat koşturulur.
- Duruş 2. step yükünde olur ise; lastik 1. step yükünde 30 dk, 2. step yükünde 30 dk koşturulur.
- Duruş 3. step yükünde veya sonrasında olur ise; lastik 1. step yükünde 30 dk, 2. step yükünde 30 dk, 3. step yükünde 1 saat koşturulur.
- 2 saat sonunda basınç, duruş anındaki basınca ayarlanıp deneye kaldığı yerden devam edilir. Bu süre deney süresine dahil edilmez.

Deneyin Sonrası Yapılacak İşlemler:

- Deney süresini tamamlayan (62 saat veya seri üretim alt limiti) lastikten; Toplam süre, toplam yol, bitiş tarihi ile deney sonrası istenen ölçümler alınır ve kayıt edilir.

(Özür veren lastikten deney sonrası ölçümler alınmaz.)

- Özür varsa özürlü yerden ve karşısından birer kesit alınıp taşlanır. Özür vermeyen lastik hurdalanır.

3.5.2 Topuk dayanıklılık testi

Amaç: Binek araçları için tasarlanmış havalı lastiklerin; topuk performansını görmek için sabit hızda, sabit yükte ve yüksek basınçta yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek topuk dayanıklılık testlerini kapsar.

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 38 ± 3 °C'de 3 saat

Jant: ETRTO Standardında belirtilen; Lastiğe ait jant, deney jantı olarak kullanılır

Basınç: 43 psi

Yük: Yük indeksine karşılık gelen yükün, % 200 'ü deney yükü olarak kullanılır.

Hız: 60 km/saat

Yol Tekerleği: 1.7 m çapındaki yol tekerleği kullanılır. (2 m çapındaki yol tekerleği kullanıldığında deney yükü % 90/88 arttırılır.)

Deneyin Yapılması:

- Teste başlamadan önce, basınç kontrolü yapılır ve deney öncesi ölçümler alınır.

- Test şartları uygulanarak; lastik ve jant kompleksi makine dingiline takılır ve tamburun dış yüzeyine doğru bastırılır.
- Her 24 saatte bir basınç ve özür kontrolü yapılır. 5 psi'nin üzerinde basınç kaybı var ise nedeni araştırılır.
- Kontrollerde ortam sıcaklığı ölçülür ve deney formuna kayıt edilir.
- Lastik özür verdiğinde veya deney süresini tamamladığında test biter.
- Nitelik denetim testleri için, testler seri üretim alt limitinde durdurulur.

Tekrar Başlatma Programı:

- Elde olmayan nedenlerden dolayı 30 dakikayı aşan duruşlarda; Duruş anındaki lastik basıncı ölçülüp kayıt edilir.
- Duruş sonrası; lastik basıncı, başlangıç deney basıncına kadar şişirilir.
- Lastik test yükünde 2 saat koşturulur.
- 2 saat sonunda basınç, duruş anındaki basınca ayarlanıp deneye kaldığı yerden devam edilir.
- Bu süre deney süresine dahil edilmez.

Deneyin Sonrası Yapılacak İşlemler:

- Deney süresini tamamlayan lastikten; Toplam süre, Toplam yol, Bitiş tarihi ile deney sonrası istenen ölçümler alınır ve kayıt edilir. (Özür veren lastikten deney sonrası ölçümler alınmaz.)
- Özür varsa özürlü yerden ve karşısından bir kesit alınıp taşlanır. Özür vermeyen lastik hurdalanır.

3.5.3 Karkas dayanıklılık testi

Amaç: Binek araçları için tasarlanmış havalı lastiklerin; karkas performansını görmek için sabit hızda, sabit yükte ve düşük basınçta yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek lastiklerini kapsar.

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 38 ± 3 °C'de 3 saat

Jant: ETRTO Standardında belirtilen; Lastiğe ait jant, deney jantı olarak kullanılır.

Basınç: 14 psi

Yük: Yük indeksine karşılık gelen yük; deney yükü olarak kullanılır.

Hız: 60 km/saat

Yol Tekerleği: 1.7 m çapındaki yol tekerleği kullanılır. (2 m çapındaki yol

tekerleği kullanıldığında deney yükü % 90/88 arttırılır.)

Deneyin Yapılması:

- Teste başlamadan önce, basınç kontrolü yapılır ve deney öncesi ölçümler alınır.
- Test şartları uygulanarak; lastik ve jant kompleksi makine dingiline takılır ve tamburun dış yüzeyine doğru bastırılır.
- Her 24 saatte bir basınç ve özür kontrolü yapılır. 4 psi'nin üzerinde basınç kaybı var ise nedeni araştırılır.
- Kontrollerde ortam sıcaklığı ölçülür ve deney formuna kayıt edilir.
- Lastik özür verdiğinde veya deney süresini tamamladığında test biter.
- Nitelik Denetim testleri için, testler seri üretim alt limitinde durdurulur.

Tekrar Başlatma Programı:

- Elde olmayan nedenlerden dolayı 30 dakikayı aşan duruşlarda; Duruş anındaki lastik basıncı ölçölüp kayıt edilir.
- Lastik test yükünde 2 saat koşturulur.
- 2 saat sonunda basınç, duruş anındaki basınca ayarlanıp deneye kaldığı yerden devam edilir.
- Bu süre deney süresine dahil edilmez.

Deneyin Sonrası Yapılacak İşlemler:

- Deney süresini (166.6 saat veya seri üretim alt limiti) tamamlayan lastikten; Toplam süre, toplam yol, bitiş tarihi ile deney sonrası istenen ölçümler alınır ve kayıt edilir. (Özür veren lastikten deney sonrası ölçümler alınmaz.)
- Özür varsa özürlü yerden ve karşısından bir kesit alınıp taşlanır. Özür vermeyen lastikler hurdalanır.

3.5.4 Topuk düşürme testi

Amaç: Binek ve Hafif Ticari Araçlar için tasarlanmış olan havalı lastiklerde; topuğun janta tutunma mukavemetini ölçmek ve değerlendirmek için yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek ve Hafif Ticari Araçlar için tasarlanmış olan havalı lastikleri kapsar.

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 24 ± 8 °C'de 24 saat

Jant: ETRTO Standardında belirtilen, lastiğe ait jant; deney (Hump'lı) jantı olarak kullanılır.

Basınç: Deney basıncı olarak; Çizelge 3.1.'de verilmiş olan basınç kullanılır.

Çene İlerleme Hızı: 50.8 ± 1.6 mm/dk

Testin Yapılması:

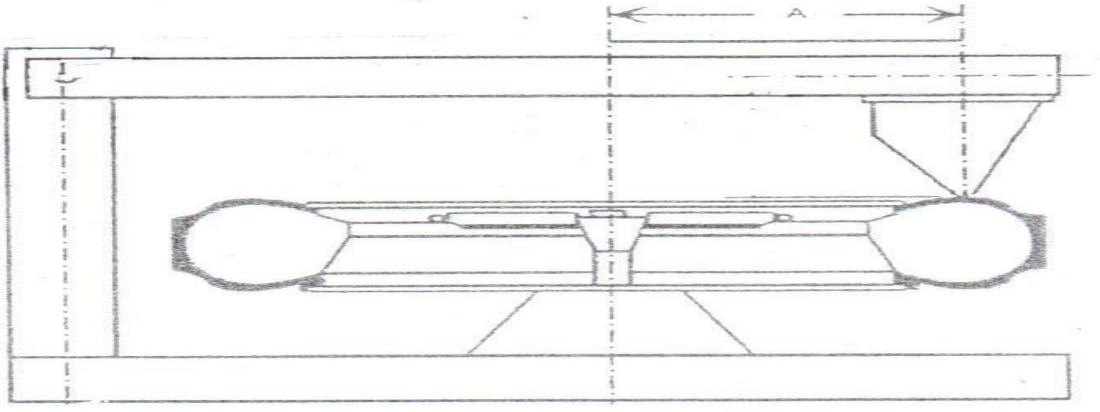
- Lastik jantlanmadan önce, jantın topuk yatakları ve lastiğin topukları hafif deterjanlanarak temizlenir, kurulanır, bu kısımlarda kayganlaştırıcı veya yapıştırıcı madde bulunmamalıdır.
- Lastiğin seri yüz topuğu üste gelecek şekilde lastik janta takılır, janta takılan lastik dizayn basıncına kadar şişirilir ve 24 saat şartlandırılır.
- Şartlanma süresi dolan lastiğin, lastik basıncı Çizelge 3.1'de belirtilen test basıncı değerine ayarlanır.

Çizelge 3.3. Topuk düşürme test basınçları çizelgesi

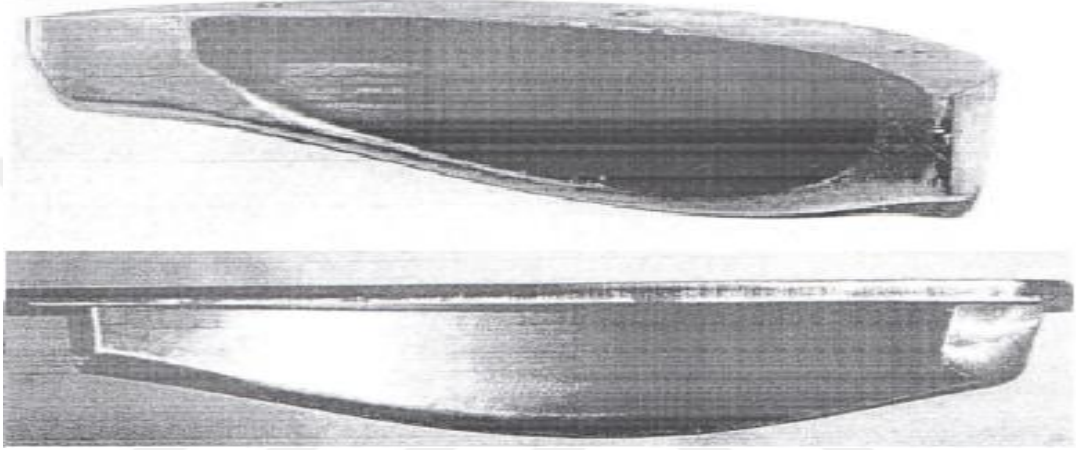
BİNEK RADYAL LASTİKLER (PSR)									
DIZAYN BASINCI	psi				kPa				
	32	36	40	60	240	280	300	340	350
TEST BASINCI	24	28	32	52	180	220	180	220	180

HAFİF TİCARİ ("LT" VE "C" MARKALI) RADYAL (LVR) LASTİKLER		
KESİT GENİŞLİĞİ	LASTİK YÜK KATEGORİSİ	TEST BASINCI psi(kPa)
≤ 295 mm	LR C (6 KM)	38 (260)
	LR D (8 KM)	49 (340)
	LR E (10 KM)	59 (410)
> 295 mm	LR C (6 KM)	28 (190)
	LR D (8 KM)	38 (260)
	LR E (10 KM)	49 (340)

- Lastik yanağı üzerinde, seri plakadan başlanarak eşit aralıkta 5 nokta (1, 2, 3, 4 ve 5 olarak) işaretlenir.
- Lastik ve jant kompleksi statik deney makinası topuk düşürme dingiline (Bkz.Şekil 3.16.) bağlanır.



Şekil 3.16. Topuk düşürme ünitesi



Şekil 3.17. Topuk düşürme çenesi

- Jant ölçme çapına göre kullanılacak topuk düşürme (çene) aparatı Çizelge 3.4.'ten seçilir ve makinaya monte edilir.

Çizelge 3.4. Çene aparatı ve bağlantı mesafesi bilgileri çizelgesi

TOPUK DÜŞÜRME (ÇENE) APARATI NOSU	JANT ÇAPI	"A" TOPUK DÜŞÜRME (ÇENE) APARATININ MERKEZE OLAN MESAFESİ(mm)
2A	12	241
2A	13	254
2A	14	267
2A	15	279
2A	16	292
2A	17	305
2A	18	318
2B	19	330
2B	20	343

- Topuk düşürme (Çene) aparatının merkeze olan (A) mesafesi (Bkz.Çizelge 3.4.) ayarlanır.
- Topuk düşürme (Çene) aparatının bağlı olduğu hareketli parçanın gövdeye paralelliği sağlanır.
- Topuk düşürme (Çene) aparatı lastik yanağına 0.5 mm kalacak şekilde ayarlanır.
- Topuk düşürme (Çene) aparatı lastik yanağına bastırılır, lastik topuğunun janttan düşmesi, hava tahliyesi veya çene aparatının janta değmesi durumuna kadar çene ilerlemesi devam eder ve bu durumlar neticesinde çenenin otomatik olarak geri çekilmesi gözlemlenir.
- Janta tutunma mukavemeti değerlerini gösteren test rapor çıktısı alınır ve işlem tamamlanır.

3.5.5 Yuvarlanma direnci testi

Amaç: Motorlu taşıtlar için tasarlanmış havalı lastiklerin, yuvarlanma dirençlerini görmek amacıyla yuvarlanma direnci testleri yapılır.

Kapsam: Motorlu taşıt araçları için tasarlanmış havalı lastiklerin tüm yuvarlanma direnci testlerini kapsar.

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 25 ± 5 °C

Jant: ETRTO Standardında belirtilen, Lastiğe ait jant; deney jantı olarak kullanılır.

Basınç: Test basıncı Çizelge 3.1.'de belirtilen değerlere göre belirlenir.

Yük: ETRTO Standardında belirtilen, Lastiğe ait yükün yükün %'si Çizelge 3.5.'den bakılarak hesaplanır.

Hız: Test hızı Çizelge 3.6.'da belirtilen değerlere göre belirlenir.

Çizelge 3.5. Yük-Basınç çizelgesi

YÜK-BASINÇ ÇİZELGESİ				
LASTİK SINIFI	BİNEK (C1)		LVR (C2)	TBR/LSR (C3)
	STANDART	KUVVETLENDİRİLMİŞ		
MAKİNA POZİSYONU	1		1	2
1.STEP YÜKÜ (FULL LOAD):	YÜK KAPASİTESİNİN %80'i		YÜK KAPASİTESİNİN %85'i (SINGLE YÜK)	
2.STEP YÜKÜ (SKIM LOAD):	20 daN		20 daN	50 daN
TEST BASINCI (psi)	30.4	36.2	DİZAYN BASINCI	

Çizelge 3.6. Hız çizelgesi

HIZ ÇİZELGESİ				
LASTİK SINIFI	BİNEK (C1)	LVR (C2) TBR/LSR(C3)	TBR/LSR (C3)	
YÜK İNDEKSİ	HEPSİ	YÜK İNDEKSİ ≤ 121	YÜK İNDEKSİ > 121	
HIZ SEMBOLÜ	HEPSİ	HEPSİ	J ,100 km/saat ve daha düşük hızlar veya hız sembolü bulunmayan lastikler için	K ,110 km/saat ve daha yüksek hızlar için
TEST HIZI (km/saat)	80	80	60	80

Çizelge 3.7. Warm up süresi

WARM UP SÜRESİ				
LASTİK SINIFI	BİNEK (C1)	LVR (C2) TBR/LSR(C3) YUK İNDEKSİ ≤121	LVR (C2) TBR/LSR(C3) YUK İNDEKSİ>121	
JANT ÇAPI	HEPSİ	HEPSİ	<22.5	≥22.5
1.STEP (WARM UP) SÜRESİ	60 DK	75 DK	150 DK	180 DK
2.STEP (SKIM LOAD) SÜRESİ	4 DK	4 DK	5 DK	5 DK
K (SICAKLIK DÜZELTME FAKTÖRÜ)	0.008	0.01	0.006	

Deneyin Yapılması:

- Lastiği jantlamadan önce, Jantın topuk yatakları ve lastiğin topukları temizlenir, kurulanır.
- Lastiğin seri yüz topuğu üste gelecek şekilde lastik janta takılır. (Janta takılan lastik Çizelge 3.8.'de belirtilen test basıncına kadar şişirilir.) Lastik şartlanmaya bırakılır.

Şartlanma süresi:

- Binek lastikler için en az 3 saat,
- Kamyonet/Minibüs ve Kamyonet/Otobüs Lastikleri için en az 6 saattir.
- Şartlanma süresi dolan Lastiğin, lastik basıncı Çizelge 3.1.'de belirtilen test basıncı değerine ayarlanır ve 10 dakika sonra basınç kontrolü yapılır, basınç kaybı var ise nedeni araştırılır.
- Lastik ve jant kompleksi deney makinası dingiline takılır ve (2 m çapındaki) tamburun dış yüzeyine doğru bastırılır.
- Termometre ile Lastik yanağı arası mesafe 40 cm ve dik olacak şekilde ayarlanır.
- Acil stop switchleri her test öncesinde manuel olarak ayarlanır.
- Deney programı kesintiye uğratılmaksızın yapılmalıdır.

Tekrar Başlatma Programı:

- Testin herhangi bir sebeple kesintiye uğraması durumunda lastik tekrar şartlandırılır.
- Şartlandırma sonrası basınç kontrolü ve ayarlaması yapılarak test baştan başlatılır.

3.5.6 Parçalanma enerjisi (plunger) testi

Amaç: Binek araçlar için tasarlanmış olan havalı lastiklerin; Parçalanma enerjisini görmek için yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek radyal/çapraz grubu lastikleri kapsar

Şartlandırma: Ortam sıcaklığı 18 - 40 °C'de 3 saat

Jant: ETRTO Standardında belirtilen, Lastiğe ait jant; deney jantı olarak kullanılır

Basınç: Deney basıncı olarak; Çizelge 3.8'de verilmiş olan basınç kullanılır.

Hız: 50.8 mm/dk

Uygulama:

- Lastiğin seri yüz topuğu üste gelecek şekilde lastik janta takılır. (Janta takılan lastik dizayn basıncına kadar şişirilir).
- Şartlanma süresi dolan Lastiğin, lastik basıncı Çizelge 3.8'de belirtilen test basıncı değerine ayarlanır.
- Seri plakadan başlayarak eşit aralıkta 5 nokta (1, 2, 3, 4 ve 5 olarak) işaretlenir.
- Lastik ve jant kompleksi statik deney makinası dingiline bağlanır.
- 19 mm çapındaki plunger çubuğu makinaya monte edilir.
- Çubuk verilen enerji değerine kadar bastırılır.
 - 4 ayrı (1, 2, 3 ve 4) noktadan aynı işlem tekrar edilir.
 - 5'inci değerde lastik patlayana kadar ve/veya janta değene kadar çubuk bastırılır.
- Parçalanma enerjisi değerlerini gösteren test rapor çıktısı alınır ve işlem tamamlanır.

Çizelge 3.8. Basınç çizelgesi

LASTİK YANAK BİLGİSİ	BASINÇ ÇİZELGESİ	
	DİZAYN BASINCI Psi (kPa)	TEST BASINCI Psi (kPa)
STANDART LOAD	35 (240)	26 (180)
EXTRA LOAD	41 (280)	32 (220)
300 Kpa	44 (300)	26 (180)
340 Kpa	50 (340)	32 (220)
350 Kpa	51 (350)	26 (180)

3.5.7 Binek lastikleri ece r30 onay testi

Amaç: Binek taşıtlar için tasarlanmış olan yeni ürün (Standart çapraz-kuşaklı, çapraz katlı, standart radyal, takviyeli) lastiklere "E ONAYI" alınması için yapılan bir testtir.

Kapsam: Binek lastiklerini kapsar

Lastiğin janta hazırlanması:

- Lastik, ETRTO Standardında belirtilen ölçüm jantına takılır. (Janta takılan lastik 44 ila 52 psi'lik basınca kadar şişirilir.)

Janta şişirilen lastiğin, basınç ayarının yapılması:

- Standart radyal lastiklerde 26 psi'ye kadar,
- Takviyeli (Kuvvetlendirilmiş) lastiklerde 32 psi'ye kadar,
- Jant üzerine takılı lastik, 24 saatten az olmamak kaydıyla ortam sıcaklığında (20 °C ve 30 °C arasında) şartlandırılır.
- Basınç, yukarıda belirtilen basınç seviyesine yeniden ayarlanır.
- Lastiğin koruyucu dişleri veya koruyucu bantların kalınlıkları dikkate alınarak, altı eşit aralıklı noktadan lastiğin toplam genişliği kumpas ile ölçülür. Elde edilen en yüksek ölçüm, toplam genişlik olarak alınır.

- Lastiğin maksimum çevresi ölçülüp, elde edilen sayı pi sayısına (3.1416'ya) bölünerek dış çap belirlenir.
- Değerler dinamik deney formuna kayıt edilir.

Dinamik Deney İçin Takip Edilecek Yöntem:

- Lastik, ETRTO Standardında belirtilen deney jantına takılır.
- Lastik, Çizelge 3.9.'da verilen uygun basınca (psi cinsinden) kadar şişirilir.

Çizelge 3.9. Basınç çizelgesi

HIZ KATEGORİSİ	ÇAPRAZ KATLI LASTİKLER			RADYAL LASTİKLER	
	KAT DEĞERİ			STANDART	TAKVİYELİ
	4	6	8		
L , M , N	33	39	44	35	41
P, Q, R, S	38	44	48	38	44
T , U , H	41	46	51	41	46
V	44	49	54	44	49
W	---	---	---	46	52
Y	---	---	---	46	52

- Janta takılı durumdaki lastik, üç saatten az olmamak kaydıyla deney ortam sıcaklığında (20 °C ve 30 °C arasında) şartlandırılır.
- Lastik basıncı, yukarıda belirtildiği değere yeniden ayarlanır.

Deneyin Yapılması:

- Lastik ve jant kompleksi deney makinası dingiline takılır ve (1.70 m veya 2 m çapındaki) tamburun dış yüzeyine doğru bastırılır.
- Çizelge 3.10.'da verilen yük değerleri deney makinası dingiline uygulanır.

Çizelge 3.10. Hız kategorisi-test yükü çizelgesi

HIZ KATEGORİSİ	TEST YÜKÜ
L, M, N, P, Q ,R, S, T, U, H	YÜK KAPASİTESİ x % 80
V	YÜK KAPASİTESİ x (% 91 x 80)
W	YÜK KAPASİTESİ x (% 85 x 80)
Y	YÜK KAPASİTESİ x (% 85 x 80)

- Deney süresince, lastik basınçları düzeltilmemeli ve deney yükü sabit tutulmalıdır.
- Deney odası sıcaklığı, deney süresince 20 °C ve 30 °C arasında kalmalıdır.
- Deney, aşağıdaki hususlara uyularak ara verilmeksizin yapılmalıdır.
- Sıfır hızdan, deney başlama hızına kadar geçen zaman 10 dakikadır.
- Deneye başlama hızı, Lastik tipi için belirlenen en yüksek hızlara göre ve tambur çaplarına göre Çizelge 3.11.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Tambur çapı- hız kategorisine göre testte kullanılacak azami hız değerleri

TAMBUR ÇAPI	HIZ KATEGORİSİNE GÖRE TESTTE KULLANILACAK AZAMI HIZ DEĞERLERİ (km/h)												
	L	M	N	P	Q	R	S	T	U	H	V	W	Y
1.70 m ± % 1	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	200	230	260
2 m ± % 1	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240	270

- Kademeli hız artırımını 10 km/h'tir.
- Son kademe hariç, her bir hız kademesindeki deney süresi (Y hız sınıfı hariç) 10 dakikadır. Y hız sınıfında başlangıç hızı kademesi (11. step) 20 dakikadır.
- Son hız kademesindeki deney süresi (Y hız sınıfı hariç) 20 dakikadır. Y hız sınıfında 10 dakikadır.
- Azami deney hızı; Lastik tipi için belirlenen en yüksek hızdan 70 m ± % 1'lik çapa sahip düz tekerlerde 10 km/h daha azdır. 2 m ± % 1'lik çapa sahip olan düz tekerlerde belirlenen azami hıza eşittir. Toplam deney süresi 1 saattir.

Çizelge 3.12. 1.70 m ± % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı çizelgesi.

1.70 m ± % 1'lik ÇAPA SAHİP YOL TEKERLEĞİNE AİT STEPLERDEKİ OLMASI GEREKEN HIZ MİKTARI ÇİZELGESİ.													
STEP (sayı)	SÜRE (dakika)	HIZ KATEGORİSİ (km/h)											
		L	M	N	P	Q	R	S	T	U	H	V	W
1	1	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	20	23
2	1	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	40	46
3	1	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	60	69
4	1	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	80	92
5	1	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	100	115
6	1	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	120	138
7	1	56	63	70	77	84	91	98	105	112	119	140	161
8	1	64	72	80	88	96	104	112	120	128	136	160	184
9	1	72	81	90	99	108	117	126	135	144	153	180	207
10	1	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	200	230
11	10	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	200	230
12	10	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240
13	10	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	220	250
14	20	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	230	260

Çizelge 3.13. 2 m ± % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı çizelgesi.

2 m ± % 1'lik ÇAPA SAHİP YOL TEKERLEĞİNE AİT STEPLERDEKİ OLMASI GEREKEN HIZ MİKTARI ÇİZELGESİ.													
STEP (sayı)	SÜRE (dakika)	H I Z K A T E G O R İ S İ (km/h)											
		L	M	N	P	Q	R	S	T	U	H	V	W
1	1	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	21	24
2	1	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	42	48
3	1	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	63	72
4	1	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	84	96
5	1	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	105	120
6	1	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	126	144
7	1	63	70	77	84	91	98	105	112	119	126	147	168
8	1	72	80	88	96	104	112	120	128	136	144	168	192
9	1	81	90	99	108	117	126	135	144	153	162	189	216
10	1	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240
11	10	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	210	240
12	10	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	220	250
13	10	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	230	260
14	20	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	240	270

Çizelge 3.14. 1.70 m ve 2 m $\pm$ % 1'lik çapa sahip yol tekerleğine ait steplerdeki olması gereken hız miktarı

YOL TEKERLEĞİ ÇAPI		1.70 m $\pm$ % 1'lik ÇAPA SAHİP YOL TEKERLEĞİNE AİT STEPLERDEKİ OLMASI GEREKEN HIZ MİKTARI	2 m $\pm$ % 1'lik ÇAPA SAHİP YOL TEKERLEĞİNE AİT STEPLERDEKİ OLMASI GEREKEN HIZ MİKTARI
STEP (sayı)	SÜRE (dakika)	HIZ KATEGORİSİ (km/h)	HIZ KATEGORİSİ (km/h)
		Y	Y
1	1	26	27
2	1	52	54
3	1	78	81
4	1	104	108
5	1	130	135
6	1	156	162
7	1	182	189
8	1	208	216
9	1	234	243
10	1	260	270
11	20	260	270
12	10	270	280
13	10	280	290
14	10	290	300

Deney Sonrası Yapılacak İşlemler:

- Toplam deney süresini tamamlayan lastiğin görsel kontrolü yapılır. Lastikte; sırt ayrılması, kat ayrılması, kord ayrılması, kord parçalanması veya kopması vb. özürler gözlenmez ise lastik deneyi özürsüz tamamlamıştır.
- Deneyden geçen lastiğin deney sonrası ölçümleri alınır ve lastik makinadan sökülerek 20° ila 30 ° C arasındaki ortam sıcaklığında 6 saat bekletilir.
- 6 saat ortam sıcaklığında bekletilen lastiğin çevresi ölçülüp, elde edilen sayı π sayısına (3.1416) bölünerek dış çap belirlenir.
- Deney sonrası ölçülen dış çap, deney öncesi ölçülen dış çap'tan $\pm$ % 3.5'tan fazla olmamalıdır.
- Alınan değerler, ilgili dinamik deney formuna kayıt edilir.
- Bütün işlemler bittikten sonra lastikte;

Lastikte özüre rastlanır ise, özür bölgesinden ve karşı bölgeden kesit alınarak taşlanır.

Lastikte özüre rastlanmaz ise lastik hurdalanır.

3.6 Lastik Hasar Testi Sonuçları

Çizelge 3.15. Genel dayanıklılık testi deney öncesi ve sonrası ölçümler

DENEY ÖNCESİ ÖLÇÜMLER		DENEY SONRASI ÖLÇÜMLER	
ŞARTLANMA:	3 saat 38 °C $\pm$ 3 °C	BASINÇ:	43 psi
JANT:	6½Jx16 inch	KESİT GENİŞLİĞİ:	214.1 mm
BASINÇ:	36 psi	DIŞ ÇAP:	627.7 mm
KESİT GENİŞLİĞİ:	216.1 mm	İÇ AÇINIM:	391 mm
DIŞ ÇAP:	626.4 mm		
İÇ AÇINIM:	390 mm		
TOPUK OTURMA BASINCI:	14/12 psi		
SERTLİK S/Y:	72/63 shore		
AĞIRLIK:	8.850 kg		

Çizelge 3.16. Test gerçekleştirme limitleri

YÜK (kg)	HIZ (km/saat)	SÜRE (saat)	YOL (km)	ORTAM SICAKLIĞI (°C)	BASINÇ (psi)
0	0	0	0	36.4	36.0
523	81	4	324	36.5	41.0
554	81	10	810	38.7	43.0
615	81	34	2754	37.3	43.0
646	81	38	3078	36.8	43.0

Sonuç: Test limitte durduruldu. Özür yok.

Çizelge 3.17. Topuk dayanıklılık deney öncesi ve sonrası ölçümler

DENEY ÖNCESİ ÖLÇÜMLER		DENEY SONRASI ÖLÇÜMLER	
ŞARTLANMA:	3 saat 38 °C ± 3 °C	BASINÇ:	48 psi
JANT:	6½Jx16 inch	KESİT GENİŞLİĞİ:	211.6 mm
BASINÇ:	43 psi	DIŞ ÇAP:	633.4 mm
KESİT GENİŞLİĞİ:	212.5 mm	İÇ AÇINIM:	388 mm
DIŞ ÇAP:	631.8 mm		
İÇ AÇINIM:	387 mm		
TOPUK OTURMA BASINCI:	12/10 psi		
SERTLİK S/Y:	69/61 shore		
AĞIRLIK:	8.850 kg		

Çizelge 3.18. Test gerçekleştirme limitleri

YÜK (kg)	HIZ (km/saat)	SÜRE (saat)	YOL (km)	ORTAM SICAKLIĞI (°C)	BASINÇ (psi)
0	0	0	0	35.8	43.0
1230	60	24	1440	38.7	51.0
1230	60	48	2880	40.0	50.0
1230	60	72	4320	40.6	48.0
1230	60	75	4500	39.6	48.0

Sonuç: Test limitte durduruldu. Özür yok.

Çizelge 3.19. Karkas dayanıklılık deney öncesi ve sonrası ölçümler

DENEY ÖNCESİ ÖLÇÜMLER		DENEY SONRASI ÖLÇÜMLER	
ŞARTLANMA:	3 saat 38 °C ± 3 °C	BASINÇ:	19 psi
JANT:	6½Jx16 inch	KESİT GENİŞLİĞİ:	213.5 mm
BASINÇ:	14 psi	DIŞ ÇAP:	630.6 mm
KESİT GENİŞLİĞİ:	210.5 mm	İÇ AÇINIM:	381 mm
DIŞ ÇAP:	630.3 mm		
İÇ AÇINIM:	379 mm		
TOPUK OTURMA BASINCI:	18/10 psi		
SERTLİK S/Y:	70/53 shore		
AĞIRLIK:	9.050 kg		

Çizelge 3.20. Test gerçekleştirme limitleri

YÜK (kg)	HIZ (km/saat)	SÜRE (saat)	YOL (km)	ORTAM SICAKLIĞI (°C)	BASINÇ (psi)
0	0	0	0	36.4	14.0
615	60	24	1440	36.9	19.0
615	60	48	2880	37.1	18.0
615	60	72	4320	37.0	19.0
615	60	91.7	5500	37.0	19.0

Sonuç: Test limitte durduruldu. Özür yok.

Çizelge 3.21. Topuk düşürme testi ölçümleri

TOPUK DÜŞÜRME TESTİ	
BASINÇ :	26 psi
JANTA TUTUNMA 1. BÖLGE:	1405.60 kg
JANTA TUTUNMA 2. BÖLGE:	1409.50 kg
JANTA TUTUNMA 3. BÖLGE:	1409.00 kg
JANTA TUTUNMA 4. BÖLGE:	1420.70 kg
JANTA TUTUNMA 5. BÖLGE:	1370.30 kg
MİN. DEĞER:	1370.30 kg
TOPUK DÜŞÜRME LİMİTİ	906 kg

Sonuç: Test limiti sağlanmıştır.

Çizelge 3.22. Yuvarlanma direnci testi deney öncesi ölçümler

DENEY ÖNCESİ ÖLÇÜMLER	
ŞARTLANMA:	3 saat 25 °C ± 5 °C
JANT:	6½Jx16 inch
BASINÇ:	30.4 psi
KESİT GENİŞLİĞİ:	214 mm
DIŞ ÇAP:	628 mm
İÇ AÇINIM:	386 mm
TOPUK OTURMA BASINCI:	10/10 psi
SERTLİK S/Y:	68/60 shore
AĞIRLIK:	8.950 kg

Çizelge 3.23. Test gerçekleşme limitleri

YÜK (kg/daN)	HIZ (km/saat)	SÜRE (saat)	ORTAM SICAKLIĞI (°C)	BASINÇ (psi)	YUVARLANMA DİRENCİ KUVVETİ (N)
0	0	0	0	25.0	0
523	492 / 483	80	288.8	24.6	59.5
554	- / 20	80	311.4	24.6	17.3

Sonuç: Test limiti sağlanmıştır.

Çizelge 3.24. Parçalanma enerjisi (plunger) testi deney öncesi ölçümler

ŞİŞİRİLMİŞ ÖLÇÜLER	
AĞIRLIK:	8.900 kg
İÇ AÇINIM:	400 mm
KESİT GENİŞLİĞİ:	215.8 mm
DIŞ ÇAP:	626.4 mm
OMUZ GENİŞLİĞİ:	186 mm
SIRT SERTLİĞİ:	71 shore
YANAK SERTLİĞİ:	62 shore
ŞARTLANDIRMA	
JANT:	6½Jx16 inch
SUBAP:	TR-414
BASINÇ :	36 psi
TOPUK OTURTMA BASINCI:	28/10 psi
KALIP NO:	6891-4

Çizelge 3.25. Test gerçekleştirme limitleri

PARÇALANMA ENERJİSİ TESTİ					
BASINÇ:	26 psi				
ÇUBUK:	19 mm				
SEHİM 1:	96.89 mm	YÜK 1:	653.00 kg	ENERJİ 1:	3163.46 kg-cm
SEHİM 2:	97.25 mm	YÜK 2:	649.00 kg	ENERJİ 2:	3155.76 kg-cm
SEHİM 3:	97.00 mm	YÜK 3:	650.00 kg	ENERJİ 3:	3152.50 kg-cm
SEHİM 4:	97.00 mm	YÜK 4:	650.00 kg	ENERJİ 4:	3152.50 kg-cm
SEHİM 5:	130.14 mm	YÜK 5:	808.00 kg	ENERJİ 5:	5257.66 kg-cm
MAX. DEĞER	130.14 mm	MAX. DEĞER	808.00 kg	MAX. DEĞER	5257.66 kg-cm
PARÇALANMA ENERJİSİ LİMİTİ:					2998 kg-cm

Sonuç: Test limiti sağlanmıştır.

Çizelge 3.26. Binek lastikleri ece r30 onay (yüksek hız) testi deney öncesi ve sonrası ölçümler

DENEY ÖNCESİ ÖLÇÜMLER		DENEY SONRASI ÖLÇÜMLER	
ŞARTLANMA:	3 saat 38 °C ± 3 °C	BASINÇ:	50 psi
JANT:	6½Jx16 inch	KESİT GENİŞLİĞİ:	213.1 mm
BASINÇ:	41 psi	DIŞ ÇAP:	629.6 mm
KESİT GENİŞLİĞİ:	214.7 mm	İÇ AÇINIM:	389 mm
DIŞ ÇAP:	627.4 mm		
İÇ AÇINIM:	390 mm		
TOPUK OTURMA BASINCI:	10/10 psi		
SERTLİK S/Y:	67/60 shore		
AĞIRLIK:	8.950 kg		

Çizelge 3.27. Test gerçekleştirme limitleri

YÜK (kg)	HIZ (km/saat)	SÜRE (saat)	YOL (km)	ORTAM SICAKLIĞI (°C)	BASINÇ (psi)
0	0	0	0	35.0	41.0
492	0-170	10	16	35.0	41.0
492	170	10	44	35.0	41.0
492	180	10	74	35.0	41.0
492	190	10	106	35.0	41.0
492	200	20	172	35.0	41.0
492	210	10	207	35.0	41.0

Sonuç: Test limitte durduruldu. Özür yok.

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada izotaktik polipropilen üzerine oda koşullarında yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme sonrası yapılan gevşeme deneylerinin gözlemleri raporlanmıştır. Deneydeki gözlemler, basit gevşemeden karma gevşemeye geçişi, gevşeme sürecinin başlangıcındaki maksimum gerilme ve deney başlangıç seviyesi arasındaki farkın artmasına bağlı olduğunu göstermektedir. Yükleme geçmişine bağlı olarak hasar ve gevşeme davranışının hakkında detaylı bir inceleme meydana getirilmiştir: (i) bir başlangıç gerilme seviyesinde σ_0 , karma gevşeme davranışının özkütlesi maksimum gerilme $\sigma_{\max}$ seviyesi ile farkın yükselmesi ile yükselmektedir, (ii) Döngüsel ön yükleme programı yapıldığında, döngü miktarının yükselmesiyle karışık gevşemenin özkütlesi düşer.

Kurucu modeller, özellikle birleşik durum değişken teorileri, çok sayıda malzeme sabiti içerir. Modellemede malzeme parametrelerinin belirlenmesi önemli bir adımdır ve bu noktada deneysel verilere duyulan ihtiyaç devreye girmektedir. Polimerik malzemeler hakkında yeterli tek eksenli veri olmasına rağmen, bunların hasar-sünme ve gevşeme etkileşim davranışları yeterince araştırılmamıştır. Bu koşullar altında malzeme tepkisini simüle edebilmek için, malzeme parametreleri sadece tek eksenli döngüsel veriler kullanılarak değil, aynı zamanda döngüsel-gevşeme verileri kullanılarak da belirlenmelidir. Bu nedenle, döngüsel sürünme/gevşeme deneyleri yapılmalıdır.

Geliştirilmiş malzeme modelinin, modeli oluşturmak için kullanılan çeşitli yükleme koşullarında yanıtı ne kadar iyi tahmin edebileceğini belirlemek için deformasyon oranlarında farklı deformasyon tipi altında polipropilen üzerinde testler yapıldı.

Çalışmanın son adımında, $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerinim oranı ile tek eksenli çekme testlerinde PP gözlemleri, çeşitli çeşitli gerilmeler/gerilmeler ile gevşeme testleri raporlanmıştır. Gevşeme davranışının, maksimum gerinim ile mevcut gerinim seviyesi arasındaki farktan etkilendiği gözlemlenmiştir. Gerinim artışı arttıkça, gevşeme davranışı basit gevşeme davranışından gevşeme davranışına değişir.

Deneysel veriler, ortam sıcaklığında gerinim kontrollü döngüsel çekme testlerinde izotaktik polipropilen hakkında raporlanmıştır. Gerilim diyagramlarının aşağıdaki karakteristik özellikleri gözlemlenir: (i) çevrim başına maksimum ve minimum gerilimler, çevrim sayısı n (döngüsel yumuşama), (ii) $\sigma_{\min}(n)$ 'deki azalma oranı, $\sigma_{\max}(n)$, (iii) bu oranlar gerinim hızı $\dot{\epsilon}$ 'dan zayıf bir şekilde etkilenir, (iv) n 'deki bir artış,

gerilimin (gerinim eğrilerinin (görünür döngüsel güçlendirme) saat yönünün tersine dönmesine ve histerezis enerjisinde azalmaya neden olur.

Oda sıcaklığında karışık programlı (maksimum gerinim 0.15 ve sıfır minimum stres arasındaki salınımlar) tek eksenli çekme döngüsel testlerinde izotaktik polipropilen üzerinde gözlemler raporlanmıştır. Deneysel veriler, minimum gerinmenin (bir numunedeki artık gerinmeyi karakterize eder) döngü sayısına bağımlılığının evrensel karakterini gösterir: deneysel fonksiyon $\sigma_{\min}(n)$ sıcaklıktan bağımsızdır ve gerinim oranından zayıf bir şekilde etkilenir.

Gevşeme davranışının, maksimum gerinim ile mevcut gerinim seviyesi arasındaki farktan etkilendiği gözlemlenmiştir. Gerinim artışı arttıkça, gevşeme davranışı basit gevşeme davranışından ters sürünme/gevşeme davranışına değişir.

Bu çalışmada bir binek lastiğinin seri üretime alınmadan önce sağlaması gereken statik ve dinamik nitelik testlerinin uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla 205/55/R16 ebatında olan bir lastik seçilmiş olup bu lastiğe genel dayanıklılık, topuk dayanıklılık, karkas dayanıklılık, topuk düşürme, yuvarlanma direnci, parçalanma enerjisi (plunger) ve ECE R30 Onay (Yüksek Hız) testleri uygulanmıştır. Genel dayanıklılık testi lastiğin genel performansını görmek için sabit hızda ve değişken yükte yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. Topuk dayanıklılık testi lastiğin topuk performansını görmek için sabit hızda, sabit yükte ve yüksek basınçta yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. Karkas dayanıklılık lastiğin karkas performansını görmek için sabit hızda, sabit yükte ve düşük basınçta yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. Topuk düşürme testi lastiğin topuğunun janta tutunma mukavemetini ölçmek ve değerlendirmek için yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. Yuvarlanma direnci testi lastiğin, yuvarlanma dirençlerini görmek amacıyla yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. Parçalanma enerjisi (Plunger)lastiğin parçalanma enerjisini görmek için yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır. ECE R30 Onay (Yüksek Hız) Testi Binek taşıtlar için tasarlanmış olan yeni ürün lastiklere "E ONAYI" alınması için yapılmış olup limit değerlerini sağlamıştır.

Sonuç olarak bir binek lastiği seri üretime alınmadan önce standart statik ve dinamik testlerini geçmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Amoedo, J. ve Lee, D., 1992. Modeling the uniaxial rate and temperature dependent behavior of amorphous and semicrystalline polymers, *Polymer Engineering & Science*, 32, 16, 1055–1065.
- Ariyama, T., 1994. Viscoelastic-plastic deformation behavior of polypropylene after cyclic preloadings, *Polymer Engineering & Science*, 34, 17, 1319–1326.
- Baral, P., Guillonneau, G., Kermouche, G., Bergheau, J. M., Loubet, J. L., Bennin, T. ve Ullah, N., 2019. Effect of loading rate on the creep behaviour of epoxy resin insulators by nanoindentation, *Macromolecules*, 27, 2, 11786–11797.
- Baykal, D., Siskey, R. S., Underwood, R. J., Briscoe, A. ve Kurtz, S. M., 2016. The biotribology of PEEK-on-HXLPE bearings is comparable to traditional bearings on a multidirectional pin-on-disk tester, *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 474, 11, 2384-2393.
- Bergström, J. S., Kurtz, S. M., Rimnac, C. M. ve Edidin, A. A., 2002. Constitutive modeling of ultra-high molecular weight polyethylene under large-deformation and cyclic loading conditions, *Biomaterials*, 23, 11, 2329–2343.
- Bergström, J. S., Rimnac, C. M. ve Kurtz, S. M., 2003. Prediction of multiaxial mechanical behavior for conventional and highly crosslinked UHMWPE using a hybrid constitutive model, *Biomaterials*, 24, 8, 1365–1380.
- Brusselle-Dupend, N. ve Cangémi, L., 2008. A two-phase model for the mechanical behaviour of semicrystalline polymers. Part I: Large strains multiaxial validation on HDPE, *Mechanics of Materials*, 40, 9, 743–760.
- Caelers, H. J. M., Govaert, L. E. ve Peters, G. W. M., 2016. The prediction of mechanical performance of isotactic polypropylene on the basis of processing conditions, *Polymer*, 83, 116–128.
- Chen, K., Kang, G., Yu, C. ve Jiang, H., 2019. Effect of crystalline content on ratchetting of ultra-high molecular weight polyethylene polymers: Experimental investigation and constitutive model, *Mechanics of Materials*, 133, 37–54.
- Colak, O. U. ve Dusunceli, N., 2006. Modeling viscoelastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE), *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME, 128, 4, 572–578.
- Das, S. ve Roy, D., 2019. A constitutive model for block-copolymers based on effective temperature, *International Journal of Mechanical Sciences*, 161–162.
- Day, J. S., MacDonald, D. W., Ramsey, M. L., Abboud, J. A. ve Kurtz, S. M., 2020. Quantitative ultrahigh-molecular-weight polyethylene wear in total elbow retrievals, *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 14, 11, 2189.
- Drozdov, A. D., 2010. Time-dependent response of polypropylene after strain reversal, *International Journal of Solids and Structures*, 77, 12, 2277-2293.
- Drozdov, A. D. ve Dusunceli, N., 2012. Inverse relaxation in polypropylene, *Iranian Polymer Journal, English Edition*, 21, 10 , 701–711.
- Drozdov, A. D. ve Dusunceli, N., 2013. Modeling of multi-cycle deformation of

- polymers with various deformation programs, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 9, 1, 4–22.
- Dusunceli, N., 2010a. Modeling finite deformation behavior of semicrystalline polymers under uniaxial loading-unloading, *Journal of Elastomers and Plastics*, 42, 4, 347–364.
- Dusunceli, N., 2010b. Modeling finite deformation behavior of semicrystalline polymers under uniaxial loading-unloading, *Journal of Elastomers and Plastics*, 42, 4, 347–364.
- Dusunceli, N., 2012. The unusual creep and relaxation behaviour of polypropylene, *Journal of Polymer Engineering*, 32, 3, 167–176.
- Dusunceli, N. ve Colak, O. U., 2006. High density polyethylene : Experiments and modeling, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 10, 4, 331–345.
- Dusunceli, N., Drozdov, A. D. ve Theilgaard, N., 2017. Influence of temperature on viscoelastic–viscoplastic behavior of poly(lactic acid) under loading–unloading, *Polymer Engineering and Science*, 57, 3, 239–247.
- ASTM E328,. 2013. Standard test methods for stress relaxation for materials and structures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Fairhurst, A., Thommen, M. ve Rytka, C., 2019. Comparison of short and long term creep testing in high performance polymers, *Polymer Testing*, 78, 105979.
- Ge, S., Zhu, X., Wang, S. Q., Chen, K., Kang, G., Yu, C. ve Coates, P. D., 2019. A constitutive model for block-copolymers based on effective temperature, *Macromolecules*, 161–162, 22, 8878–8894.
- Ho, K., 2001. Modeling of nonlinear rate sensitivity by using an overstress model, *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2, 3, 351–364.
- Ivey, M., Melenka, G. W., Carey, J. P. ve Ayranci, C., 2017. Characterizing short-fiber-reinforced composites produced using additive manufacturing, *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 3, 3, 81–91.
- Jourdan, C., Cavaille, J. Y. ve Perez, J., 1989. Mechanical relaxations in polypropylene: A new experimental and theoretical approach, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 27, 11, 2361–2384.
- Khan, F. ve Krempf, E., 2006. Amorphous and semicrystalline solid polymers: Experimental and modeling studies of their inelastic deformation behaviors, *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 128, 1, 64–72.
- Kitagawa, M. ve Takagi, H., 1990. Nonlinear constitutive equation for polyethylene under combined tension and torsion, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 28, 11, 1943–1953
- Kitagawa, M., Zhou, D. ve Qui, J., 1995. Stress-Strain curves for solid polymers, *Polymer Engineering & Science*, 35, 22, 1725–1732.
- Kitagawa, M., Zhou, D., Shimada, K. ve Umeoka, H., 1999. Anomalous behavior associated with unloading in polyethylene, *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 48, 6, 592–597.

- Krempl, E. ve Ho, K., 2000. Overstress model for solid polymer deformation behavior applied to Nylon 66. ASTM Special Technical Publication, 1357, 118–137.
- Lai, J. ve Bakker, A., 1995. An integral constitutive equation for nonlinear plasto-viscoelastic behavior of high-density polyethylene, *Polymer Engineering & Science*, 35, 17, 1339-1347.
- Lewis, G. ve Carroll, M., 2001. Effect of crosslinking UHMWPE on its tensile and compressive creep performance, *Bio-Medical Materials and Engineering*, 11, 3, 167-183.
- Li, W., Gazonas, G., Brown, E. N., Rae, P. J. ve Negahban, M., 2019. Thermomechanical model for monotonic and cyclic loading of PEEK, *Mechanics of Materials*, 129, 113–138.
- Meyer, R. W. ve Pruitt, L. A., 2001. The effect of cyclic true strain on the morphology, structure, and relaxation behavior of ultra high molecular weight polyethylene, *Polymer*, 42, 12, 5293-5306
- Mijovic, I., 1994. An introduction to the mechanical properties of solid polymers, I. M. Ward and D. W. Hadley, John Wiley & Sons, Chichester, UK, soft cover £19.95. *Polymers for Advanced Technologies*, 5, 9, 88-102.
- Mourad, A. H. I., Fouad, H., ve Elleithy, R., 2009. Impact of some environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behaviour of UHMWPE-GUR 410-medical grade. *Materials and Design*, 30, 10, 4112–4119.
- Sweeney, J., Spares, R. ve Woodhead, M., 2009. A constitutive model for large multiaxial deformations of solid polypropylene at high temperature, *Polymer Engineering and Science*, 49, 10, 1902–1908.
- Wang, A. ve Li, G., 2015. Stress memory of a thermoset shape memory polymer, *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 24, 1–11.
- Zhang, C. ve Moore, I. D., 1997. Nonlinear mechanical response of high density polyethylene. Part I: Experimental investigation and model evaluation, *Polymer Engineering and Science*, 37, 2, 404–413.
- URL-1 < <https://www.bridgestone.com.tr/genel-bilgiler>>, Erişim tarihi: 05.09.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Önder Çağdaş ÖZENSOY

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Karabük Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği
Bölümü, 2009-2014

Lisans : Ahi Evran Üniversitesi, Makine Mühendisliği
Bölümü, 2017-2021

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, 2020-2022

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. HP Pelzer PİMSA / Yaz Stajı
2. Mercedes-Benz Türk Aksaray Kamyon Fabrikası / Yaz Stajı
3. Meplin Piston / Üretim Planlama Mühendisi
4. Çelikform Gestamp / Üretim Planlama Mühendisi
5. Petlas / Proses Kalite Takım Lideri

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Düşünceli, N. ve Özensoy, Ö. Ç., 2021. Çevrimsel ön yüklemenin polipropilenin gevşeme davranış üzerindeki etkisi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24, 4, 359-370.