

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KAUÇUK TÜRÜ MALZEMELERİN İNELASTİK ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Mak. Yük. Müh. Vahap VAHAPOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nce

“Doktor”

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.03.2006

Tezin Savunma Tarihi : 12.05.2006

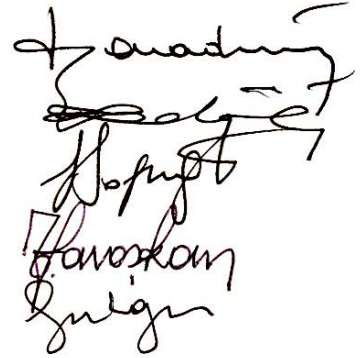
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Hasan SOFUOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışma, kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinin incelenmesine yönelik deneysel bir araştırmadır. Çalışmada SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri, kalıcı deformasyon, histerezis, gerilme gevşemesi gibi inelastik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonunda ise kauçuk malzemelerin inelastik özelliklerinden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir.

Doktora çalışmamın gerçekleşmesinde değerli bilgileriyle beni yönlendiren, danışmanım Sayın Prof. Dr. Sami KARADENİZ'e, tez izleme jürimde bulunan Sayın Prof. Dr. Ragıp ERDÖL'e teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmaları gerçekleştirmem sırasında benden maddi ve manevi yardımlarda bulunan ve isimlerini tek tek veremediğim K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü hocaları, asistanları, uzman ve teknisyenlerine de teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca manen yorulduğum anlarda beni motive eden, destekleyen ve de kendisini tanımaktan dolayı onur duyduğum D.S.İ. Merkez Atölye'de görevli çalışma arkadaşım Sebahattin SARAÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam sırasında birçok kişi maddi veya manevi olarak benden yardımlarını esirgememişlerdir. Fakat iki kişi, maddi ve manevi yardımlarının dışında, çalışmam sırasında gece ve gündüz hep yanımda olmuşlar sıkıntılarımı, endişelerimi ve çalışmamın zorluklarını benimle aynı anda yaşamış ve paylaşmışlardır. Bu fedakarlıklarından dolayı onlara teşekkür etmek istiyorum;

Eşim ve Oğluma ...

Vahap VAHAPOĞLU
Trabzon 2006

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET.....	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kauçuk Türü Malzemeler.....	7
1.3. Kauçukların Mekanik Deneyleri	13
1.4. Literatür Araştırması	20
1.4.1. Şekil Değiştirme Hızı	20
1.4.2. Mullins Etkileri	29
1.4.3. Gerilme Gevşemesi	36
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı	45
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	48
2.1. Giriş.....	48
2.2. Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği.....	49
2.3. Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği Programı.....	62
2.3.1. Mullins Etkileri Deneyi-1 Programının Tanıtılması.....	64
2.3.2. Mullins Etkileri Deneyi-2 Programının Tanıtılması.....	67
2.3.3. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1 Programının Tanıtılması	68
2.3.4. Gerilme Gevşemesi Deneyi-2 Programının Tanıtılması	70
2.4. İnelastik Özellikleri İncelemeye Yönelik Deney Prosedürü ve Deney Şartları.....	71
2.4.1. Şekil Değiştirme Hızı Deney Prosedürü ve Deney Şartları	72
2.4.2. Mullins Etkileri Deney Süresi ve Deney Şartları	74

2.4.3.	Gerilme Gevşemesi Deney Prosedürü ve Deney Şartları.....	78
2.4.4	İnelastik Özelliklerden Bağımsız Deneysel Veri Elde Edilmesi Deney Prosedürü ve Deney Koşulları	79
2.5.	Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	80
3.	BULGULAR	83
3.1.	Şekil Değişirme Hızı Deneyleri	83
3.1.1.	SBR Kauçuk Deneyleri	83
3.1.2.	NBR Kauçuk Deneyleri	90
3.1.3.	NR Kauçuk Deneyleri	96
3.2.	Mullins Etkileri Deneyleri.....	101
3.2.1.	SBR Kauçuk Deneyleri	101
3.2.2.	NBR Kauçuk Deneyleri	116
3.2.3.	NR Kauçuk Deneyleri	129
3.3.	Gerilme Gevşemesi Deneyleri	141
3.3.1.	SBR Kauçuk Deneyleri	141
3.3.2.	NBR Kauçuk Deneyleri	151
3.3.3.	NR Kauçuk Deneyleri	158
3.3.4.	SBR, NBR ve NR Kauçuk Deney Sonuçlarının Karşılaştırılmaları	165
3.4.	İnelastik Özelliklerinden Bağımsız Deneysel Veri Elde Edilmesi.....	172
3.4.1.	SBR Kauçuk Deneyleri	172
3.4.2.	NBR Kauçuk Deneyleri	176
3.4.3.	NR Kauçuk Deneyleri	177
4.	İRDELEME.....	185
4.1.	Şekil Değişirme Hızı Deneyleri	185
4.2.	Mullins Etkileri Deneyleri.....	191
4.3.	Gerilme Gevşemesi Deneyi.....	203
4.4.	İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Etme Deneyleri.....	210
5.	SONUÇLAR	215
6.	ÖNERİLER	218
7.	KAYNAKLAR.....	220
	ÖZGEÇMİŞ	236

ÖZET

Bu tezde deformasyon sebebiyle kristalize olamayan SBR (stiren-bütadien kauçuğu) ve NBR (nitril-bütadien kauçuğu) kauçukları ile deformasyon nedeniyle kristalize olabilen NR (doğal kauçuk) kauçuğunun inelastik özelliklerinden gerilme gevşemesi, Mullins etkileri, kalıcı deformasyon, şekil değiştirme hızı ve histerezisin bu kauçukların gerilme-şekil değiştirme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Yapılan çalışmada, amaca yönelik olarak bir tek eksenli çekme makinası tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deney düzeneğindeki tüm donanım ve sensörlerin kontrolü NI-LABVIEW ortamında yazılan bir yazılımla kontrol edilmiştir. Sözü edilen inelastik özellikleri incelemeye yönelik olarak yedi farklı deney prosedürü geliştirilmiş ve yazılımla ilişkilendirilmiştir. Böylelikle tüm deneyler tamamen bir bilgisayar desteğiyle gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, çalışmada kullanılan kauçukların her bir inelastik özelliklerinin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkileri tek tek incelenmiş ve ardından bileşik etkileri çalışılmıştır. Böylece kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalardan, ön deformasyon deneylerinin SBR kauçuk malzemesinde 200 mm/dak. uygulanabileceği gözlemlenmiştir. NBR ve NR kauçuk malzemelerinde buna karşılık gelen şekil değiştirme hızları ise 80 mm/dak'dır. Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için kauçuk numunelerin 10 ile 12 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu, tekrarlı yükleme çevrimlerinden malzemedeki gerilme yumuşaması, kalıcı deformasyon ve histerezis kararlı hale gelmektedir. Deneylerden, SBR kauçuk için inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan NBR ve NR kauçuk için ise yükleme ve boşaltma eğrileri arasında histerezis alanı kaldığından inelastik özelliklerden bağımsız veriler elde edilememektedir.

Anahtar Kelimeler: Kauçuk Türü Malzemeler, Mullins Etkileri, Histerezis, Gerilme Gevşemesi, Kalıcı Deformasyon, Şekil Değiştirme Hızı, Ön Deformasyon Prosedürü, Tek Eksenli Çekme Deney Makinası

SUMMARY

Experimental Investigation of the Inelastic Properties of Rubber-like Materials

In this thesis, the effects of the stress relaxation, Mullins effects, permanent set, strain rate of straining, and hysteresis on the stress–strain behaviours of SBR (Stiren-Bütadien Rubber) and NBR (Nitril-Bütadien Rubber) which show no strain induced crystallization and NR (natural rubber) which shows strain induced crystallization are investigated experimentally.

A special purpose uni-axial testing machine was designed and manufactured for the study. All the hardware and the sensors used in the experimental set up were controlled by a software written in the NI-LABVIEW platform. To investigate the inelastic properties of the rubbers used seven different loading procedures were proposed and then fed into the software. Hence, all the experiments were performed by the full assistance of a computer.

In the first stage, the effects of the every one of these inelastic properties on the stress-strain behaviours of the chosen rubbers were investigated and then their combined effects were studied. Hence the stress-strain data which are independent of the inelastic properties of the rubbers were obtained. The effects of the application of pre-conditioning on the inelastic properties of the studied rubbers were also investigated.

Experimental investigation showed that the pre-conditioning experiments can be carried out at a strain rate of 200mm/min. for the SBR. The corresponding strain rate for NBR and NR is 80 mm/min. In order to obtain the Mullins effects free data it is necessary that the rubber specimens should be subjected to 10 to 12 pre loading cycles. After these loading cycles the effects of the stress relaxation, permanent set, hysteresis on the stress - strain behavior settled down. For the SBR is possible to obtain the stress-strain data which are independent from the inelastic properties of this rubber. On the other hand, such data can not be obtained for of the NBR and NR since there remains some hysteresis area between the uploading and unloading curves for these rubbers.

Key Words: Rubber-Like Materials, Mullins Effects, Hysteresis, Stress Relaxation, Permanent Set, Strain Rate, Pre Conditioning, Uniaxial Testing Machine

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Kauçuk türü malzemeler için önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının sınıflandırılması [26].....	6
Şekil 2.	İki fonksiyonlu monomerler	8
Şekil 3.	Üç fonksiyonlu monomerler	8
Şekil 4.	Kauçuk türü malzemelerin sınıflandırması.....	10
Şekil 5.	Polimerlerin molekül yapıları	11
Şekil 6.	Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler.....	16
Şekil 7.	Literatürde tek eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan araştırmacılar	18
Şekil 8.	Tek eksenli çekme deformasyonları	18
Şekil 9.	Basit çekme deneyi genel prensibi	19
Şekil 10.	(a) Kauçuğa uygulanan sabit deformasyon (b) Sabit deformasyon altında kauçuktaki gerilme gevşemesi davranışı	37
Şekil 11.	Tek eksenli çekme deney düzeneğinin resmi	49
Şekil 12.	Tek eksenli çekme deney düzeneği krokisi	50
Şekil 13.	Deney düzeneği tahrik sistemi.....	52
Şekil 14.	Tahrik milleri yataklama sistemi	53
Şekil 15.	a) Tahrik millerine zincir dişli çark mekanizması ile hareketin iletilmesi, b) Elle tahrik mekanizması	53
Şekil 16.	Tutma Çeneleri	54
Şekil 17.	a) Moment giderici mekanizma, b) Yük hücresinin hareket tablasına bağlantı tertibatı	55
Şekil 18.	a) Yük hücresi amplifikatörü, b) DC güç kaynağı.....	55
Şekil 19.	a) Artımsal tip enkoderın tahrik miline bağlantısı, b) Data acquisition bağlantı kartı	56
Şekil 20.	a) Deney düzeneği kapısı ve deneylerin izlenebileceği ısıya dayanıklı çift cam, b) Deney düzeneği ısıtma eşanjörleri	57
Şekil 21.	Sıcaklık odası ısıtma ve sirkülasyon sistemi krokisi	58
Şekil 22.	HAAKE F3-K tipi sabit sıcaklık banyosu	59
Şekil 23.	Sabit sıcaklık banyosu içerisine yerleştirilen ek rezistans sistemi	59

Şekil 24.	a) Sıcaklık kontrolörü ve triyak sürücü, b) Isıtılan yağı sisteme pompalayan pompa	59
Şekil 25.	Sıcaklık odasındaki sıcaklığın belirlendiği termokupl sıcaklık problemleri, b) Digital termokupl termometresi	60
Şekil 26.	a) Radyal fan ve doğru akım motoru tertibatı b) Üstten emilen havanın alttan sıcaklık odası içerisine verilmesi	61
Şekil 27.	Sıcaklık odası kapısı üzerine yerleştirilen sıcaklık termometresi.....	61
Şekil 28.	Geliştirilen programa ait algoritma.....	63
Şekil 29.	Mullins etkileri deneyi-1'nin bilgisayar ekran görüntüsü.....	66
Şekil 30.	Mullins etkileri deneyi-2'nin bilgisayar ekran görüntüsü.....	68
Şekil 31.	İnelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyi-1'nin bilgisayar ekran görüntüsü.....	69
Şekil 32.	Gerilme gevşemesi deneyi-2'nin bilgisayar ekran görüntüsü	71
Şekil 33.	Şekil değiştirme hızının, gerilme-uzama oranını davranışına etkisinin incelendiği deney prosedürü	72
Şekil 34.	Malzemeye uygulanacak ön deformasyon prosedürünün, şekil değiştirme hızını belirleyebilmek için uygulanacak olan deney prosedürü	73
Şekil 35.	Ön deformasyon prosedürü uygulanmış malzemedeki şekil değiştirme hızının gerilme-uzama oranına etkisinin inceleneceği deney prosedürü.....	74
Şekil 36.	Malzemeye uygulanacak N tekrarlı yükleme sayısını belirleyebilmek için uygulanacak olan deney prosedürü.....	75
Şekil 37.	Mullins etkileri ile malzemeye uygulanacak olan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi incelemek için uygulanacak olan deney prosedürü	76
Şekil 38.	Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişimini incelemek için uygulanacak olan deney prosedürü.....	76
Şekil 39.	Malzemeye uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü.....	78
Şekil 40.	Malzemeye uygulanan ön deformasyon prosedürlü gerilme gevşemesi deney prosedürü.....	79
Şekil 41.	İnelastik özelliklerden bağımsız veri elde edebilmek için uygulanan deney prosedürü.....	80
Şekil 42.	Kauçuk numune kesme kalıbı.....	82
Şekil 43.	a-f) SBR kauçuk malzemesinin, sırasıyla, $\dot{\epsilon} = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerilme-uzama oranı grafikleri, g) Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi	84-85
Şekil 44.	SBR kauçuk malzemesinin 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	86

Şekil 45.	SBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	88
Şekil 46.	SBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	89
Şekil 47.	SBR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	89
Şekil 48.	SBR kauçuk malzemesine ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra şekil değiştirme hızlarının karşılaştırılması	90
Şekil 49.	NBR kauçuk malzemesinin $\varepsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1. yükleme-boşaltma verileri.....	92
Şekil 50.	NBR kauçuk malzemesinin 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	93
Şekil 51.	NBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	93
Şekil 52.	NBR kauçuk malzemesinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	94
Şekil 53.	NBR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	95
Şekil 54.	NR kauçuk malzemesinin $\varepsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1. yükleme-boşaltma verileri.....	96
Şekil 55.	NR kauçuk malzemesinin 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	97
Şekil 56.	NR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	99
Şekil 57.	NR kauçuk malzemesinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri	100
Şekil 58.	NR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi	100
Şekil 59.	NR kauçuk malzemesinin ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonraki gerilme - şekil değiştirme hızı ilişkisi.....	101
Şekil 60.	a-n) SBR kauçuk deney numunesinin $\varepsilon = 200$ mm/dak. şekil değiştirme hızında 1-15. yükleme-boşaltma çevrim grafikleri, 0) Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi	103-104
Şekil 61.	SBR kauçuk deney numunesinin $\varepsilon = 200$ mm/dak. şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrim verilerinin karşılaştırılması.....	104
Şekil 62.	SBR kauçuk deney numunesinin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi	105

Şekil 63.	SBR kauçuk deney numunelerinin 15 tekrarlı yükleme sonunda kalıcı deformasyonun yükleme-boşaltma sayısı ile değişimi.....	106
Şekil 64.	SBR kauçuk deney numunelerinin 15 defa yükleme-boşaltma çevrimi sonunda histerezis kayıplarının yükleme boşaltma sayısı ile değişimi	109
Şekil 65.	SBR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 200 \text{ mm/dak}$. şekil değiştirme hızında 10. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi deneysel verilerinin karşılaştırılması.....	109
Şekil 66.	a-d) SBR kauçuk deney numunesinin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi	110
Şekil 67.	SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	110
Şekil 68.	SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	110
Şekil 69.	SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi	111
Şekil 70.	SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi.....	111
Şekil 71.	SBR kauçuk numunenin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	114
Şekil 72.	SBR kauçuk numunenin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	114
Şekil 73.	SBR kauçuk numunenin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	115
Şekil 74.	SBR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerinin birbirleri ile karşılaştırılması.....	115
Şekil 75.	SBR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin birbirleri ile karşılaştırılması.....	116
Şekil 76.	NBR kauçuk numunenin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak}$. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme deneyi	117
Şekil 77.	NBR kauçuk numunenin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak}$. şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrim verilerinin karşılaştırılması.....	118
Şekil 78.	NBR kauçuk numunenin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi.....	119
Şekil 79.	NBR kauçuk numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda, kalıcı deformasyonun tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi	120

Şekil 80.	NBR kauçuk numunenin 15 tekrarlı yükleme sonunda, histerezis kayıplarının tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi.....	121
Şekil 81.	NBR kauçuk numunenin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 10. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması.....	121
Şekil 82.	a-d) NBR kauçuk deney numunesinin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimlerin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi	123
Şekil 83.	NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	124
Şekil 84.	NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	124
Şekil 85.	NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi.....	125
Şekil 86.	NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$ ötelenerek birlikte gösterimi.....	125
Şekil 87.	NBR kauçuk deney numunesinin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri.....	126
Şekil 88.	NBR kauçuk deney numunesinin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri.....	127
Şekil 89.	NBR kauçuk deney numunesinin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri.....	127
Şekil 90.	NBR kauçuk deney numunesinin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerin birbirleri ile karşılaştırılması.....	128
Şekil 91.	NBR kauçuk deney numunesinin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerin birbirleri ile karşılaştırılması.....	128
Şekil 92.	NR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme deneyi.....	130
Şekil 93.	NR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması.....	130
Şekil 94.	NR kauçuk deney numunesinin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi	130
Şekil 95.	NR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda, kalıcı deformasyonun yükleme boşaltma sayısı ile değişimi	132
Şekil 96.	NR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda histerezis kayıplarının yükleme-boşaltma sayısı ile değişimi	133

Şekil 97.	NR kauçuk deney numunesinin $\varepsilon = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 12. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimleri sonundaki deneysel verilerin karşılaştırılması	134
Şekil 98.	a-d) NR kauçuk numunenin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi	135
Şekil 99.	NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	136
Şekil 100.	NBR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi	136
Şekil 101.	NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi.....	137
Şekil 102.	NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi.....	137
Şekil 103.	NR kauçuk numunenin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	139
Şekil 104.	NR kauçuk numunenin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	139
Şekil 105.	NR kauçuk numunenin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri	140
Şekil 106.	NR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması.....	140
Şekil 107.	NR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması.....	141
Şekil 108.	a-d; $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'deki gerilme gevşemesi deneyine ait gerilme-zaman grafikleri, e; Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi.....	144
Şekil 109.	Sabit uzama oranında gerilme-zaman verileri için tanımlamalar	145
Şekil 110.	SBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	146
Şekil 111.	SBR kauçuğuna ait normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi	147
Şekil 112.	SBR kauçuk malzemesinin, uzama oranı $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'deki ön deformasyon prosedürü uygulanmış gerilme-zaman grafikleri.....	148
Şekil 113.	SBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'daki ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	149

Şekil 114. SBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi.....	150
Şekil 115. NBR kauçuk malzemesine, ait $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki gerilme zaman grafikleri.....	152
Şekil 116. NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	153
Şekil 117. Normalize edilmiş NBR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için yükleme başlangıcından itibaren a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi	154
Şekil 118. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri.....	155
Şekil 119. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri	156
Şekil 120. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NBR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi	157
Şekil 121. NR kauçuk malzemesine ait $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri.....	159
Şekil 122. NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	160
Şekil 123. Normalize edilmiş NR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi	161
Şekil 124. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri.....	162
Şekil 125. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri	163
Şekil 126. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi	164
Şekil 127. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 1.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	167
Şekil 128. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	167

Şekil 129. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	168
Şekil 130. SBR, NBR ve NR kauçuklarının $\lambda = 3.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	168
Şekil 131. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 1.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	169
Şekil 132. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	169
Şekil 133. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması	170
Şekil 134. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuklarının $\lambda = 3.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması.....	170
Şekil 135. SBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı grafiği	173
Şekil 136. SBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği.....	173
Şekil 137. SBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi	174
Şekil 138. SBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi	174
Şekil 139. SBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi	175
Şekil 140. SBR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı verileri.....	176
Şekil 141. NBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı grafiği	178
Şekil 142. NBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği.....	178
Şekil 143. NBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi	179
Şekil 144. NBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi	179
Şekil 145. NBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi	180
Şekil 146. NBR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı ilişkisi.....	181

Şekil 147. NR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı ilişkisi	181
Şekil 148. NR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği.....	182
Şekil 149. NR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında gerilme-zaman ilişkisi	182
Şekil 150. NR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında gerilme-zaman ilişkisi	183
Şekil 151. NR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi	184
Şekil 152. NR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı ilişkisi.....	184

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Kauçuk türü malzemelerin ASTM D2000 standartlarına göre tanım aralıkları.....	12
Tablo 2.	Sentetik kauçuk malzemelerinde ilkler.....	14
Tablo 3.	Kauçuk türü malzemeler ve metal malzemelerin genel fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	15
Tablo 4.	SBR, NBR ve NR kauçuk malzemeler ile çelik (metal) malzemenin mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması [52-53].....	16
Tablo 5.	Tek eksenli çekme deney düzeneğinin özellikleri.....	51
Tablo 6.	Deney düzeneği kasnak grupları.....	52
Tablo 7.	SBR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri.....	81
Tablo 8.	NBR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri.....	81
Tablo 9.	NR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri.....	82
Tablo 10.	SBR kauçuğunun, 1.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	85
Tablo 11.	SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\epsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve şekil değiştirme hızlarında 15 tekrarlı yüklemeye için geçen süreler.....	87
Tablo 12.	SBR kauçuğunun, 15.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	88
Tablo 13.	NBR kauçuğunun, 1.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	92
Tablo 14.	NBR kauçuğunun, 15.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	94
Tablo 15.	NR kauçuğunun, 1.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	97
Tablo 16.	NR kauçuğunun, 15.yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri.....	99
Tablo 17.	SBR kauçuk deney numunesinin her bir yüklemeye-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri.....	105

Tablo 18.	SBR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri.....	106
Tablo 19.	SBR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri	108
Tablo 20.	SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme miktarları	113
Tablo 21.	NBR kauçuk numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri.....	118
Tablo 22.	NBR kauçuk numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri.....	119
Tablo 23.	NBR kauçuk numunenin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri.....	120
Tablo 24.	NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme miktarları.....	126
Tablo 25.	NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri	130
Tablo 26.	NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri	132
Tablo 27.	NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri	133
Tablo 28.	NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme miktarları	138
Tablo 29.	SBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri.....	145
Tablo 30.	Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri	149
Tablo 31.	NBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri	152
Tablo 32.	Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri	155
Tablo 33.	NR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri.....	160
Tablo 34.	Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR sentetik kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri.....	162
Tablo 35.	Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve uygulanmamış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin 10. saat sonundaki normalize edilmiş gerilme değerlerinin karşılaştırılması	171
Tablo 36.	SBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda her uzama oranında gerilmenin kararlı hale geldiği değerler.....	175

Tablo 37. NBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değerler	180
Tablo 38. NR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değerler	183
Tablo 39. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemesinin II. gerilme giderici yükleme-boşaltma çevriminde her bir uzama oranında yükleme ve boşaltmadaki gerilmelerin ortalaması	214

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Helmholtz serbest enerji fonksiyonu
BR	: Polibütadien kauçuk
C_{ij}	: Malzeme sabitleri ($i, j = 1, 2, 3$)
CR	: Neopren kauçuk
f	: Kuvvet
f_e	: İç enerjiden kaynaklanan kuvvet
f_s	: Entropiden kaynaklanan kuvvet
H_y	: Histerezis kayıpları
I_i	: Asal doğrultulardaki şekil değiştirme invaryantı ($i = 1, 2, 3$)
IIR	: Butil kauçuk
L	: Numune boyu
N	: Tekrarlı yükleme sayısı
NBR	: Nitril bütadien kauçuk
NR	: Doğal kauçuk
S	: Entropi
SBR	: Stiren-bütadien kauçuğu
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
U	: İç enerji
V	: Hacim
W	: Şekil değiştirme enerji fonksiyonu
W_b	: Malzemenin boşaltma deformasyonu sırasındaki gerilme-uzama oranı eğrisi altında kalan alan
W_y	: Malzemenin yükleme deformasyonu sırasındaki gerilme-uzama oranı eğrisi altında kalan alan
σ	: Mühendislik gerilmesi
σ_i	: Asal doğrultulardaki mühendislik gerilmesi ($i = 1, 2, 3$)
ε	: Şekil değiştirme

- $\dot{\varepsilon}$: Şekil değiştirme hızı
 λ : Uzama oranı
 λ_i : Asal doğrultulardaki uzama oranı ($i = 1, 2, 3$)
 α : Açı (derece cinsinden)
 $\Delta\lambda$: Kalıcı deformasyon

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kauçuk türü malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi konusunda 18. yılında Gough [1] tarafından başlatılan çalışma, günümüzde de artan bir oranda devam etmektedir. Özellikle Manchester şehrinde kauçuk mekaniği ve termoelastisitesi üzerine uzun yıllar boyunca sürdürülen ve halen de devam etmekte olan bilimsel çalışmalar bu alandaki çalışmaların temelini teşkil etmektedir [2].

Kauçuk mekaniği üzerine ilk çalışma Gough [1] tarafından 1805 yılında yapılmıştır. Gough çalışmasında vulkanize edilmemiş doğal kauçuğu üç farklı deneye tabi tutarak, kauçuk malzemenin çekme sırasında ısındığını ve serbest bırakıldığında ise soğduğunu, sabit yük altında malzeme ısıtıldığında boyunun kısaldığını ve kauçuk numune soğuk su içerisinde çekme deneyine tabi tutulduğunda ise kauçuğun geri çekici kuvvetlerini kaybettiğini ve bağıl yoğunluğunun arttığını belirlemiştir.

Gough'tan yaklaşık yarım yüzyıl sonra Joule [3] 1859'da, Gough'un deneylerini tekrar etmiştir. Fakat Joule deneylerinde kauçuk numunesi olarak, Goodyear'ın 1839 yılındaki araştırmasında kullandığı, vulkanize edilmiş kauçuk numune kullanarak numunenin deneyler sırasındaki kristalizasyonunu önlemiştir. Joule, Kelvin'in 1857 yılında termodinamiğin ikinci kanununu kullanarak elde ettiği, katıların tek eksenli çekmedeki termodinamik bağıntısını test etmeyi amaçlamıştır. Joule çalışmasında Gough'un deneylerini doğrulamış ve çok küçük uzamalar haricinde kauçuk numunenin sabit basınç ve sabit numune uzunluğunda tek eksenli deformasyona tabi tutulması durumunda uygulanan kuvvetin, artan sıcaklıkla artacağını ifade etmiştir. Ayrıca Joule daha birçok katı üzerinde yaptığı çalışmalarından, kauçuğun termoelastik özelliğinin diğer tipik katılardan çok farklı olduğunu ve termodinamiksel olarak *kauçuğun çekme işlemine tabi tutulmasının gazların sıkıştırılması ile benzer olduğunu vurgulamıştır.*

Joule'un 1859'da kauçuğun çekme deformasyonunun gazların sıkıştırılması ile benzer özellikler taşıdığını belirtmesinden yaklaşık 75 yıl sonra, 1932 yılında Meyer, von Susich ve Valko [4] kauçuk elastisitesinde *kinetik teoriyi* önererek kauçuk türü malzemelerin elastik davranışlarını gazların sıkıştırılmasına benzer bir teoriyle modellemeye

çalışmışlardır. Ayrıca kauçuk türü malzemelerin makromoleküler yapıda oldukları ve kauçuğun elastik özelliklerinin moleküler yaklaşımla ifade edilebileceğini belirtmişlerdir.

1940 yılına kadar araştırmacılar kauçuk türü malzemeler için uygulanan kuvvet, uzama ve sıcaklık arasındaki ilişkileri deneysel olarak araştırmışlardır. 1940'lı yıllarda kauçuk termoelastisitesinde, termodinamiğin 1. ve 2. yasaları ve Helmholtz Serbest Enerji Fonksiyonunu kullanılarak malzemeye uygulanan kuvvetin termodinamik bağıntısını

$$f = \left(\frac{\partial A}{\partial L} \right)_{V,T} = \left(\frac{\partial U}{\partial L} \right)_{V,T} - T \left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)_{V,T} \quad (1)$$

şeklinde elde edilmiştir [5-6]. Burada, f kuvvet; A Helmholtz Serbest Enerji Fonksiyonu, V hacim, T sıcaklık, U iç enerji, S entropi ve L , numune boyudur. f kuvvetini, iç enerjiden (f_e) ve entropiden (f_s) kaynaklanan kuvvet olarak ikiye ayırarak, kuvveti

$$f = f_e + f_s \quad (2)$$

ile ifade etmişlerdir. (1) ve (2) denklemlerinin düzenlenmesiyle de

$$\frac{f_e}{f} = 1 - \frac{T}{f} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_{V,L} \quad (3)$$

bağıntısını elde edilmiştir. Bu denklemin elde edildiği 1930-1940'lı yıllardan 1990'lı yıllara kadar, malzemeye uygulanan kuvvetin ne kadarının iç enerjiden ve ne kadarında entropi teriminden kaynaklandığı üzerine araştırmalar devam etmiştir [7]. Esasen kinetik teori, iç enerjiden kaynaklanan kuvvetin olmadığı kabulü üzerine kurulmuştur [5]. Ancak 1940-1990'lı yıllar arasında yapılan çalışmalar iç enerjiden kaynaklanan terimin sıfır olmadığını ve yapılan deneyler sonunda malzemeye uygulanan kuvvetin % 10-20'lik bir kısmının iç enerjiden kaynaklandığını ortaya koymuştur [8]. Esasen tüm bu çalışmalar kauçuk türü malzemelerin termoelastik bünye denkleminin elde edilebilmesi için yapılmıştır. Fakat kauçuğun entropik davranış yanında enerjik davranış ta göstermesi, kauçuk türü malzemeler için termoelastik bünye denkleminin ele edilmesini zorlaştırmıştır.

Chadwick ve Creasy'in [9-10], 1974 yılındaki, modifiye edilmiş entropi teorisi çalışmalarına kadar kauçuk türü malzemelerin termoelastik davranışı entropik elastisite teorisi ($f_e = 0$) ile modellenmeye çalışılmıştır. Kauçuk türü malzemelerin farklı sıcaklıklardaki deformasyon deneyleri genellikle, kolaylığı sebebiyle, tek eksenli çekme deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, 1992 yılında, Ogden kauçuk termoelastisitenin geliştirilebilmesi için farklı sıcaklıklarda yapılmış iki eksenli çekme deneysel verilerine ihtiyaç olduğunu belirtmiştir [11].

1940'lı yıllardaki bir grup araştırmacı, yukarıda ifade edildiği üzere, kuvvet, sıcaklık ilişkisini incelerken, bir grup araştırmacı da kauçuk türü malzemelerde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi, yani bünye denklemlerini, araştırmışlardır. Bu konuda ilk çalışma 1944 yılında Treloar [12] tarafından yapılmış ve bunu 1948 yılında Rivlin'in yaptığı bir dizi çalışma [13-20] izlemiştir. Rivlin kauçuk türü malzemelerde mühendislik gerilmesi (σ) ile mühendislik şekil değiştirmesi (ε) arasındaki bağıntının şekil değiştirme enerji fonksiyonu, W , ile ifade edilebileceğini belirterek

$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (4)$$

şekil değiştirme enerji fonksiyonunu seriye açılım formunda önermiştir. Burada I_i , terimleri asal doğrultudaki uzama oranları (λ_i) cinsinden ifade edilen

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

şekil değiştirme invariantlarıdır. Böylece, Rivlin, şekil değiştirme enerji fonksiyonunun şekil değiştirme invariantlarının fonksiyonu olduğunu belirtmiştir.

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (6)$$

Kauçuk türü malzemelerin sıkıştırılmaz olduğu düşüncesiyle de

$$I_3 = 1 \quad (7)$$

ifadesinin (6) denkleminde yerine yazılmasıyla, sıkıştırılmaz malzemeler için şekil değiştirme enerji fonksiyonunu

$$W = (I_1, I_2) \quad (8)$$

şeklinde ifade etmiştir. Rivlin'in önerisinin aksine, önce 1961 yılında Carmichael ve Holdaway [21] daha sonra ise 1967 yılında Valanis ve Landel [22] şekil değiştirme enerji fonksiyonunun asal doğrultulardaki uzama oranlarının fonksiyonu olması gerektiğini belirtmişlerdir.

$$W = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (9)$$

1972 yılında Ogden, (9) denkleminde belirtilen formdaki, en yaygın olarak kullanılan, şekil değiştirme enerji fonksiyonunu önermiştir [23-24].

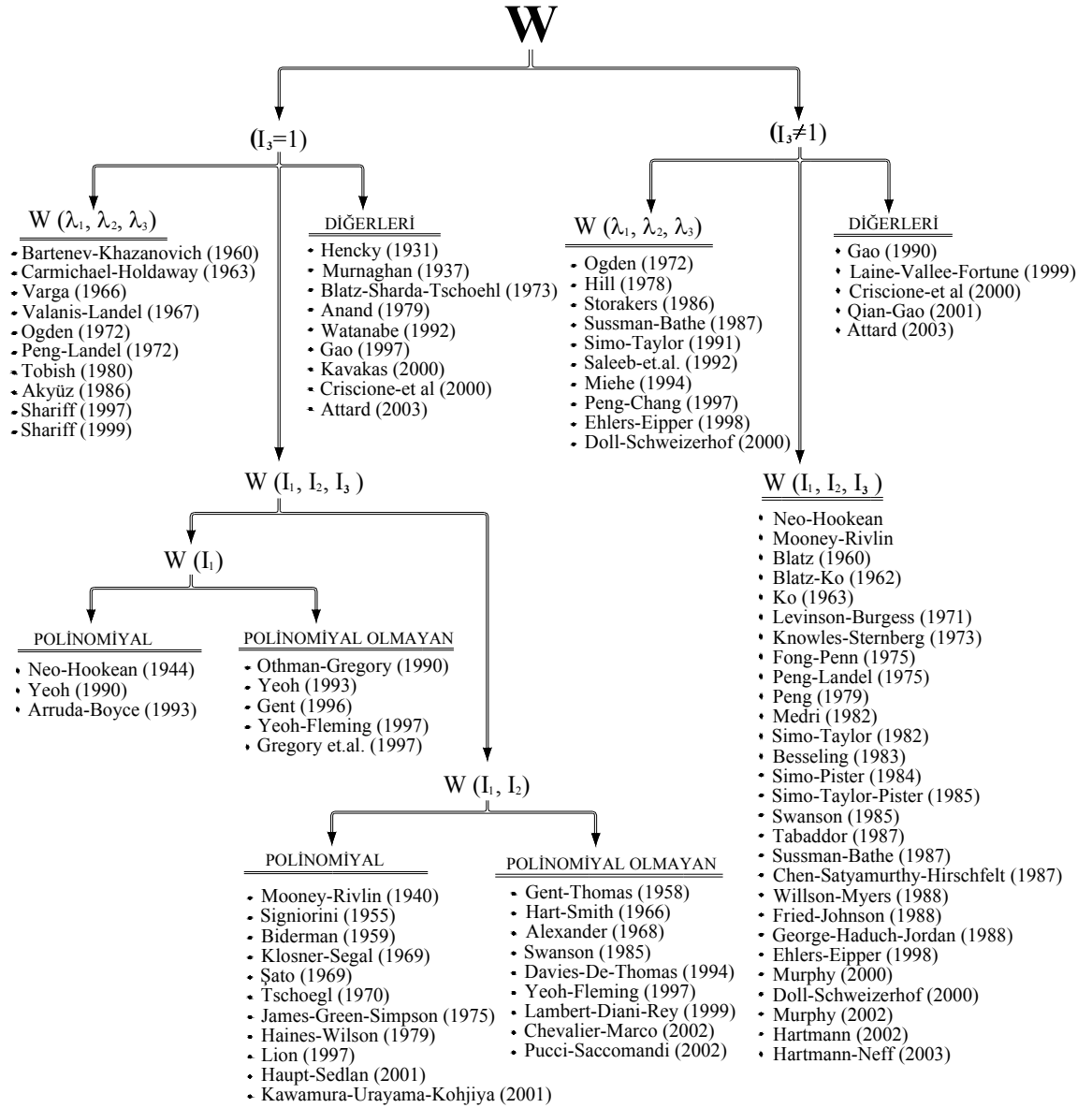
Bazı araştırmacılar ise hem (6) hem de (9) denklemlerindeki formlardan ayrı olarak ya farklı şekil değiştirme tanımlaması ya da farklı şekil değiştirme invariant tanımlaması kullanarak çeşitli şekil değiştirme enerji fonksiyonları önermişlerdir [25]. Bu konudaki çalışmalar günümüzde de devam etmekte olup, araştırmacıların hedefi en basit formdaki gerilme şekil değiştirme bağıntısı elde etmektir. Literatürde yer alan ve bu amaca yönelik çalışmaların özeti Şekil 1'de verilmiştir [26].

Kauçuk türü malzemelerin, bir yandan termoelastik özellikleri bir yandan da gerilme-şekil değiştirme bağıntıları incelenirken, kauçuk malzemeleri doğru bir şekilde modelleyebilmek için malzemenin özelliklerinin zamanla değişiminin yani vizkoelastik özelliklerinin de incelenmesi gerekmektedir. Kauçuk türü malzemelerin, özellikle de karbon siyahı katkı maddesi katılmış olan malzemelerde, mekanik ve termal özelliklerinin modellenmesi sırasında elastik olmayan davranış sergiledikleri deneysel olarak da gözlemlenmektedir [27]. Kauçuk türü malzemelerin bu inelastik karakterli özellikleri, aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

1. *Gerilme Gevşemesi*: Kauçuk türü malzemelerin sabit deformasyon altında gerilmenin zamanla azaldığı gözlenmiş ve kauçuk türü malzemelerin bu davranışı, literatürde *gerilme gevşemesi*” olarak adlandırılmıştır.
2. *Sünme*: Kauçuk türü malzemelerin sabit kuvvet altında, malzeme boyunun zamanla arttığı gözlenmiş ve bu davranış, literatürde, *sünme* veya *sürünme* olarak adlandırılmıştır. Esasen hem gerilme gevşemesi hem de sünme davranışı, metallerde yüksek sıcaklıklarda görülmekle birlikte kauçuk türü malzemelerde oda sıcaklıklarında da görülmektedir.
3. *Mullins Etkileri*: Kauçuk türü malzemelerin tekrarlı yüklemeye tabi tutulması durumunda yani malzeme belirli bir deformasyona kadar deforme edilip ilk hale geri dönülse ve aynı yükleme-boşaltma çevrimi tekrar edilmesi durumunda birinci gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ikincisinden farklı olduğu ve artan yükleme ve boşaltma deformasyonlarında malzemenin elastikiyetinin giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Literatürde bu davranış *gerilme yumuşaması* veya *Mullins etkileri* olarak adlandırılmıştır.
4. *Histerezis*: Kauçuk türü malzemelerin deformasyonları sırasında gerilme-şekil değiştirme diyagramında yükleme eğrisi ile boşaltma eğrisi arasında farklılık olduğu deneysel olarak gözlemlenmektedir. Bu davranış *histerezis* olarak tanımlanmaktadır.
5. *Kalıcı Deformasyon*: Kauçuk türü malzemeler belirli bir boya kadar deforme edilip serbest bırakıldığında numune boyunda uzama olduğu gözlemlenmektedir. Malzemedeki bu uzama ise *kalıcı deformasyon* olarak adlandırılmaktadır.
6. *Şekil Değiştirme Hızı*: Kauçuk türü malzemelerin deformasyonu sırasında malzemeye uygulanan şekil değiştirme hızı malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini dolayısıyla da malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir.
7. *Kristalizasyon*: Kauçuk türü malzemelerin, ya numunenin soğutulmasıyla ya da numunenin deformasyonu (çekilmesi) sırasında, içyapısı değişmekte ve malzeme yapısı kristalize olmaktadır. Literatürde bu davranış *kristalizasyon* olarak tanımlanmaktadır. Ancak SBR (stiren-bütadien kauçuk), NBR (nitril bütadien kauçuk) gibi bazı kauçuk malzemeler deformasyon sırasında kristalize olmamaktadır.

Yukarıda tanımlanan tüm inelastik özellikler kauçuğun gerilme-şekil değiştirme davranışının modellenmesini zorlaştırmaktadır. Esasen teorik ve deneysel çalışmalarla gelinmek istenen nokta; tüm bu inelastik özellikleri kapsayan bünye denklemlerini ifade

eden tek bir malzeme modelinin ortaya konulmasıdır. Bu amaçla araştırmacılar tüm bu özellikleri tek tek incelemekte ve bu özelliklerin dahil edildiği modeller elde etmeye çalışmaktadırlar. Bu amaçla 1999 yılından itibaren Avrupa’da iki yılda bir olmak üzere, kauçuk malzemeler için yapılan çalışmaları tartışmak amacıyla konferans düzenlenmeye başlanılmıştır [28-31].



Şekil 1. Kauçuk türü malzemeler için önerilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarının sınıflandırılması [26].

1.2. Kauçuk Türü Malzemeler

Genel anlamda, gereksinim duyulan maddelerin tümüne *malzeme* denilmektedir. Malzemeler ise literatürde organik, organik olmayan veya metalik, metalik olmayan gibi birçok sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Malzemeleri en genel anlamda katı, sıvı ve gaz olarak sınıflandırmak mümkündür. Mühendislikte daha çok kullanılan katı malzemeler ise genel olarak kendi aralarında dört gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar; metal, seramik, polimer ve kompozit malzemelerdir.

Polimerler, üretimlerinin belirli bir aşamasında plastik kıvam aldıklarından ve bir kalıba enjekte edilerek kolaylıkla biçimlendirilebildiklerinden endüstride plastikler olarak da isimlendirilmektedirler [32]. Polimerik malzemeler, hafif olmaları ve kolay işlenebilmeleri nedeniyle son zamanlarda önemli bir mühendislik malzemesi haline gelmişlerdir. Polimer, tanım olarak, küçük ve basit bir kimyasal birim olan monomerlerin polimerizasyon reaksiyonları sonucunda birbirlerine bağlanmasıyla oluşmuş büyük bir moleküldür. *Makromolekül* olarak da adlandırılır. Bu nedenle de bu malzemelere latince poli=çok, meros=parça anlamına gelen iki kelimenin birleşmesiyle *Polimer* adı verilmiştir. Büyük moleküllerden oluşan polimerlerin mekanik davranışları önemli ölçüde molekül yapılarına bağlıdır. Molekül yapıda kovalent bağların yayılışına göre polimerler, *Lineer Polimerler* ve *Uzayağı Polimerler* olmak üzere iki grupta toplanabilir. Polimerlerin, polimerize olabilmesi için bir monomer molekülünün iki ya da daha fazla fonksiyonu olması gereklidir. Bunun anlamı, molekülün iki veya daha fazla reaktif gruplara (hidroksil, amino asidi, di- veya poli-alkol, di-amino asidi gibi) sahip olmasıdır. İki fonksiyonlu monomerde reaktif gruplar, molekülün iki ucunda yer alır. Bunlar birbirlerine kovalent bağlarla eklenerek Şekil 2'de görüldüğü gibi uzun bir zincir meydana getirirler. Bu durum zincirlere bir doğrultuda hareket kolaylığı verir. Bu tür polimerlere molekül dizilişinden dolayı *Lineer Polimerler* denir. Zincir doğrultusundaki bağlar kuvvetli bağlar olduğu halde, yanal doğrultudaki muhtelif zincirler birbirlerine ancak ikinci derecede zayıf çekim kuvvetleri ile bağlıdırlar.

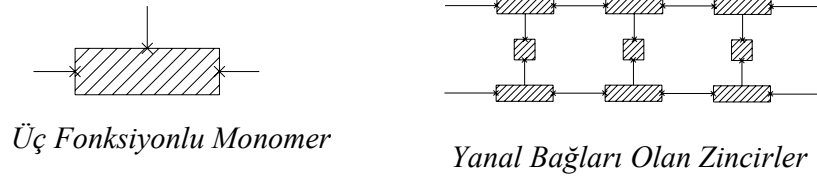
Polimerizasyon sırasında bazı yan kollar da teşekkül edebilir. Böylece dallı zincirler meydana gelebilir. Bu tip dallı zincirlerin hareket kabiliyetleri düz zincirlere kıyasla azalır. Eğer monomerler daha fazla reaktif gruplara sahip iseler bunların polimerizasyonu sonucunda Şekil 3'de görüldüğü gibi üç boyutlu ağ doğar. Bu ağdaki yanal bağlar,

zincirlerin hareketlerini tamamen imkansızlaştırırlar. Bu tür polimerlere ise *Uzayağı Polimerleri* denir [33].



Şekil 2. İki fonksiyonlu monomerler

Lineer polimerlerle uzayağı polimerler arasında bir yapıya sahip olan *Elastomerler* ise, bükülmüş ve topak şeklinde dolanmış uzun molekül zincirlerinden oluşur. Kuvvet etkisi ile bu topakların açılması ve bağ dönmesi sonucu, büyük ölçüde tersinir davranış (yani elastik şekil değişimi) gösterdiklerinden, bu malzemelere *Elastomerler* denilmektedir. Endüstride Elastomerler, sıcaklık etkisiyle davranış yönünden de, *Termoplastik ve Termoset Elastomerler* olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar [34].



Şekil 3. Üç fonksiyonlu monomerler

Termoplastik elastomerler, lineer polimerler olup sıcaklıkları artınca yumuşarlar, soğutulunca sertleşirler ve yeniden ısıtıldıklarında tekrar yumuşarlar (Yanal bağların zayıflığı dolayısı ile). Termoset elastomerler ise uzayağı polimerleri olup, ısıtıldıklarında yumuşarlar. Bu nedenle hepsine birden plastik adı verilir. Sıcakken şekil verilip soğutulduktan sonra sertleşirler (Yanal bağlar doğmasından dolayı). Ancak termoplastiklerin aksine yeniden ısıtıldıklarında (çok yüksek sıcaklıklar dışında) tekrar yumuşamazlar. Çünkü bunların yanal bağları da kuvvetli bağlardır [32].

ASTM D1418 standartlarına göre de termoset elastomerler M, Q, U, R sınıflandırılmasına tabi tutulmuştur [35]. Tüm bu sınıflar kauçuk veya kauçuk-türü malzemeler olarak adlandırılan malzemelere karşılık gelmektedirler (Şekil 4).

Kauçuk, bazı tropik bitkilerin sütümsü öz suyundan (*lateks*) doğal halde ya da petrol ve alkolün bileşimlerinden suni olarak elde edilen bir malzemedir. Esasen kauçuk terimi normalde *Hevea Brasiliensis* ağacından elde edilen malzemeye karşılık gelmekte olup, günümüzde ise bu terim ASTM standartlarıncı, uygulanan kuvvetin serbest bırakılmasıyla tekrar eski konumuna geri dönebilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır [36].

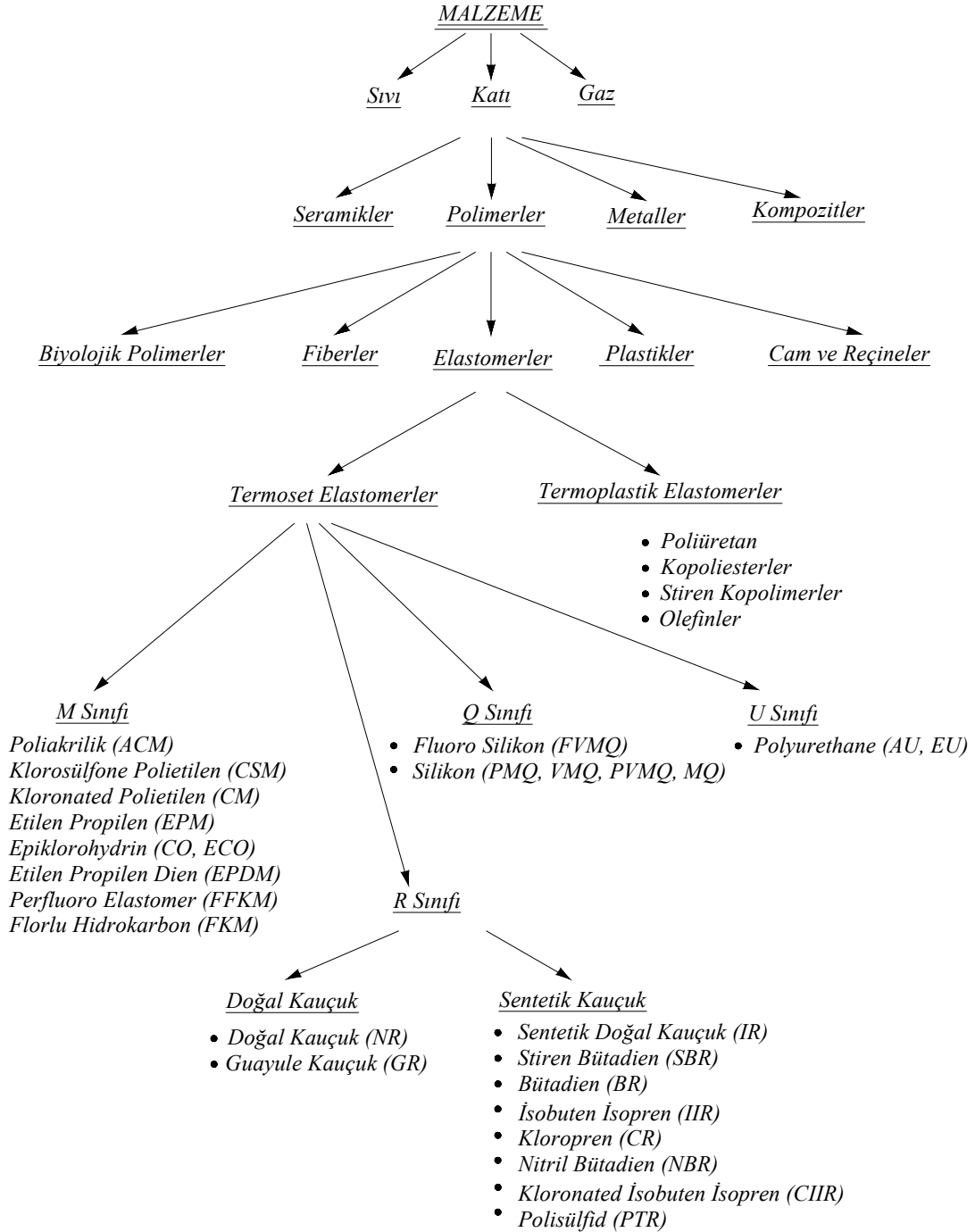
1839 yılında Charles Goodyear'ın vulkanizasyon işlemini bulmasına kadar termoplastik elastomer olarak tanımlanan kauçuk türü malzemeler vulkanizasyon işleminin uygulanmasıyla *Termoset Elastomer* grubuna dahil edilmiştir [37]. Günlük kullanımda ise kauçuk türü malzemeler doğal ve sentetik kauçuk olarak ikiye ayrılmaktadır. Bitkilerden doğal olarak elde edilen kauçuklar dışındaki tüm kauçuklar günlük kullanımda sentetik kauçuk olarak adlandırılmaktadır.

Polimerlerin elde edilişleri *eklenme* (zincir veya katılma), *kondansasyon* (basamaklı), veya *ko-polimerizasyon* yöntemlerinden biri ile yapılır. Bu yöntemlerden biri ile elde edilebilen polimerlere şekil verilmesi kalıplama, presleme, haddeme gibi, metallere benzer işlemlerle yapılır.

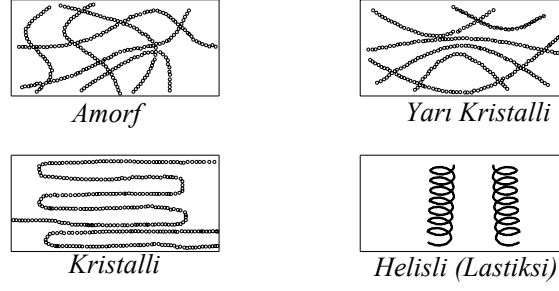
Polimer moleküllerinin birbirlerine göre yerleşme şekilleri, Şekil 5'de görüldüğü gibi amorf veya kristalli yapılara yol açmaktadır. Tamamen gelişigüzel yerleşme amorf durumdur. Buna karşılık zincirlerin paralel yönelmeleri kristalli durumdur. Kristalli durumda moleküller birbirine göre daha sıkı bir şekilde yaklaşmış oldukları için moleküller arasındaki çekim kuvvetleri artmıştır. Bu da sertliğin, rijidliğin, mukavemetin, birim ağırlığın artmasına sebep olmaktadır. Bir polimer hiçbir zaman tam kristalli olmamakta, içinde yer yer amorf ve kristalli bölgeler bulunmaktadır. Tam kristalli olması, çok gevreklediği için, zaten istenmemektedir.

Moleküler yapıları açısından elastomerler, gayrimuntazam helisler şeklinde uzun helezonlu zincirleri bulunan polimerlerdir. Helezonlu zincirler gelişigüzel yerleşmişlerdir ve polimer amorfudur. Fakat böyle bir polimer kuvvet altında şekil değiştirince helezonlar açılarak birbirlerine paralelleşir ve polimer kristalleşir, molekülleri arasındaki bağlar artar ve malzeme sertleşir. Kuvvet kaldırılacak olursa, yapı eski şekline geri döner. Ancak şekil değiştirme sırasında helezonlarda birbirlerine kıyasla kaymalar olursa yapı eski şekline tam dönemez ve malzemede kalıcı şekil değiştirme olur. Doğal kauçukta meydana gelen bu kayma olayını önlemek için kükürtle yakmak, yani *vulkanizasyon* ile helezonlar arasında bir miktar yanıl bağ kurmak, metodu geliştirilmiştir. Eğer vulkanizasyon çok ileri götürülecek olursa kauçuğun yumuşaklığı tamamen kaybolur ve sert lastik (ebonit) elde

edilir [38]. Eğer zincirler bir doğrultuya paralel olarak yönlendirilirse lif veya iplikler elde edilir. Bu tip polimerlerde ipliklerin çekilmesi yolu ile *kristalleşme* olur ve özellikler iplik doğrultusunda yükselir. Fazla sertleşmelerini ve fleksibilitelerini kaybetmelerini önlemek için de, içlerine bir miktar amorf kısım, veya moleküller arası çekim kuvvetlerini azaltıcı (plastikleştirici) madde katılır.



Şekil 4. Kauçuk türü malzemelerin sınıflandırması



Şekil 5. Polimerlerin molekül yapıları

Polimerleri uzun süreli yüklemeye, zincirlerin birbirini üzerinde kaymaları sonucunda viskoz şekil değiştirmeler meydana gelir. Metallerde yüksek sıcaklıklarda kendini gösteren süne ve gevşeme olayları polimerlerde normal sıcaklıkta kendisini gösterir. Bir polimer; camsı malzemenin, gevrek katı bir malzemenin, elastik kauçuğun veya viskoz sıvının tüm özelliklerini uygulanan sıcaklığa ve ölçüm zamanına bağlı olarak gösterebilir. Bu nedenle polimerler genellikle *vizkoelastik malzeme* olarak tanımlanırlar. Bu terim viskoz sıvı ve elastik katı durumlarında bulunabilen polimerin genel bir tanımlamasıdır [39].

Günümüzde kauçuk türü malzemelerin sınıflandırılmasına yönelik olarak ASTM tarafından hazırlanan üç standart literatürde ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

1. *ASTM D1418-Rubber and Rubber Lattices-Nomenclature*: Bu standart var olan kauçukları kimyasal bileşimlerine göre tanımlamakta ve sınıflandırmaktadır [35].
2. *ASTM D1566-Standart Definitions of Terms Relating to Rubber*: Bu standart kauçuk imalatçıları ve tasarımcılarının aralarındaki iletişimin kurulması amacıyla hazırlanmıştır [40].
3. *ASTM D2000-Standart Classification System for Rubber Parts in Automotive Applications*: Bu standart ismi itibarıyla sadece otomobillerde kullanılan kauçuk malzemeleri kapsasa da hazırlanış itibarıyla tüm kauçuk malzemeleri kapsamaktadır. Ayrıca bu standart, uygulamada, diğer iki standarttan daha fazla kullanılmaktadır [41].

ASTM D2000 standardı (Bu aynı zamanda SAE J200 standardı ile aynıdır) kauçuk malzemeleri karakteristik özelliklerine göre sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırmada kauçuk *Tip* ve *Sınıf* olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Burada tip, kauçuğun ısıl yaşlanmaya (heating aging) karşı, sınıf ise kauçuğun yağ içinde şişmeye karşı gösterdiği dirence göre tanımlanmıştır. Yani ASTM D2000 ve SAE J200 standartları kauçuğun

termal ve yağ emme testlerindeki performanslarına göre tanımlanmaktadır. Termal test ile kauçuğun maksimum servis sıcaklığı belirlenmekte ve sınıflandırma 70-275 °C sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Burada 70 °C A terimine, 275 °C ise J terimine karşılık gelmekte olup bu iki sıcaklığın arasına tekabül eden servis sıcaklıkları da A ile J harfi arasında kalan harflere tekabül etmektedir (Tablo 1). Böylece elde edilen terim malzemenin tipini tanımlamaktadır. Yağ emme testinde ise, kauçuk ASTM standartlarında tanımlanan yağ içinde bekletilerek maksimum yağ emme miktarı belirlenmektedir. Bu ise A-K harf aralığında tanımlanmaktadır (Tablo 1). Elde edilen bu terimde malzemenin sınıfını oluşturmakta olup bu iki terimin önce tip sonra sınıf teriminin yan yana yazılmasıyla da kauçuk malzemenin ASTM D2000 standartlarına göre ismi elde edilmektedir. Örneğin ASTM D2000 standartlarına göre AK ile tanımlanan kauçuk, 70 °C'de kullanılabilen ve %10'dan fazla hacimsel şişmeye maruz kalmayan malzemeler olarak tanımlanmıştır.

Tablo 1. Kauçuk türü malzemelerin ASTM D2000 standartlarına göre tanım aralıkları

<i>Tip</i>	<i>Test Sıcaklığı</i>	<i>Sınıf</i>	<i>Hacimsel Şişme (max. %)</i>
<i>A</i>	<i>70</i>	<i>A</i>	<i>Sınırlama Yok</i>
<i>B</i>	<i>100</i>	<i>B</i>	<i>140</i>
<i>C</i>	<i>125</i>	<i>C</i>	<i>120</i>
<i>D</i>	<i>150</i>	<i>D</i>	<i>100</i>
<i>E</i>	<i>175</i>	<i>E</i>	<i>80</i>
<i>F</i>	<i>200</i>	<i>F</i>	<i>60</i>
<i>G</i>	<i>225</i>	<i>G</i>	<i>40</i>
<i>H</i>	<i>250</i>	<i>H</i>	<i>30</i>
<i>J</i>	<i>275</i>	<i>J</i>	<i>20</i>
		<i>K</i>	<i>10</i>

Avrupalıların, 16. yüzyılın başlarında tanıştıkları doğal kauçuk, ancak 19. yüzyılın ortalarına doğru Charles Macintosh, Thomas Hancock ve Charles Goodyear gibi araştırmacı ve girişimcilerin özel gayret ve keşifleriyle günlük yaşamın ayrılmaz bir mühendislik malzemesi olmuştur [42]. Özellikle Charles Goodyear'ın 1840 yılında tesadüfen vulkanizasyon işlemini bulması kauçuğun soğukta sertleşmesi ve sıcakta yumuşayarak yapışkan hale gelmesi gibi olumsuz özellikleri giderilerek kauçuk alanında teknolojik çalışmaların başlamasına sebep olmuştur [43-48]. I. ve II. Dünya savaşları

sırasında doğal kauçuk plantasyonlarının ambargo altına alınması, özellikle Almanya, Rusya ve Amerika'da, sentetik kauçuk üretim çalışmalarına ağırlık verilmesine sebep olmuştur. Sonuçta günümüzde kullandığımız bir çok sentetik kauçuk malzemeler savaş yıllarındaki, özellikle II. Dünya Savaşı sırasındaki, ihtiyaca binaen elde edilmiştir (Tablo 2) [49-50].

Genel mühendislik eğitimlerinde vazgeçilmez mühendislik malzemesi metallerdir. Eğitimlerde temel bilgiler hep metaller üzerine kuruludur. Bu sebeple kauçuğun mekanik ve termal özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Tablo 3'de, kauçuk türü malzemeler ve metal malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir. Metal malzemeler için lineer bölgedeki davranış esas alınmış olup fiziksel değerler için ortalama değerler sunulmuştur. Tablo 4'de ise SBR, NBR ve NR (doğal kauçuk) kauçuk malzemeleri ile metal malzemelerin (St 70) mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması sunulmuştur.

1.3. Kauçukların Mekanik Deneyleri

Kauçuk mekaniği üzerine çalışma yapan araştırmacılar matematiksel formda şekil değiştirme enerji fonksiyonunu elde ettikten sonra bu fonksiyon içerisinde yer alan malzeme sabitlerini deneysel olarak belirlemeye çalışmışlardır. Kauçuk mekaniğinde numunelerin *safi homojen deformasyona* maruz kalması sağlanarak deneylerin, dolayısıyla da ölçümlerin, daha kolay yapılması amaçlanmıştır. Böylece numuneye uygulanan kuvvetler numunenin tüm noktalarında aynı deformasyona dolayısıyla da aynı miktarda uzamaya sebep olacağından numunenin uygulanan yük altında şekil değiştirme ölçümleri daha basit olmaktadır [56, 39]. Literatürde kauçuk türü malzemeler için çekme, basma ve kayma deneyleri safi homojen deformasyonu oluşturacak şekilde yapılmıştır. Burulma ve çekmeli burulma deneyleri ise homojen olmayan deformasyonlar olarak yapılmıştır. Literatürde yer alan birçok deneysel çalışma standart olmayan çekme hızlarında ve numune boyutlarında gerçekleştirilmiştir [57]. Bu deneyler içerisinde en basit ve de en yaygın olarak kullanılan ise tek eksenli çekme deneyidir. Bunu yanında tek eksenli basma, iki eksenli çekme ve basma, burulma ve kayma deneyleri de yapılmaktadır. Literatürde yer alan, kauçuk-türü malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deney türleri diyagram halinde Şekil 6'da verilmiştir [58].

Tablo 2. Sentetik kauçuk malzemelerinde ilkler

Ticari İsmi veya Marka ismi	ASTM I418	Kimyasal İsmi	İlk Üretildiği Yıl	İlk Üretildiği Ülke	İlk Üreten Kişi	İlk Üretici Firma
Doğal Kauçuk	NR	Doğal İsopren	—	—	—	—
Metil Kauçuk	—	Dimetilbütadien	1915	Almanya	Fritz Hofman	Bayer & Co.
Thiokol	PTR	Polisülfid	1922	A.B.D.	Joseph C. Patrick	Thiokol Corporation
Üretan	BG	Poliester	1930	—	Otto Bayer	—
Neopren	CR	Kloropren	1931	A.B.D.	Arnold Collins	Du Pont Corporation
GRS veya Buna-S	SBR	Stiren Bütadien	1933	Almanya	Eduard Tschunkur ve Walker Bock	I.G. Farben
Nitril veya Buna-N	NBR	Nitril Bütadien	1934	Almanya	Eric Kondrad ve Eduard Tschunkur	I.G. Farben
Butil	IIR	İsobuten İsopren	1937	A.B.D.	Robert M. Thomas ve William Joseph Sparks	Standart Oil Development Comp.
Silikon	VMQ, PVMQ, MQ, PMQ	Polisiloksan	1944	A.B.D.	—	Dow Corning Corporation ve General Electric Company
Akrilik	ACM, ANM	Poliakrilat	1948	A.B.D.	—	B.F. Goodrich Corporation
Hypalon	CSM	Klorosülfone Polietilen	1955	A.B.D.	—	Du Pont Corporation
Sentetik Doğal Kauçuk	IR	İsopren	1956	A.B.D.	F.W. Staveley Samuel Emmet Horne, Jr.	Fire Stone Tire and Reserach Co. B.F. Goodrich Corporation
Fluorokarbon	FKM	Florlu Hidrokarbon	1956	A.B.D.	—	Du Pont Corporation
Polibütadien	BR	Bütadien	1961	—	—	—
EPDM	EPDM	Etilen-Propilen Dien Monomer	1963	—	—	—
Vamac	—	Etilen / Akrilik	—	A.B.D.	—	Du Pont Corporation

Tablo 3. Kauçuk türü malzemeler ve metal malzemelerin genel fiziksel ve kimyasal özellikleri

KAUÇUK		METAL
AMORF YAPILIDIR.	⇔	KRİSTAL YAPILIDIR.
⇓		⇓
SIKIŞTIRILAMAZ BİR MALZEMEDİR. ($v \approx 0.5$)	⇔	SIKIŞTIRILABİLİR BİR MALZEMEDİR. ($v \approx 0.3$)
⇓		⇓
NON-LİNEER DAVRANIŞ GÖSTERİR.	⇔	LİNEER DAVRANIŞ GÖSTERİR.
⇓		⇓
DEFORMASYON İLE BİRLİKTE İÇ ENERJİ DEĞİŞMEZ.	⇔	DEFORMASYON İLE BİRLİKTE ENTROPİ DEĞİŞMEZ.
⇓		⇓
DEFORMASYON SIRASINDA TOPLAM GERİLME, ENTROPİ DEĞİŞİMİNDEN MEYDANA GELİR.	⇔	DEFORMASYON SIRASINDA TOPLAM GERİLME, İÇ ENERJİ DEĞİŞİMİNDEN MEYDANA GELİR.
⇓		⇓
TERMODİNAMİK AÇIDAN ENTROPİKTİR.	⇔	TERMODİNAMİK AÇIDAN ENERJİTİKTİR.
⇓		⇓
KAUÇUK ÇEKİLMESİ ESNASINDA ISINIR.	⇔	METAL ÇEKİLMESİ ESNASINDA SOĞUR.
⇓		⇓
SABİT YÜK ALTINDA ISITILIRSA KISALIR, SOĞUTULURSA UZAR.	⇔	SABİT YÜK ALTINDA ISITILIRSA UZAR, SOĞUTULURSA KISALIR.
⇓		⇓
BÜYÜK ELASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ (600 %)	⇔	KÜÇÜK ELASTİK ŞEKİL DEĞİŞİMİ (0.02 %)
⇓		⇓
KOMPLEKS HASAR SÖZ KONUSUDUR.	⇔	PLASTİK DEFORMASYON SÖZ KONUSUDUR.
⇓		⇓
ÇEKME VE BASMA DURUMLARINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞ FARKLIDIR.	⇔	ÇEKME VE BASMA DURUMLARINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞ AYNIDIR.
⇓		⇓
ODA SICAKLIKLARDA İNELASTİK DAVRANIŞ GÖSTERİR (SÜNME, GERİLME GEVŞEMESİ, HİSTEREZİS, MULLINS ETKİLERİ, KALICI DEFORMASYON). VİZKOELASTİK BİR MALZEMEDİR	⇔	YÜKSEK SICAKLIKLARDA İNELASTİK DAVRANIŞ GÖSTERİR (SÜNME, GERİLME GEVŞEMESİ, HİSTEREZİS)

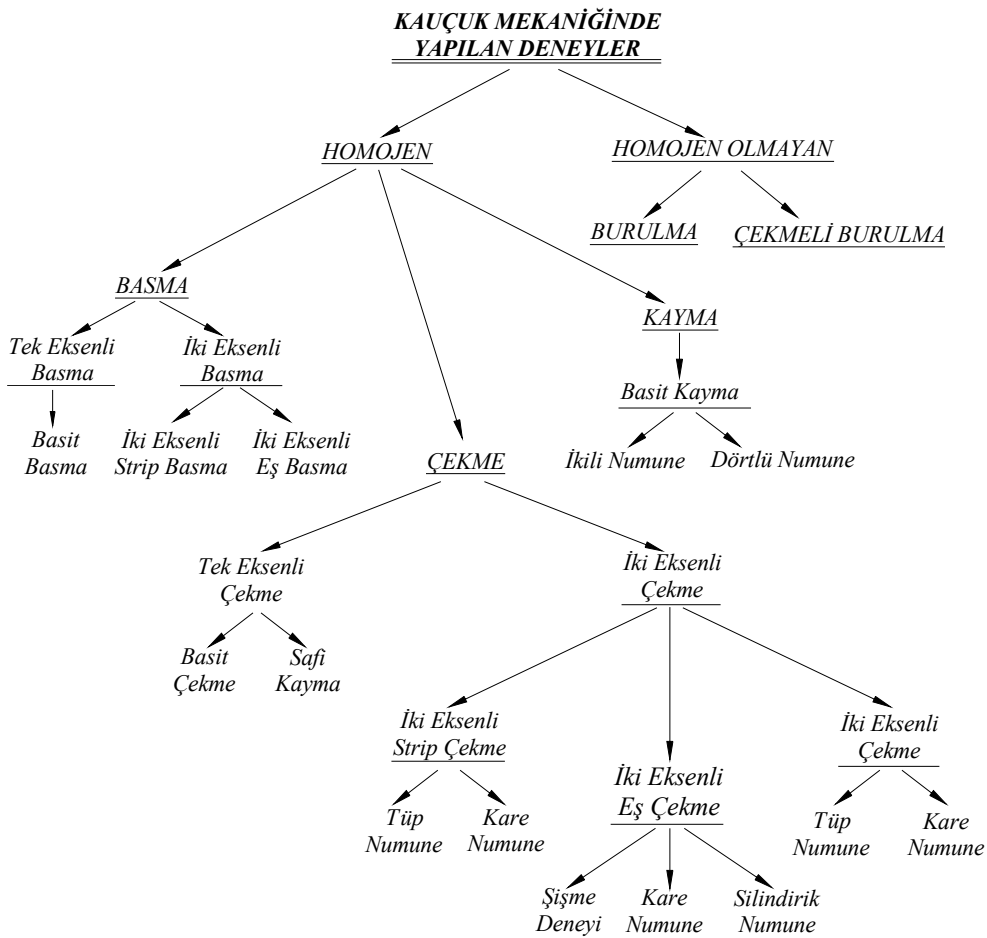
Tablo 4. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemeler ile çelik (metal) malzemenin mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırılması [51-55].

ÖZELLİKLER	SBR	NBR	NR	ÇELİK (St 70)
Yoğunluk (kg/m ³)	1130 ¹	1140 ²	1210 ³	7850
Kopma Gerilmesi (MPa)	28.1 ¹	22.1 ²	22.1 ³	630
Kopma Uzaması (%)	440 ¹	330 ²	490 ³	8-11
Poisson Oranı (ν)	0.5	0.5	0.5	0.30
Isıl İletkenlik (W/m.K)	0.25	0.28	0.14	55
Özgül Isı (kJ/kg.K)	1.9	1.97	1.9	0.46
Lineer Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ m/m.K)	250	260	220	11

¹ 100 birim karışımında 50 birim karbon siyahı katkı maddesi vardır.

² 100 birim karışımında 60 birim karbon siyahı katkı maddesi vardır.

³ 100 birim karışımında 50 birim karbon siyahı katkı maddesi vardır.



Şekil 6. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en çok çekme deneyi yapılır. Çekme deneyi numuneye uygulanan kuvvete göre,

- Tek Eksenli Çekme
- İki Eksenli Çekme

olarak ikiye ayrılmaktadır.

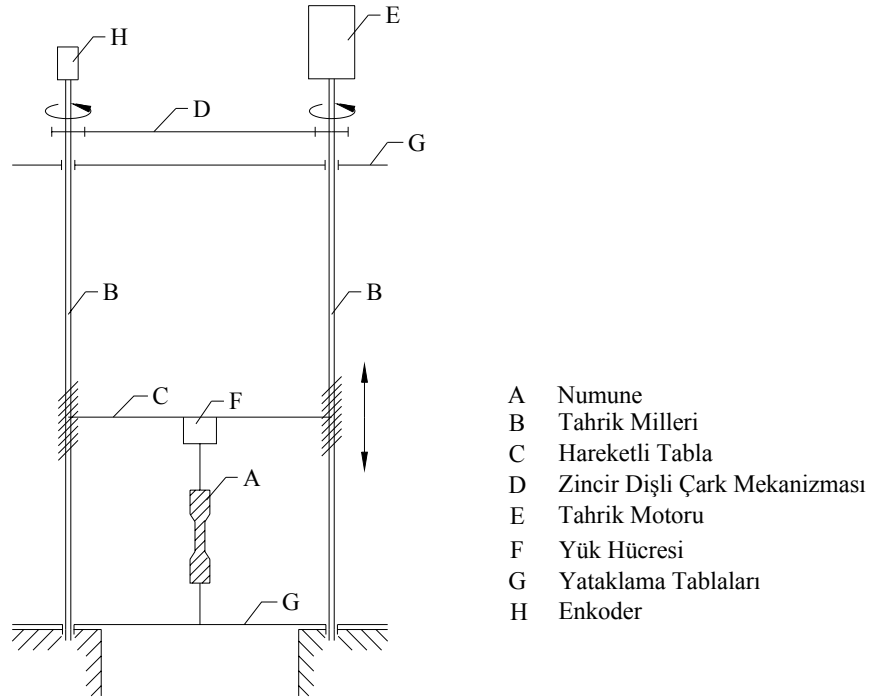
Kauçuk türü malzemelerin çekme ve basma bölgelerindeki mekanik davranışının birbirinden farklı olması nedeniyle, malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede tek eksenli çekme deneyi yanında tek eksenli basma deneylerinin de yapılmasına gereksinim duyulmaktadır [59]. Tek eksenli basma deneylerinde basma yüzeylerindeki sürtünmenin oldukça fazla olması nedeniyle de, literatürde tek eksenli basma deneyi yerine, iki eksenli çekme deneyi yapılmaktadır [60-61, 12]. Yapılan bu çalışmada, sadece tek eksenli çekme deneyinden basit çekme deneyi gerçekleştirildiğinden bu bölümde verilen bilgiler daha çok bu deneydeki deformasyon türüne yoğunlaşmıştır. Literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan tek eksenli çekme deneyi

- Basit Çekme
- Safi Kayma (Pure Shear)

olarak ikiye ayrılabilir. Şekil 7'de literatürde kauçuk türü malzemeler için tek eksenli çekme deformasyonu üzerine çalışma yapan bazı araştırmacılar, Şekil 8'de ise tek eksenli çekmede oluşan deformasyonlar görülmektedir [58].

1805 ve 1859 yıllarında kauçuk türü malzemelerin ilk bilimsel çalışmaları basit çekme deneyleri ile yapılmıştır. Bu deformasyon türünün kolaylığı ve bu konuda önemli bir bilgi birikiminin oluşması nedeniyle basit çekme deneyinde kullanılan numune boyutları ve takip edilen deney prosedürleri standartlaştırılmıştır. Kauçuk türü malzemelerin basit çekme deneyi ASTM D 412, DIN 53 504 ve ISO 37 standartlarında verilmektedir [62-63]. Ancak kauçuk türü malzemeler için yapılan diğer birçok deney için bu durumdan, yani standartların mevcudiyetinden, bahsetmek henüz mümkün değildir.

Tek eksenli çekme deformasyonu, genel olarak, Şekil 9'da gösterilen tahrik mekanizması ile sağlanmaktadır. E tahrik motoru ile tahrik edilen B tahrik milleri, D zincir çark mekanizması ile aynı anda harekete sebep olmakta ve C hareketli tablanın aşağı yukarı hareketini sağlamaktadır. Böylece A numunesi tek eksenli çekme deformasyonuna maruz kalırken F yük hücrelerinden kuvvet, H enkoder'ından (bunu yerine direkt olarak lazer ekstansometre veya video ekstansometrede kullanılabilir) ise yer değiştirme okunarak numunenin gerilme-şekil değiştirme davranışı elde edilmektedir.



Şekil 9. Basit çekme deneyi genel prensibi

Genel olarak yukarıda bahsedilen tahrik sisteminde çalışan basit çekme deneylerinde kauçuk türü malzemeler için Dumbbell numune ve halka numune olarak adlandırılan iki farklı numune kullanılmaktadır [62-63]. Literatürde bu numunelerden, özellikle, C kesme kalıbıyla kesilmiş Dumbbell numune kullanılmaktadır. İlave olarak halka formda numuneler de bazı çalışmalarda kullanılmıştır. Ancak bunların yanı sıra kauçuk türü malzemelerin mekanik ve kimyasal testlerinin ve araştırmaların yapıldığı en önde gelen kurumlardan biri olan Akron Kauçuk Geliştirme Laboratuvarlarının hazırladığı raporda [64] numune boyunun, genişliğine oranının en az 10 olması gerektiği belirtilmektedir. Raporda, numune boyutlarıyla ilgili kısıtlamadaki amacın numunenin deformasyonu sırasında numunede hasarın meydana gelmemesi olduğu belirtilmiş ve bu nedenle numune boyutları için de Dumbbell numune kullanılmasının şart olmadığı vurgulanmıştır. Dumbbell numune kullanılmaması durumunda kullanılacak numune boyunun tutma çeneleri arasında kalan uzunluk olarak alınabileceği belirtilmiştir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde Dumbbell numune yerine dikdörtgen formunda ince uzun numunelerin de kullanıldığını görülmektedir [12].

Basit çekme deformasyonunda, malzemeye uygulanan kuvvetler sadece bir yönde olup gerilmeler;

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (10)$$

olup şekil değişimleri ise, Poisson oranının 0.5 olduğu kabulü altında, kuvvet uygulanan doğrultuda uzama olurken diğer iki doğrultuda eşit miktarda daralma meydana gelir.

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (11)$$

Burada λ_i asal doğrultulardaki uzama oranı olup uzama oranı şekil değiştirme cinsinden

$$\lambda = 1 + \varepsilon \quad (12)$$

denklemleri ile tanımlanır

1.4. Literatür Araştırması

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri ve gerilme gevşemesi, literatürde, en çok araştırma yapılan konulardır. Kalıcı deformasyon, Histerezis ve sünme özellikleri ise kauçuk türü malzemeler için, literatürde, çok daha az inceleme konusu olmuştur. Bu amaçla, yapılan bu tez çalışmasının literatür araştırması bölümünde kauçuk türü malzemelerde gerilme-şekil değiştirme davranışlarının şekil değiştirme hızına bağımlılığı, Mullins etkileri ve gerilme gevşemesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar sunulmuştur.

1.4.1. Şekil Değiştirme Hızı

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için Mullins etkileri, gerilme gevşemesi, vizkoelastisite konuları üzerine araştırmalar, zaman zaman önem kazanmış ve araştırmacılar çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmışlardır. Şekil değiştirme hızının kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmalara olan ilgi ise daha sınırlı kalmıştır. Literatürde, şekil değiştirme hızının kauçuk

türü malzemelerin deformasyonuna etkisini inceleyen araştırmacılar deneysel çalışmalarını ya tek eksenli çekme ya da tek eksenli basma makinalarında gerçekleştirmişlerdir.

Kauçuk türü malzemelerde çekme hızının mekanik özelliklere etkisinin incelendiği çalışmaları üç kategoride toplamak mümkündür. Birinci grup, yarı statik deneyler olarak da adlandırılan, çekme hızı $0,0001-0,1 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında yapılan deneyler olup bu deneyler vidalı millerin tahrikiyle gerçekleştirilir. İkinci grup ise $0,1-500 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında yapılan deneylerdir. Bu deneylerde, daha hızlı yükleme sistemine, piezoelektrik transdüserlere ve temassız yer değiştirme ölçüm cihazlarına ihtiyaç vardır [65]. Deneyler yüksek hızlı servohidrolik test cihazlarında gerçekleştirilmekte olup literatürde uygulaması, deney düzeneğinin daha özel olması sebebiyle, yarı statik deneylere göre çok daha azdır. Üçüncü grup ise $500-10000 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında yapılan deneyler olup, bu deneyler Hopkinson-Kolsky bar tekniği [66-67] veya Nolle dalga yayılma aparatı [68-69] ile gerçekleştirilen deneylerdir. Bu çalışmada sadece düşük Şekil değişim hızları ile ilgilenildiğinden diğer iki gruptaki deneyler ile gerçekleştirilen çalışmalara fazla yer verilmemiştir.

Kauçuk türü malzemelerin deformasyonuna Şekil değiştirme hızının etkisi ilk defa, 1903 yılında, Bouasse ve Carrière tarafından $0,005-0,07 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında ve $\lambda_{max} = 7$ uzama oranı için deneysel olarak incelenmişlerdir [70]. Bu çalışmayı, 1930 yılında, Somerville, Ball ve Edland'ın $0,0033-0,033 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında ve $\lambda_{max} = 4,5$ uzama oranında yaptığı çalışma izlemiştir. [71]. Her iki çalışmada da artan Şekil değiştirme hızında mühendislik gerilmenin azaldığı ifade edilmiştir. Bu ise, şu anki bilinen sonuçların aksine bir bulgudur. Bu alışmaları 1932 yılında Holt'un $0,1-15 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızı aralığında ve $\lambda_{max} = 5,5$ uzama oranında yaptığı çalışma [72] ve 1939 yılında Dart ve Guth'ın $0,02-3 s^{-1}$ Şekil değiştirme hızında aralığında yaptığı çalışma [73] izlemiştir. Her iki grupta çalışmalarında, daha önceki çalışmaların aksine, bugün de geçerli olan, Şekil değişimi hızının artmasıyla gerilmenin arttığını ifade etmişlerdir. Tüm bu çalışmalarda, o yıllarda Mullins etkileri ve gerilme gevşemesi davranışı henüz tanımlanmamış olduğu için deneyler numunenin direkt çekilmesinden elde edilmiştir. Bu çalışmalarda numunelerdeki Mullins etkileri veya gerilme gevşemesi davranışını azaltacak deney prosedürleri uygulanmamıştır.

1930 lu yıllarda, deneylerin yapıldığı şekil değiştirme hızlarından daha yüksek şekil değiştirme hızlarında deney yapabilmek için Beadle ve Stevens darbe sarkacı (impact pendulum) deney düzeneğini kullanmışlardır [74]. Özellikle otomobil lastiklerinin yollardaki ani gerilme değişimlerini tanımlayabilmek için yüksek şekil değiştirme hızlarında deneylerin yapılmasının gerektiğini belirtmişlerdir. Daha sonraki yıllarda Van Rossem ve Beverdam [75], ve Albertoni [76], darbe sarkacı deney düzeneğini kullanarak, kauçuk türü malzemelerin uzaması sırasında yapılan işi hesaplamışlar ve en iyi malzeme karışımının belirlenmesi için deneylerin yüksek şekil değişimi hızlarında yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Albertoni, $\lambda = 4.5$ uzama oranı için 80 s^{-1} şekil değiştirme hızında deneyleri gerçekleştirerek, yüksek şekil değiştirme hızındaki (80 s^{-1}) gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin rutin deneylerden ve düşük şekil değiştirme hızında ($0,16 \text{ s}^{-1}$) elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrilerinden çok farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Hauk ve Neumann, 1939 yılında yaptıkları deneysel çalışmalarda, $0,5 - 7 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızı aralığında ve $\lambda_{\max} = 5,5$ uzama oranında yaptıkları deneyleri hem izotermal hem de adyabatik durum için gerçekleştirmişlerdir. [77]. Deneylerinden, şekil değişime hızının artmasıyla mühendislik gerilmesinin artması yanında, şekil değişim hızının azalmasıyla adyabatik durum için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin izotermal durum için elde edilen eğriye yaklaştığını gözlemlemişlerdir.

Roth ve Holt, 1939 yılında, kauçuk türü malzemelerin yüksek şekil değiştirme hızlarındaki aşınma direncinin, düşük şekil değiştirme hızlarındaki aşınmaya dirençlerinden daha iyi olup olmadığını araştırmak için düşük ve yüksek hızlarda tek eksenli çekme deneyleri yapmışlardır [78]. Deneylerinde dört farklı kauçuk malzemesinin düşük hızlardaki ($0,08 - 0,1 \text{ s}^{-1}$) deneylerini standart tek eksenli çekme makinalarında, yüksek hızlardaki (10 s^{-1}) deneylerini ise numuneye asılan ağırlıkların (20-40 kg) serbest bırakılmasıyla gerçekleştirmişlerdir. Yüksek hızlardaki deneylerin çok hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden deneylerin adyabatik olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek hızlardaki deneyleri sabit olmayan şekil değişim hızında fakat ortalama 10 s^{-1} hızda gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, deneylerin yüksek şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmesinin malzemenin aşınma direncine etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında yüksek ve düşük şekil değiştirme

hızlarında yapılan tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen gerilme-uzama oranı eğrilerinin yüksek deformasyonlarda ($\lambda \geq 6$) çakıştığını belirtmişlerdir.

Smith ve arkadaşları, 1956-1969 yılları arasında, SBR kauçuğunun kopma gerilmesinin (çekme dayanımı) ve maksimum uzamaların sıcaklık ve çekme hızıyla değişimini incelemişlerdir [79-83]. Çalışmalarında Instron test cihazı kullanarak $-67.8 - 93.3$ °C sıcaklık ve $0.158 \cdot 10^{-3} s^{-1} - 0.158 s^{-1}$ çekme hızı aralıklarında halka tipi numune kullanarak, gerilme-şekil değiştirme eğrisinden kopma noktasını deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda, malzemenin çekme dayanımının artan çekme hızı ve azalan sıcaklık ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak sıcaklık ve farklı çekme hızlarında, numunede meydana gelen kopmaların nedenini araştırmışlar ve kopmaların denge hali için gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmemesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Zhurkov, Sanfirova ve Tamashevskii, 1962 yılında, birçok doğal ve sentetik kauçuk malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme davranışlarına, şekil değiştirme hızının etkisini araştırmışlardır [84]. Deneylerini $0,07 - 1300 s^{-1}$ ($2 \text{ mm/s} - 31000 \text{ mm/s}$) hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin (kopma mukavemeti, kopma uzaması), malzemenin yapısına ve malzemeye katılan katkı maddesine bağlı olarak, şekil değiştirme hızıyla değiştiğini belirtmişlerdir. Şekil değiştirme hızının artmasıyla birlikte, malzemenin elastisite modülü ve kopma mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerde şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma uzamasının azalmasına karşılık, katkı maddesi katılmamış kauçuk türü malzemelerde, şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma uzamasının çok daha karmaşık bir davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, katkı maddesi katılmamış ve kristalize olmayan kauçuk malzemelerde şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma mukavemetinin arttığı buna karşılık katkı maddesi katılmamış ve kristalize olabilen kauçuk malzemelerde ise şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma mukavemetinin önce azaldığı ve minimum bir değerden geçtikten sonra tekrar arttığını gözlemlemişlerdir. Bazı kauçuk türü malzemelerde ise şekil değiştirme hızının artmasıyla kopma mukavemetindeki azalmanın deformasyon sebebiyle malzemede meydana gelen yapısal değişiklikten kaynaklandığını ve malzemedeki yapısal değişikliğe ise kristalizasyonun sebep olduğunu belirtmişlerdir. Kauçuk malzemede deformasyon sebebiyle kristalizasyonun meydana gelebilmesi için 1-2 saniyeye ihtiyaç vardır [84]. Yüksek şekil değiştirme hızlarında deforme edilen kauçuk malzemelerde, malzemenin

kristalize olabilmesi için gereken süre dolmadan malzeme deforme edildiğinden malzeme kristalize olamamakta ve düşük kopma mukavemeti göstermekte olduğunu belirtmişlerdir.

Dannis, 1963 yılında, otomobil lastiklerinin aşınma davranışının incelenebilmesi için, kauçuk türü malzemelerin yüksek şekil değişim hızında deneylerinin gerçekleştirilerek gerilme-şekil değiştirme verilerinin elde edilmesi gerektiğini belirtmiştir [85]. Bunun için ağırlığın düşme prensibine göre çalışan tek eksenli çekme deney düzeneğini geliştirerek deneylerini $\dot{\epsilon} = 500 \text{ s}^{-1}$ şekil değişim hızında gerçekleştirmiştir.

Literatürde ilk defa şekil değiştirme hızının, gerilme yumuşaması (Mullins etkileri) üzerine etkisini Kraus, Childers ve Rollmann, 1966 yılındaki çalışmalarında araştırmışlardır [86]. Araştırmacılar, karbon siyahı katkı maddesi katılmış stiren-bütadien kauçuklarında şekil değiştirme hızı ile gerilme arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar deneylerden önce stiren-bütadien kauçuk numunesini bir defa uzama oranı 3.5'a kadar deforme etmişler deneylerini bundan sonra gerçekleştirmişlerdir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış numuneyi ise 25 °C sıcaklık ve 0.0414 s⁻¹ şekil değiştirme hızında deforme etmişlerdir. Buradan gerilme yumuşamasının, şekil değiştirme hızı ile bir sıcaklık fonksiyonunun çarpımına eşit olduğu kabulünü yapmışlar ve bu kabulü en iyi Williams-Landel-Ferry bağıntısının [87] modelleyebileceğini belirtmişlerdir.

Lion, 1996 yılında, karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin, oda sıcaklığında, histerezis, şekil değiştirme hızı ve Mullins etkileri gibi inelastik özellikleri modelleyebilmek için üç boyutlu vizkoplastik bir model önermiştir [88]. Lion, tüm deneylerden önce malzemeye tek eksenli çekme için $\lambda = 2.0$ ve tek eksenli basma için $\lambda = 0.7$ değerine kadar 12 defa, yükleme-boşaltma çevrimi uygulayarak Mullins etkilerinden bağımsız deneysel veriler elde etmiştir. Bu düşünce ilk olarak James ve Green [89-90] tarafından uygulanmış ve literatürde bir çok araştırmacı [91-93] Mullins etkilerinden bağımsız deneysel veri elde etmek için malzemeyi ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Araştırmacılar, uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün nasıl yapılacağı konusunda bir araştırma yapmamışlardır. Bu noktada var olan deneyimlerden yararlanmışlardır. Lion, ayrıca, ön deformasyon prosedürü uygulanmış kauçuk malzemelerde farklı şekil değiştirme hızlarında deneyleri gerçekleştirmiş fakat ön deformasyon prosedürü uygulamanın şekil değişimine etkisinin olup olmadığını irdelememişlerdir. Çalışmasında, ön deformasyon prosedürü uygulanmış, numuneleri

$2.10^{-4} s^{-1}$, $2.10^{-3} s^{-1}$, $2.10^{-2} s^{-1}$, ve $2.10^{-1} s^{-1}$ şekil değiştirme hızlarında deforme etmişlerdir. Farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneylerden, çekme hızının artmasıyla malzemeye uygulanan gerilmenin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca malzemeyi $2.10^{-1} s^{-1}$ şekil değiştirme hızında deforme ederken belirli aralıklarla deney durdurularak 1 saat süreyle gerilmedeki azalma incelenmiştir. Buradan deneyin durdurulduğu her bir deformasyondaki 1 saat sonunda kararlı hale gelen gerilme değerlerinin teşkil ettiği gerilme-şekil değiştirme verilerinin malzemenin denge halindeki gerilme-şekil değiştirme eğrisini olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı bu deneyi hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma deformasyonu için ayrı ayrı gerçekleştirmiştir. Bu deneyden malzemenin denge halindeki verilerinden yükleme ve boşaltma eğrilerinin üst üste düşmediğini ve malzemede denge hali için histerezisin olduğunu belirtmiştir.

Jerrams, Kaya ve Soon, 1998 yılında, sonlu elemanlar analizini kullanarak kauçuk türü malzemelerin temas problemlerini modellemeye çalışmışlardır [94]. Bunun için şekil değiştirme enerji fonksiyonu içerisinde yer alan malzeme sabitlerini, özellikle de Yeoh ve Ogden şekil değiştirme enerji fonksiyonu içerisinde yer alan malzeme sabitlerini, tek eksenli çekme deformasyonu için farklı şekil değiştirme hızlarında belirlemişler ve bu malzeme sabitlerinin şekil değiştirme hızıyla değişimini incelemiştir. Bergström ve Boyce, 1998 yılındaki çalışmalarında, büyük şekil değişimine maruz elastomerlerin zaman bağımlı davranışını ifade edebilmek için yeni bir bünye denklemi önermişlerdir [95-96]. Bunun için kloropren ve nitril sentetik kauçuk numunelerini, farklı şekil değiştirme hızlarında tek eksenli basma deformasyonuna tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, deneylerden önce deney numunelerine 5-6 kez yükleme-boşaltma çevrimi uygulayarak deneylerdeki Mullins etkilerini gidermeyi ve tekrarlanabilir deneysel veriler elde etmeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalarındaki gözlemlerinden malzemenin mekanik davranışını, yani malzemeye uygulanan gerilmeyi, şekil değiştirme hızına bağımlı ve şekil değiştirme hızından bağımsız olmak üzere iki kısma ayırarak yeni bir bünye denklemi önermişlerdir. Esasen, malzemeye uygulanan gerilmenin denge ve zaman bağımlı olarak ikiye ayrılması ilk defa Green ve Tobolsky tarafından, 1946 yılında, önerilmiş [97] ve literatürde, Johnson ve arkadaşları [98-100] ve Roland ve arkadaşları [101-102] tarafından kullanılmıştır. Bergström ve Boyce deneysel çalışmalarında, sabit şekil değişiminde gerilme ile şekil değiştirme hızının logaritmasının lineer değiştiğini, şekil değiştirme hızının artmasıyla malzemenin mukavemetinin arttığını, hem katkı maddesi katılmış hem de katkı maddesi katılmamış elastomerlerde şekil değiştirme hızına olan bağımlılığın yükleme

eğrilerinde, boşaltma eğrilerine nazaran daha fazla olduğu, sonuçlarını elde etmişlerdir. Malzemenin davranışını, denge hali ve zaman bağımlı olarak ikiye ayırarak üç boyutlu bir model önermişler ve çalışmaları sonucunda önerdikleri malzeme modelinin, deneysel verileriyle farklı şekil değiştirme hızları ve farklı gerilme gevşemesi davranışı için uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar hem katkı maddesi katılmış hem de katkı maddesi katılmamış elastomerlerde şekil değiştirme hızına olan bağımlılığın yüklem eğrilerinde, boşaltma eğrilerine nazaran daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [95-96].

Bergström ve Boyce, 2000 yılında, katkı maddesi (karbon siyahı) katılmış ve büyük şekil değişimi etkisindeki elastomerlerin, zaman bağımlı davranışlarını ifade edebilmek için 1998 yılındaki önerdikleri bünye denklemini geliştirerek yeni bir model önermişlerdir [103]. Bergström ve Boyce, 2001 yılındaki çalışmalarında ise, hem elastomerlerin hem de yumuşak biyolojik dokuların zaman bağımlı davranışını modelleyebilmek için yine 1998 yılındaki önerdikleri bünye denklemini modifiye ederek yeni bir bünye denklemi önermişlerdir [104]. Araştırmacılar her iki çalışmalarında da kloropren ve doğal kauçuk malzemeleri kullanarak tek eksenli basma deformasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, malzemeleri farklı şekil değiştirme hızlarında deforme etmişler ve şekil değiştirme hızının artmasıyla malzemeye uygulanan gerilmenin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca malzemeye uygulanan yüklem-boşaltma eğrileri sonucunda histerezis döngüsünün şekil değiştirme hızından çok fazla etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu özelliklerinin elastomerler yanında yumuşak dokular için de geçerli olduğunu vurgulamışlardır.

Miehe ve Keck, 2000 yılında, büyük şekil değişlere maruz ve katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin monotonik ve çevrimsel davranışını modelleyebilmek için phenomenological bir malzeme modeli önermişlerdir [105]. Modelde gerilmeyi, elastik, vizkoelastik (şekil değişime bağımlı) ve plastoelastik (şekil değişimden bağımsız) olarak üç kısma ayırmışlardır. Deneysel çalışmalarında Lion'un çalışmalarından [88] etkilenecek benzer deneyler yapmışlar ve benzer ön deformasyon kullanmışlardır. Fakat burada da araştırmacılar ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerilme-şekil değiştirme verilerine etkisinin olup olmadığını irdelememişlerdir. Araştırmacılar vizkoelastik kısımdaki şekil değiştirme hızının malzemenin davranışına etkisini incelemek için malzemeyi $5.4 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, $5.4 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, $5.4 \cdot 10^{-2} s^{-1}$ ve $5.4 \cdot 10^{-1} s^{-1}$ şekil değiştirme hızlarında hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma deformasyonları için ayrı ayrı deforme ederek şekil değiştirme hızının gerilme-şekil değiştirme verilerine etkisini araştırmışlardır. Farklı şekil değiştirme hızlarındaki deneylerden, çekme hızının artmasıyla malzemeye uygulanan

gerilmenin arttığı sonucuna varmışlardır. Şekil değiştirme hızına bağlı bu vizkoz etkilerin, deformasyon sırasında polimer zincirleri arasındaki ikincil zayıf bağlardan kaynaklandığını belirterek kauçuğun bünye denklemine vizkoz ve şekil değiştirme hızının etkisinin katılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca malzemeyi $5.4 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızında deforme ederken tek eksenli çekme deformasyonunda $\lambda = 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0$ uzama oranlarında ve tek eksenli basma deformasyonunda ise $\lambda = 0.94, 0.88, 0.82, 0.76, 0.70$ uzama oranlarında deneyi durdurarak 1 saat süreyle gerilmadaki azalmayı izlemişlerdir. Buradan deneyin durdurulduğu her bir deformasyondaki 1 saat sonunda kararlı hale gelen gerilme değerlerinin teşkil ettiği gerilme-şekil değiştirme verilerinin malzemenin denge halindeki gerilme-şekil değiştirme eğrisi olduğunu belirtmişlerdir.

Haupt ve Sedlan, 2001 yılında, katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin vizkoplastik davranışını modelleyebilmek için tek eksenli çekme, burulma ve çekmeli burulma deneyleri yaparak yeni bir malzeme modeli önermiştir [106]. Mullins etkilerinden bağımsız bir model önerebilmek için malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Fakat çalışmalarında ön deformasyon prosedürü nasıl uyguladıklarını açıklamamışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışının şekil değiştirme hızı ile değişip değişmediğini test etmek için ise malzemeyi $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ve $3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızlarında deforme etmişlerdir. Buradan malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışının non-lineer elastik ve şekil değiştirme hızına bağımlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Cheng ve Chen, 2003 yılında, EPDM sentetik kauçuğunun gerilme-şekil değiştirme davranışını hem yarı-statik şekil değiştirme hızı bölgesinde ($\dot{\epsilon} = 0.004 - 0.4 \text{ s}^{-1}$) ve hem de dinamik şekil değiştirme hızı bölgesinde ($2800 - 3200 \text{ s}^{-1}$) incelemişlerdir [107]. Yarı-statik şekil değiştirme hızı deneylerini tek eksenli çekme makinasında, dinamik şekil değiştirme hızı deneylerini ise Split Hopkinson Tension Bar deneysel tekniğine uygun deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. EPDM kauçuklarını $\dot{\epsilon} = 0.004 \text{ s}^{-1}$, $\dot{\epsilon} = 0.04 \text{ s}^{-1}$ ve $\dot{\epsilon} = 0.4 \text{ s}^{-1}$ şekil değiştirme hızlarında ve $\lambda_{\max} = 3.0$ uzama oranında yapmış oldukları deneylerde artan şekil değişim hızlarında, sabit uzama oranı altında, malzemeye uygulanan gerilmenin hem yükleme hem de boşaltma yüklemelerinde arttığını belirtmişlerdir. Fakat ön deformasyon prosedürü uygulamanın şekil değişimine etkisini araştırmamışlardır. Çalışmalarında, şekil değiştirme hızının malzemenin sadece özelliklerini değiştirdiğini,

malzemede tekrarlı yükleme sebebiyle meydana gelen hasarın ise sadece maksimum uzama oranından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, ilk defa, gerilme-şekil değiştirme davranışına hem Mullins etkilerinin hem şekil değiştirme hızının hem de maksimum uzama oranının etkilerini birlikte incelemişlerdir. Bunun için deneysel çalışmalarında, sabit tekrarlı yükleme sayılarında, şekil değiştirme hızı ve maksimum uzama oranını karşılıklı olarak değiştirmişlerdir. Deneylelerinden şekil değiştirme hızı ve maksimum uzama oranının birbirinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Kauçuk mekaniği üzerine çalışan bazı araştırmacıların vurguladığı diğer bir görüş ise literatürde yer alan deneysel çalışmalardaki şekil değiştirme hızlarının ya çok düşük ya da çok yüksek olduğu, orta bölgedeki hızlarda gerçekleştirilmiş yeterli deneysel verilerin literatürde olmadığı ve bu eksikliğin giderilmesine yönelik yeni deneysel tekniklerin geliştirilmesi gerektiğini şeklidir [108].

Song, Chen ve Cheng, 2004 yılında, EPDM sentetik kauçuğunun farklı şekil değiştirme hızlarındaki davranışını hem tek eksenli çekme, hem de tek eksenli basma deformasyonunu modelleyebilmek için 2003 yılında elde ettikleri deneysel verilerini [107, 110] kullanarak yeni bir model önermişlerdir [111]. Bu amaçla kauçuğun büyük şekil değiştirme bölgesindeki davranışını modelleyebilmek için Mooney-Rivlin şekil değiştirme enerji fonksiyonunu, küçük şekil değiştirme bölgesindeki davranışını modelleyebilmek için ise Maxwell modelini kullanmışlar ve her iki modelin birleştirilmesinden şekil değiştirme hızının etkisinin dahil edildiği yeni bir model elde etmişlerdir. Araştırmacılar bu modelin EPDM kauçuk malzemelerinin hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma bölgesindeki davranışını, modelleyebildiğini ifade etmişlerdir.

Quintavalla ve Johnson, 2004 yılında, golf toplarına vurma esnasında malzemenin davranışını modelleyebilmek için katkı maddesi katılmış polibütadien kauçuğunun düşük ($\dot{\epsilon} < 0.5 \text{ s}^{-1}$) ve yüksek ($\dot{\epsilon} > 5000 \text{ s}^{-1}$) şekil değiştirme hızlarında tek eksenli basma ve Split Hopkinson Pressure Bar deneylerini gerçekleştirmişlerdir [108-109]. Çalışmalarında Bergström-Boyce malzeme modelini [95] kullanmışlar ve bu modeldeki malzeme sabitlerini Marquardt-Levenberg sayısal yöntemi [112] ile belirlemişlerdir. Bergström-Boyce malzeme modelinin hem düşük hem de yüksek şekil değiştirme hızlarında deneysel gerilme-uzama oranı verilerini iyi bir şekilde modellediğini belirtmişlerdir.

1.4.2. Mullins Etkileri

Kauçuk türü malzemelerden imal edilen deney numunelerinin çekme ve basma deformasyonları sırasında numunenin belirli bir deformasyona kadar deforme edilip daha sonra geri bırakılması durumunda, yükleme ve boşaltma eğrilerinin birbirinden farklı olduğu yani histerezisin oluştuğu görülür. Aynı yükleme-boşaltma çevriminin tekrarlanması durumunda 1. ve 2. yükleme-boşaltma çevrimlerinin birbirinden çok farklı olduğu ve aynı deformasyonda 2. yüklemedeki gerilmelerin 1. yüklemedeki gerilmelerden daha düşük olduğu görülür. Literatürde, gerilmedeki bu azalma *Gerilme Yumuşaması* veya *Mullins Etkileri* olarak adlandırılmaktadır [113]. 2. çevrimsel yüklemekten sonra yükleme-boşaltma eğrilerinin ya üst üste düştüğü ya da denge halindeki çevrimsel yüklemeye yakınsadığı gözlemlenmektedir. Bu fiziksel özellik, hem katkı maddesi katılmış hem de katkı maddesi katılmamış vulkanize edilmiş kauçuk malzemelerde görülmektedir [114].

Gerilme yumuşaması, literatürde ilk defa, 1903 yılında Bouasse ve Carriere [70] ve 1904 yılında Shedd ve Ingersol [115] tarafından incelenmiştir. 1922 yılında Gurney ve Taverners [116] uçaklarda kullanılan kauçuk malzemelerden yapılmış şok emici elemanlardaki enerji yutma (abzorb etme) kabiliyetini incelerken yükleme ve boşaltma eğrileri arasında önemli miktarda enerji farkının olduğunu ve bu farkın artan yüklemelerde azaldığını gözlemlemişlerdir. Williams ise kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elde etmeden önce malzemenin birkaç kez tekrarlı yüklemeye tabi tutulması gerektiğini belirtmiştir [117]. Sommerville ve Cope [71] ve Gerke [118], gerilme yumuşaması etkilerinin olmadığı gerilme-şekil değiştirme verilerini elde edebilmek için malzemeyi tek eksenli çekme deformasyonu altında tekrarlı yüklemeye tabi tutmuştur. Holt, 1932 yılındaki çalışmasında [72], tekrarlı yüklemenin ve deformasyon hızının gerilme-şekil değiştirme özelliklerine etkisini araştırmıştır.

Mullins, 1947 yılında [119], hem katkı maddesi katılmış hem de katkı maddesi katılmamış kauçuk türü malzemelerin gerilme-şekil değiştirme verileri, gerilme gevşemesi, şişme, elektrik iletkenliği ve güç faktörü özelliklerine tekrarlı yüklemenin etkilerini araştırmıştır. İlk defa Bouasse ve Carriere [70] tarafından incelenen gerilme yumuşaması davranışı, 1947 yılındaki Mullins'in çalışması [119] ile literatürde konunun başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve gerilme yumuşaması tanımlaması artık literatürde *Mullins Etkileri* olarak adlandırılmıştır.

Blanchard ve Parkinson, 1952 yılında [120-121] ilk defa, katkı maddeli kauçuk türü malzemelerin gerilme yumuşaması davranışını modelleyebilmek için moleküler teoriyi kullanarak yarı amprik bir bağıntı önermişler ve gerilme yumuşamasının katkı maddesi ve kauçuk arasındaki bağların kopmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Blanchard ve Parkinson'ın aksine Mullins ve Tobin phenomenological teoriyi kullanarak katkı maddeli kauçuk türü malzemelerin davranışını modellemek için kauçuğun sert ve yumuşak olmak üzere iki fazdan oluştuğunu ve çekme sırasında faz dönüşümünün gerçekleştiği kabulünü yaparak bir model önermişlerdir [122]. Araştırmacılar malzemenin ilk önce sert olduğunu uygulanan deformasyon ile malzemenin yumuşamadığını belirterek deformasyon sebebiyle malzemede meydana gelen faz dönüşümlerini ölçebilmek için modellerinde hasar parametresi tanımlamasını kullanmışlardır. Mullins ve Tobin, ayrıca, karbon siyahı katkı maddeli malzemelerde ön deformasyon prosedürün etkili olduğunu, katkı maddesi katılmamış malzemelerde ise ön deformasyon prosedürü uygulamanın etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Bueche, 1960 ve 1961 yıllarında [123-124], gerilme yumuşamasını moleküler teoriyi kullanarak incelemiştir. Çalışmasında, kauçuğa katılan katkı maddeleri arasında üç farklı zincir bağının olduğunu, bunlardan birincisinin hemen deformasyon ile koptuğunu, ikincisinin daha yüksek deformasyonlarda koptuğunu ve üçüncüsünün ise deformasyon ile kopmadığını kabul etmiştir. Ayrıca zincirlerin kopmasıyla, kopan zincirlerin deformasyon sırasında malzemenin mukavemetine etki yapmadığını ve bu zincir kopmasıyla malzemede gerilme yumuşaması meydana geldiği kabulünü yaparak gerilme yumuşaması davranışını açıklamış ve bu kabule uygun teorik bir model önermiştir.

1960'lı yıllarda, Bouasse ve Carriere'nin [70] katkı maddesiz kauçuklar için elde ettikleri sonucun aksine, Mullins etkilerinin sadece katkı maddeli kauçuklarda meydana geldiği düşünülmüştür. Harwood, Mullins ve Payne, 1965-1967 yılları arasında [125-130], gerilme yumuşaması modellemede Bueche modelinin yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, 1965 yılına kadar olan çalışmalarda, gerilme yumuşamasının karbon siyahı katkı maddeleri arasındaki zincir kopmasından, zincir topaklaşmasından veya kauçuk ve karbon siyahı katkı maddesi arasındaki zayıf bağların kopmasından kaynaklandığı şeklindeki açıklamaların geçersiz olduğunu ve gerilme yumuşamasının kauçuğun deformasyon sebebiyle meydana gelen faz değişiminden ve moleküllerin deformasyon sebebiyle yeniden düzenlenmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [125, 127]. Katkı maddesi katılmış veya katılmamış kauçuk malzemelerde, aynı maksimum gerilmeye kadar

yapılan gerilme yumuşaması deneylerinden, gerilme yumuşaması miktarının aynı olduğunu belirterek gerilme yumuşamasında, katkı maddesinin önemli bir parametre olmadığını ve katkı maddelerinin gerilme yumuşamasına çok küçük bir etki yaptığını belirtmişlerdir [126-127]. Araştırmacılar deneysel çalışmalarını katkı maddesi katılmamış [127, 129] ve katılmış [127-128] doğal kauçuk malzemesi için hem belirli gerilmeye, hem de kopma gerilmesine [128-129] kadar gerçekleştirmişlerdir.

Literatürdeki bazı araştırmacılar [114] ise gerilme yumuşaması davranışını, kauçuğun deformasyonu sırasında kauçuk molekülü ve katkı maddesi molekülleri arasındaki kaymadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Houwink 1956 yılında [131] ve Dannenberg ve Brennan, 1966 yılında [132], kayma modelini esas alarak, şekil değiştirme enerjisi kayıplarını gerilme yumuşamasını tanımlamada bir kriter olarak kullanmışlardır.

Literatürde ilk defa, şekil değiştirme hızının ve sıcaklığın Mullins etkileri üzerine etkisini Kraus, Childers ve Rollmann 1966 yılında araştırmışlardır [86]. Deneylerinde her bir stiren-bütadien kauçuk numunesini farklı ön deformasyona tabi tutarak 25 °C sıcaklık ve 0.0414 s⁻¹ şekil değiştirme hızında deforme etmişlerdir. Buradan gerilme yumuşamasının, malzemenin vizkoelastik ve hasar (failure) davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

1970'li yılların başından 1990'lı yıllara kadar Mullins etkileri üzerine, genel manada, çalışma olmamıştır. 1991 ve 1992 yılında Govindjee ve Simo [133-135] sürekli hasar mekaniğini kullanarak oldukça kompleks hiperelastik bir model önermişlerdir. 1991 yılındaki çalışmalarında [133] karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuklar için mikro-mekanik teoriyi kullanarak gerilme yumuşamasının tanımlandığı bir sürekli hasar modeli önermişlerdir. Bir sonraki yıl ise mikro-mekanik teoriyi kullanarak önerdikleri modeli, sayısal analizlerde daha etkin kullanabilmek için, phenomenological teoriyi kullanarak elde etmişlerdir [134]. 1992 yılında ise [135], 1991 yılında önerdikleri modele vizkoelastik etkileri katmışlardır. Önerilen bu modellerin, roket yakıtı gibi vizkoelastik malzemelerde çok iyi sonuç verdiği fakat katı kauçuk malzemelerde yetersiz olduğu görülmüştür [27].

Johnson ve Beatty, 1993 yılında, Mullins'in [122] kullandığı iki faz modelini kullanarak daha basit bir model önermişler ve önerdikleri modelin tek eksenli çekme deneyi verileri ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir [136-137]. Johnson ve Beatty, 1995 yılında ise tek eksenli çekme deformasyonu için önerdikleri modeli iki eksenli eş çekme deneyleri için genelleştirmişlerdir [138].

Miehe, 1995 yılında, iki tür hasar mekaniği modeli tanımlamıştır [139]. Bunlardan birincisi süreksiz hasar olup sadece malzemeye uygulanan maksimum uzama oranına bağlıdır. İkincisi ise sürekli hasar olup malzemeye uygulanan uzama oranına bağlıdır. Bu ikinci tür hasar, Lion [88], Shen, Golnaraghi, ve Plumtree [140] tarafından da çalışılmış olmakla birlikte bu hasar mekaniği tanımlaması üzerinde çok az çalışma yapılmıştır.

Lion 1996 yılında önermiş olduğu modelde gerilmeyi, şekil değişim hızından bağımsız denge hali için gerilme ve şekil değişimine bağlı gerilme olarak ikiye ayırmıştır [88]. Araştırmacı, Mullins etkilerinin, şekil değişim hızına bağımlılık ve histerezis özelliğinden ayırt edilebilmesi için malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerekli olduğunu belirtmiştir. Bunun için her deneyden önce malzemeyi, tek eksenli çekme deformasyonu için $\lambda = 1$ ve tek eksenli basma deformasyonu için $\lambda = 0.3$ değerine kadar 12 defa 0.02 s^{-1} şekil değiştirme hızında yükleme-boşaltma çevrimine tutmuş ve malzemeyi 1 saat süreyle yüksüz halde bekletmiştir. Böylece malzemenin kararlı halde olduğunu ve artık malzemede gerilme yumuşamasının olmadığını belirtmiştir. Çalışmasında malzemeyi 2.10^{-2} s^{-1} şekil değişim hızında sırasıyla 1.3, 1.65, ve 2.0 uzama oranlarında 12 şer defa yükleme- boşaltma çevrimsel yüklemeye tabi tutmuştur. Deney sonunda malzemenin her bir uzama oranında kararlı histerezis döngüsünün olduğunu belirtmiş ve bu döngüyü denge halindeki histerezis olarak tanımlamıştır.

Bergström ve Boyce 1998 yılındaki deneysel çalışmalarından

- Mullins etkilerini giderecek deney prosedürü uygulanması durumunda deneysel verilerin tekrar aynı değerlerde elde edilebileceğini,
- Katkı maddesi katılmış ve katılmamış elastomerlerde, tekrarlı yükleme altında malzemenin histerezis davranış gösterdiğini,
- Malzemeye katılan karbon siyahı katkı maddesinin geometrik büyüklüğünün histerezis davranışını önemli ölçüde etkilemediğini,
- Malzemeye katılan katkı maddesi miktarına bağlı olarak birinci yükleme boşaltma eğrisinden sonra çok az veya hiç kalıcı deformasyonun olmadığını
- Yükleme-boşaltma çevrimi sırasında sabit şekil değişimlerinde belirli süre beklenilmesi durumunda, hem yükleme hem de boşaltma anındaki beklemelerde aynı denge gerilmesine yakınsama olduğu

sonuçlarını elde etmişlerdir [96, 103]. Deney sonuçlarındaki gözlemlerinden malzemeye uygulanan gerilmeyi denge hali ve zaman bağımlı olmak üzere ikiye ayırarak üç boyutlu bir model önermişlerdir. Çalışmaları sonucunda önerdikleri malzeme modelinin deneysel

verileriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar önerdikleri malzeme modeli ile, uygun malzeme katsayılarının seçilerek katkı maddesi katılmış malzemelerin davranışlarının modellenebileceğini belirtmişlerdir. Aynı araştırmacılar, katkı maddesi katılmış malzemeler için 1999 yılında farklı bir malzeme modeli önermişlerdir [141].

Holzapfel, Stadler ve Ogden, 1999 yılında, daha önceki çalışmalarında [27, 142] önerdikleri pseudo-elastik modele, tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen kalıcı deformasyonu ilave ederek yeni bir model önermişlerdir [143]. Araştırmacılar önerdikleri modeli sonlu elemanlar programına dahil ederek tek eksenli çekme ve homojen olmayan çekme testini hem sayısal hem de analitik olarak çözümlenmişlerdir.

1999 yılında Ogden ve Roxburgh ise katkı maddeli kauçuk türü malzemeler için non-linear elastisite teorisi yerine pseudo-elastisite teorisini kullanarak, içerisinde hasar değişkeninin olduğu bir pseudo-enerji fonksiyonu tanımlamışlar ve Mullins etkileri için yeni bir phenoemological model önermişlerdir [27]. Aynı yıl diğer bir çalışmalarında ise kalıcı deformasyonun etkisini modele ilavesi için yeni bir çalışma yapmışlardır [142]. Her iki çalışmada da şekil değiştirme hızının etkisini dikkate almamışlardır [107].

Beatty ve Krishnaswamy 2000 yılında ise, Johnson ve Beatty'nin 1993 yılında tek eksenli çekme deformasyonu için ortaya koyduğu modeli [136] diğer deformasyon türlerini de (safı kayma ve iki eksenli çekme, burulma) kapsayacak şekilde genelleştirerek hem sıkıştırılmaz hem de sıkıştırılabilir malzemeler için yeni bir model önermişlerdir [144-148]. Araştırmacılar, gerilme yumuşamasının deformasyon sebebiyle malzemenin içyapısında meydana gelen hasardan kaynaklandığını belirterek bir gerilme yumuşama fonksiyonu tanıtmışlardır. Tanımladıkları bu fonksiyonun malzemeye uyguladıkları maksimum uzama oranına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bergström ve Boyce, 2000 yılında büyük şekil değişimine maruz karbon siyahı katkı maddesi katılmış elastomerlerin [103] ve 2001 yılında ise yumuşak biyolojik dokuların [104] zaman bağımlı davranışını modelleyebilmek için 1998 yılındaki önerdikleri bünye denklemini kullanarak yeni modeller önermişlerdir. Çalışmalarında, kloropren ve doğal kauçuk malzemeleri kullanarak tek eksenli basma deformasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Her iki çalışmada da hem Mullins etkilerinin hem de gerilme gevşemesi etkilerinin görüldüğü Mullins etkileri deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde ara deformasyonlardaki beklemelede malzemenin yüklenilmesi sırasında gerilmenin azaldığını ve yükün boşaltılması sırasındaki beklemelede ise gerilmenin arttığını gözlemlemişlerdir. Bekleme sürelerini 20 saniye gibi kısa bir süre olarak belirlemişler ve

çok düşük şekil değiştirme hızları ve daha uzun süreli bekleme ve boşaltma eğrilerinin birbirlerine yaklaşabileceğini belirtmişler fakat bunu deneysel olarak doğrulamamışlardır. Lion [88] yükleme ve boşaltma eğrilerinin hiçbir zaman üst üste düşmeyeceğini belirterek her zaman denge hali için bir histerezisin olacağını belirtmiştir.

Miehe ve Keck, 2000 yılında, büyük şekil değişimlerine maruz ve katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin monotonik ve çevrimsel davranışını modelleyebilmek için malzemenin mekanik davranışını:

1. *Elastik Davranış*: Malzemenin büyük şekil değişimi davranışı modellenir.
2. *Sonlu Vizkoelastik Davranış*: Malzemenin zamana bağımlı özellikleri modellenir. Gerilme gevşemesi ve sünme gibi
3. *Sonlu PlastoElastik Davranış*: Malzemenin zamandan bağımsız denge halindeki histerezis davranışı modellenir.
4. *Hasar Davranışı*: Malzemede meydana gelen Mullins etkileri modellenir.

şeklinde dört kısma ayırarak yeni bir phenomenological malzeme modeli önermişlerdir [105]. Önerdikleri formülasyonun izotermal şartlarda karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuk türü malzemelerin monoton ve çevrimsel deformasyon davranışını modelleyebileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar malzemeyi, tek eksenli çekme deformasyonunda, $5.4 \cdot 10^{-2} s^{-1}$ şekil değişimi hızında ve $\lambda = 1.30$, $\lambda = 1.66$ ve $\lambda = 2.0$ uzama oranlarında 12 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutmuşlardır. 12. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemenin her bir uzama oranı için denge halindeki histerezis eğrisini elde etmişlerdir. Üç farklı uzama oranında yaptıkları deneylerden malzemede meydana gelecek gerilme yumuşamasının, malzemeye uygulanacak maksimum deformasyon miktarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Malzemede görülen bu davranışın polimer zincirleri ve katkı maddesi partikülleri arasındaki zayıf bağlarda meydana gelen hasardan kaynaklandığını belirterek bu davranışın modele katılması gerektiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, son olarak, hem çekme hem de basma bölgesinde ve $0.7 \leq \lambda \leq 2.0$ deformasyon aralığında, malzemeyi $5.4 \cdot 10^{-2} s^{-1}$ çekme hızında 12 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutmuşlar ve 13. yükleme-boşaltma çevriminde 20 farklı uzama oranında 1'er saat bekleme yaparak gerilmedeki azalmayı dolayısıyla da denge halindeki histerezis eğrisini elde etmişlerdir. Şekil değişim hızından bağımsız bu inelastik özelliğin katkı maddesi partikülleri arasındaki tersinmez kaymadan meydana geldiğini belirterek, malzeme modelinde plastoelastik kısmına dahil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Haupt ve Sedlan, 2001 yılında, önerdikleri malzeme modelinde malzeme davranışını elastik ve inelastik (vizkoelastik ve vizkoplastik) olarak ikiye ayırmışlardır [106]. Mullins etkilerinden bağımsız bir model önerebilmek için malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Böylece malzemenin, Mullins etkilerinin olmadığı, vizkoplastik davranışını modellemişlerdir. Fakat çalışmalarında ön deformasyon prosedürü nasıl uyguladıklarını açıklamamışlardır. Ayrıca malzemeyi $3.10^{-2} s^{-1}$ çekme hızında deforme ederken 5 farklı uzama oranında 20000 saniye gerilme gevşemesine tabi tutmuşlardır. Malzemenin denge halinde histerezis davranışının oluşup oluşmadığını görmek için iki farklı deney prosedürü önermişlerdir. Deneylerden malzemedeki denge halinde histerezis davranışının oluştuğunu fakat deney prosedürlerinde çok uzun beklenilmemesi durumunda denge halindeki histerezis oluşmayacağını belirtmişlerdir.

Clement, Bokobza ve Monnerie, 2001 yılında, silika katkılı silikon elastomerlerin (-20)-(+100) °C sıcaklık aralığında gerilme yumuşaması davranışını incelemiştir [149]. Ayrıca deneysel sonuçları Bueche'nin modeli ile karşılaştırmışlardır. Aynı yıl DeSimone, Marigo ve Teresi hasar mekaniğini kullanarak kauçuk türü malzemelerin gerilme yumuşaması davranışı için yeni bir model önermişlerdir [150].

Cheng ve Chen, 2003 yılında, son yıllarda, Mullins etkilerinin modellenmesine yönelik çalışmalarının olduğunu [27, 133-134, 144-148, 150] fakat bu çalışmalarda Mullins etkilerine şekil değiştirme hızının etkisinin incelenmediğini belirterek çalışmalarını bu konu üzerine yoğunlaştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında hem şekil değiştirme hızını hem Mullins etkilerini hem de kalıcı deformasyonu modelleyebilmek için, 1999 yılında, Ogden ve Roxburgh tarafından önerilen [27, 142] malzeme modelini kullanmışlardır. Fakat Ogden ve Roxburgh önerdikleri bu malzeme modelinde, kauçuğun histerezis ve kalıcı deformasyon özelliklerini modele ilave etmemişlerdir. Buna rağmen, Cheng ve Chen kullandıkları bu modelin kauçuğun genel manada inelastik özelliklerini modelleyebildiğini fakat modele kalıcı deformasyon, gerilme gevşemesi ve histerezis özelliklerinin ilave edilmesinin gerektiğini belirtmişlerdir [107]. Deneysel çalışmalarında gerilme-şekil değiştirme davranışına hem Mullins etkilerinin hem şekil değiştirme hızının hem de maksimum uzama oranının etkisi aynı anda araştırmışlardır. Artan uzama oranlarında kalıcı deformasyon ve maksimum uzama oranındaki gerilme azalmasının arttığını deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Ayrıca Mullins etkileri sebebiyle malzemedeki meydana gelen hasarın sadece malzemeye uygulanan maksimum uzama oranının artmasıyla değiştiğini belirterek EPDM kauçuğunun 5. yükleme-boşaltma çevriminden

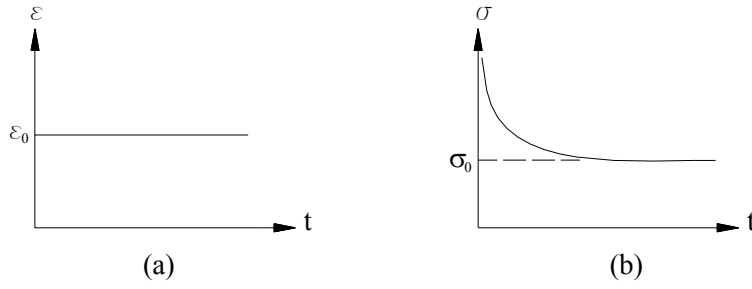
sonra gerilme-uzama oranı diyagramında meydana gelen histerezis eğrisinin kararlı hale geldiğini deneysel olarak gözlemlemişlerdir.

Gentot, Brieu ve Mesmacque, 2004 yılında, kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi davranışını tek eksenli çekme deformasyonu verilerini ve Miehe'nin [139] önerdiği süreksiz hasar tanımlamasını kullanarak, yeni bir malzeme modeli önermişlerdir [151]. Önerdikleri modelde malzemeye uygulanan maksimum deformasyon ve çevrim sayısını değişken olarak tanımlamışlardır. Önerdikleri malzeme modelinin doğal kauçuk ve silika katkılı doğal kauçuk malzemelerinin gerilme yumuşaması davranışını yüksek çevrim sayılarına kadar modelleyebildiğini belirtmişlerdir.

1.4.3. Gerilme Gevşemesi

Gerilme gevşemesi deneyi günümüzde kauçuk türü malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesinde araştırma kurumları yanında özellikle o-ring, keçe ve conta imalatının yapıldığı kurumlarda ve otomobil endüstrisinde başvurulan standart bir test metodu olma yolundadır [152].

Kauçuk türü malzemelerde sabit deformasyon altında gerilmenin zamanla azaldığı (Şekil 10) gözlenmiş ve kauçuk türü malzemelerin bu davranışı, literatürde, “*Gerilme Gevşemesi*” olarak adlandırılmıştır [153-154]. Yaklaşık 20 yıl önce ISO TC 45 teknik komitesi tarafından, gerilme gevşemesi davranışını belirlemeye yönelik deney prosedürlerini standartlaştırma çalışmaları başlamıştır. Günümüzde ise ISO 3384 standarttı [155] basma deformasyonları için, ISO 6914 standarttı [156] ise çekme deformasyonları için uygulamada kullanılmaktadır. Literatürde, özellikle 1940’lı yıllardan itibaren, gerilme gevşemesi deney düzeneklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardan başlayarak günümüze kadar iki tip ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi sürekli ölçüm, ikincisi ise aralıklı ölçüm sistemi olarak adlandırılmıştır. Sürekli ölçüm tekniğinde numune belli bir deformasyona kadar deforme edilir ve o deformasyonda gerilme-zaman davranışı incelenir. Aralıklı ölçüm sisteminde ise malzeme kısa aralıklarla, periyodik olarak, belirlenen deformasyona kadar deforme edilmektedir [157].



Şekil 10: (a) Kauçuğa uygulanan sabit deformasyon (b) Sabit deformasyon altında kauçuktaki gerilme gevşemesi davranışı

Kauçuk türü malzemeleri, çekme deformasyonu ile gerilme gevşemesi deneyleri yapılarak malzemenin kimyasal ve fiziksel değişimlerinin incelenmesi ilk defa Tobolsky ve arkadaşları tarafından başlatılmıştır [158-159]. Tobolsky, Prettman ve Dillon çalışmalarında çekme deformasyonunda doğal kauçuk, Neopren, Butil kauçuk, Buna S, Buna N kauçuklarının gerilme gevşemesi deneylerini yapmışlardır [158]. Çalışmalarında gerilme gevşemesine sıcaklığın, uzama oranının, deney yapılan ortamın, katkı maddelerinin etkisini araştırmışlardır. 100 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda gerilme gevşemesi deneylerinde kuvvetin 100 saat gibi bir sürede ortadan kalktığını gözlemleyerek gerilme gevşemesinin sıcaklığa bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Uzama oranının ise gerilme gevşemesinden bağımsız olduğunu fakat yüksek uzama oranlarında kristalizasyon etkisi nedeniyle gerilme gevşemesinin biraz daha hızlandığını belirtmişlerdir. Farklı vulkanizasyon karışım maddelerinin kullanılmasının ve deneylerin hava veya nitrojen ortamında yapılmasının deneylerde bir fark oluşturmadığını gözlemlemişlerdir. Antioksidant maddelerinin karışımda kullanılması durumunda ise gerilme gevşemesinin daha yavaş oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, ayrıca, farklı uzama oranlarındaki gerilme gevşemesini modelleyebilmek için yeni bir denklem önermişlerdir.

Kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi deneyi sırasında moleküler zincirlerinin ve katkı maddelerinin deformasyon sırasında yer değiştirmesi sebebiyle deformasyondan sonraki birkaç dakika içerisinde fiziksel gevşeme meydana gelmektedir. Bu ilk andaki gevşeme ikincil ağ bileşimlerinin gevşemesinden kaynaklanmaktadır. Daha sonraki gerilmedeki büyük azalma ise oksidasyon ve termal nedenlerle oluşmaktadır. Oksidasyon molekül zincirlerinin kesilmesine, sıcaklığın artması ise moleküler hareketliliğe bu ise molekül zincirlerinin kesilmesine sebep olmaktadır [152, 158].

Mooney, Wolstenholme ve Villars, çalışmalarında, çekme deformasyonunu kullanarak gerilme gevşemesini yeni bir deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir [160]. Çalışmalarında deneylerini $\lambda = 1.1 - 5.0$ uzama oranı aralığında ve 35 ve 70 °C sıcaklıklarında 7-8 ay gibi uzun bekleme sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında uygulanan kuvvet veya gerilme gevşemesini geçici (transient) ve sürekli (steady) gerilme gevşemesi bölgesi olarak ikiye ayırmışlardır. Gerilme gevşemesi deneyindeki non-lineer değişim gösteren 1. bölgeyi geçici gerilme gevşemesi bölgesi daha sonraki bölgeyi ise yani daha çok lineer değişim gösteren bölgeyi ise sürekli gerilme gevşeme bölgesi olarak tanımlamışlardır. Araştırmacılar gerilme gevşemesi deneyine başlamadan önce malzemeyi $\lambda = 4.0$ 'a kadar deforme etmişler ve bu deformasyonda malzemeyi 1 dakika bekleterek malzemeye gerilme gevşemesi deneyi öncesi ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Deneylerinden, ön deformasyon prosedürünün gerilme gevşemesi deneyindeki I. bölgedeki ani gerilme düşüşünü azalttığını ve I. bölgeden II. bölgeye geçiş süresini kısalttığını belirtmişlerdir. Deneylerinden, $\lambda = 2.5$ 'a kadar gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğunu ve sıcaklık artışının ise gerilme gevşemesini hızlandırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca $\lambda = 2.5$ 'da 35-113 °C sıcaklık aralığında hava ve vakum ortamlarında yaptıkları deneylerde, hava ve vakum ortamlarındaki deneylerin benzer sonuç vermelerine karşın, sıcaklık arttıkça hava ortamlarındaki deneylerde gerilme gevşemesinin attığı gözlenmiş ve oksidasyonun gerilme gevşemesini arttırdığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar özellikle yüksek sıcaklıklarda oksidasyonun 2. bölgedeki gerilme gevşemesi değerini etkilediğini belirtmişlerdir.

Macdonald ve Ushakoff, daha önceki araştırmacıların aksine, basitliği ve kolaylığı sebebiyle tek eksenli basma deformasyonunu kullanarak gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirmişlerdir [161]. Araştırmacılar, özellikle, gerilme gevşemesi deneylerinde normalize edilmiş gerilme ile logaritmik zaman arasında lineer bir bağıntının olması gerektiği üzerine yoğunlaşmışlar ve gerilme gevşemesinin ilk andaki non-lineer davranışı dikkate almayarak normalize edilmiş gerilme ile logaritmik zaman arasında lineer bir bağıntı önermişlerdir. Birkaç saatlik gerilme gevşemesi deneyi sonunda elde edilen lineer eğriden malzemenin kullanım ömrünün belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında gerilme gevşemesine sıcaklığın ve nemin etkisini araştırmışlardır. Sıcaklık ve malzemedeki nem miktarının artmasıyla gerilme gevşemesinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Wilkinson ve Gehman, tek eksenli basma deformasyonu ile gerilme gevşemesi oluşturarak yeni bir deney düzeneği geliştirmişlerdir [162]. Deney düzeneğinde numuneye

uygulanacak basma kuvvetini hava basıncı ile gerçekleştirmişlerdir. Literatürde bu yöntem ilk defa Morris, James ve Segman tarafından kullanılmıştır [163]. Çalışmalarında gerilme gevşemesine deformasyon miktarının, sıcaklığın ve vulkanizasyon süresinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında gerilme gevşemesindeki deneysel verileri, aynı malzeme ve aynı şartlar için, tekrar elde edebilmek için malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamışlardır. Bunun için malzeme 1 dakika içerisinde maksimum deformasyona kadar üç defa basma deformasyonuna tabi tutulmuştur. Araştırmacılar malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın I. bölgedeki gerilme düşüşünü önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Deneylerde, deney başladıktan 0.1 saat (6 dakika) sonra belirli aralıklarla verileri kaydetmişlerdir. Ayrıca normalize edilmiş gerilmeyi de 0.1 saatteki değeri için elde etmişlerdir. GR-S (SBR) ve Hevea kauçuk numunelerinde deformasyon miktarının gerilme gevşemesine etkisinin olmadığını, sıcaklık ve vulkanizasyon süresinin artmasıyla gerilme gevşemesindeki ani düşüşün azaldığını deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Fakat deneylerini küçük deformasyonlar ($\lambda \geq 0.7$) için gerçekleştirmişlerdir.

Robinson ve Vodden, Baxter ve Vodden tarafından kurulan [164] deney düzeneğinde, kauçuk karışımlarına antioksidant malzemesinin katılmasının gerilme gevşemesine etkisini araştırmışlardır [165]. Tek eksenli çekme deformasyonu ile farklı sıcaklıklarda (100, 110, 120 °C) gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneylerinden antioksidant katkı maddelerinin numuneye katılmasının malzemenin sabit deformasyon altındaki ömrünü arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Eller, donanmadaki conta malzemesi uygulamalarındaki tasarımlar için, hem tek eksenli çekme hem de tek eksenli basma deformasyonlarında gerilme gevşemesi deneyleri yapmıştır [166]. Çalışmada, SBR ve BR (polibütadien kauçuk) deney numuneleri ilk önce 3 dakika deformasyon altında (çekme veya basma) tuttukten sonra 3 dakika sonunda uygulanan gerilme ölçülmüş ve 1 saat bekletildikten sonra numune 194 °C sıcaklıkta 46 saat yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Daha sonra tekrar numune çekme deformasyonu için 1 saat, basma deformasyonu için 5 saat beklemeye tabi tutmuş ve bu süre sonunda deforme edilerek 3 dakika sonunda gerilme değeri okunmuştur. Eller, çekme deformasyonu ile yapmış olduğu gerilme gevşemesi deneylerinde, SBR kauçuğunu $\lambda \leq 1.6$ ve BR kauçuğunu ise $\lambda \leq 1.8$ 'e kadar, basma deformasyon için gerçekleştirdiği deneyleri ise, her iki malzeme içinde, $\lambda \leq 0.7$ deforme ederek deneylerini gerçekleştirmiştir Çalışmada SBR ve BR kauçuklarının, çekme deformasyonunda, uzama oranının artmasıyla gerilme

değerinde önemli bir değişimin olmadığı, basma deformasyonu için ise gerilme değerinin artan uzama oranıyla azaldığını gözlemlemiştir. Fakat araştırmacının deneylerini küçük deformasyon bölgelerinde gerçekleştirdiği unutulmamalıdır. Danjard, kauçuk türü malzemelerin sürekli ölçüm sistemiyle gerilme gevşemesi davranışını ölçebilmek yeni bir cihaz geliştirmiş ve çalışmasında sadece cihazı tanıtmıştır [167].

Bartenev ve Galil-Ogly, 1956 yılında, kauçuk türü malzemelerin tekrarlı yüklemeye altında kopma ve dinamik yorulma davranışını sabit deformasyon ve sabit yük altında gerilme gevşemesi deneyleri ile incelemiştir [168]. Bu deneylerden, numune kopmadan önce, numuneye uygulanan N tekrarlı yüklemeye sayısı, deformasyon ve kopma için geçen zamanı belirleyerek numuneye uygulanan tekrarlı yüklemeye sayısı ile deformasyon arasında bir bağıntı önermişlerdir. Ayrıca kauçuk türü malzemelerin statik ve dinamik yorulma davranışlarını karşılaştırmışlardır.

Berry, 1957 yılında, kauçuk türü malzemelerin sürekli ölçüm ve aralıklı ölçüm sistemlerinde gerilme gevşemesini ölçebilecek helisel yay gerilme gevşeme cihazını geliştirmiştir [169]. Berry, diğer bir çalışmasında ise, numune kalınlığının, deformasyon miktarının, oksijen basıncının, vakum ortamının, sıcaklığın ve ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerilme gevşemesine etkisini araştırmıştır [170]. Bu çalışmasında özellikle sülfür ile vulkanize edilmiş doğal kauçuğun farklı oksijen basınçlarında ve sabit deformasyonda gerilme-zaman değişimini incelemiştir. Çalışmada elde edilen sonuçları, sülfür ile karşılıklı bağlar arasında oluşan oksidasyon ve oksidasyona uğramış karşılıklı bağların kesilmesi açısından yorumlamıştır. Berry, doğal kauçuk için $\lambda = 1.10 - 3.50$ uzama oranı aralığında gerilme gevşemesinin deformasyon miktarına bağlı olmadığını belirtmiştir ve deneylerinde ön deformasyon prosedürü uygulamamıştır.

Dunn ve Scanlan ise, Berry'nin geliştirdiği gerilme gevşemesi deney cihazını [169-170] daha da geliştirerek otomatik hale dönüştürmüşler ve deneylerini bu cihaz ile gerçekleştirmişlerdir [171].

Watanabe, 1962 yılında, NR, SBR, CR (neopren kauçuk) NBR, IIR (butil kauçuk), Viton-A ve iki farklı silikon sentetik kauçuk malzemeleri için $50-150^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında gerilme gevşemesi ve sünme deneylerini gerçekleştirerek bu kauçukların gerilme gevşemesi ve sünme özelliklerini birbirleri ile karşılaştırarak bu kauçukların termal ömürlerini belirlemişlerdir [154]. Gerilme gevşemesi deneylerini tek eksenli çekme deformasyonunda, $\lambda = 1.5$ deformasyon miktarında, 100 saat süreyle, hava ortamında ve $50 - 150^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında gerçekleştirmiştir. Tobolsky ve Eyring vizkoelastisite teorisi

[172] gereği normalize edilmiş gerilme ile $\log t$ (zaman) arasında lineer ilişkinin ne kadar süreyle geçerli olduğu araştırmışlardır. NR, SBR, IIR ve CR kauçuk malzemelerinin 100 °C’de 10 saat gibi kısa sürede lineerlikten saptığını gözlemlemişlerdir. Bu sürenin NR kauçuk malzemesi için 50 °C’de 100 saat, 70 °C’de 10 saat ve 100 °C’de 1 saat olduğunu gözlemlemiştir. SBR ve IIR kauçuklarının küçük sıcaklıklarda NR kauçuğundan daha hızlı gerilme gevşemesi gösterdiği, yüksek sıcaklıklarda ise NR kauçuğunun SBR ve IIR kauçuklarından daha hızlı gerilme gevşemesi davranışı gösterdiğini gözlemlemiştir. Vinil silikon ve Viton-A kauçuk malzemelerinin ise 100 °C’de 1000 saat gibi uzun süre lineer davranış gösterdiğini belirtmiştir. Araştırmacı NR ve CR kauçuğunun maksimum kullanılabilir sıcaklıklarını araştırmış ve NR kauçuğunun 70-80 °C ve CR kauçuğunun ise 90-100 °C sıcaklıklarına kadar kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu sıcaklıkların üzerinde oksidasyonun sebep olduğu gerilme gevşemesinin olduğunu bunun ise malzemenin ömrünü azalttığını belirtmiştir. Ayrıca SBR kauçuk için 70 °C sıcaklıkta $\lambda = 1.25$ ve $\lambda = 1.5$ sabit deformasyonda gerilme gevşemesi deneylerini yapmış ve bu sıcaklıkta deformasyon miktarının gerilme gevşemesine bağlı olduğunu öne sürmüştür. Literatürde bir çok araştırmacı bu sonucu sadece oda sıcaklığı için ifade etmiştir [161-163, 168-171].

Bernstein, Kearsley ve Zapas, 1963 yılında, kauçuk türü malzemelerin gerilme davranışını modelleyebilmek için iki basit bünye denklemi önermişlerdir [173]. Bu denklemlerden bir tanesi katı mekaniği diğeri ise akışkanlar mekaniği temellidir. Yapmış oldukları gerilme gevşemesi deneylerinden akışkanlar mekaniği teorisiyle önerdikleri denklemin malzemenin davranışını daha iyi modellediğini gözlemlemişlerdir. Mükemmel gazlardan esinlenerek önerdikleri bu denklemi “*Mükemmel Elastik Akışkanlar*” olarak adlandırmışlardır. Bu model ayrıca literatürde “*BKZ Akışkanı*” olarak da adlandırılmaktadır. Bir sonraki yıl aynı araştırmacılar önerdiklere modele termodinamik etkileri de ilave etmişlerdir [174]. 1988 yılında ise Bernstein, Kearsley ve Zapas tarafından önerilen modelin en optimal model olduğu Taner tarafından vurgulanmıştır [175].

Cotten ve Boonstra, 1967 yılında, katkı maddeleri katılmış kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi deneylerini gerçekleştirerek katkı maddesinin gerilme gevşemesine etkisini araştırmışlardır [176]. Bunun için ham kauçuk numunelerini tek eksenli basma, vulkanize edilmiş kauçuk numunelerini ise tek eksenli çekme deney düzeneğinde gerilme gevşemesi deneyine tabi tutmuşlardır. Oda sıcaklığında gerilme gevşemesi deneyinde gerilmedeki azalmanın

$$f_t = f_{1,0} t^{-n} \quad (13)$$

amprik bağıntısıyla ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Burada f_t ; anlık kuvveti, $f_{1,0}$; gerilme gevşemesi deneyinin birinci dakikasındaki kuvvet değeri, t ; dakika cinsinden zaman ve n ; ise malzeme katsayısıdır. Araştırmacılar ham kauçukta karbon siyahı katkı maddesinin gerilme gevşemesi değerini azalttığını, vulkanize edilmiş kauçukta ise etkinin çok daha küçük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar Mooney vizkositesi ile birinci dakikadaki gerilme gevşemesi değeri arasında bir bağıntının varlığını araştırmışlardır. Cotten ve Boonstra, cis-4 ve SBR kauçukları için $\lambda = 1.75 - 3.50$ uzama oranı aralığında gerilme gevşemesinin deformasyon miktarına bağlı olmadığını belirtmişler ve deneylerinde ön deformasyon prosedürü uygulamamışlardır.

Bartenev ve Lyalina, 1972 yılında, karbon siyahı katkı maddesinin gerilme gevşemesine etkisini araştırmışlardır [177]. Vulkanize edilmiş ve katkı maddesi katılmamış kauçuklarda meydana gelen gerilme gevşemesinin sebebinin fiziksel ve kimyasal olduğunu, vulkanize edilmiş ve karbon siyahı katkı maddesi katılmış kauçuklarda meydana gelen gerilme gevşemesinin sebebinin ise fiziksel, kimyasal ve katkı maddelerinin meydana getirdiği gerilme gevşemesinin olduğunu belirtmişlerdir. Kauçuk makro moleküllerinin, katkı maddelerinden kopmasıyla meydana gelen gerilme gevşemesini, ilk defa, katkı maddesinin meydana getirdiği gerilme gevşemesi olarak tanımlamışlardır.

Kusano ve Murakami, 1972 yılında, büyük deformasyonlarda katkı maddesi katılmamış üç farklı karışımdaki doğal kauçuk malzemesi için tekrarlı yükleme altında aralıklı ölçüm sistemini kullanarak gerilme gevşemesi davranışının kimyasal etkilerini incelemişlerdir [178]. Deneylerinde gerilme gevşemesinin hem sıcaklıktan hem de uzama oranından etkilendiğini belirterek gerilme gevşemesi davranışını modellemek için sıcaklık ve uzama oranının da dahil edildiği Arrhenius tipi bir bağıntı önermişlerdir. Araştırmacılar deneylerdeki tekrarlı yüklemeleri, diğer araştırmacıların aksine, küçük deformasyonlar yerine [168] büyük deformasyonlarda gerçekleştirmişlerdir.

Curro ve Salazar, 1977 yılında, fiziksel ve kimyasal gerilme gevşemesi davranışını birbirinden ayırt edebilmek için farklı sıcaklıklarda gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirmişlerdir [179].

Kusano ve Murakami, 1978 yılında, bir önceki çalışmasının [178] aksine katkı maddesi katılmış doğal kauçuk malzemesi için tekrarlı yükleme altında ve büyük

deformasyonlarda gerilme gevşemesi davranışının kimyasal etkilerini incelemişlerdir [180]. Araştırmacılar, katkı maddesi katılmış doğal kauçuk malzemesinde 70 °C ve daha düşük sıcaklıklardaki deneylerde gerilme gevşemesinin uzama oranı ve numune çekme hızına (frekans) bağlı olduğunu, 70 °C'nin üzerinde ise sadece uzama oranına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Gerilme gevşemesinin 70 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda polimer zincirleri arasındaki birincil bağlar ve polimer ve karbon siyahı arasındaki bağların kesilmesinden kaynaklandığını, 70 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ise sadece polimer ve karbon siyahı arasındaki bağların kesilmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar bulgularını $\log(\sigma/\sigma_t) - t$ grafikleri üzerinden yorumlamışlardır. Ayrıca bu çalışmalarındaki sonuçları, bir önceki çalışmalarında [178], katkı maddesi katılmamış doğal kauçuk için, buldukları sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve katkı maddesi katılmış ve katılmamış malzemelerin tekrarlı yükleme altındaki gerilme gevşemesi davranışlarının, küçük deformasyon bölgesi dışında, tamamen birbirinden farklı olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla da yorulma davranışlarının da birbirinden farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Brown, 1980 yılında, kauçukların hızlandırılmış yaşlanma özelliklerinin belirlenmesi için en iyi ve direkt yöntemin gerilme gevşemesi deneyi olduğunu belirtmiştir [157]. Çalışmasında numuneye ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerekli olduğunu özellikle de numunenin tutma çeneleri arasına bağlanırken kuvvette meydana gelen sapmaların giderilmesi için bu ön deformasyon prosedürü uygulamaya ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Fakat ön deformasyon prosedürü uygulamanın gerekliliğini deneysel verilerle göstermemiştir.

Brown ve Bennett, 1981 yılında, literatürde o ana kadar mevcut basma deformasyonu ile yapılan gerilme gevşemesi deney düzeneklerini anlattıktan sonra WALLACE/RAPRA basma gerilme gevşemesi deney düzeneğini ve çalışma prensibini anlatmışlardır [181].

James ve Peppiatt, 1981 yılında, sulu ortamlardaki kauçuk malzemelerin gerilme gevşemesi davranışını incelemişlerdir [182]. Çalışmalarında, sulu ortamlarda korozyona uğraması sebebiyle, Lucas aparatında değişiklik yapmışlar ve sulu ortamlar için deney prosedürünü önermişlerdir. Lucas aparatındaki değişiklik ile malzemenin sulu ortamda, problemsiz iki yıl boyunca test edilebileceğini belirtmişlerdir.

Meier, Kuster ve Mandell, 1984 yılında, NR ve NBR kauçuk malzemelerinin uzun dönemdeki (16 yıl) gerilme gevşemesi davranışını, incelemişler ve kısa süreli (maksimum 64 hafta) gerilme gevşemesi deneylerinden elde ettikleri verilerle indirgenmiş değişkenler metodunu kullanarak aynı malzemenin uzun süreli gerilme gevşemesi davranışını

belirlemeye çalışmışlardır [183]. Deneyler oda sıcaklığında (20 °C) ve hava ortamında gerçekleştirilmiştir. İndirgenmiş değişkenler metodundan tahmin edilen sonuçların, 16 yıl için, oldukça iyi sonuç verdiğini fakat daha uzun süreli (20-50 yıl) tahminlerde kimyasal etkilerin sebep olduğu gerilme gevşemesi sebebiyle indirgenmiş değişkenler metodundan elde edilecek sonuçların iyi netice vermeyeceğini belirtmişlerdir.

Birley, Fernondo ve Tahir, 1986 yılında, ASTM ve BS standartlarındaki [184-186] gerilme gevşemesi ile ilgili bazı eksiklikleri ve deney prosedürlerindeki yetersizlikleri gündeme getirerek çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmışlardır [187-188]. Çalışmalarını tek eksenli çekme deformasyonu ile gerçekleştirerek, aynı numune için, deneylerin tekrar edilebilirliği, numune boyutları, deformasyon hızı, sıcaklığın etkisi ve ön deformasyon prosedürü uygulamanın etkisini araştırmışlardır. Doğal kauçuk malzemesi üzerinde yaptıkları çalışmada, çekme hızının artmasıyla ilk andaki başlangıç gerilmesinin arttığını ve katkı maddesi katılmış malzemede daha hızlı gerilme gevşemesi meydana getirdiğini, katkı maddesi katılmamış malzemelerde ise gerilme gevşemesi miktarının çekme hızıyla değişmediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar BS 903 Part A-42 [186] İngiliz standardında yer alan ön deformasyon prosedürü uygulamışlar karbon siyahı katkı maddesi katılmış doğal kauçuk malzemede 23 ve 100 °C'de numuneyi ilk önce beş defa $\lambda = 0.75$ deformasyon oranında yükleme-boşaltma deformasyonuna tabi tutmuşlar ve bu işlemten sonra minimum 16 saat, maksimum 48 saat bekleyerek gerilme gevşemesi deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonunda ön deformasyon prosedürü uygulamanın malzemenin özelliklerine çok önemli bir etkisinin olmadığını belirterek deneylerini ön deformasyon prosedürsüz olarak gerçekleştirmişlerdir. 100 °C'de antioksidant katkılı veya katkısız malzemelerin gerilme gevşemesinin benzer davranış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Stenberg ve araştırma grubu, diğer araştırmacıların aksine, sürekli ve aralıklı ölçüm ile gerilme gevşemesinin belirlenmesi yerine tek eksenli basma deformasyonunu kullanarak dinamik gerilme gevşemesi deneylerini gerçekleştirmişlerdir [189-196]. 1973-1989 yılları arasında kauçuk türü malzemelerin farklı ortam, farklı sıcaklıklardaki dinamik gerilme gevşemesi davranışı ve yaşlanma özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca kurdukları deney düzeneğinde sürekli ve aralıklı ölçüm ile gerilme gevşemesi deneylerini yaparak elde ettikleri sonuçları dinamik gerilme gevşemesi deneyi sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Othman ve Hepburn, 1992 yılında, kauçuk türü malzemelerin hızlandırılmış yaşlanma karakteristiğinin belirlenebilmesi için, çekme deformasyonu ile gerilme gevşemesi davranışının incelenmesinin en iyi yöntemlerden biri olduğunu belirtmişler ve

deneylerinin tek eksenli çekme deformasyonu ile gerçekleştirmişlerdir [197]. Bunun sebebini ise herhangi bir çevre şartının ince çekme numunelerinde daha çabuk hissedilmesi, daha uzun numune kullanarak şekil değişimi ölçümlerinde daha az hata yapılması ve numunedeki en ufak bir gerilmenin daha hassas olarak belirlenebilmesi olarak belirtmişlerdir. Bunun için sürekli ölçüm tekniğinde basit ve ucuz bir deney düzeneği geliştirerek çalışmalarında bu deney düzeneği ve deney prosedürünü açıklamışlardır.

Davies, De ve Thomas, 1996 yılında, katkı maddesi katılmış ve katılmamış doğal kauçuk ve SBR kauçuk malzemelerinin gerilme gevşeme davranışını tekrarlı yükleme durumu için incelemişlerdir [198]. İlk birkaç yükleme dışında zaman ve gerilme arasında lineer bir ilişkinin olduğunu gözlemlemişler ve bunun için ampririk bir bağıntı önermişlerdir. Ayrıca çalışmada tekrarlı yükleme ve statik gerilme gevşeme davranışını karşılaştırmışlardır.

Spetz, 1998 yılındaki raporunda, hem sürekli hem de aralıklı ölçüm tekniği için geliştirdikleri deney düzeneklerini tanıtmışlar ve gerilme gevşemesi deneyinden malzeme ömrünün nasıl belirlenebileceğini açıklamışlardır [152].

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Kauçuk malzemeler, endüstride her geçen gün kullanım alanları çoğalan mühendislik malzemeleridir. Sonlu elemanlar yöntemi gibi bilgisayar destekli tasarıma yönelik sayısal yöntemler günümüzde mühendislik uygulamalarının vazgeçilmez araçlarından. Bu yöntemlerin yapının davranışını modellemedeki başarıları, diğer etkenler yanında, modele girilen verilerin gerçeği ne ölçüde doğru bir şekilde yansıttıklarına bağlıdır. Bu sebeple kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışı deneysel olarak belirlenerek matematiksel modeli kurulmalı ve bu matematiksel model içerisindeki veriler doğru olarak belirlenmelidir.

Kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi, katkı maddeleri ve üretim yöntemlerine bağlı olarak fiziksel özelliklerindeki çeşitlilik yanında, gerilme gevşemesi, Mullins etkileri, kalıcı deformasyon, şekil değiştirme hızı ve histerezis gibi inelastik özellikler sergilemeleri nedeniyle zorluklar içermektedir. Literatürde, kauçuk malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışını modellenmesinde, yukarıda belirtilen inelastik özelliklerin katılmadığı, çok sayıda şekil değiştirme enerji fonksiyonu

önermişlerdir (Şekil 1). Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerin de içerisinde olduğu, bir matematiksel modelin kurulabilmesi için her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme davranışındaki etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Çekme ve basma deformasyon bölgelerinde farklı davranış göstermeleri nedeniyle bu malzemeler, metal malzemelerde olduğu gibi, sadece tek eksenli çekme deformasyonundan elde edilen bilgilerle modellenememektedir. Bu deneysel veriler çoğu kez tek eksenli basma deneyi veya kauçuğun sıkıştırılmazlık özelliğinden dolayı tek eksenli basma deformasyonunun eş değeri olan iki eksenli çekme deneylerinin de gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. Bunun dışında, literatürde, kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışını modellemek veya modellenin doğruluğunu test etmek için farklı mekanik deneyler yapılmaktadır (Şekil 6). Kauçuk malzemenin vizkoelastik bir malzeme olması yani bazı mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi de gerçekçi modellerin kurulmasında diğer bir sorun kaynağıdır. Literatür incelemesinde tartışılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, konuya yönelik araştırmalarda ortak temel amaçlardan biri, belki de en önemlisi, en az sayıda deneysel veri ile tüm bu inelastik özellikleri içeren, olabildiğince gerçekçi modellerin kurulmasıdır.

Literatürde, farklı katkı maddeleri içeren değişik kauçuk türleri için inelastik özellikler, genellikle, ya tek tek incelenmiş ya da belirgin bir durumu yansıtan yükleme koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm bu inelastik özelliklerin bir arada incelenerek bu inelastik özelliklerin tek bir modelde toplandığı çalışma yapılmamıştır ve literatürde bu konuda boşluk vardır.

En az sayıda deneysel veri ile gerçekçi bir modelin kurulabilmesi iki adımlı bir araştırma programının yürütülmesini gerektirmektedir. Bunlardan ilki değinilen inelastik özellikleri tek tek modellemede gerekli olan en az sayıdaki deneysel verinin neler olması gerektiğinin saptanması. İkincisi ise bu inelastik özelliklerin birbirleri ile etkileşimlerinin anlaşılması. İkinci aşamanın başarısı veya konunun temel başlangıç noktası ise değinilen inelastik özelliklerin tam ve doğru anlaşılmasıdır.

Bu nedenle bu tez çalışmasında deformasyon sebebiyle kristalize olmayan SBR ve NBR kauçukları ile deformasyon sebebiyle kristalize olabilen NR kauçuğunun inelastik özelliklerinden, gerilme gevşemesi, Mullins etkileri, kalıcı deformasyon, şekil değiştirme hızı ve histerezisin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkileri deneysel olarak incelenecektir. Ayrıca SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerin, yukarıda belirtilen, kristalizasyon dışındaki her bir inelastik özelliğin malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisini belirlenmesi, kauçuk malzemelerin Mullins etkilerinden, kalıcı

deformasyondan, histerezisden gerilme gevşemesinden, şekil değiştirme hızından bağımsız ve yükleme-boşaltma çevrimleri boyunca aynı değerleri veren denge halindeki gerilme-şekil değiştirme verilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilecek denge halindeki gerilme-şekil değiştirme verileri ise Şekil 1'de verilen şekil değiştirme enerji fonksiyonlarına benzer bir modelin kurulmasında veya bu modellerin doğruluğunun test edilmesinde temel teşkil edebilir.

Çalışmada her bir inelastik özelliği inceleyebilmek için özel deney prosedürleri geliştirilerek yukarıda belirtilen inelastik özellikler hem tek tek ve hem de etkileşimli olarak incelenecektir. Bu amaca yönelik olarak bir bilgisayar kontrollü tek eksenli çekme deney düzeneği tasarlanarak imal edilmiştir. İncelenmesine karar verilen inelastik özelliklerin modellenmesinde etkin olan parametrelerin belirlenmesine yönelik deney prosedürlerinin neler olması gerektiği, literatürden de yararlanılarak, belirlenecektir. Özellikle, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın hangi tür yükleme koşullarını içermesi gerektiği belirlenerek bu prosedürlerin malzemenin inelastik özelliklerine etkileri incelenecektir. Her bir inelastik özelliği modellemeye yönelik temel deneysel parametreler belirlendikten sonra bu parametreleri kullanarak incelenen kauçuk malzemelere ait inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmeye çalışılacaktır. Kauçuk türü malzemelerin teorik modellenmesine yönelik olarak ilerde yapılması düşünülen ilave deneysel ve teorik çalışmalara alt yapı oluşturma, çalışmanın bir diğer amacıdır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Kauçuk türü malzemelerin tek eksenli çekme deformasyonunu gerçekleştiren standart çekme makineleri ticari olarak mevcut olmakla birlikte bu deney düzenekleri ve deney düzeneğini kontrol eden yazılımlar oldukça sınırlı kapasitede olmaları yanında oldukça da pahalıdırlar.

Bu amaçla, yapılan çalışmada, kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerini inceleyebilmek için bir tek-eksenli çekme deney makinası tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu tezdeki çalışmada amaç; kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi olduğundan, inelastik özellikleri incelerken bazı deneylerin saatlerce süreceği görülmüş bu nedenle de deney düzeneğinin bilgisayar kontrollü olması gerektiğine karar verilmiştir. Bu sebeple, tek eksenli çekme deney düzeneğinin bilgisayar ile kontrolü NI-LABVIEW ortamında hazırlanan yazılım vasıtasıyla yapılmıştır. Yazılımda kauçuğun şekil değiştirme hızı, kalıcı deformasyon, histerezis, Mullins etkileri ve gerilme gevşemesi inelastik özelliklerini inceleyebilmek için, literatürdeki kaynaklardan da yararlanarak, yedi farklı deney prosedürü hazırlanmış ve bu yedi prosedür yazılım içerisine dahil edilerek tüm deneylerin bilgisayar kontrollü yapılması sağlanmıştır. Ayrıca geliştirilen yazılım, incelenmesi düşünülebilecek yeni deney prosedürlerinin ilavesine de olanak tanımaktadır.

Deneysel çalışmalarda, deformasyon sebebiyle kristalize olabilen veya olmayan malzemelerin kullanılması düşünülmüştür. Bu sebeple çalışmada deformasyon sebebiyle kristalize olmayan SBR ve NBR sentetik kauçuğu ile kristalize olabilen NR kauçuğu kullanılmış ve bu malzemelere ait inelastik özellikler incelenmiştir.

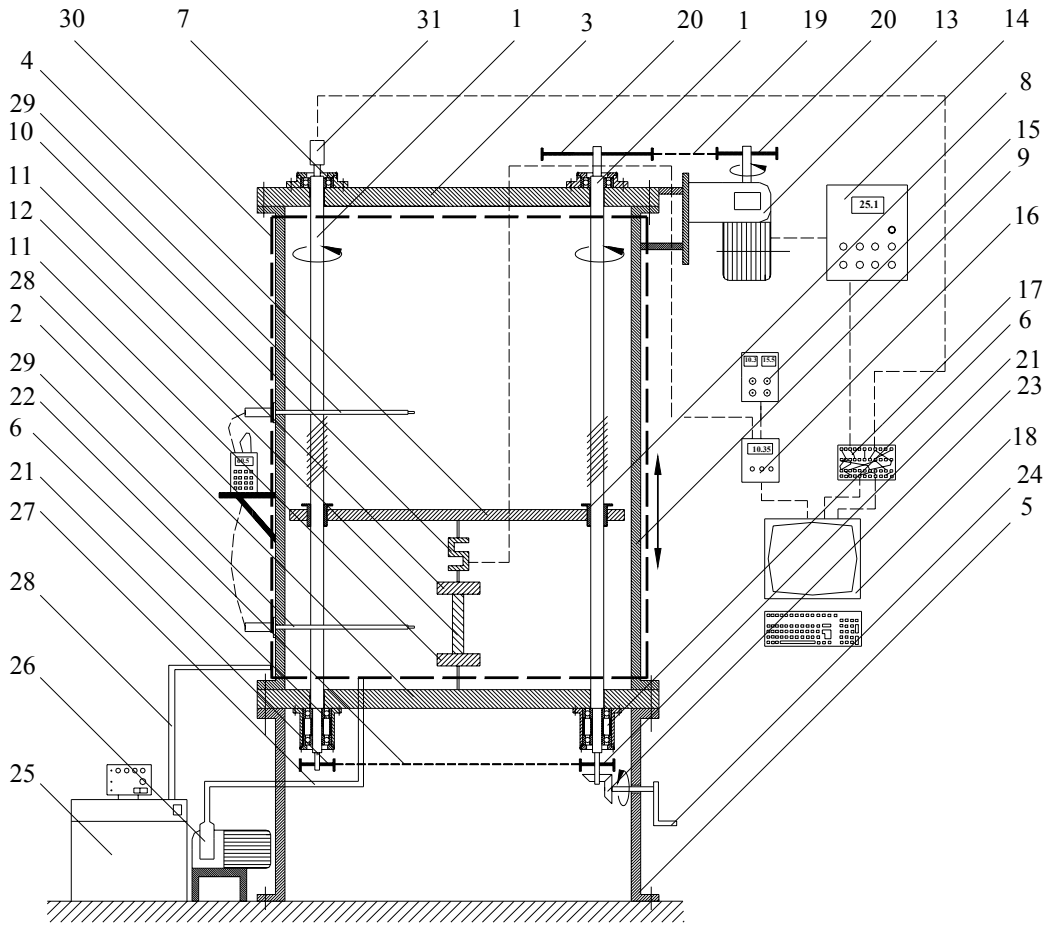
Tez çalışmanın bu bölümünde önce tasarım ve imalatı gerçekleştirilen tek eksenli çekme deney makinasının özellikleri ve deney düzeneğinin kontrolünü gerçekleştirecek olan bilgisayar programının kullanımı tanıtılmıştır. Daha sonra malzemelerin inelastik özelliklerini incelemek için deney numunelerine uygulanacak olan özel deney prosedürleri ve deney koşulları tanıtılmış ve son olarak da deneyde kullanılan malzemelerin karışımları verilmiştir.

2.2. Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği

Tasarım ve imalatı K.T.Ü. Makine Mühendisliği, Mekanik laboratuvarında gerçekleştirilen tek eksenli çekme deney düzeneği Şekil 9’da gösterilen sisteme uygun biçimde hazırlanmıştır. Deney düzeneğinin resmi Şekil 11’de, genel krokisi Şekil 12’de ve genel özellikleri ise Tablo 5’de verilmiştir.



Şekil 11. Tek eksenli çekme deney düzeneğinin resmi



1	Tahrik Mili	18	Bilgisayar
2	Alt Tabla	19	Kayış
3	Üst Tabla	20	Kasnak
4	Hareketli Tabla	21	Zincir Dişlisi
5	Sabitleme Ayağı	22	Zincir
6	Yataklama Elemanları	23	Konik Dişli
7	Yataklama Elemanları	24	Elle Tahrik Kolu
8	Hareket Somunu	25	Sabit Sıcaklık Ünitesi
9	Taşıyıcı Ayaklar	26	Pompa
10	Yük Hücresi	27	Yağ Basma Hattı
11	Tutma Çenesi	28	Yağ Dönüş Hattı
12	Numune	29	Sıcaklık Probu
13	Redüktörlü Motor	30	Yalıtım Odası
14	Hız Kontrol Ünitesi	31	Artımsal Enkoder
15	Güç Ünitesi		
16	Yük Hücresi Amplifikatörü	----	Elektrik Bağlantı Kablosu
17	Bağlantı Kartı	=====	Yalıtım Odası

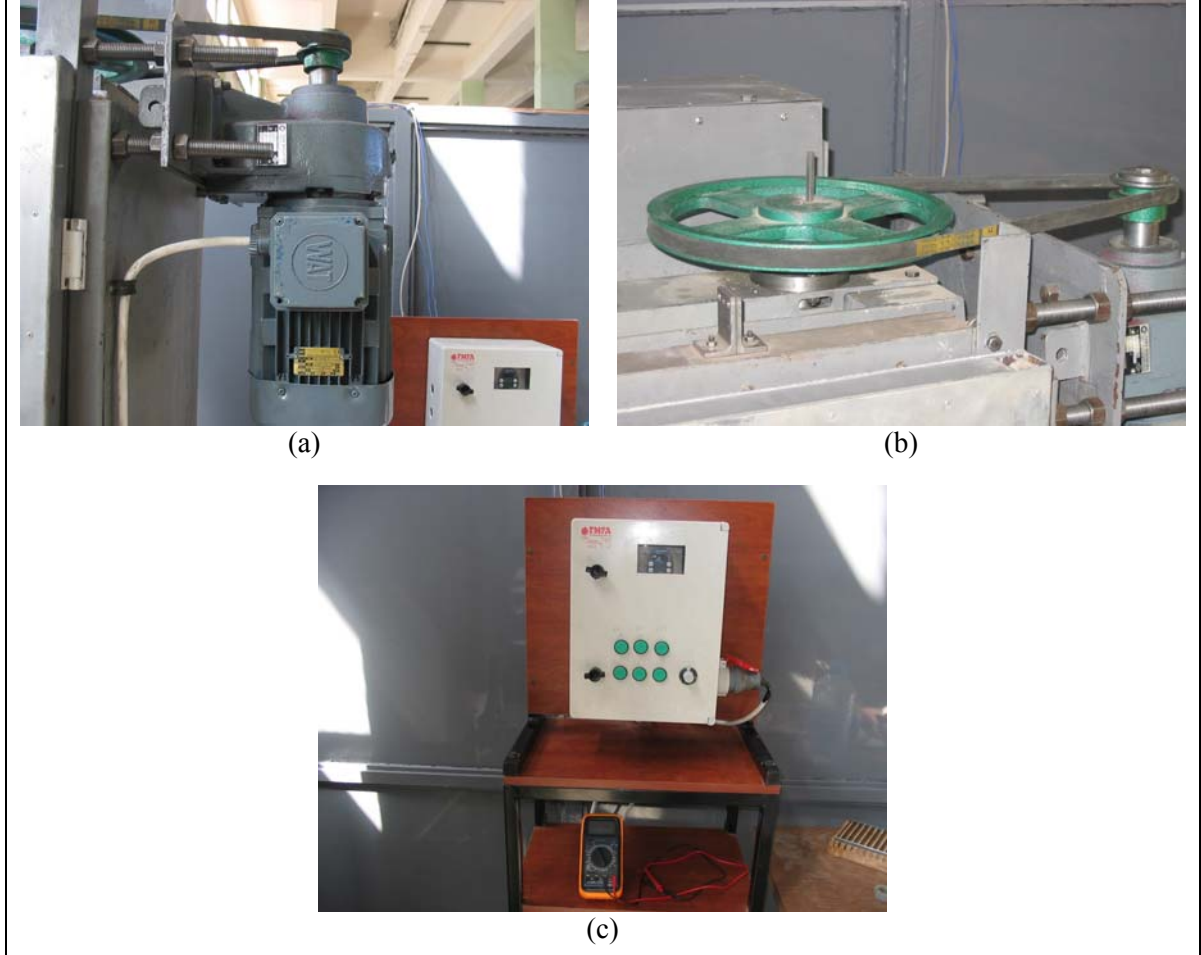
Şekil 12. Tek eksenli çekme deney düzeneği krokisi

Tablo 5. Tek eksenli çekme deney düzeneğinin özellikleri

TEK EKSENLİ ÇEKME DENEY DÜZENEĞİ ÖZELLİKLERİ	
Özellikler	Kapasite
Deney Düzeneği Max. Yük Kapasitesi	: 10 kN
Yük Hücresi (Load Cell) Kapasitesi	: 100 kg
Yük Hücresi Okuma Hassasiyeti	: 0.005 kg
Artımsal Enkoder Darbe Sayısı	: 2000 darbe/çevrim
Artımsal Enkoder Okuma Hassasiyeti	: 0.75 µm
Tutma Çenesi Yük Kapasitesi	: 5 kN
Şekil Değiştirme Hız Aralığı	: 0 – 400 mm/dak.
Maksimum Yer Değiştirme (ΔL)	: 500 mm
Minimum Veri Okuma Hızı	: 0.4 s
Sıcaklık Odası Ayar Hassasiyeti	: ± 0.2 °C
Çalışma Sıcaklık Aralığı	: 20 - 120 °C
Sıcaklık Odası Boyutları	: 50*60*110 mm ³

Deney düzeneğinin tahriki alternatif akımla çalışan, 1400 d/dak çıkış hızına sahip, 3 kW'lık elektrik motoru (13) (Şekil 2) ile sağlanmıştır. Deneylein düşük hızlarda gerçekleştirilecek olması sebebiyle elektrik motoru çıkışına redüktör (13) yerleştirilerek motor devri 150 d/dak'ya düşürülmüştür (Şekil 13a). Redüktör çıkışı ise bir kayış kasnak sistemi (19, 20) ile deney düzeneği tahrik miline (1) verilmiştir (Şekil 13b). Redüktör ve tahrik mili arasında kullanılan kayış kasnak mekanizmasında 1/3 devir düşürme mekanizması kullanılarak motorun devrinin yaklaşık 50 d/dak'ya (75 mm/dak.) düşürülmesi sağlanmıştır. Böylece motor çıkış devri yaklaşık 28 kat düşürülmüştür. Deneylei çok daha düşük devirlerde gerçekleştirebilmek ve istenilen aralıklarda hız kontrolünü sağlayabilmek için elektrik motoru (13), 4kW'lık hız kontrol ünitesi (14) ile kontrol edilmiştir (Şekil 13c). Deney düzeneği tahrik mili ve redüktör mili ucuna takılan kasnakların Tablo 6'da belirtilen 3 farklı konumda yerleştirilmeleri ve hız kontrol ünitesi yardımıyla Tablo 6'da verilen hızlarda deneylei gerçekleştirilmiştir. Uygun kasnak sistemi seçildikten sonra, deneylei yapılacak hız, hız kontrol ünitesinden ayarlanabilmektedir. Deney düzeneğinde numuneler 0-400 mm/dak. şekil değiştirme hızında deforme edilebilmektedir. Daha yüksek hızlardaki deneyleide ise, hem yüksek hızdan kaynaklanan

titreşimler hem de yüksek hızda verilerin kaydedilmesinde sistemi kapasitesinin sınırlı oluşu nedeni ile sağlıklı sonuçlar alınamamıştır.



Şekil 13. Deney düzeneği tahrik sistemi

Tablo 6. Deney düzeneği kasnak grupları

Kasnak Grubu	Devir Aralığı (d/dak.)	Devir Aralığı (mm/dak.)	Redüktör Çıkışı Kasnak Çapı	Tahrik Mili Kasnak Çapı
1. Grup	0 - 40	0 - 60	1X	3X
2. Grup	40 - 120	60 - 180	1X	1X
3. Grup	120 - 300	180 - 450	3X	1X

Tahrik millerinin (1), altta (2) ve üstteki (3) plakalar üzerine yataklanarak serbest dönmeleri sağlanmıştır. Deney düzeneğinin alt yataklama plakasında hem yataklama hem tahrik millerinin merkezlemesini sağlamak için Şekil 14a'da görülen yataklama sistemi, üst yataklama plakasında ise Şekil 14b'de görülen yataklama sistemi kullanılmıştır.

Tahrik milleri (1) arasındaki hareket, zincir-dişli çark mekanizması (21, 22) ile sağlanmıştır (Şekil 15a). Ayrıca deney düzeneğini motor dışında elle de tahrik edebilmek için (24) tahrik millerinden bir tanesine konik dişli çark (23) mekanizması kurulmuştur (Şekil 15b). Elektrik motorundan gelen hareketle tahrik milleri dönmekte ve hareket tablası (4) aşağı yukarı hareket etmektedir.



Şekil 14. Tahrik milleri yataklama sistemi

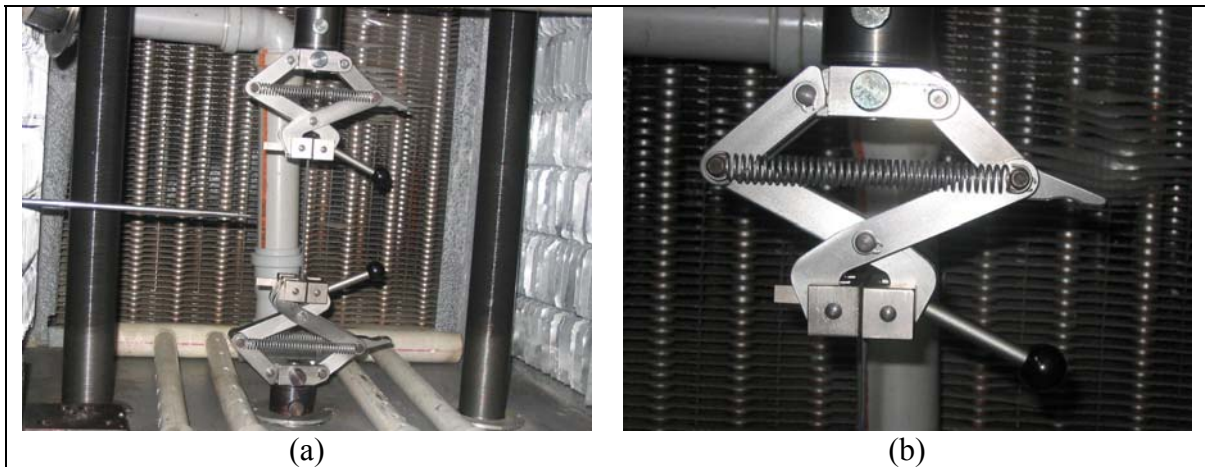


Şekil 15. a) Tahrik millerine zincir dişli çark mekanizması ile hareketin iletilmesi, b) Elle tahrik mekanizması

Deneyler esnasında, tutma çeneleri arasındaki yer değiştirmenin ölçümü alınmıştır. Deneylerden doğru verilerin alınabilmesi için deneyler esnasında çenelerin numuneyi kaçırmaması gerekmektedir. Özellikle bu durum kauçuk türü malzemeler gibi sıkıştırılmaz olan malzemelerde problem olmaktadır. Eğer malzeme tamamen sıkma

prensibine göre rijid bağlanırsa, numune deformasyon sırasında çenelere bağlantı yerinden kesilmekte, çok sıkılmaksızın bağlanması durumunda ise çenelerde kaçırma meydana gelmektedir. Özellikle bu problemler büyük şekil değiştirmelerde meydana gelmektedir. Literatürde, bu problemi ortadan kaldırmak için, numunenin tutma çenelerine yapılandırılması tekniğinden başka, farklı tutma çeneleri kullanılmıştır [107, 199-201]. Yapılan çalışmada ise bu problemi ortadan kaldırmak için artan şekil değiştirmelerde daha fazla sıkma kuvveti uygulayan mekanizmaya sahip ve 5 kN kapasiteli tutma çeneleri (11) kullanılmıştır (Şekil 16). Tutma çenelerinden bir tanesi alt yataklama plakasına (2) sabitlenirken diğeri yük hücresi tarafına sabitlenmiştir.

Deneyle sırasında numuneye uygulanan kuvveti ölçebilmek için 100 kg kapasiteli ve (-40) - (+80) °C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen 9363 model yük hücresi (10) kullanılmıştır. Deneylede numuneye uygulanan kuvveti ölçerken sadece çekme kuvvetini ölçmek ve bunun dışında küçük moment etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla yük hücresine momentleri ortadan kaldırıcı ve sadece numuneye etkiyen çekme kuvvetini alan oynak bilyalı rulman mekanizması eklenmiştir (Şekil 17a). Bu mekanizmanın bir ucu hareket tablasına (4), diğeri ucu ise hareketli tutma çenesine (11) bağlanmıştır (Şekil 17b).



Şekil 16. Tutma Çeneleri

İki tutma çenesi arasına bağlanan numunenin (12) hareket tablasının (4) yukarı doğru hareketi ile tek eksenli deformasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu esnada numuneye uygulanan kuvvet yük hücresi tarafından analog sinyal olarak üretilmekte ve bu sinyal yük hücresi amplifikatörüne (16) aktarılmaktadır (Şekil 18a). Analog sinyal yük hücresi amplifikatöründe hem filtrelenmekte hem de sayısallaştırılmaktadır. Yük hücresi

amplifikatöründen çıkan sinyal ise bilgisayara seri porttan alınarak işlenmektedir. Yük hücresi amplifikatörü 5A ve 0-30 V aralığında ayarlanabilen, 2305 model DC güç kaynağı (15) ile beslenmektedir (Şekil 18b). Yük hücresinin beslemesi ise yük hücresi amplifikatöründen sağlanmaktadır.



Şekil 17. a) Moment giderici mekanizma, b) Yük hücresinin hareket tablasına bağlantı tertibatı



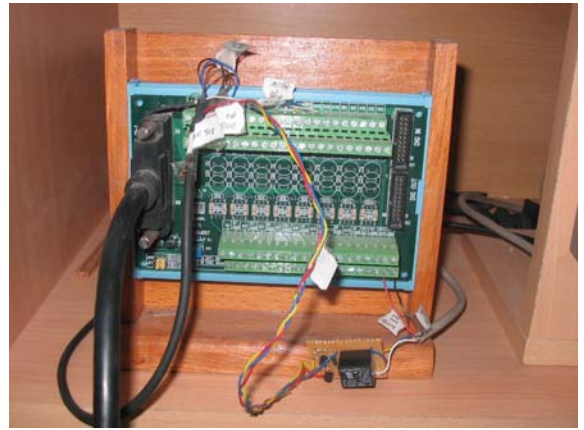
Şekil 18. a) Yük hücresi amplifikatörü, b) DC güç kaynağı

Kauçuk türü malzemelerin tek eksenli çekme deformasyonlarında numunenin, uygulanan kuvvet altında uzaması endüstriyel uygulamalarda ve literatürde konvansiyonel uzama ölçerler, artımsal enkoderler, lazer uzama ölçerler veya video uzama ölçerler ile yapılmaktadır. Konvansiyonel uzama ölçerler numune üzerine çok küçük iğne ayaklarla tutturulmaktadır. Bu ise malzemede çentik etkisi meydana getirmektedir. Artımsal enkoder malzemenin tutma çeneleri arasındaki mesafenin değişimini ölçmektedir. Lazer uzama

ölçerle ise, numune üzerine çizilen iki çizginin yer değiştirmesi lazer yöntemiyle ölçülmektedir. Benzer şekilde video uzama ölçer ise yine numune üzerine çizilen iki çizginin video ile kayıt edilmesiyle ölçmektedir. Son iki yöntem daha çok son yıllarda kullanılan ölçüm yöntemleri olup her ikisinde de malzemeye temas etmeden numunenin orta bölgesinden ölçüm alınmaktadır. Bu çalışmada malzemede meydana gelen uzama, son iki yöntemin pahalı ve ilk yöntemin ise numune üzerinde çentik etkisi yapması sebebiyle artımsal enkoder vasıtasıyla ölçülmüştür. Bunun için 2000 darbe/çevrim özelliğine sahip artımsal enkoder (31) kullanılmıştır. Enkoder tahrik millerinden bir tanesinin ucuna özel bir kaplin ile bağlanmıştır (Şekil 19a). Deney düzeneğindeki tahrik millerinin hatvesi 1.5 mm olarak imal edildiğinden hareket tablasının yer değiştirmesi dolayısıyla da numunenin uzaması $0.75 \mu\text{m}$ hassasiyette ölçülebilmektedir (Burada çekme deformasyonları sırasında numunenin tutma çenelerinden kaymadığı kabulü yapılmıştır). Enkoder'dan üretilen darbe sinyalleri bağlantı kartına girilmiştir (Şekil 19b). Bağlantı kartından alınan sinyaller ise bilgisayarın PCI slotuna takılan data acquisition kartına alınarak deney düzeneği için yazılan özel programda işlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 19. a) Artımsal tip enkoderın tahrik miline bağlantısı, b) Data acquisition bağlantı kartı

Deneyler sırasında tahrik motoru deney düzeneği için yazdırılan program vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Hız kontrol ünitesinin, bilgisayar yardımı ile kontrol edilebilme özelliğinin olması sebebiyle hız kontrol ünitesi ile bilgisayar, bağlantı kartı ve data acquisition kartı üzerinden haberleştirilmiştir. Böylece tahrik motorunun istenen anda çalışması, istenen anda durması, sağa ve sola dönüşleri bilgisayar vasıtasıyla sağlanmıştır.

Deney düzeneğinde farklı sıcaklıklarda deneyler yapabilmek için iç hacmi 50*66*100 (cm) olan bir sıcaklık odası (30) oluşturulmuştur. Sıcaklık odasının kapısı da dahil olmak üzere tüm yüzeyleri 4 cm'lik cam yünü ile ısı yalıtımı yapılmıştır. Sıcaklık odasında farklı sıcaklıklarda deneylerin yapılması sırasında içerisinin görülebilmesi amacıyla deney düzeneği kapısına 25*50 cm boyutunda ısıya dayanıklı çift cam yerleştirilmiştir (Şekil 20a). Sıcaklık odasının arka ve yan çeperlerine bakır boru ve alüminyum kanatçıklardan oluşan petekler monte edilmiştir. Petekler birbirlerine seri şekilde bağlanarak ısıtma odanın ısıtılması sağlanmıştır (Şekil 20b).



(a)

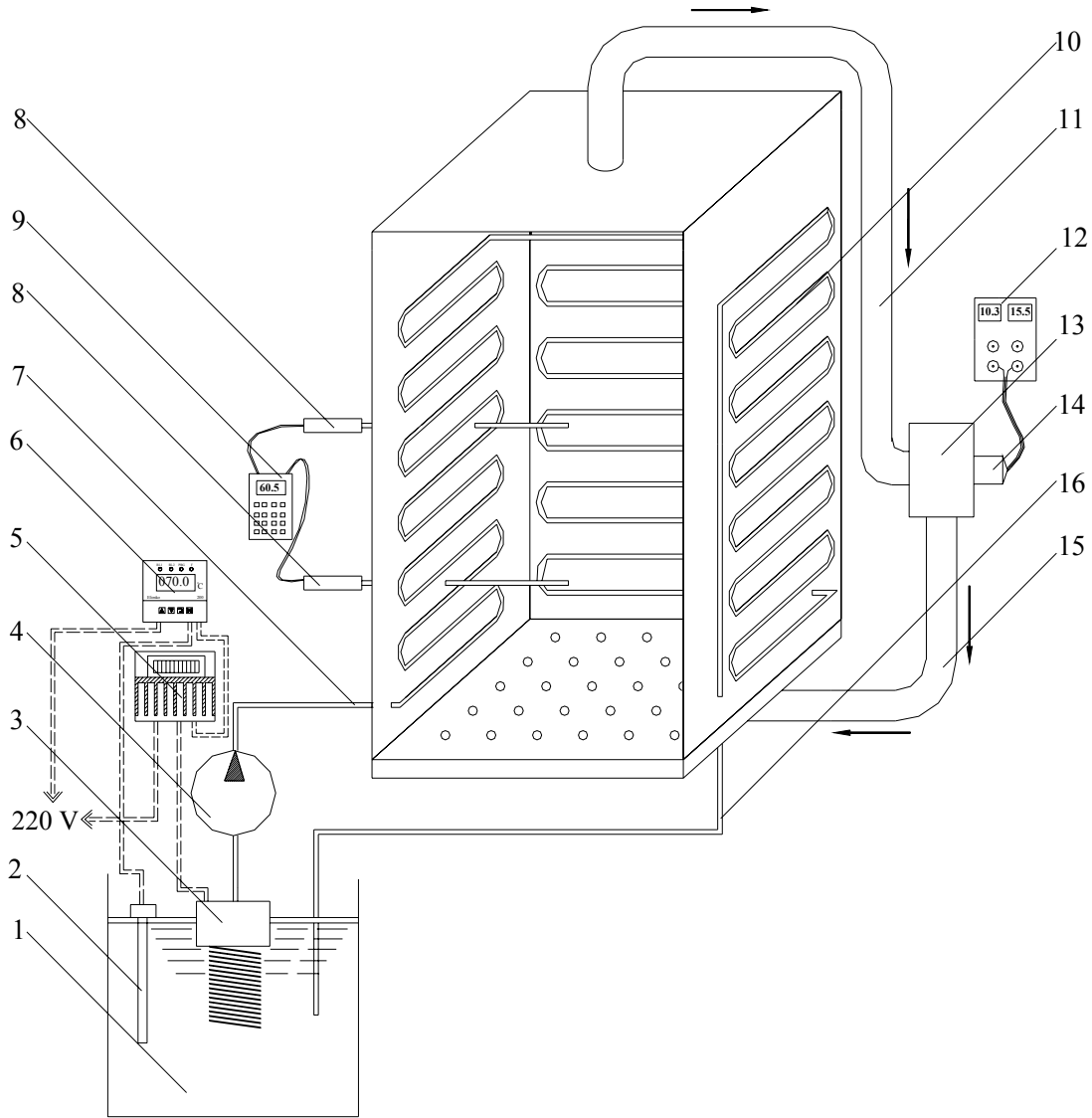


(b)

Şekil 20. a) Deney düzeneği kapısı ve deneylerin izlenebileceği ısıya dayanıklı çift cam, b) Deney düzeneği ısıtma eşanjörleri

Deney düzeneğinin ısıtılması, sıcaklığın okunması ve deney düzeneğinin içerisindeki sıcaklığın sabitlenmesini sağlayan tesisata ait sıcaklık odası sirkülasyon krokisi Şekil 21'de verilmiştir. Sıcaklık odasının ısıtılması sabit sıcaklık banyosu (1) ile sağlanmıştır (Şekil 22). Kullanılan sabit sıcaklık banyosu (-40) - (+150) °C sıcaklık aralığında ± 0.1 °C hassasiyette sabit sıcaklık sağlayabilmektedir. Sabit sıcaklık banyosunun sıvı tankı 7.5"*1 1.5"*6" boyutlarında olup 12 litre hacim kapasitesi vardır. Sabit sıcaklık banyosunun ısıtma kapasitesini arttırmak için banyosunun içerisine 7500 W gücünde ek rezistans (3) yerleştirilmiştir (Şekil 23). Ek rezistansın kontrolü ise sıcaklık kontrolörü (6) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 24a). Sıcaklık kontrolörü triyak sürücü (5) ile kontrol edilmiştir. Sabit sıcaklık banyosu içerisine yerleştirilen rezistans termometre (2) sıcaklık kontrolörüne bağlanarak istenilen sıcaklık aralığında sıcaklık kontrolörünün yağ sıcaklığını kontrol etmesi sağlanmıştır. Sabit sıcaklık banyosunda hem korozyif etkilerden sakınmak hem de 0–

100 °C sıcaklık aralığı dışında da deneyler yapabilmek için akma noktası -55 °C ve alevlenme noktası 148 °C olan Petrol Ofisi trafo yağı kullanılmıştır [202].

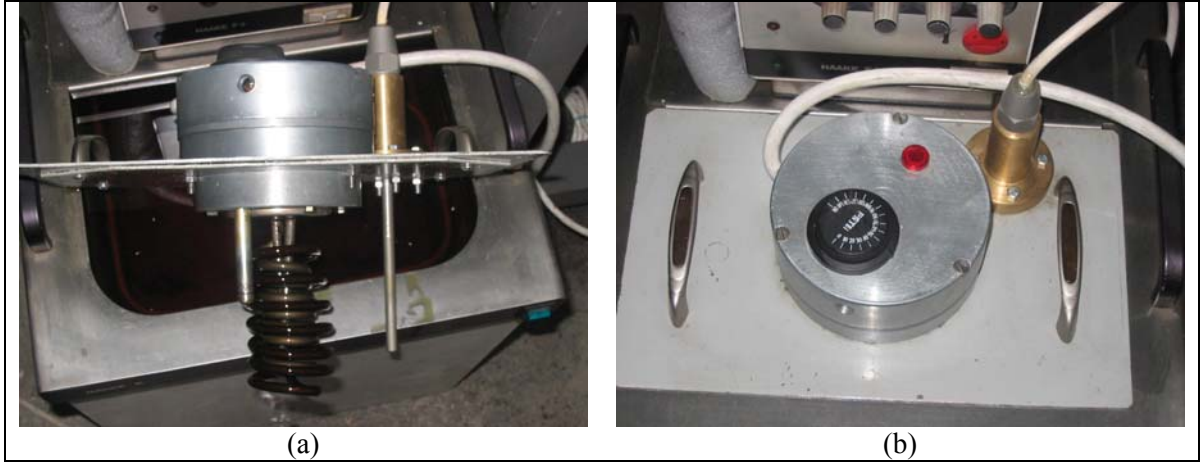


- | | | | |
|---|----------------------------------|----|--------------------|
| 1 | Sabit Sıcaklık Banyosu | 9 | Digital Termometre |
| 2 | Rezistans Termometre (Yap Tipi) | 10 | Eşanjör Boruları |
| 3 | Elektrikli Rezistans | 11 | Hava Emme Hattı |
| 4 | Pompa | 12 | DC Güç Kaynağı |
| 5 | Triyak Sürücü | 13 | Radyal Fan |
| 6 | Sıcaklık Kontrolörü | 14 | DC Motoru |
| 7 | Yağ Basma Hattı | 15 | Hava Dönüş Hattı |
| 8 | Sıcaklık Probu (Thermokupl Tipi) | 16 | Yağ Dönüş Hattı |
- ===== Elektrik Bağlantı Kablosu

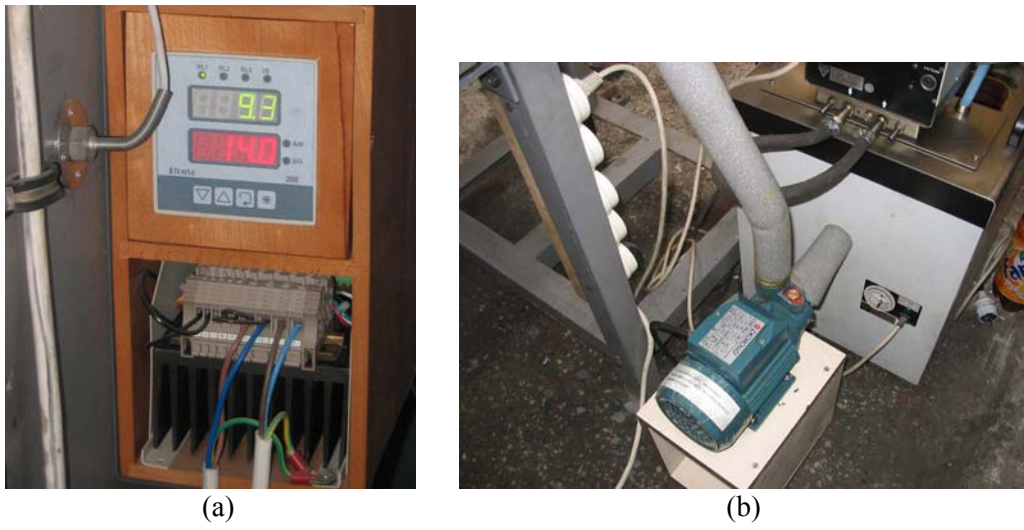
Şekil 21. Sıcaklık odası ısıtma ve sirkülasyon sistemi krokisi



Şekil 22. HAAKE F3-K tipi sabit sıcaklık banyosu



Şekil 23. Sabit sıcaklık banyosu içersine yerleştirilen ek rezistans sistemi



Şekil 24. a) Sıcaklık kontrolörü ve triyak sürücü, b) Isıtılan yağı sisteme pompalayan pompa

Sabit sıcaklık banyosundan alınan trafo yağı 0.37 kW gücündeki bir pompa (4) ile sıcaklık odası içerisinde yer alan peteklere (10) pompalanmış (Şekil 24b) ve dönüş yağı (16) tekrar sabit sıcaklık banyosuna (1) verilmiştir. Sıcaklık odasının arka ve yan çeperlerindeki bakır borulardan (10) geçen yağ ve aliminyum kanatçıklar vasıtasıyla, doğal konveksiyon yolu ile, deney düzeneği odasının ısıtması sağlanmıştır. (Şekil 20b).

Deney düzeneği odası içerisindeki sıcaklık, 12 inç boyunda T tipi termokupl probu (8) ile iki noktadan ayrı ayrı ölçülmüştür (Şekil 25a). Sıcaklık problemleri (-250)-(+400) °C sıcaklık aralığında sıcaklık ölçümünü gerçekleştirebilecek kapasitede olup, probun ilk okuma hassasiyeti 15 saniyedir. Sıcaklık problemlerinin boyu 304.8 mm (12 inç) seçilerek sıcaklık odasının ortasından okuma yapılması sağlanmıştır. Problemler, Digi-Sense marka çift girişli, J, T, E, K tipi termokuplları okuyabilen dijital termokupl termometresine (9) bağlanarak deney düzeneğinden iki noktadan sıcaklık okuması sağlanmıştır (Şekil 25b).



Şekil 25. a) Sıcaklık odasındaki sıcaklığın belirlendiği termokupl sıcaklık problemleri, b) Digital termokupl termometresi

Yukarıda ifade edilen sistemde, yağın ısıtılıp sisteme pompalanmasıyla (7) odanın ısıtılması gerçekleştirilmesi durumunda Şekil 25a'da görülen iki sıcaklık probu arasında 8 °C'lik bir ısı farkının oluştuğu görülmüştür. Her ne kadar deney düzeneği çeperleri yalıtılmış olsa da sıcaklık odası içerisinde bir hava sirkülasyonunun olmaması nedeniyle ısınan hava, sıcaklık odasının üst tarafında toplanmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için Şekil 21'de krokisi verilen deney düzeneğine sirkülasyon tesisatı (11-15) yapılmıştır. Böylece sıcaklık odasının üstünden emilen sıcak hava (11) bir radyal fan (13) tertibatıyla (Şekil 26a) sıcaklık odasının altından farklı noktalardan (Şekil 26b) odaya verilmiştir.

Sirkülasyonu sağlayan radyal fan (13) 24V doğru akım motoruyla (14) tahrik edilmiştir. Deneyde motorun direkt 24V doğru akım ile beslenmesi durumunda sıcaklık odasının alt tarafının sıcak üst tarafının ise daha soğuk olduğu görülmüştür. Bu problemi çözmek için de radyal fan doğru akım motoru Şekil 18b’de görülen ikinci bir 5A ve 0-30 V aralığında ayarlanabilen, DC güç kaynağı (12) ile beslenmiştir. Fan motorunun 13.8 V ile beslenmesi durumunda iki sıcaklık probu arasındaki sıcaklık farkının 0.1-0.3 °C’ye düştüğü görülmüştür. Bu ise çalışma odası için yeterli bir hassasiyettir.

Deney düzeneği içerisinde digital termometre ile okunan sıcaklığı kontrol etmek ve çalışma anında oda sıcaklığının gözle okunmasını sağlamak için, deney düzeneği kapısı üzerine 0-120 °C aralığında çalışan, 2 °C hassasiyetli, analog ölçüm yapan panel tipi termometre yerleştirilerek bu termometre ile de sıcaklık ölçümü yapılmıştır (Şekil 27).



(a)



(b)

Şekil 26. a) Radyal fan ve doğru akım motoru tertibatı b) Üstten emilen havanın alttan sıcaklık odası içerisine verilmesi



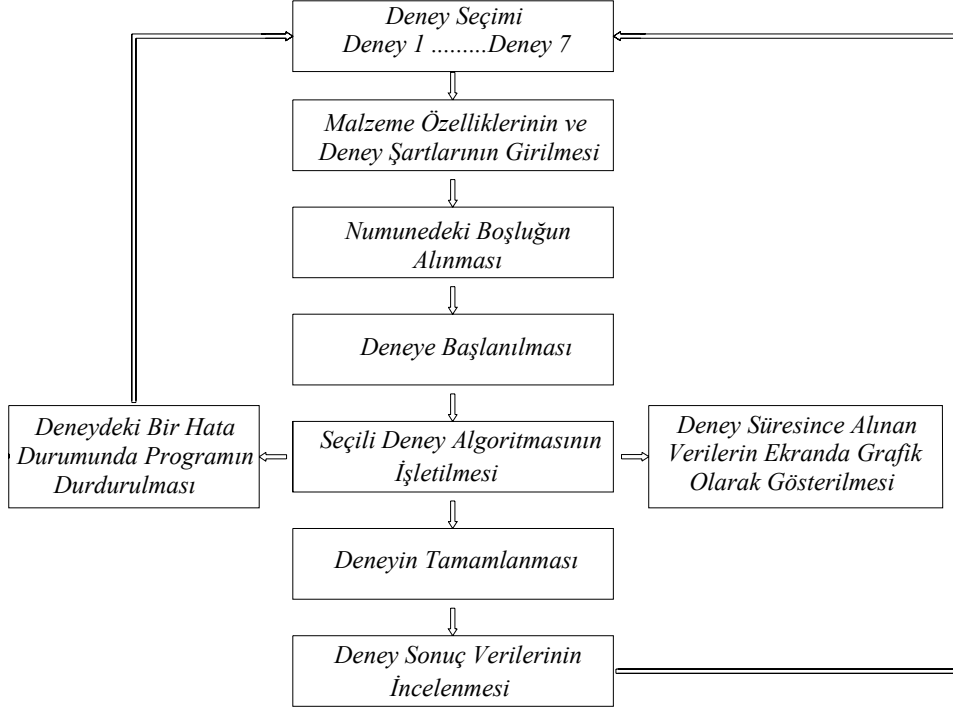
Şekil 27. Sıcaklık odası kapısı üzerine yerleştirilen sıcaklık termometresi

2.3. Tek Eksenli Çekme Deney Düzenegi Programı

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerini inceleyebilmek için özel prosedürlerde deneylerin gerçekleştirilecek olması ve bazı deneylerin 100 saat veya daha fazla sürmesi nedeniyle deney düzeneginin bir yazılım vasıtasıyla bilgisayar destekli kontrolünü gerektirmiştir. Tek eksenli çekme deney düzenekleri için var olan standart ticari yazılımlar hem kauçuğun tüm inelastik özelliklerinin incelenmesini içermemekte hem de var olan yazılımlar oldukça pahalıdır. Bu amaçla, yapılan çalışmada tek eksenli çekme deney düzenegindeki tüm donanım ve sensörlerin kontrolü NI-LABVIEW ortamında yazılan bir yazılım vasıtasıyla kontrol edilmiştir.

Deney prosedürlerinin yürütülmesi, deney süresince kuvvet ve yer değiştirme büyüklüklerinin ölçülmesi, verilerin sayısal olarak ekranda gösterilmesi, verilerin deney esnasında birebir grafiğe aktarımı, tahrik motorunun kontrolü ve deney sonunda toplanan bütün verilerin raporlanması, grafiksel programlama dili olan NI-LABVIEW’de oluşturulan ve Şekil 28’de de algoritması verilen, *Grafiksel Kullanıcı Arayüzü* (Graphical User Interfaces) ile sağlanmıştır. Grafiksel kullanıcı arayüzü Labview; National Instrument firması tarafından endüstriyel otomasyon sistemleri için geliştirilen, operatör-makine etkileşiminin maksimum olmasını sağlayan bir arayüz programıdır [203]. Oluşturulan grafiksel kullanıcı arayüzü ile kullanıcıya zengin bir görsellik sunulmasının yanında, kullanıcıdan gelen istekler doğrultusunda mevcut deney prosedürleri üzerinde değişiklikler yapılabilmesine veya programa yeni bir deney prosedürlerinin kolaylıkla eklenebilmesine imkan vermektedir. Şekil 28’den de görüleceği üzere çalışmada önce hangi deney ile çalışma yapılacağı seçilir. Daha sonra malzeme özellikleri, deney şartları, yapılacak deneyin özel prosedür bilgileri bilgisayara girilir. Numune tutma çeneleri arasına bağlandıktan sonra numune üzerinde çok küçük ya bası ya da çeki kuvveti vardır. Numunenin üzerindeki bu yük alınarak malzeme yüksüz ($\sigma=0$) pozisyona getirilir. Bu işleme “*Boşluk Alma*” denilmektedir. Boşluk alma işlemi gerçekleştirildikten sonra deneye başlanılır. Deneyin başlaması ile birlikte deneyden alınan gerilme ve şekil değiştirme verileri birebir bilgisayar ekranında yer alır ve veriler eş zamanlı olarak grafiğe dönüştürülür. Böylece deneyin gelişim seyri birebir bilgisayar ekranından takip edilebilir. Program deney sonunda sesli ve ekrana yazılı olarak deneyin bittiğine dair ikaz vermektedir. Bu ikazın onaylanması ile deney tamamlanır. Deney sırasında beklenenden farklı veriler elde edilmesi durumunda veya yanlış veriler girilmesi durumunda deney

durdurularak, deneydeki olumsuzluklar giderilir ve deneye yeniden başlanılır. Deney süresince alınan veriler, deneye başlamadan önce kullanıcı tarafından tanımlanan klasördeki text dosyasına veya MS-Excel dosyasına kayıt edilir. Ayrıca deney süresince alınan verilerin kullanıcıya gösterildiği osiloskop ekranı JPEG formatında kullanıcının tanımladığı klasöre kaydedilir.



Şekil 28. Geliştirilen programa ait algoritma

Yazılımda,

1. Çekme Deneyi
2. Mullins Etkileri Deneyi-1
3. Mullins Etkileri Deneyi-2
4. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1
5. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-2
6. Gerilme Gevşemesi Deneyi-1
7. Gerilme Gevşemesi Deneyi-2

adı altında yedi farklı deney prosedürü hazırlanmıştır.

1. deney prosedüründeki çekme deneyi ile malzemenin kopma yüklemesine kadarki gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmektedir. 2. ve 3. deney prosedürlerinde ise histerezis ve Mullins etkilerini incelemeye yönelik olarak iki farklı deney prosedürü üzerinde çalışılmıştır. İlave olarak bu deney prosedürlerinde kalıcı deformasyonun varlığı da görülebilmektedir. 4. ve 5. deneylerde ise kauçuğun gerilme-şekil değiştirme diyagramlarındaki vizkoelastik ve vizkoplastik davranışı, 6. ve 7. deney prosedürleri ile gerilme gevşemesi davranışı incelenebilmektedir. Geliştirilen yazılım, zaman içerisinde farklı deney prosedürlerinin ilavesine açıktır.

Bu tez çalışmasında SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin; gerilme gevşemesi, Mullins etkileri, kalıcı deformasyon, şekil değiştirme hızı ve histerezis özelliklerini inceleyebilmek amacıyla farklı deney koşullarında

1. Mullins Etkileri Deneyi-1
2. Mullins Etkileri Deneyi-2
3. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1
4. Gerilme Gevşemesi Deneyi-2

deneyleri yapılmıştır.

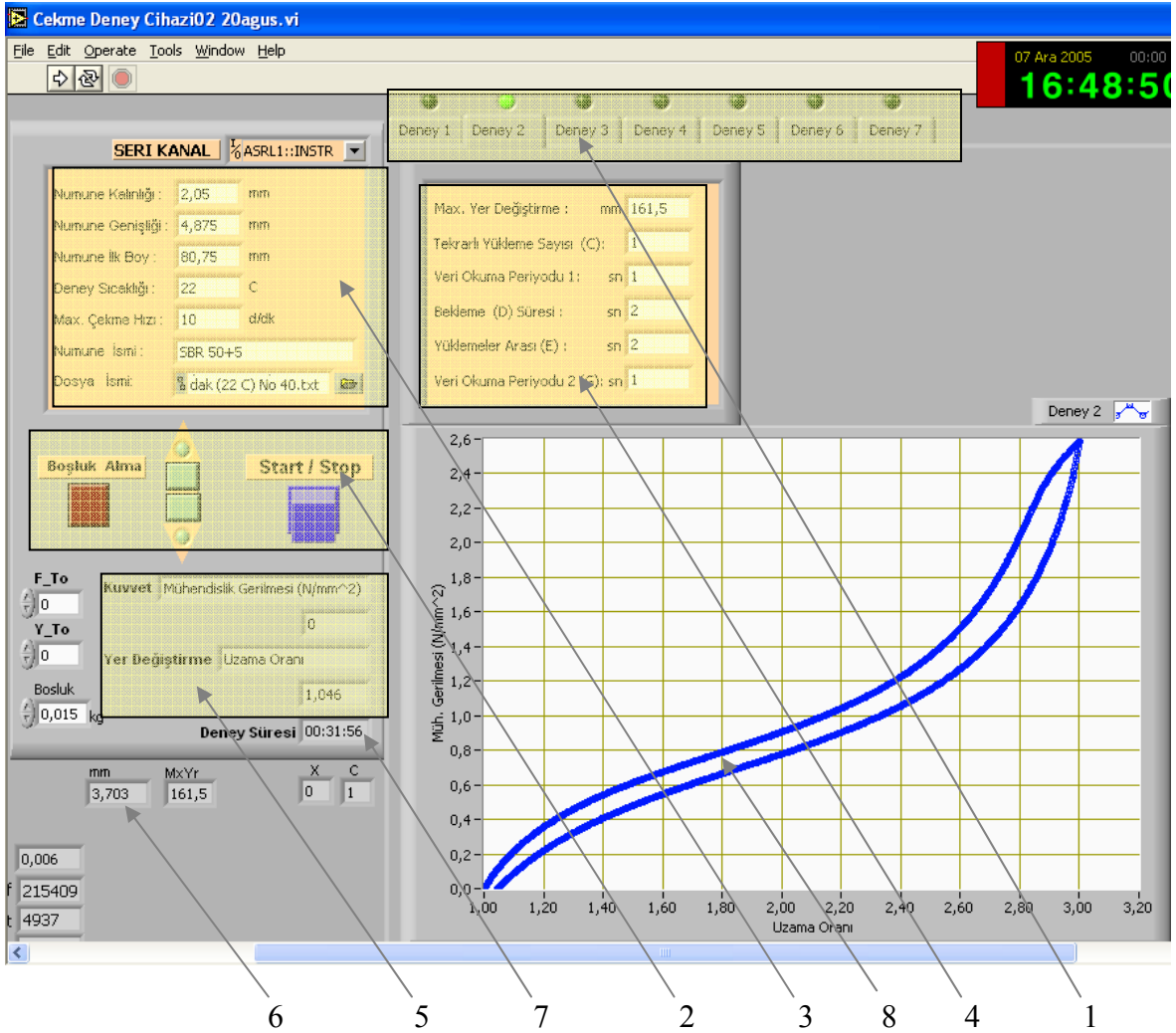
2.3.1. Mullins Etkileri Deneyi-1 Programının Tanıtılması

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi Mullins etkileridir. Daha önce de belirtildiği üzere kauçuk malzemelerde sabit şekil değişimi altında gerilmede azalma meydana gelmektedir. Malzemenin bu özelliğini inceleyebilmek için “*Mullins Etkileri Deneyi-1*” adı altında bir deney hazırlanmıştır. Bu deneyde malzemenin davranışına Mullins etkilerinin yanında malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon, histerezis ve şekil değiştirme hızının etkisi de incelenebilmektedir.

Mullins Etkileri Deneyi-1 deneyi sonundaki ekran görüntüsü Şekil 29’da görülmektedir. Deneye başlamadan önce hangi deney yapılacağı Şekil 29’da gösterilen 1 numaralı bölgeden seçilir. Seçili olan deney prosedürü üzerinde yeşil renkli uyarıcı lamba yanarak hangi deneyin yapıldığı hakkında kişiye bilgi verir. Şekil 29’da 2 numaralı deney seçilmiş durumdadır. Deneyi yapılacak numuneyi tutma çenelerine bağlayabilmek için şekilde 2 numaralı bölgedeki boşluk alma ve start/stop düğmeleri arasında kalan butonlarla tutma çeneleri aşağı yukarı hareket ettirilir ve çeneler, numunenin bağlanacak olduğu

seviyeye getirilir. Numune çenelere serbest ve üzerinde yük olmayacak şekilde bağlanır. Daha sonra numunenin boşluğunu almak için, boşluk alma butonuna basılarak numunenin üzerinde bası ve çeki gerilmesi olmayacak şekilde yüksüz hale gelmesi sağlanır. Bu durumda numune deney için hazırdır. Şekil 29'da 3 numaralı bölgede, deneyi yapılacak numunenin numune kalınlığı, numune genişliği, numune ilk boyu, deney sıcaklığı, numune çekme hızı, numune ismi, deneysel verilerin kaydedileceği dosyanın ismi ve bilgisayarda hangi klasöre kaydedileceği girilir. 4 numaralı alanda ise deney prosedürü tanımlanır. Deneyle ilgili kuvvet-yer değiştirme verileri okunacağından, kuvvet ve yer değiştirme olarak hangi tanımlama ile veri alınacaksa şekilde 5 numaralı bölgeden belirlenebilir. Kuvvet için, kuvvet, mühendislik gerilmesi ve gerçek gerilme opsiyonları mevcuttur. Yer değiştirme için ise mühendislik şekil değiştirme, uzama oranı ve doğal şekil değiştirme opsiyonları mevcuttur. Şekil 29'daki deney için kuvvet tanımlaması olarak mühendislik gerilmesi (N/mm^2) ve yer değiştirme tanımlaması olarak ise uzama oranı alınmıştır. Ayrıca deneyler sırasında gerilme ve şekil değiştirme verileri deneyle birebir ekranda 5 numaralı bölgeden okunabilmektedir. Numunedeki, toplam yer değiştirme ise 6 numaralı bölgeden okunur. Deney için geçen toplam süre ise 7 numaralı yerden okunur. Deneyle ilgili okunan gerilme ve yer değiştirme verileri birebir grafiğe aktarılarak 8 numaralı alanda deneyle eş zamanlı olarak çizilmektedir. Deneyi yapabilmek için 3, 4, ve 5 numaralı bölgelerdeki veriler girildikten sonra 2 numaralı bölgedeki start/stop butonuna basılarak deney başlatılır. Deney sırasında tüm veriler birebir alınarak ilgili yerlere ve grafiğe aktarılır. Deney bittikten sonra ekrana bir uyarı mesajı gelerek kişiyi uyarır. Deneyle ilgili tüm veriler deney bittikten sonra 1 numaralı gölgede verilen dosya isminde ve ilgili klasörden alınarak incelenebilir. Ayrıca deney sonundaki 8 numaralı grafik ise ayrı bir jpeg dosyasına kaydedilir.

Şekildeki 4 nolu bölgesinde ise yapılacak olan deneyle ilgili deney prosedürü tanımlanır. Şekildeki 4 nolu bölge, yazılı veriler için şu şekilde ifade edilebilir, Deney numunesi deney başladığında 161.5 mm $\left(\lambda = 1 + \frac{161.5}{80.75} = 3 \right)$ yani uzama oranı 3'e kadar deforme edilecek, 161.5 mm yer değiştirmeden sonra motor duracak 2 saniye bekleyecek (D Bekleme Süresi) ve motor ters yönde dönerek malzemedeki kuvveti geri bırakarak gerilme sıfır olunca motor duracak ve 2 saniye bekleyecektir (E Yüklemeler Arası Bekleme Süresi).



Şekil 29. Mullins Etkileri Deneyi-1'nin bilgisayar ekran görüntüsü

Bu tez çalışmasında, motorun normal yönde dönmesi ve bu durumda da deney numunesinin maksimum yer değiştirmeye kadar uzaması ve belli bir süre beklemesi “Yükleme”, motorun ters yönde dönerek malzeme üzerindeki kuvvetin kaldırılarak kuvvet sıfır olunca motorun durması ve belli bir süre beklenilmesi işlemi “Boşaltma” ve hem yüklemeye hem de boşaltma işleminin her ikisinin birden gerçekleştirilmesi işlemi ise “Yükleme-Boşaltma Çevrimi” veya “Çevrim” olarak tanımlanacaktır. Şekil 29'daki verilen ekran için malzeme bir defa çevrime (C, Tekrarlı Yüklemeye Sayısı) tabi tutulmuştur. Tez çalışmasında, deney numunesinin N kez yüklemeye-boşaltma çevrimine tabi tutulması ise “ N Tekrarlı Yüklemeye” olarak tanımlanmıştır. Yapılan tez çalışmasında Mullins etkileri, birçok deneyde, 15 çevrim için incelenmiştir. Deneyde hem yüklemeye hem de boşaltma işlemi sırasında gerilme ve uzama oranı verileri 1'er saniye aralıkla (Veri Okuma Periyodu-1)

kaydedilmiş, yükleme ve boşaltma sonlarındaki 2 saniyelik beklemelemlerde ise yine 1 saniye aralıklarla (Veri Okuma Periyodu-2) gerilme uzama oranı verileri kaydedilmiştir.

2.3.2. Mullins Etkileri Deneyi-2 Programının Tanıtılması

Mullins etkileri ile malzemeye uygulanan maksimum şekil değişimi arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için “*Mullins Etkileri Deneyi-2*” adı altında bir deney prosedürü hazırlanmıştır. Bu deneyde de malzemeye uygulanan maksimum şekil değiştirmenin etkisini belirlenmesi yanında malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon, histerezis ve şekil değiştirme hızının etkisi de incelenebilmektedir.

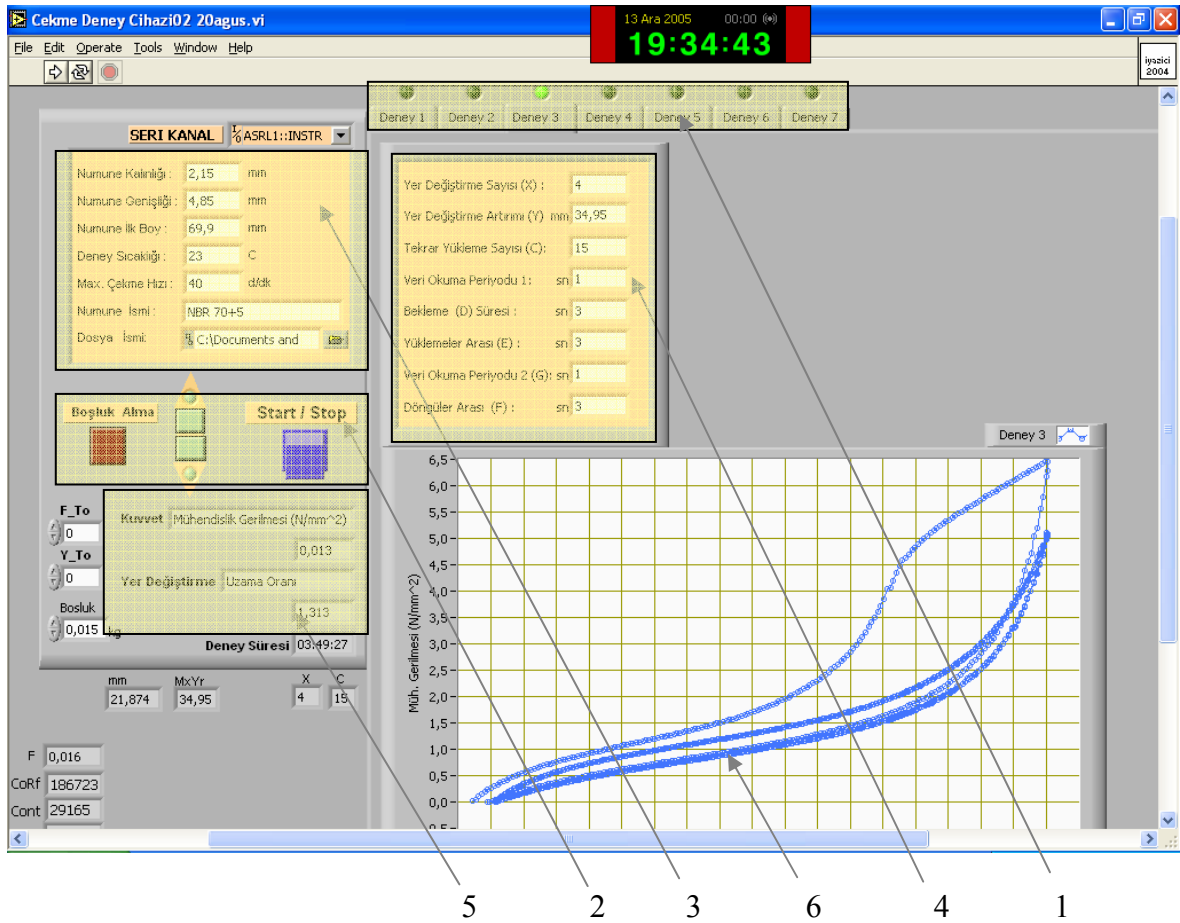
Mullins Etkileri Deneyi-2 deneyi sonundaki ekran görüntüsü Şekil 30’da görülmektedir. Deneyden önce, daha önceki deneyde olduğu gibi, ilk önce 1 numaralı bölgeden hangi deney yapılacağı seçilir. Seçili olan deney prosedürü üzerinde yeşil renkli uyarıcı lamba yanarak hangi deneyin yapıldığı hakkında kişiye bilgi verir. Şekil 30’da 3 numaralı deney seçilmiş durumdadır. Deneyin başlatılması ile ilgili işlemler Mullins Etkileri Deneyi-1 için verilen işlemlerle aynı olduğu için burada tekrar edilmemiştir.

Şekil 30’da verilen ekran görüntüsünün 4 nolu bölgesinde ise yapılacak olan deneyle ilgili deney prosedürü tanımlanır. 4 nolu bölge Şekil 30’daki yazılı veriler için deney prosedürü şu şekilde ifade edilebilir. Malzeme 4 farklı maksimum uzama oranında (X Yer Değiştirme Sayısı) ve her bir uzama oranı için de 15 kez (C, Tekrarlı Yükleme Sayısı) yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulacaktır. Malzeme ilk önce 34.95 mm yer değiştirme

(34.95*1=34.95) yapacak $\left(\lambda = 1 + \frac{34.95}{69.90} = 1.5 \right)$ yani uzama oranı 1.5’a kadar

deformasyonu gerçekleştirildikten sonra motor duracak ve 3 saniye (D Bekleme Süresi) bekleyecektir. 3 saniye sonunda motor ters yönde dönerek malzemedeki kuvveti geri bırakılacak ve gerilme sıfır oluncaya kadar motor ters yönde dönecektir. Malzemedeki gerilme sıfır olunca motor duracak ve tekrar 3 saniye (E Yükleme Arası Bekleme Süresi) beklenilecektir. Bu yükleme-boşaltma çevrimi 15 kez tekrarlanarak deney tamamlanacaktır. Deneyde hem yükleme hem de boşaltma işlemi sırasında gerilme ve uzama oranı verileri 1’er saniye aralıkla (Veri Okuma Periyodu-1), yükleme ve boşaltma sonlarındaki 3 saniyelik beklemelemlerde ise yine 1 saniye aralıklarla (Veri Okuma Periyodu-2) gerilme-uzama oranı verileri kaydedilecektir. $\lambda=1.5$ ’da 15 tekrarlı yükleme

tamamlandıktan sonra 3 saniye (E Yüklemeler Arası Bekleme Süresi) beklenilerek ve numune, daha sonra $34.95 \times 2 = 69.90$ mm yer değiştirme yaparak $\left(\lambda = 1 + \frac{89.90}{69.90} = 2.0 \right)$ bu deformasyonda da 15 kez yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulacaktır. Benzer şekilde $34.95 \times 3 = 104.85$ mm ($\lambda = 2.5$) ve $34.95 \times 4 = 139.80$ mm ($\lambda = 3.0$) yer değiştirmelerde de 15 kez yükleme-boşaltma çevrimi gerçekleştirilerek deney tamamlanacaktır.



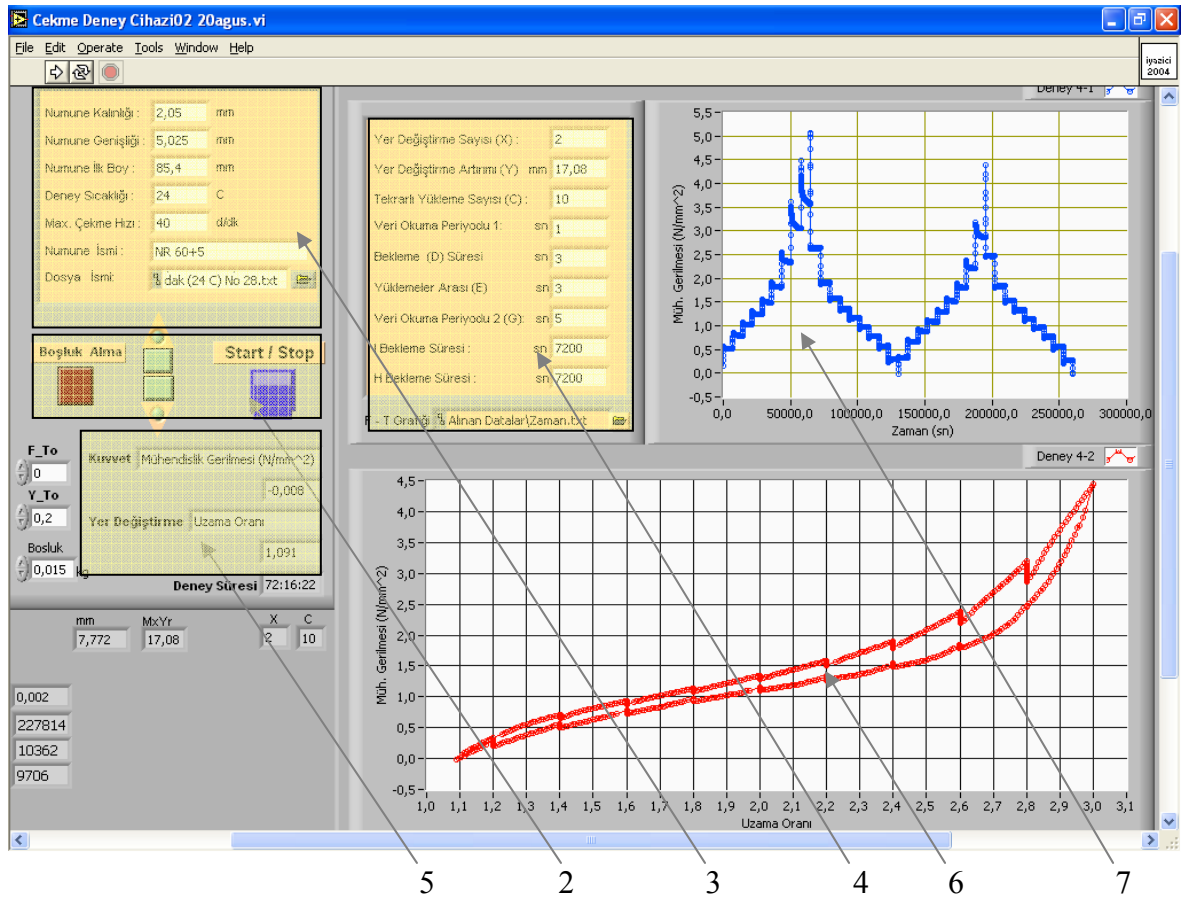
Şekil 30. Mullins Etkileri Deneyi-2'nin bilgisayar ekran görüntüsü

2.3.3. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1 Programının Tanıtılması

Kauçuk türü malzemelerin şekil değiştirme hızı, histerezis, gerilme gevşemesi ve Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için “İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1” adı altında bir deney prosedürü

hazırlanmıştır. Bu deneyde malzemeye uygulanan yükleme prosedürü sonunda malzemede histerezis oluşup oluşmadığı ve buradan da ilgili malzeme davranışının vizkoleasisite teorisine göre mi yoksa vizkoplatisite teorisine göre mi modellenmesi gerektiğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1 deneyi sonundaki ekran görüntüsü Şekil 31’de görülmektedir. Deneye başlamadan önce, daha önceki deneyde olduğu gibi, ilk önce hangi deney yapılacağı seçilir. Deneyin başlatılması için 3, 4 ve 5 nolu bölgelere gerekli veriler girilir ve ilgili seçimler yapılarak 2 nolu bölgeden deney başlatılır. Deneyler sırasında okunan gerilme ve yer değiştirme verileri birebir grafiğe aktarılarak 6 numaralı alanda gerilme-uzama oranı grafiği ve 7 numaralı alanda ise gerime-zaman grafiği deneyle eş zamanlı olarak çizilmektedir.



Şekil 31. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Edilmesi Deneyi-1'nin bilgisayar ekran görüntüsü

Şekil 31’de 4 nolu bölgedeki yazılı veriler için, deney prosedürü şu şekilde ifade edilebilir; Numune, deney başladıktan sonra 10 defa (X Yer Değiştirme Sayısı) 17.08 mm yer değiştirme (Y Yer Değiştirme Arttırımı) yaparak bu yer değiştirmelerde 7200 saniye bekleme (I Bekleme Süresi) yapacaktır. Her 7200 saniye sonunda motor kaldığı yerden devam ederek bir sonraki 17.08 mm ye kadar malzemeyi deforme edecektir. 10. yer değiştirmede artık malzeme maksimum deformasyon yapmıştır ve bu nedenle 10 yer değiştirme sonunda motor duracak 3 saniye beklenilecek (D Bekleme Süresi) ve motor ters yönde dönerek bu sefer 10 defa 17.08 mm aralıklarla yer değiştirmeyi malzemenin boşaltma işlemi için yapılacaktır. Burada da her 17.08 mm’lik yer değiştirme sonunda 7200 saniye bekleme (H Bekleme Süresi) yapılacaktır. Boşaltma işlemi sonunda 10 yer değiştirmeden sonra kuvvet sıfır olunca motor duracak ve 3 saniye beklenilerek (E Yükleme Arası Bekleme Süresi) 1. çevrim tamamlanmış olacaktır. Bu işlem bir kez daha tekrar edilerek, deney 2. çevrim sonunda (C Tekrarlı Yükleme Sayısı) tamamlanacaktır. Deneylerde gerime-uzama oranı verileri 1 saniye aralıklarla (Veri Okuma Periyodu-1) gerilme-zaman verileri ise 5 saniye aralıklarla (Veri Okuma Periyodu-2) kaydedilecektir.

2.3.4. Gerilme Gevşemesi Deneyi-2 Programının Tanıtılması

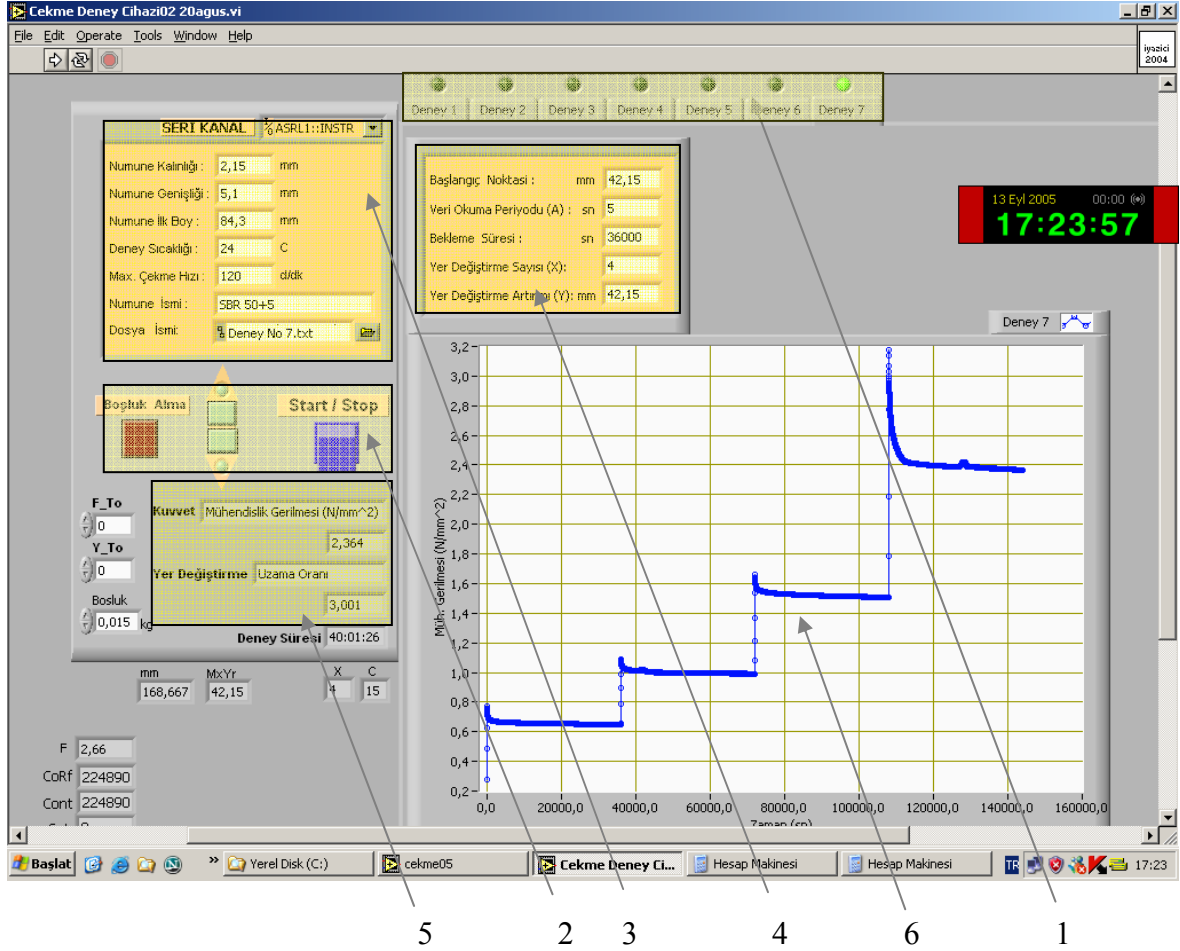
Kauçuk türü malzemelerin sürekli ölçüm yöntemi ile gerilme gevşeme deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için daha önceki bölümlerde tanıtımı yapılan deney düzeneğinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 32’de SBR kauçuğuna ait gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneyinin deney bitimindeki bilgisayar ekranı görülmektedir. Deneye başlamadan önce, daha önceki deneylerde olduğu gibi ön işlemler tamamlanarak, 4 numaralı alanda deney prosedürü tanımlanır.

Şekil 32’deki verilerle 4 nolu bölge yorumlanırsa, deneyde malzemenin 42.15 mm arttırılma (Başlangıç Noktası) başlanılmak üzere 4 defa (X Yer Değiştirme Sayısı) yine 42.15 mm arttırımla (Y Yer Değiştirme Arttırımı) gerilme–zaman verileri kaydedilecektir.

Bu durumda $42.15 \text{ mm} \left(\lambda = 1 + \frac{42.15}{84.30} = 1.5 \right)$, $84.30 \text{ mm} (\lambda = 2.0)$, $126.45 \text{ mm} (\lambda = 2.5)$

ve $168.60 \text{ mm} (\lambda = 3.0)$ deformasyonlarda malzeme 36000 saniye=10 saat süreyle (Bekleme Süresi) gerilme gevşemesi deneyine tabi tutularak gerilme zaman verileri

alınacaktır. Deneyselerde 5 saniye aralıklarla (A Veri Okuma Periyodu) gerilme-zaman verileri alınarak veri dosyasına kaydedilecek ve ekranda grafik çizimi gerçekleştirilecektir.



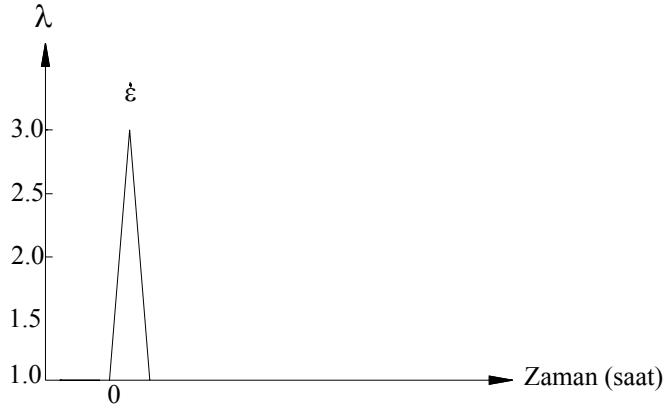
şekil 32. Gerilme gevşemesi deneyi-2'nin bilgisayar ekran görüntüsü

2.4. İnelastik Özellikleri İncelemeye Yönelik Denei Prosedürü ve Denei Koşulları

SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin inelastik özelliklerinden şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri, histerezis, kalıcı deformasyon ve gerilme gevşemesini inceleyebilmek için denei prosedürleri geliştirilmiştir. Aşağıda şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri, gerilme gevşemesi ve inelastik özelliklerden bağımsız veri elde etmeye yönelik denei prosedürlerinin tanıtımı yapılmış ve denei koşulları verilmiştir.

2.4.1. Şekil Değiştirme Hızı Deney Prosedürü ve Deney Koşulları

Kauçuk türü malzemelere şekil değiştirme hızının etkisini inceleyebilmek için malzemeler 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuşlardır. Deneyler hava ortamında ve 22-28 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi çeneler arasına bağlandıktan sonra $\lambda_{\max} = 3.0$ 'a kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutularak farklı şekil değiştirme hızlarının malzemenin gerilme-uzama oranı davranışına olan etkisi araştırılmıştır (Şekil 33).

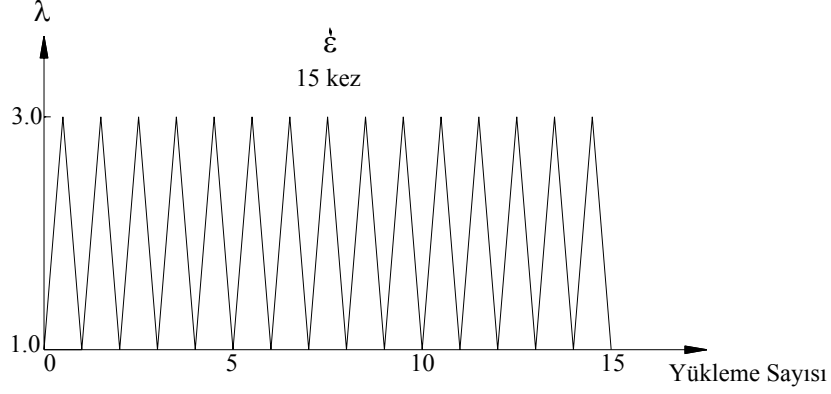


Şekil 33. Şekil değiştirme hızının, gerilme-uzama oranını davranışına etkisinin incelendiği deney prosedürü

Literatürde, kauçuk türü malzemelere asıl yapılmak istenen deneyden önce, ön deformasyon prosedürü uygulanarak malzemelerin inelastik özelliklerinin kararlı haldeki değerlerinin elde edildiği çalışmalar mevcuttur. Kauçuk türü malzemelere deneylerden önce, numuneye ön deformasyon prosedürü uygulanıp uygulanmayacağı ve eğer numuneye ön deformasyon prosedürü uygulanacaksa bunun hangi şekil değiştirme hızında uygulanacağı bu çalışmanın bir diğer araştırma konusudur.

Malzemeye uygulanacak olan, ön deformasyon prosedürünün şekil değiştirme hızının belirlenebilmesi için Şekil 34'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Bunun için deney numuneleri 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15 defa $\lambda_{\max} = 3.0$ 'a kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutularak deneylerden elde

edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri karşılaştırılmıştır. Deneyler, yine, hava ortamında ve 22-24 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

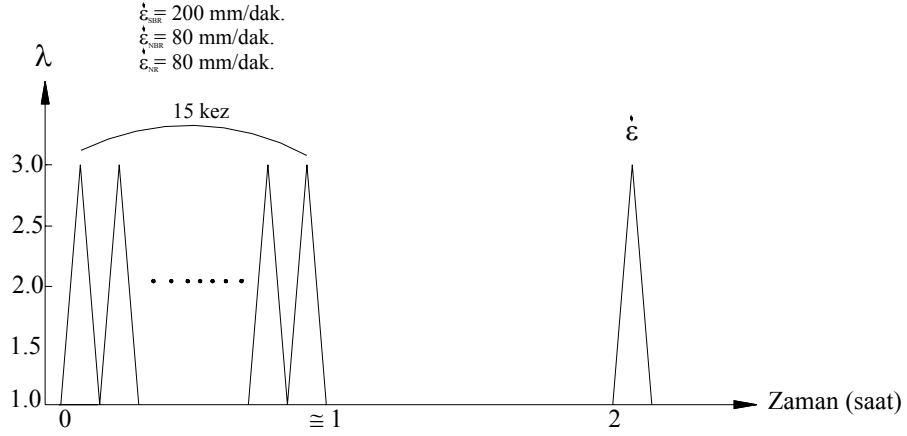


Şekil 34. Malzemeye uygulanacak ön deformasyon prosedürünün, şekil değiştirme hızını belirleyebilmek için uygulanacak olan deney prosedürü

Çalışmada, şekil değiştirme hızları ile maksimum 300 mm/dak. hıza kadar deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek şekil değiştirme hızlarında çalışıldığı zaman numuneden alınacak olan veri sayısı azalmaktadır. Bunun nedeni ise aynı miktardaki yer değiştirmenin daha hızlı yapılmasıdır. Bu durum ise gerilme-uzama oranı eğrisinin doğru olarak tahminini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, deneylerde malzemeye uygulanan kuvveti ölçmek için kullanılan S tipi yük hücresi deney düzeneğine Şekil 17a'da gösterilen aparatlar vasıtasıyla bağlanmıştır. Bu aparatlar ise deney sırasında malzemeye gelebilecek eğilme momentlerinin ölçülmemesini ve sadece malzemeye uygulanan çekme kuvvetinin ölçülmesini sağlamaktadır. Fakat bu aparatlar yük hücresine hareket kabiliyeti kazandırdığından yüksek hızlarda çene, yük hücresi ve tutma aparatlarının titreşim hareketi yapmasını sebep olmaktadır. Her ne kadar bu titreşimlerden gelebilecek eğilme momentleri kuvvet olarak okunmasa da, deneyler sırasında bu, yüksek hızlarda oluşan bir olumsuzluktur. 300 mm/dak. şekil değişimi hızından daha yüksek hızlarda yapılan deneylerde $1.0 \leq \lambda \leq 1.3$ ve $2.7 \leq \lambda \leq 3.0$ uzama oranı aralıklarında hassas ve sürekli veri alınamamaktadır. Bu sebeple de çalışmada doğru ve güvenilir veriler alabilmek için deneyler 300 mm/dak. şekil değişim hızı ve daha düşük hızlarda gerçekleştirilmiştir.

Kauçuk türü malzemelere uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün hangi şekil değiştirme hızında gerçekleştirileceğinin belirlenmesinden sonra, malzemeye Şekil

35’de gösterilen deney prosedürü uygulanmıştır. Şekil 34’deki deney prosedürünün uygulanması durumunda SBR kauçuğunun 200 mm/dak., NBR kauçuğunu 80 mm/dak. ve NR kauçuğunun ise 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında ön deformasyon prosedürü deneylerinin yapılabileceği belirlenmiştir. Şekil 35’den de görüleceği üzere her bir malzemeye, belirlenen şekil değiştirme hızında ön deformasyon prosedürüne tabi tutulduktan sonra numuneler tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz durumda 2 saat bekletilmiş ve daha sonra 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında bir kez $\lambda_{\max} = 3.0$ ’a kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuşlardır. Böylece malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulaması durumunda şekil değiştirme hızının malzemenin gerilme-uzama oranı davranışına etkisi araştırılmıştır.

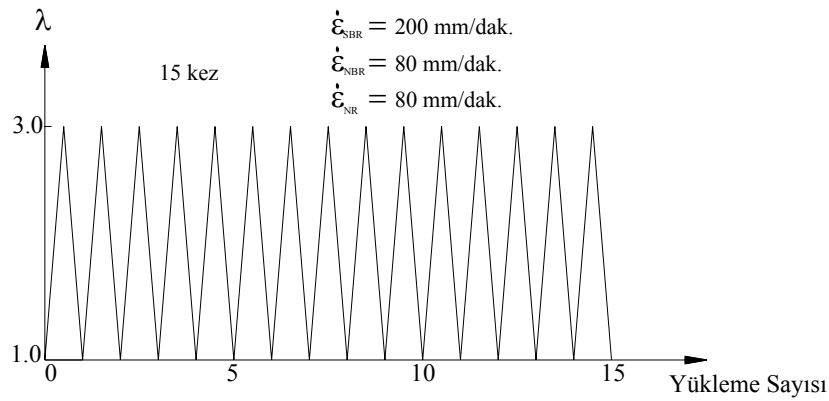


Şekil 35. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış malzemedeki şekil değiştirme hızının gerilme-uzama oranına etkisinin inceleneceği deney prosedürü

2.4.2. Mullins Etkileri Deney Prosedürü ve Deney Koşulları

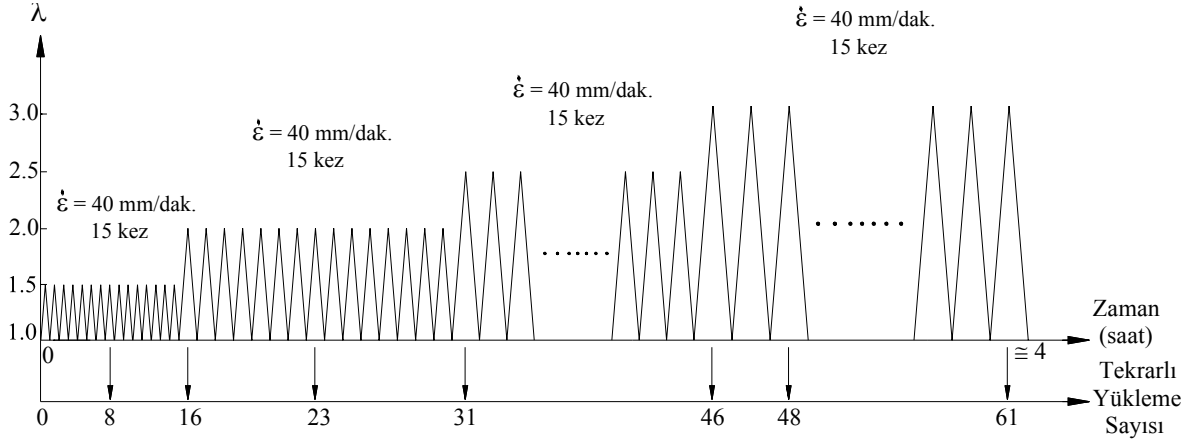
Kauçuk türü malzemelerden yapılmış deney numunelerine belirli bir deformasyona kadar uygulanan, N tekrarlı yükleme sonunda gerilmenin azaldığı görülmüş ve bu davranış literatürde Mullins Etkileri olarak tanımlanmıştır. Malzeme davranışında görülen bu özellik belirli bir yükleme-boşaltma çevriminden sonra gerilme davranışının kararlı hale geldiği ve neredeyse ortadan kalktığı görülmektedir. Gerilmenin kararlı hale gelmesi için gerekli yükleme-boşaltma çevrim sayısı (N) malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir. Yapılan tez çalışmasında, kullanılan SBR, NBR ve NR kauçuk

malzemelerinde Mullins etkilerinin kararlı hale geldiği yükleme-boşaltma çevrim sayısının belirleyebilmek için SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerden yapılmış deney numunelerine Şekil 36'da gösterilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deneyde, numuneler $\lambda = 3.0$ 'a kadar SBR kauçuk numuneleri için 200 mm/dak., NBR kauçuk numuneleri için 80 mm/dak. ve NR kauçuk numuneleri için ise 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15 kez yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur. Deneyin gerçekleştirildiği bu hızlar, ilgili malzemelerin şekil değişim hızından bağımsız deneysel veri elde edildiği hızlar olup, bu şekil değiştirme hızları tez çalışması içerisinde ilerleyen bölümlerde deneysel olarak belirlenecektir. Şekil 36'daki deney prosedürünün uygulanması ile malzemedeki Mullins etkilerini gidermek için gerekli N kez yükleme-boşaltma çevrim sayısı belirlenmiştir. Malzemeye uygulanan 15 kez yükleme-boşaltma çevrim sayısı tecrübi bir değer olup bu değer arttırılabilir.



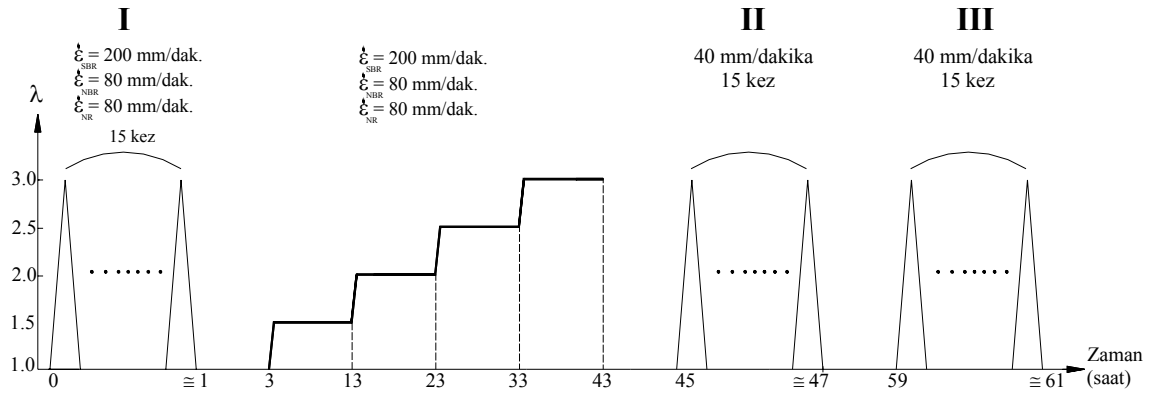
Şekil 36. Malzemeye uygulanacak N tekrarlı yükleme sayısını belirleyebilmek için uygulanacak olan deney prosedürü

Mullins etkileri ile deney numunelerine uygulanan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedüründe dört farklı uzama oranında, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, $\lambda = 3.0$, Mullins etkileri ile uzama oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun için deney numuneleri uzama oranı 1.5'da 15 kez, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda deney numuneleri uzama oranı 2.0'a kadar deforme edilmiş ve bu deformasyon için 15 kez, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında yüklemeler gerçekleştirilmiş ve bunu uzama oranı 2.5 ve 3.0 takip ederek deney tamamlanmıştır.



Şekil 37. Mullins etkileri ile malzemeye uygulanacak olan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi incelemek için uygulanacak olan deney prosedürü

Mullins etkileri için yapılan son deney prosedüründe ise, Şekil 36'da verilen Mullins etkilerini giderici deney prosedürü uygulanmış bir malzemede, zaman içerisinde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır (Şekil 38). Şekil 36'daki deney prosedürüne ilave olarak gerilme gevşemesi ve 15 tekrarlı yüklemenin yapılması durumunda malzeme özelliklerinde nasıl bir değişim olacağı ve, özellikle de, Şekil 36'ya ilave deneylerin Şekil 36'da verilen prosedürden amaçlanandan farklı bir etki yapmayacağını belirlemek için bu deney prosedürü uygulanmıştır.



Şekil 38. Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişimini incelemek için uygulanacak olan deney prosedürü

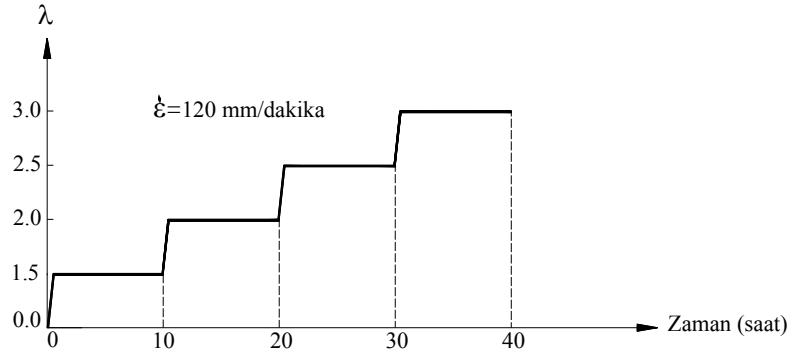
Bunun için deney numuneleri önce, Şekil 38'den de görüleceği üzere SBR kauçuğu için 200 mm/dak., NBR ve NR kauçuğu için ise 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 kez uzama oranı 3.0'a kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur. Çevrim

sonunda deney numuneleri tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiştir. Böylece malzemedeki Mullins etkilerinin giderilmesi amaçlanmıştır. Deney numunelerine uygulanan bu ilk 15 tekrarlı yükleme işlemi daha sonra uygulanacak olan tekrarlı yüklemelerle karıştırılmaması için, *I. Grup Tekrarlı Yükleme* olarak adlandırılmıştır.

I. grup tekrarlı yüklemenin ardından yapılan gerilme gevşemesi deneyi ile numunede ek gerilme yumuşamasının meydana gelip gelmediği deney numuneleri gerilme gevşemesi deneyine tabi tutularak incelenmiştir. I. grup tekrarlı yükleme deneyi sonundaki 2 saatlik bekleme sonunda deney numuneleri $\lambda = 1.5$ 'a kadar deforme edilmiş ve 10 saat beklemeye tabi tutulmuştur. 10 saat sürenin sonunda numune $\lambda = 1.5$ 'dan $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilmiş ve burada da 10 saat süre bekleme yapılmıştır. Bu işleme $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ uzama oranlarında da devam edilmiş ve yaklaşık 40 saatlik bir süre sonunda gerilme gevşemesi deneyi tamamlanmıştır. Burada da SBR kauçuğu için 200 mm/dak., NBR ve NR kauçuğu için ise 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bunun içinde gerilme gevşemesi deneyi sonunda deney numuneleri yine tutma çenelerinden sökülmeden 2 saat süreyle bekletilmiştir. Gerilme gevşemesi deneyinin gerilme yumuşaması meydana getirip getirmediğinin belirlemek için gerilme gevşemesi deneyi sonunda deney numuneleri yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiş ve 2 saat sonunda ikinci bir 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Burada tüm numunelerin, 40 mm/dak şekil değiştirme hızında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu ikinci 15 tekrarlı yükleme işlemi ise *II. Grup Tekrarlı Yükleme* olarak adlandırılmıştır. II. Grup tekrarlı yükleme sonunda deney numuneleri tekrar yüksüz konumda fakat bu defa 12 saat bekleme yapılmıştır. Böylece zaman içerisinde deneylerle elde edilen özelliklerin kaybolup kaybolmadığı araştırılmış ve deney numuneleri üçüncü ve son kez 15 tekrarlı yükleme işlemine tabi tutularak deney prosedürü sonlandırılmıştır. Bu üçüncü kez 15 tekrarlı yükleme ise *III. Grup Tekrarlı Yükleme* olarak adlandırılmıştır Bu tekrarlı yükleme de, tüm malzemeler için, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında yapılmıştır. Şekil 38'de verilen deney prosedürü uygulanırken sırasıyla I. grup tekrarlı yükleme, gerilme gevşemesi, II. grup tekrarlı yükleme ve III. grup tekrarlı yükleme yapılarak deney tamamlanmıştır. Her tekrarlı yüklemeye önce numune çenelerden sökülmeden Şekil 38'de belirtilen sürelerde yüksüz pozisyonda bekletilmiştir. Şekil 38'deki deney prosedüründe yer alan dört adet deneye başlamadan önce her bir deneyde de deney numunesi boyu yeniden ölçülmüş ve programa girilmiştir.

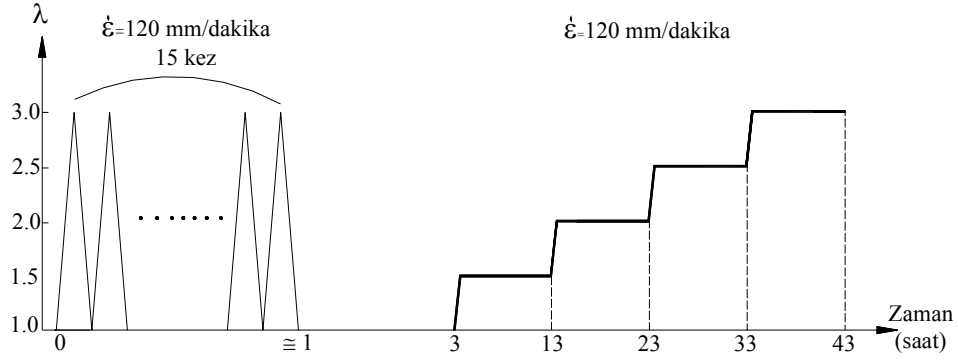
2.4.3. Gerilme Gevşemesi Deneysel Prosedürü ve Deneysel Koşulları

Gerilme gevşemesi deneysel çalışmalarında sürekli tip ölçüm sistemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler hava ortamında ve 24-27 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 39 ve Şekil 40'de gösterilen deney prosedürleri uygulanmıştır. Şekil 39'daki deney prosedüründe numune çeneler arasına bağlandıktan sonra $\lambda = 1.5$ 'a kadar 120 mm/dakika çekme hızıyla deforme edilmiş ve 10 saat süreyle gerilme-zaman verileri kaydedilmiştir. 10 saat sürenin sonunda numune $\lambda = 1.5$ 'dan $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilmiş ve burada da 10 saat süreyle gerilme-zaman verileri kaydedilmiştir. Bu işleme $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ uzama oranlarında da devam edilmiş ve yaklaşık 40 saatlik bir süre sonunda deneyler tamamlanmıştır. Bu deney prosedürü ile uzama oranının (deformasyonun) gerilme gevşemesine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu deney ile malzemenin ömrü tahmin edilebilmektedir.



Şekil 39. Malzemeye uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü

Şekil 40'da uzama oranı-zaman grafiği verilen deney prosedüründe ise gerilme gevşemesi deneyinden önce numuneye ön deformasyon prosedürü uygulanmıştır. Bunun için numune çenelere bağlandıktan sonra 120 mm/dakika çekme hızında $\lambda = 3.0$ 'a kadar 15 kez yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur. Deney sonunda numune tutma çenelerinden sökülmeden 2 saat yüksüz konumda bekletilmiş ve daha sonra Şekil 39'da verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Böylece çalışmada ön deney prosedürünün gerilme gevşemesi davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu deney prosedürü yaklaşık 43 saatte tamamlanmıştır.



Şekil 40. Malzemeye uygulanan ön deformasyon prosedürlü gerilme gevşemesi deney prosedürü

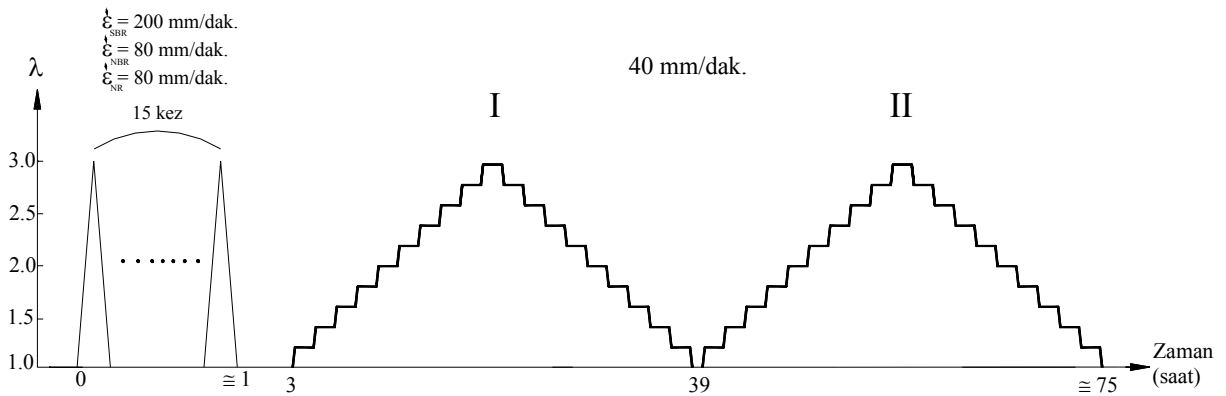
2.4.4. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Deneysel Veri Elde Edilmesi Deney Prosedürü ve Deney Koşulları

Kauçuk türü malzemelere uygulanan yükler altında malzemedeki gerilme-şekil değiştirme davranışını modellemek için hiperelastisite teorisi (non-lineer elastisite teorisi) kullanılmaktadır. Literatürde, bu teoriyi kullanarak, birçok şekil değiştirme enerji fonksiyonu önerilmiştir [26]. Benzer şekilde kauçuk türü malzemelerde meydana gelen sünme ve gerilme gevşemesi davranışı için vizkoelastisite teorisi [204-206], Mullins etkilerini modellemek için hasar mekaniği [88, 114, 207-208] ve malzemedeki histerezis davranışını modellemek için vizkoplastisite teorisi [209-211] kullanılarak birçok model önerilmiştir. Konu ile ilgili olarak, son zamanlarda yapılan çalışmalar da [88, 95, 105, 209] dikkate alındığında araştırmacılar tarafından tüm bu inelastik özellikleri kapsayacak tek bir bünye denkleminin elde edilmesinin amaçlandığı söylenebilir.

Kauçuk türü malzemelerin bünye denklemi; elastik, vizkoelastik, vizkoplastik ve hasar kısımları olarak dört gruba ayrılabilir. İnelastik özelliklerden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elastik kısım ile, gerilme gevşemesi ve sünme vizkoelastik kısım ile, malzemedeki meydana gelen histerezis vizkoplastik kısım ve Mullins etkileri ise hasar mekaniği ile modellenebilir. Yapılan bu çalışmada her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme grafiğine etkisini belirleyebilmek için Şekil 41'de verilen deney prosedürü SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerine uygulanmıştır.

Bu deney prosedüründe önce Mullins etkilerinden bağımsız veriler elde edebilmek için deney numuneleri $\lambda = 3.0$ 'a kadar, SBR kauçuk numuneleri için 200 mm/dak., NBR kauçuk numuneleri için 80 mm/dak. ve NR kauçuk numuneleri için ise 80 mm/dak. şekil

değiştirme hızında, 15 tekrarlı yükleme tabii tutulmuştur (Şekil 41). Deneilerin gerçekleştirildiği hızlar, bölüm 2.4.2. de belirtildiği gibi, ilgili malzemelerin şekil değişim hızından bağımsız deneysel veri elde edildiği hızlar olup, bu şekil değiştirme hızlarının ilerleyen bölümlerde deneysel olarak nasıl belirlendiği açıklanacaktır. Böylece, deformasyon bu hızlarda gerçekleştirilerek, deformasyona şekil değiştirme hızının etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılacaktır. 15 tekrarlı yüklemelerden sonra numune, tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiştir. Bekleme sonunda malzeme başlangıç anı olan $\lambda=1.0$ 'dan 0.2 artırımlarla 10 defa çekme deformasyonuna tabii tutulmuş ve her deformasyon sonunda 2 saat bekleme yapılmıştır. Bu beklemler sırasında numunedeki gerilme-zaman değerleri kayıt edilmiştir. Maksimum deformasyona ulaştıktan, $\lambda=3.0$, sonra numuneye uygulanan kuvvet tekrar 0.2 uzama oranı adımıyla kaldırılmış ve yine her bir adımda 2 saat bekleme yapılmıştır. Bu yükleme-boşaltma çevrimi iki defa tekrar edilerek deney tamamlanmıştır. Şekil 41'deki bu yükleme-boşaltma çevrimlerinin, Mullins etkilerini giderici yükleme-boşaltma çevrimleriyle karıştırılmaması için, "I. ve II. Gerilme Gevşemesini Giderici Yükleme-Boşaltma Çevrimi" olarak tanımlanmıştır.



Şekil 41. İnelastik özelliklerden bağımsız veri elde edebilmek için uygulanan deney prosedürü

2.5. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Yapılan çalışmada kullanılacak olan numuneler, deformasyon sebebiyle, hem kristalize olabilen hem de kristalize olmayan kauçuk türü malzemelerden seçilmiştir. Bu amaçla çalışmada deformasyon sebebiyle kristalize olmayan SBR ve NBR kauçuğu ile

kristalize olabilen NR kauçuğu [51-52] kullanılmış ve bu malzemelere ait inelastik özellikler incelenmiştir. Deneylerde kullanılan SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerine ait karışım bilgileri, sırasıyla Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 7. SBR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri

Malzeme (SBR-50 SH A)	Miktar (Birim)
SBR1502	1000
Çinko Oksit	50
Stearik Asit	10
Antioksidant	30
Ozonvax	40
FEF N 550	350
Plastifiyan	100
TBBS	10,7
Otos	11,5
Kükürt	15
	1617,2

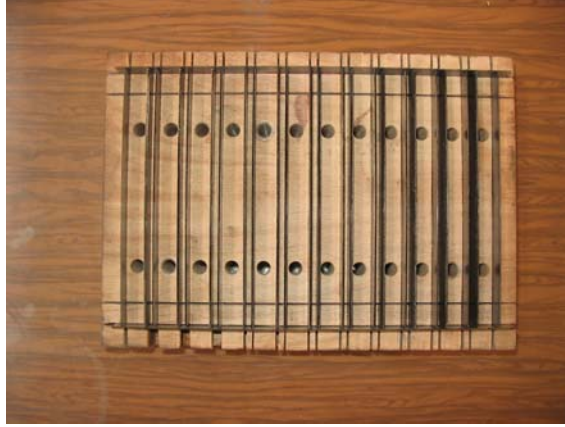
Tablo 8. NBR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri

Malzeme (NBR - 70 SH A)	Miktar (Birim)
NBR 33/80	1000
Çinko Oksit	50
S. Asit	10
Antioksidant	25
FEF N 550	425
İnert Silika	400
Plastifiyan	60
AFLUX 42	20
Kükürt	10
MBTS	10
TBzTD	25
	2035

Tablo 9. NR kauçuk malzemesine ait karışım bilgileri

Malzeme (NR-60 SH A)	Miktar (Birim)
NR Kauçuk	1000
Çinko Oksit	50
Stearik Asit	10
Antioksidant	45
Ozonvax	30
HAF N 330	370
Plastifiyan	12
CBS	8
Kükürt	40
	1565

Çalışmada, şekil değişimi ölçümü tutma çeneleri arasındaki mesafenin değişimi olarak ölçüldüğünden deneylerde Dumbbell numune yerine dikdörtgen formda numune kullanılmıştır. Numuneler, 200x150x2 [mm] boyutlarında dökülmüş olan kauçuk plakadan 5x2x110 [mm] boyutlarında Şekil 42’de görülen kesme kalıbı ile kesilerek elde edilmiştir.



Şekil 42. Kauçuk numune kesme kalıbı

3. BULGULAR

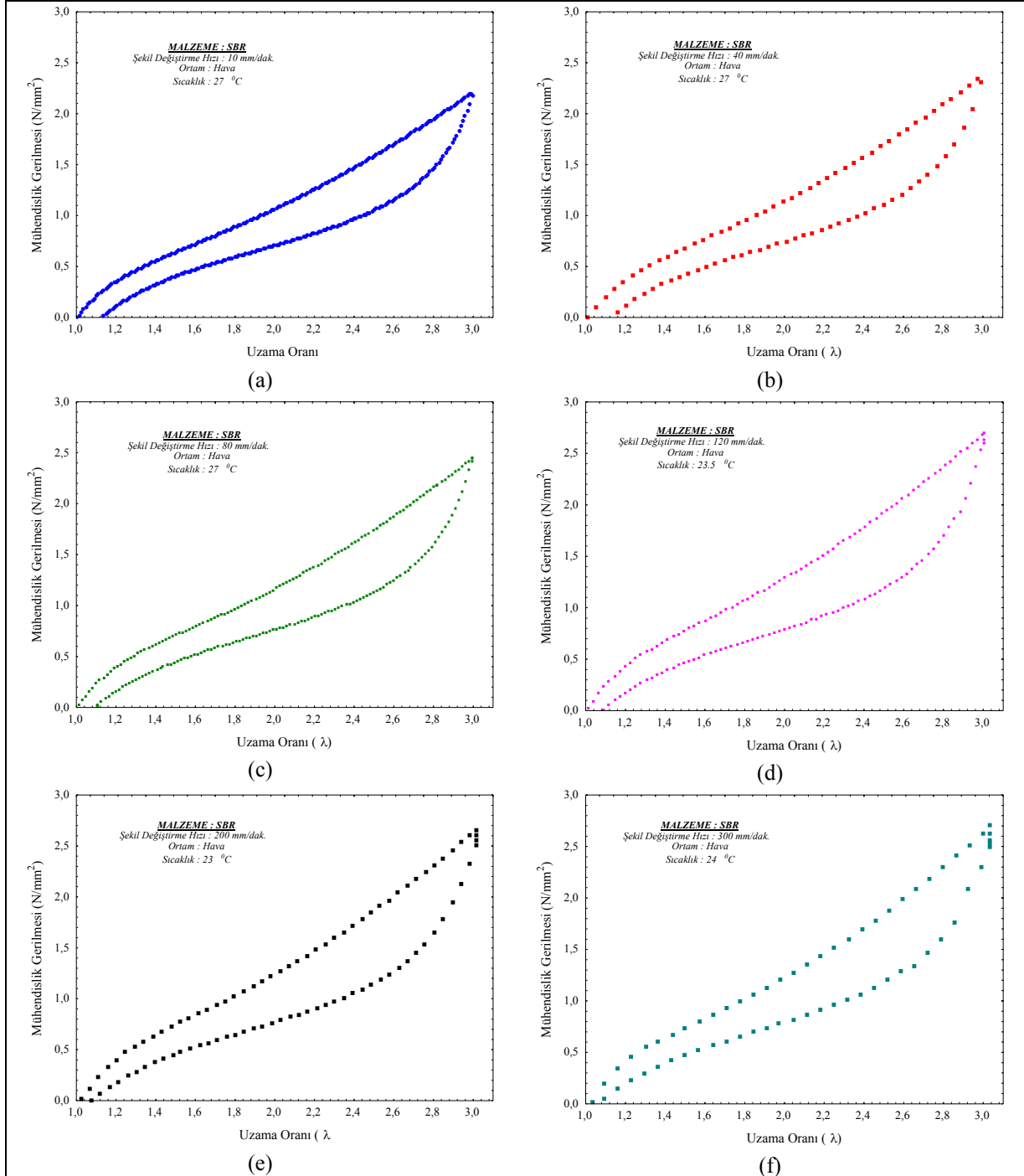
3.1. Şekil Değişirme Hızı Deneyleri

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi de farklı şekil değişirme hızlarında malzemenin gerilme-uzama oranı davranışının farklılık göstermesidir. Bu çalışmada SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin farklı şekil değişirme hızlarında yükleme-boşaltma çevrimleri yapılarak şekil değişirme hızının malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca deney numunelerine ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda, şekil değişirme hızının etkisi incelenerek ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve uygulanmamış durumlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

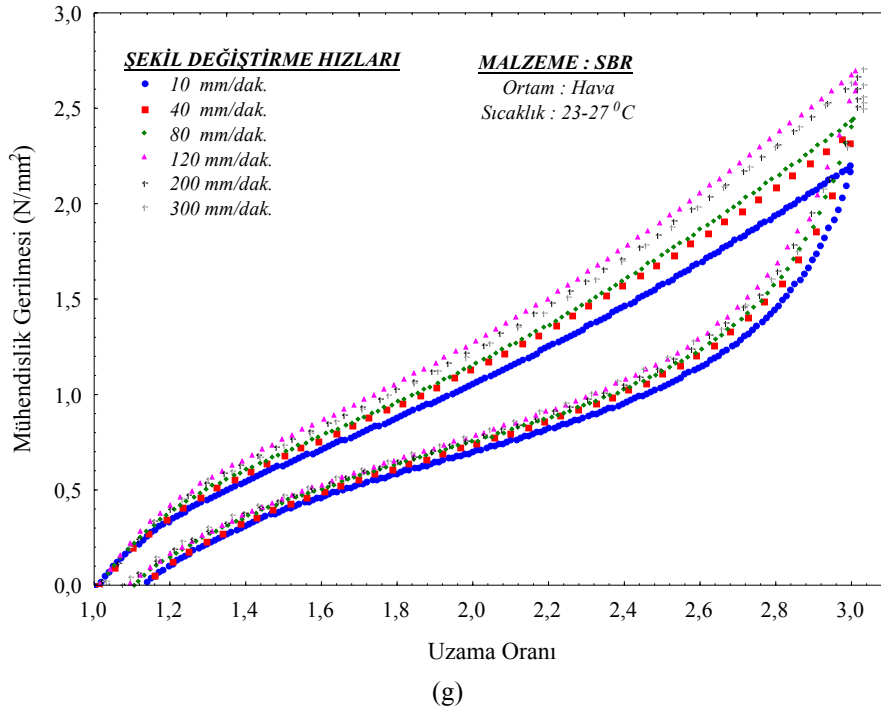
3.1.1. SBR Kauçuk Deneyleri

Şekil 33'de verilen deney prosedürü SBR kauçuk malzemesi deney numunelerine uygulanmış ve Şekil 43'de verilen mühendislik gerilmesi-uzama oranı grafiği elde edilmiştir. Deneyde sırasıyla $\dot{\epsilon} = 10\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 40\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 80\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 120\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 200\text{mm/dak.}$ ve $\dot{\epsilon} = 300\text{mm/dak.}$ şekil değişirme hızlarında malzemenin yükleme-boşaltma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Malzemenin, her bir şekil değişirme hızındaki davranışı Şekil 43a-f'de görülmektedir. Deneyin toplu halde grafikleri ise Şekil 43g'de verilmiştir. Şekil 43g'den de görüleceği üzere artan şekil değişirme hızlarında malzemenin gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum özellikle yükleme eğrileri boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrisinde ise yükleme eğrisine göre daha az bir davranış farklılığı söz konusudur. SBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değişirme hızlarında, malzemenin yükleme deformasyonu sırasında uzama oranı 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 ve boşaltma deformasyonu sırasında uzama oranı 2.5, 2.0 ve 1.5'deki gerilme değerleri Tablo 10'da sunulmuştur. Tablo değerlerinden artan şekil değişirme hızlarında gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, Tablo 10'daki

veriler kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 44'da verilmiştir.



Şekil 43. a-f) SBR kauçuk malzemesinin, sırasıyla, $\dot{\epsilon} = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak . şekil değiştirme hızlarında gerilme-uzama oranı grafikleri



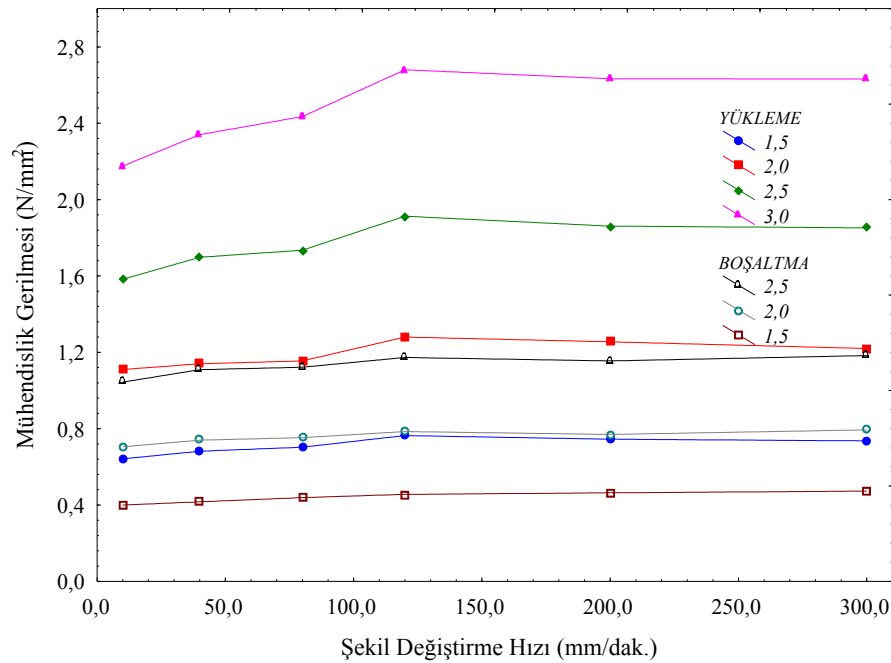
Şekil 43. g) Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi

Tablo 10. SBR kauçuğunun, 1.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	0,642	1.110	1.583	2.176	1.044	0.705	0.400
40 mm/dak.	0.682	1.140	1.698	2.340	1.109	0.740	0.417
80 mm/dak.	0.703	1.155	1.735	2.435	1.122	0.753	0.439
120 mm/dak.	0.764	1.280	1.913	2.680	1.173	0.785	0.456
200 mm/dak.	0.745	1.255	1.861	2.633	1.155	0.770	0.464
300 mm/dak.	0.736	1.220	1.852	2.632	1.183	0.794	0.473

Çalışmada şekil değiştirme hızıyla ilgili bir diğer araştırma, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda gerilme-uzama oranı verilerinin ön deformasyon prosedürü uygulanmasından nasıl etkileneceğidir. Bunun için ilk önce malzemeye uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün hangi hızda yapılması

gerektiği belirlenmelidir. Esasen düşük hızlarda deneyler doğru sonuç vermekle birlikte oldukça uzun bir zaman almaktadır. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin 15 defa yükleme-boşaltma çevrimlerinin (Şekil 34) 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilmesi durumunda her bir deney için geçen süreler Tablo 11’de verilmiştir. Tablodan şekil değiştirme hızının azalmasıyla deney süresinin arttığı görülmektedir. SBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri toplu olarak Şekil 43g’de ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 45’de verilmiştir. 15 tekrarlı yükleme sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin birbirine, 1. yükleme-boşaltma çevrimi ile karşılaştırıldığında, oldukça yakınsadığı görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma çevrim verilerinin 10, 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızları için beraber çizilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 46). Şekil 45’deki sonuçlar, ayrıca, Tablo 12’de gerilme değerleri için ifade edilmiştir. Tablo 12’deki veriler kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 47’de verilmiştir.

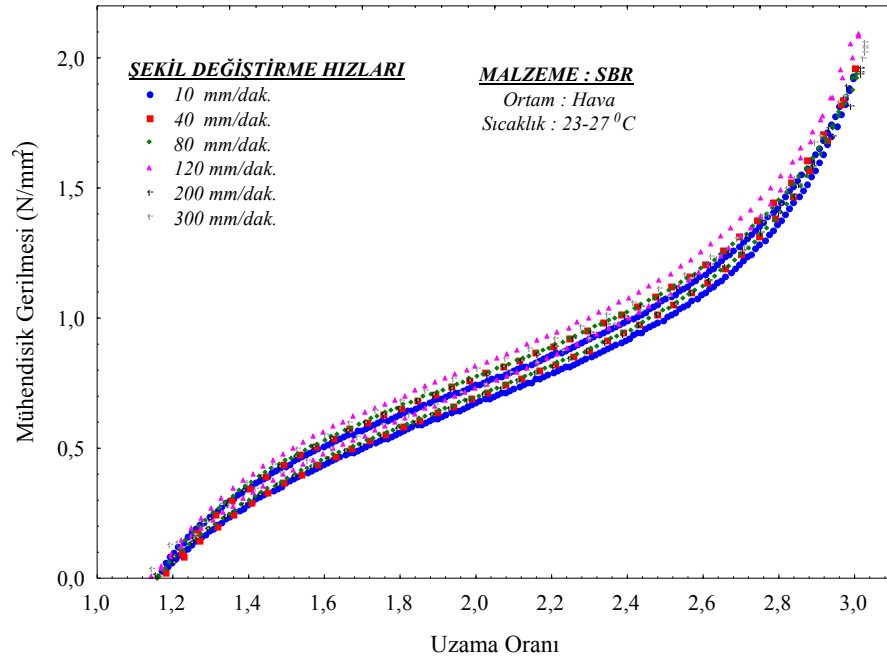


Şekil 44. SBR kauçuk malzemesinin 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi

SBR kauçuğuna ön deformasyon prosedürü uygulama hızı 200 mm/dak. olarak belirlendikten sonra malzemeye Şekil 35’de verilen ön deformasyon prosedürü uygulanmıştır. Bunun için malzeme 200 mm/dak hızında ön deformasyon prosedürüne tabi tutulmuş ve ön deformasyon prosedüründen sonra malzeme tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiştir. Beklemeden sonra malzeme, 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutularak, ön deformasyon prosedürü uygulamanın malzemenin özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Şekil 48). Şekil 48’den malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda tüm hızlarda gerilme-uzama oranı eğrilerinin neredeyse üst üste çakıştığı görülmektedir. Bu durum sadece $\lambda \geq 2.9$ bölgesinden sonra farklılık arz etmektedir.

Tablo 11. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\varepsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15 tekrarlı yükleme için geçen süreler

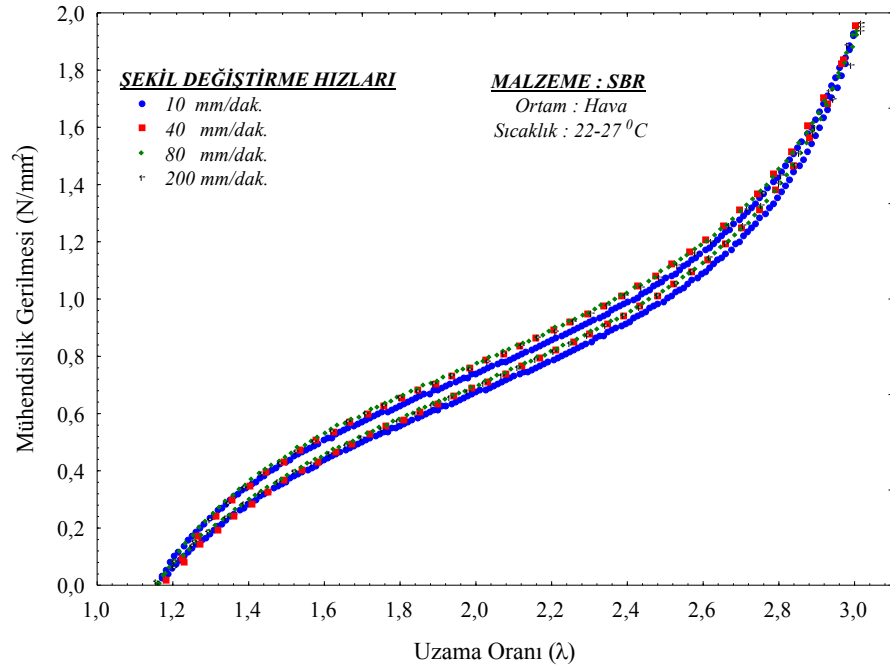
Şekil Değiştirme Hızı (ε)	SBR	NBR	NR
	Deney Süresi (saat: dak.:san.)	Deney Süresi (saat: dak.:san.)	Deney Süresi (saat: dak.:san.)
10 mm/dak.	06:53:46	06:45:42	07:04:52
40 mm/dak.	01:43:47	01:34:36	01:49:47
80 mm/dak.	00:54:32	00:51:56	00:53:43
120 mm/dak.	00:36:48	00:36:05	00:37:02
200 mm/dak.	00:22:55	00:22:09	00:23:05
300 mm/dak.	00:16:50	00:15:04	00:16:45



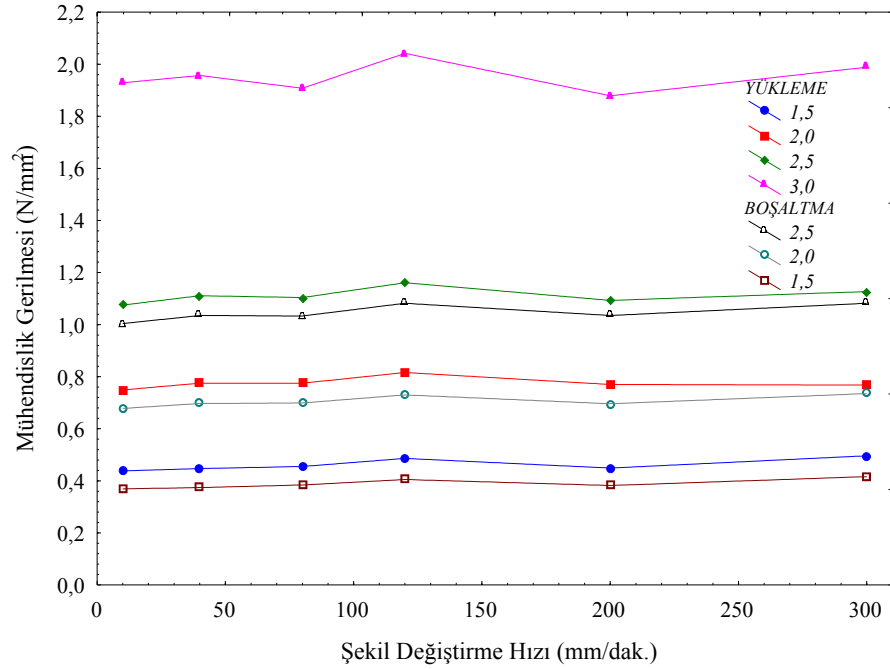
Şekil 45. SBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri

Tablo 12. SBR kauçuğunun, 15.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

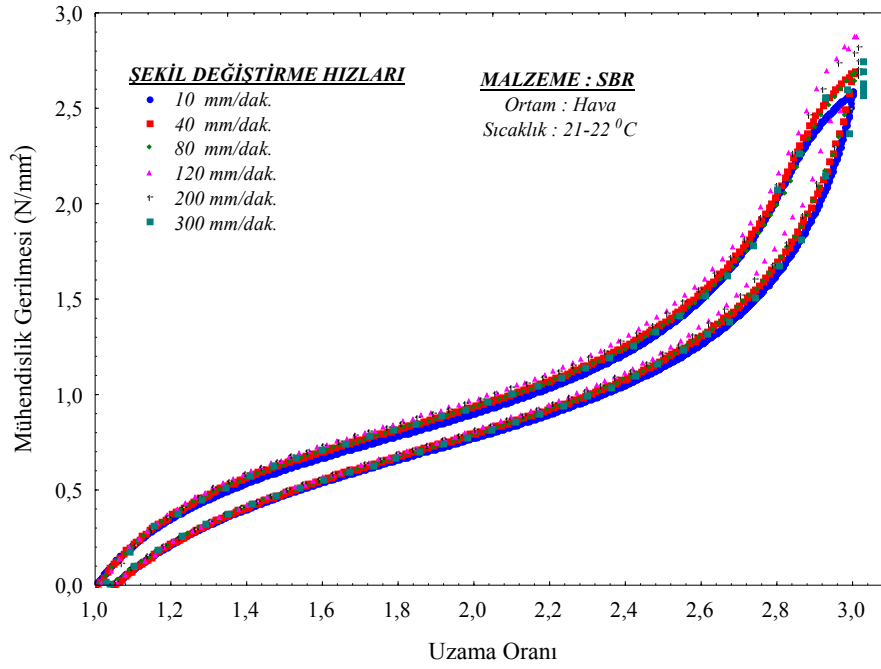
ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	0.438	0.749	1.075	1.929	1.004	0.678	0.369
40 mm/dak.	0.447	0.775	1.111	1.957	1.035	0.697	0.374
80 mm/dak.	0.455	0.775	1.104	1.908	1.033	0.699	0.384
120 mm/dak.	0.486	0.816	1.161	2.042	1.082	0.730	0.405
200 mm/dak.	0.449	0.770	1.093	1.879	1.035	0.696	0.382
300 mm/dak.	0.496	0.768	1.127	1.989	1.082	0.735	0.416



Şekil 46. SBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 47. SBR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi



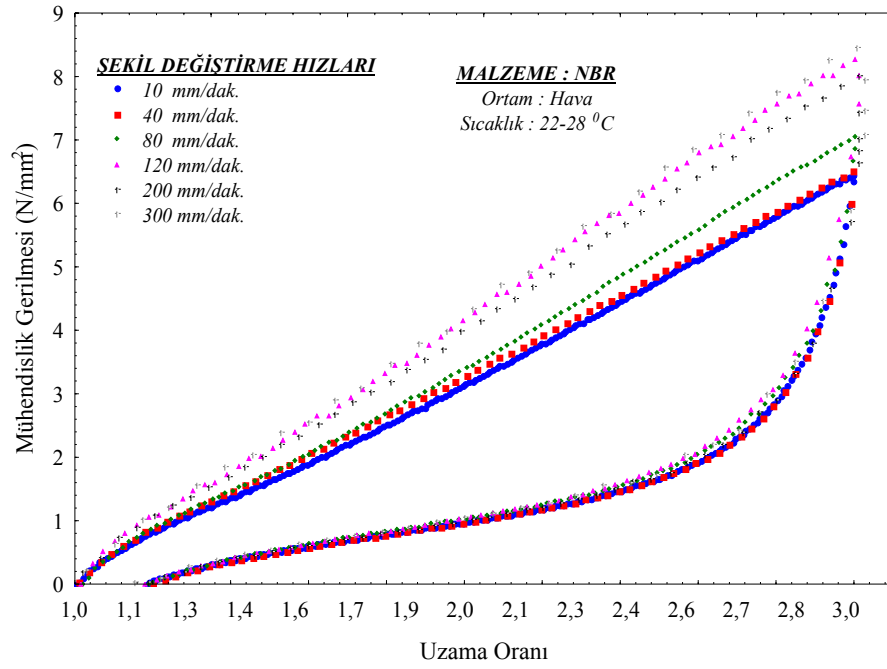
Şekil 48. SBR kauçuk malzemesine ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra şekil değiştirme hızlarının karşılaştırılması

3.1.2. NBR Kauçuk Deneyleri

Şekil 33’de verilen deney prosedürü NBR kauçuk malzemesinden hazırlanan deney numunelerine uygulanmış ve Şekil 49’da verilen mühendislik gerilmesi-uzama oranı grafiği elde edilmiştir. Deneyde, sırasıyla, $\dot{\epsilon} = 10\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 40\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 80\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 120\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 200\text{mm/dak.}$ ve $\dot{\epsilon} = 300\text{mm/dak.}$ şekil değiştirme hızlarında yükleme-boşaltma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 49’dan görüleceği üzere artan şekil değiştirme hızlarında malzemenin gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum özellikle yükleme eğrisi boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrisinde ise neredeyse tüm hızlardaki gerilme-uzama oranı verileri üst üste düşmektedir. NBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında, malzemenin yükleme deformasyonu sırasında uzama oranı 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 ve boşaltma deformasyonu sırasında uzama oranı 2.5, 2.0 ve 1.5’deki gerilme değerleri Tablo 13’de sunulmuştur. Tablo değerlerinden de artan şekil değiştirme hızlarında gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, Tablo 13’deki veriler kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 50’de verilmiştir.

Çalışmada, NBR kauçuk malzemesine uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün hangi hızda yapılacağını belirlemek için malzeme, Şekil 34’de verilen, 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. NBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri toplu olarak Şekil 49’da ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 51’de verilmiştir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin birbirine, 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen verilerle karşılaştırıldığında, neredeyse tamamen yakınsadığı görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma çevrim verilerinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızları için aynı grafikte çizilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 52). Şekil 51’deki sonuçlar, ayrıca, Tablo 14’de gerilme değerleri için ifade edilmiştir. Tablo 14’deki veriler kullanılarak da sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 53’de verilmiştir.

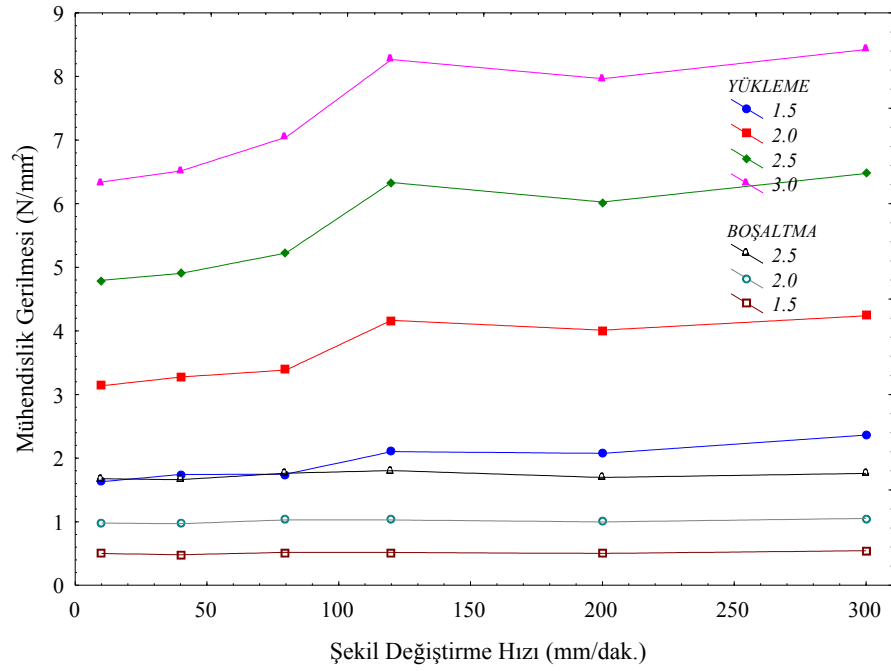
NBR kauçuğunun, ön deformasyon prosedürü uygulama hızı Şekil 34’deki deney prosedürünün uygulanmasıyla 80 mm/dak. olarak belirlendikten sonra (bölüm 4.2) malzemeye Şekil 35’de verilen ön deformasyon prosedürü uygulanmıştır. Bunun için malzeme 80 mm/dak hızında ön deformasyon prosedüre tabi tutulmuş ve ön deformasyon prosedüründen sonra malzeme tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiştir. Beklemeden sonra malzeme 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutularak ön deformasyon prosedürü uygulamanın malzemenin özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Şekil 53). Şekil 53’den malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda neredeyse tüm hızlarda gerilme-uzama oranı eğrilerinin yükleme durumunda birbirinden tamamen farklı olduğu boşaltma durumunda ise tüm hızlardaki gerilme-uzama oranı verilerinin üst üste düştüğü görülmektedir.



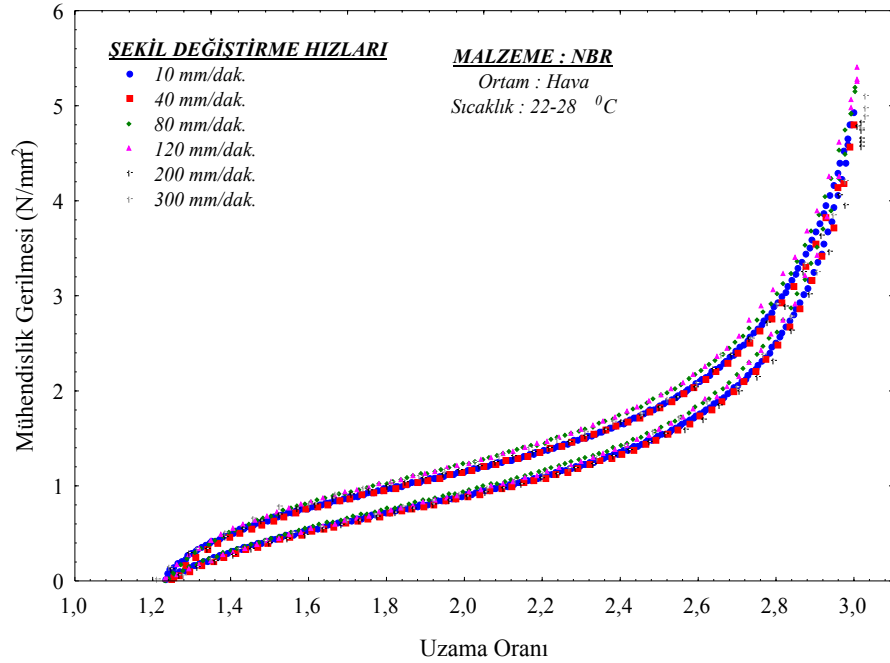
Şekil 49. NBR kauçuk malzemesinin $\varepsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1. yükleme-boşaltma verileri

Tablo 13. NBR kauçuğunun, 1.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

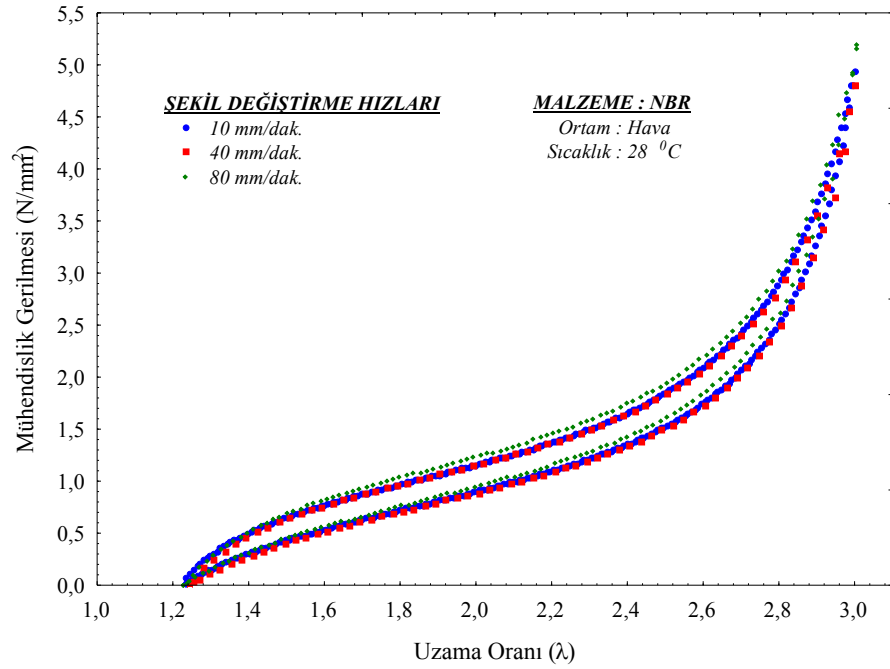
ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	1.629	3.137	4.795	6.339	1.675	0.979	0.500
40 mm/dak.	1.743	3.275	4.903	6.514	1.662	0.969	0.481
80 mm/dak.	1.747	3.385	5.225	7.044	1.763	1.029	0.518
120 mm/dak.	2.102	4.166	6.333	8.266	1.804	1.028	0.516
200 mm/dak.	2.075	4.011	6.026	7.965	1.696	0.997	0.502
300 mm/dak.	2.363	4.237	6.475	8.424	1.760	1.052	0.544



Şekil 50. NBR kauçuk malzemesinin 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi



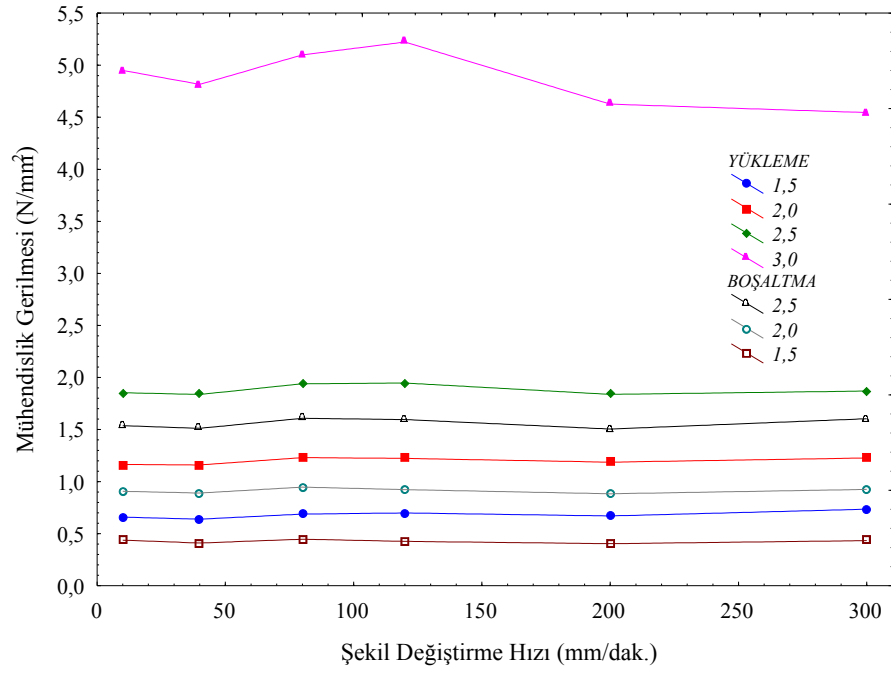
Şekil 51. NBR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri



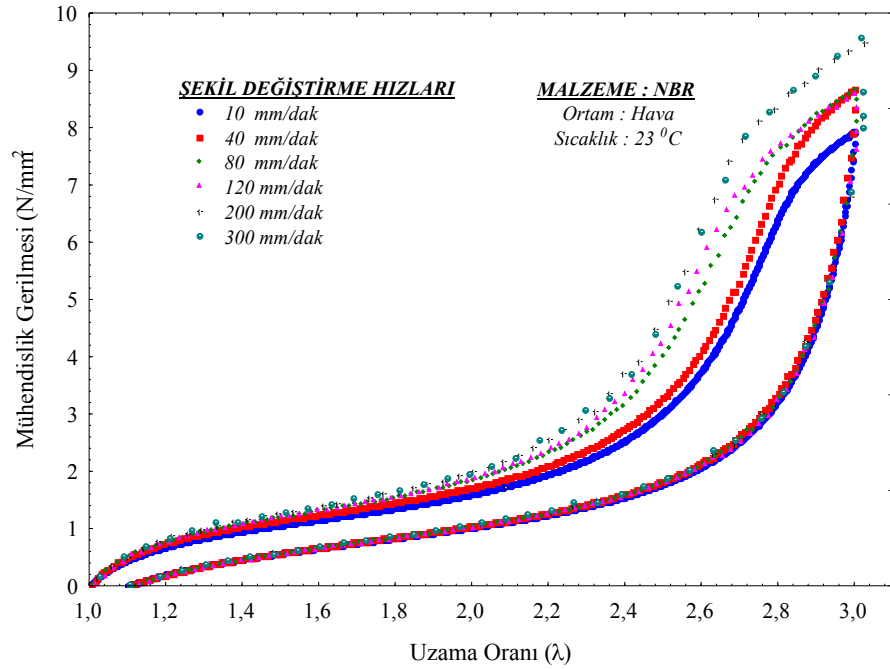
Şekil 52. NBR kauçuk malzemesinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri

Tablo 14. NBR kauçuğunun, 15.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	0.659	1.164	1.854	4.950	1.537	0.907	0.438
40 mm/dak.	0.639	1.160	1.837	4.816	1.512	0.890	0.410
80 mm/dak.	0.688	1.231	1.940	5.099	1.608	0.947	0.447
120 mm/dak.	0.699	1.233	1.947	5.223	1.596	0.923	0.426
200 mm/dak.	0.670	1.187	1.838	4.626	1.505	0.883	0.404
300 mm/dak.	0.735	1.227	1.870	4.545	1.604	0.925	0.433



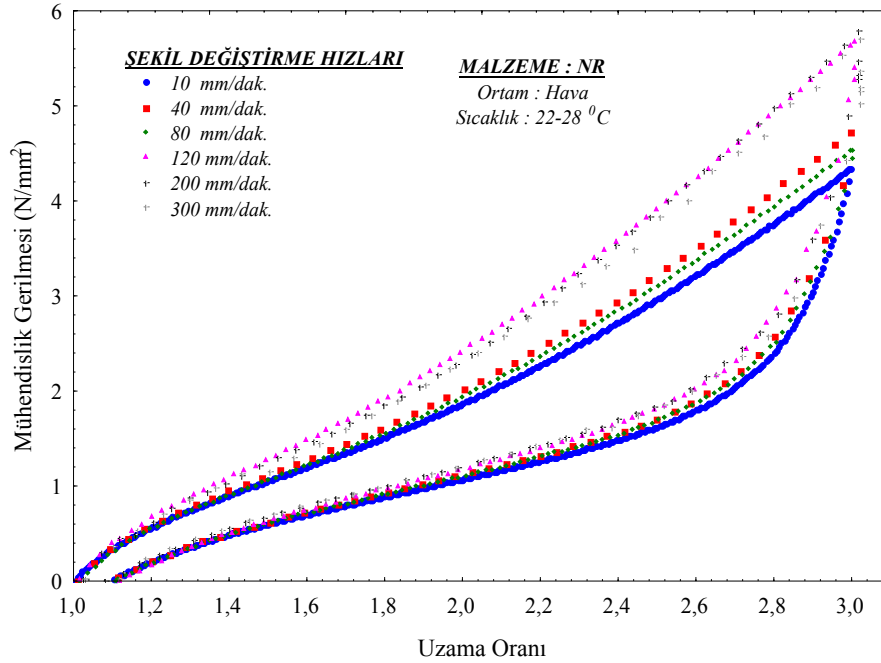
Şekil 52. NBR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi



Şekil 53. NBR kauçuk malzemesinin ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra şekil değiştirme hızlarının karşılaştırılması

3.1.3. NR Kauçuk Deneyleri

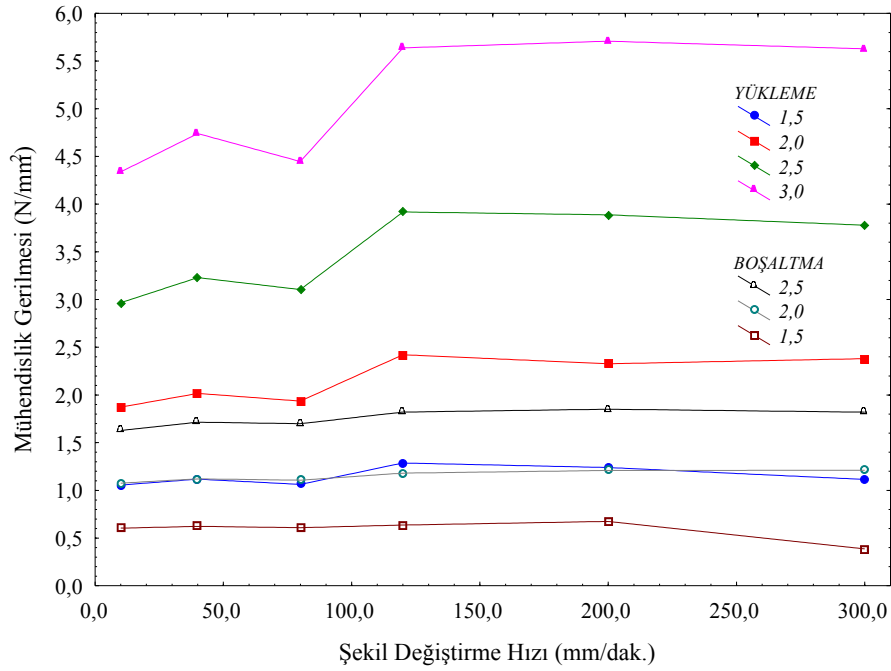
Şekil 33’de verilen deney prosedürü NR kauçuk deney numunelerine uygulanmış ve Şekil 54’de verilen mühendislik gerilmesi-uzama oranı grafiği elde edilmiştir. Deneyde, sırasıyla, $\varepsilon = 10\text{mm/dak.}$, $\varepsilon = 40\text{mm/dak.}$, $\varepsilon = 80\text{mm/dak.}$, $\varepsilon = 120\text{mm/dak.}$, $\varepsilon = 200\text{mm/dak.}$ ve $\varepsilon = 300\text{mm/dak.}$ şekil değiştirme hızlarında malzemenin yükleme-boşaltma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 54’den görüleceği üzere artan şekil değiştirme hızlarında malzemenin gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum özellikle yükleme eğrisi boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrisinde ise yükleme eğrisine göre daha az belirgin bir davranış farklılığı söz konusudur. NR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında, malzemenin yükleme deformasyonu sırasında uzama oranı 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 ve boşaltma deformasyonu sırasında uzama oranı 2.5, 2.0 ve 1.5’deki gerilme değerleri Tablo 15’de sunulmuştur. Tablo değerlerinden de yine artan şekil değiştirme hızlarında gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, Tablo 15’deki veriler kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 55’de verilmiştir.



Şekil 54. NR kauçuk malzemesinin $\varepsilon = 10, 40, 80, 120, 200$ ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1. yükleme-boşaltma verileri

Tablo 15. NR kauçuğunun, 1.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

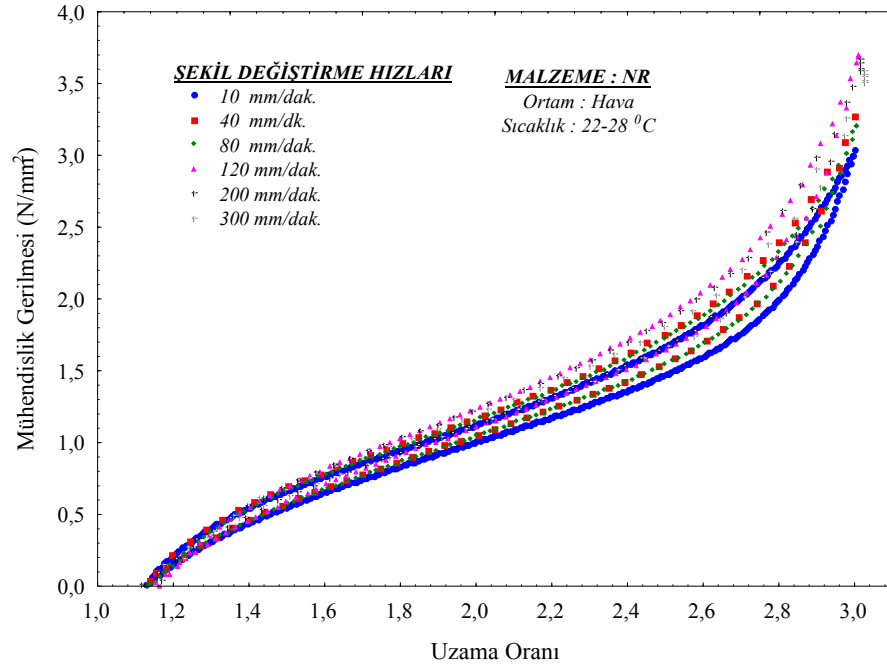
ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	1.056	1.872	2.967	4.338	1.628	1.076	0.604
40 mm/dak.	1.118	2.017	3.230	4.740	1.715	1.121	0.623
80 mm/dak.	1.063	1.936	3.105	4.447	1.699	1.107	0.609
120 mm/dak.	1.287	2.422	3.918	5.638	1.821	1.181	0.637
200 mm/dak.	1.240	2.327	3.888	5.708	1.851	1.209	0.675
300 mm/dak.	1.150	2.381	3.779	5.628	1.820	1.212	0.686



Şekil 55. NR kauçuk malzemesinin 1. yüklem-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi

Çalışmada, NR kauçuk malzemesine uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün hangi hızda yapılacağını belirleyebilmek için malzeme, Şekil 34’de verilen, 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. NR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri toplu olarak Şekil 54’de ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 56’da verilmiştir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin birbirine, 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilenlerle karşılaştırıldığında, sonuçların yakınsadığı görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma verilerinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızları için aynı şekil üzerinde çizilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 57). Şekil 56’daki sonuçlar, ayrıca, Tablo 16’da gerilme değerleri için ifade edilmiştir. Tablo 16’daki veriler kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 58’de verilmiştir.

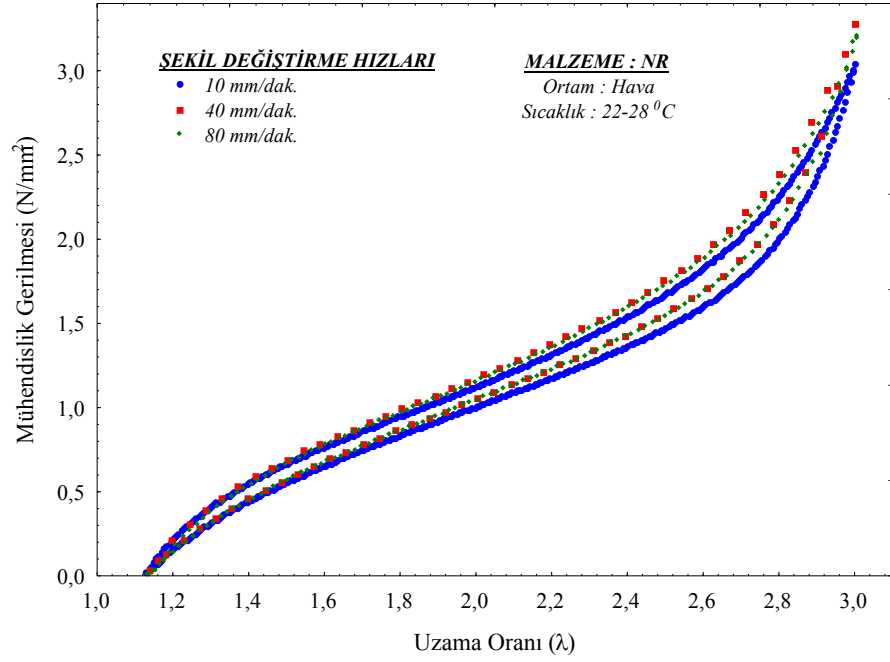
NR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulama hızı 80 mm/dak. olabileceği gözlemlendikten sonra deney numunelerine Şekil 35’de verilen ön deformasyon prosedürü uygulanmıştır. Bunun için numuneler 80 mm/dak hızında ön deformasyon prosedürüne tabi tutulmuş ve sonra numuneler tutma çenelerinden sökülmeden yüksüz pozisyonda 2 saat bekletilmiştir. Beklemeden sonra malzeme 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 1 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutularak ön deformasyon prosedürü uygulamanın malzemenin özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Şekil 59). Şekil 59’dan malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda neredeyse tüm hızlarda gerilme-uzama oranı eğrilerinin aynı olduğu görülmektedir. Bu durum sadece $\lambda \geq 2.8$ bölgesinden sonra farklılık arz etmektedir.



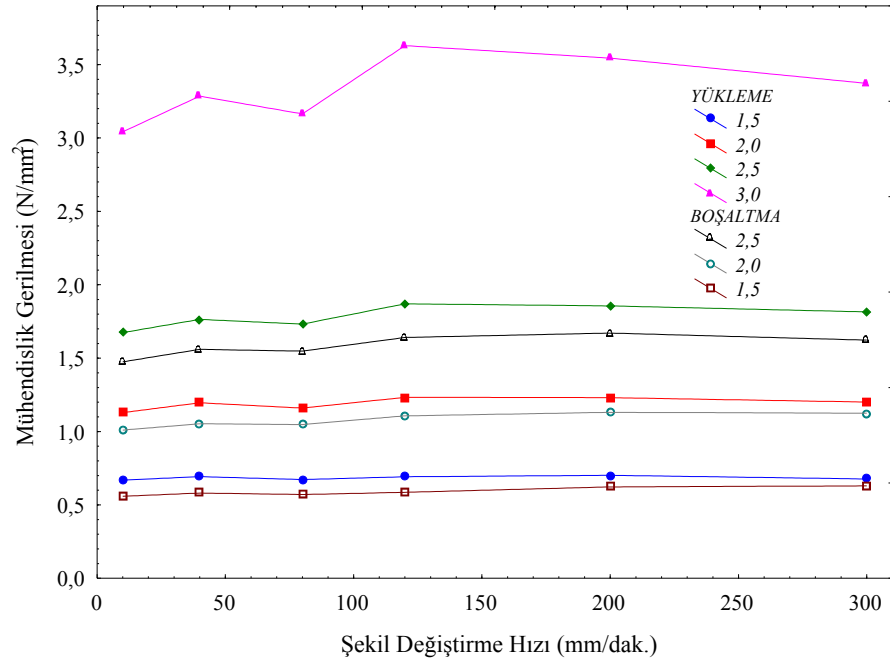
Şekil 56. NR kauçuk malzemesinin 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri

Tablo 16. NR kauçuğunun, 15.yükleme-boşaltma çevrimi sonunda sabit uzama oranları için 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme değerleri

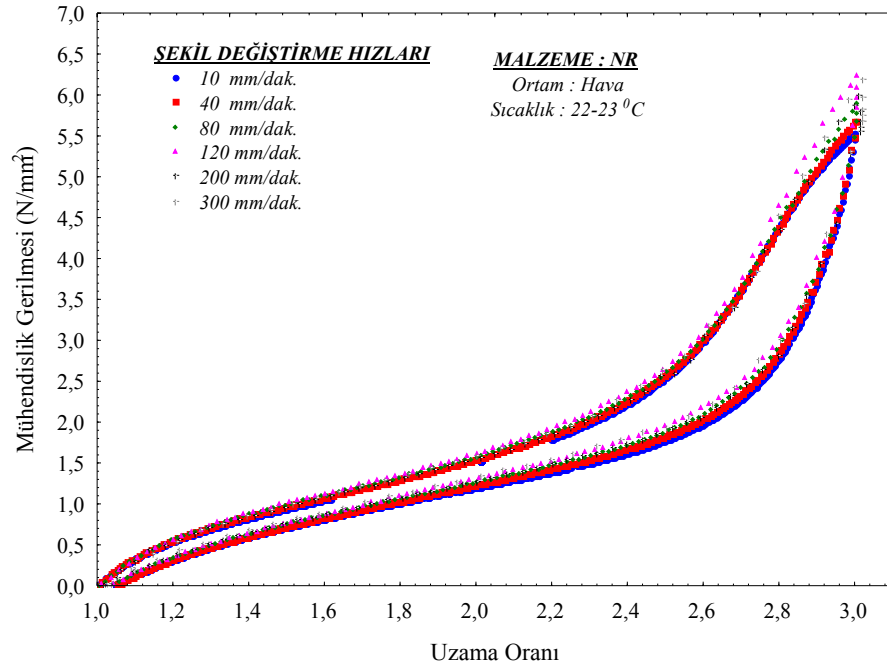
ε	YÜKLEME			$\sigma_{\lambda=3.0}$ (N/mm ²)	BOŞALTMA		
	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)		$\sigma_{\lambda=2.5}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=2.0}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\lambda=1.5}$ (N/mm ²)
10 mm/dak.	0.669	1.129	1.674	3.042	1.475	1.010	0.559
40 mm/dak.	0.693	1.196	1.764	3.285	1.560	1.053	0.581
80 mm/dak.	0.673	1.160	1.732	3.164	1.548	1.048	0.571
120 mm/dak.	0.692	1.233	1.870	3.629	1.641	1.107	0.586
200 mm/dak.	0.702	1.231	1.856	3.544	1.671	1.131	0.623
300 mm/dak.	0.677	1.201	1.815	3.372	1.623	1.125	0.630



Şekil 57. NR kauçuk malzemesinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 58. NR kauçuk malzemesinin 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, sabit uzama oranlarında, gerilmenin şekil değiştirme hızı ile değişimi



Şekil 59. NR kauçuk malzemesinin ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonraki gerilme-şekil değiştirme hızı ilişkisi

3.2. Mullins Etkileri Deneyleri

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi de tekrarlı yükleme-boşaltma çevrimlerinde gerilmedeki azalmadır. Kauçuk-türü malzemelerin tekrarlı yükleme ve sabit deformasyon altında gerilme değerlerinin azaldığı ve bu özelliğinin, literatürde Mullins etkileri olarak tanımlandığı daha önce ifade edilmişti. Yapılan çalışmada SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerde Mullins etkilerinin malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi araştırılmıştır.

3.2.1. SBR Kauçuk Deneyleri

Kauçuk-türü malzemelerin Mullins etkilerini inceleyebilmek için deney numuneleri N tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney numuneleri her bir yükleme-boşaltma çevriminde, sabit uzama oranına kadar deforme edilmiş ve serbest bırakılmıştır. Böylece sabit deformasyon altında, tekrarlı yüklemelerde gerilmedeki azalma yani gerilme yumuşaması gözlemlenmiştir. Çalışmada, N , tekrarlı yükleme sayısı, 15 olarak seçilmiştir.

Yapılan çalışmada, SBR kauçuk numunesinde Mullins etkilerini inceleyebilmek için deney numuneleri 15 kez, 200 mm/dak. şekil değiştirme hızında, $\lambda = 3.0$ 'e kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur (Şekil 36). Malzemenin, her bir yükleme-boşaltma çevrimlerindeki davranışı Şekil 60a-n'de görülmektedir. Deneyin toplu halde grafikleri ise Şekil 60-o'da verilmiştir. Şekil 60-o'dan da görüleceği üzere artan yükleme-boşaltma çevrim sayılarında gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve kararlı hale gelmektedir. SBR kauçuk malzemesinde 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşaması 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte incelenmesinden daha açık şekilde görülmektedir (Şekil 61).

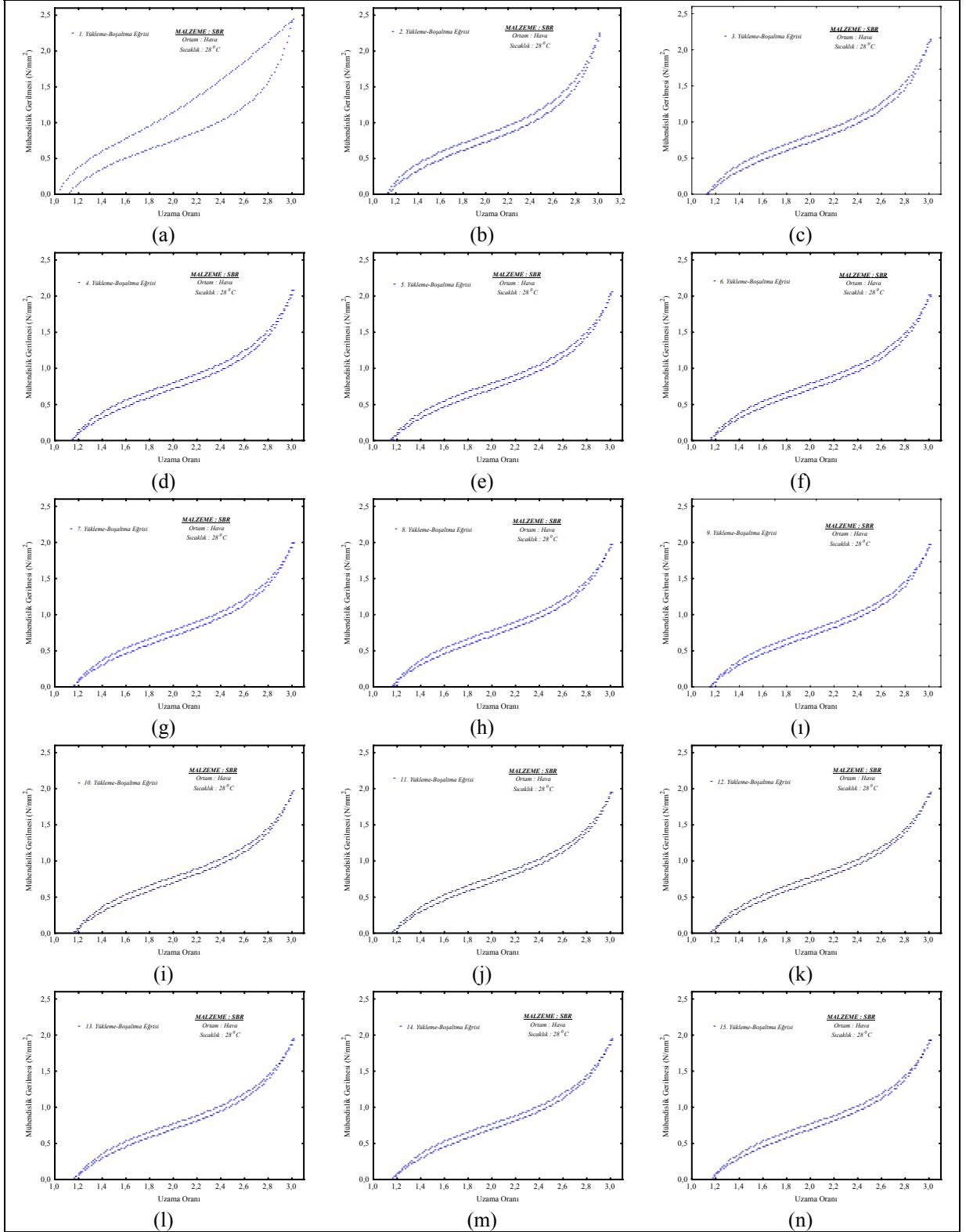
Kauçuk-türü malzemelerde, Mullins etkileri sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşamasının kararlı hale gelip gelmediği, eğer kararlı hale gelme söz konusu ise bunun kaçınıcı yükleme-boşaltma çevriminde oluştuğunu belirleyebilmek için malzemeye uygulanan tekrarlı yükleme altında aşağıdaki durumlar incelenmelidir.

- Maksimum deformasyonda, gerilmedeki azalma,
- Tekrarlı yükleme sebebiyle kalıcı deformasyondaki değişim,
- Tekrarlı yükleme sebebiyle histerezisdeki azalma (histerezis kayıpları)

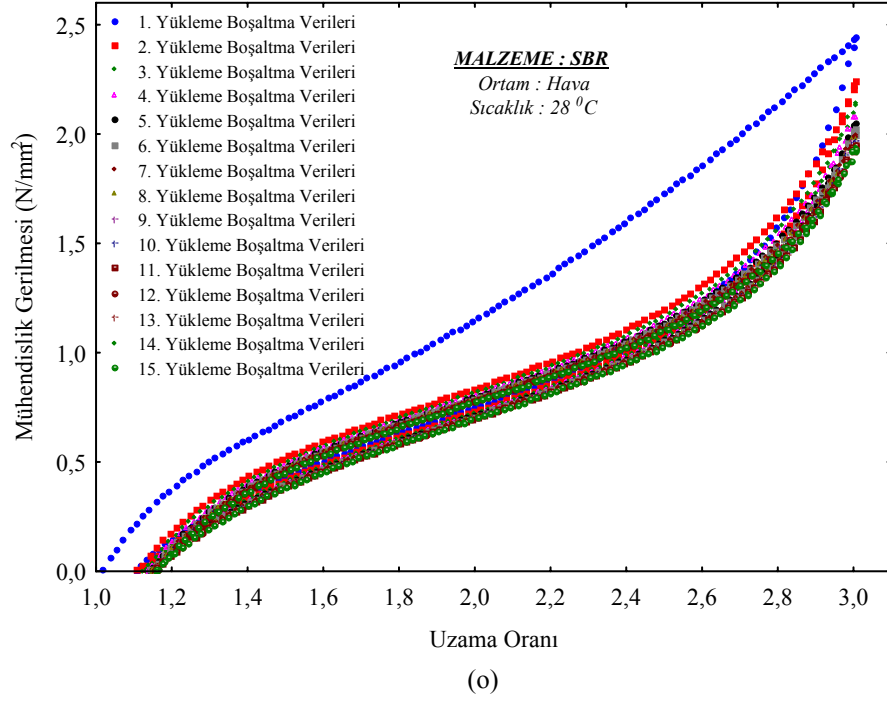
Gerilmenin kararlı hale gelmesi için gerekli tekrarlı yükleme sayısı (N) malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmada, kullanılan SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerde Mullins etkilerinin kararlı hale geldiği tekrarlı yükleme sayısını belirleyebilmek için Şekil 36'da gösterilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney numuneleri $\lambda = 3.0$ 'a kadar 15 tekrarlı yükleme tabi tutulmuştur. Böylece malzemedeki Mullins etkilerini gidermek için gerekli N tekrarlı yükleme sayısı belirlenmiştir.

SBR kauçuk malzemesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri kaydedilerek bu değerler Tablo 17'de sunulmuştur. Bu gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 62'de verilmiştir.

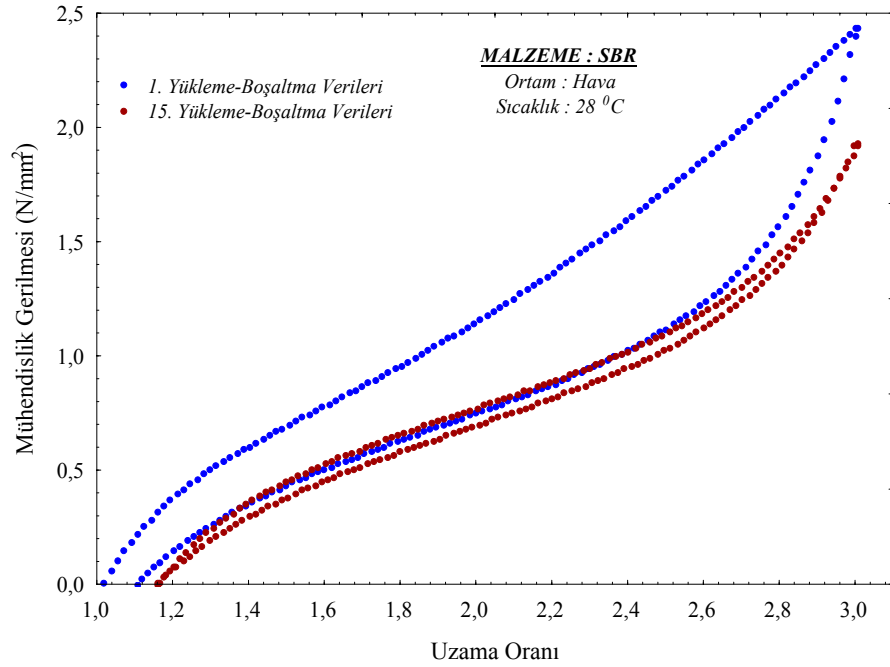
Kauçuk türü malzemelere uygulanan kuvvetin serbest bırakılmasıyla numunenin ilk (orijinal) boyuna geri dönmediği bilinmektedir. Bu ise, literatürde, kalıcı deformasyon olarak adlandırılmaktadır. SBR kauçuk deney numunesine 15 tekrarlı yükleme uygulanması durumunda, malzemedeki kalıcı deformasyonun değişimini incelemek için her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonundaki kalıcı deformasyon değerleri Tablo 18'de verilmiştir. Bu kalıcı deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 63'de verilmiştir.



Şekil 60. a-n) SBR kauçuk deney numunesinin $\varepsilon = 200 \text{ mm / dak.}$ şekil değiştirme hızında 1.-15. yükleme-boşaltma çevrim verileri



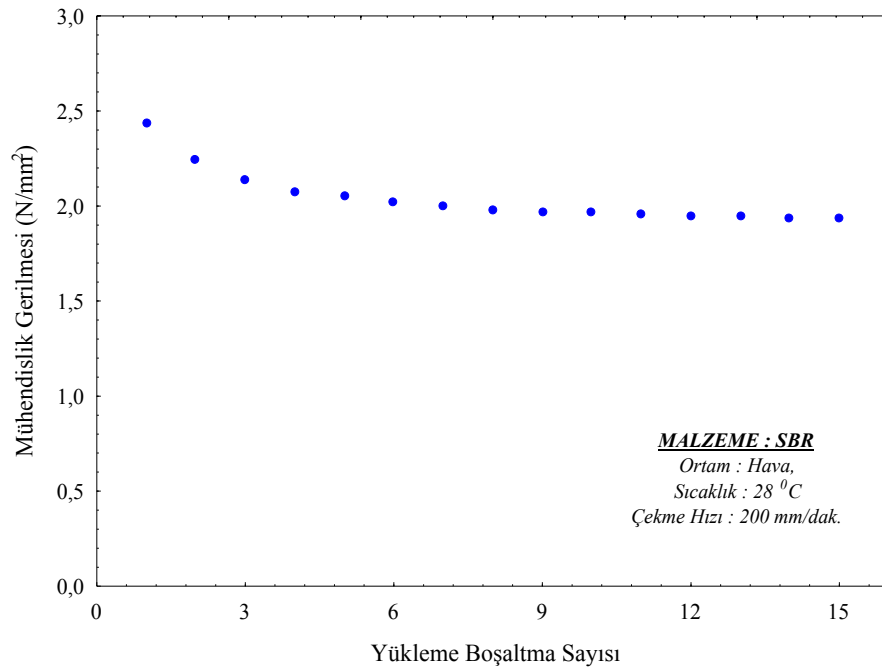
Şekil 60. o) Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi



Şekil 61. SBR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 200 \text{ mm / dak.}$ şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

Tablo 17. SBR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri

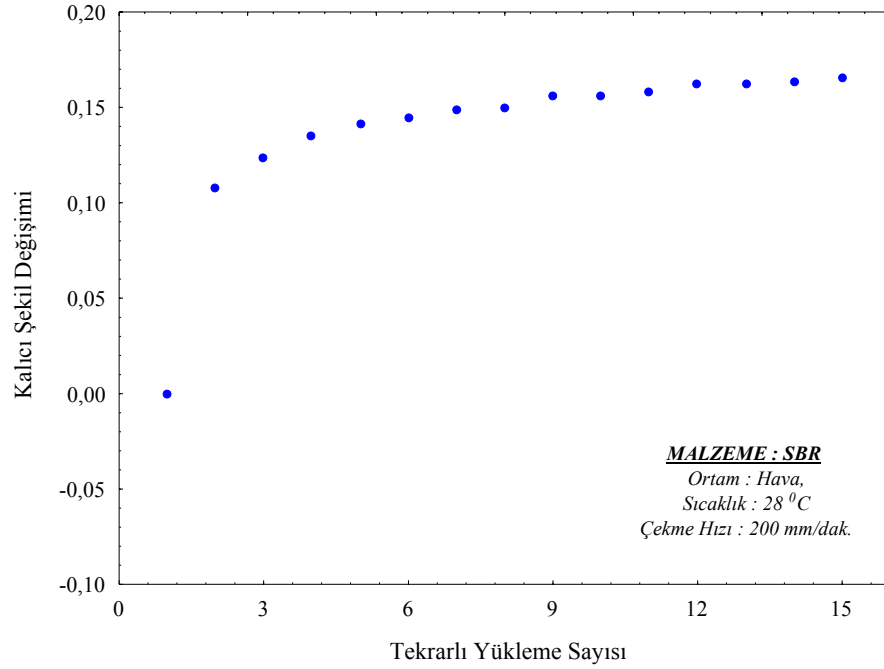
SBR ($\dot{\varepsilon} = 200 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	σ_{\max} (N/mm ²)	Tekrarlı Yükleme Sayısı	σ_{\max} (N/mm ²)
1.	2.441	9.	1.973
2.	2.240	10.	1.967
3.	2.140	11.	1.955
4.	2.076	12.	1.951
5.	2.051	13.	1.951
6.	2.021	14.	1.942
7.	1.999	15.	1.936
8.	1.980		



Şekil 62. SBR kauçuk deney numunesinin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi

Tablo 18. SBR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri

SBR ($\dot{\varepsilon} = 200 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\Delta\lambda_{Kalıcı}$	Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\Delta\lambda_{Kalıcı}$
1.	0.000	9.	1.156
2.	0.108	10.	0.156
3.	0.123	11.	0.158
4.	0.135	12.	0.162
5.	0.141	13.	0.162
6.	0.144	14.	0.163
7.	0.149	15.	0.165
8.	0.150		



Şekil 63. SBR kauçuk deney numunelerinin 15 tekrarlı yükleme sonunda kalıcı deformasyonun yükleme-boşaltma sayısı ile değişimi

Kauçuk türü malzemelere uygulanan tekrarlı yükleme sonunda yüklemedeki ve boşalmadaki gerilme-uzama oranı eğrilerinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Malzemenin yükleme deformasyonu sırasındaki gerilme-uzama oranı eğrisi altında kalan alan W_y , boşaltma deformasyonu sırasındaki gerilme-uzama oranı eğrisi altında kalan alan ise W_b ile tanımlanırsa, yükleme-boşaltma deformasyonu sonunda malzemede meydana gelen histerezis kayıpları, H_y ,

$$H_y = W_y - W_b \quad (14)$$

denklemleri ile tanımlanır [212]. W_y ve W_b değerleri, yükleme ve boşaltma eğrileri altındaki alanlara eşit olup bu iki alan değerinin birbirinden çıkarılmasıyla histerezis kayıpları bulunur. Yapılan çalışmada her bir yükleme ve boşaltma verilerine en küçük kareler yöntemi uygulanarak sekizinci dereceden polinomial fonksiyonlar uydurulmuş ve bu fonksiyonların altında kalan alan ise sayısal integrasyonla hesaplanmıştır. En küçük kareler yöntemi ile fonksiyon uydurulması ve sayısal integrasyonla alan hesabı MATLAB'da yazılan bir program vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. SBR kauçuk deney numunesine uygulanan 15 tekrarlı yükleme sonunda her bir yükleme-boşaltma çevrimindeki histerezis kayıp değerleri Tablo 19'da sunulmuştur. Bu histerezis kayıp değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 64'de verilmiştir.

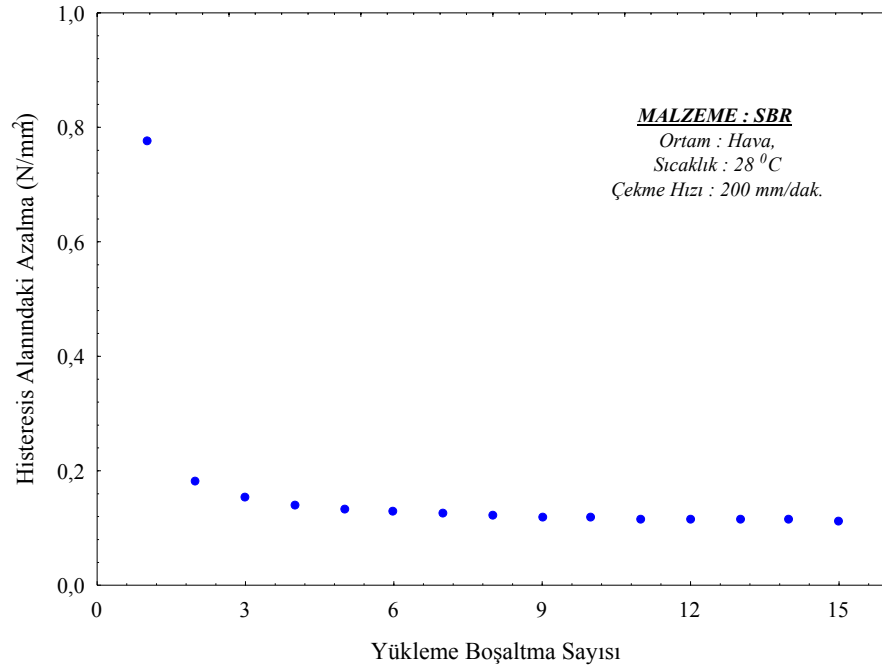
Gerilmedeki azalma, kalıcı deformasyon ve histerezis kayıplarının incelenmesinden deney numunesine uygulanan 10. ve 15. yükleme-boşaltma verileri Şekil 65'de çizilmiştir. Her iki deneysel verilerinin karşılaştırılmasından 10. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin hemen hemen üst üste düştüğü görülmektedir.

Mullins etkileri ile malzemeye uygulanan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için deney numunelerine Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedüründe numuneler dört farklı uzama oranında, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, $\lambda = 3.0$, 15 kez, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. SBR kauçuk deney numunesi Şekil 37'de ilk önce $\lambda = 1.5$ uzama oranına kadar 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuş daha sonra ara vermeden $\lambda = 2.0$ uzama oranında 15, $\lambda = 2.5$ uzama oranında 15, ve son olarak $\lambda = 3.0$ uzama oranında 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutularak deney tamamlanmıştır. Böylece $\lambda = 2.0$ uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma çevrimi 16., $\lambda = 2.5$ 'daki 1. yükleme-boşaltma çevrimi

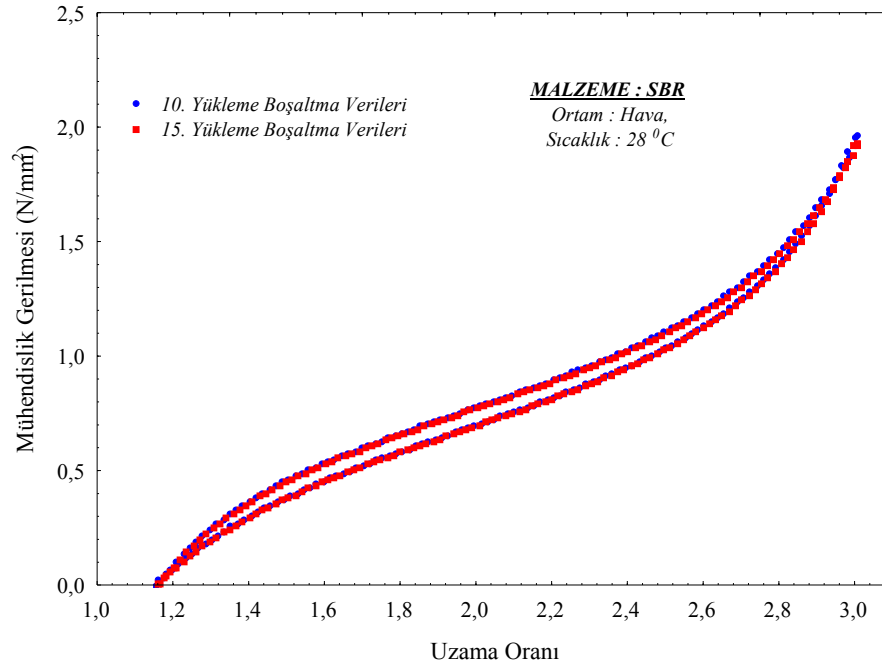
31. ve $\lambda = 3.0$ 'daki 1. yükleme-boşaltma çevrimi 46. yükleme-boşaltma çevrimi olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 66a-d'de verilmiştir. Tekrarlı yüklemeye ait 2.-14. yükleme-boşaltma verileri grafikleri karmaşıktırdıkları için verilmemiştir. Şekil 66e'de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. çevrimin verileri birlikte sunulmuştur. Deney sonuçlarını birbirleri ile karşılaştırmak içinde her bir uzama oranına ait 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 67'de ve 15. yükleme-boşaltma çevrim verileri ise Şekil 68'de sunulmuştur. Şekil 67 ve Şekil 68'de verilen verilerin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için ilgili verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme yapılması gerekmektedir. Şekil 67 ve Şekil 68'deki verilerin $(\sigma, \lambda) = (0,1)$ başlangıç noktasına ötelenmesi durumunda elde edilen veriler Şekil 69 ve Şekil 70'de sunulmuştur. Şekil 69 ve Şekil 70'deki grafiklerde yapılan öteleme miktarları her bir uzama oranı için Tablo 20'de sunulmuştur.

Tablo 19. SBR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri

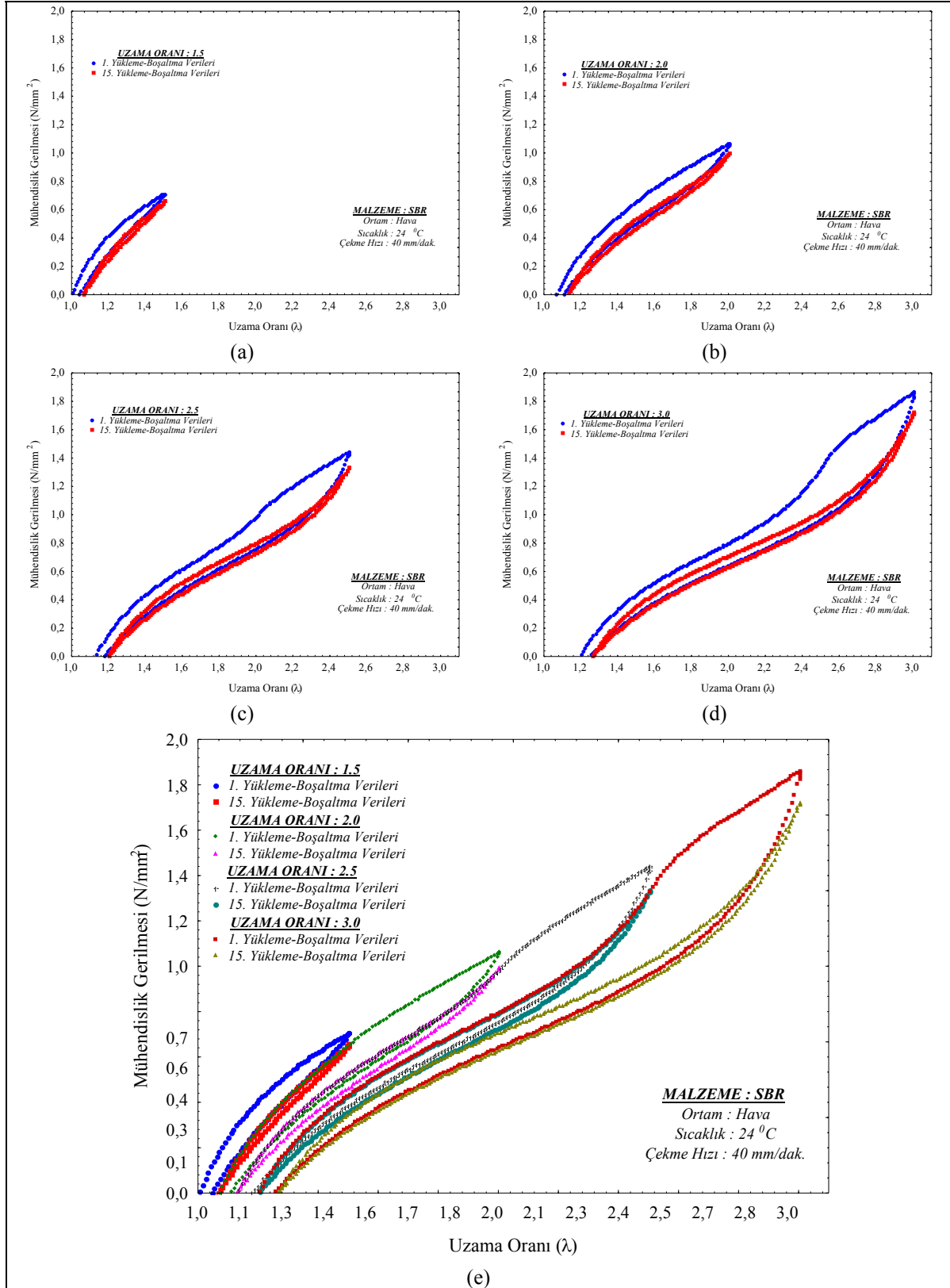
SBR ($\varepsilon = 200 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)	Tekrarlı Yükleme Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)
1.	0.776	9.	0.119
2.	0.182	10.	0.118
3.	0.153	11.	0.116
4.	0.139	12.	0.115
5.	0.133	13.	0.115
6.	0.128	14.	0.114
7.	0.124	15.	0.114
8.	0.121		



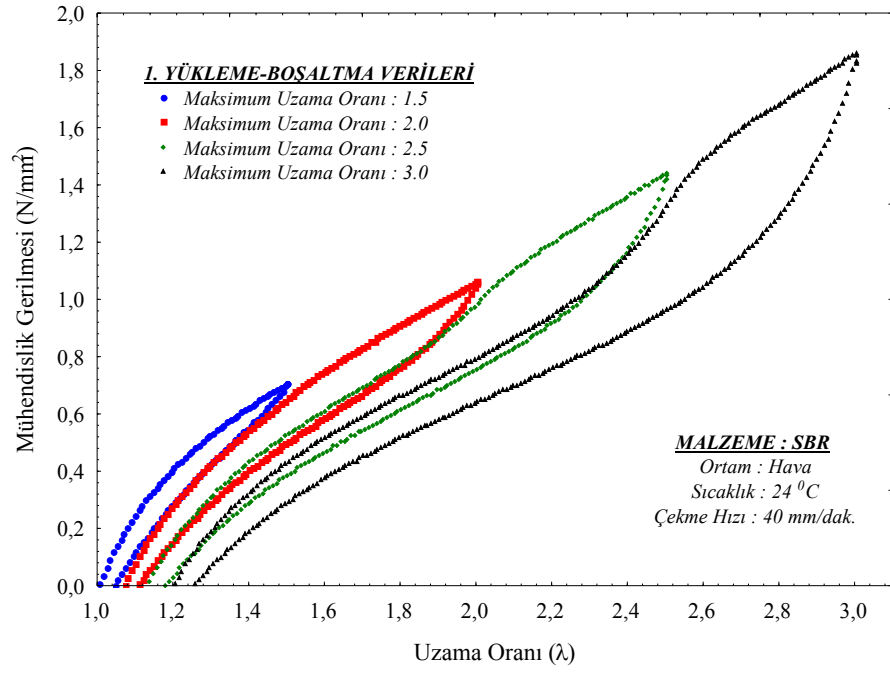
Şekil 64. SBR kauçuk deney numunelerinin 15 defa yüklem-boşaltma çevrimi sonunda histerezis kayıplarının yüklem boşaltma sayısı ile değişimi



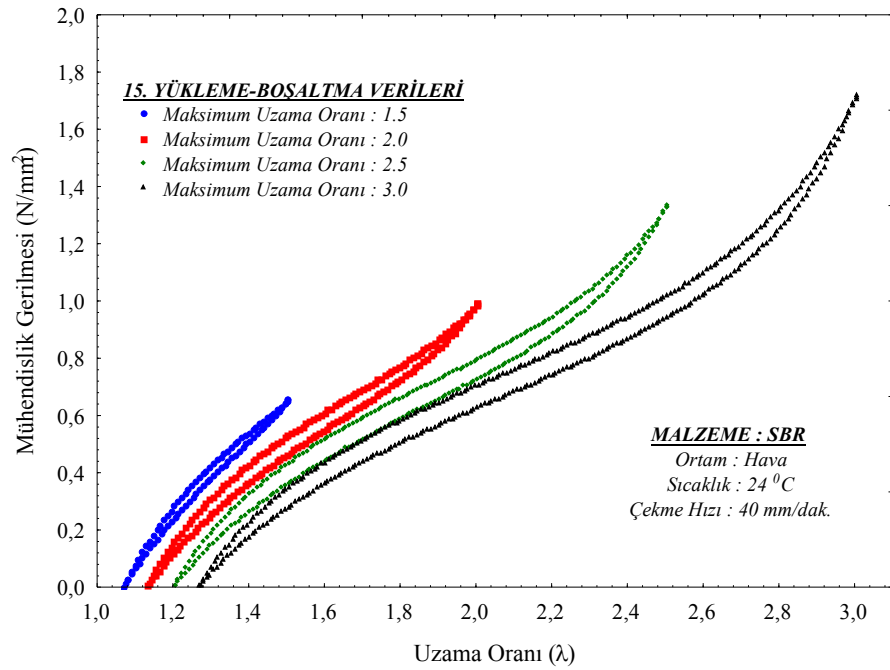
Şekil 65. SBR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 200 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 10. ve 15. yüklem-boşaltma çevrimi deneysel verilerinin karşılaştırılması



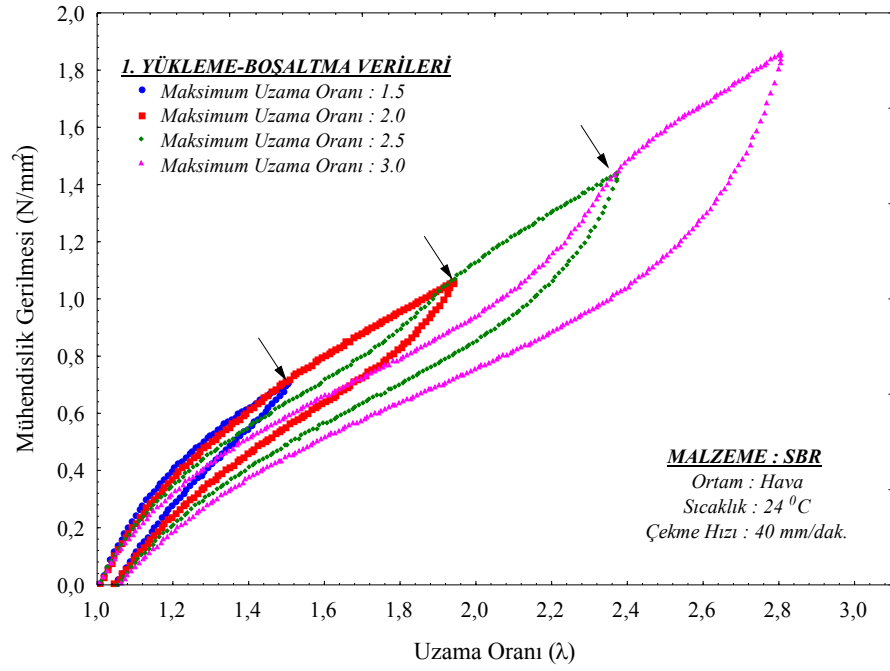
Şekil 66. a-d) SBR kauçuk deney numunesinin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi



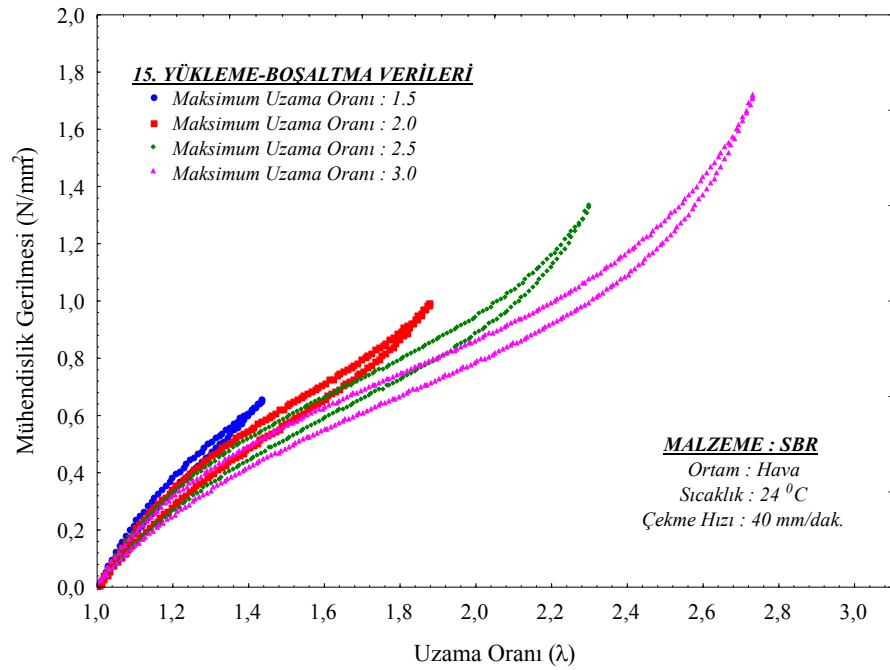
Şekil 67. SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



Şekil 68. SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



Şekil 69. SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi

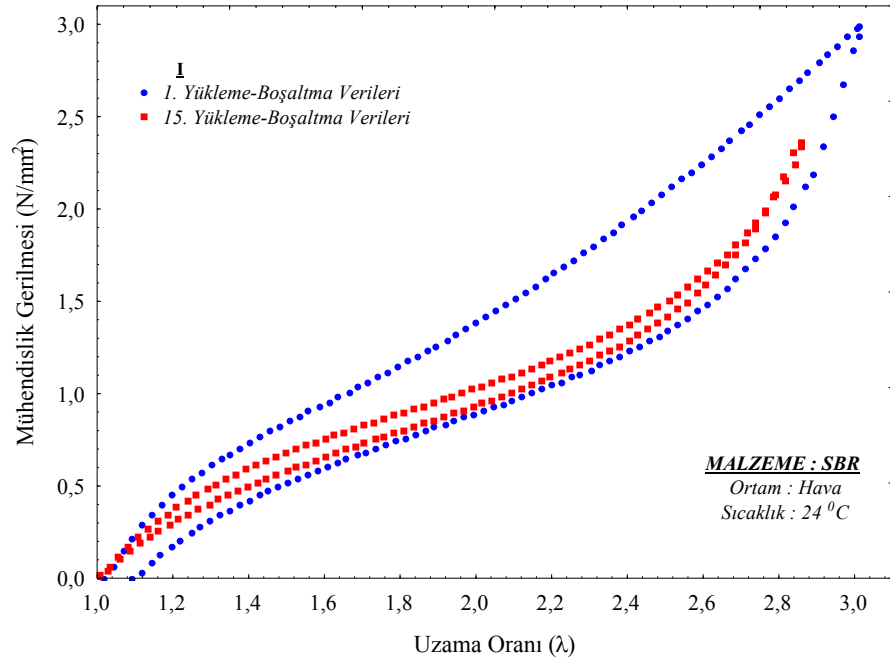


Şekil 70. SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi

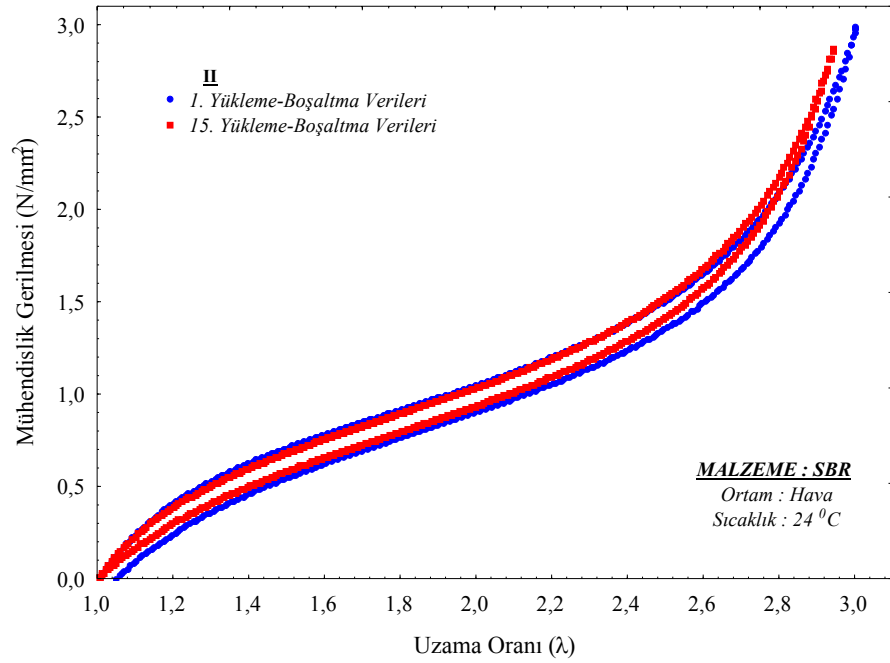
Tablo 20. SBR kauçuk numunenin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme miktarları

1. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ		15. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ	
Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı	Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı
1.5	0.000	1.5	0.071
2.0	0.065	2.0	0.128
2.5	0.130	2.5	0.204
3.0	0.197	3.0	0.272

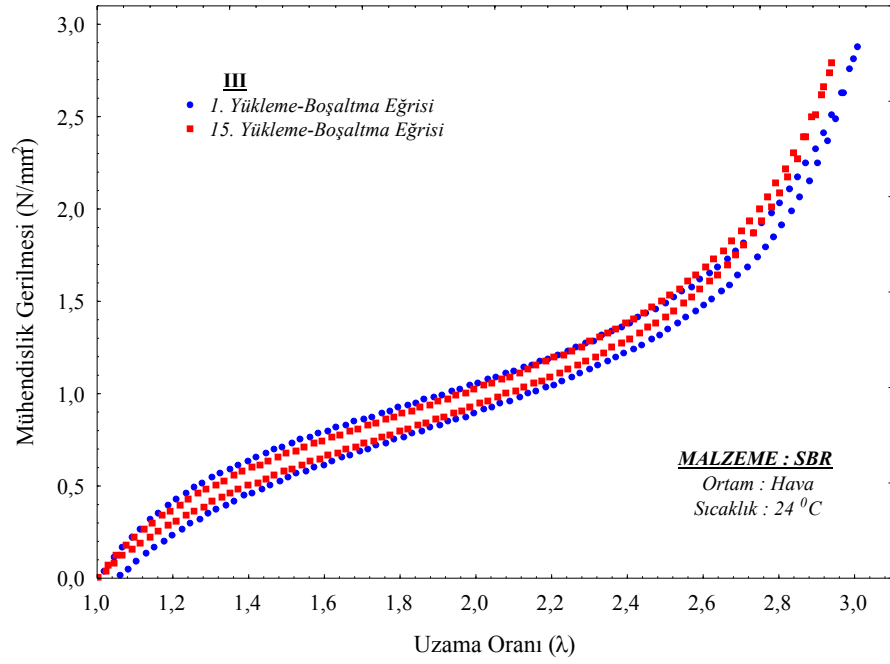
Şekil 36'da verilen Mullins etkilerini giderici deney prosedürü uygulanmış SBR kauçuk numunenin Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişip değişmediğini incelemek amacıyla Şekil 38'deki deney prosedürü uygulanmıştır. Bunun için, sırasıyla, 15 tekrarlı yükleme (I. grup tekrarlı yükleme), gerilme gevşemesi, 15 tekrarlı yükleme (II. grup tekrarlı yükleme) ve tekrar 15 tekrarlı yükleme (III. grup tekrarlı yükleme) çevrimleri uygulanarak deney tamamlanmıştır. Deney sonunda I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait veriler, sırasıyla, Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73'de sunulmuştur. Ayrıca I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini birbirleri ile karşılaştırabilmek için her üç deneydeki 1. yükleme-boşaltma çevrim verileri Şekil 74'de, 15. yükleme-boşaltma çevrim verileri ise Şekil 75'de sunulmuştur. Şekil 75'deki gerilme-uzama oranı verilerinin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için her üç deneye ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir. Şekil 74'deki deneyler 1. yükleme-boşaltma çevrimi verileri olduğundan bu verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmesine ihtiyaç yoktur.



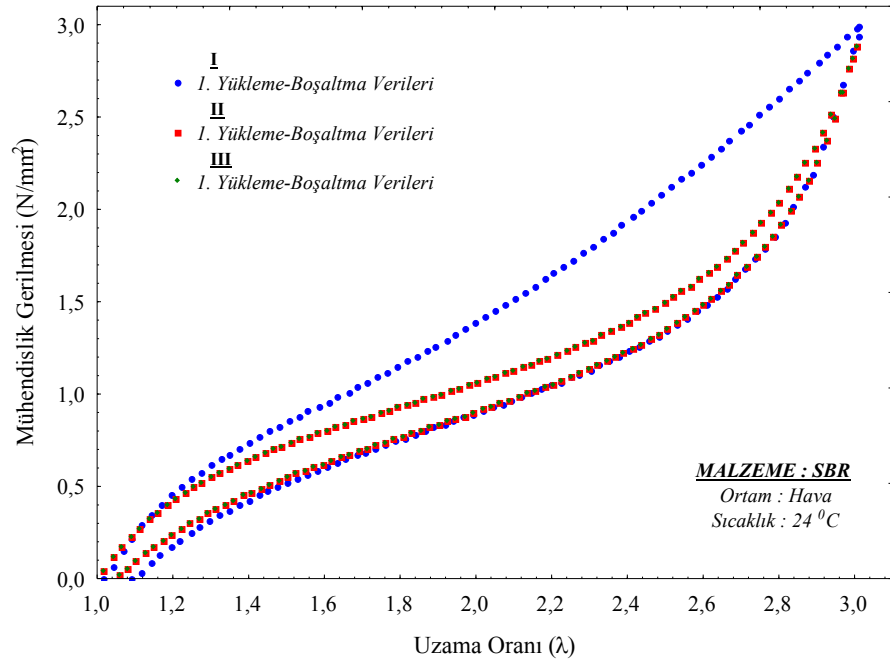
Şekil 71. SBR kauçuk numunenin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



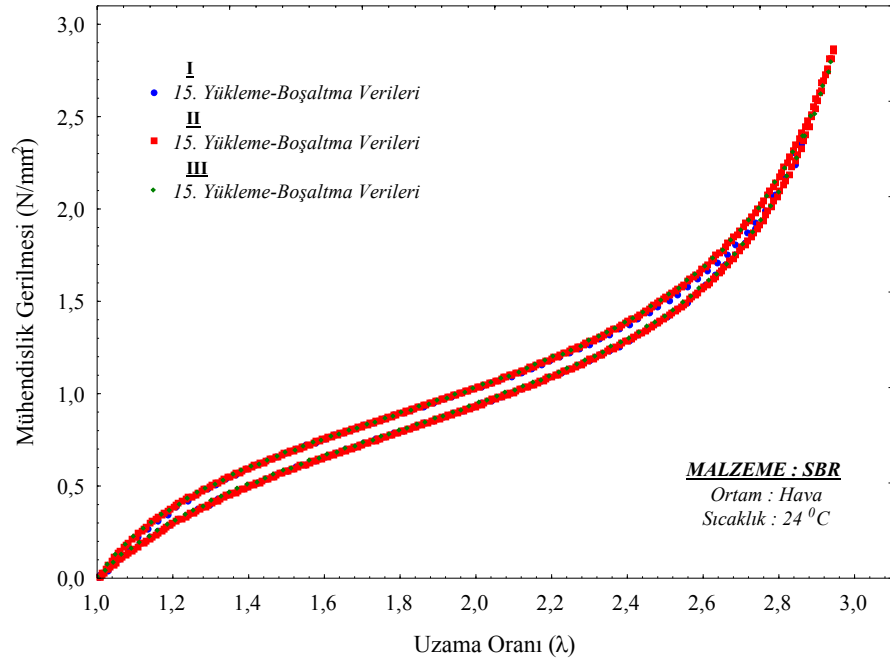
Şekil 72. SBR kauçuk numunenin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 73. SBR kauçuk numunenin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 74. SBR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması



Şekil 75. SBR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

3.2.2. NBR Kauçuk Deneyleri

NBR kauçuk malzemesinin Mullins etkilerini inceleyebilmek için deney numuneleri 15 kez, 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında, $\lambda = 3.0$ 'e kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur (Şekil 36). Deney numunesinin, her bir yükleme-boşaltma çevrimindeki davranışı Şekil 76'da verilmiştir. Şekil 76'dan da görüleceği üzere artan yükleme-boşaltma çevrim sayılarında gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve kararlı hale gelmektedir. NBR kauçuk malzemesinde 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşaması, 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte incelenmesinden daha açık şekilde görülmektedir (Şekil 77).

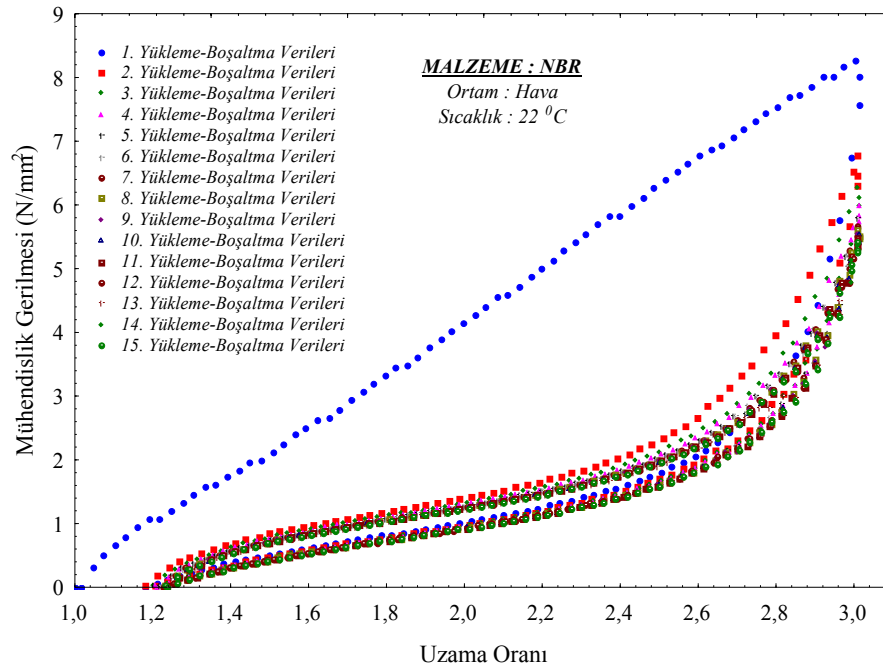
NBR kauçuk numunenin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri kaydedilerek bu değerler Tablo 21'de sunulmuştur. Bu gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 78'de verilmiştir.

NBR kauçuk numunesine 15 tekrarlı yükleme uygulanması durumunda malzemedeki kalıcı deformasyonun değişimini incelemek için her bir yükleme-boşaltma çevrimi

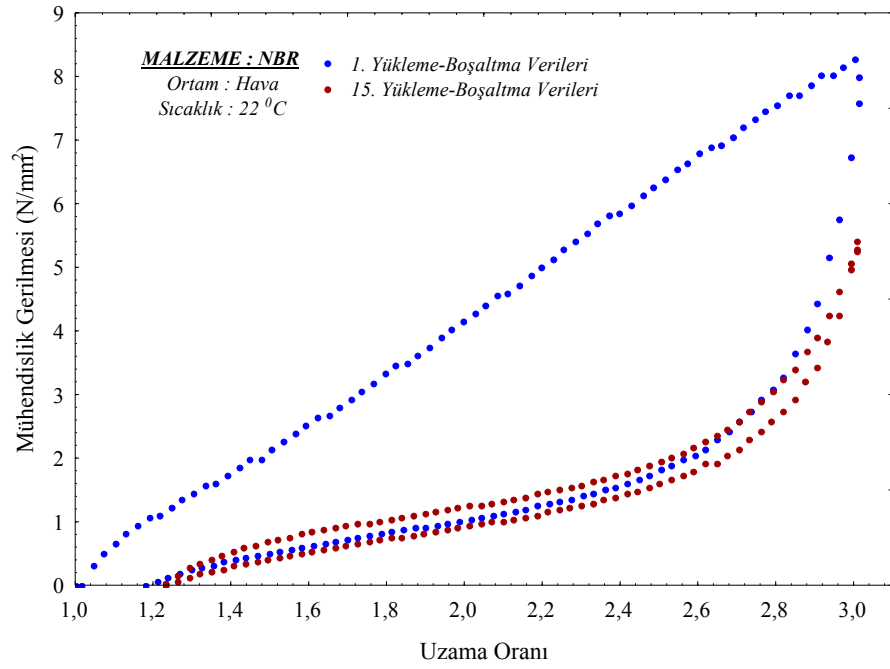
sonundaki kalıcı deformasyon değerleri Tablo 22’de sunulmuştur. Bu kalıcı deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 79’da verilmiştir.

NBR kauçuk numunesine uygulanan 15 tekrarlı yükleme sonunda her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonundaki histerezis kayıp değerleri yazılan MATLAB programı ile hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 23’de sunulmuştur. NBR kauçuk için histerezis kayıp değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi Şekil 80’de verilmiştir.

Gerilmedeki azalma, kalıcı deformasyon ve histerezis kayıplarının incelenmesinden deney numunesine uygulanan 10. ve 15. yükleme-boşaltma verileri Şekil 81’de görülmektedir. Her iki deneysel verilerinin karşılaştırılmasından 10. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimlerine ait gerilme –uzama oranı verilerinin üst üste düştüğü söylenebilir.



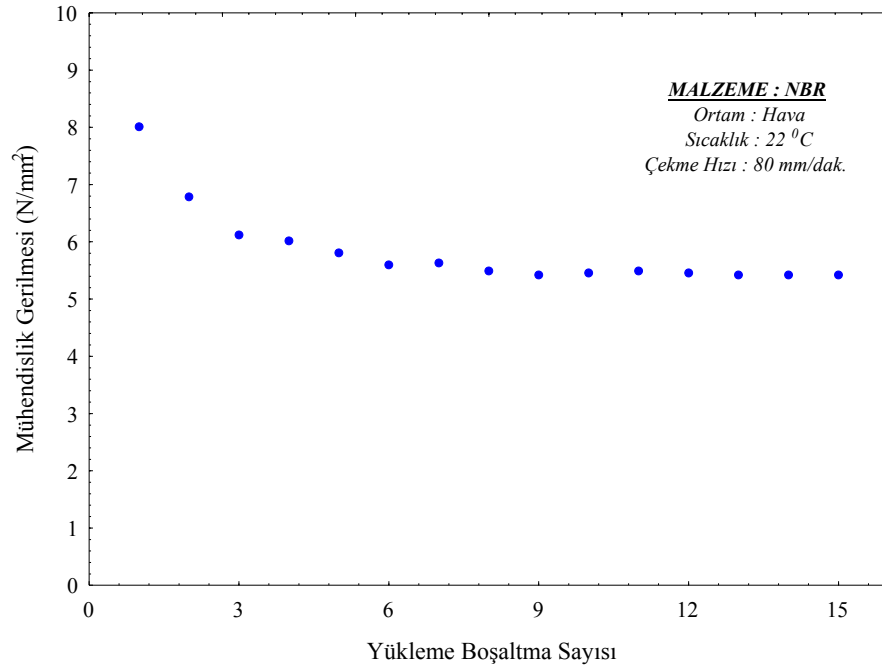
Şekil 76. NBR kauçuk numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm / dak.}$ şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme deneyi



Şekil 77. NBR kauçuk numunenin $\dot{\varepsilon} = 80 \text{ mm / dak.}$ şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrim verilerinin karşılaştırılması

Tablo 21. NBR kauçuk numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri

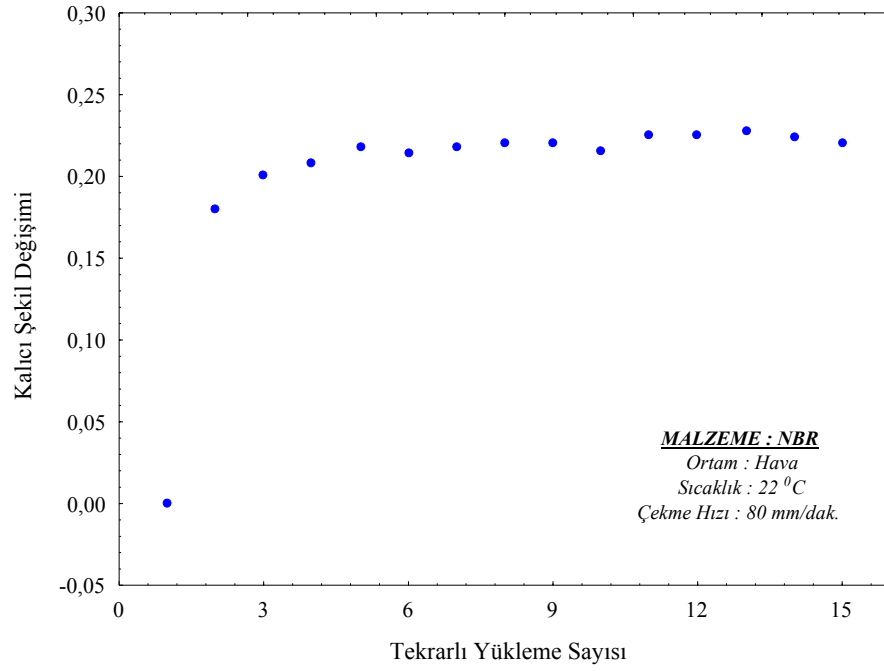
NBR ($\dot{\varepsilon} = 80 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\sigma_{\text{max.}} (N/mm^2)$	Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\sigma_{\text{max.}} (N/mm^2)$
1.	8.008	9.	5.417
2.	6.789	10.	5.441
3.	6.128	11.	5.491
4.	5.999	12.	5.453
5.	5.798	13.	5.437
6.	5.586	14.	5.422
7.	5.637	15.	5.406
8.	5.500		



Şekil 78. NBR kauçuk numunenin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yüklenme sayısı ile değişimi

Tablo 22. NBR kauçuk numunesinin her bir yüklenme-boşaltma çevrimi sonunda, malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri

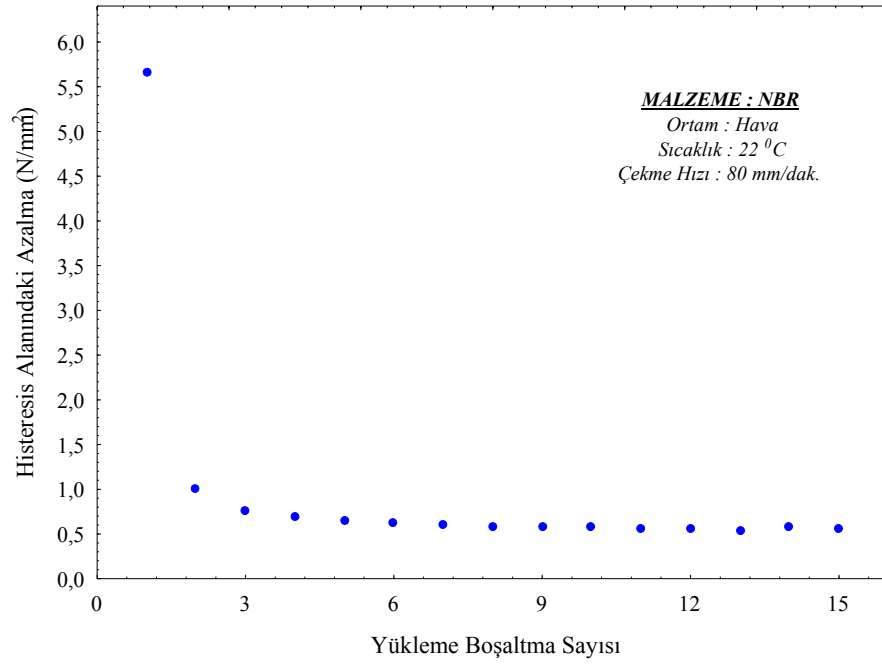
NBR ($\varepsilon = 80 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yüklenme Sayısı	$\lambda_{\text{Kalıcı}}$	Tekrarlı Yüklenme Sayısı	$\lambda_{\text{Kalıcı}}$
1.	0.000	9.	0.220
2.	0.180	10.	0.216
3.	0.201	11.	0.225
4.	0.208	12.	0.225
5.	0.218	13.	0.228
6.	0.214	14.	0.224
7.	0.218	15.	0.220
8.	0.221		



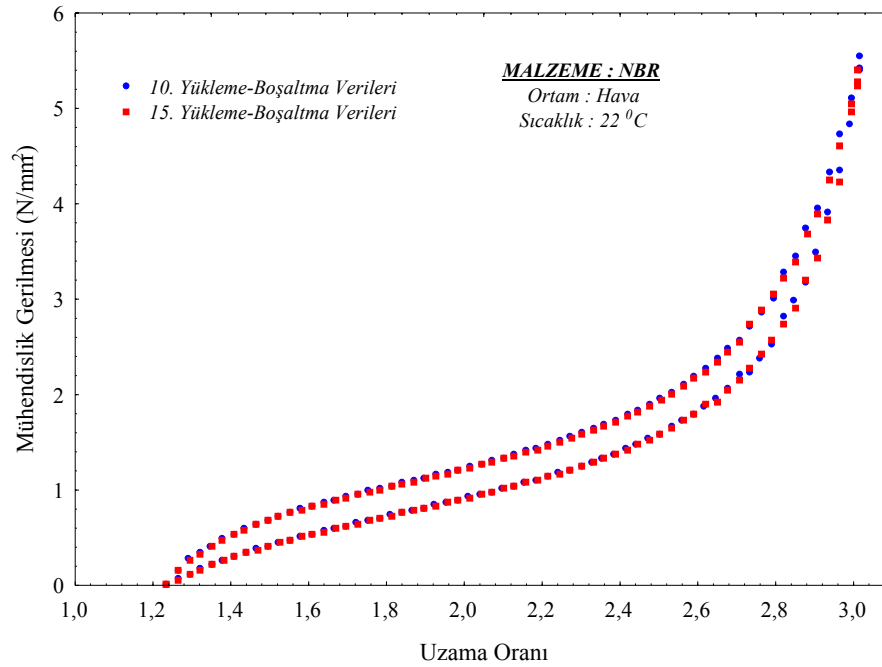
Şekil 79. NBR kauçuk numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda, kalıcı deformasyonun tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi

Tablo 23. NBR kauçuk numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri

NBR ($\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)	Tekrarlı Yükleme Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)
1.	5.667	9.	0.589
2.	1.005	10.	0.580
3.	0.7616	11.	0.567
4.	0.689	12.	0.553
5.	0.649	13.	0.547
6.	0.621	14.	0.575
7.	0.604	15.	0.567
8.	0.587		



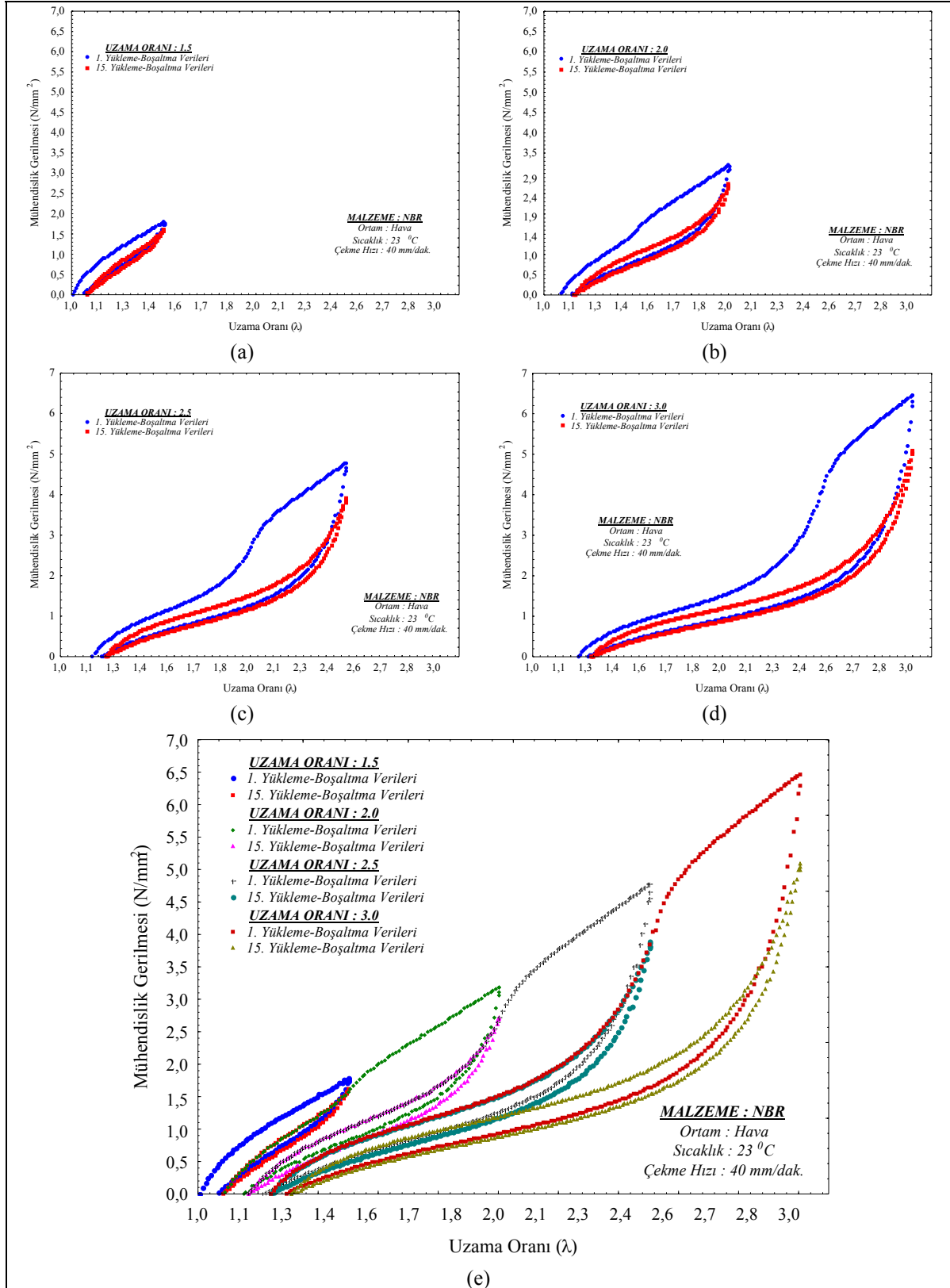
Şekil 80. NBR kauçuk numunenin 15 tekrarlı yüklemeye sonunda, histerezis kayıplarının tekrarlı yüklemeye sayısı ile değişimi



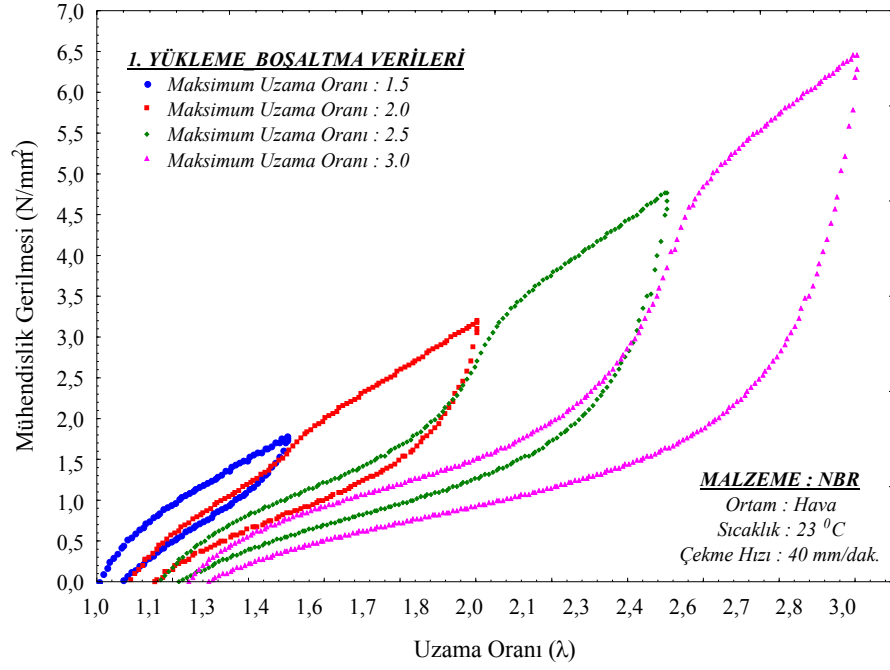
Şekil 81. NBR kauçuk numunenin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak}$. şekil değiştirme hızında 10. ve 15. yüklemeye-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

Mullins etkileri ile malzemeye uygulanan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için deney numunelerine Şekil 37’de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedüründe deney numunesi, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, $\lambda = 3.0$, olmak üzere dört farklı uzama oranında 15 kez, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 82a-d’de verilmiştir. Şekil 82-e’de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. çevrimin verileri birlikte sunulmuştur. Deney sonuçlarını karşılaştırmak için her bir uzama oranına ait 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 83’de ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 84’de sunulmuştur. Şekil 83 ve Şekil 84’de sunulan verilerin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için ilgili verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmesi gerekmektedir. Şekil 83 ve Şekil 84’deki verilerin $(\sigma, \lambda) = (0,1)$ başlangıç noktasına ötelenmesi durumunda elde edilen veriler Şekil 85 ve Şekil 86’da sunulmuştur. Şekil 85 ve Şekil 86’daki grafiklerde yapılan öteleme miktarları her bir uzama oranı için Tablo 24’de verilmiştir.

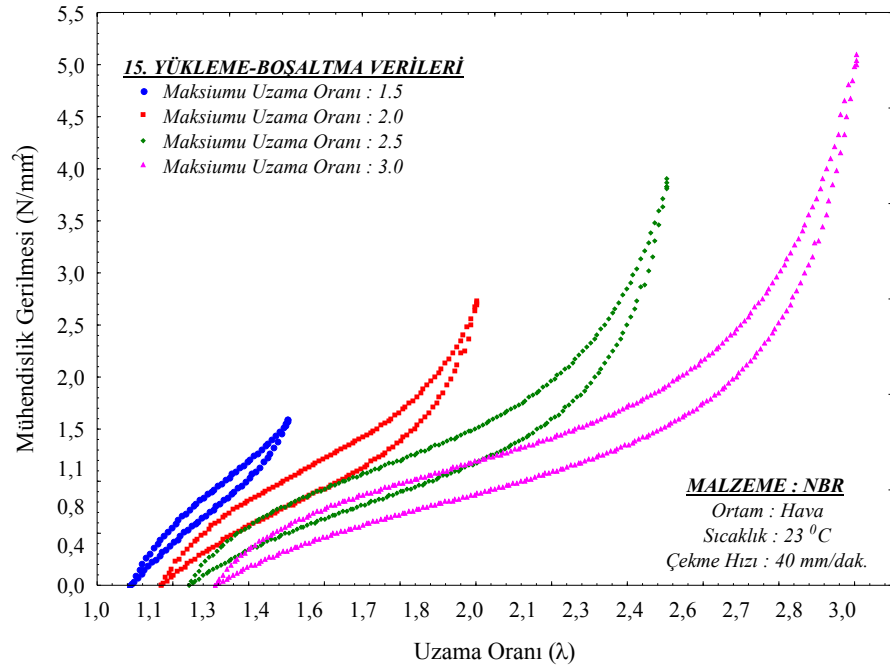
Şekil 36’da verilen Mullins etkilerini giderici deney prosedürü uygulanmış NBR kauçuk numunenin Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişip değişmediğini incelemek amacıyla Şekil 38’deki deney prosedürü uygulanmıştır. Bunun için, sırasıyla, 15 tekrarlı yükleme (I. grup tekrarlı yükleme), gerilme gevşemesi, 15 tekrarlı yükleme (II. grup tekrarlı yükleme) ve tekrar 15 tekrarlı yükleme (III. grup tekrarlı yükleme) çevrimleri uygulanarak deney tamamlanmıştır. Deney sonunda I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri, sırasıyla, Şekil 87, Şekil 88 ve Şekil 89’da sunulmuştur. Ayrıca I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini birbirleri ile karşılaştırabilmek için her üç deneydeki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 90’da, 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 91’de sunulmuştur. Şekil 91’deki gerilme-uzama oranı verilerin birbirleri ile karşılaştırabilmek için her üç deneye ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir. Şekil 90’daki deneyler 1. yükleme-boşaltma verileri olduğundan bu verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmesine ihtiyaç yoktur.



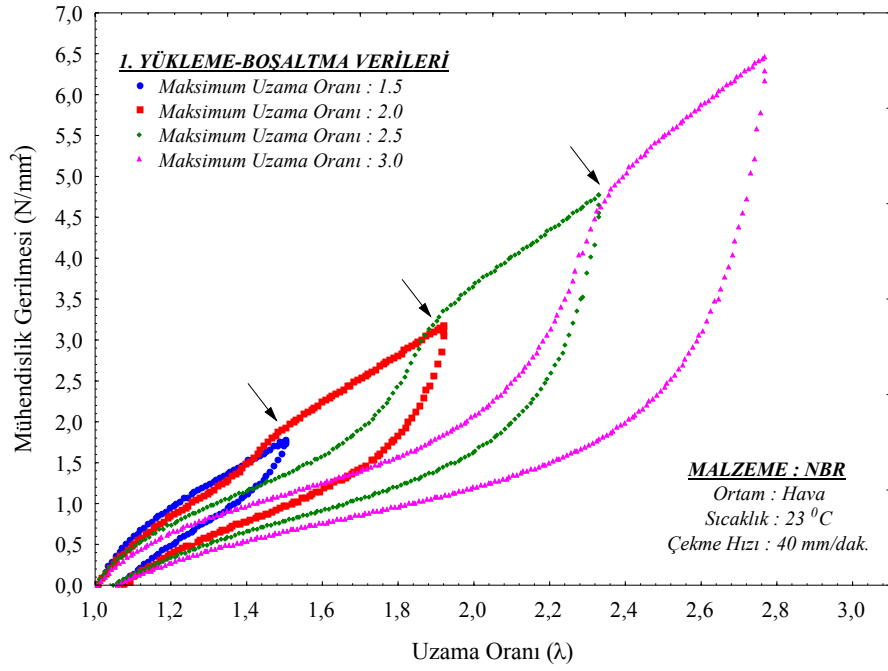
Şekil 82. a-d) NBR kauçuk deney numunesinin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimlerin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi



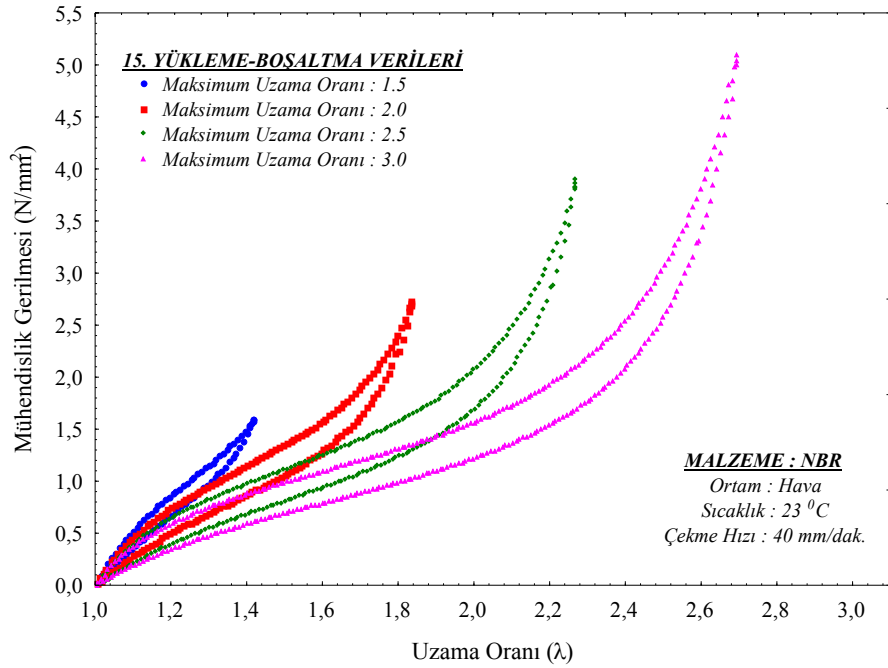
Şekil 83. NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



Şekil 84. NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



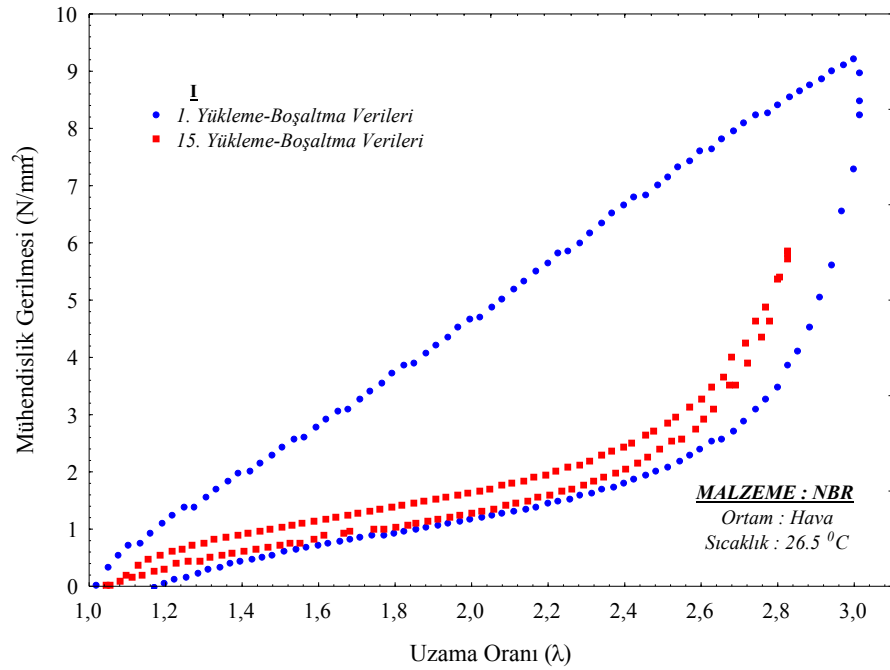
Şekil 85. NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi



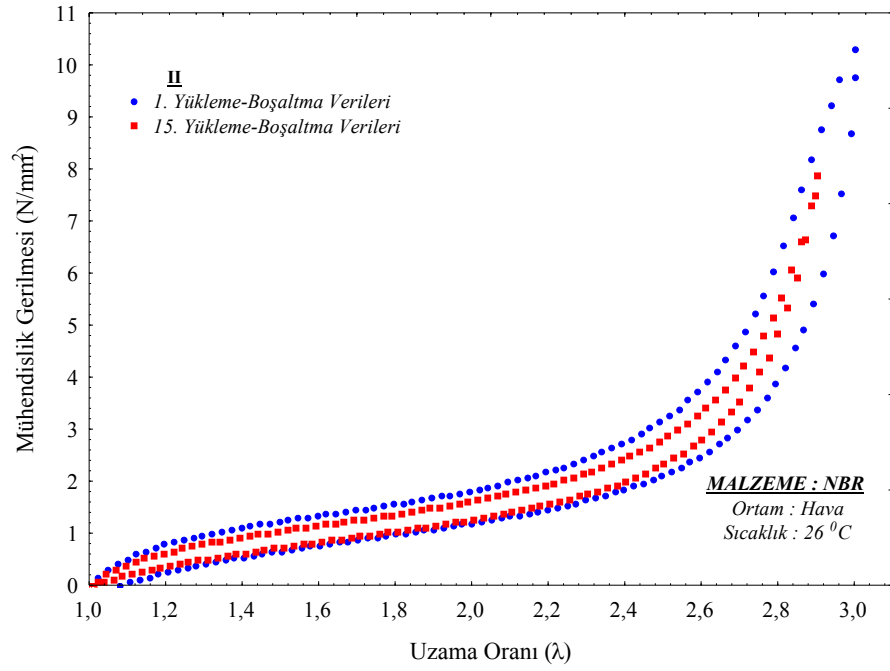
Şekil 86. NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$ ötelenerek birlikte gösterimi

Tablo 24. NBR kauçuk deney numunesinin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, öteleme miktarları

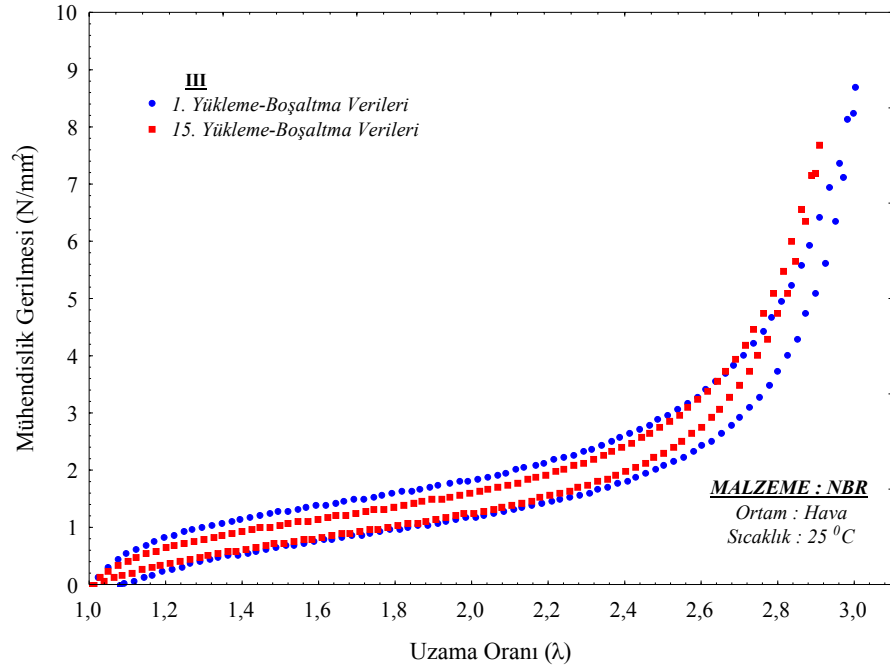
1. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ		15. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ	
Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı	Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı
1.5	0.000	1.5	0.085
2.0	0.083	2.0	0.168
2.5	0.171	2.5	0.235
3.0	0.235	3.0	0.310



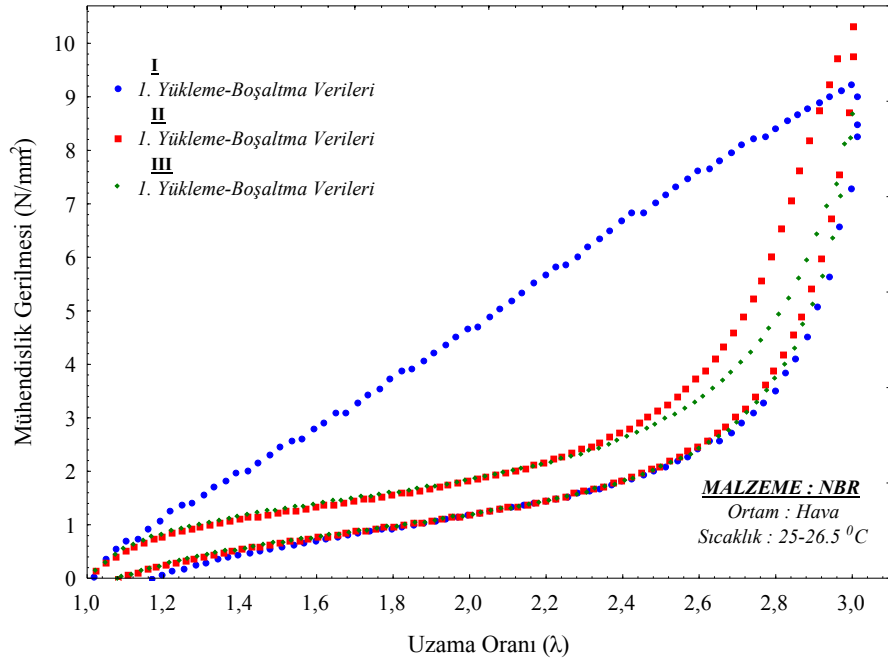
Şekil 87. NBR kauçuk deney numunesinin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



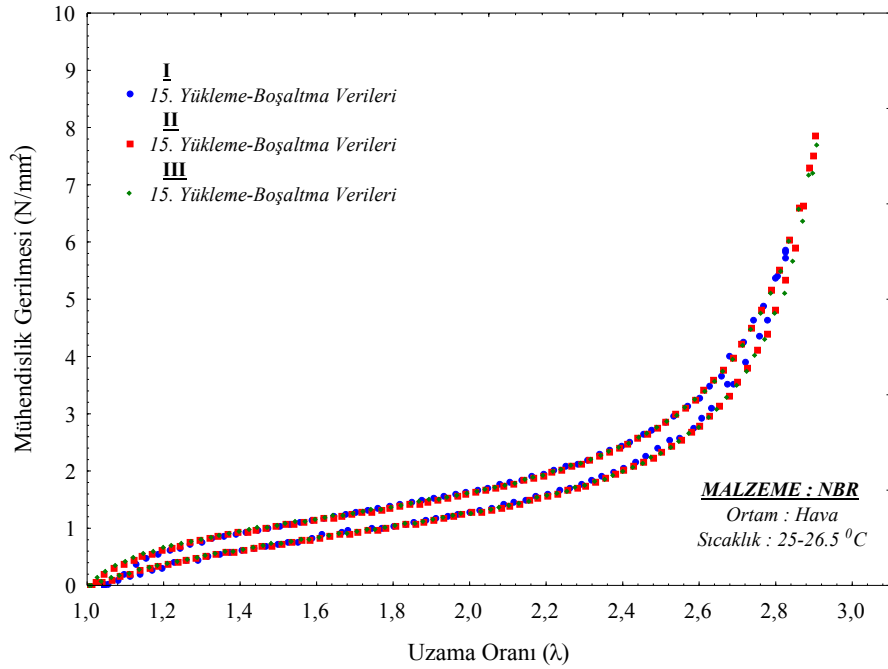
Şekil 88. NBR kauçuk deney numunesinin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 89. NBR kauçuk deney numunesinin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 90. NBR kauçuk deney numunesinin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerde elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması



Şekil 91. NBR kauçuk deney numunesinin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemelerde elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

3.2.3. NR Kauçuk Deneyleri

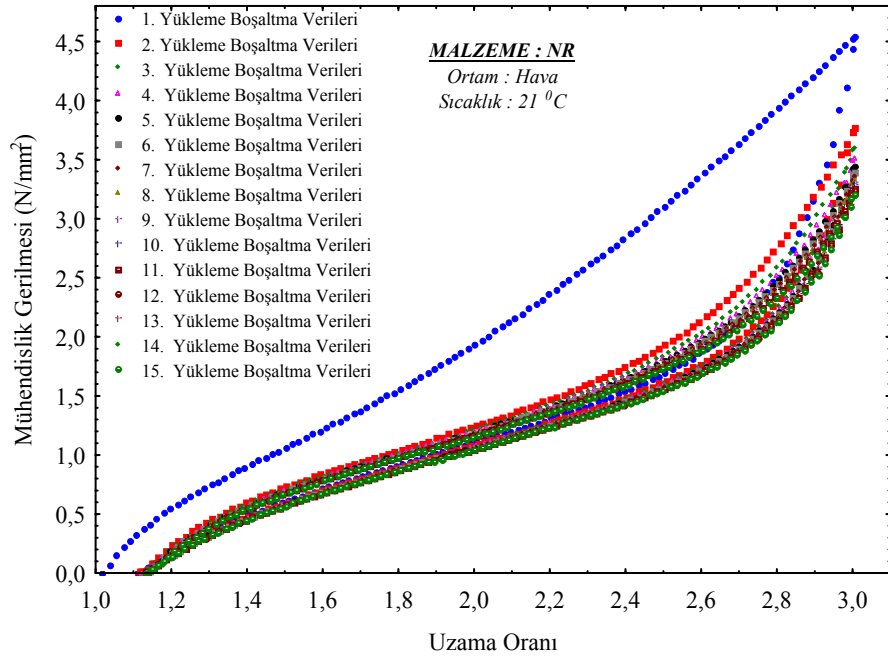
NR kauçuk malzemesinin Mullins etkilerini inceleyebilmek için deney numunesi 15 kez, 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında, $\lambda = 3.0$ 'e kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulmuştur (Şekil 36). Deney numunesinin, her bir yükleme-boşaltma çevrimindeki davranışı Şekil 92'de verilmiştir. Şekil 92'den de görüleceği üzere artan tekrarlı yükleme sayılarında gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve kararlı hale gelmektedir. NR kauçuk deney numunesinde 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşaması, 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte incelenmesinden daha açık şekilde görülebilir (Şekil 93).

NR kauçuk numunesinin her bir tekrarlı yükleme sonunda, $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri kaydedilerek Tablo 25'de sunulmuştur. Bu gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 94'de verilmiştir.

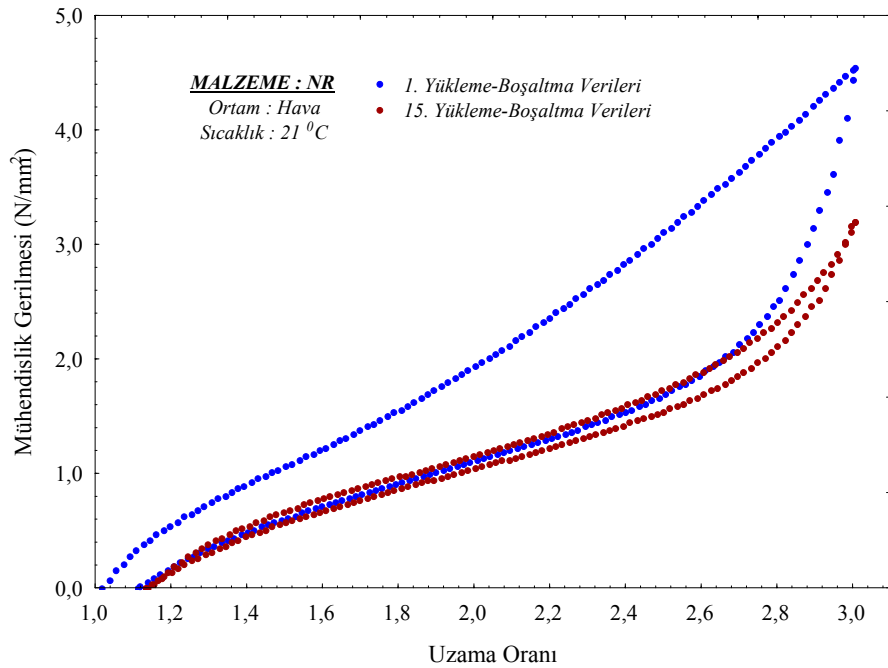
NR kauçuk numunesine 15 tekrarlı yükleme uygulanması durumunda numunedeki kalıcı deformasyonun değişimini incelemek için her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonundaki kalıcı deformasyon değerleri Tablo 26'da sunulmuştur. Bu kalıcı deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 95'de verilmiştir.

NR kauçuk deney numunesine uygulanan 15 tekrarlı yükleme sonunda her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonundaki histerezis kayıp değerleri yazılan MATLAB programı ile hesaplanmış ve değerleri Tablo 27'de sunulmuştur. Bu histerezis kayıp değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 96'da verilmiştir.

Gerilmedeki azalma, kalıcı deformasyon ve histerezis kayıplarının incelenmesinden numuneye uygulanan 12. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen deneysel veriler Şekil 97'de verilmiştir. Deneysel verilerinin karşılaştırılmasından 12. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin üst üste düştüğü görülmektedir.



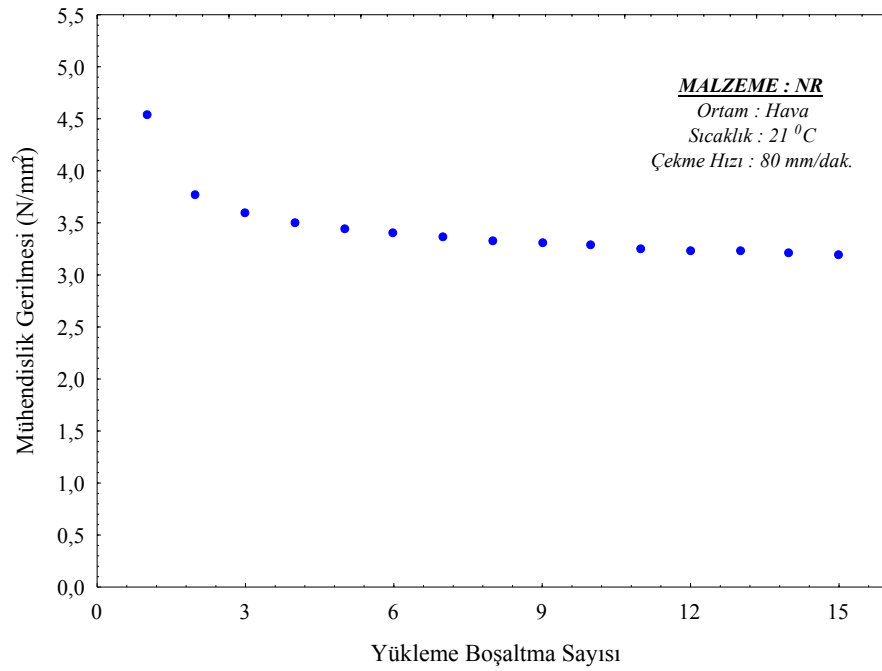
Şekil 92. NR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme deneyi



Şekil 93. NR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

Tablo 25. NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri

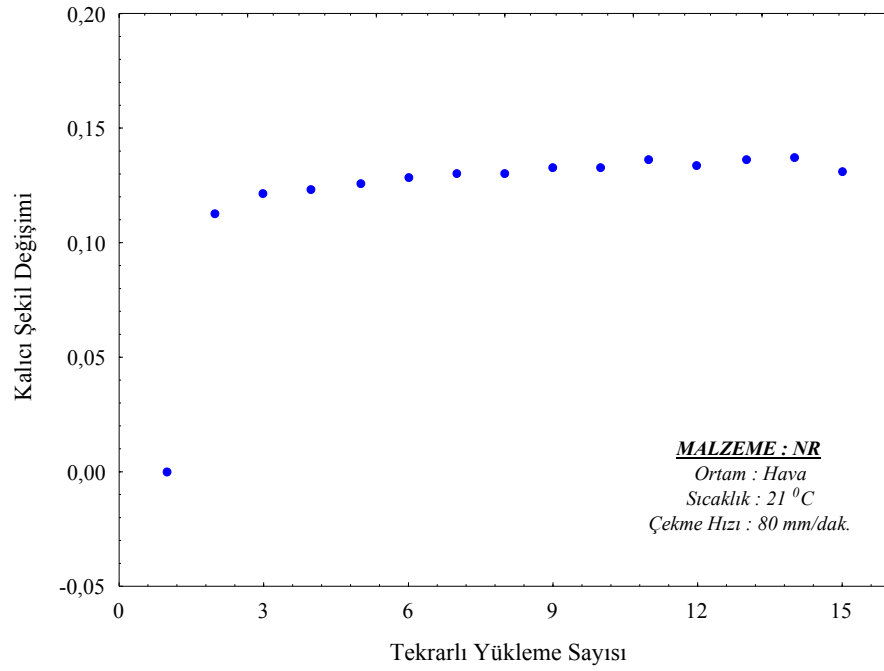
NR ($\dot{\varepsilon} = 80 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	σ_{\max} (N/mm^2)	Tekrarlı Yükleme Sayısı	σ_{\max} (N/mm^2)
1.	4.540	9.	3.303
2.	3.778	10.	3.284
3.	3.594	11.	3.256
4.	3.507	12.	3.226
5.	3.446	13.	3.225
6.	3.401	14.	3.211
7.	3.362	15.	3.200
8.	3.326		



Şekil 94. NR kauçuk deney numunesinin, $\lambda = 3.0$ 'daki gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi

Tablo 26. NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri

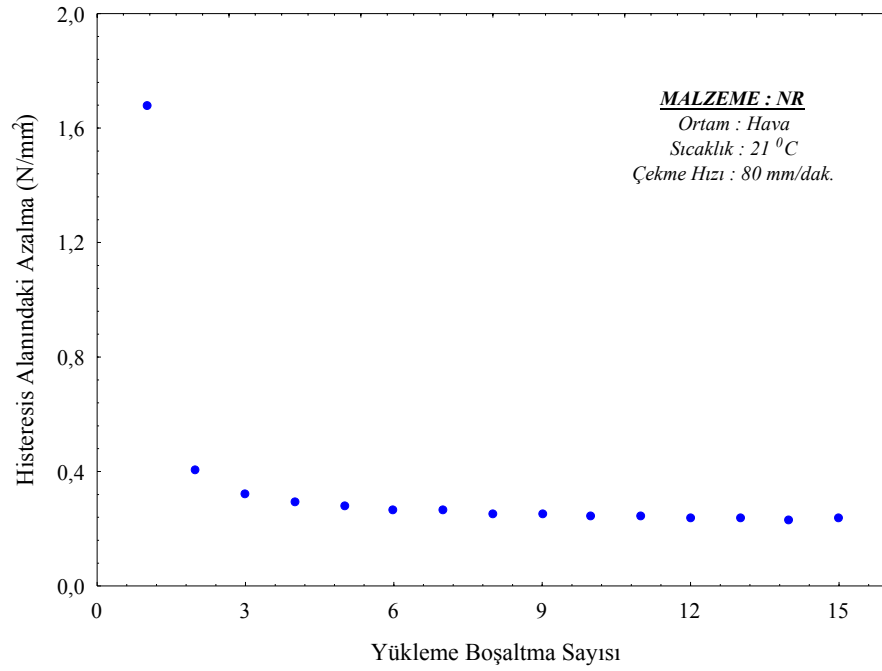
NR ($\varepsilon = 80 \text{ mm / dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\lambda_{\text{Kalıcı}}$	Tekrarlı Yükleme Sayısı	$\lambda_{\text{Kalıcı}}$
1.	0.000	9.	0.133
2.	0.113	10.	0.133
3.	0.121	11.	0.136
4.	0.123	12.	0.134
5.	0.126	13.	0.136
6.	0.128	14.	0.137
7.	0.130	15.	0.131
8.	0.300		



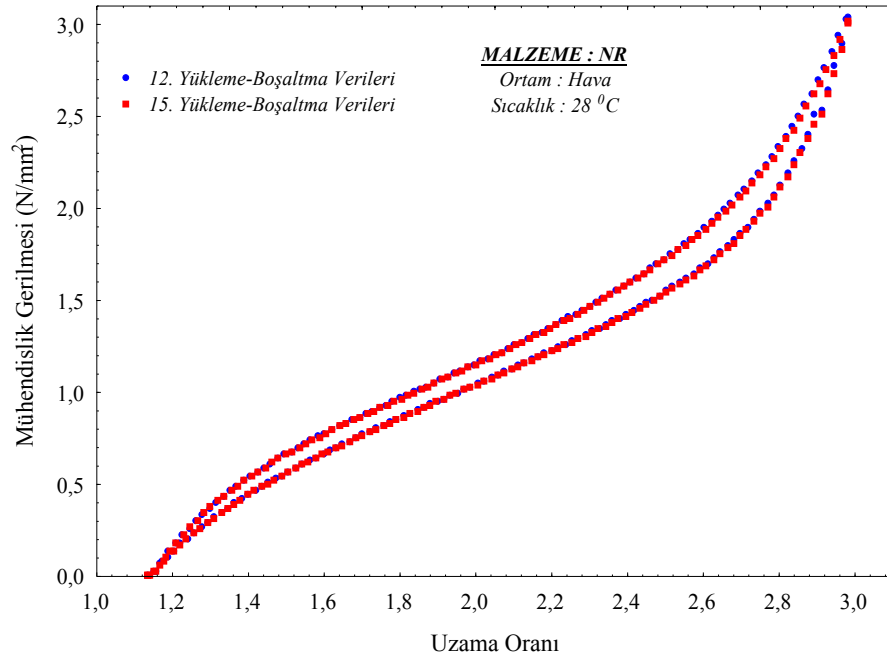
Şekil 95. NR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda, kalıcı deformasyonun yükleme boşaltma sayısı ile değişimi

Tablo 27. NR kauçuk deney numunesinin her bir yükleme-boşaltma çevrimi sonunda, malzemede meydana gelen histerezis kayıp değerleri

NR ($\varepsilon = 80 \text{ mm/dak.}$)			
Tekrarlı Yükleme Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)	Çevrim Sayısı	Histerezis Kayıpları ($J/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$)
1.	1.677	9.	0.251
2.	0.407	10.	0.246
3.	0.319	11.	0.242
4.	0.293	12.	0.237
5.	0.278	13.	0.237
6.	0.267	14.	0.233
7.	0.262	15.	0.237
8.	0.253		

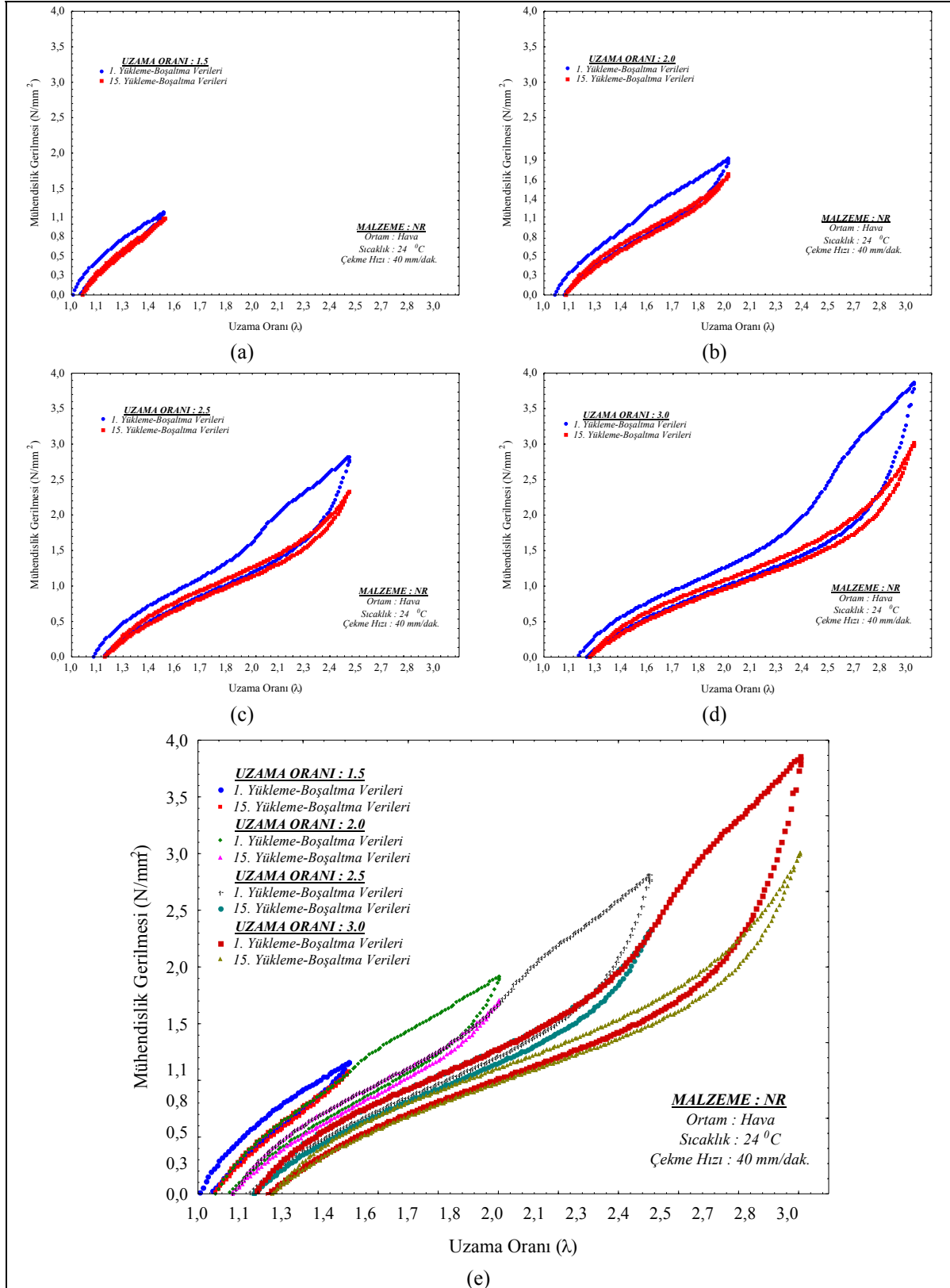


Şekil 96. NR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda histerezis kayıplarının yükleme-boşaltma sayısı ile değişimi

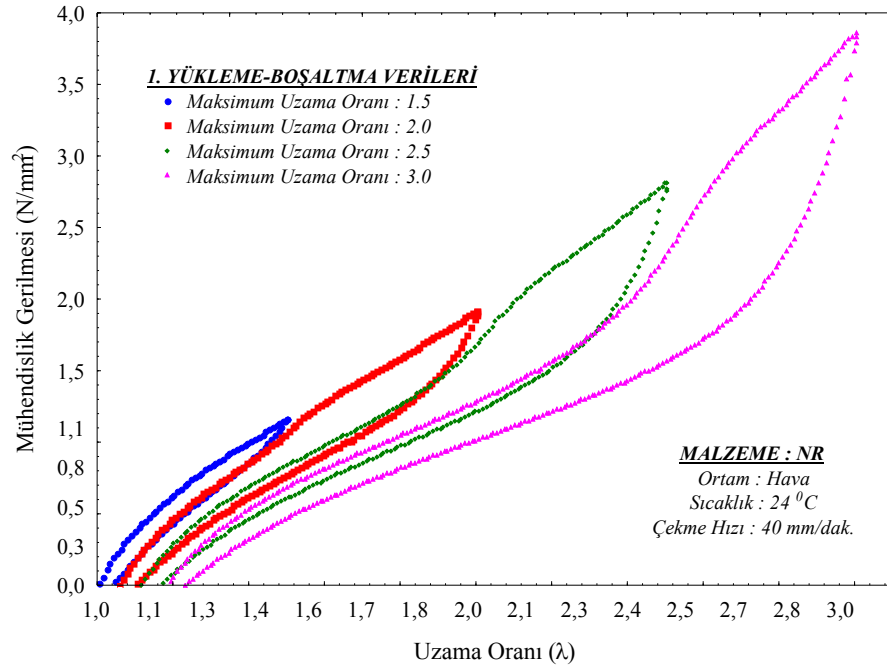


Şekil 97. NR kauçuk deney numunesinin $\dot{\epsilon} = 80 \text{ mm/dak.}$ şekil değiştirme hızında 12. ve 15. yüklem-boşaltma çevrimleri sonundaki deneysel verilerin karşılaştırılması

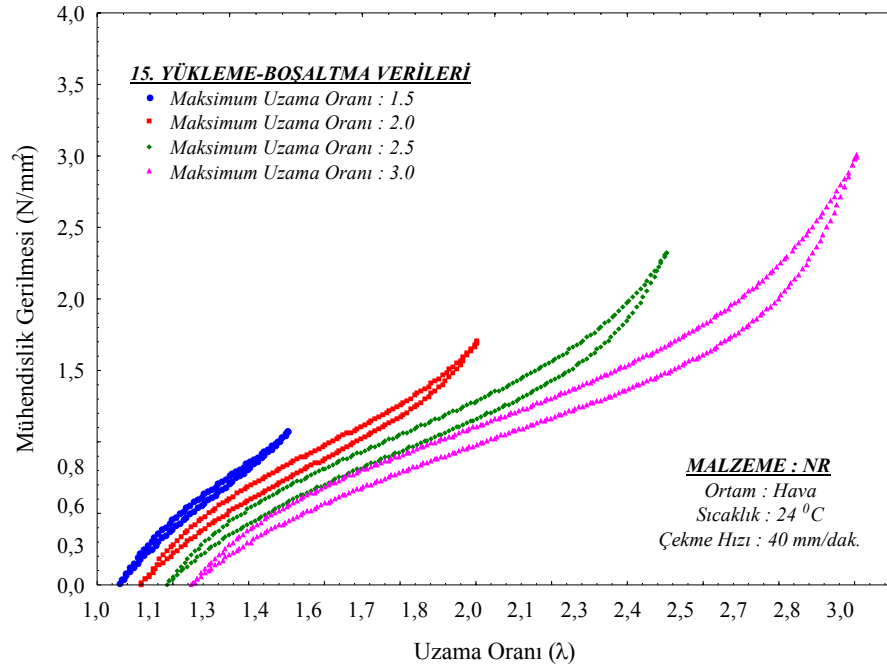
Mullins etkileri ile malzemeye uygulanan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için deney numunesine Şekil 37’de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedüründe numuneler, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, $\lambda = 3.0$, olmak üzere dört farklı uzama oranında 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yüklem-boşaltma çevrimlerine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 98a-d’de verilmiştir. Şekil 98e’de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. veriler birlikte sunulmuştur. Deney sonuçlarını birbirleri ile karşılaştırmak için her bir uzama oranına ait 1. yüklem-boşaltma verileri Şekil 99’da ve 15. yüklem-boşaltma verileri ise Şekil 100’de sunulmuştur. Şekil 99 ve Şekil 100’de sunulan verilerin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için ilgili verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmesi gerekmektedir. Şekil 99 ve Şekil 100’deki verilerin $(\sigma, \lambda) = (0,1)$ başlangıç noktasına ötelenmesi durumunda elde edilen veriler Şekil 101 ve Şekil 102’de sunulmuştur. Şekil 101 ve Şekil 102’deki grafiklerde yapılan öteleme miktarları her bir uzama oranı için Tablo 28’de verilmiştir.



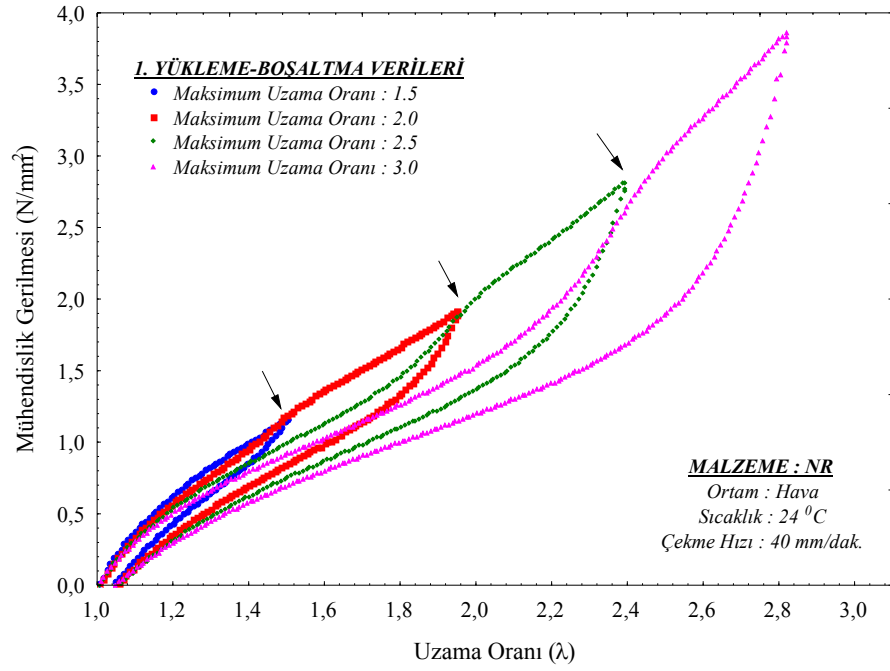
Şekil 98. a-d) NR kauçuk numunenin, sırasıyla, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ 'daki 15 tekrarlı yükleme sonundaki 1. ve 15. çevrimin gerilme-uzama oranı verileri, e) Tüm uzama oranlarındaki verilerin toplu olarak gösterimi



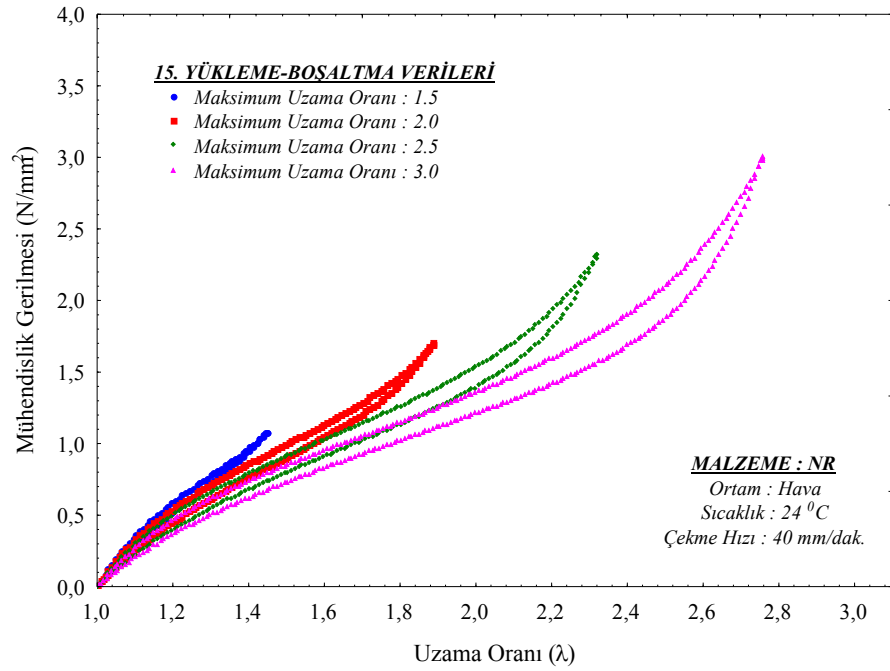
Şekil 99. NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



Şekil 100. NBR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme boşaltma verilerinin birlikte gösterimi



Şekil 101. NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi

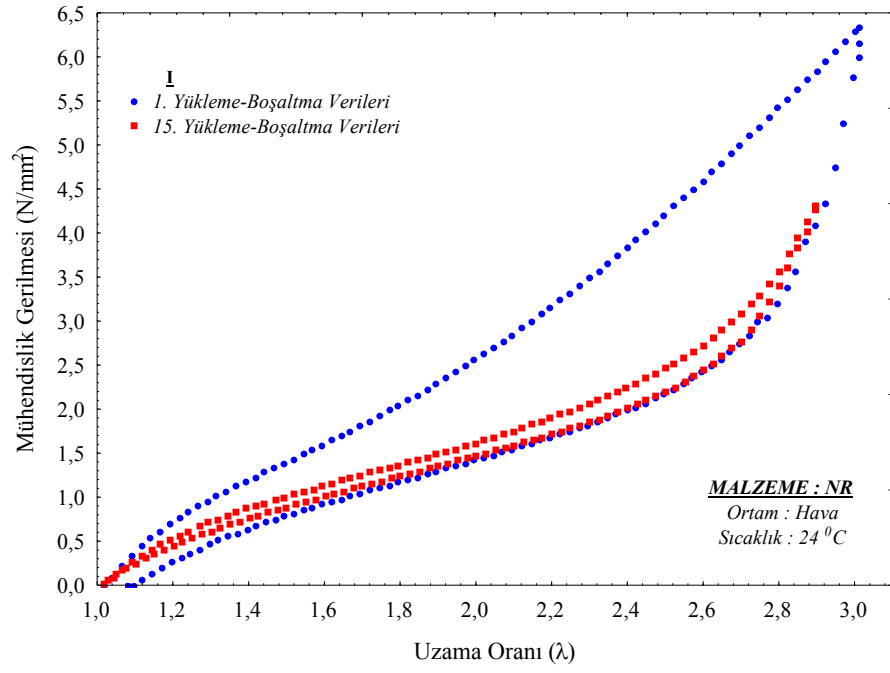


Şekil 102. NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenerek birlikte gösterimi

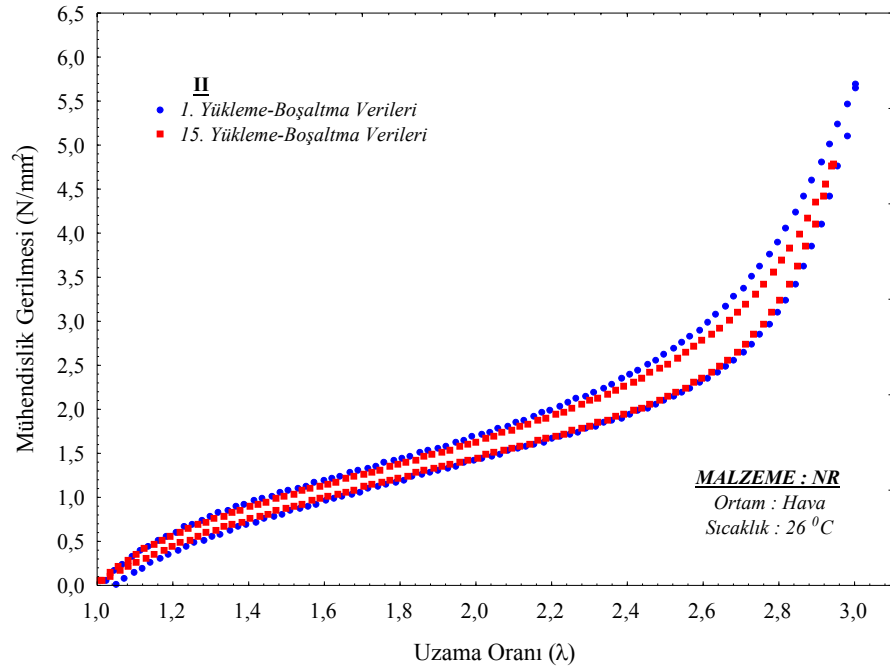
Tablo 28. NR kauçuk numunesinin her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenme miktarları

1. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ		15. YÜKLEME-BOŞALTMA VERİLERİ	
Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı	Uzama Oranı (λ)	Öteleme Miktarı
1.5	0.000	1.5	0.057
2.0	0.051	2.0	0.118
2.5	0.112	2.5	0.183
3.0	0.184	3.0	0.247

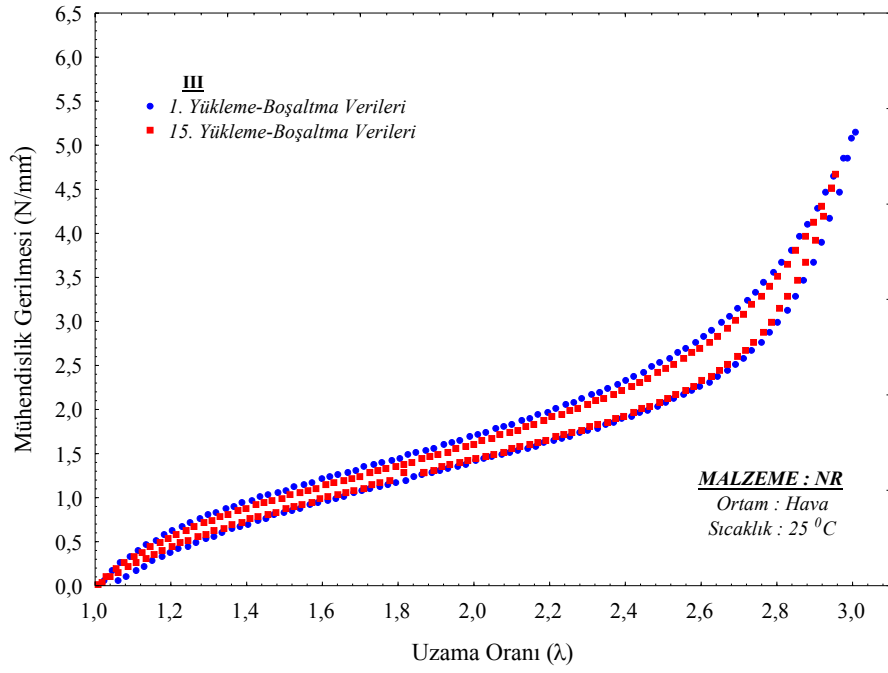
Şekil 36’da verilen Mullins etkilerini giderici deney prosedürü uygulanmış NR kauçuk numunenin Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişip değişmediğini incelemek amacıyla Şekil 38’deki deney prosedürü uygulanmıştır. Bunun için, sırasıyla, 15 tekrarlı yükleme (I. grup tekrarlı yükleme), gerilme gevşemesi, 15 tekrarlı yükleme (II. grup tekrarlı yükleme) ve tekrar 15 tekrarlı yükleme (III. grup tekrarlı yükleme) çevrimleri uygulanarak deney tamamlanmıştır. Deney sonunda I., II. ve III. grup tekrarlı yüklemenden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri, sırasıyla, Şekil 103, Şekil 104 ve Şekil 105’de sunulmuştur. Ayrıca I., II. ve III. grup tekrarlı yüklemenden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini karşılaştırmak için her üç deneydeki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 106’da, 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 107’de sunulmuştur. Şekil 107’deki gerilme-uzama oranı verilerini birbirleri ile karşılaştırmak için her üç deneye ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir. Şekil 106’daki deneyler 1. yükleme-boşaltma verileri olduğundan bu verilerin başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmesine ihtiyaç yoktur.



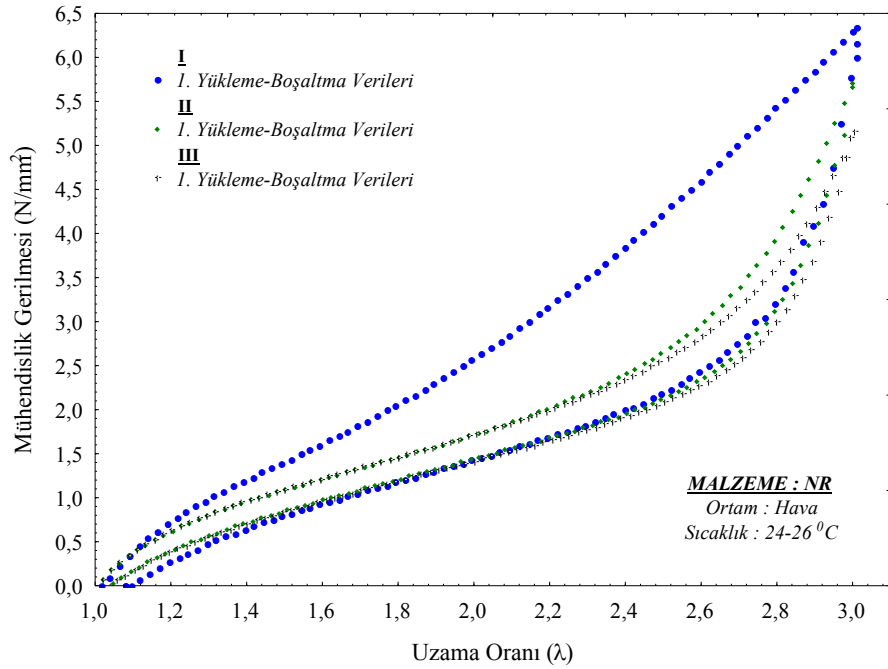
Şekil 103. NR kauçuk numunenin I. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



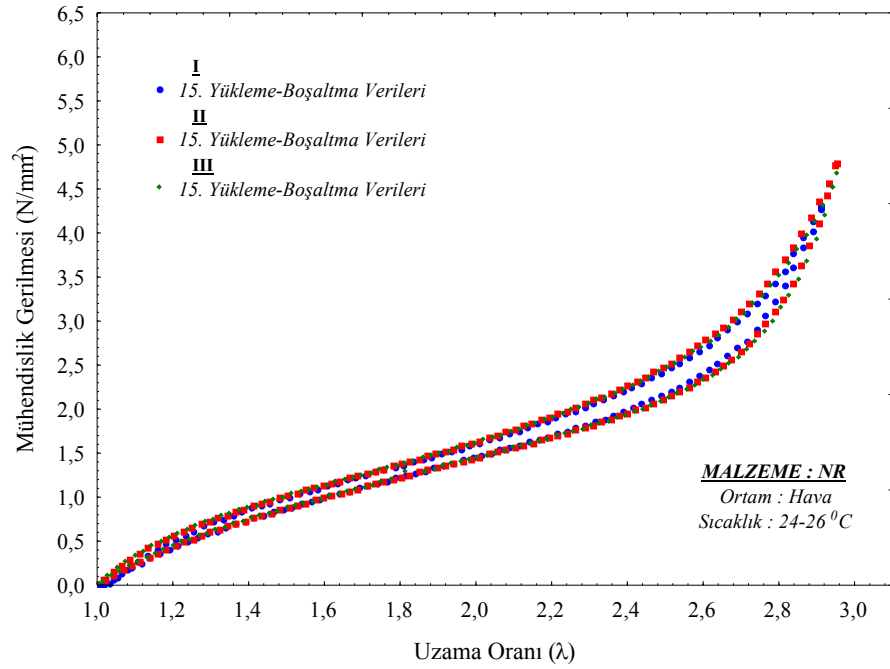
Şekil 104. NR kauçuk numunenin II. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 105. NR kauçuk numunenin III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri



Şekil 106. NR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yüklemekten elde edilen 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması



Şekil 107. NR kauçuk numunenin I., II, ve III. grup tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılması

3.3. Gerilme Gevşemesi Deneyleri

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi de gerilme gevşemesi; yani sabit deformasyon altında gerilmenin zamanla azalmasıdır. Yapılan çalışmada SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin sürekli ölçüm yöntemini kullanarak gerilme gevşemesi deneyleri farklı uzama oranlarında hava ortamı için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneyler, ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve uygulanmamış numuneler kullanmak sureti ile tekrarlanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3.1. SBR Kauçuk Deneyleri

Şekil 39'de verilen deney prosedürü SBR kauçuk deney numunelerine uygulanmış ve Şekil 108'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Deneyde sırasıyla $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, ve $\lambda = 3.0$ için 10 saat boyunca gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır. Her bir deneyden elde edilen gerilme- zaman ilişkisi Şekil 108a-d'de

görülmektedir. Deneyin toplu halde grafikleri ise Şekil 108e'de verilmiştir. Her bir uzama oranında gerilmenin deneyin başlangıcında hızlı ve eksponansiyel bir düşüş gösterdiği daha sonra ise bu düşüşün zaman içerisinde lineere yakın bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu lineere yakın değişimin eğimi ise ortam sıcaklığında oldukça küçük olduğu hatta düşük uzama oranlarında eğimi sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 108e'den elde edilen verilerin yer aldığı Tablo 29'da açıkça görülmektedir. Tablo 29'da sunulan değerler Şekil 109'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Burada 0.1 saatteki gerilme değeri σ_1 , $t = t_2 = t_{1s}$. saatteki gerilme değeri σ_2 ve $t = t_3$. saatteki gerilme değeri ise σ_3 olarak tanımlanmaktadır. t_1 . saatten t_2 . saate kadar olan sürede gerilmedeki azalma $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2$, t_2 . saatten t_3 . saate kadar olan sürede gerilmedeki azalma $\Delta\sigma_3 = \sigma_2 - \sigma_3$ ve t_1 . saatten t_3 . saate kadar olan sürede gerilmedeki azalma ise $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ olarak tanımlanmıştır. t_2 . saat ile t_3 . saat arasındaki gerilme-zaman verilerine Gauss-Newton yöntemi kullanılarak uydurulan lineer eğrinin yatayla yaptığı açı ise α olarak tanımlanmıştır. α açısı çalışmalarda derece cinsinden ifade edilmiştir. Şekil 109'da non-lineer değişim gösteren $t_1 - t_2$ aralığındaki bölge 1. Bölge, $t_2 - t_3$ aralığındaki lineer değişim gösteren bölge ise 2. Bölge olarak adlandırılmıştır. Benzer bir tanımlama literatürde Mooney, Wolstenholme ve Villers [160] tarafından yapılmış olup bu çalışma ile Mooney ve arkadaşları tarafından yapılan tanımlama arasında gerilmelerin tanımlaması bakımından farklılık vardır.

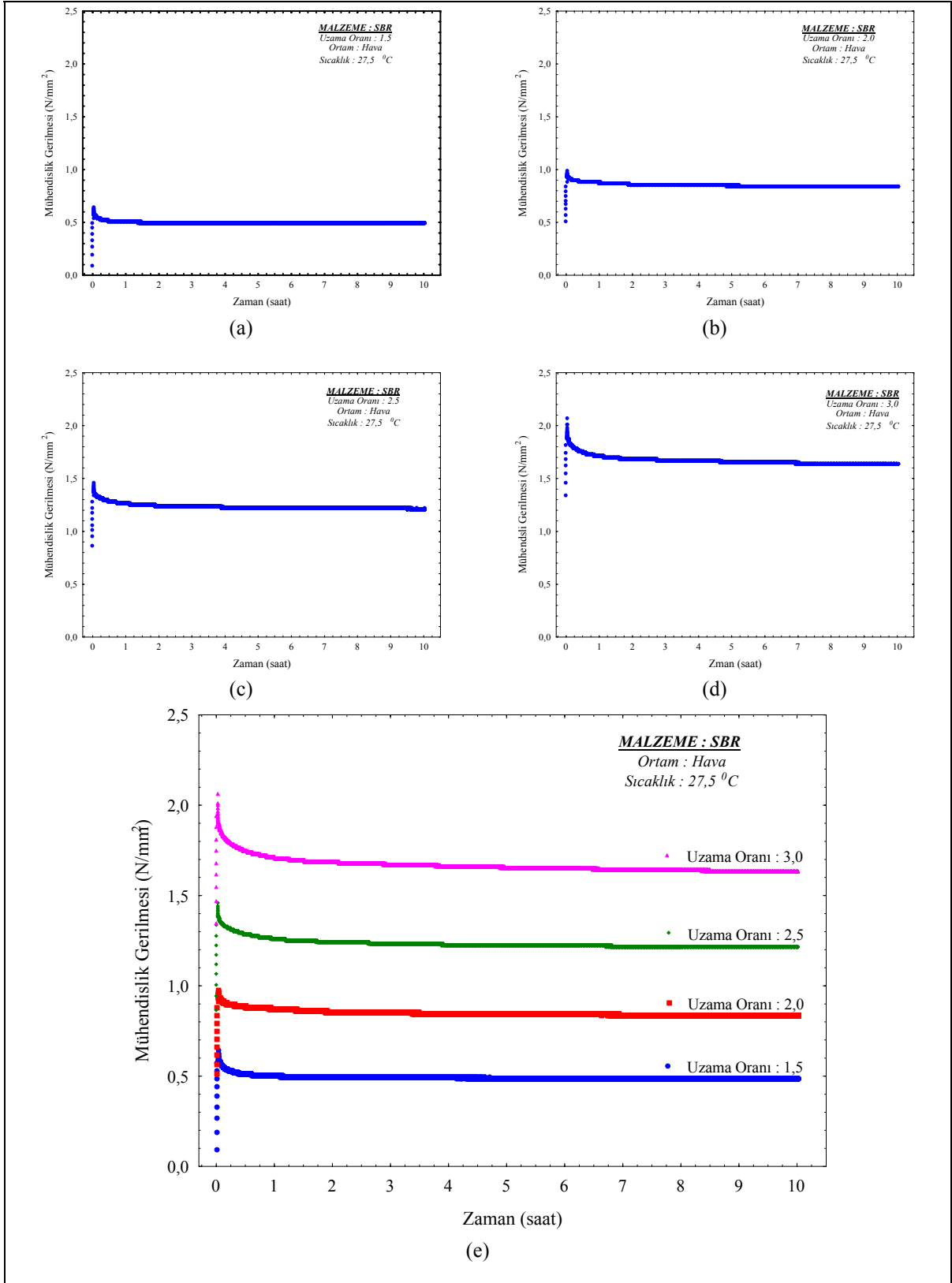
Bu çalışmada, tüm deneyler için, $t_2 = t_{1s}$ değeri 2 saat ve $t = t_3$ değeri ise 10 saat olarak alınmıştır. Tablo 29'da her bir uzama oranında t_1 , t_2 . ve t_3 . saatlerdeki gerilme değerleri ve bunlar arasındaki fark verilmiştir. Tabloda yer alan verilerden gerilmelerdeki düşüş ilk iki saatte oldukça fazla ($\Delta\sigma_2$), 2. ile 10. saatler arasındaki düşüşün ise oldukça az olduğu görülmektedir ($\Delta\sigma_3$). Ayrıca α açısının değerinin oda sıcaklığında, tüm uzama oranları için, neredeyse sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Açılarının çok küçük olmasına rağmen artan uzama oranı ile açının değerinin arttığı görülmektedir. Tablo 29'daki verilerden çıkarılabilecek bir diğer sonuç da; artan uzama oranı ile ilk andaki başlangıç gerilmelerinin (σ_1) arttığıdır. Bu durum beklenen bir sonuçtur ve aynı şekilde uzama oranının artmasıyla σ_2 ve σ_3 değerleri de artmaktadır. Ancak deneylerde 10 saat sonunda toplam gerilme azalmasının ($\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$) $\lambda = 2.0$ 'daki değerinin $\lambda = 1.5$ 'daki

değerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2$ gerilme düşüşü içinde geçerlidir. Benzer bulgu $\Delta\sigma_3 = \sigma_2 - \sigma_3$ için gözlemlenmemiştir.

Gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen gerilme-zaman verilerinin farklı uzama oranlarındaki değerlerini karşılaştırabilmek için deneysel verilerin normalize edilerek grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir [169]. Literatürde bu tür uygulama ilk olarak Tobolsky ve arkadaşlarının çalışmalarında [158-159] görülmektedir. Literatürde gerilmenin normalize değeri, deneyde okunan gerilmenin 0.01. saatteki değerine [158, 161, 213], 0.1. saatteki değerine [162] veya 1. saatteki değerine [163] bölünmesiyle elde edilmiştir.

Bu çalışmada gerilmenin normalize edilmiş değeri, deneyden okunan gerilme değerinin (σ_t) 0.1. saatteki gerilme değerine ($\sigma_{0.1}$) bölünerek elde edilmiş ve grafikler buna göre çizilmiştir. Şekil 110'da, Şekil 108e'deki gerilme gevşemesi deneysel verilerinin 0.1. saatteki gerilme değerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş gerilme gevşemesi-zaman grafiği görülmektedir. Şekil 110'da en fazla gerilme gevşemesi $\lambda = 1,5$ 'de olduğu görülmektedir. Özellikle $\lambda = 1.5$ ile $\lambda = 2.0$ uzama oranları arasında normalize edilmiş gerilme gevşemesi arasında fark en fazladır. Genel olarak, SBR kauçukta gerilme gevşemesinin her bir uzama oranında benzer davranış gösterdiği söylenebilir. Fakat Şekil 110'a dikkat edilirse $\lambda = 1.5$ 'daki $\sigma_t / \sigma_{0.1}$ değerindeki ani düşüş fazla olmakla birlikte α değerinin daha küçük değerde olması sebebiyle gerilme gevşemesi eğrisinin değişimi neredeyse sabite yakın bir değerde devam etmektedir. Fakat aynı şekilde $\lambda = 2.0$ 'ın gerilme gevşemesi eğrisinin yakından incelenmesinden de görüleceği üzere ilk andaki ani gerilme düşüşü $\lambda = 1.5$ 'a göre düşük olmasına karşın α açısının büyük olması sebebiyle zaman içerisinde gerilmedeki azalma daha hızlı olmaktadır.

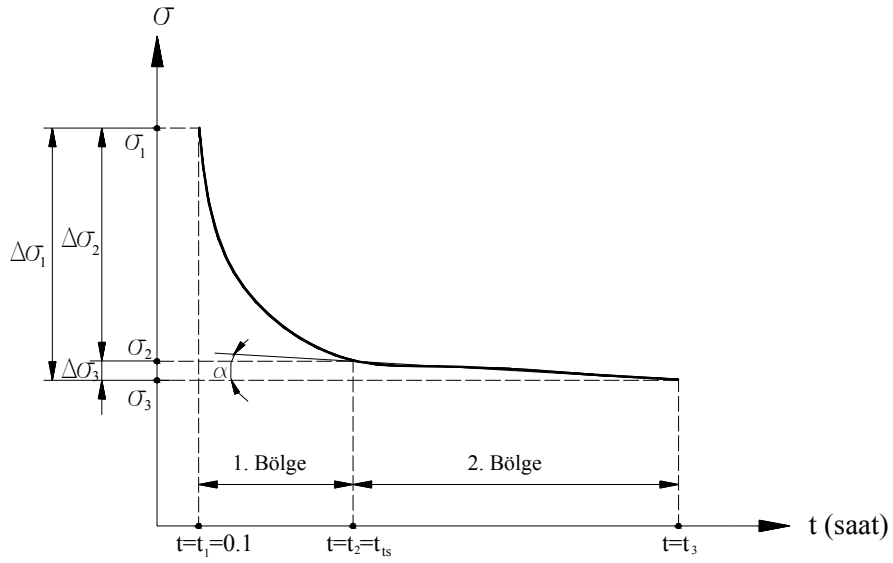
Şekil 111'de, Şekil 110'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verileri kullanarak her bir uzama oranı için 2. ve 10. saatlerdeki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi görülmektedir. Her iki grafikten de görüleceği üzere gerilme gevşemesi uzama oranı ile değişim göstermemektedir.



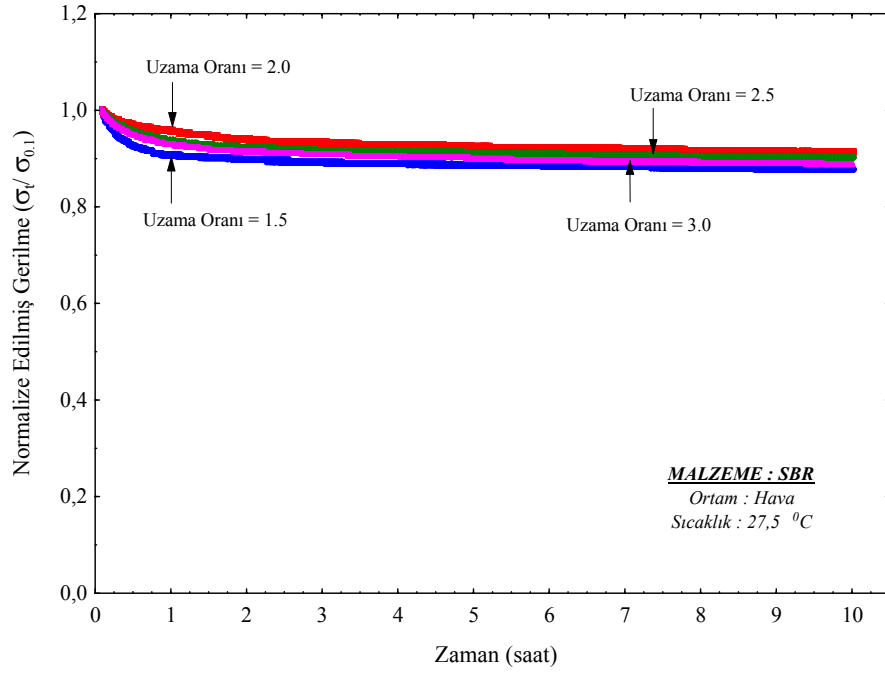
Şekil 108. a-d; $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme gevşemesi deneyine ait gerilme-zaman grafikleri, e; Tüm grafiklerin toplu olarak gösterimi

Tablo 29. SBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_2 = \sigma_{t_2}$ (N/mm ²)	$\sigma_3 = \sigma_{t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	0.645	0.498	0.487	0.158	0.147	0.011	0.073
$\lambda = 2.0$	0.981	0.861	0.838	0.143	0.120	0.023	0.147
$\lambda = 2.5$	1.460	1.242	1.213	0.247	0.218	0.029	0.191
$\lambda = 3.0$	2.064	1.683	1.634	0.430	0.381	0.049	0.341



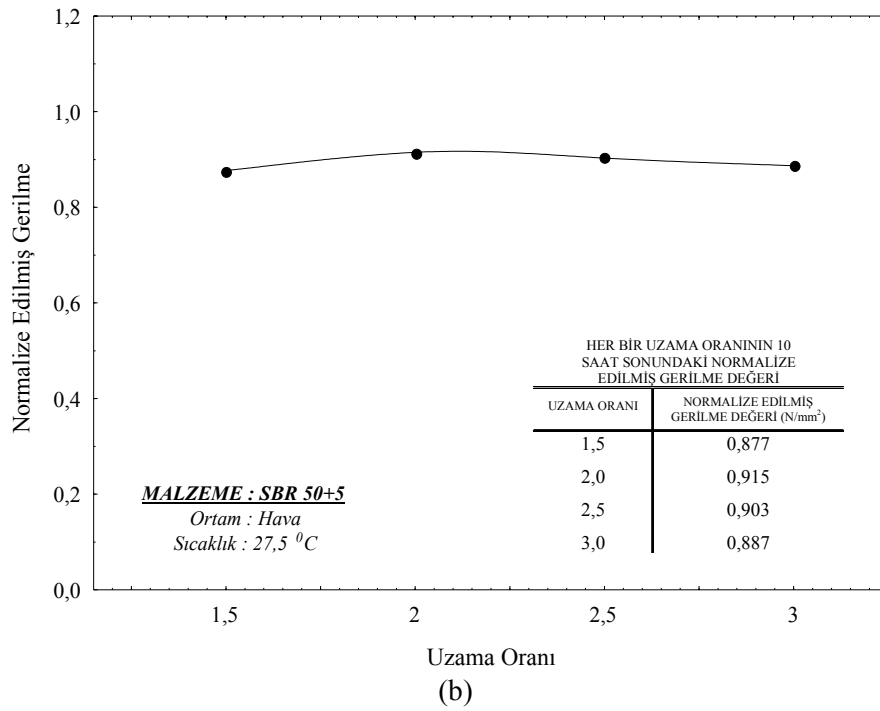
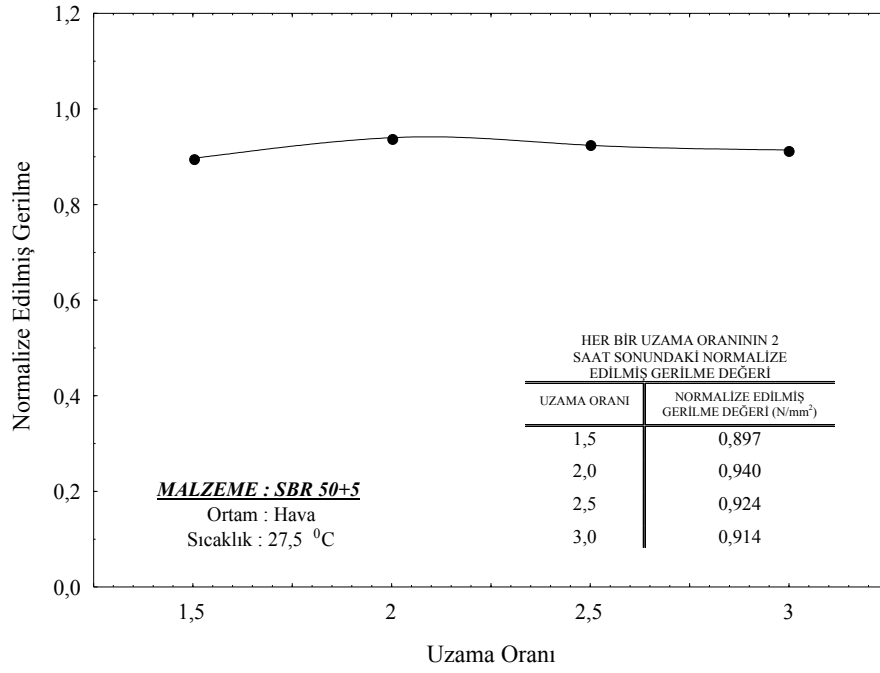
Şekil 109. Sabit uzama oranında gerilme-zaman verileri için tanımlamalar



Şekil 110. SBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Aynı malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanarak ön deformasyon prosedürünün gerilme gevşemesi deney sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Bunun için Şekil 40'da verilen deney prosedürü SBR kauçuğu numunelerine uygulanmış ve Şekil 112'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Deneylerde numune 15 defa $\lambda = 3.0$ 'a kadar yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulduktan sonra 2 saat beklenilmiş ve sırasıyla $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$, ve $\lambda = 3.0$ için 10'ar saat boyunca gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır.

Ön deformasyon prosedürü uygulanmış numune ile gerçekleştirilen deneyde de her bir uzama oranında gerilmenin yüklemenin başlangıcında eksponansiyel bir düşüş gösterdiği daha sonra ise bu düşüşün zaman içerisinde hemen hemen lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi eğrileri, Şekil 108e'de verilen eğrilerle karşılaştırılırsa 1. bölgede, ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numuneye ait eğrilere göre, daha kısa sürede oluştuğu ve $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2$ gerilme farkının azaldığı görülmektedir. $\lambda = 3.0$ 'de ise $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi eğrilerinden farklı bir değişim gözlemlenmiştir.

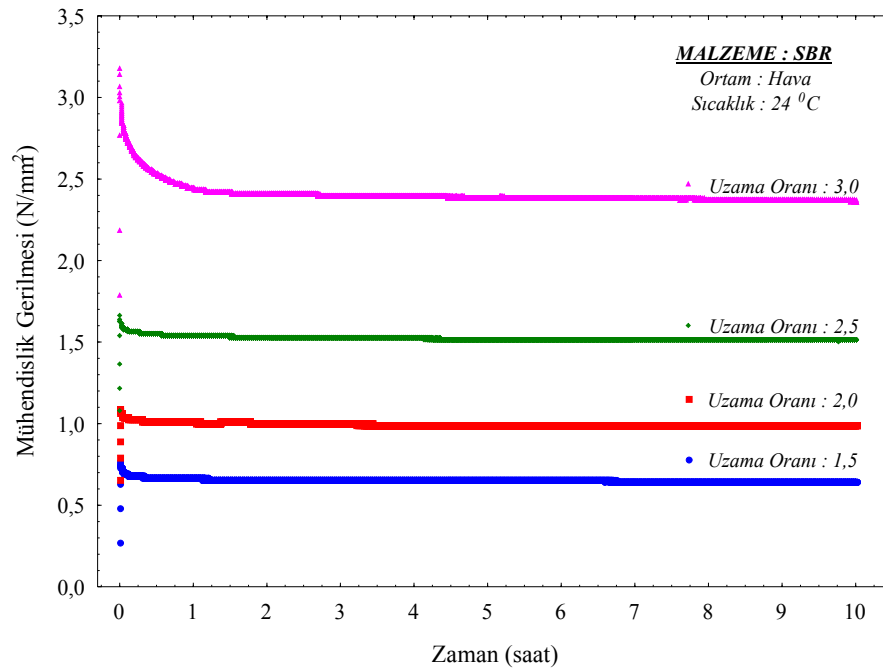


Şekil 111. SBR kauçuğuna ait normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi

Gerilme gevşemesinin 2. bölgedeki lineere yakın olan eğrisinin eğiminin ise deneylerin gerçekleştirildiği 24 °C'lik ortam sıcaklığında oldukça küçük olduğu fakat artan uzama oranıyla arttığı görülmektedir. Bu durum Tablo 30'da görülmektedir. Tabloda, her

bir uzama oranında 0.1., 2. ve 10. saatlerdeki gerilme değerleri ve bunlar arasındaki farklar verilmiştir. σ_1 , σ_2 ve σ_3 gerilme değerleri artan uzama oranı ile artmakta $\Delta\sigma_1$ ve $\Delta\sigma_2$ gerilme düşüşleri ise, yine Tablo 30'da verildiği gibi, $\lambda = 2.0$ 'de düşüş göstermektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR kauçuk malzemesinin normalize edilmiş gerilme-zaman grafiği ise Şekil 113'de verilmiştir. Burada Şekil 110'daki verilerin aksine $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme-zaman eğrilerinin daha dar bir bant içinde kalarak benzer davranış gösterdiği, fakat $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme-zaman grafiğinin Şekil 110'dakinden oldukça farklı bir karakter sergilediği görülmektedir.

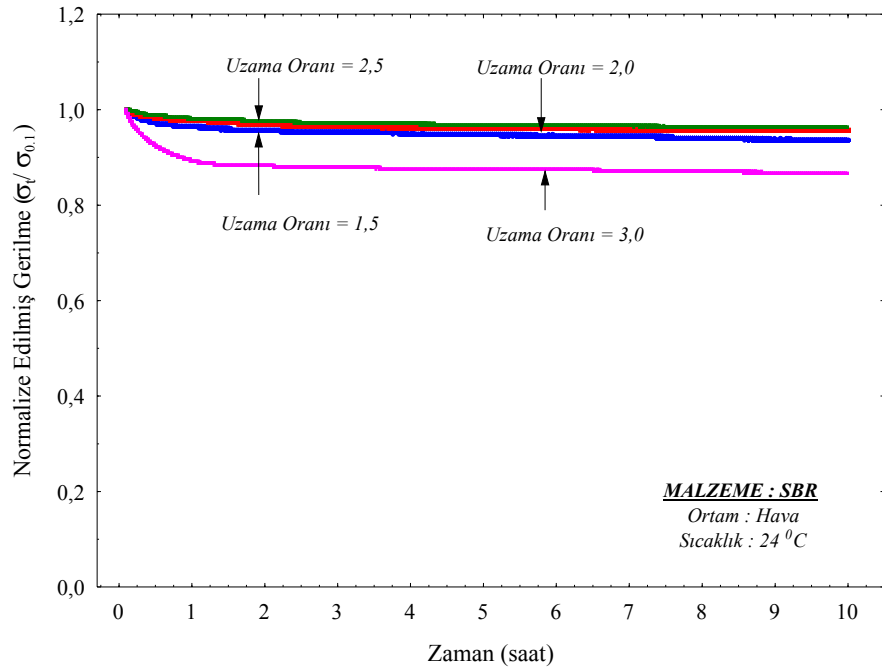
Şekil 114a-b'de ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR kauçuğunun deney başlangıcından 2 ve 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği üzere uzama oranı $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da normalize edilmiş gerilme gevşemesi uzama oranı ile değişim göstermemektedir. Fakat $\lambda = 3.0$ 'da gerilme gevşemesi uzama oranına bağlı olmaktadır. Dikkat edilirse ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda gerilme gevşemesi-uzama oranı ilişkisi ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numunelerden elde edilen ilişkiyen (Şekil 111) farklıdır.

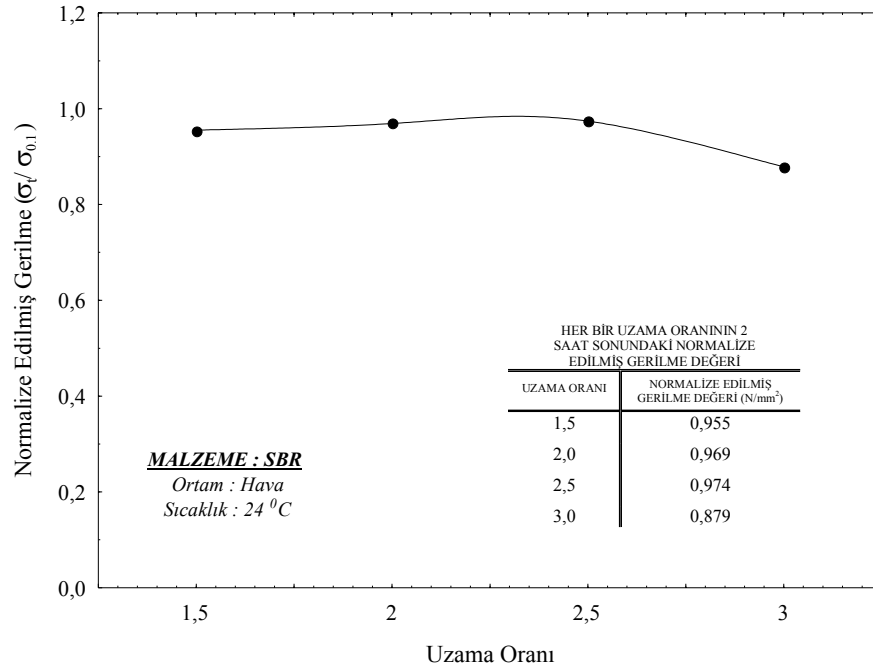


Şekil 112. SBR kauçuk malzemesinin, uzama oranı $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'deki ön deformasyon prosedürü uygulanmış gerilme-zaman grafikleri

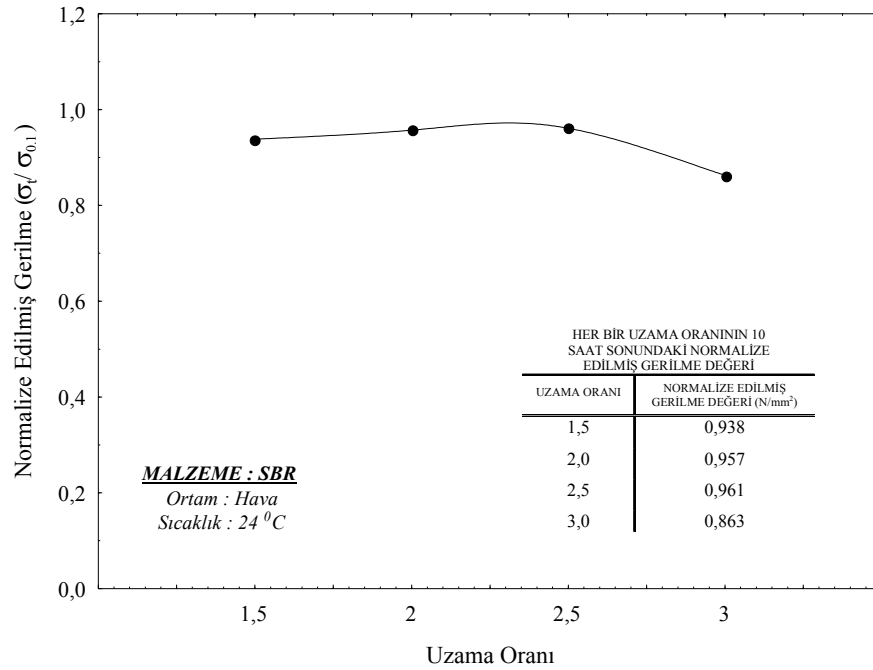
Tablo 30. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_2 = \sigma_{t_2}$ (N/mm ²)	$\sigma_3 = \sigma_{t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	0.769	0.660	0.648	0.121	0.109	0.012	0.086
$\lambda = 2.0$	1.091	1.004	0.991	0.100	0.087	0.013	0.082
$\lambda = 2.5$	1.659	1.530	1.510	0.149	0.129	0.020	0.139
$\lambda = 3.0$	3.174	2.408	2.364	0.810	0.766	0.044	0.280

Şekil 113. SBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



(a)



(b)

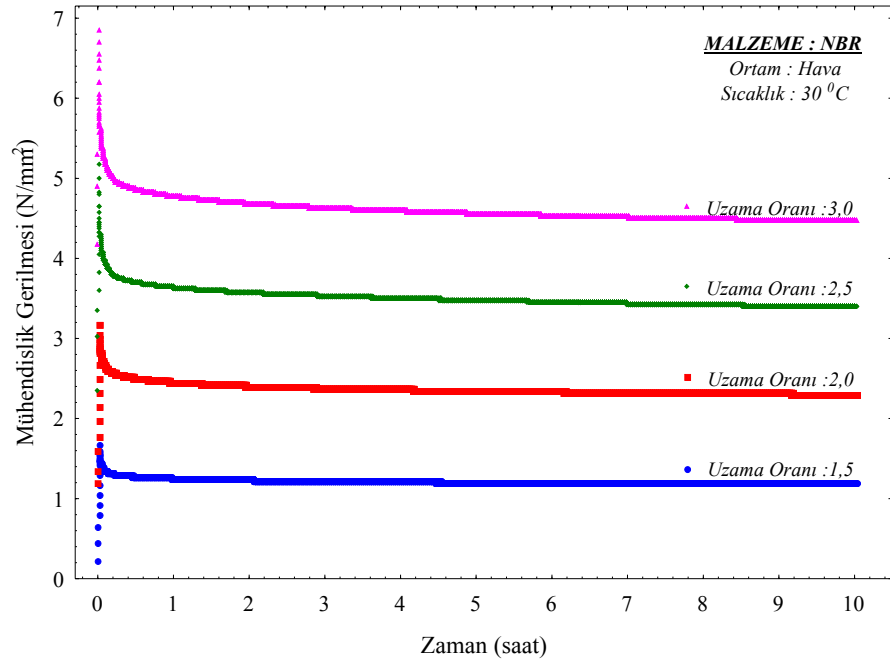
Şekil 114. SBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi

3.3.2. NBR Kauçuk Deneyleri

Şekil 39'da verilen deney prosedürünün NBR kauçuğu numunelerine uygulanmasıyla Şekil 115'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Her bir uzama oranında gerilmenin deney başlangıcında hızlı ve eksponansiyel bir düşüş gösterdiği daha sonra ise bu düşüşün zaman içerisinde lineer'e yakın bir değişim gösterdiği burada da görülmektedir. Bu durum Tablo 31'de sayısal olarak ta görülmektedir. Tablo 31'de her bir uzama oranında 0.1., 2. ve 10. saatlerdeki gerilme değerleri ve bunlar arasındaki fark verilmiştir. Tabloda verilen değerlerden yüklemenin ilk 2 saati sonunda gerilmelerdeki azalmanın ($\Delta\sigma_2$) oldukça fazla, 2. saati ile 10. saati arasındaki azalmanın ($\Delta\sigma_3$) ise oldukça az olduğu görülmektedir. 2. bölgedeki lineer değişimin eğimi ise oldukça küçük olduğu hatta düşük uzama oranlarında eğimin sifıra yakın olduğu görülmektedir. Fakat eğimin yine de artan uzama oranıyla arttığı görülmektedir. Tablo 31'deki sayısal veriler dikkatlice incelendiğinde artan uzama oranı ile ilk andaki başlangıç gerilmelerinin (σ_1) burada da arttığı görülmektedir. Aynı şekilde uzama oranının artmasıyla σ_2 ve σ_3 gerilme değerleri de artmaktadır. 10. saat sonunda SBR kauçuğu için toplam gerilme azalmasının ($\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$) $\lambda = 2.0'$ daki değerinin $\lambda = 1.5'$ daki değerinden daha düşük olduğu gözlemi, NBR kauçuğunda da gözlemlenmemiştir.

Şekil 115'de verilen gerilme-zaman grafiğindeki gerilmelerin, 0.1. saatteki gerilme değerine bölünmesiyle Şekil 116'daki normalize edilmiş grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerden her bir deformasyon oranındaki gerilme gevşemesi davranışını temsil eden eğrilerin dar bir bant içinde kaldıkları görülmektedir.

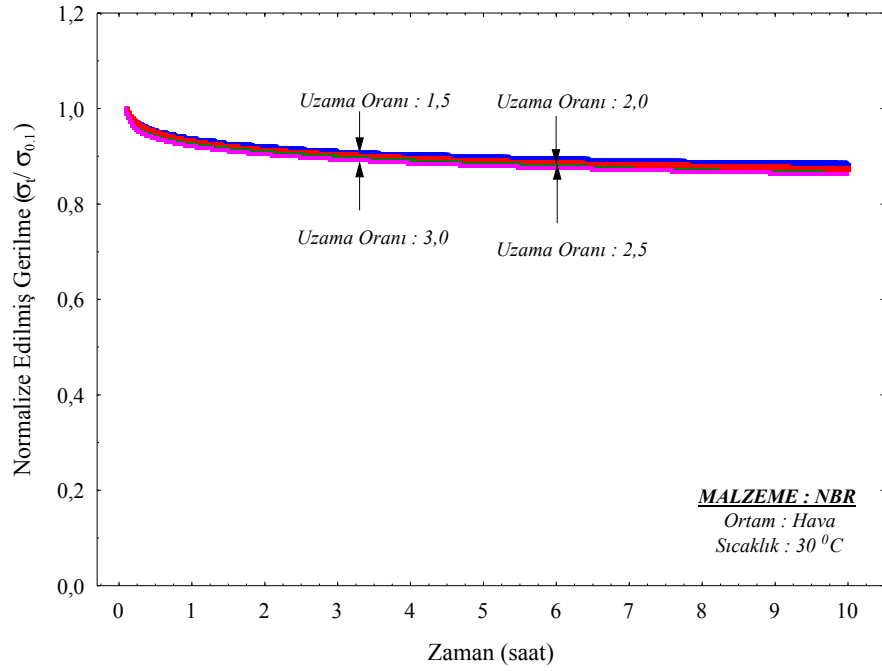
Şekil 117'de, Şekil 116'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verileri kullanarak, her bir uzama oranı için 2. ve 10. saatler sonundaki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği üzere gerilme gevşemesi oranı uzama oranı ile değişim göstermemektedir.



Şekil 115. NBR kauçuk malzemesine, ait $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki gerilme zaman grafikleri

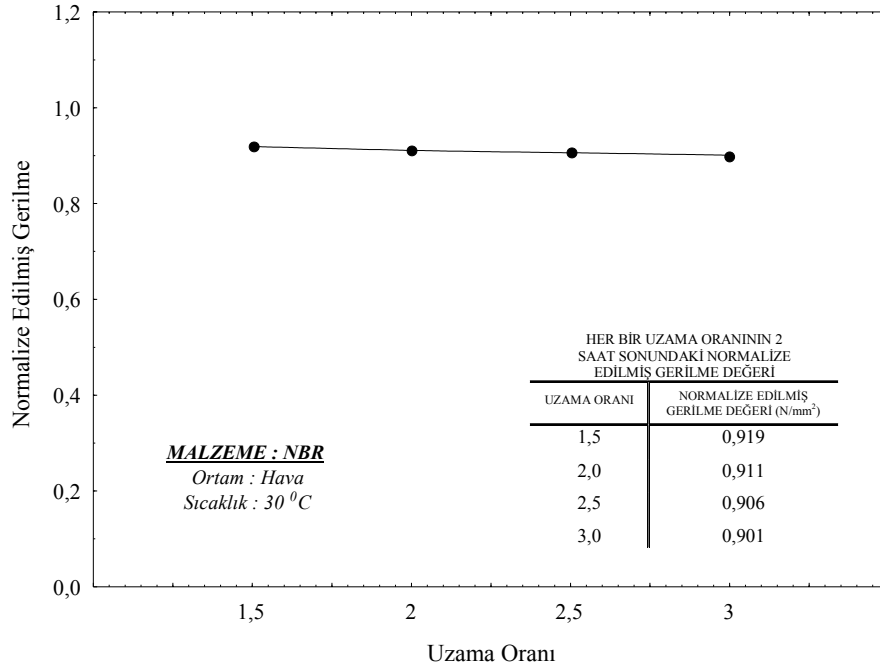
Tablo 31. NBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t_2=t_{1s}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t=t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	1.664	1.239	1.189	0.475	0.425	0.050	0.316
$\lambda = 2.0$	3.182	2.410	2.307	0.875	0.772	0.103	0.675
$\lambda = 2.5$	5.181	3.572	3.397	1.784	1.609	0.175	1.207
$\lambda = 3.0$	6.857	4.683	4.467	2.390	2.174	0.216	1.436

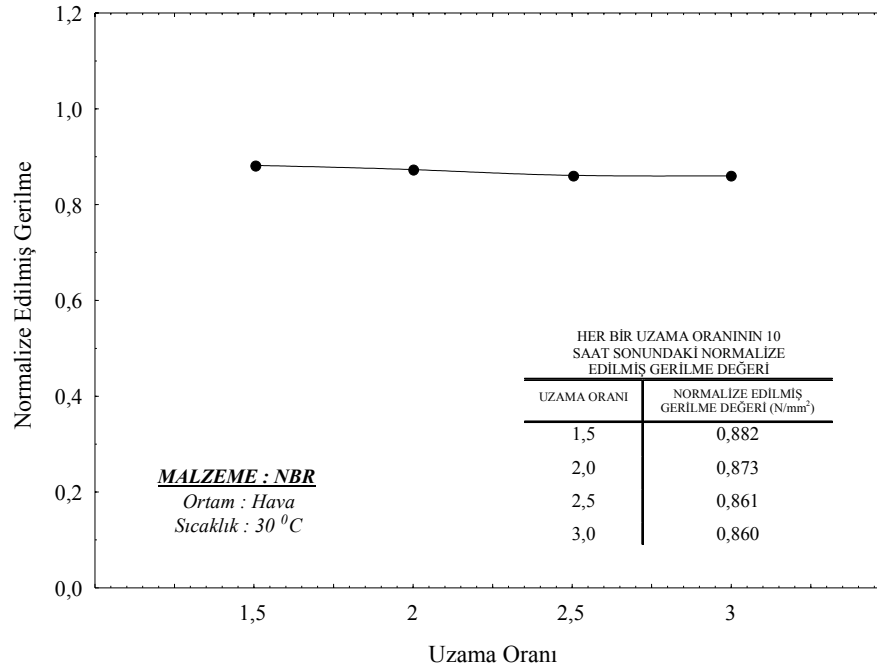


Şekil 116. NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

SBR kauçuk numunelerde yapıldığı gibi NBR kauçuk numunelere de ön deformasyon prosedürü uygulanarak ön deformasyon prosedürünün gerilme gevşemesi davranışına etkisi incelenmiştir. Bunun için Şekil 40'da verilen deformasyon prosedürü NBR kauçuğu için uygulanmış ve Şekil 118'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış numune ile gerçekleştirilen deneyde de her bir uzama oranında, gerilmenin yüklemenin ilk aşamasında hızlı bir düşüş gösterdiği daha sonra ise bu düşüşün lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu lineer değişimin eğiminin ise oldukça küçük olduğu hatta $\lambda = 2.5$ ve daha düşük deformasyonlarda eğimin sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Tablo 32'den de görülmektedir. Tablodaki verilerden de görüleceği gibi ilk 2 saat sonunda gerilmelerdeki düşüş oldukça fazladır ($\Delta\sigma_2$). 2. saat ile 10. saat arasındaki düşüş ise oldukça az olduğu görülmektedir ($\Delta\sigma_3$). Ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi eğrilerinin, Şekil 115 eğrisiyle kıyaslanırsa, 1. bölgenin ön deformasyon prosedürü uygulanmamış eğrilere göre daha kısa sürede oluştuğu ve $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2$ gerilme farkının azaldığı görülmektedir. Fakat, bu durum $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme gevşemesi eğrisi için geçerli değildir. $\lambda = 3.0$ 'de $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi eğrilerinden farklı bir değişim göstermektedir.

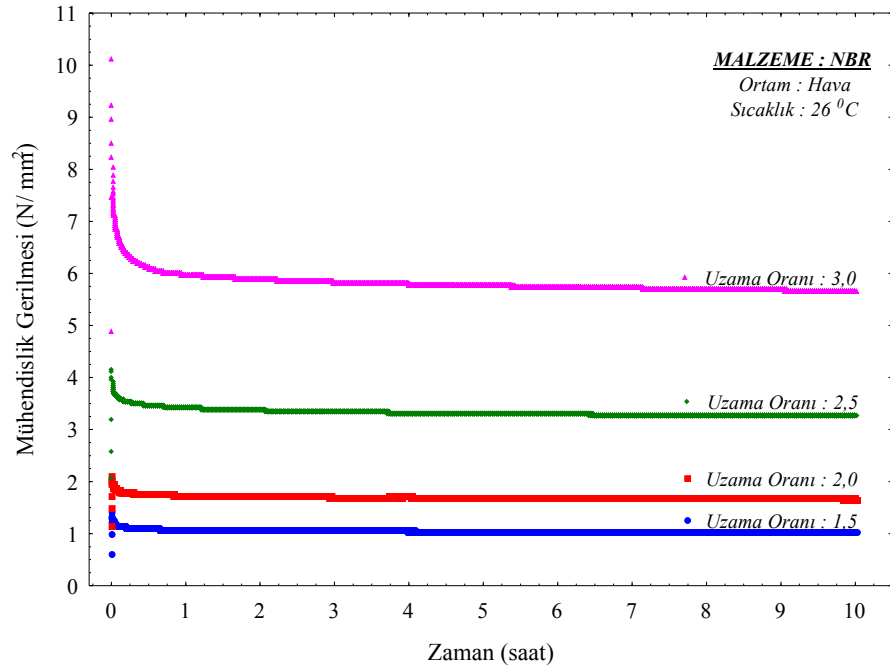


(a)



(b)

Şekil 117. Normalize edilmiş NBR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için yükleme başlangıcından itibaren a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi



Şekil 118. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri

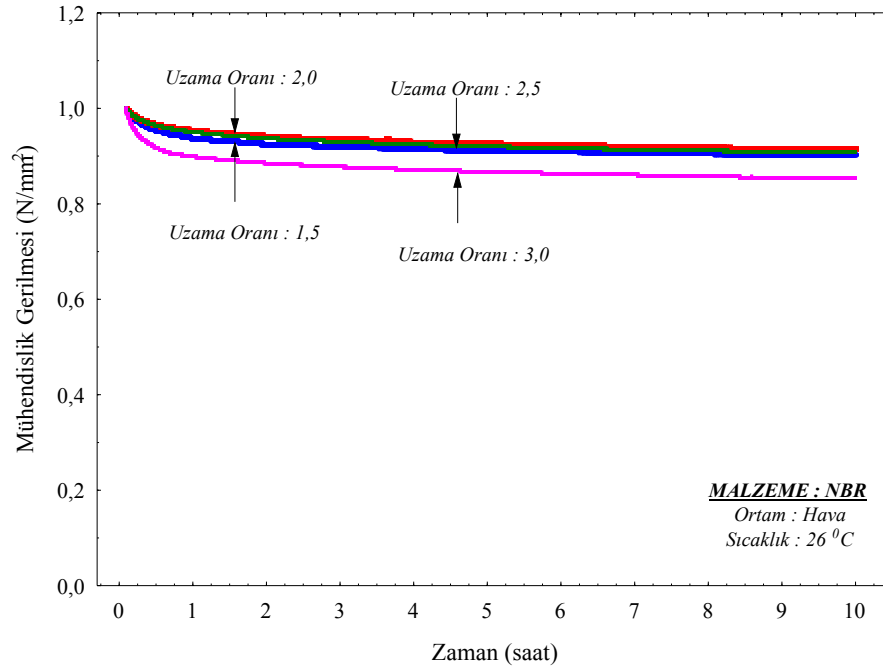
Tablo 32. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t_2=t_{1s}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t=t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	1.410	1.069	1.044	0.366	0.341	0.025	0.170
$\lambda = 2.0$	2.098	1.723	1.671	0.427	0.375	0.052	0.351
$\lambda = 2.5$	4.143	3.370	3.261	0.882	0.723	0.109	0.717
$\lambda = 3.0$	10.112	5.880	5.661	4.451	4.232	0.219	1.452

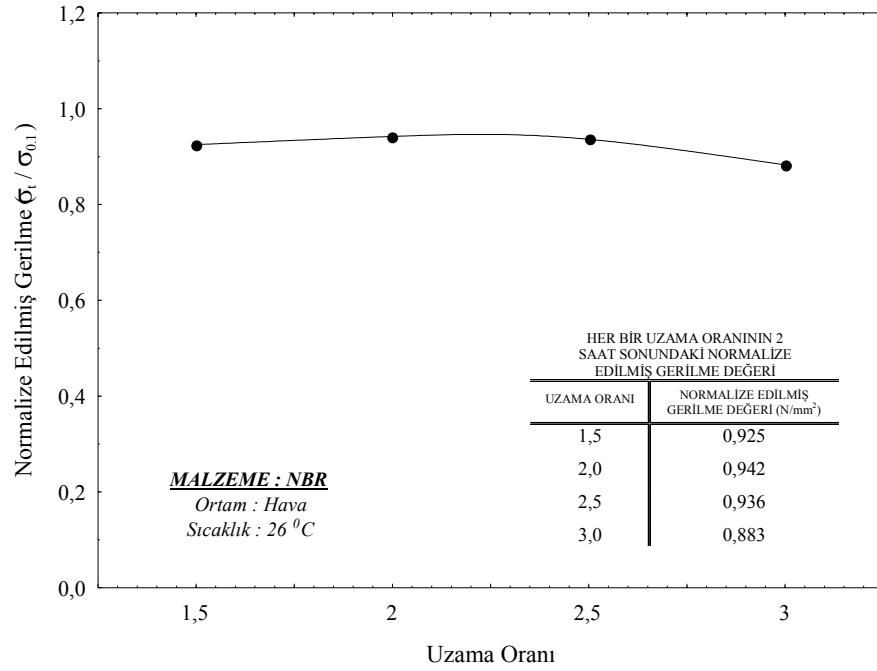
Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuk malzemesinin normalize edilmiş gerilme-zaman grafiği Şekil 119'da verilmiştir. Burada Şekil 116'daki verilerin aksine $\lambda = 1.5, \lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme-zaman eğrilerinin daha dar bir bantta

benzer davranış göstermesine karşın $\lambda = 3.0$ 'deki normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinin farklı bir davranış gösterdiği görülmektedir.

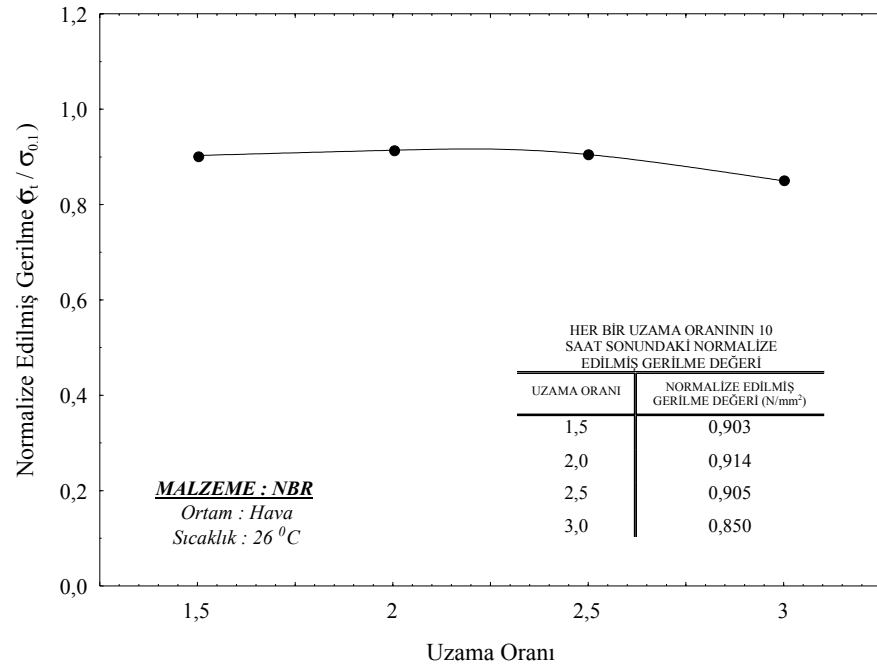
Şekil 120a-b'de ön deformasyon prosedürü uygulanmış NBR kauçuğunun deney başlangıcından 2 ve 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği üzere uzama oranı $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da normalize edilmiş gerilme gevşemesi uzama oranı ile değişim göstermemektedir. Fakat $\lambda = 3.0$ 'da gerilme gevşemesi uzama oranına bağlı olmaktadır. Dikkat edilirse ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda gerilme gevşemesi-uzama oranı ilişkisi ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numunelerden elde edilen ilişkidir (Şekil 117) farklıdır.



Şekil 119. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NBR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'deki gerilme-zaman grafikleri



(a)



(b)

Şekil 120. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NBR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi

3.3.3. NR Kauçuk Deneyleri

Şekil 39'da verilen deney prosedürünün NR kauçuğundan imal edilen numunelere uygulanmasıyla Şekil 121'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Her bir uzama oranında gerilmenin, yüklemenin başlangıcında hızlı ve eksponansiyel daha sonra ise bu düşüşün zaman içerisinde lineer bir değişime dönüştüğü burada da görülmektedir. Bu lineer değişimin eğiminin oldukça küçük olduğu hatta düşük uzama oranlarında sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Tablo 33'de sayısal değerler olarak verilmiştir. Tabloda her bir uzama oranında deney başlangıcından itibaren 0.1., 2. ve 10. saatlerdeki gerilme değerleri ve bunlar arasındaki fark verilmiştir. Verilerin incelenmesinden ilk 2 saatteki gerilmelerdeki düşüşün oldukça fazla olduğu ($\Delta\sigma_2$), 2. saat ile 10. saat arasındaki düşüşün ise oldukça az olduğu ($\Delta\sigma_3$), ancak yine de artan uzama oranıyla arttığı görülmektedir.

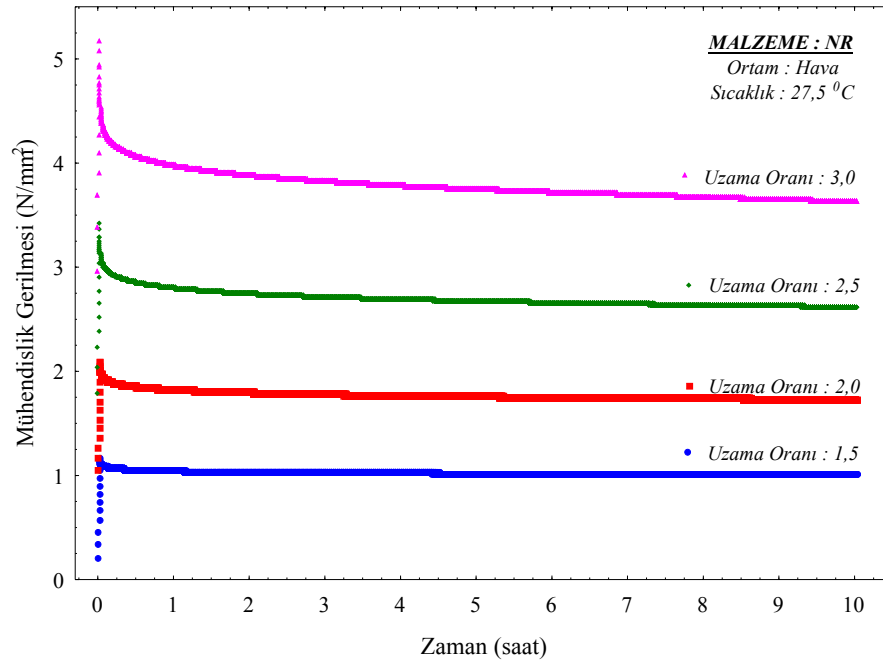
Şekil 121'de verilen gerilme-zaman grafiğindeki gerilmelerin 0.1. saatteki gerilme değerine bölünmesiyle Şekil 122'deki normalize edilmiş grafikler elde edilmiştir. Normalize edilmiş grafiklerden her bir deformasyon oranındaki gerilme gevşemesi davranışının, SBR ve NBR kauçuklarında gözlemlenen davranışların aksine, uzama oranının değerine bağlı olduğu görülmektedir. Uzama oranının artmasıyla malzemedeki gerilme gevşemesi miktarı da artmaktadır.

Şekil 123'de, Şekil 122'deki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerini kullanarak, her bir uzama oranı için 2. ve 10. saatteki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi görülmektedir. Her iki grafikten de görüleceği üzere normalize edilmiş gerilme artan uzama oranıyla lineer olarak azalmaktadır.

NR kauçuk malzemesine ön deformasyon prosedürü uygulanarak, ön deformasyon prosedürünün gerilme gevşemesi deneyine etkisi araştırılmıştır. Bunun için Şekil 40'da verilen deney prosedürü NR kauçuğu için uygulanmış ve Şekil 124'de verilen mühendislik gerilmesi-zaman grafiği elde edilmiştir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış numune ile gerçekleştirilen deneyde de her bir uzama oranında gerilmenin yükleme başlangıcında hızlı bir düşüş gösterdiği daha sonra ise bu düşüşün zaman içerisinde lineer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu lineer değişimin eğiminin deneylerin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığında oldukça küçük olduğu, ve hatta $\lambda = 2.5$ ve daha düşük uzama oranlarında sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Fakat $\lambda = 3.0$ 'da eğimin oldukça arttığı görülmektedir. Bu durum Tablo 34'de açıkça görülmektedir. Tablodaki verilerden gerilmelerdeki düşüşün

ilk iki saatte oldukça fazla olduğu ($\Delta\sigma_2$), 2. saat ile 10. saatler arasındaki düşüşün ise oldukça az olduğu görülmektedir ($\Delta\sigma_3$). Deney numunesine ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi eğrilerinin, Şekil 121'de verilen eğrileriyle karşılaştırılmasından, 1. bölgenin ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numuneye ait eğrilere göre daha kısa sürede oluştuğu ve $\Delta\sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_2$ gerilme farkının azaldığı görülmektedir. Fakat bu durum $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme gevşemesi eğrisi için geçerli değildir. NR Kauçuğu $\lambda = 3.0$ 'de $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesi davranışından farklı bir davranış göstermektedir.

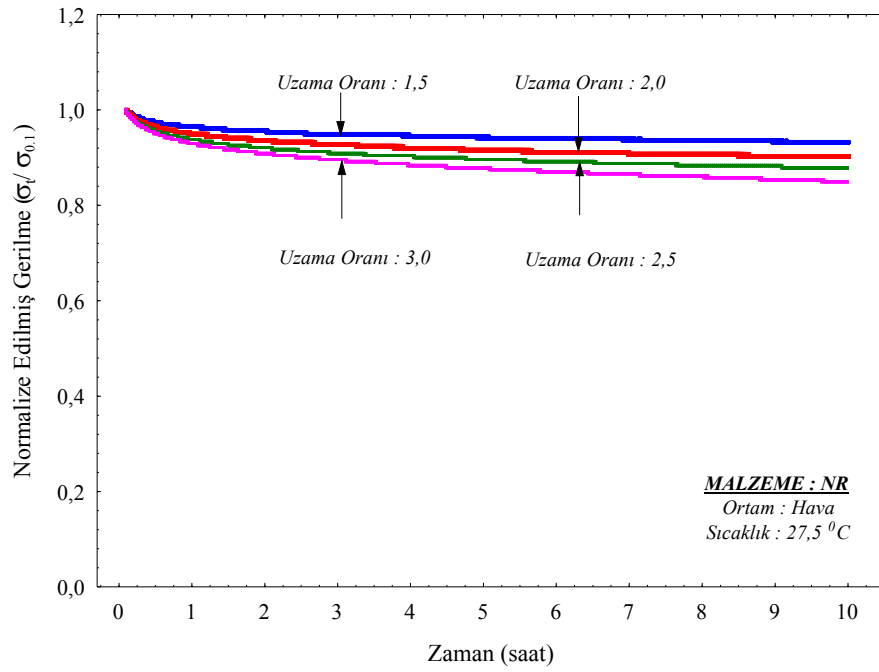
Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR kauçuk malzemesinin normalize edilmiş gerilme-zaman grafiği Şekil 125'de verilmiştir. Burada da, Şekil 122'deki verilerin aksine $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme-zaman eğrilerinin dar bir bantta içinde benzer davranış göstermesine karşın $\lambda = 3.0$ 'deki normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinin farklı bir davranış gösterdiği görülmektedir.

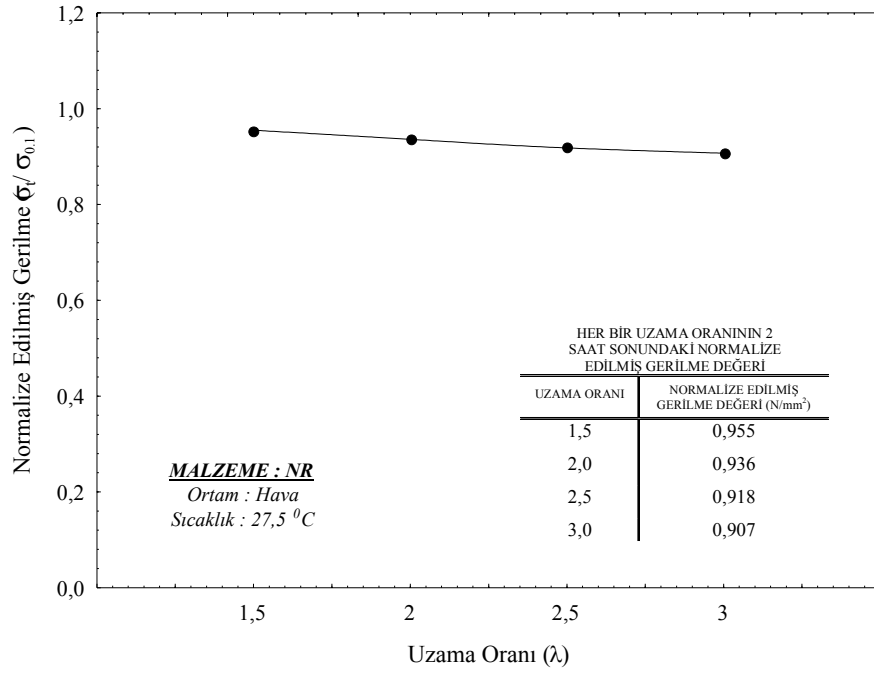


Şekil 121. NR kauçuk malzemesine ait $\lambda = 1.5$, 2.0, 2.5 ve 3.0'deki gerilme-zaman grafikleri

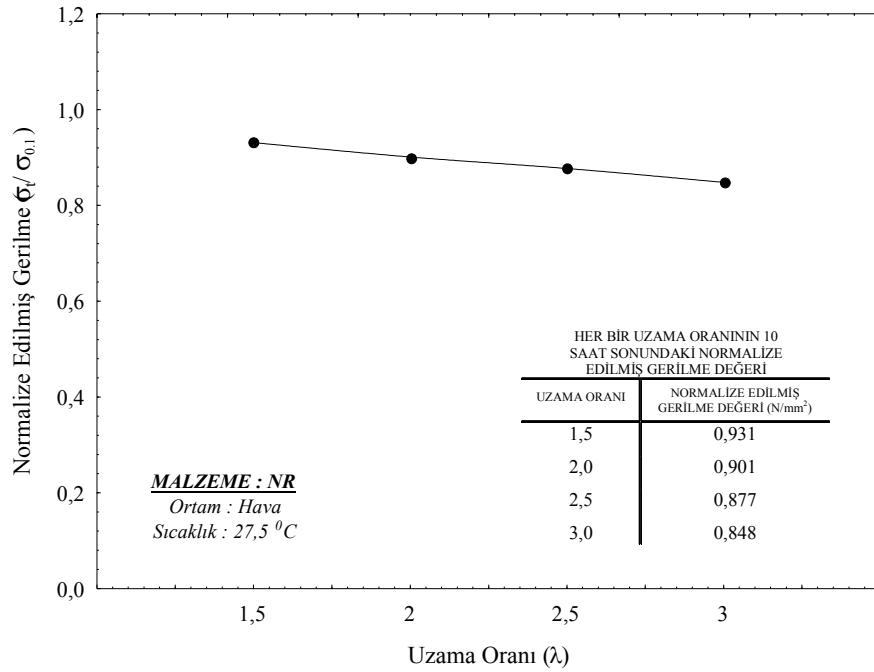
Tablo 33. NR kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t_2=t_{15}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t=t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	1.168	1.039	1.013	0.155	0.129	0.026	0.164
$\lambda = 2.0$	2.105	1.800	1.734	0.371	0.305	0.066	0.439
$\lambda = 2.5$	3.432	2.745	2.621	0.811	0.687	0.124	0.822
$\lambda = 3.0$	5.180	3.882	3.633	1.547	1.298	0.249	1.622

Şekil 122. NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

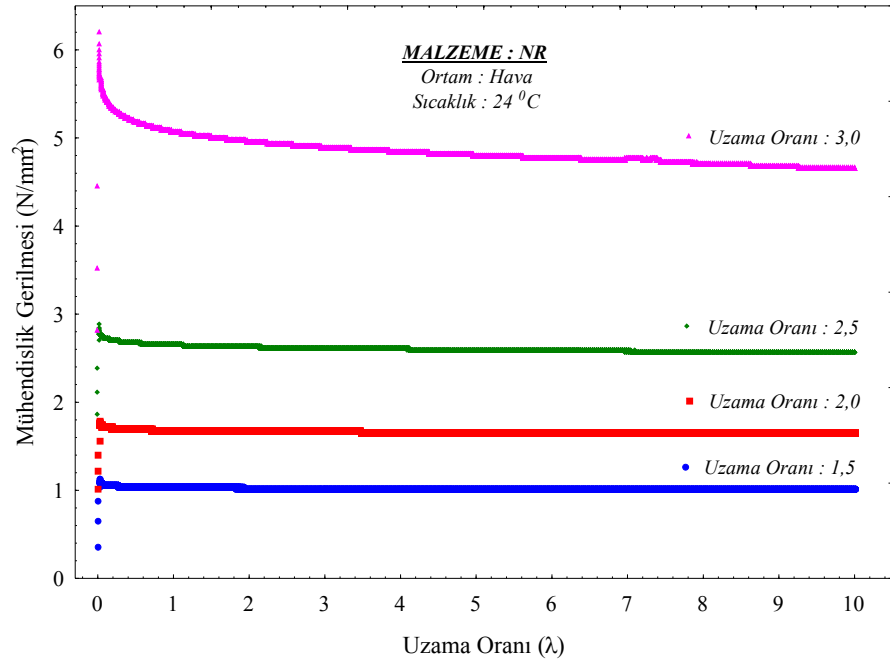


(a)



(b)

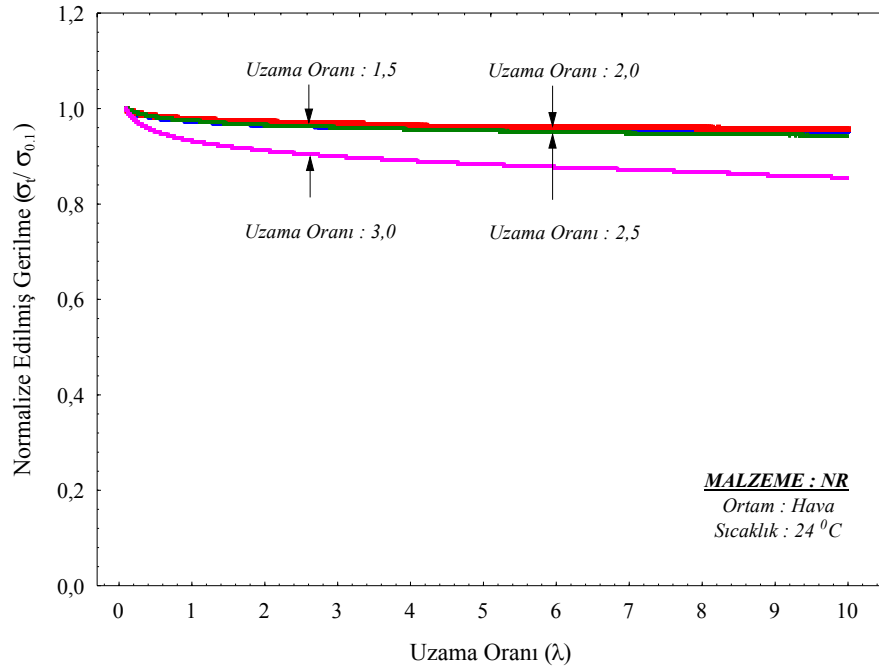
Şekil 123. Normalize edilmiş NR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi



Şekil 124. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri

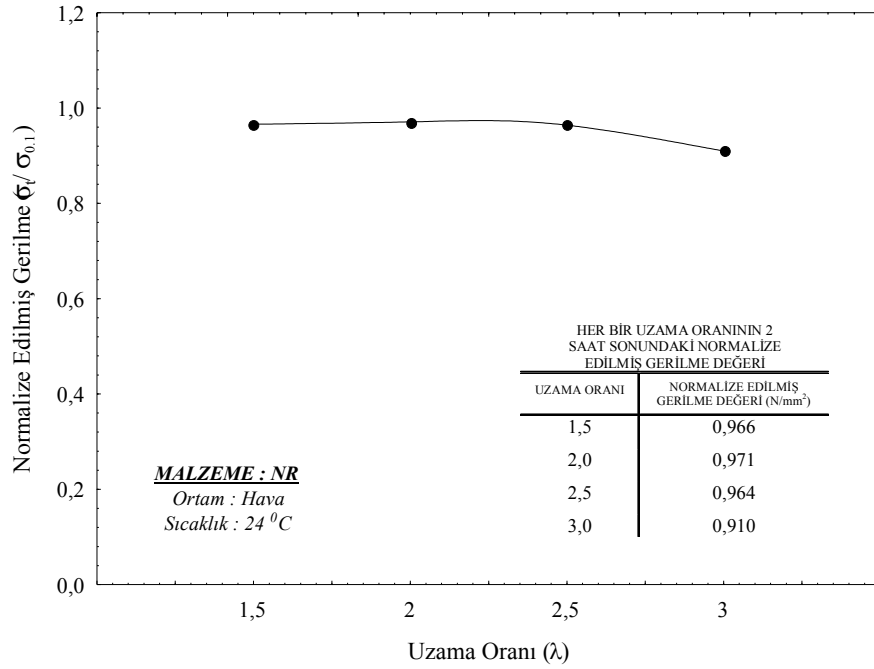
Tablo 34. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR sentetik kauçuğuna ait gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{t_1}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t_2=t_{1s}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{t=t_3}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_1$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_2$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_3$ (N/mm ²)	α
$\lambda = 1.5$	1.123	1.035	1.020	0.103	0.088	0.015	0.087
$\lambda = 2.0$	1.798	1.678	1.650	0.148	0.120	0.028	0.198
$\lambda = 2.5$	2.881	2.629	2.567	0.314	0.252	0.062	0.409
$\lambda = 3.0$	6.605	4.963	4.653	1.952	1.642	0.310	2.301

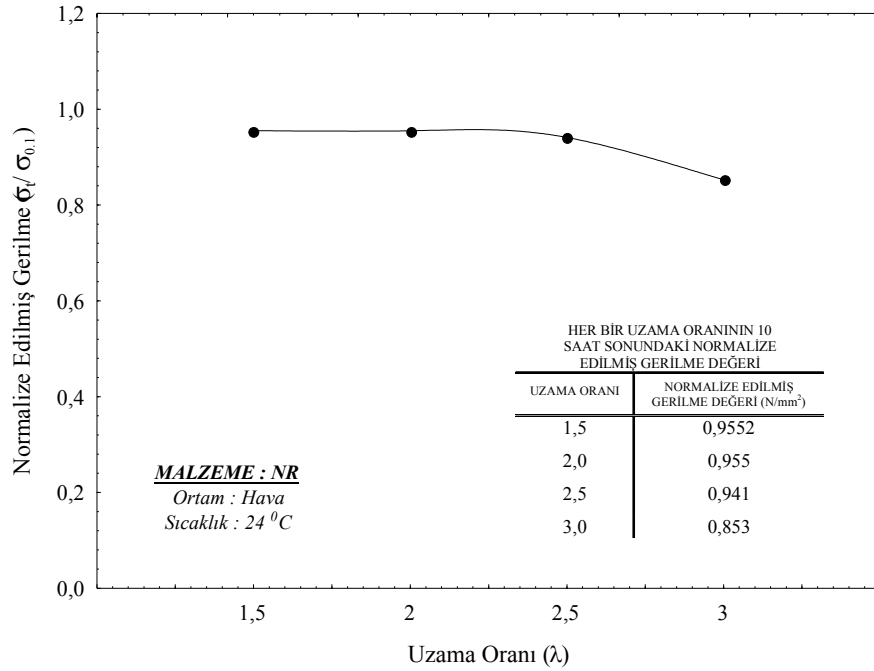


Şekil 125. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NR kauçuk malzemesinin $\lambda = 1.5$, 2.0 , 2.5 ve 3.0 'deki gerilme-zaman grafikleri

Şekil 126a-b'de ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR kauçuğunun deney başlangıcından 2 ve 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği üzere uzama oranı $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da normalize edilmiş gerilme gevşemesi uzama oranı ile değişim göstermemektedir. Fakat $\lambda = 3.0$ 'da gerilme gevşemesi uzama oranına bağlı olmaktadır. Dikkat edilirse ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda gerilme gevşemesi-uzama oranı ilişkisi ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numunelerden elde edilen ilişkidir (Şekil 123) farklıdır.



(a)



(b)

Şekil 126. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş NR kauçuğunun gerilme-zaman grafiğinde her bir uzama oranı için deney başlangıcından a) 2 saat sonraki, b) 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranıyla değişimi

3.3.4. SBR, NBR ve NR Kauçuk Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılmaları

Gerilme gevşemesi deneylerinden elde edilen bilgi, malzemenin kullanım ömrünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Kauçuk türü malzemelerin ömürleri belirlenirken [161] ilgili malzemenin gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen gerilme-zaman verileri normalize edilerek 0-1 gerilme skalasında çizilir. Gerilmenin normalize edilmiş değeri ($\sigma_t/\sigma_{0.1}$), deney sırasında okunan değer (σ_t), deneyin başlangıcındaki değere ($\sigma_{0.1}$) bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$\sigma_{\text{Normalize Edilmiş Gerilme}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{0.1}} \quad (15)$$

Burada normalize edilmiş gerilmenin 1 olması demek, deneyden okunan değer malzemenin gerilme gevşemesi deneyinin başlangıç değerine eşit olması demektir. Gerilmenin 0 olması demek ise, deneyden okunan değeri sıfır olur ki, malzeme artık tamamen özelliğini kaydetmiş demektir. Normalize edilmiş gerilmenin 100 ile çarpılıp 100 değerinden çıkarılması ile

$$\sigma_{\text{Normalize Edilmiş Gerilmedeki Azalma}} = 100 - \left(\sigma_{\text{Normalize Edilmiş Gerilme}} \right) * 100 \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{Normalize Edilmiş Gerilmedeki Azalma}} = 100 - \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{0.1}} \right) * 100 \quad (17)$$

normalize edilmiş gerilmede, yüzde olarak, azalma bulunur. Buradan, örneğin normalize edilmiş gerilme grafiğinde okunan 0.4 gerilme değeri gerilme gevşemesi deneyinin başlangıç değerinden %60 azalmanın olduğunu ifade etmektedir. Kauçuk malzemelerin kullanım yerleri düşünülerek müsaade edilebilecek maksimum gerilme azalması değeri belirlenerek malzemenin kullanım ömrü hesaplanabilir.

Deneysel gerçekleştirilen SBR, NBR ve NR kauçuklarının $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ uzama oranlarındaki kullanım ömürlerinin karşılaştırabilmek için normalize edilmiş ve ön deformasyon prosedürü uygulanmamış gerilme gevşemesi deneysel verilerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları, sırasıyla, Şekil 127 – Şekil 130'da, ön

deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme gevşemesi deneysel verilerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları ise, sırasıyla, Şekil 131 – Şekil 134’de sunulmuştur. Burada ilgili üç malzemenin kullanım ömürleri verilmeyecek sadece birbirleriyle karşılaştırılmaları yapılacaktır. Çünkü bir malzemenin kullanım ömrünün belirlenebilmesi için, yukarıda da belirtildiği gibi, kullanım yerindeki maksimum deformasyon miktarı ve müsaade edilebilecek maksimum gerilme azalması değeri verilmesi gerekmektedir.

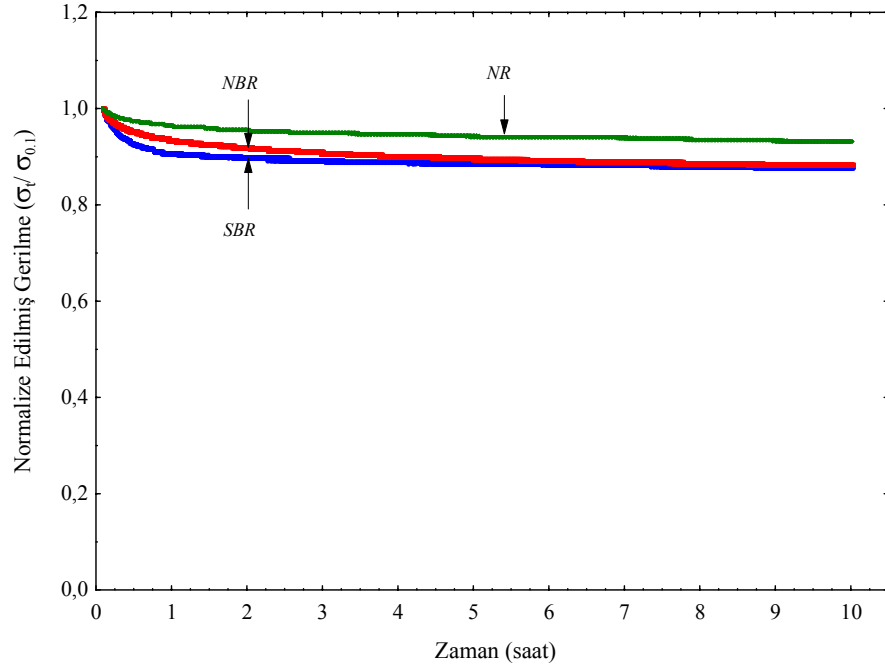
$\lambda = 1.5$ uzama oranında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve uygulanmış durumdaki SBR, NBR ve NR malzemelerinin gerilme gevşemesi davranışları, sırasıyla, Şekil 127 ve Şekil 131’de görülmektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmamış durumda NR en az gerilme gevşemesi gösterirken deney başlangıcından itibaren 0 – 10 saatleri arasında NBR malzemesi SBR malzemesine göre daha az gerilme gevşemesi davranışı göstermektedir. 10 saat’in üzerindeki durumda ise SBR malzemesinin NBR den daha az gerilme gevşemesi göstereceği görülmektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda ise tüm zamanlar boyunca en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla NR, SBR, ve NBR malzemeleri göstermektedir.

$\lambda = 2.0$ uzama oranında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve uygulanmış durumdaki SBR, NBR ve NR malzemelerinin gerilme gevşemesi davranışları, sırasıyla, Şekil 128 ve Şekil 132’de görülmektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmamış durumda en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NR ve NBR malzemeleri göstermektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda ise SBR ve NR malzemeleri aynı miktarda gerilme gevşemesi gösterirken NBR bu iki malzemedenden daha fazla gerilme gevşemesi göstermektedir.

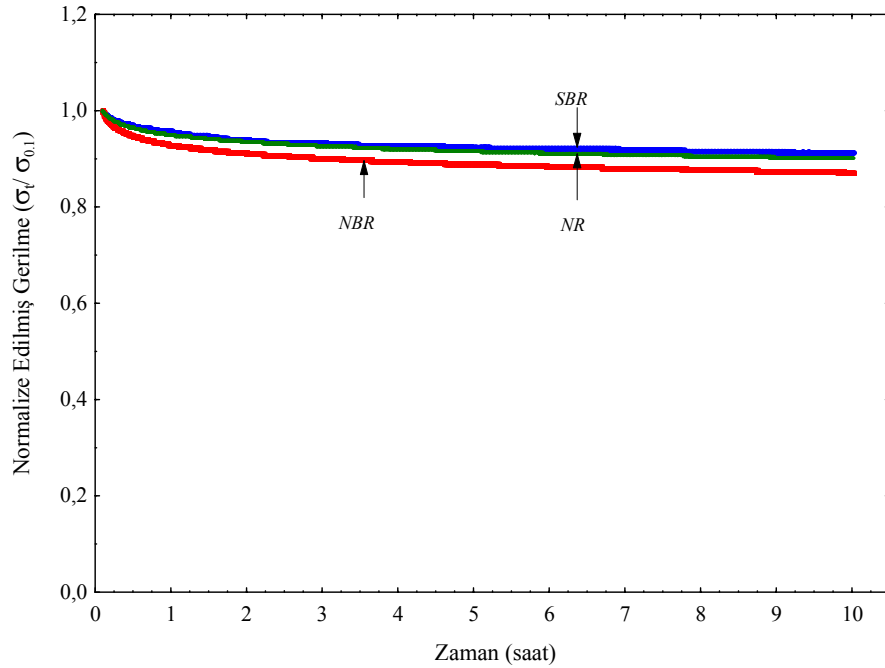
$\lambda = 2.5$ uzama oranında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve uygulanmış durumdaki SBR, NBR ve NR malzemelerinin gerilme gevşemesi davranışları, sırasıyla, Şekil 129 ve Şekil 133’de görülmektedir. Hem ön deformasyon prosedürü uygulanmamış hem de ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NR ve NBR malzemeleri göstermektedir.

$\lambda = 3.0$ uzama oranında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve uygulanmış durumdaki SBR, NBR ve NR malzemelerinin gerilme gevşemesi davranışları, sırasıyla, Şekil 130 ve Şekil 134’de görülmektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmamış durumda en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NBR ve NR malzemeleri göstermektedir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda ise malzemelerinin

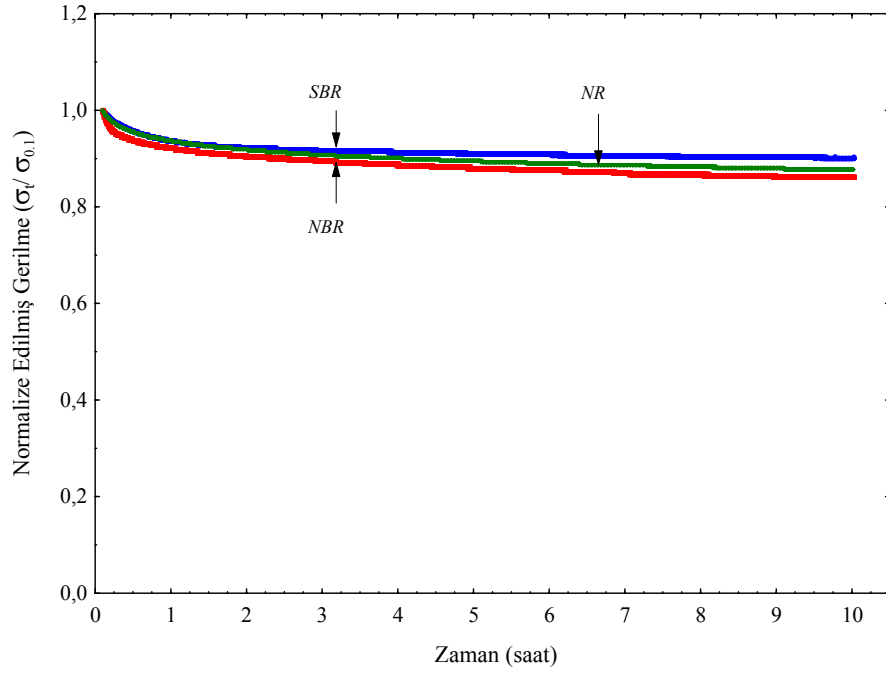
gerilme gevşemesi davranışı 10 saat sonunda düzenli hale gelmekte en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NR ve NBR malzemeleri göstermektedir.



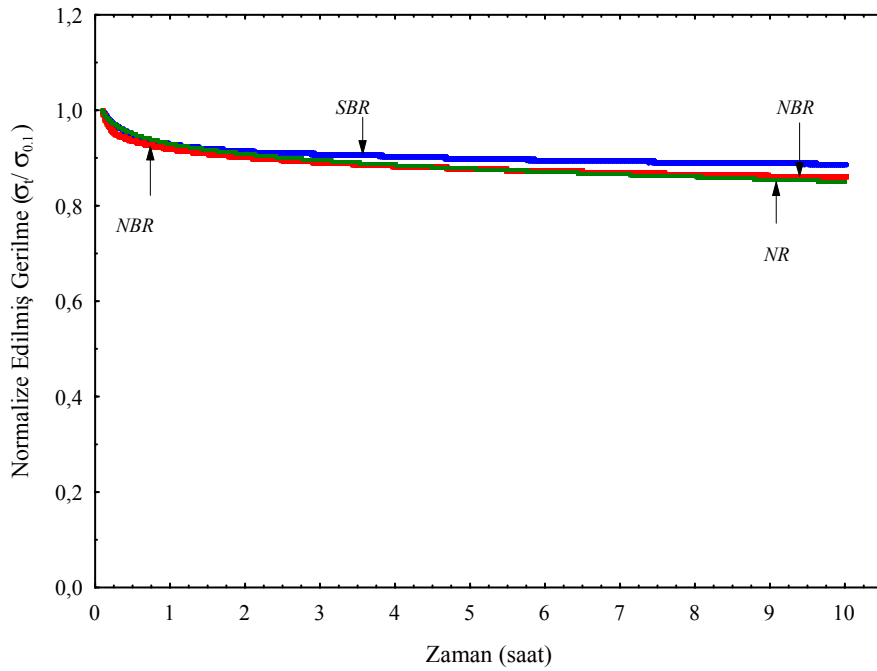
Şekil 127. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 1.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



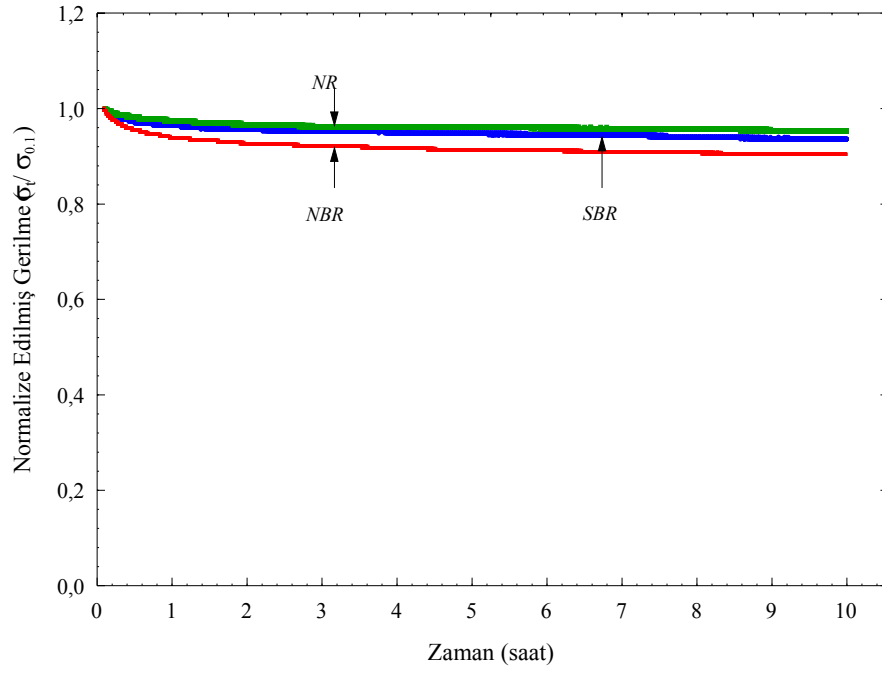
Şekil 128. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



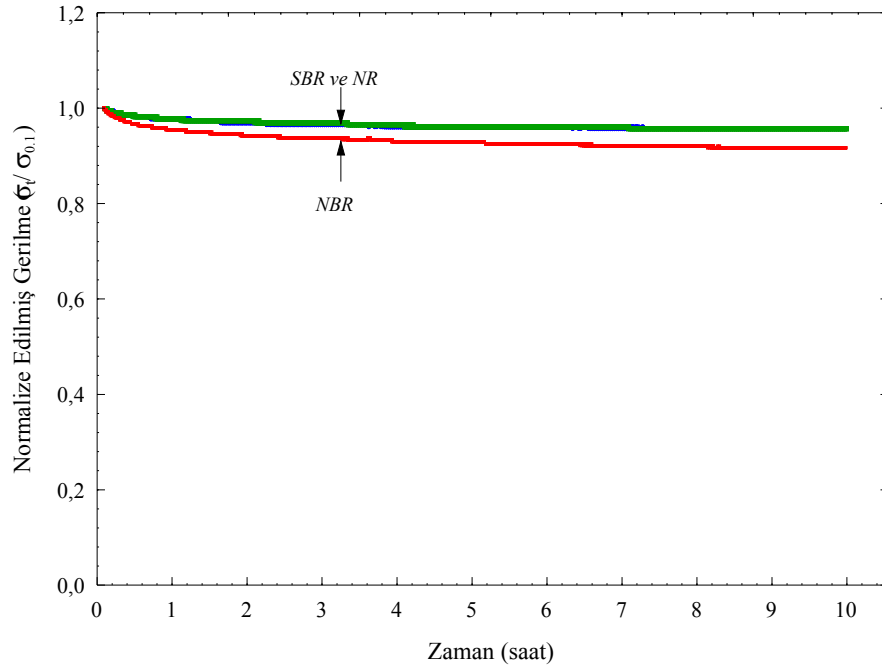
Şekil 129. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



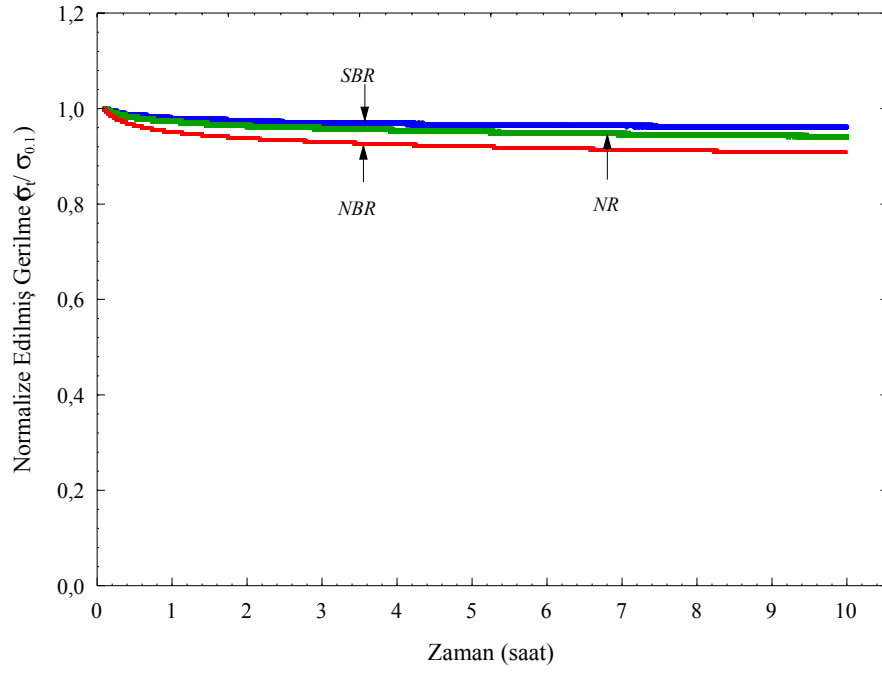
Şekil 130. SBR, NBR ve NR kauçuklarının $\lambda = 3.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



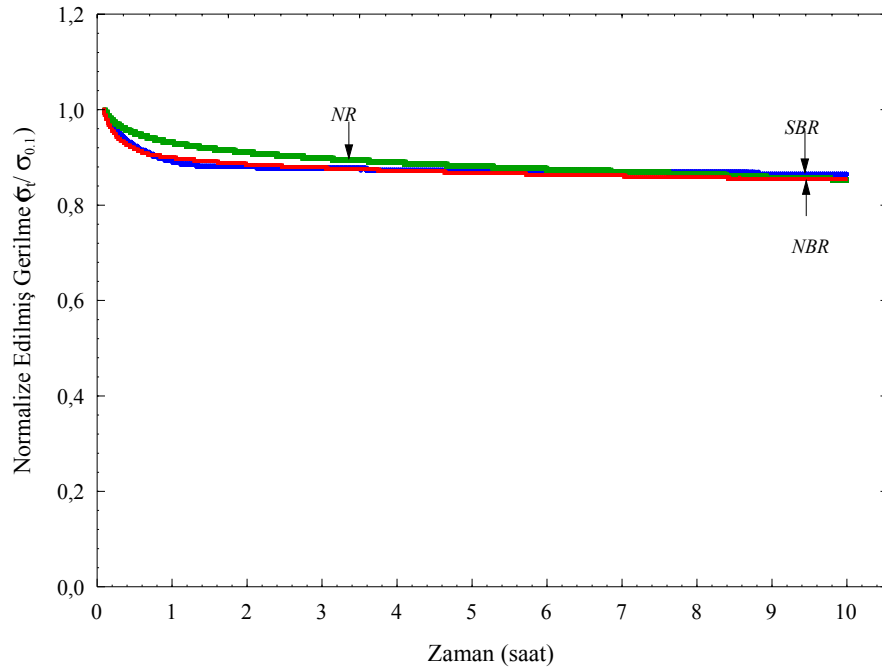
Şekil 131. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 1.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



Şekil 132. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



Şekil 133. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin $\lambda = 2.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması



Şekil 134. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR kauçuklarının $\lambda = 3.0$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman verilerinin karşılaştırılması

Tablo 35’de hem ön deformasyon prosedürü uygulanmış hem de uygulanmamış numunelerle gerçekleştirilen deneylerde SBR, NBR ve NR numunelerin 10. saat sonundaki normalize edilmiş gerilme değerleri verilmiştir. Tablodan, ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme değerlerinin, ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve normalize edilmiş değerlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum ise aynı malzemeler için, ön deformasyon prosedürü uygulanmış malzemelerin daha uzun ömürlüymüş gibi anlaşılmasına sebep olabilir. Fakat bu sonuç mantıken yanlıştır. Sonuçta malzemenin sadece tek kullanım ömrü vardır. Buradan da görüleceği üzere ön deformasyon prosedürü uygulamak malzemenin özelliklerini etkilemesi yanında malzemenin ömür değerini de etkilemektedir. Sonuçta, deneylerden önce ön deformasyon prosedürü uygulanmalı ve malzemenin ömürleri bu grafikten belirlenmelidir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmamış deneylerden elde edilecek ömürler malzemenin ömrünü daha kısa gösterecektir.

Tablo 35. Ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve uygulanmamış SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin 10. saat sonundaki normalize edilmiş gerilme değerlerinin karşılaştırılması

			$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2.0$	$\lambda = 2.5$	$\lambda = 3.0$
SBR	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmamış	$\sigma_{t=10}$	0.877	0.915	0.903	0.887
	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmış	$\sigma_{t=10}$	0.938	0.957	0.961	0.863
NBR	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmamış	$\sigma_{t=10}$	0.882	0.873	0.861	0.860
	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmış	$\sigma_{t=10}$	0.903	0.914	0.905	0.850
NR	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmamış	$\sigma_{t=10}$	0.931	0.901	0.877	0.848
	Ön Deformasyon Prosedürü Uygulanmış	$\sigma_{t=10}$	0.952	0.955	0.941	0.853

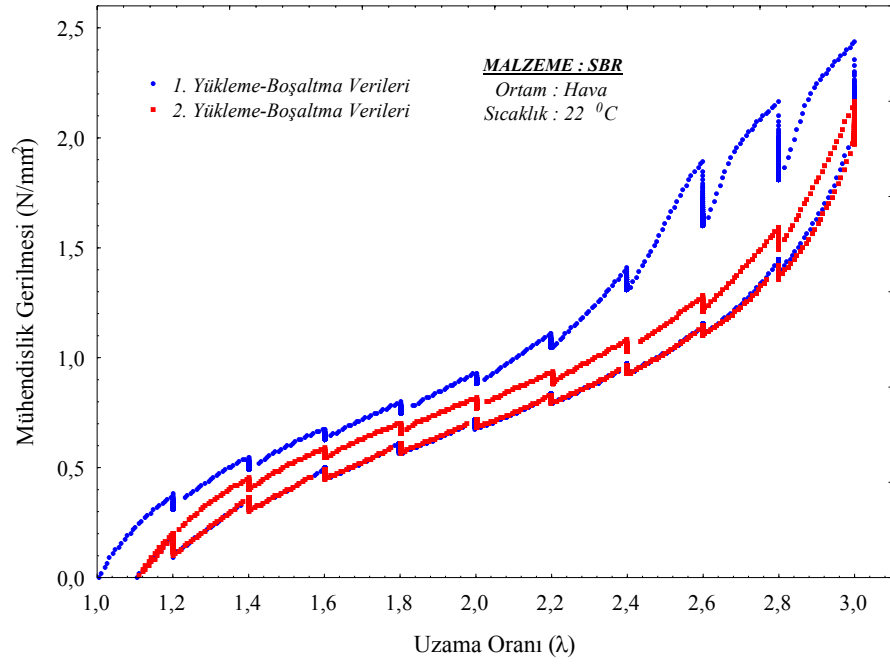
3.4. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Deneysel Veri Elde Edilmesi

Bir önceki bölümlerde tek tek her inelastik özellik incelenmiştir. Bu bölümde ise SBR, NBR ve NR kauçuk numunelere Şekil 41'deki deney prosedürü uygulanarak her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi belirlenmiş ve malzemelerin bu inelastik özelliklerden bağımsız ve denge halindeki gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir.

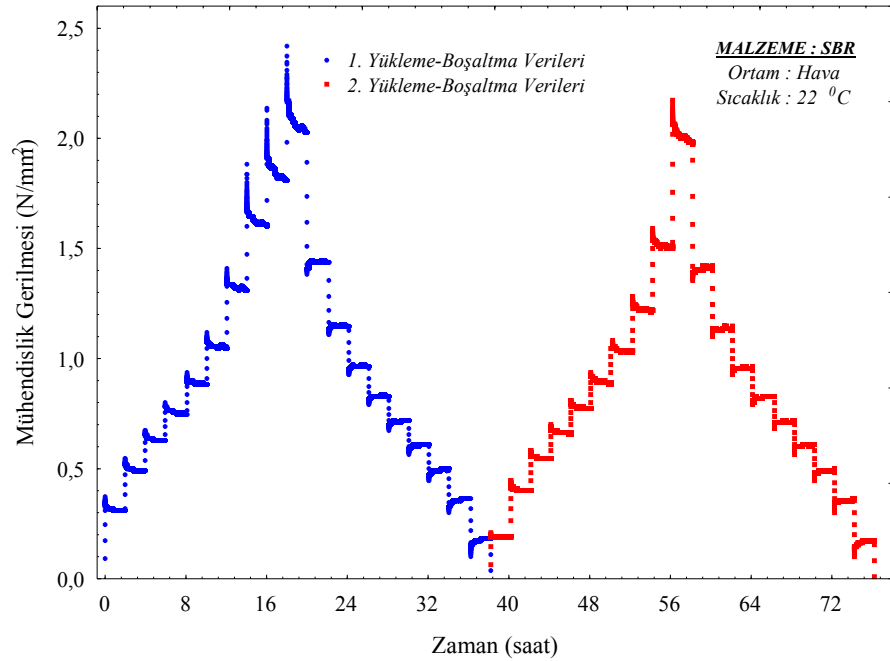
3.4.1. SBR Kauçuk Deneyleri

SBR kauçuğunun deformasyonu sırasında her bir inelastik özelliğin (Mullins etkileri, gerilme gevşemesi, kalıcı deformasyon, sünme, histerezis, şekil değiştirme hızının etkisi) gerilme-şekil değiştirme davranışına etkilerini belirleyebilmek için Şekil 41'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Malzemede Mullins etkilerini gidermek için uygulanan 15 tekrarlı yüklemeye sonra deney numunesi 2 saat yüksüz konumda bekletilmiş ve daha sonra 0.2 uzama oranı adımı ile $\lambda=3.0$ 'a kadar yükleme-boşaltma çevrimi yapılmıştır. Bu işlem iki defa tekrar edilerek deney tamamlanmıştır. Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanmasıyla elde edilen gerilme-uzama oranı grafiği Şekil 135'de, gerilmenin zamanla değişimi ise Şekil 136'da verilmiştir. II. gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki yükleme sırasında, her bir uzama oranında 2 saat boyunca bekleme sebebiyle gerilmenin zamanla değişimi Şekil 137'de, boşaltma sırasındaki gerilmedeki zamanla değişim ise Şekil 138'de verilmiştir. Şekil 137 ve Şekil 138'deki her bir uzama oranındaki gerilmelerin, 2 saat sonunda kararlı hale gelmiş değerleri alınarak, Tablo 36'da sunulmuştur. Tablo 36'daki gerilme-uzama oranı verileri ise Şekil 139'da grafik olarak sunulmuştur.

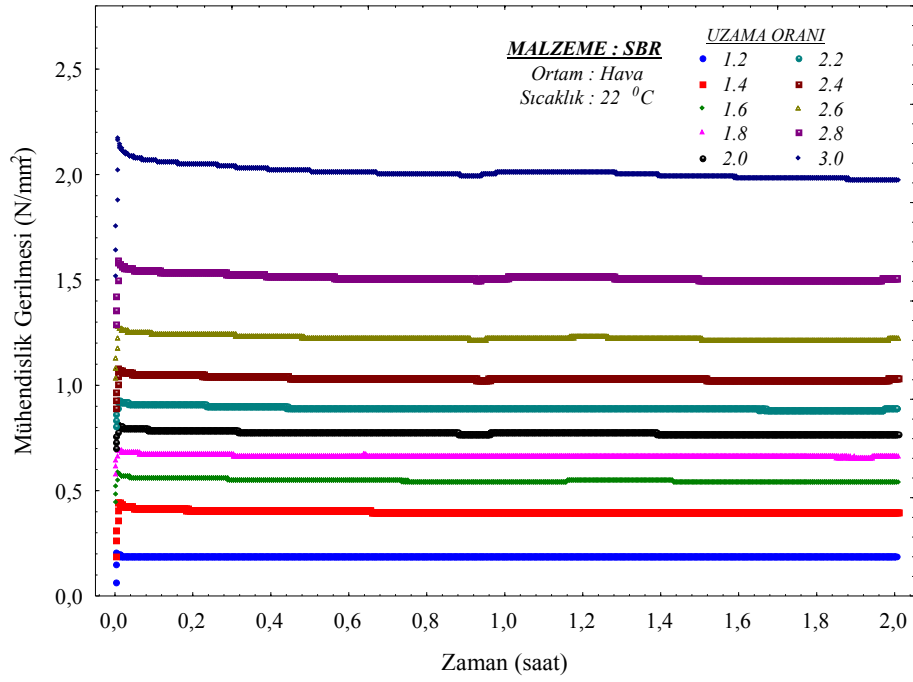
Şekil 41'de verilen deney prosedüründeki Mullins etkilerini giderici, 15 tekrarlı yüklemeye 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri ile II. gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 140'da beraber verilmiştir. Ayrıca II. gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki aynı uzama oranı için yükleme ve boşaltmadaki gerilmelerin ortalaması alınarak, bu gerilme değerleri ile uzama oranı verileri de Şekil 140'da verilmiştir.



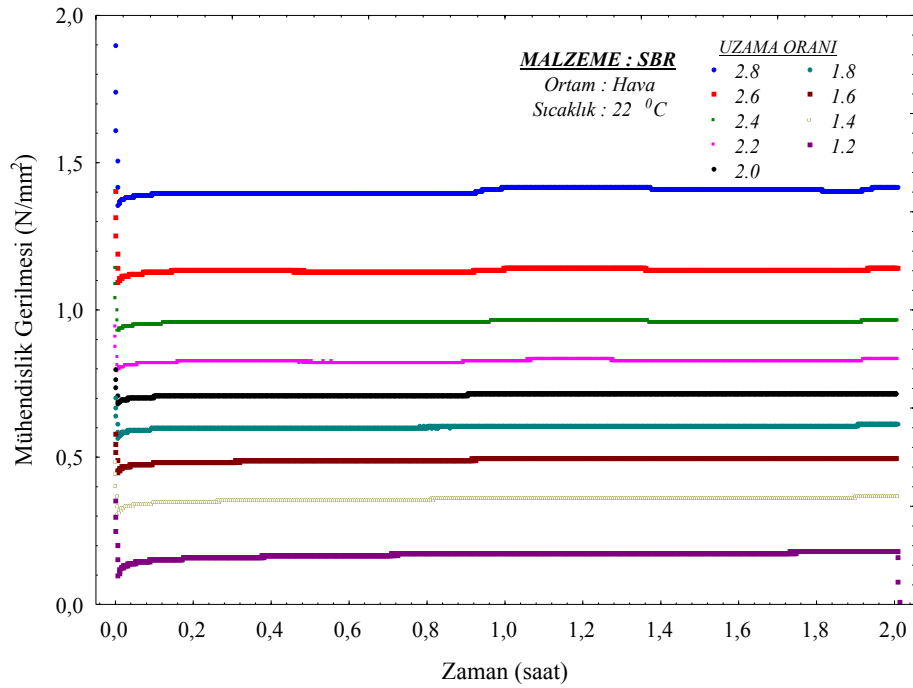
Şekil 135. SBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı grafiği



Şekil 136. SBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği



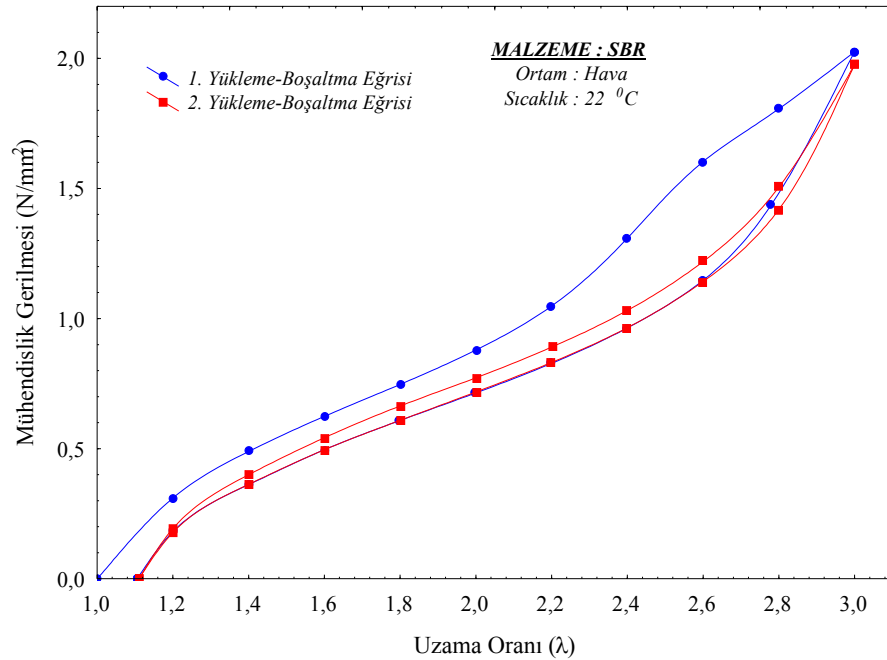
Şekil 137. SBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi



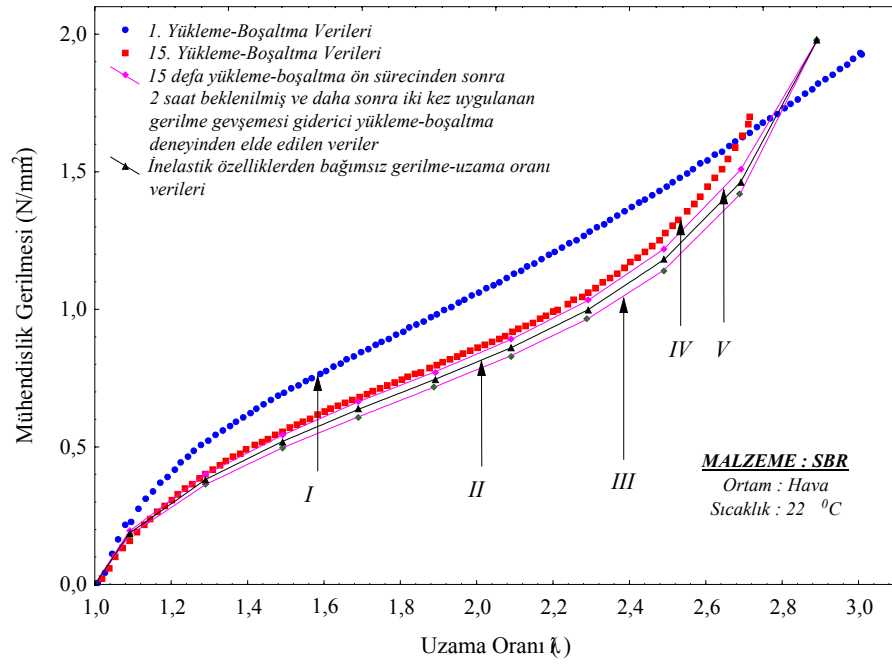
Şekil 138. SBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi

Tablo 36. SBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda her uzama oranında gerilmenin kararlı hale geldiği değerler

I.				II.			
Yükleme		Boşaltma		Yükleme		Boşaltma	
λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)
1.000	0.000	2.779	1.435	1.110	0.000	2.799	1.417
1.200	0.310	2.600	1.147	1.200	0.193	2.600	1.142
1.401	0.490	2.400	0.964	1.400	0.400	2.399	0.964
1.601	0.625	2.200	0.828	1.600	0.542	2.199	0.831
1.800	0.747	1.999	0.714	1.800	0.664	2.000	0.718
2.000	0.879	1.799	0.608	2.001	0.773	1.800	0.609
2.200	1.048	1.600	0.496	2.201	0.891	1.600	0.496
2.400	1.309	1.400	0.362	2.401	1.032	1.400	0.363
2.600	1.603	1.200	0.181	2.601	1.220	1.200	0.178
2.801	1.807	1.105	0.000	2.801	1.507	1.110	0.000
3.000	2.025			3.001	1.977		



Şekil 139. SBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi



Şekil 140. SBR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı verileri

3.4.2. NBR Kauçuk Deneyleri

NBR kauçuğunun deformasyonu sırasında her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisini belirleyebilmek için Şekil 41'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Malzemede Mullins etkilerini gidermek için uygulanan 15 tekrarlı yüklemekten sonra 2 saat yüksüz konumda bekletilmiş ve daha sonra 0.2 uzama oranı adımı ile $\lambda=3.0$ 'a kadar yüklem-boşaltma çevrimi yapılmıştır. Bu işlem iki defa tekrar edilerek deney tamamlanmıştır. Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanmasıyla elde edilen gerilme-uzama oranı grafiği Şekil 141'de, gerilmenin zamanla değişimi ise Şekil 142'de verilmiştir. II. gerilme gevşemesi giderici yüklem-boşaltma çevrimindeki yüklem sırasında, her bir uzama oranında 2 saat boyunca bekleme sebebiyle gerilmenin zamanla değişimi Şekil 143'de, boşaltma sırasındaki gerilmedeki zamanla değişim ise Şekil 144'de verilmiştir. Şekil 143 ve Şekil 144'deki her bir uzama oranındaki gerilmelerin 2 saat sonundaki kararlı hale gelmiş değerleri Tablo 37'de ve Şekil 145'de sunulmuştur.

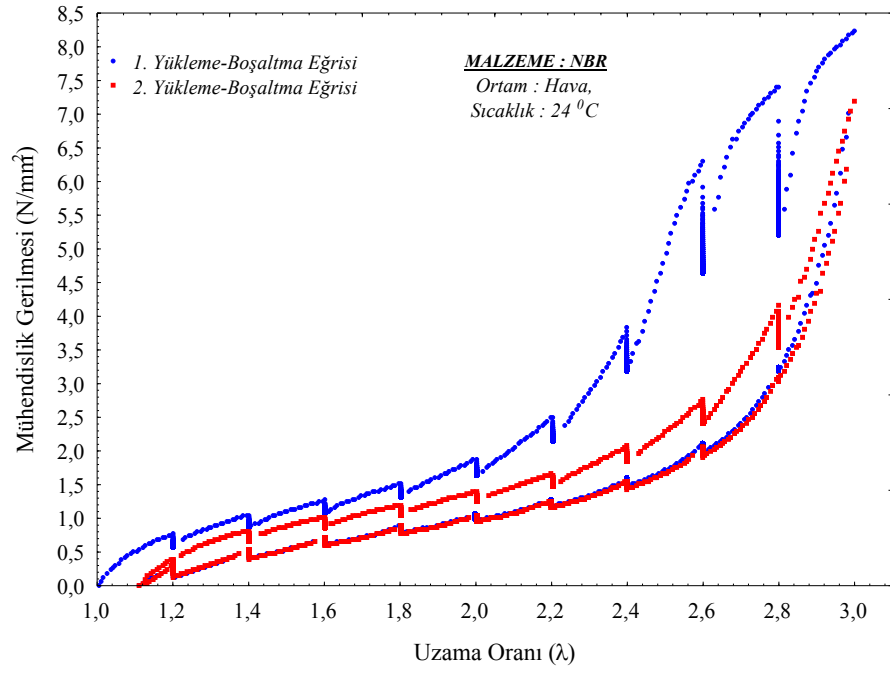
Şekil 41'de verilen deney prosedüründeki Mullins etkilerini giderici, 15 tekrarlı yüklemde 1. ve 15. yüklem-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri ile II.

gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 146'da birlikte verilmiştir. Ayrıca II. gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki aynı uzama oranı için yükleme ve boşaltmadaki gerilmelerin ortalaması alınarak, ortalaması alınmış gerilme ile uzama oranı verileri de Şekil 146'da sunulmuştur.

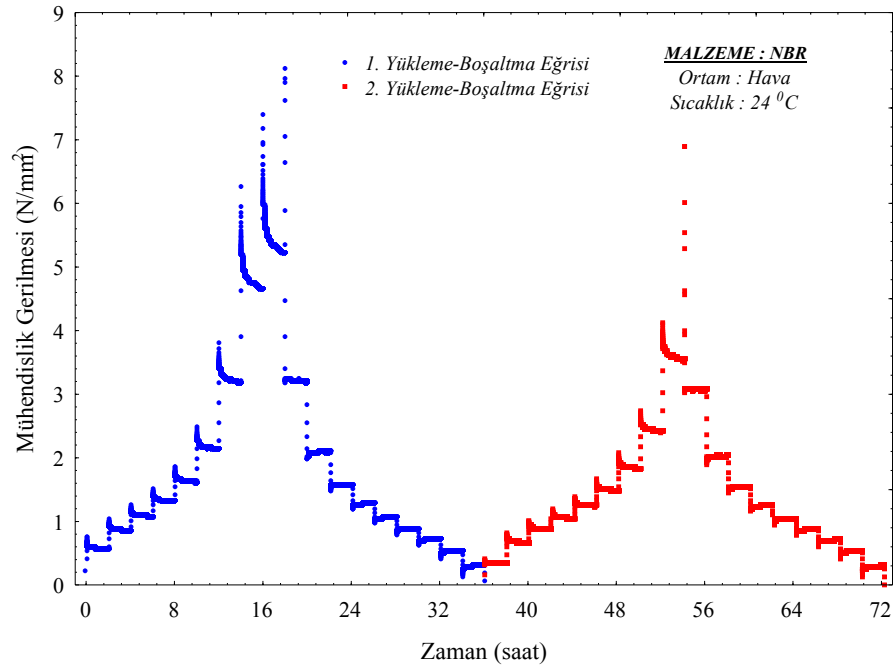
3.4.3. NR Kauçuk Deneyleri

SBR ve NBR kauçuk numunelerle yapıldığı gibi NR kauçuğunun deformasyonu sırasında her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisini incelemek için Şekil 41'de verilen deney prosedürü bu malzemeden deney numunesine de uygulanmıştır. Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanmasıyla elde edilen gerilme-uzama oranı ilişkisi Şekil 147'de, gerilmenin zamanla değişimi ise Şekil 148'de verilmiştir. II. gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki yükleme sırasında, her bir uzama oranında 2 saat boyunca bekleme sebebiyle gerilmenin zamanla değişimi Şekil 149'da, boşaltma sırasındaki gerilmedeki zamanla değişim ise Şekil 17'de verilmiştir. Şekil 149 ve Şekil 150'deki her bir uzama oranındaki gerilmelerin 2 saat sonundaki kararlı hale gelmiş değerleri alınarak Tablo 38 oluşturulmuştur. Tablo 38'deki gerilme-uzama oranı verileri Şekil 151'de, ayrıca, grafik formda sunulmuştur.

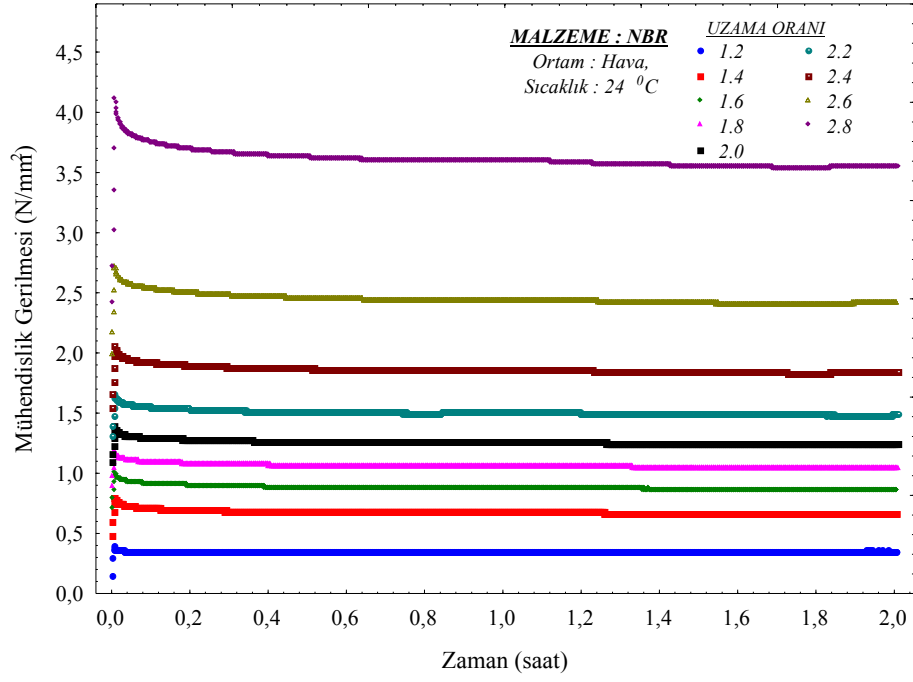
Şekil 41'de verilen deney prosedüründeki Mullins etkilerini giderici, 15 tekrarlı yüklemde 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri ile II. gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 152'de birlikte sunulmuştur. Ayrıca II. gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki aynı uzama oranı için yükleme ve boşaltmadaki gerilmelerin ortalaması alınarak, bu gerilme değerlerinin uzama oranı ilişkisi Şekil 152'de verilmiştir.



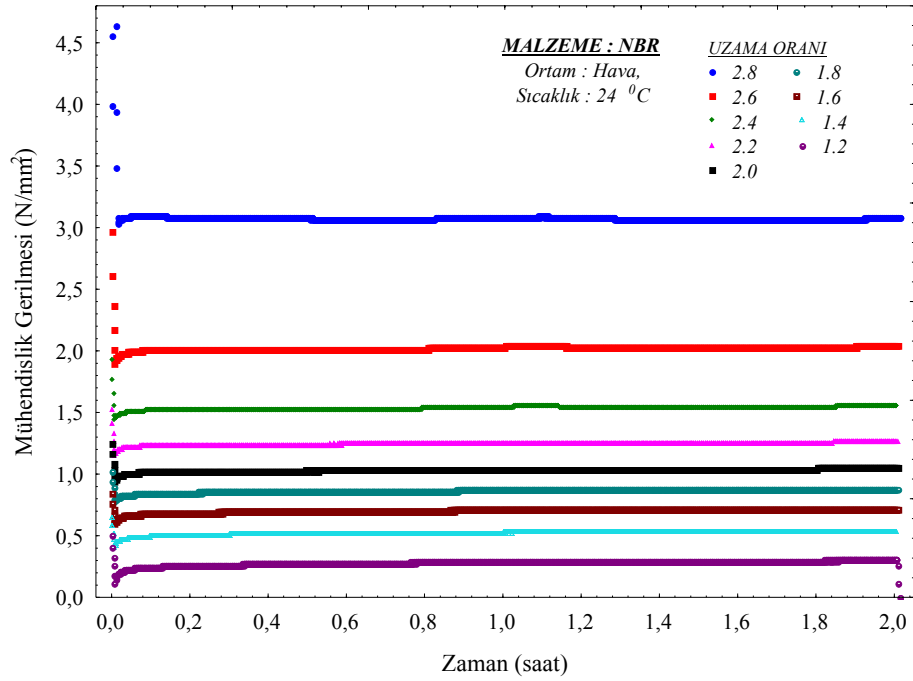
Şekil 141. NBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı grafiği



Şekil 142. NBR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği



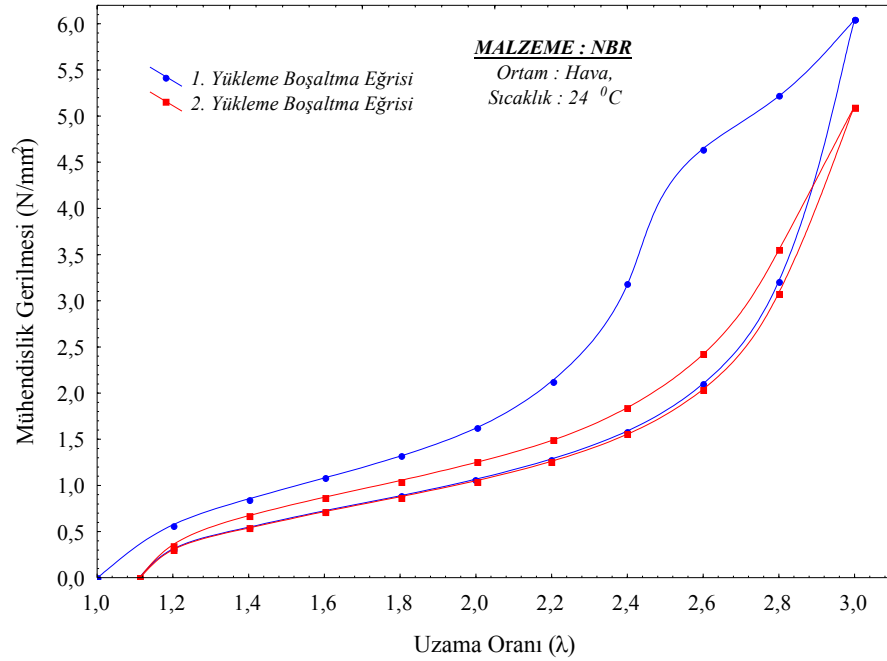
Şekil 143. NBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi



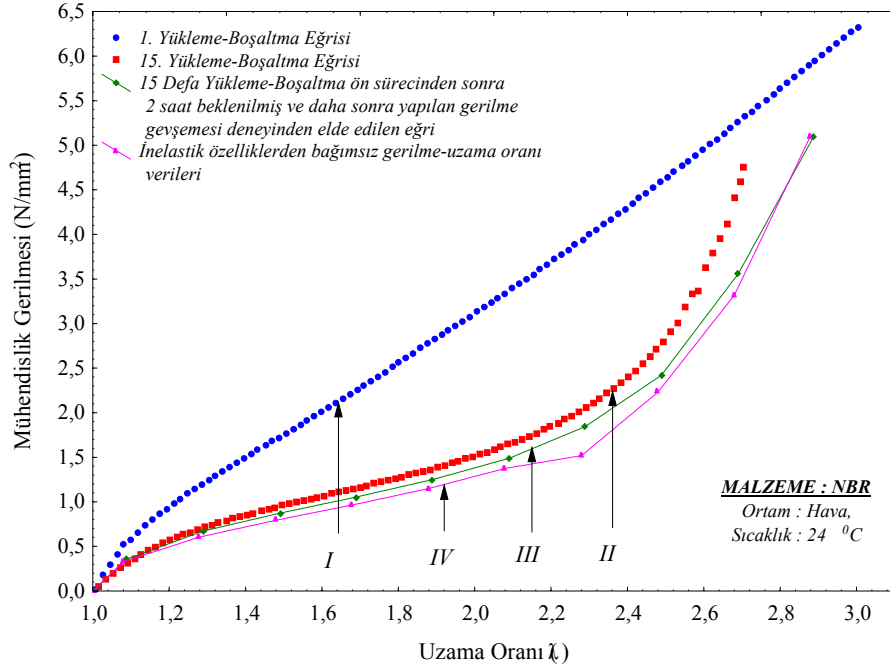
Şekil 144. NBR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında her bir uzama oranındaki gerilme-zaman ilişkisi

Tablo 37. NBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değerler

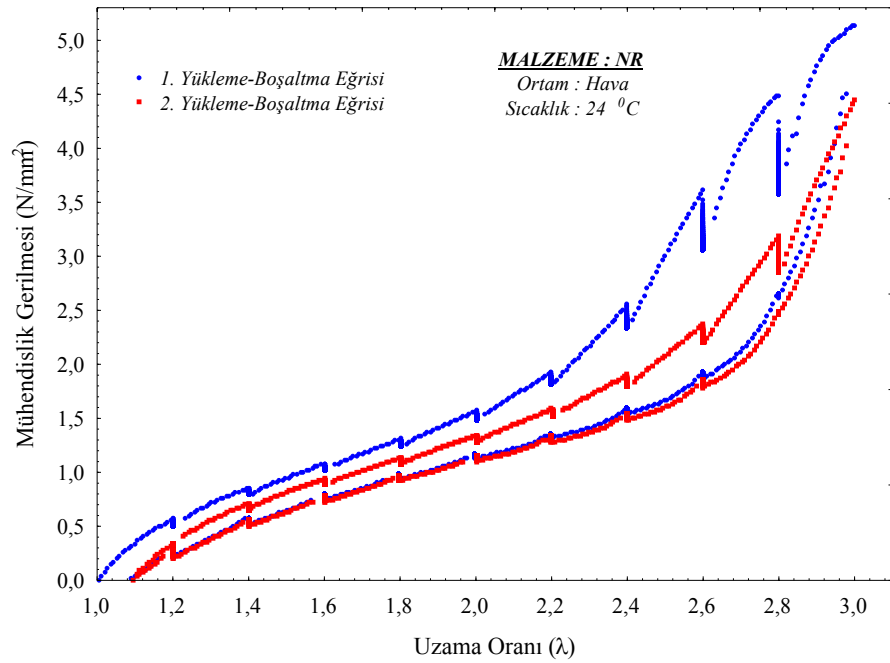
I.				II.			
Yükleme		Boşaltma		Yükleme		Boşaltma	
λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)
1.000	0.000	2.799	3.205	1.111	0.000	2.799	3.079
1.200	0.573	2.600	2.102	1.200	0.357	2.600	2.042
1.401	0.855	2.400	1.590	1.400	0.672	2.400	1.555
1.600	1.081	2.200	1.287	1.601	0.873	2.200	1.262
1.801	1.318	1.999	1.067	1.800	1.053	2.000	1.051
2.000	1.621	1.800	0.888	2.000	1.249	1.800	0.878
2,201	2.132	1.600	0.726	2.201	1.488	1.599	0.715
2.401	3.185	1.399	0.547	2.400	1.843	1.400	0.539
2.601	4.651	1.200	0.312	2.600	2.421	1.200	0.303
2.801	5.219	1110	0.000	2.801	3.557	1.113	0.000
3.000	6.041			2.999	5.100		



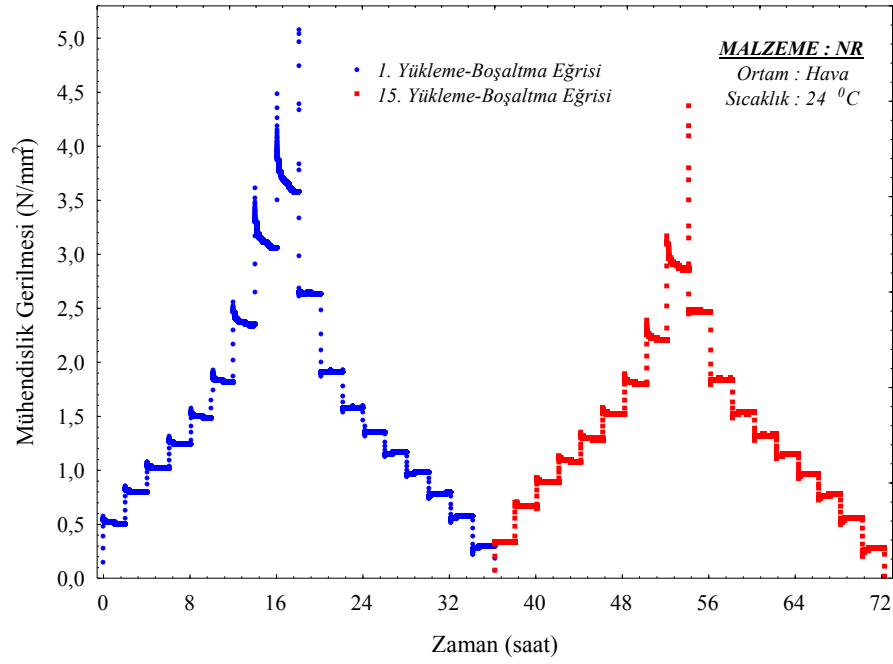
Şekil 145. NBR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi



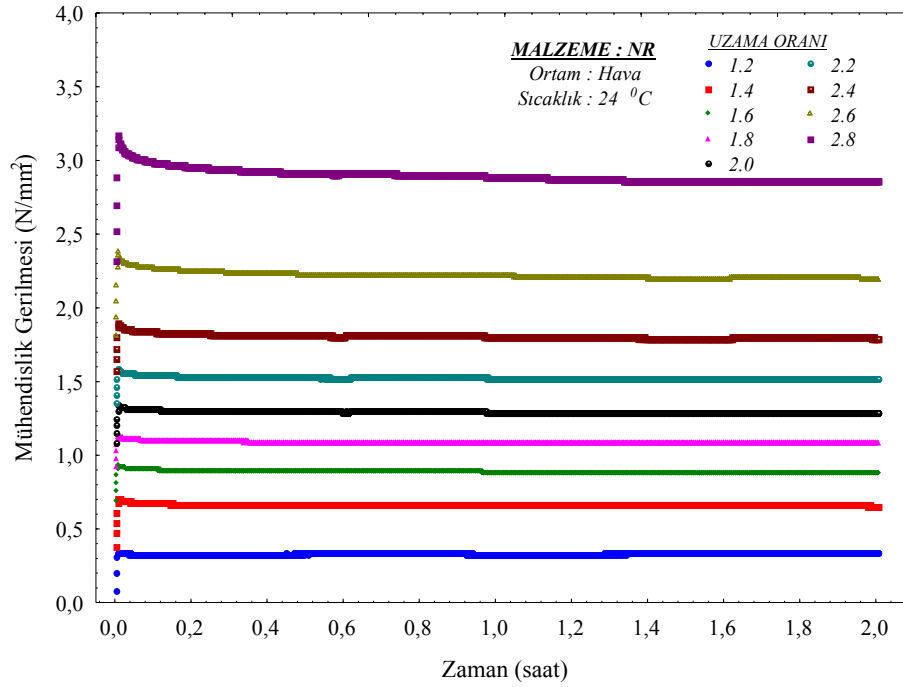
Şekil 146. NBR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı ilişkisi



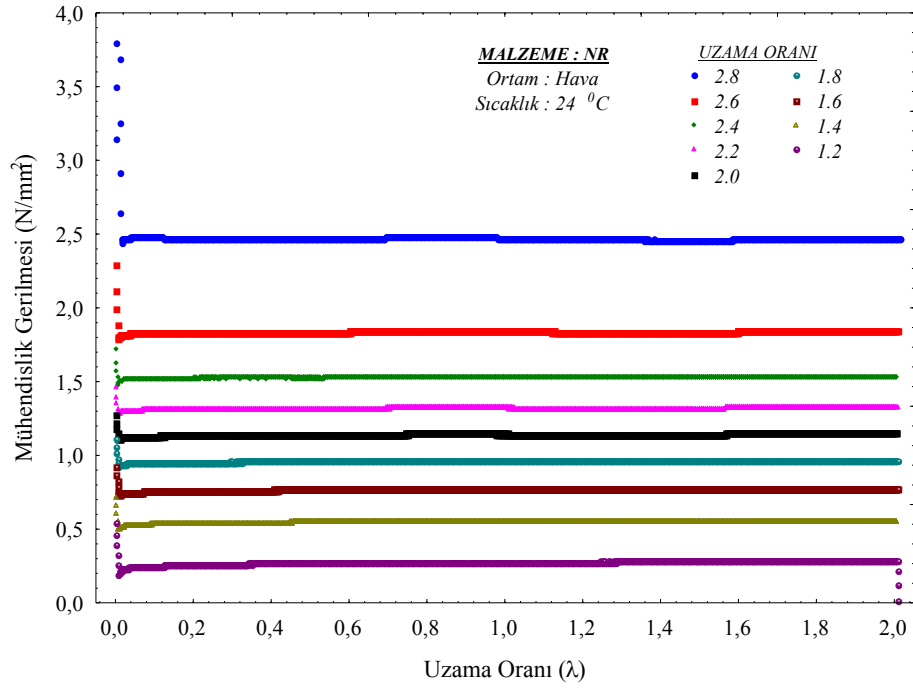
Şekil 147. NR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-uzama oranı ilişkisi



Şekil 148. NR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyine ait gerilme-zaman grafiği



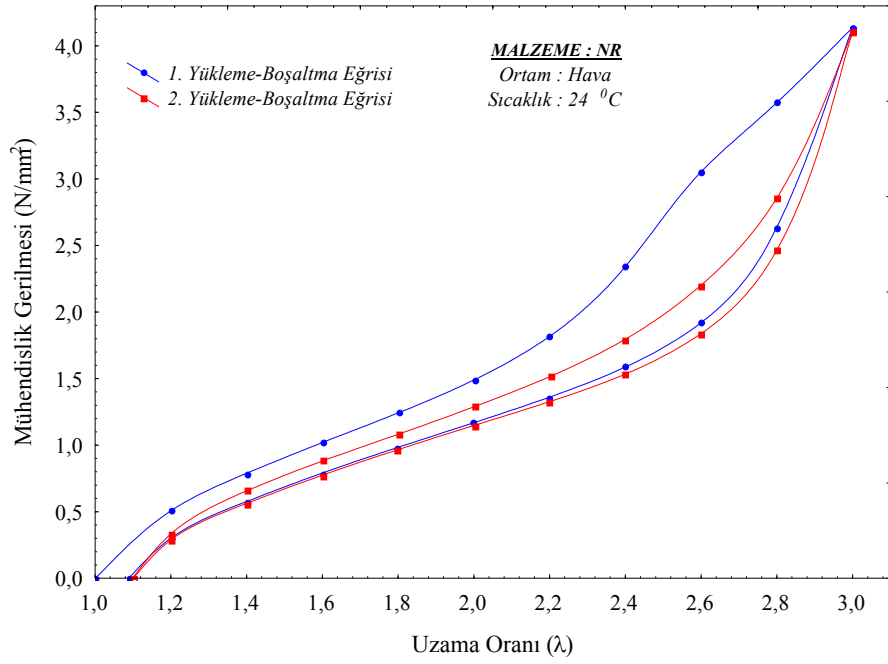
Şekil 149. NR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde yükleme sırasında gerilme-zaman ilişkisi



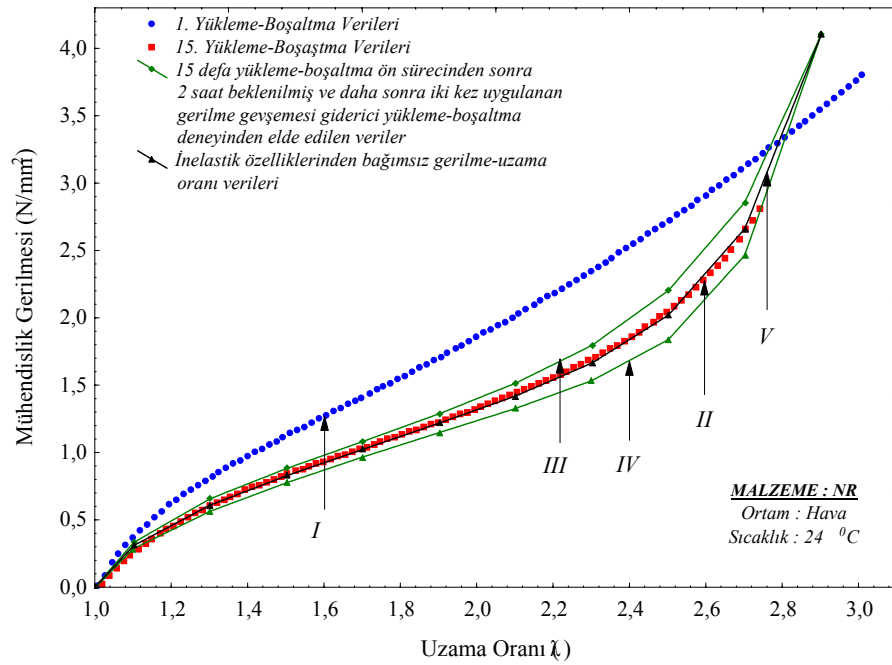
Şekil 150. NR kauçuk malzemesinin II. yükleme-boşaltma çevriminde boşaltma sırasında gerilme-zaman ilişkisi

Tablo 38. NR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değerler

I.				II.			
Yükleme		Boşaltma		Yükleme		Boşaltma	
λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)
1.000	0.000	2.800	2.638	1.098	0.000	2.800	2.465
1.200	0.507	2.600	1.920	1.200	0.333	2.600	1.838
1.401	0.790	2.400	1.587	1.400	0.657	2.399	1.533
1.601	1.021	2.199	1.360	1.601	0.882	2.199	1.326
1.800	1.242	1.999	1.168	1.800	1.082	2.000	1.148
2.001	1.491	1.799	0.983	2.000	1.288	1.799	0.966
2.200	1.817	1.599	0.790	2.201	1.516	1.600	0.775
2.401	2.345	1.400	0.577	2.400	1.796	1.399	0.562
2.600	3.053	1.199	0.299	2.600	2.202	1.199	0.286
2.800	3.573	1.088	0.000	2.800	2.857	1.100	0.000
3.000	4.137			3.000	4.101		



Şekil 151. NR kauçuk malzemesinin I. ve II. yükleme-boşaltma çevrimleri sonunda gerilmenin kararlı hale geldiği değer ile uzama oranı ilişkisi



Şekil 152. NR kauçuk malzemesine Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen gerilme-uzama oranı ilişkisi

4. İRDELEME

4.1. Şekil Değiştirme Hızı Deneyleri

SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin farklı şekil değiştirme hızlarında ($\dot{\epsilon} = 10\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 40\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 80\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 120\text{mm/dak.}$, $\dot{\epsilon} = 200\text{mm/dak.}$ ve $\dot{\epsilon} = 300\text{mm/dak.}$) hem ön deformasyon prosedürü uygulanmamış hem de uygulanmış deney numuneleri kullanılarak elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 43 - Şekil 58 ve Tablo 10 – Tablo 16’da, sunulmuştur.

SBR kauçuğunun Şekil 33’deki deney prosedürü için farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verilerine ait grafikler Şekil 43’de sunulmuştur. Şekil 43g’den görüleceği üzere artan şekil değiştirme hızlarında malzemenin, sabit uzama oranı altında, gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum, özellikle, yükleme eğrileri boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrilerinde ise, yükleme eğrilerine göre daha az belirgin bir davranış farklılığı söz konusudur. Şekil 43g’deki grafiklere ait sabit uzama oranlarındaki (yükleme sırasındaki uzama oranları 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 ile boşaltma sırasındaki uzama oranlarındaki 2.5, 2.0 ve 1.5) gerilme değerleri Tablo 10’da sunulmuştur. Grafiklerden de görüleceği üzere en düşük gerilme değeri, beklenildiği üzere, 10 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleşmiştir. Şekil değiştirme hızı azaldıkça amorf yapıdaki molekül dizilişi, deformasyon sebebiyle, daha kararlı ve düzenli bir şekilde geçmekte ve dolayısıyla da okunan gerilme değerleri malzemenin yapısını daha iyi yansıtmaktadır. Yüksek hızlarda ise artan şekil değiştirme hızlarında kauçuk molekülleri kararlı ve düzenli bir şekil alamadan deney tamamlanmakta ve sebeple de yüksek hızlarda, sabit uzama oranında, gerilmeler yüksek çıkmaktadır. SBR kauçuğuna ait Tablo 10’daki veriler incelendiğinde, farklı şekil değiştirme hızlarındaki yükleme eğrilerinde 120 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerilmelerin maksimum olduğu görülmektedir (Şekil 44). Yani hem 200 mm/dak. hem de 300 mm/dak. hızlarından daha yüksek gerilme elde edilmiştir. Esasen 120 mm/dak. için beklenen davranış 80 ve 200 mm/dak arasında bir eğrinin elde edilmesiydi. Fakat yük boşaltma eğrileri sırasında ise maksimum gerilmeler 300 mm/dak. şekil değiştirme hızında meydana gelmektedir (Şekil 44).

Çalışmada şekil değiştirme hızıyla ilgili bir diğer araştırma ise, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmasının şekil değiştirme hızına ne tür etkiler yaptığının belirlenmesidir. Yukarıda da ifade edildiği üzere, şekil değiştirme ne kadar düşük hızda gerçekleştirilirse malzemenin mekanik davranışı o kadar doğru olarak elde edilmektedir. Fakat düşük hızlarda şekil değiştirme deneylerinin gerçekleştirilmesine karşılık deneylerin tamamlanma süresi artmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak Şekil 34'deki ön deformasyon prosedürü, 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilmesi durumunda, bu işlemin tamamlanma süreleri Tablo 11'de verilmiştir. Tablodan, 10 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen ön deformasyon prosedürünün 7 saat gibi uzun bir sürede, 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleştirilen ön deformasyon prosedürünün ortalama 1.5 ile 2 saat arasında bir sürede tamamlandığı görülmektedir. Eğer deneyler 80 mm/dak. hızda gerçekleştirilirse deneyler 1 saatten az sürede tamamlanmakta ve bu süre giderek azalmaktadır. Buradan sorulması gereken “Malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmeden deneylerin gerçekleştirilebileceği en yüksek şekil değiştirme hızının ne olduğu” sorusudur. Bu sebeple malzemeye uygulanacak olan ön deformasyon prosedürü hem kısa sürede tamamlanmalı hem de malzemenin özelliklerini etkilememelidir. SBR kauçuk malzemesi için Şekil 34'de verilen deney prosedürü 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilmiştir. SBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri toplu olarak Şekil 43g'de ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 45'de verilmiştir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin, 1. yükleme-boşaltma sonundaki değerlerle karşılaştırıldığında, belirli değerlere yakınsadığı görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma verilerinin 10, 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızları için elde edilen sonuçların beraber aynı grafiklerde gösterilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 46). Şekilde görüldüğü üzere 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verileri neredeyse üst üste düşmektedir. Bu sonuçlar ayrıca Şekil 45'deki grafik verilerinden elde edilen Tablo 12'de gerilme değerleri için de ifade edilmiştir. Tablodaki gerilme değerleri de kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 47'de verilmiştir. Şekil 47'den tüm uzama oranlarında gerilmelerin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Hem Şekil 46 hem de Şekil 47'den, 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızlarının gerilme-uzama oranı verileri 10 mm/dak şekil değiştirme hızı verileri ile $\lambda \leq 1.6$

ve $\lambda \geq 2.6$ bölgesinde tamamen üst üste düşerken $1.6 \leq \lambda \leq 2.6$ deformasyon aralığında çok az bir sapmanın oldu gözlemlenmektedir. Bu durum 120 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızları için geçerli değildir. 40, 80 ve 200 mm/dak. şekil değiştirme hızlarından 200 mm/dak. değeri ile ön deformasyon prosedürünün uygulanması daha kısa süreceğinden SBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü 200 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleştirilebilir.

SBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulama hızı 200 mm/dak. olarak belirlendikten sonra malzemeye Şekil 35’de verilen ön deformasyon prosedürü 200 mm/dak. hızda uygulanmıştır. Deney sonunda farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 48’de verilmiştir. Buradan, tüm hızlarda gerilme-uzama oranı verilerinin hem yükleme hem de boşaltma durumunda üst üste düştüğü görülmektedir. Malzemeye ön deformasyon prosedürü uyguladıktan sonra, gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsız olmaktadır. Fakat bu sonuç $\lambda \geq 2.9$ bölgesinden sonra geçerli değildir. Ayrıca Şekil 48 dikkatli incelendiğinde bu eğrilerden yine 120 mm/dak. şekil değiştirme hızına karşılık gelen eğride diğer şekil değiştirme hızlarına karşılık gelenlere göre az da olsa bir sapma olduğu görülmektedir.

NBR kauçuğunun Şekil 33’deki deney prosedürü için farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verilerine ait grafikler Şekil 49’da sunulmuştur. Şekil 49’dan görüleceği üzere artan şekil değiştirme hızlarında malzemenin, sabit uzama oranı altında, gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum, özellikle, yükleme eğrileri boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrilerinde ise, tüm hızlarda gerime-uzama oranı verileri üst üste düşmektedir. Şekil 49’daki grafiklere ait sabit uzama oranlarındaki (yükleme sırasındaki uzama oranları 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 ile boşaltma sırasındaki uzama oranlarındaki 2.5, 2.0 ve 1.5) gerilme değerleri Tablo 13’de sunulmuştur. Tablodan da görüleceği üzere en düşük gerilme değeri, beklenildiği üzere, 10 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleşmiştir. Şekil değiştirme hızı azaldıkça amorf yapıdaki molekül dizilişi, deformasyon sebebiyle, daha kararlı ve düzenli bir şekilde yeni şekle geçmekte ve dolayısıyla da okunan gerilme değerleri malzemenin yapısını daha iyi yansıtmaktadır. NBR kauçuğuna ait Tablo 13’deki veriler incelendiğinde, farklı şekil değiştirme hızlarındaki yükleme eğrilerinde 300 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerilmelerin maksimum olduğu görülmektedir (Şekil 44). Daha sonra 120 mm/dak. şekil değişim hızındaki gerilmelerin yüksek olduğu görülmektedir. Yani 120 mm/dak. şekil değişim hızında, 200 mm/dak. şekil değişim hızından daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir.

Esasen 120 mm/dak. için beklenen davranış 80 ve 200 mm/dak arasında bir eğrinin elde edilmesiydi.

Çalışmada şekil değiştirme hızıyla ilgili bir diğer araştırma ise, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmasının şekil değiştirme hızına ne tür etkilerin yaptığının belirlenmesidir. Yukarıda da ifade edildiği üzere, şekil değiştirme hızı ne kadar düşük hızda gerçekleştirilirse şekil değiştirme hızından bağımsız verilerde o oranda doğru olarak elde edilecektir. Fakat düşük hızlarda şekil değiştirme deneylerinin gerçekleştirilmesine karşılık deneylerin de tamamlanma süresi o oranda da artacaktır. Bu sebeple NBR kauçuk malzemesinin özellikleri değişmeden deneylerin gerçekleştirilebileceği en yüksek şekil değiştirme hızı araştırılmıştır. NBR kauçuk malzemesi için Şekil 34’de verilen deney prosedürü 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilmiştir. NBR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 49’da ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 51’de verilmiştir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin 1. yükleme-boşaltma sonunda elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında, birbirlerine yakınsadıkları görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma verilerinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızları için beraber çizilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 52). 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verileri neredeyse üst üste düşmektedir. Bu sonuçlar ayrıca Şekil 51’deki grafik verilerinden elde edilen Tablo 14’de gerilme değerleri için de ifade edilmiştir. Tablodaki gerilme değerleri de kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 53’de verilmiştir. Şekil 53’den tüm uzama oranlarında gerilmelerin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Hem Şekil 52 hem de Şekil 53’den, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarının gerilme-uzama oranı verileri 10 mm/dak şekil değiştirme hızı verileri ile $\lambda \leq 1.5$ ve $\lambda \geq 2.7$ bölgesinde tamamen üst üste düşerken $1.5 \leq \lambda \leq 2.7$ deformasyon aralığında az bir sapmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızları için geçerli değildir. 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarından, 80 mm/dak. ile ön deformasyon prosedürü uygulanması daha kısa süreceğinden NBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü deneyleri 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleştirilebilir.

NBR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulama hızı 80 mm/dak. olarak belirlendikten sonra malzemeye Şekil 35’de verilen ön deformasyon prosedürü 80 mm/dak. hızda uygulanmış ve farklı şekil değiştirme hızlarında deneyler yapılmıştır.

Deney sonunda farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 53’de verilmiştir. Şekil 53’den, SBR kauçukta gözlenenin aksine, NBR numunelere ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra farklı hızlarda gerçekleştirilen yükleme işleminin tüm şekil değiştirme hızlarında birbirinden tamamen farklı olduğu görülmektedir. Fakat boşaltma verilerinde ise tüm hızlardaki gerilme-uzama oranı verileri üst üste düşmektedir. Buradan, NBR kauçuk malzemelerine ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra, yükleme eğrisi boyunca gerilme-uzama oranı eğrilerinin şekil değiştirme hızına bağımlı olduğu, boşaltma eğrisi boyunca ise gerilme-uzama oranı eğrisinin şekil değiştirme hızından bağımsız olduğu görülmektedir.

NR kauçuğunun Şekil 33’deki deney prosedürü için farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verilerine ait grafikler Şekil 54’de sunulmuştur. Şekil 54’den görüleceği üzere artan şekil değiştirme hızlarında malzemenin, sabit uzama oranı altında, gerilme değerleri artmaktadır. Bu durum, özellikle, yükleme eğrileri boyunca daha belirgin olmaktadır. Boşaltma eğrilerinde ise, yükleme eğrilerine göre daha az belirgin bir davranış farklılığı söz konusudur. Şekil 54’deki grafiklere ait sabit uzama oranlarındaki gerilme değerleri Tablo 15’de sunulmuştur. Grafiklerden de görüleceği üzere en düşük gerilme değeri, beklenildiği üzere, 10 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleşmiştir. NR kauçuğuna ait Tablo 15’deki veriler incelendiğinde, farklı şekil değiştirme hızlarındaki yükleme eğrilerinde 120 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerilmelerin maksimum olduğu görülmektedir (Şekil 44). Daha sonra 200 mm/dak. şekil değişim hızındaki gerilmelerin yüksek olduğu görülmektedir. Yani hem 120 mm/dak. şekil değişim hızında hem de 200 mm/dak. şekil değişim hızında 300 mm/dak. şekil değişim hızından daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir.

Çalışmada, ayrıca ön deformasyon prosedürü işlemleri için, NR kauçuk malzemesinin mekanik özelliklerinin değişmeden deneylerin gerçekleştirilebileceği en yüksek şekil değiştirme hızı araştırılmıştır. NR kauçuk malzemesi için Şekil 34’de verilen deney prosedürü 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarında gerçekleştirilmiştir. NR kauçuğunun 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 54’de ve 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 56’de verilmiştir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda 10, 40, 80, 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verilerinin, 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında, yakınsadıkları görülmektedir. Bu durum 15. yükleme-boşaltma verilerinin 10, 40 ve 80 mm/dak. şekil

değiştirme hızları için beraber çizilmesi durumunda daha iyi görülmektedir (Şekil 57). 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verileri neredeyse üst üste düşmektedir. Bu sonuçlar ayrıca Şekil 56'daki grafik verilerinden elde edilen Tablo 16'da gerilme değerleri için de ifade edilmiştir. Tablodaki gerilme değerleri de kullanılarak sabit uzama oranında gerilme ile şekil değiştirme hızının değişimi Şekil 58'de verilmiştir. Şekil 58'den tüm uzama oranlarında, farklı şekil değiştirme hızlarında gerilmelerin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Hem Şekil 57 hem de Şekil 58'den, 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarının gerilme-uzama oranı verileri 10 mm/dak. şekil değiştirme hızı verileri ile $\lambda \leq 1.5$ ve $\lambda \geq 2.7$ bölgesinde tamamen üst üste düşerken $1.5 \leq \lambda \leq 2.7$ deformasyon aralığında çok az fakat kabul edilebilir bir sapmanın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum 120, 200 ve 300 mm/dak. şekil değiştirme hızları için geçerli değildir. 40 ve 80 mm/dak. şekil değiştirme hızlarından 80 mm/dak. ile ön deformasyon prosedürü uygulanması daha kısa süreceğinden NR kauçuğunun ön deformasyon prosedür işlemleri 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında gerçekleştirilebilir.

NR kauçuğunun ön deformasyon prosedürü uygulama hızı 80 mm/dak. olarak belirlendikten sonra malzemeye Şekil 35'de verilen ön deformasyon prosedürü 80 mm/dak. hızda uygulanmış ve farklı şekil değiştirme hızlarında deneyler yapılmıştır. Deney sonunda farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilen gerilme-uzama oranı verileri Şekil 59'da verilmiştir. Şekil 59'dan, SBR kauçuğunun davranışına benzer şekilde, ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonra farklı hızlarda gerçekleştirilen hem yükleme hem de boşaltma gerilme-uzama oranı verileri üst üste düşmektedir. Buradan ön deformasyon prosedürü uygulanmış NR kauçuk malzemelerde hem yükleme hem de boşaltma deformasyonları boyunca gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsızdır. Fakat bu sonuç $\lambda \geq 2.8$ bölgesinden sonra geçerli değildir.

Yapılan bu tez çalışmasında SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin farklı şekil değiştirme hızlarındaki gerilme-uzama oranı verileri incelenmiş ve şekil değiştirme hızının gerilme-uzama oranına etkisi araştırılmıştır. Literatürde, Bouasse ve Carrière [70] ve Sommerville, Ball ve Edland'ın [71] yaptıkları çalışmalar dışında tüm çalışmalarda, sabit uzama oranında, artan şekil değiştirme hızlarında gerilmenin arttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmada da, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda, SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerin artan şekil değiştirme hızlarında gerilme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil değiştirme hızı azaldıkça amorf yapıdaki molekül dizilişi, deformasyon sebebiyle, daha kararlı ve düzenli bir şekilde

yeni şekle geçmekte ve dolayısıyla da okunan gerilme değerleri malzemenin yapısını daha iyi yansıtmaktadır. Yüksek hızlarda ise artan şekil değiştirme hızlarında kauçuk molekülleri kararlı ve düzenli bir şekil alamadan deney tamamlanmakta ve sebeple de yüksek hızlarda, sabit uzama oranında, gerilmeler yüksek çıkmaktadır. Bu sebeple, ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda, SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinde gerilme-uzama oranı verileri hem yükleme hem de boşaltma deformasyonunda şekil değiştirme hızına bağlıdır.

Deneyle maksimum uzama oranı 3'e kadar gerçekleştirilmiş olup bu deformasyona kadar, Roth ve Holt, çalışmalarının aksine [78], gerilme-uzama oranı eğrilerinin birbirleriyle çakıştığı görülmemiştir. Çalışmada, her üç malzeme için de, şekil değiştirme hızına olan bağımlılığın yükleme eğrilerinde, boşaltma eğrilerine nazaran daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir. Bu sonuç ise literatürdeki Bergström ve Boyce'un çalışmaları [95-96] ile uyumludur.

Çalışmada, literatürde ilk kez, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın şekil değiştirme hızına etkisi incelenmiştir. Esasen malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamaktan amaç; malzemenin Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde ederek, Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verilerine şekil değiştirme hızının etkisini incelemektir. Deneyle sonunda SBR ve NR kauçuk malzemelerinin gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsızdır. NBR kauçuk malzemesi ise yüklemedeki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızına bağımlı iken boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsızdır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda [88, 95-96, 105-106] araştırmacılar malzemeye Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elde edebilmek için malzemeye ön prosedür uygulamışlar fakat malzemeye ön prosedür uygulama hızını belirlemek için bir çalışma yapmamışlardır. Yapılan bu çalışmada malzemeye uygulanacak olan ön deformasyon prosedürünün malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmeden hangi şekil değiştirme hızında gerçekleştirilmesi gerektiği belirlenmiştir.

4.2. Mullins Etkileri Deneyle

Kauçuk türü malzemelere, sabit deformasyon altında, uygulanan tekrarlı yüklemelerde gerilmelerin zamanla azalması, literatürde, Mullins Etkileri olarak

tanımlanmıştır. Yapılan tez çalışmasında SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerindeki Mullins etkileri davranışları deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen veriler Şekil 60 - Şekil 107 ve Tablo 17 – Tablo 28’de, sunulmuştur.

SBR kauçuk deney numunesinin, $\lambda = 3.0$ sabit deformasyon altında, 200 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme sebebiyle numunede meydana gelen gerilme yumuşaması Şekil 60’da sunulmuştur. Şekil 36’daki deney prosedürünün uygulanması durumunda artan yükleme-boşaltma çevrim sayısında gerilme-uzama oranı verilerinin kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir. Malzemede 1. yükleme eğrisinde $\lambda = 1.2$ ’den sonra gerilme ile uzama oranı arasında lineer bir ilişki söz konusudur. Bu durum kauçuğun bilinen davranışına ters bir gözlemdir. Çünkü kauçuk türü malzemeler uygulanan kuvvet altında gerilme-uzama oranı ilişkisi non-lineer bir davranış gösterir. 1. boşaltma eğrisinde ise, yüklemenin aksine, non-lineer bir davranış söz konusudur. 1. yükleme-boşaltma çevriminden sonra uygulanan 2. yükleme-boşaltma çevriminde ise malzemenin davranışında önemli bir değişim söz konusu olmakta ve hem yükleme hem de boşaltmada gerilme-şekil değiştirme eğrileri non-linear bir davranış göstermektedir. 2. yükleme-boşaltmadan sonraki yükleme çevrimlerinde ise gerilme-uzama oranı verileri kararlı hale gelerek belli değerlere yakınsamaktadır. Malzemede tekrarlı yükleme sebebiyle meydana gelen değişim Şekil 61’de verilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından daha açık görülmektedir. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda gerilme-uzama oranı verilerinde histerezisin azaldığı, kalıcı deformasyonun ve gerilme yumuşamasının olduğu görülmektedir.

Kauçuk-türü malzemelerde, Mullins etkileri sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşamasının kararlı hale gelip gelmediği, eğer kararlı hale gelme söz konusu ise kaçınıcı tekrarlı yükleme sayısında meydana geldiğini belirleyebilmek için Mullins deneylerinde;

- Maksimum deformasyonda gerilmedeki azalma
- Tekrarlı yükleme sebebiyle kalıcı deformasyondaki değişim
- Tekrarlı yükleme sebebiyle histerezisdeki azalma (histerezis kayıpları)

incelenmiştir. Gerilmenin kararlı hale gelmesi için gerekli tekrarlı yükleme sayısı (N) incelenen kauçuk türlerinde farklılık göstermektedir. Çalışmada, N tekrarlı yükleme sayısını belirleyebilmek için malzeme 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. 15 tekrarlı yükleme, deneyime dayalı bir değer olup bu değer malzemeye göre arttırılabilir veya

azaltılabilir. Şekil 36'daki deney prosedürünün SBR kauçuk deney numunesine uygulanmasıyla her bir yükleme-boşaltma çevriminden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden gerilme yumuşaması, kalıcı deformasyon ve histerezis kayıpları hesaplanmış ve tablolar halinde verilmiştir.

SBR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sebebiyle $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri Tablo 17'de ve ilgili gerilme değerlerin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi Şekil 62'de verilmiştir. Şekil 62'den da görüleceği üzere gerilme değerinde eksponansiyel bir azalma söz konusudur. Gerilme değeri 1. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_1 = 2.441 \text{ N/mm}^2$ iken 10. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_{10} = 1.967 \text{ N/mm}^2$ ve 15. yüklemede ise $(\sigma_{\lambda=3.0})_{15} = 1.936 \text{ N/mm}^2$ değerini almaktadır. Dikkat edilirse $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri sabit bir değere doğru yakınsamaktadır.

SBR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri Tablo 18'de, ilgili deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 63'de verilmiştir. Tablo 18'deki verilere dikkat edilirse deneye ilk başlangıçta kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_1 = 0.0$ iken 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda yani 2. yükleme-boşaltma çevriminin başlangıcında $\Delta\lambda_2 = 0.108$ değerini almaktadır. 10. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_{10} = 0.156$, ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $\Delta\lambda_{15} = 0.165$ değerini almaktadır. Özellikle, ilk yükleme-boşaltma çevrimi sonunda numunede ani bir kalıcı deformasyon oluşmakta sonraki tekrarlı yüklemelerde ise artan bir biçimde eksponansiyel değişim göstererek kalıcı deformasyon değeri kararlı bir değer almaktadır.

SBR kauçuk deney numunesinin 15 tekrarlı yükleme nedeniyle numunede meydana gelen histerezis kayıpları Tablo 19'da, ilgili histerezis kayıplarının tekrarlı yükleme ile değişimi ise Şekil 64'de verilmiştir. Tablo 19'daki veriler incelenirse 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede $(H_y)_1 = 0.776 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$ histerezis kayıpları oluşurken 2. yükleme-boşaltma çevriminde $(H_y)_2 = 0.182 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$, 10. yükleme-boşaltma çevriminde sonunda $(H_y)_{10} = 0.118 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$ ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda ise $(H_y)_{15} = 0.114 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$ histerezis kayıpları oluşmaktadır. Özellikle 1. yükleme-boşaltma çevriminden 2. yükleme-boşaltma çevrimine geçişte histerezis kayıplarında çok önemli bir düşüş olmakta, sonraki yükleme-boşaltma çevrimlerinde ise

azalan bir biçimde eksponansiyel değişim göstererek histerezis kayıp değeri kararlı hale gelmektedir.

Şekil 62-Şekil 64 grafikleri ve Tablo 17-Tablo 19 verileri birlikte incelendiğinde 10. yükleme-boşaltma çevriminden sonra gerilme-uzama oranı verilerinin kararlı hale geldiği Şekil 65'den görülmektedir. İlave olarak 10. yükleme-boşaltma çevriminden sonra gerilme-uzama oranı verileri hemen hemen üst üste düşmektedir. Dolayısıyla SBR kauçuk deney numunesinde Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için bu malzemeden yapılmış deney numunelerinin 10 kez tekrarlı yüklemeye tabi tutulması yeterlidir.

Mullins etkileri ile malzemeye uygulanan maksimum deformasyon arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinden yapılmış deney numunelerine Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanmıştır. Deney prosedüründe numuneler, $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$, uzama oranlarında ve 40 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur.

SBR kauçuk deney numunesine Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanması durumunda deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 66a-d'de verilmiştir. Şekil 66e'de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. çevrim verileri (1., 15., 16., 30., 31., 45., 46. ve 60. yükleme-boşaltma verileri) birlikte sunulmuştur. $\lambda = 1.5$ 'a kadar deforme edilen bir numuneye ait 15. yükleme-boşaltma verileri ile $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilen numuneye ait 16. yükleme-boşaltma verilerinin yüklemeye eğrileri, uzama oranı 1.5'a kadar aynı davranışı gösterirken (Şekil 66e), uzama oranı 1.5'dan sonra malzemenin davranışında önemli bir değişme söz konusudur. Bu durum $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilen numunenin 30. yükleme-boşaltma verileri ile $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilen numunenin 31. yükleme-boşaltma yük çevrimine ait yüklemeye eğrileri, uzama oranı 2.0'a kadar aynı davranışı gösterirken (Şekil 66e), uzama oranı 2.0'den sonra malzemenin davranışında önemli bir değişme söz konusu olmaktadır. Benzer şekilde $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilen numuneden elde edilen 45. yükleme-boşaltma verileri ile $\lambda = 3.0$ 'a kadar deforme edilen numuneden 46. yükleme-boşaltma verilerinin yüklemeye eğrileri, uzama oranı 2.5'a kadar aynı davranışı gösterirken (Şekil 66e), uzama oranı 2.5'dan sonra malzemenin davranışında önemli bir değişme söz konusudur. Deney sonuçlarını karşılaştırmak için her bir uzama oranına ait 1. yükleme-boşaltma verileri (1., 16., 31., ve 46. yükleme-boşaltma verileri) Şekil 67'de verilmiştir. Şekil 67'deki grafikleri karşılaştırmak için de veriler

başlangıç noktasına ötelenerek, elde edilen grafik Şekil 69'da sunulmuştur. Şekil 67 ve Şekil 69 birlikte incelendiğinde; maksimum $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilen yükleme-boşaltma çevrimlerinde (16.-30. yükleme boşaltma çevrimleri) uzama oranı 1.5'dan sonra, maksimum $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilen yükleme-boşaltma çevrimlerinde (31.-45. yükleme boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.0'dan sonra ve maksimum $\lambda = 3.0$ 'a kadar deforme edilen yükleme-boşaltma çevrimlerinde (46.-60. yükleme boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.5'dan sonra malzemenin mekanik davranışında ani bir farklılaşma oluşmaktadır. Malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışında meydana gelen bu ani değişimler Şekil 69'da oklarla gösterilmiştir. 15. yükleme-boşaltma verilerinin (15., 30., 45., ve 60. yükleme-boşaltma verileri) aynı grafikte gösterilmesi durumu Şekil 68'de verilmiştir. Şekil 68'deki grafikleri birbirleri ile daha iyi karşılaştırabilmek için, buradaki veriler başlangıç noktasına ötelenerek, elde edilen grafik Şekil 70'de sunulmuştur. Şekil 70'e, dikkat edilirse, her bir uzama oranında 15 tekrarlı yükleme sonundaki gerilme-uzama oranı verileri birbirinden önemli farklılıklar içermektedir.

Şekil 66-Şekil 70 arasındaki grafiklerden Mullins etkilerinin malzemeye uygulanan maksimum deformasyona bağlı olduğu görülmektedir. Bu durum SBR kauçuk malzemesi için Şekil 70'de açık bir şekilde görülmektedir. Deformasyon, yani uzama oranı miktarı, arttıkça 15. yükleme-boşaltma çevrimi verileri birbirinden tamamen farklı davranış göstermekte ve artan uzama oranlarında gerilme-uzama oranı verileri ve malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç, azalmaktadır. Ayrıca 1. yükleme-boşaltma verileri moleküler açıdan incelenmek istenirse bunun için Şekil 37'deki 31. yükleme-boşaltma çevrimi ele alınabilir. Burada malzeme $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilmiştir. 30. yükleme-boşaltma çevriminde malzeme $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edildiğinden malzeme içerisindeki moleküller arasındaki bazı bağlar kopmuş ve uzama oranı 2.0'deki tekrarlı yükleme sebebiyle gerilme yumuşaması meydana gelmiştir. Fakat malzeme 31. yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulması durumunda uzama oranı 2.0'a kadar 30. yükleme-boşaltma çevriminin davranışını gösterecek, uzama oranı 2.0'dan sonra ise moleküller arasındaki bağlar bir üst deformasyona karşı direnç göstereceğinden malzemede $\lambda = 2.0$ 'de ani bir değişim olacaktır. Bu davranışın oluştuğu konumlar Şekil 69'da her bir uzama oranı için oklarla gösterilmiştir.

SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinde, Mullins etkilerini incelemek amacıyla uygulanan bir diğer deneysel çalışmada ise, Şekil 38'de verilen deney prosedürü uygulanarak Mullins etkilerinin zaman içerisinde değişip değişmediği incelenmiştir.

SBR kauçuk deney numuneleri, Şekil 38'de gösterildiği üzere, sırasıyla I. grup tekrarlı yükleme, gerilme gevşemesi, II. grup tekrarlı yükleme ve III. grup tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemeden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait veriler, sırasıyla, Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73'de sunulmuştur. Ayrıca I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemeden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini birbirleri ile karşılaştırabilmek için her üç deneydeki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 74'de, 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 75'de sunulmuştur. Şekil 75'deki gerilme-uzama oranı verilerin birbirleri ile karşılaştırılabilmesi için her üç deneye ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir.

I., II. ve III. grup tekrarlı yükleme çevrimlerine ait 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, II. ve III. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. yükleme-boşaltma verilerinin üst üste düştüğü görülmektedir. Ayrıca, II. ve III. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri birbirlerine oldukça yakın değerlerdir (Şekil-72, Şekil 73). Fakat daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği ve de Şekil 71'deki sonuçlardan da görüldüğü üzere I. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri arasında, numune 1. yüklemeye ilk defa yükleme-boşaltma çevriminde tabi tutulduğundan, önemli farklar vardır.

SBR kauçuk malzemesi, II. grup tekrarlı yüklemeden önce 2 saat ve III. grup tekrarlı yüklemeden önce ise 12 saat yüksüz olarak bekletilmiştir. Bu beklemler ardından yapılan 15 tekrarlı yüklemeden elde edilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin birbirine yakın değerler verdiği fakat üst üste düşmediği görülmektedir. I., II. ve III. Grup tekrarlı yüklemeye ait 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, Şekil 75'de görüleceği üzere, her üç yükleme durumuna ait verilerin üst üste düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, SBR kauçuk malzemesinde Mullins etkilerinden bağımsız deney verileri elde etmek isteniyorsa malzeme 10 defa (daha önceki bölümlerde belirlendiği üzere) yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulması gerekmektedir. Şekil 38'deki deney prosedürünün uygulanması malzemede bir gerilme yumuşaması meydana getirmemektedir. Bu gözlem deneylerin yapıldığı maksimum deformasyon olan $\lambda = 3.0$ 'ü aşmamak kaydıyla geçerlidir.

NBR kauçuk malzemesinin, $\lambda = 3.0$ sabit deformasyon altında, 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme sonunda numunede meydana gelen gerilme yumuşaması Şekil 76'da sunulmuştur. Numuneye ait 1. yükleme eğrisinde $\lambda = 1.2$ 'den sonra gerilme ile uzama oranı arasında lineer bir ilişki, boşaltma eğrisinde ise non-lineer

ilişki söz konusudur. 2. yükleme-boşaltma çevriminde ise malzemenin davranışında önemli bir değişim söz konusu olmakta ve hem yükleme hem de boşaltma eğrileri non-linear bir davranış göstermektedir. 2. yükleme-boşaltma çevriminden sonraki yükleme-boşaltma çevrimlerinde ise gerilme-uzama oranı verileri bir sabit değere yakınsamaktadır. Malzemede tekrarlı yükleme sebebiyle meydana gelen değişim, Şekil 77’de verilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından görülmektedir. NBR kauçuk malzemesinde, SBR kauçuk malzemesinin aksine, 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimlerinin karşılaştırılmasından gerilmede önemli düşüş söz konusudur. 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede gerilme-uzama oranı verilerinde histerezisin azaldığı, kalıcı deformasyonun ve gerilme azalmasının olduğu görülmektedir.

NBR kauçuk malzemesinin 15 tekrarlı yükleme sebebiyle $\lambda = 3.0$ ’deki gerilme değerleri Tablo 21’de ve ilgili gerilme değerlerin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi Şekil 78’de verilmiştir. Şekil 78’den de görüleceği üzere gerilme değerinde eksponansiyel bir azalma ve sonuçta da sabit bir değere yakınsama söz konusudur. 1. yüklemede gerilme değeri $(\sigma_{\lambda=3.0})_1 = 8.008 \text{ N/mm}^2$ iken 10. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_{10} = 5.441 \text{ N/mm}^2$ ve 15. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_{15} = 5.406 \text{ N/mm}^2$ değerlerini almaktadır.

NBR kauçuk malzemesinin 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri Tablo 22’de ve ilgili deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 79’da verilmiştir. Tablo 22’deki verilere dikkat edilirse deneye ilk başlangıçta kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_1 = 0.0$ iken 2. yükleme-boşaltma çevriminin başlangıcında kalıcı deformasyon $\Delta\lambda_2 = 0.180$ değerini almaktadır. 10. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_{10} = 0.216$, ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda kalıcı deformasyon değeri ise $\Delta\lambda_{15} = 0.220$ değerini almaktadır. Özellikle, ilk yükleme-boşaltma çevriminde malzemede ani bir kalıcı deformasyon oluşmakta sonraki yükleme-boşaltma çevrimlerinde ise eksponansiyel olarak artarak kararlı hale gelmektedir.

NBR kauçuk malzemesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda numunede meydana gelen histerezis kayıpları Tablo 23’de ve ilgili histerezis kayıplarının tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 80’de verilmiştir. Tablo 23’deki veriler incelenirse 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede $(H_y)_1 = 5.667 \text{ J}/(10^3 \text{ mm}^3)$ histerezis kayıpları oluşurken 2. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $(H_y)_2 = 1.005 \text{ J}/(10^3 \text{ mm}^3)$, 10. yükleme-boşaltma

çevrimi sonunda $(H_y)_{10} = 0.580 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$ ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda ise $(H_y)_{15} = 0.567 \text{ J}/(10^3 \cdot \text{mm}^3)$ histerezis kayıpları oluşmaktadır. Özellikle 1. yükleme-boşaltma çevriminden 2. yükleme-boşaltma çevrimine geçişte histerezis kayıplarında önemli bir düşüş olmakta sonraki yükleme-boşaltma çevrimlerinde ise azalan bir biçimde eksponansiyel değişim göstererek histerezis kayıp değeri sabit bir değer almaktadır.

Şekil 78-Şekil 80 grafikleri ve Tablo 21-Tablo 23 verileri birlikte incelendiğinde 10. yükleme-boşaltma çevriminden sonra gerilme-uzama verilerinin kararlı hale geldiği, Şekil 81'den görülmektedir. 10. yükleme-boşaltma çevriminden sonra gerilme-uzama oranı verileri üst üste düşmektedir. Dolayısıyla NBR kauçuk malzemesi için Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için numunenin 10 kez tekrarlı yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulması yeterlidir.

NBR kauçuk malzemesine Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanması durumunda deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yükleme-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 82a-d'de verilmiştir. Şekil 82e'de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. çevrimin verileri (1., 15., 16., 30., 31., 45., 46. ve 60. yükleme-boşaltma verileri) birlikte sunulmuştur. Deney sonuçlarını birbirleri ile karşılaştırmak için de her bir uzama oranına ait 1. yükleme-boşaltma verileri (1., 16., 31., ve 46. yükleme-boşaltma verileri) Şekil 83'de verilmiştir. Şekil 83 deki grafikleri birbirleri ile daha iyi karşılaştırabilmek için, veriler başlangıç noktasına ötelenerek, elde edilen grafik Şekil 85'de verilmiştir. Hem Şekil 83 hem de Şekil 85 incelendiğinde; maksimum $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilen numunelerin yükleme-boşaltma çevrimlerinde (16.-30. yükleme-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 1.5'dan sonra, maksimum $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilen numunelerin yükleme-boşaltma çevrimlerinde (31.-45. yükleme-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.0'dan sonra ve maksimum $\lambda = 3.0$ 'a kadar deforme edilen numunenin yükleme-boşaltma çevrimlerinde (46-60. yükleme-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.5'dan sonra malzemenin mekanik davranışında ani bir değişim olmaktadır. Malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışında meydana gelen bu ani değişimler Şekil 85'de oklarla gösterilmiştir. Her bir uzama oranına ait 15. yükleme-boşaltma verileri (16., 30., 45., ve 60. yükleme-boşaltma verileri) Şekil 84'de birlikte verilmiştir. Şekil 84'deki grafikleri birbirleri ile daha iyi karşılaştırabilmek için, veriler başlangıç noktasına ötelenerek, elde edilen grafik Şekil 86'da sunulmuştur. Şekil 86'ya, dikkat edilirse, her bir

uzama oranına ait 15 tekrarlı yükleme sonundaki gerilme-uzama oranı verileri birbirinden farklılık arz etmektedir.

Şekil 82-Şekil 86 arasındaki grafiklerden Mullins etkilerinin malzemeye uygulanan maksimum deformasyona bağlı olduğu görülmektedir. Bu durum NBR kauçuk numunesi için Şekil 86'da net bir şekilde görülmektedir. Deformasyon, yani uzama oranı miktarı arttıkça 15. yükleme-boşaltma verileri birbirinden tamamen farklı eğilimde davranış göstermekte ve artan uzama oranlarında gerilme-uzama oranı verileri ve malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç azalmaktadır.

NBR kauçuk malzemesine, Şekil 38'de ifade edildiği üzere sırasıyla, I. grup tekrarlı yükleme, gerilme gevşemesi, II. grup tekrarlı yükleme ve III. grup tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinden 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri, sırasıyla, Şekil 87, Şekil 88 ve Şekil 89'da sunulmuştur. Ayrıca I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemelerden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini birbirleri ile karşılaştırmak için her üç yüklemeye ait 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 90'da, 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 91'de sunulmuştur. Şekil 91'deki gerilme-uzama oranı verilerin birbirleri ile karşılaştırmak için her üç yükleme-boşaltma çevrimine ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir.

I., II. ve III. Grup tekrarlı yüklemeye ait 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, II. ve III. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. yükleme-boşaltma verilerinin, SBR kauçuğunun aksine, üst üste düşmediği görülmektedir. Ayrıca, II. ve III. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri birbirlerine yakın sonuç vermektedir (Şekil 88, Şekil 89). Fakat daha önceki çalışmalardan bilindiği üzere ve Şekil 87'deki sonuçlardan görüldüğü üzere I. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri arasında, numune 1. yüklemeye ait ilk defa yükleme-boşaltma çevriminde tabi tutulduğundan, önemli farklar vardır.

NBR kauçuk malzemesinin I., II. ve III. grup tekrarlı yüklemeye ait 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, Şekil 91'de görüleceği üzere, her üç yüklemeye ait verileri üst üste düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, NBR kauçuk malzemesinde Mullins etkilerinden bağımsız deney verileri elde edilmek isteniyorsa malzemenin 10 defa (daha önceki bölümlerde belirlendiği üzere) yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulması gerekmektedir. Şekil 38'deki deney prosedürünün uygulanması numuneye ek bir gerilme

yumuşaması meydana getirmemektedir. Bu sonuç deneyin yapıldığı maksimum deformasyon olan $\lambda = 3.0$ 'ü aşmamak kaydıyla geçerlidir.

NR kauçuk malzemesinin, $\lambda = 3.0$ sabit deformasyon altında, 80 mm/dak. şekil değiştirme hızında 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen gerilme yumuşaması Şekil 92'de sunulmuştur. Malzemede 1. yükleme eğrisinde $\lambda = 1.4$ 'den sonra gerilme ile uzama oranı arasında lineer, boşaltma eğrisinde ise non-lineer bir ilişki söz konusudur. 2. yükleme-boşaltma deneyinde ise malzemenin davranışında önemli bir değişim söz konusu olmakta ve hem yükleme hem de boşaltma eğrileri non-liner bir davranış göstermektedir. 2. yükleme-boşaltmadan sonraki tekrarlı yüklemelerde ise gerilme-uzama oranı verileri sabit bir değere yakınsamaktadır. Malzemede tekrarlı yükleme sebebiyle meydana gelen değişim Şekil 93'de verilen 1. ve 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından görülmektedir.

NR kauçuk malzemesinin 15 tekrarlı yükleme sonunda $\lambda = 3.0$ 'deki gerilme değerleri Tablo 25'de ve ilgili gerilme değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi Şekil 94'de verilmiştir. Şekil 94'den de görüleceği üzere gerilmede eksponansiyel bir azalma ve sonuçta da sabit bir değere yakınsama söz konusudur. 1. yüklemede gerilme değeri $(\sigma_{\lambda=3.0})_1 = 4.540 \text{ N/mm}^2$ iken 12. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_{12} = 3.226 \text{ N/mm}^2$ ve 15. yüklemede $(\sigma_{\lambda=3.0})_{15} = 3.200 \text{ N/mm}^2$ değerini almaktadır.

15 tekrarlı yüklemeye sebebiyle NR kauçuk numunede meydana gelen kalıcı deformasyon değerleri ise Tablo 26'da, ilgili deformasyon değerlerinin tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 95'de verilmiştir. Tablo 26'daki verilere dikkat edilirse deneye ilk başlangıçta kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_1 = 0.0$ iken 2. yükleme-boşaltma çevriminin başlangıcında $\Delta\lambda_2 = 0.113$ değerini almaktadır. 12. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda kalıcı deformasyon değeri $\Delta\lambda_{12} = 0.134$, ve 15. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda ise $\Delta\lambda_{15} = 0.131$ değerini almaktadır. Özellikle, ilk yükleme-boşaltma çevriminde malzemede ani kalıcı deformasyon oluşmakta sonraki yükleme-boşaltma çevrimlerinde ise artan bir biçimde eksponansiyel değişim göstererek sabit bir değer almaktadır.

NR kauçuk malzemesinin 15 tekrarlı yükleme sebebiyle malzemede meydana gelen histerezis kayıpları Tablo 27'de, ilgili histerezis kayıplarının tekrarlı yükleme sayısı ile değişimi ise Şekil 96'da verilmiştir. Tablo 26'daki veriler incelenirse 1. yükleme-boşaltma çevrimi sonunda malzemede $(H_y)_1 = 1.667 \text{ J}/(10^3 \text{ mm}^3)$ histerezis kayıpları oluşurken 2.

yükleme-boşaltma çevrimi sonunda $(H_y)_2 = 0.407 J/(10^3.mm^3)$, 12. yüklem-boşaltma çevrimi sonunda $(H_y)_{12} = 0.237 J/(10^3.mm^3)$ ve 15. yüklem-boşaltma çevrimi sonunda ise $(H_y)_{15} = 0.237 J/(10^3.mm^3)$ histerezis kayıpları oluşmaktadır. Özellikle 1. yüklem-boşaltma çevriminden 2. yüklem-boşaltmaya geçişte histerezis kayıplarında önemli bir düşüş olmakta sonraki yüklem-boşaltma çevrimlerinde ise azalan bir biçimde eksponansiyel değişim göstererek histerezis kayıp değeri sabit bir değere yakınsamaktadır.

Şekil 94-Şekil 96 grafikleri ve Tablo 25-Tablo 27 verileri beraber incelendiğinde 12. yüklem-boşaltma çevriminden sonra gerilme-uzama verilerinin kararlı hale geldiği Şekil 97'den görülmektedir. 12. yüklem-boşaltmadan sonra gerilme-uzama oranı verileri tamamen üst üste düşmektedir. Dolayısıyla NR kauçuk malzemesinin Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için bu malzemeden imal edilmiş numunelerin 12 kez yüklem-boşaltma çevrimine tabi tutulması yeterlidir.

NR kauçuk malzemesine Şekil 37'de verilen deney prosedürü uygulanması durumunda deney sonunda her bir uzama oranındaki 1. ve 15. yüklem-boşaltma çevrimine ait gerilme-uzama oranı verileri Şekil 98a-d'de verilmiştir. Şekil 98e'de ise her bir uzama oranındaki 1. ve 15. çevrimin verileri (1., 15., 16., 30., 31., 45., 46. ve 60. yüklem-boşaltma verileri) birlikte sunulmuştur. Deney sonuçlarını karşılaştırmak içinde her bir uzama oranına ait 1. yüklem-boşaltma verileri (1., 16., 31., ve 46. yüklem-boşaltma verileri) Şekil 99'da verilmiştir. Şekil 99 daki grafikleri birbirleri ile daha iyi karşılaştırabilmek için, veriler başlangıç noktasına ötelenerek elde edilen grafik Şekil 101'de verilmiştir. Şekil 99 ve Şekil 101 birlikte incelendiğinde; maksimum $\lambda = 2.0$ 'a kadar deforme edilen numunenin yüklem-boşaltma çevrimlerinde (16.-30. yüklem-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 1.5'dan sonra, maksimum $\lambda = 2.5$ 'a kadar deforme edilen numunenin yüklem-boşaltma çevrimlerinde (31.-45. yüklem-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.0'dan sonra ve maksimum $\lambda = 3.0$ 'a kadar deforme edilen numunenin yüklem-boşaltma çevrimlerinde ise (46.-60. yüklem-boşaltma çevrimleri) uzama oranı 2.5'dan sonra malzemenin mekanik davranışında ani değişimler gözlemlenmektedir. Malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışında meydana gelen bu ani değişimler Şekil 101'de oklarla gösterilmiştir. 15. yüklem-boşaltma verilerinin (16., 30., 45., ve 60. yüklem-boşaltma verileri) birlikte çizilmesi durumu Şekil 100'de verilmiştir. Şekil 100'deki grafikleri karşılaştırabilmek için, veriler başlangıç noktasına ötelenmiştir. Bu durumda elde edilen grafik Şekil 102'de sunulmuştur. Şekil 102'ye, dikkat edilirse, her

bir uzama oranındaki 15 tekrarlı yükleme sonundaki gerilme-uzama oranı verileri birbirinden farklılık arz etmektedir. Şekil 98-Şekil 102 arasındaki grafiklerden Mullins etkilerinin malzemeye uygulanan maksimum deformasyona bağlı olduğu görülmektedir.

NR kauçuk malzemesine, Şekil 38’de ifade edildiği üzere sırasıyla, I. grup tekrarlı yükleme, gerilme gevşemesi, II. grup tekrarlı yükleme ve III. grup tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deney sonunda I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemeden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerinde 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri, sırasıyla, Şekil 103, Şekil 104 ve Şekil 105’de sunulmuştur. Ayrıca I., II., ve III. grup tekrarlı yüklemeden elde edilen gerilme-uzama oranı verilerini karşılaştırabilmek için her üç deneydeki 1. yükleme-boşaltma verileri Şekil 106’da, 15. yükleme-boşaltma verileri ise Şekil 107’de sunulmuştur. Şekil 107’deki gerilme-uzama oranı verilerini karşılaştırabilmek için her üç yükleme-boşaltma çevrimine ait veriler başlangıç noktasına, $(\sigma, \lambda) = (0,1)$, ötelenmiştir.

I., II. ve III. Grup tekrarlı yüklemeye ait 1. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, II. ve III. grup tekrarlı yüklemelerdeki 1. yükleme-boşaltma verilerinin, SBR kauçuğunun aksine, üst üste düşmediği görülmektedir. Ayrıca, II. ve III. grup tekrarlı yüklemelerde 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri birbirlerine yakın sonuç vermektedir (Şekil 104, Şekil 105). Şekil 103’deki sonuçlardan görüldüğü üzere I. grup tekrarlı yüklemeye ait 1. ve 15. yükleme-boşaltma verileri arasında SBR ve NBR kauçuklarda olduğu gibi, numune 1. yüklemeye ilk defa yükleme-boşaltma çevriminde tabi tutulduğundan, önemli farklar vardır.

NR kauçuk malzemesinin I., II. ve III. grup tekrarlı yüklemeden elde edilen 15. yükleme-boşaltma verilerinin karşılaştırılmasından, Şekil 107’de görüleceği üzere, her üç grup yükleme-geçirime ait verilerin üst üste düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, NR kauçuk malzemesinde Mullins etkilerinden bağımsız deney verileri elde edilmek isteniyorsa malzeme 12 defa (daha önceki bölümlerde belirlendiği üzere) yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutulması gerekmektedir. Şekil 38’deki deney prosedürünün uygulanması malzemede ek bir gerilme yumuşaması meydana getirmemektedir. Bu gözlem yine deneyin yapıldığı maksimum deformasyon olan $\lambda = 3.0$ ’ü aşmamak koşuluyla geçerlidir.

Malzemenin sabit bir deformasyon altında tekrarlı yüklemeye tabi tutulması durumunda, malzeme içerisindeki moleküller arasındaki bağlardan bazıları uygulanan deformasyon sebebiyle kopmakta ve kopan bağların malzemeye uygulanan kuvvete karşı bir tepki göstermemesi sebebiyle de gerilmede yumuşama meydana gelmektedir. Bu durum deneyi gerçekleştirilen her üç malzemede de gözlemlenmiştir. Literatürdeki [114,

123-130] çalışmalarda da malzemede meydana gelen gerilme yumuşaması moleküler arasındaki bağların kopması ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bueche kauçuğa katılan katkı maddeleri arasında üç farklı zincir bağının olduğunu, bunlardan birincisinin hemen deformasyon ile koptuğunu, ikincisinin daha yüksek deformasyonlarda koptuğunu ve üçüncüsünün ise deformasyon ile kopmadığını kabul etmiştir [123-124]. Ayrıca zincirlerin kopmasıyla, kopan zincirlerin deformasyon sırasında malzemenin mukavemetine etki yapmadığını ve bu zincir kopmasıyla malzemede gerilme yumuşaması meydana geldiği kabulünü yaparak gerilme yumuşaması davranışını açıklamıştır. Deneysel sonuçlardan Bueche'nin önerdiği moleküler açıklamanın [123-124] geçerli olduğu görülmüştür.

Tekrarlı yüklemenin uygulandığı deformasyonun, üzerindeki bir deformasyonda malzeme yeniden tekrarlı yüklemeye tabi tutulursa, bir önceki deformasyon sebebiyle kopmayan molekül arası bağlardan bazıları bu deformasyon sırasında kopmakta ve bu üst deformasyondaki tekrarlı yüklemeye elde edilen gerilme-uzama oranı verileri bir önceki deformasyona göre farklılık göstermektedir. Bu sebeple de gerilme yumuşaması malzemeye uygulanan maksimum deformasyona bağlıdır.

Literatürde araştırmacılar [96, 103, 105-106, 123] Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verilerini elde etmek için uyguladıkları tekrarlı yükleme sayısını belirlemek için herhangi bir çalışma yapmamışlardır. Malzemeye uygulanması gerekli tekrarlı yükleme sayısını tecrübeye dayalı olarak belirlemişlerdir. Literatürde ilk defa bu çalışmada malzemeye uygulanması gerekli tekrarlı yükleme sayısı belirlenmiştir. Çalışmada SBR ve NBR kauçuk için 10 NR kauçuk için ise 12 defa tekrarlı yüklemeye tabi tutulması gerektiği belirlenmiştir. Malzemelere bu tekrarlı yüklemenin uygulanmasından sonra uygulanacak ek deformasyonlarında malzemede ek gerilme yumuşaması meydana getirmemektedir. Tekrarlı yükleme sebebiyle malzeme içerisinde moleküler arasında bağ kopmaları meydana gelmiş bu sebeple de ek deformasyonların uygulanması ek gerilme yumuşaması meydana getirmemektedir. Bu durum çalışmanın yapıldığı maksimum deformasyonun aşılması durumunda geçerlidir.

4.3. Gerilme Gevşemesi Deneyleri

SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin sabit uzama oranları ($\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$) altında hem ön deformasyon prosedürü uygulanmamış hem de ön

deformasyon prosedürü uygulanmış numunelerle gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneylerinden gerilme-zaman verileri elde edilmiş ve ilgili veriler Şekil 108-Şekil 131 ve Tablo 29–Tablo 35’de, sunulmuştur.

SBR kauçuğunun Şekil 39’daki deney prosedürü için gerilme gevşemesi deneyleri sonunda elde edilen gerilme-zaman grafikleri Şekil 108’de sunulmuştur. Gerilme gevşemesi özelliğinden beklenildiği üzere her bir uzama oranında numuneye uygulanan gerilme zamanla azalmaktadır. Numunede ilk önce hızlı ve non-lineer karakterde gerilme düşüşü ($\Delta\sigma_2$) meydana gelirken geçiş süresinden sonra malzemede çok daha az gerilme azalmasına ($\Delta\sigma_3$) sahip ve lineere yakın bir değişim gösteren gerilme gevşemesi meydana gelmektedir.

Şekil 108, Tablo 29’daki verilerle birlikte incelenirse $\lambda = 1.5$ ’da ve 0.1. saatteki gerilme değeri 0.645 N/mm^2 iken bu değer 2 saat sonunda 0.498 N/mm^2 ’ye 10 saat sonunda ise 0.487 N/mm^2 ’ye düşmektedir. İlk 2 saat sonundaki gerilmedeki azalma 0.147 N/mm^2 iken geri kalan 8 saat sonundaki düşüş 0.011 N/mm^2 ’dir. $\lambda = 3.0$ ’de ise 2.064 N/mm^2 ile başlayan gerilme değeri 2 saat sonunda 1.683 N/mm^2 ’ye 10 saat sonunda ise 1.634 N/mm^2 ’ye düşmektedir. İlk 2 saat sonunda gerilmede meydana gelen azalma 0.381 N/mm^2 iken geri kalan 8 saat 0.049 N/mm^2 ’lik bir azalma söz konusudur. Tablo 29’daki yer alan diğer uzama oranlarına karşılık gelen gerilme gevşemesi değerlerinin incelenmesinden $\Delta\sigma_2$ ’de hızlı, $\Delta\sigma_3$ ’de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir. Tüm uzama oranları incelendiğinde SBR kauçuğunun gerilme gevşemesinde iki farklı davranış söz konusu olmaktadır. Eğer 0 – 2 saatlik bölgeyi *I. Bölge* ve 2 - 10 saatlik bölgeyi *II. Bölge* olarak adlandırsak malzeme I. bölgede non-lineer bir gerilme azalması sergilerken, II. bölgede lineere yakın bir azalma göstermektedir. Özellikle tüm uzama oranlarında II. bölgedeki azalmanın neredeyse sabit kaldığı söylenebilir. II. bölgedeki azalmanın oda sıcaklığından farklı sıcaklıklarda sabit kalmayacağı ve lineer değişim göstereceği tahmin edilmektedir. Şekil 109’daki grafiğin incelenmesinden, I. bölge, malzemede ani deformasyon sebebiyle, gerilmedeki düşüşü ifade etmektedir. II. bölge ise malzemenin gerilmedeki düşüş değerinin kararlı hale gelmesinin bir göstergesi olup bu bölgedeki davranıştan malzemenin ömrü belirlenmektedir. Dolayısıyla $\Delta\sigma_2$ gerilme düşüşü, deformasyon sebebiyle malzemede meydana gelen hasarı ifade ederken, $\Delta\sigma_3$ gerilme düşüşü ise malzemenin ömrünü

tanımlamaktadır. Gerilme gevşemesine I. bölgede fiziksel etkenler etkin iken II. bölgedeki davranışta daha çok kimyasal ve oksidasyonun sebep olduğu etkiler söz konusudur.

Şekil 108e'deki gerilme değerlerinin 0.1 saatteki gerilme değeri ile normalize edilmesiyle Şekil 110'daki gerilme-zaman eğrileri elde edilir ki buradan gerilmedeki azalmanın artan uzama oranıyla arttığı gözlemlenmekte fakat bu artış küçük değerlerde kalmaktadır. Şekil-110'daki verileri kullanarak 2 ve 10 saat sonundaki normalize edilmiş gerilmenin uzama oranı ile değişimi Şekil 111'de sunulmuştur. Şekil 111'deki grafikten, uzama oranının gerilme gevşemesinden bağımsız olduğu söylenebilir.

SBR kauçuğuna Şekil 40'daki ön deformasyon prosedürü uygulanmasıyla Şekil 112'deki gerilme-zaman eğrileri ve Tablo 30'daki veriler elde edilmiştir. Ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numunelerin ön deformasyon prosedürü uygulanmış numunelerle karşılaştırılmasından, ön deformasyon prosedürü uygulanmış numunelerin σ_1 gerilmeleri tüm uzama oranlarında artmasına karşılık, $\Delta\sigma_1$ ve $\Delta\sigma_2$ gerilmeleri, $\lambda = 3.0$ uzama oranı dışında, azalmaktadır. Şekil 112'deki gerilme değerlerinin 0.1. saatteki gerilmelerle normalize edilmesiyle Şekil 113'deki eğriler elde edilmiştir. Bu durumda $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'daki normalize edilmiş gerilme-zaman eğrilerinin neredeyse üst üste düştüğü görülmektedir. Yine bu grafikte de $\lambda = 3.0$ 'de tamamen farklı bir davranış söz konusudur. Şekil 113'deki verileri kullanarak 2. ve 10. saatlerdeki normalize edilmiş gerilmelerin uzama oranı ile değişimi Şekil 114'de sunulmuştur. Şekil 114'deki grafikten, gerilme gevşemesinin uzama oranından $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar bağımsız olduğu söylenebilir. Dikkat edilirse $\lambda = 3.0$ değerinde hem 2. hem de 10. saat değerlerinde sapmalar vardır.

NBR kauçuğunun Şekil 39'daki deney prosedürü için gerilme gevşemesi deneyleri sonunda elde edilen gerilme-zaman grafikleri Şekil 115'de sunulmuştur. Şekil 115, Tablo 31'deki verilerle birlikte incelenirse $\lambda = 1.5$ 'da ve 0.1. saatteki gerilme değeri 1.664 N/mm^2 iken 2 saat sonunda 1.239 N/mm^2 'ye, 10 saat sonunda ise 1.189 N/mm^2 'ye düşmektedir. İlk 2 saat sonundaki gerilmedeki azalma 0.425 N/mm^2 iken geri kalan 8 saat sonundaki gerilme düşüşü 0.050 N/mm^2 'dir. $\lambda = 3.0$ 'de ise 6.857 N/mm^2 ile başlayan gerilme değeri 2 saat sonunda 4.683 N/mm^2 'ye, 10 saat sonunda ise 4.467 N/mm^2 'ye düşmektedir. İlk 2 saat sonunda gerilmede meydana gelen azalma 2.174 N/mm^2 iken geri kalan 8 saat sonunda ise 0.216 N/mm^2 'dir. Tablo 31'deki diğer uzama oranlarındaki davranışların da incelenmesiyle $\Delta\sigma_2$ 'de hızlı, $\Delta\sigma_3$ 'de ise nispeten çok daha az bir düşüşün olduğu görülmektedir. Tüm uzama oranlarındaki gerilme gevşemesinin

incelenmesinden NBR kauçuğu da I. bölgede non-lineer bir gerilme azalması sergilerken, II. bölgede lineere yakın bir azalma göstermektedir. Özellikle tüm uzama oranlarında II. bölgedeki azalmanın neredeyse sabit kaldığı söylenebilir. Şekil 115'deki gerilme değerlerinin 0.1. saatteki gerilme değeri için normalize edilmesiyle Şekil 116'daki gerilme-zaman eğrileri elde edilir ki buradan gerilmedeki azalmanın artan uzama oranıyla küçük değerlerde, arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 116'daki verileri kullanarak deney başlangıcından 2 ve 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilme değerlerinin uzama oranı ile değişimi Şekil 117'de verilmiştir. Şekil 117'deki grafikten, gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğu söylenebilir.

NBR kauçuğuna Şekil 40'daki ön deformasyon prosedürü uygulanmasıyla Şekil 118'deki gerilme-zaman eğrileri ve Tablo 32'deki veriler elde edilmiştir. $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ uzama oranlarında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış gerilmeler, ön deformasyon prosedürü uygulanmış gerilmelere göre, σ_1 , $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ ve $\Delta\sigma_3$ gerilme değerlerinin azalmasına karşılık, $\lambda = 3.0$ uzama oranında diğer uzama oranlarında gözlenenenden daha farklı bir davranış söz konusudur. $\lambda = 3.0$ 'a karşılık gelen σ_1 , $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ ve $\Delta\sigma_3$ gerilme değerlerinde ise artış söz konusudur (Tablo 31-32). Şekil 118'deki gerilme değerlerinin 0.1. saatteki gerilme ile normalize edilmesi ile Şekil 119'daki gerilme-zaman eğrileri elde edilmiştir. Şekilde $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da normalize edilmiş gerilme-zaman eğrilerinin neredeyse üst üste düştüğü görülmektedir. Burada da $\lambda = 3.0$ 'de tamamen farklı bir davranış söz konusudur. Şekil 119'daki verileri kullanarak deney başlangıcından 2 ve 10 saat sonraki normalize edilmiş gerilmelerin uzama oranı ile değişimi Şekil 120'de incelenmiştir. Şekil 120'deki grafikten, gerilme gevşemesinin uzama oranından $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar bağımsız olduğu söylenebilir. Dikkat edilirse $\lambda = 3.0$ değerinde hem 2. hem de 10. saat değerlerinde sapmalar vardır.

NR kauçuğunun Şekil 39'daki deney prosedürünün uygulanması ile gerilme gevşemesi deneyleri sonunda elde edilen gerilme-zaman grafikleri ise Şekil 121'de sunulmuştur. Şekil 121, Tablo 33'deki verilerle birlikte değerlendirilirse $\lambda = 1.5$ 'da ve 0.1. saatteki gerilme değeri 1.168 N/mm^2 iken 2 saat sonunda 1.039 N/mm^2 'ye, 10 saat sonunda ise 1.013 N/mm^2 'ye düşmektedir. İlk 2 saat sonundaki gerilmedeki azalma 0.129 N/mm^2 iken geri kalan 8 saat sonundaki gerilme düşüşü ise 0.026 N/mm^2 'dir. $\lambda = 3.0$ 'de ise 5.180 N/mm^2 ile başlayan gerilme değeri 2 saat sonunda 3.882 N/mm^2 'ye, 10 saat sonunda ise 3.633 N/mm^2 'ye düşmektedir. İlk 2 saat sonunda gerilmede meydana gelen

azalma 1.298 N/mm^2 iken geri kalan saat sonunda ise 0.249 N/mm^2 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 33'deki diğer uzama oranlarındaki davranışların da incelenmesiyle $\Delta\sigma_2$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu, $\Delta\sigma_3$ 'de ise nispeten çok daha az bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. NR kauçuğunda da I. bölgede non-lineer, II. bölgede ise lineere yakın bir gerilme azalması göstermektedir. Özellikle $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da, II. bölgedeki lineer değişimlerin sabit kaldığı söylenebilir. Şekil 121'deki gerilme değerlerinin 0.1. saatteki gerilme değerleri ile normalize edilmesiyle Şekil 122'deki gerilme-zaman eğrileri elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere gerilmedeki azalma artan uzama oranıyla artmakla birlikte bu artış SBR ve NR kauçuklarındakinin aksine daha belirgindir. Şekil 122 kullanılarak 2. ve 10. saatlerdeki normalize edilmiş gerilmelerin uzama oranı ile değişimi Şekil 123'de görülmektedir. Şekil 123'deki grafikten, normalize edilmiş gerilmelerin uzama oranı ile lineer değiştiği görülmektedir. Hatırlanırsa ön deformasyon prosedürü uygulanmamış SBR ve NBR malzemelerinde bu değişim tüm uzama oranlarında hemen hemen sabit değişmekteydi.

NR kauçuğuna Şekil 40'daki ön deformasyon prosedürü uygulanmasıyla Şekil 124'deki gerilme-zaman eğrileri ve Tablo 34 verileri elde edilmiştir. $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ uzama oranlarında ön deformasyon prosedürü uygulanmamış gerilmeler, ön deformasyon prosedürü uygulanmış gerilmelere göre, σ_1 , $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ ve $\Delta\sigma_3$ gerilme değerlerinin azalmasına karşılık, $\lambda = 3.0$ uzama oranında $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ ve $\Delta\sigma_3$ gerilme değerlerinde ise artış söz konusudur (Tablo 33-34). Şekil 124'deki verilerin 0.1. saatteki gerilme değerleri ile normalize edilmesi durumunda Şekil 125'deki gerilme-zaman eğrileri elde edilmiştir. NR Kauçuğu için $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$ ve $\lambda = 2.5$ 'da gerilme-zaman eğrilerinin neredeyse üst üste düştüğü görülmektedir. Yine bu grafikte de $\lambda = 3.0$ 'de tamamen farklı bir davranış söz konusudur. Şekil 125'deki verileri kullanarak 2. ve 10. saatlerdeki normalize edilmiş gerilmelerin uzama oranı ile değişimi Şekil 126'da sunulmuştur. Şekil 126'daki grafikten, gerilme gevşemesinin uzama oranından $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar bağımsız olduğu söylenebilir. Dikkat edilirse $\lambda = 3.0$ değerinde hem 2. hem de 10. saat değerlerinde sapmalar vardır.

Literatürde, gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen veriler $\log(\sigma/\sigma_t) - t$ [169-170, 178, 180, 214-215] ve $(\sigma/\sigma_{0.1}) - t$ [188, 196] grafikleri ile sunulması yanında, bazı çalışmalarda $\sigma - t$ [161, 163], $\sigma - \log t$ [154, 162, 166, 176, 187-188], $\sigma/\sigma_0 - \log t$ [154, 161-162, 187-188, 216], $\log \sigma - t$ [160] ve $\log \sigma - \log t$ [176, 217-218] grafikleri de

kullanılmıştır. Esasen deneysel verileri $(\sigma/\sigma_{0.1})-t$ grafiğinde incelemek ve sonuçları bu grafik üzerinden yorumlamak daha belirgin sonuç verecektir. Çünkü bu durumda $(\sigma/\sigma_{0.1})-t$ grafiğinde, gerilme gevşemesi davranışını 0-1 birimsiz skalada inceleme olanağı ortaya çıkar. Böylece aynı malzemelerin, farklı uzama oranlarında veya farklı malzemelerin aynı uzama oranındaki davranışlarının karşılaştırılmaları daha iyi yapılarak, grafikteki skaladan kaynaklanacak yorumlama hataları giderilmiş olur. Deneysel verilerin yorumlanması sırasında $(\sigma/\sigma_{0.1})-t$ grafiği yerine normalize edilmemiş grafiklerin kullanılması durumunda, grafiklerde gerilmeleri hangi aralıkta tanımlandığına dikkat edilmelidir. Gerilmelerin dar bir aralıkta incelenmesi durumunda gerilme gevşemesi uzama oranına bağlı olduğu sonucu çıkarken eğer aynı gerilmeler geniş bir aralıkta incelenirse, gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Yapılan çalışmalar literatürde yer alan çalışmalar ile karşılaştırılırsa, yapılan bu tez çalışmasında doğal kauçuk numunesinin ön deformasyon prosedürü uygulanmadan gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneyinden (Şekil 122) gerilme gevşemesinin uzama oranına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmalarında ön deformasyon prosedürü uygulamayan Kusano ve Murakami [178, 180] ise yine aynı malzeme için gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Fakat malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda (Şekil 125) doğal kauçuk malzemesinin $\lambda \leq 2.5$ deformasyon miktarına kadar uzama oranından bağımsız olduğunu görülmektedir.

Eller, ön deformasyon prosedürü uyguladığı numunelerle gerçekleştirdiği gerilme gevşemesi deneylerinden, SBR ve BR kauçuk malzemeleri için, gerilmenin uzama oranıyla değişmediğini belirtmişlerdir [166]. Yine Cotten ve Boonstra [176], Berry [170], Mooney, Wolstenholme ve Villars [160] çalışmalarında gerilme gevşemesinin malzemenin uzama oranından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Wilkinson ve Gehmann [162] ve Mooney, Wolstenholme ve Villars [160] çalışmalarında malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamanın I. bölgedeki hızlı gerilme düşüşünü önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Fakat bu araştırmacıların çalışmalarında, bu tez çalışmasında yapılanın aksine, gerilme gevşemesini davranışını I. ve II. bölge diye iki gruba ayırmamışlar ve çalışmalarında ön deformasyon prosedürü uygulamanın ilk andaki ani düşüşü azalttığını belirtmişlerdir. Bu durum yapılan çalışmada da Şekil 108e ile Şekil 112'nin, Şekil 115 ile Şekil 118'in, Şekil 121 ile Şekil 124'in karşılaştırılmalarında açıkça görülmektedir. Dikkat edilirse her üç malzemede de ön

deformasyon prosedürü uygulanmasından sonra malzemenin $\Delta\sigma_2$ gerilme düşüşü azalmakta ve geçiş süresi kısalmaktadır. Bu ise non-lineer bölgenin azalması, lineer bölgenin ise artması anlamına gelmektedir. Fakat Şekil 112, Şekil 118 ve Şekil 124'den görüleceği üzere bu ifadeler $\lambda \leq 2.5$ deformasyon miktarına kadar doğrudur. $\lambda = 3.0$ için ise bu durum geçerli değildir.

Gerilme gevşemesi deneyinden önce malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulaması İngiliz standartlarında [185-186] olmasına rağmen ABD standartlarında [184] ön deformasyon prosedürü uygulaması yoktur. İngiliz BS standartlarında malzemenin tek eksenli basma deformasyonu ile gerilme gevşemesi deneylerinde numunenin beş defa $\lambda = 0.75$ 'e kadar yükleme-boşaltma işlemine tabi tutulmasını ve bu işlemden sonra numunenin minimum 16 saat, maksimum 48 saat beklemeden sonra gerilme gevşemesi deneyinin yapılması gerektiğini belirtmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında numune, Şekil 40'dan de görüleceği üzere, deformasyonu gerçekleştirilecek maksimum uzama oranına (bu çalışmada $\lambda = 3.0$) kadar 15 defa yükleme-boşaltma işlemine tabi tutularak, 2 saat yüksüz konumda bekletilmiş ve daha sonra gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır. Malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda SBR ve NBR malzemelerinde gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğu görülmesine karşılık NR malzemesinde gerilme gevşemesinin uzama oranına bağımlı olduğu görülmektedir. Fakat malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda her üç malzeme içinde $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğu fakat $\lambda > 2.5$ değerinden sonra ise gerilme gevşemesinin uzama oranına bağımlı olduğu görülmektedir.

Kauçuk türü malzemeler, düşük sıcaklıklarda amorf yapıdan kristal yapıya geçerek içyapı kristalize olmaktadır. Malzemenin kristalize olması ile de içyapısı değişmekte dolayısıyla malzemenin mekanik ve termal özellikleri değişmektedir. Kauçuk türü malzemelerde düşük sıcaklıklarda meydana gelen bu kristalleşme olayı aynı zamanda malzemenin deformasyonu sırasında da gerçekleşebilmektedir. Çalışmada kullanılan SBR ve NBR kauçuk malzemeleri deformasyon sebebiyle kristalize olmazken, NR kauçuğu deformasyonla birlikte kristalize olmaktadır [51-52]. Çalışmada, özellikle, deformasyon nedeniyle hem kristalize olan hem kristalize olmayan malzeme seçilerek kristalizasyonun gerilme gevşemesine etkisi araştırılmak istenilmiştir. Deneylerden, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda, her üç malzeme içinde $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar gerilme gevşemesinin uzama oranından bağımsız olduğu fakat $\lambda > 2.5$

değerinden sonra ise uzama oranına bağımlı olduğu görülmektedir. Buradan malzemenin kristalize olup olmaması, malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamak koşulu ile, gerilme gevşemesi ve uzama oranı arasındaki ilişkiyi değiştirmemektedir.

Kauçuk türü malzemelerin deneyleri sırasında bazı noktalara dikkat edilmelidir. Kauçuk türü malzemeler vizkoelastik özelliklere sahip oldukları için zaman içerisinde mekanik ve termal özellikleri değişmektedir. Bu durum, özellikle, numunenin tutma çeneleri arasına bağlanması sırasında kendisini göstermektedir. Deneylerde numune çenelere bağlanıp yüksüz konumda ayarlandıktan sonra bilgisayar programında deney verilerini girinceye kadarlık çok kısa sürede bile numuneye uygulanan kuvvet, az da olsa, değişmektedir. İkinci bir nokta ise kauçuğun tek eksenli çekme deneyi sırasında malzemenin tutma çeneleri arasından kayma meydana gelip gelmediğinin sorgulanmasıdır. Literatürde bu nokta birçok araştırmacı tarafından vurgulanmış ve çalışmalarına uygun özel tutma çeneleri imal etmek ihtiyacı duymuşlardır. Deneylere başlamadan önce numuneye ön deformasyon prosedürü uygulamak yukarıda bahsedilen her iki problemin de ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Öncelikle ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda numunenin mekanik özellikleri kararlı hale gelmekte ve numunenin çenelere bağlanması sırasındaki kuvvetteki değişimi ortadan kalkmaktadır. İkinci olarak deformasyonu gerçekleştirilecek maksimum uzamaya kadar numuneye ön deformasyon prosedürü uygulanması durumunda ise tutma çeneleri arasında numunede meydana gelebilecek kayma ortaya çıkmakta ve esas deney yapılırken bu problem ortadan kalkmaktadır. Kauçukla ilgili deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında yukarıda bahsedilen iki nokta önemli olup bunlar yapılan deneylerden elde edilen verilerin güvenilirliği açısından da önemlidir. Bu noktalar literatürde, yalnızca Brown tarafından [157] vurgulanmış olup her nedense diğer çalışmalarda bu durumdan pek söz edilmemiştir.

SBR, NBR ve NR kauçuklarının ön deformasyon prosedürü uygulanmamış ve normalize edilmiş numunelerden elde edilen $\lambda = 1.5$, $\lambda = 2.0$, $\lambda = 2.5$ ve $\lambda = 3.0$ uzama oranındaki gerilme–zaman ilişkilerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları Şekil 127-Şekil 130'da verilmiştir. Aynı malzemelerin, ön deformasyon prosedürü uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme gevşemelerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları ise Şekil 131-Şekil 134'da sunulmuştur. Ayrıca, Tablo 35'de hem ön deformasyon prosedürü uygulanmış hem de ön deformasyon prosedürü uygulanmamış numunelerle gerçekleştirilen deneyler için SBR, NBR ve NR malzemelerinin 10. saat sonundaki normalize edilmiş gerilme değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları verilmiştir. Tablodan, ön deformasyon

prosedürü uygulanmış durumdaki numunelerden elde edilen normalize edilmiş gerilme değerlerinin ön deformasyon prosedürü uygulanmamış deneylerinkilere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuçta bir malzemenin, aynı kullanım şartlarında, tek ömrü olmalıdır. Malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamak veya uygulamamak malzemenin ömrünü arttırmaz. Buradan da görüleceği üzere ön deformasyon prosedürü uygulamak malzemenin mekanik özelliklerini etkilemesi yanında malzemenin ömür değerini de etkilemektedir. Sonuçta deneylerden önce ön deformasyon prosedürü uygulanmalı ve malzemenin ömürleri bu grafikten belirlenmelidir.

Ön deformasyon prosedürü uygulanmış numunelerden elde edilen ve normalize edilmiş gerilme gevşemelerinin birbirleriyle karşılaştırılmaları incelenirse, $\lambda = 1.5$ uzama oranında tüm zamanlar boyunca en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla NR, SBR, ve NBR malzemeleri göstermektedir. $\lambda = 2.0$ uzama oranında, SBR ve NR malzemeleri aynı miktarda gerilme gevşemesi gösterirken NBR bu iki malzemedenden daha fazla gerilme gevşemesi göstermektedir. $\lambda = 2.5$ uzama oranında, hem ön deformasyon prosedürü uygulanmamış hem de ön deformasyon prosedürü uygulanmış durumda en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NR ve NBR malzemeleri göstermektedir. $\lambda = 3.0$ uzama oranında ise malzemelerinin gerilme gevşemesi davranışı deney başlangıcından 10 saat sonunda düzenli hale gelmekte ve en az gerilme gevşemesi davranışını, sırasıyla, SBR, NR ve NBR malzemeleri göstermektedir. Buradan malzemeye uygulanan deformasyon miktarının yani uzama oranının malzemenin ömrünü etkilediği görülmektedir. Malzemenin ömrü farklı deformasyon miktarlarında farklı olmaktadır.

4.4. İnelastik Özelliklerden Bağımsız Veri Elde Etme Deneyleri

Kauçuk türü malzemelerin oda sıcaklığında inelastik özellik göstermesi nedeniyle malzemenin deformasyonu sırasında her bir inelastik özelliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramına nasıl bir etki yaptığının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, daha önce belirtildiği gibi, malzemenin bünye denklemi; elastik kısım, vizkoelastik kısım, vizkoplastik kısım ve hasar kısmı olarak dört gruba ayrılabilir. Tez çalışmasında kullanılan SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerine uygulanan deformasyon nedeniyle her bir inelastik özelliğin nasıl bir etki yaptığını belirleyebilmek için Şekil 41'deki deney prosedürü uygulanmıştır. Deformasyon sebebiyle kauçuk malzemelerde meydana gelen

Mullins etkilerini gidermek için, yani Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri elde etmek için malzemelere ilk önce 15 defa yükleme-boşaltma çevrimi uygulanmıştır. Bu işlemin, incelenen her bir kauçuk malzeme için, nasıl gerçekleştirildiği önceki bölümlerde açıklanmıştır.

Mullins etkileri giderilen kauçuk malzemeler 2 saat yüksüz konumda bekletildikten sonra Şekil 41’de gösterilen I. ve II. gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma deney prosedürleri uygulanmıştır. Malzemelerin I. gerilme gevşemesi giderici yükleme- boşaltma çevrimi sırasında her bir uzama oranındaki yüklemdeki gerilme azalmasının, boşaltmadaki gerilme artmasına göre mutlak değerce daha fazla olduğu görülmektedir. Fakat II. yükleme-boşaltma çevriminde ise, her bir uzama oranında, yüklemdeki gerilme azalması ile boşaltmadaki gerilme artışı mutlak değerce hemen hemen eşit miktardadır. Bu sonuçlar her üç malzeme için de geçerlidir (Şekil 135, Şekil 141, Şekil 147). Bu sebeple de kauçuk malzemelerde gerilme gevşemesini gidermek için birden fazla tekrarlı yükleme-boşaltma çevrimi gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Tekrarlı yükleme sayısının artmasıyla malzemelerin yüklenmesi sırasındaki gerilme düşüşü artarken, tekrarlı yükleme sebebiyle boşaltmadaki gerilme artışında bir değişim olmamakta hem I. hem de II. çevrimlerde aynı gerilme artışı gözlemlenmektedir. Bu sebeple de kauçuk malzemelerin yüklemdeki davranışı ile boşaltmadaki davranışı aynı değildir (Şekil 135, Şekil 141, Şekil 147).

II. yükleme-boşaltma çevriminde, her bir uzama oranı için, yüklemdeki gerilme azalması SBR kauçuk için Şekil 137’de, NBR kauçuk için Şekil 143’de, NR kauçuk için Şekil 149’da ve boşaltmadaki gerilme artması ise SBR kauçuk için Şekil 138’de, NBR kauçuk için Şekil 144’de, NR kauçuk için Şekil 150’de verilmiştir. Bu şekillerdeki verilerin dikkatli incelenmesinden, her bir uzama oranında, yükleme ve boşaltma deneyleri sonunda gerilmeler sabit bir değere doğru yakınsamaktadırlar. Deney prosedüründe beklemeler 2 saat süreyle yapılmıştır. Bekleme süresinin uzatılmasıyla gerilmedeki azalma veya artışların devam ettiği fakat bu azalma veya artışların çok küçük değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu sebeple de bekleme süresinin, tüm malzemeler için, $\lambda=3.0$ haricinde, 2 saat olarak yeterli olacağı düşünülmüştür.

SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin I. ve II. çevrimlerdeki hem yükleme hem de boşaltma sırasındaki 2 saatlik beklemeler sonundaki gerilme değerleri Tablo 36, Tablo 37 ve Tablo 38’de sunulmuştur. Aynı değerler grafik formda Şekil 139, Şekil 145 ve Şekil 151’de verilmiştir. Bu şekillerdeki I. ve II. çevrimler kendi içinde birbirleriyle

karşılaştırılırsa, II. çevrim sonunda yükleme ve boşaltma eğrilerinden elde edilen gerilmelerin birbirine yaklaştığı ve histerezis alanının oldukça azaldığı görülmektedir. II. çevrim sonunda elde edilen histerezis, *denge halindeki histerezis* olarak adlandırılabilir [88, 95]. Artan çevrim sayılarında bu gerilmelerin birbirine yakınsayacağı düşünülerek II. çevrim sonunda yükleme ve boşaltma eğrilerinden elde edilen gerilmelerin ortalaması, SBR, NBR ve NR kauçuk malzemesinin inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri olarak kabul edilebilir. Böyle bir kabul yapılması durumunda SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerine ait inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri Tablo 39'da sunulmuştur. Şekil 139'daki II. çevrimin incelenmesinden, SBR kauçuk malzemesinin zaman içerisinde ve artan çevrimsel yükleme sayısında yukarıda yapılan kabulün geçerli olabileceği fakat NBR ve NR kauçuk malzemelerinde ise (Şekil 145 ve Şekil 151) geçerli olmayacağı ve malzemede bir miktar histerezis alanının oluşacağı tahmin edilmektedir.

Şekil 41'deki deney prosedürünün uygulanması ile elde edilen sonuçlar SBR kauçuğu için Şekil 140'da, NBR kauçuğu için 146'da ve NR kauçuğu için Şekil 151'de verilmiştir. Şekillerdeki I numaralı eğri, malzemenin ilk defa yüklenmesi ile elde edilen gerilme-uzama oranı eğrileridir. Yani testlerde ve laboratuarlarda elde edilen deneysel gerilme-uzama oranı eğrileridir. II numaralı eğriler ise malzemeye 15 defa yükleme-boşaltma çevrimi uygulanması ile Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı eğrileridir. II numaralı eğri ile malzemedeki Mullins etkileri ve kalıcı deformasyon giderilmiş olmaktadır. Malzemede bu durumda histerezis vardır. Malzemeye iki defa gerilme gevşemesini giderici yükleme-boşaltma deneyi uygulanması durumunda, yükleme eğrisi boyunca denge halindeki gerilmeler III numaralı, boşaltma eğrisi boyunca denge halindeki gerilmeler ise IV numaralı eğrilerdir. II. çevrimden sonra her üç malzemede de histerezis alanı oluştuğu görülmektedir. Bu histerezis *denge halindeki histerezis* olarak tanımlanmıştır. Bu alanın artan çevrim sayılarında birbirine yaklaşacağı kabulü yapılırsa II. çevrimdeki yükleme ve boşaltmadaki aynı uzama oranındaki gerilmelerin ortalamasından malzemelerin inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edilebilir. Bu verileri SBR, NBR ve NR kauçuk malzemeleri için Şekil 140, Şekil 146 ve Şekil 152'da V numaralı eğrilerle gösterilmiştir.

Tablo 39. SBR, NBR ve NR kauçuk malzemesinin II. gerilme giderici yüklenme-boşaltma çevriminde her bir uzama oranında yüklenme ve boşaltmadaki gerilmelerin ortalaması

SBR		NBR		NR	
λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)	λ	σ (N/mm ²)
1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000
1.090	0.1855	1.080	0.330	1.102	0.3095
1.290	0.3815	1.280	0.6055	1.302	0.6095
1.490	0.519	1.480	0.794	1.503	0.8285
1.690	0.6365	1.680	0.9655	1.702	1.024
1.891	0.7455	1.880	1.150	2.902	1.218
2.091	0.861	2.080	1.375	2.103	1.421
2.291	0.998	2.280	1.519	2.302	1.6645
2.491	1.181	2.480	2.2315	2.502	2.020
2.691	1.462	2.680	3.318	2.702	2.661
2.891	1.977	2.879	5.100	2.902	4.101

Kauçuk türü malzemelerde, inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edilebiliyorsa I numaralı eğri; nonlinear elastisite teorisi (inelastik özelliklerden bağımsız veriler), vizkoelastisite teorisi (gerilme gevşemesinin neden olduğu etkenler) ve hasar mekaniği (Mullins etkilerinin neden olduğu etkenler) ile modellenir. Eğer malzemelerin zaman içerisinde yüklenme ve boşaltmaya ait gerilmelerin üst üste düşeceği kabulü yapılmazsa bu durumda V numaralı verilerin varlığından söz edilemez ve malzemenin gerilme-uzama oranı davranışı vizkoplastisite teorisi (histerezisin neden olduğu etkenler), vizkoelastisite teorisi (gerilme gevşemesinin neden olduğu etkenler) ve hasar mekaniği (Mullins etkilerinin neden olduğu etkenler) ile modellenir.

5. SONUÇLAR

SBR, NBR ve NR kauçuk numunelerin inelastik özelliklerinden şekil değiştirme hızı, Mullins etkileri, histerezis, kalıcı deformasyon ve gerilme gevşemesi davranışını inceleyebilmek için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinde gerilme-uzama oranı verileri hem yükleme hem de boşaltma deformasyonunda şekil değiştirme hızına bağımlıdır.
- Malzemeye sabit deformasyon altında, ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda, artan şekil değiştirme hızında mühendislik gerilmesi artmaktadır. Bu durum özellikle malzemeye uygulanan yükleme deformasyonu durumunda boşaltma deformasyonuna göre bariz bir şekilde ortaya çıkmaktadır.
- Ön deformasyon prosedürü deneyleri uygulanması durumunda SBR ve NR kauçuk malzemelerinin hem yükleme hem de boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsızdır. NBR kauçuk malzemesi ise yüklemdeki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızına bağımlı iken boşaltmadaki gerilme-uzama oranı verileri şekil değiştirme hızından bağımsızdır.
- Ön deformasyon prosedürü deneyleri, oda sıcaklığı için, SBR kauçuk malzemesinde 200 mm/dak., NBR kauçuk malzemesinde 80 mm/dak. ve NR kauçuk malzemesinde 80 mm/dak şekil değişim hızında gerçekleştirilebilir.
- SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerine Mullins etkilerini giderici tekrarlı yükleme deney prosedürleri uygulansa bile malzemelerdeki histerezis kayıpları tamamen yok edilememektedir.
- SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için malzemeye uygulanması gerekli tekrarlı

yüklemeye sayısı malzemedeki malzemeye farklılık göstermektedir. Yapılan çalışmada Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için SBR kauçuk malzemesinin 10, NBR kauçuk malzemesinin 10, ve NR kauçuk malzemesinin ise 12 tekrarlı yüklemeye tabi tutulması gerekmektedir.

- SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerde meydana gelen gerilme yumuşaması, malzemeye uygulanan maksimum deformasyon miktarına bağlıdır.
- SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinde, ardışık olarak yapılan grup tekrarlı yüklemeye deneylerinde malzemede ek gerilme yumuşaması oluşmamaktadır.
- Kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen sabit uzama oranında gerilme-zaman verileri “*I. Bölge*” ve “*II. Bölge*” olarak adlandırılan iki bölgede incelenebilir. I. bölgede gerilme-zaman verileri non-lineer bir değişim gösterirken II. bölgede gerilme-zaman verileri lineere oldukça yakın bir değişim göstermektedir. I. bölgeden II. bölgeye geçiş zamanı ise “*Geçiş Süresi*” olarak tanımlanabilir.
- Normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde $((\sigma/\sigma_{0.1})-t)$ deneysel verileri incelemek ve sonuçları bu grafik üzerinden yorumlamak daha doğru sonuç vermektedir. Bu durumda $(\sigma/\sigma_{0.1})-t$ grafiğinde, gerilme gevşemesi davranışını 0 - 1 birimsiz skalada inceleme olanağı ortaya çıkar. Böylece aynı malzemenin, farklı uzama oranlarında veya farklı malzemelerin aynı uzama oranındaki davranışlarının birbirleriyle karşılaştırılmaları daha iyi yapılarak, grafikteki skaladan kaynaklanacak yorumlama hataları giderilmiş olur.
- Kauçuk türü malzemelerin mekanik özelliklerinin ve kullanım ömürlerinin doğru olarak belirlenebilmesi için gerilme gevşemesi deneyinden önce malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmalıdır.
- Malzemeye uygulanacak ön deformasyon prosedürde deney numunelerine, deneylerin gerçekleştirileceği maksimum uzama oranına kadar N kez tekrarlı yüklemeye-boşaltma

çevrimi uygulanmalıdır. Burada N tekrarlı yükleme sayısı Mullins etkileri deneyinden belirlenmelidir.

- Ön deformasyon prosedürü uygulanmış SBR, NBR ve NR malzemelerinde, $\lambda \leq 2.5$ değerlerine kadar gerilme gevşemesi uzama oranından bağımsız, fakat $\lambda > 2.5$ değerinden sonra ise gerilme gevşemesi uzama oranına bağımlıdır. Malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmaması durumunda SBR ve NBR malzemeleri tüm uzama oranlarında ($\lambda \leq 3.0$) gerilme gevşemesi uzama oranından bağımsızdır. NR malzemesinde ise tüm uzama oranlarında ($\lambda \leq 3.0$) gerilme gevşemesi uzama oranına bağımlıdır.
- Gerilme gevşemesi deneylerinde malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulamamak malzemenin ömrünün yanlış belirlenmesine sebep olabilir. Bu sebeple malzemenin ömrünü doğru olarak hesaplayabilmek için gerilme gevşemesi deneyinden önce malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulanmalıdır.
- Gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma deney prosedüründe, tekrarlı yükleme sayısı artmasıyla malzemenin yüklenmesi sırasında, her bir uzama oranında, gerilme düşüşü artarken, tekrarlı yükleme sebebiyle boşaltmadaki gerilme artışında bir değişim olmamakta hem I. hem de II. çevrimlerde aynı gerilme artışı davranışı gözlemlenmektedir.
- SBR kauçuk malzemesine gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma çevrimi uygulanması ile artan tekrar sayısında inelastik özelliklerden bağımsız ve histerezisin oluşmadığı gerilme-uzama oranı verileri elde edilebilir. Fakat NBR ve NR kauçuk malzemelerinde ise gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma çevrimi uygulansa bile malzeme içerisinde bir miktar histerezis alanı oluşumu kalacaktır.

6. ÖNERİLER

- 300 mm/dak. şekil değiştirme hızlarından daha yüksek hızlarda deneyler gerçekleştirilerek sonuçlar bu tezdeki sonuçlar ile karşılaştırılabilir.
- Aynı deneyler farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilerek sıcaklığın şekil değiştirme hızına etkisi araştırılabilir.
- Kauçuk türü malzemelerin farklı tekrarlı yükleme altındaki gerilme yumuşaması, kalıcı deformasyon ve histerezis davranışı incelenebilir.
- Kauçuk türü malzemelerin farklı sıcaklıklarda, Mullins etkilerinden bağımsız gerilme-uzama oranı verileri elde edebilmek için uygulanması gerekli tekrarlı yükleme sayısı ilgili malzemeler için belirlenebilir.
- Mullins etkileri ile maksimum deformasyon arasındaki ilişki farklı sıcaklıklarda incelenebilir.
- Deney numuneleri için farklı sıcaklıklardaki gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirilerek sıcaklığın gerilme gevşemesine etkisi araştırılabilir. Örneğin, farklı sıcaklıklarda gerilme gevşemesi-deformasyon miktarı ilişkisi ve farklı sıcaklıklarda ön deformasyon prosedürün etkisi araştırılabilir.
- Gerilme gevşemesi deneyleri, havasız ortamda (nitrojen içerisinde) gerçekleştirilerek havanın dolayısıyla da oksijenin ve oksidasyonun gerilme gevşemesine etkisi araştırılabilir. Ayrıca yağ, su ve kauçuğun çalıştığı diğer ortamlarda da deneyler yapılarak bu ortamlardaki bu ortamlarda gerilme gevşemesi davranışı incelenebilir.
- Çalışmada gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneyleri tek eksenli çekme deformasyonu için yapılmıştır. Aynı deneyler tek eksenli basma deformasyonu için de gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılabilir.

- Ön deformasyon prosedürü uygulamalarında, ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonraki bekleme zamanının etkisi (İngiliz standartlarında bu süre bizim çalışmamızdan daha uzun süre alınmıştır.) araştırılarak bu sürenin daha uzun olmasının gerilme gevşemesi deneylerine ne tür bir etki yaptığı araştırılabilir.
- Çalışmada uygulanan Şekil 3'deki ön deformasyon prosedüründen farklı, ön deformasyon prosedürleri ve bekleme süreleri içinde deneyler gerçekleştirilerek sonuçlar kıyaslanabilir.
- Gerilme gevşemesi deneylerinde farklı çekme hızlarında deneyler yapılarak çekme hızının gerilme-zaman verilerine etkisi araştırılmalıdır. Ayrıca bu deneyler farklı sıcaklıklarda da gerçekleştirilerek aynı anda hem sıcaklığın hem de çekme hızının etkisi incelenebilir.
- İnelastik özelliklerden bağımsız veri elde edilmesi deneyinde, gerilme gevşemesi giderici yükleme-boşaltma çevrimindeki bekleme süreleri 1 saat alınıp 4 defa gerçekleştirilerek yükleme ve boşaltmadaki gerilmelerin üst üste düşüp düşmeyeceği irdelenebilir.
- İnelastik özelliklerden bağımsız veri elde etme deneyleri farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilerek sıcaklığın etkisi incelenebilir.
- Deneysel olarak inelastik özellikleri incelenen SBR, NBR ve NR kauçuk malzemelerinin inelastik özelliklerini modelleyebilecek malzeme modeli geliştirilmelidir. Malzemenin Mullins etkileri hasar mekaniği, gerilme gevşemesi ve sünme davranışı vizkoelastisite, malzemedeki meydana gelen histerezis vizkoplastisite ve inelastik özelliklerden bağımsız gerilme-şekil değiştirme verileri ise hiperelastisite teorisi (non-linear elastisite teorisi) ile modellenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Gough, J., A Description of a Property of Caoutchouc, or Indian Rubber; with some Reflections on the Cause of the Elasticity of This Substance, Mem. Lit. Phil. Soc. Manchester, 1 (1805) 288-295.
2. Allen, G., Rubber Elasticity: Manchester's Contribution Over 170 Years, Journal of Polymer Science: Symposium, 48 (1974) 197-209.
3. Joule, J.P., On Some Thermo-Dynamic Properties and Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical and Physical Sciences, 149 (1859) 91-131.
4. Meyer, K.H., von Susich, G., ve Valko, E., Kolloidzschr, 59 (1932) 208.
5. Treloar, L.R.G., The Mechanics of Rubber Elasticity, Proceeding of Royal Society of London : Series A, Mathematical and Physical Sciences, 351 (1976) 301-330.
6. Price, C., Thermodynamics of Rubber Elasticity, Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical and Physical Sciences, 351 (1976) 331-350.
7. Vahapoğlu, Kauçuk Türü Malzemelerin Termoelastik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, I. Doktora Geliştirme Raporu, Rapor No. I, Aralık, 2000.
8. Shen, M., ve Croucher, M., Contribution of Internal Energy to the Elasticity of Rubberlike Materials, Journal of Macromolecules Science-Review: Macromolecule Chemistry, C12, 2 (1975) 287-329.
9. Chadwick, P., Thermo-Mechanics of Rubber-like Materials, Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Series A: Mathematical and Physical Sciences, 276, 1260 (1974) 371-403.
10. Chadwick, P., ve Creasy, C.F.M., Modified Entropic Elasticity of Rubber-like Materials, Journal of the Mechanical Physics of Solids, 32, 5 (1984) 337-357.
11. Ogden, R.W., On the Thermoelastic Modeling of Rubber-like Solids, Journal of Thermal Stresses, 15 (1992) 533-557.
12. Treloar, L.R.G., Stress-Strain Data for Vulcanized Rubber Under Various Types of Deformation, Transaction of Faraday Society, 40 (1944) 59-69.
13. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials I: Fundamental Concepts, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 240, 822 (1948) 459-490.

14. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials II: Some Uniqueness Theorems for Pure Homogeneous Deformation, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 240 (1948) 490-508.
15. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials III: Some Simple Problems in Cylindrical Polar Co-Ordinates, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 240, 823 (1948) 509-525.
16. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials IV: Further Developments of the General Theory, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 241, 835 (1948) 379-397.
17. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials V: The Problem of Flexure, Proceeding of the Royal Society of London-Series A, 195, 1043 (1949) 463-473.
18. Rivlin, R.S., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VI: Further Results in the Theory of Torsion and Flexure, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 242, 845 (1949) 173-195.
19. Rivlin, R.S. ve Saunders, D.W., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VII: Experiments on the Deformation of Rubber, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 243, 865 (1951) 251-288.
20. Rivlin, R.S. ve Thomas, A.G., Large Elastic Deformations of Isotropic Materials VIII: Strain Distribution Around a Hole in a Sheet, Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series A: Mathematical and Physical Sciences, 243, 865 (1951) 289-298.
21. Carmichael, A.J., ve Holdaway, H.W., Phenomenological Elastomechanical Behavior of Rubbers Over Wide Ranges of Strain, Journal of Applied Physics, 32, 2 (1961) 159-165.
22. Valanis, K.C., ve Landel, R.F., Large Multi-Axial Deformation Behaviour of a Filled Rubber, Transactions of the Society of Rheology, 11, 2 (1967) 243-256.
23. Ogden, R.W., Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubber-like Solids, Proceeding of Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences, 326, 1567 (1972) 565-584.
24. Ogden, R.W., Large Deformation Isotropic Elasticity: On the Correlation of Theory and Experiment for Compressible Rubber-like Solids, Proceeding of Royal Society of London: Series A, Mathematical and Physical Sciences, 328 (1972) 567-583.

25. Vahapoğlu, Kauçuk Türü Malzemelerin Termoelastik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, II. Doktora Geliştirme Raporu, Rapor No. II, Haziran, 2001.
26. Vahapoğlu, V., ve Karadeniz, S., Constitutive Equations for Isotropic Rubber-Like Materials Using Phenomenological Approach: A Bibliography (1930-2003), Rubber Chemistry and Technology, 79, 3, 2006, (Basımda).
27. Ogden R.W., ve Roxburgh, D.G., A Pseudo-Elastic Model for the Mullins Effect in Filled Rubber, Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences, 455 (1999) 2861-2877.
28. Dorfmann, A., ve Muhr, A., Constitutive Models for Rubber, A.A. Balkema, Rotterdam, 1999.
29. Besdo, D., Schuster, R.H., ve Ihlemann, J., Constitutive Models for Rubber II, A.A. Balkema, Rotterdam, 2002.
30. Busfield, J., ve Muhr, A.H., Constitutive Models for Rubber III, A.A. Balkema, Rotterdam, 2003.
31. Austrell, P.-E., Constitutive Models for Rubber IV, Taylor & Francis Group, 2005.
32. Çimenoğlu, H., ve Kayalı, S., Malzemelerin Mekanik Davranışları, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1991.
33. Kocataşkın, F., Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1976
34. Vahapoğlu, Kauçuk Türü Malzemelerin Termoelastik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, III. Doktora Geliştirme Raporu, Rapor No. III, Aralık, 2001.
35. ASTM D 1418, Standard Practice for Rubber and Rubber Latices-Nomenclature, A.S.T.M., 2005.
36. Anonim, Elastomers and Rubbers, Machine Design, 61 (1989) 294-327.
37. Rosen, S.L., Fundamental Principles of Polymeric Materials, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.
38. Güleç, Ş., Malzeme Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 1990.
39. Ward, I.M., Mechanical Properties of Solid Polymers, John Wiley and Sons Inc., Bristol, 1971.
40. ASTM D 1566, Standard Terminology Relating to Rubber, A.S.T.M., 2005.

41. ASTM D 2000, Standard Classification System for Rubber Parts in Automotive Applications, A.S.T.M., 2005.
42. Schidrowitz, P., ve Dawson, T.R., History of the Rubber Industry. W. Heffer & Sons Ltd., Cambridge, 1952.
43. Kauffman, G.B., ve Seymour, R.B., Elastomers I. Natural Rubber, Journal of Chemical Education, 67 (1990) 422-425.
44. Morawetz, H., History of Rubber Research, Rubber Chemistry and Technology, 73, 3 (2000) 405-426.
45. Craig, A.S., Rubber Technology. A Basic Course, Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh, 1963.
46. Anonim, The Inroduction of Hevea Brasiliensis in the Far East. Natural Rubber, Newsletter of the Rubber Foundation Information Center for Natural Rubber, 24 (2001) 1-2.
47. Anonim, The Rise of the Industry. Natural Rubber, Newsletter of the Rubber Foundation Information Center for Natural Rubber, 26 (2001) 2-2.
48. Mooibroek, H., ve Cornish, K., Alternative Sources of Natural Rubber, Applied Microbiology and Biotechnology, 53 (2000) 355-365.
49. Kauffman, G.B., ve Seymour, R.B., Elastomers II. Synthetic Rubber, Journal of Chemical Education, 68, 3 (1991) 217-220.
50. Morton, M., History of Synthetic Rubber, Journal of Macromolecular Science-Chemistry, A15, 7 (1981) 1289-1302.
51. Savran, H.Ö., Elastomer Teknolojisi-I, Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul, 2001.
52. Gent, A.N., Engineering with Rubber. How to Design Rubber Components, Hanser Publishers, Munich, 1992
53. Kutay, M.G., Mukavemet Değerleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 1993
54. Anonim, Encyclopedia of Science and Technology, Vol.: 11, Mc-Graw Hill, New York, 1961, 634-647.
55. Anonim, Elastomers and Rubbers, Machine Design, 61 (1989) 294-327.
56. Love, A.E.H., A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Fourth Edition, Dover Publications, New York, 1944.
57. Nicholson, D.W., ve Nelson, N.W., Finite Element Analysis in Design with Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 63 (1990) 368-406.

58. Vahapoğlu, Kauçuk Türü Malzemelerin Termoelastik Davranışlarının Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, IV. Doktora Geliştirme Raporu, Rapor No. 4, Haziran, 2002.
59. Day, J., ve Miller, K., Equi-biaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of Experimental Technique, ABAQUS 2000 User's Conference Proceeding, 2000, Newport, Rhode Island, 205-220.
60. Kawabata, S., ve Kawai, H., Strain Energy Density Functions of Rubber Vulcanizates From Biaxial Extension, Advances in Polymer Science, 24 (1970) 89-124.
61. Baranwal, K., Pannikottu, A. ve Seiler, J.A., Various Testing Techniques Aid Development of Useful Constants, ITEC, 1996, 86-92.
62. ASTM D 412, Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomer-Tension, A.S.T.M., Philadelphia, 1992.
63. DIN 53 504, Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, D.I.N.
64. Anonim, Non-Linear Finite Element Analysis of Elastomers, Marc Analysis Research Corporation, Palo Alto, 1996.
65. Anonim, Testing at High Strain Rates, Axel Product Testing Brief, Axel Products Inc., Ann Arbor, MI, 2005.
66. Hopkinson, B., A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 213 (1914) 437-456.
67. Kolsky, H., An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, Proceedings of the Physical Society of London Section B, 62, 11 (1949) 676-700.
68. Nolle, A.W., Methods for Measuring Dynamic Mechanical Properties of Rubber-Like Materials, Journal of Applied Physics, 19 (1948) 753-774.
69. Nolle, A.W., Comment on A Method of Measuring Dynamic Mechanical Properties of Rubber-Like Materials, Journal of Applied Mechanics, 20 (1949) 227-228.
70. Bouasse, H., ve Carrière, Z., Courbes de Traction du Caoutchouc Vulcanize, Annales de la Faculté des Sciences, 5 (1903) 257-283.
71. Somerville, A., Ball J., ve Edland, L., Autographic Stress-Strain Curves of Rubber at Low Elongations, Rubber Chemistry and Technology, 3, 4 (1930) 689-700.

72. Holt, W.L., Behavior of Rubber under Repeated Stresses, Rubber Chemistry and Technology, 5, 1 (1932) 79-89.
73. Dart, F.E., ve Guth, E., The Dependency of the Stress-Strain Relationship for Rubber Upon the Rates of Stretching, Physical Review, 55 (1939) 1141-1141.
74. Beadle, C., ve Stevens, H.P., Proceedings of International Rubber Congress, 1911, London, 344-350.
75. van Rossem, A., ve H. Beverdam, H., Tensile Tests of Vulcanized Rubber at High Speed, Rubber Chemistry and Technology, 4, 2 (1931) 147-155.
76. Albertoni, G.J., Impact Machine for Rubber Testing. Determining the Stress-Strain Diagram at High Speed, Industrial and Engineering Chemistry. Analytical Edition, 9, 1 (1937) 30-34.
77. Hauk, V., ve Neumann, W., A Time Effect in the Rapid Elongation of Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 12, 3 (1939) 518-519.
78. Roth, F.L., ve Holt, W.L., Tensile Properties of Rubber Compounds at High Rates of Stretch, Rubber Chemistry and Technology, 13, 2 (1940) 348-360.
79. Smith, T.L., Viscoelastic Behavior of Polyisobutylene under Constant Rates of Elongation, Journal of Polymer Science, 20 (1956) 89-100.
80. Smith, T.L., Dependence of Ultimate Properties of a GR-S Rubber on Strain Rates and Temperature, Journal of Polymer Science, 32 (1958) 99-113.
81. Smith, T.L., Time and Temperature Dependence of the Ultimate Properties of an SBR Rubber at Constant Elongations, Rubber Chemistry and Technology, 34, 3 (1961) 897-909.
82. Smith, T.L., Nonlinear Viscoelastic Response of Amorphous Elastomers to Constant Strain Rates, Transactions of the Society of Rheology, 6 (1962) 61-80.
83. Smith, T.L., ve Dickie, R.A., Effect of Finite Extensibility on the Viscoelastic Properties of a Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizate in Simple Tensile Deformations up to Rupture, Journal of Polymer Science: Part A-2, 7 (1969) 635-658.
84. Zhurkov, C.N., Sanfirova, T.P., ve Tamashevskii, E.E., Mechanical Properties of Rubber at High Rates of Elongation, Rubber Chemistry and Technology, 35, 3 (1962) 813-817.
85. Dannis, M.L., Stress-Strain Testing of Rubber at High Rates of Elongation, Rubber Chemistry and Technology, 36, 1 (1963) 28-49.

86. Kraus, G., Childers, C.W., ve Rollmann, K.W., Stress Softening in Carbon Black-Reinforced Vulcanizates. Strain Rate and Temperature Effects, Journal of Applied Polymer Science, 10 (1966) 29-244.
87. Williams, M.L., Landel, R.F., ve Ferry, J.D., The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids, Journal of the American Chemical Society, 77, 14 (1955) 3701-3707.
88. Lion, A., A Constitutive Model for Carbon Black Filled Rubber: Experimental Investigations and Mathematical Representation, Continuum Mechanics and Thermodynamics, 8 (1996) 153-169.
89. James, A.G., Green, A. ve Simpson, G.M., Strain Energy Functions of Rubber I: Characterization of Gum Vulcanizates, Journal of Applied Polymer Science, 19 (1975) 2033-2058.
90. James, A.G., Green, A. ve Simpson, G.M., Strain Energy Functions of Rubber II: Characterizations of Filled Vulcanizates, Journal of Applied Polymer Science, 19 (1970) 2319-2330.
91. van den Bogert, P.A.J., ve Borst, R. de, On the Behavior of Rubber-like Materials in Compression and Shear, Archieve of Applied Mechanics, 64 (1994) 136-146.
92. Chow, C.L. ve Cundiff, C.H., On the Characterization of Mechanical Properties of Rubber Vulcanizates, Tire Science and Technology, 15, 2, (1987), 73-96.
93. Lambert-Diani, J., ve Rey, C., New Phenomenological Behavior Laws for Rubbers and Thermoplastic Elastomers, European Journal of Mechanics A-Solids, 18 (1999) 1027-1043.
94. Jerrams, S.J., Kaya, M., ve Soon, K.F., The Effects of Strain Rate and Hardness on the Material Constants of Nitrile Rubbers, Materials and Design, 19 (1998) 157-167.
95. Bergström, J.S., ve Boyce, M.C., Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behaviour of Elastomers, Journal of Mechanical Physics and Solids, 46, 5 (1998) 931-954.
96. Bergström, J.S., ve Boyce, M.C., Time-Dependence of Elastomeric Materials: Experiments and Modeling, Proceedings of the 10th International Conference on Deformation, Yield and Fracture of Polymers, April 1997, London.
97. Green, M.S., ve Tobolsky, A.V., A New Approach to the Theory of Relaxing Polymeric Media, The Journal of Chemical Physics, 14, 2 (1946) 80-92.
98. Johnson, A.R., ve Quigley, C.J., A Viscohyperelastic Maxwell Model for Rubber Viscoelasticity, Rubber Chemistry and Technology, 65, 1 (1992) 137-153.

99. Johnson, A.R., ve Stacer, R.G., Rubber Viscoelasticity Using the Physically Constrained System's Stretches as Internal Variables, Rubber Chemistry and Technology, 66, 4 (1993) 567-577.
100. Johnson, A.R., Quigley, C.J., ve Freese, C.E., A Viscohyperelastic Finite Element Model for Rubber, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 127 (1995) 163-180.
101. Roland, C.M., Network Recovery From Uniaxial Extension: Elastic Equilibrium, Rubber Chemistry and Technology, 62, (1989) 863-879.
102. Roland, C.M., ve Warzel, M.L., Orientation Effects in Rubber Double Networks, Rubber Chemistry and Technology, 63, (1990) 285-297.
103. Bergström, J.S., ve Boyce, M.C., Large Strain Time-Dependent Behavior of Filled Elastomer, Mechanics of Materials, 32 (2000) 627-644.
104. Bergström, J.S. ve Boyce, M.C., Constitutive Modeling of the Time-Dependent and Cyclic Loading of Elastomers and Application to Soft Biological Tissues, Mechanics of Materials, 33, 9 (2001) 523-530.
105. Miehe, C., ve Keck, J., Superimposed Finite Elastic-Viscoelastic-Plastoelastic Stress Response with Damage in Filled Rubbery Polymers. Experiments, Modeling and Algorithmic Implementation, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48 (2000) 323-365.
106. Haupt, P., and Sedlan, K., Viscoplasticity of Elastomeric Materials: Experimental Facts and Constitutive Modeling, Archieve of Applied Mechanics, 71 (2001) 89-109.
107. Cheng, M., ve Chen, W., Experimental Investigation of the Stress-Stretch Behavior of EPDM Rubber with Loading Rate Effects, International Journal of Solids and Structures, 40 (2003) 4749-4768.
108. Quintavalla, S.J., Characterization of the High and Low Strain Rate Behavior of a Filled, Crosslinked Elastomer, PhD Thesis, Lehigh University, 2004.
109. Quintavalla, S.J., ve Johnson, S.H., Extension of the Bergström-Boyce Model to High Strain Rates, Rubber Chemistry and Technology, 77, 1 (2004) 972-981.
110. Song, B., ve Chen, W., One-Dimensional Dynamic Compressive Behavior of EPDM Rubber, Journal of Engineering Materials and Technology, 125, 3 (2003) 294-301.
111. Song, B., Chen, W., ve Cheng, M., Novel Model for Uniaxial Strain-Rate-Dependent Stress-Strain Behavior of Ethylene-Propylene-Diene Monomer Rubber in Compression or Tension, Journal of Applied Polymer Science, 92 (2004) 1553-1558.
112. Marquardt, D.W., An Algorithm for Least Squares Estimation of Non-Linear Parameters, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11 (1963) 431-441.

113. Holzapfel, G.A., *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, 2000.
114. Mullins, L., Softening of Rubber by Deformation, Rubber Chemistry and Technology, 42 (1969) 339-362.
115. Shedd, J.C., ve Ingersol, R.L., The Elastic Modulus and Elastic Limit of Rubber and Their Relation to Change of Temperature, Physical Review, 19, 2 (1904) 107-116.
116. Gurney, H.P., ve Tavener, C.H., Energy Absorbing Capacity of Vulcanized Rubber, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 14, 2 (1922) 134-139.
117. Williams, I, Transformation of Energy by Rubber, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 21, 9 (1929) 872-876.
118. Gerke, R.H., Thermodynamics of Stressed Vulcanized Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 3, 2 (1930) 304-314.
119. Mullins, L., Effect of Stretching on the Properties of Rubber, Journal of Rubber Research, 16, 12 (1947) 275-289
120. Blanchard, A.F., ve Parkinson, D., Breakage of Carbon-Rubber Networks by Applied Stress, Industrial and Engineering Chemistry, 44, 4 (1952) 799-812.
121. Blanchard, A.F., Breakage of Rubber-Filler Linkages and Energy Dissipation in Stressed Rubber, Journal of Polymer Science, 14, 76 (1954) 355-374.
122. Mullins L., ve Tobin, N.R., Theoretical Model for the Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubbers, Rubber Chemistry and Technology, 30 (1957) 551-571.
123. Bueche, F., Molecular Basis for the Mullins Effect, Journal of Applied Polymer Science, 4, 10 (1960) 107-114.
124. Bueche, F., Mullins Effect and Rubber-Like Interaction, Journal of Applied Polymer Science, 5, 15 (1961) 271-281.
125. Harwood, J.A.C., Mullins, L., ve Payne, A.R., Tensile Stress Softening Effects in Pure Gum and Filler Loaded Vulcanizates, Journal of Polymer Science: B-Polymer Letters, 3 (1965) 119-123.
126. Mullins, L., ve Tobin, N.R., Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Part I. Use of a Strain Amplification factor to Describe the Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubber, Journal of Applied Polymer Science, 9 (1965) 2993-3009.
127. Harwood, J.A.C., Mullins, L., ve Payne, A.R., Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Part II. Stress Softening Effects in Pure Gum and Filler Loaded Rubber, Journal of Applied Polymer Science, 9 (1965) 3011-3021.

128. Harwood, J.A.C., ve Payne, A.R., Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Part III. Carbon Black-Filled Vulcanizates, Journal of Applied Polymer Science, 10 (1966) 315-324.
129. Harwood, J.A.C., ve Payne, A.R., Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Part IV. Unfilled Vulcanizates, Journal of Applied Polymer Science, 10 (1966) 1203-1211.
130. Harwood, J.A.C., ve Payne, A.R., Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Part V. The Anomalous Tensile Behaviour of Natural Rubber, Journal of Applied Polymer Science, 11 (1967) 1825-1834.
131. Houwink, R., Slipping of Molecules During the Deformations of Reinforced Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 29, 3 (1956) 888.
132. Dannenberg, E.M., ve Brennan, J.J., Strain Energy as a Criterion for Stress Softening in Carbon-Black-Filled Vulcanizates, Rubber Chemistry and Technology, 39, 3 (1966) 597-608.
133. Govindjee, S., ve Simo, J., A Micro-Mechanically Based Continuum Damage Model for Carbon Black-Filled Rubbers Incorporating Mullins Effect, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 39, 1 (1991) 87-112.
134. Govindjee, S., ve Simo, J., Transition From Micro-Mechanics to Computationally Efficient Phenomenology: Carbon Black Filled Rubbers Incorporating Mullins' Effect, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 40, 1 (1992) 213-233.
135. Govindjee, S., ve Simo, J.C., Mullins' Effect and the Strain Amplitude Dependence of the Storage Modulus, International Journal of Solids Structures, 29, 14-15 (1992) 1737-1751.
136. Johnson, M.A., ve Beatty, M.F., The Mullins Effect in Uniaxial Extension and its Influence on the Transverse Vibration of a Rubber String, Continuum Mechanics and Thermodynamics, 5, 1993, 83-115.
137. Johnson, M.A., ve Beatty, M.F., A Constitutive Equation for the Mullins Effect in Stress Controlled Uniaxial Extension Experiment, Continuum Mechanics and Thermodynamics, 5 (1993) 301-318.
138. Johnson, M.A., ve Beatty, M.F., The Mullins Effect in Equi-biaxial Extension and its Influence on the Inflation of a Balloon, International Journal of Engineering Science, 33, 2 (1995) 223-245.
139. Miehe, C., Discontinuous and Continuous Damage Evolution in Ogden-Type Large-Strain Elastic-Materials, European Journal of Mechanics A-Solids, 14, 5 (1995) 697-720.
140. Shen, Y., Golnaraghi, F., ve Plumtree, A., Modeling Compressive Cyclic Stress-Strain Behavior of Structural Foam, International Journal of Fatigue, 23, 6 (2001) 91-497.

141. Bergström, J.S., ve Boyce, M.C., Mechanical Behavior of Particle Filled Elastomers, Rubber Chemistry and Technology, 72 (1999) 633-656.
142. Ogden, R.W., ve Roxburgh, D.G., An Energy-Based Model of the Mullins Effect, Proceeding of the First European Conference on Constitutive Models for Rubber, September 1999, Vienna, Austria, A. 23-29.
143. Holzapfel, G.A., Stadler, M., ve Ogden, R.W., Aspects of Stress Softening in Filled Rubbers Incorporating Residual Strains, Proceeding of the First European Conference on Constitutive Models for Rubber, September 1999, Vienna, Austria, 189-193.
144. Krishnaswamy, S., ve Beatty, M.F., The Mullins Effect in Compressible Solids, International Journal of Engineering Science, 38, 13 (2000) 1397-1414.
145. Beatty, M.F., ve Krishnaswamy, S., A Theory of Stress Softening in Incompressible Isotropic Materials, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 48, 9 (2000) 1931-1965.
146. Beatty, M.F., The Mullins Effect in a Pure Shear, Journal of Elasticity, 59 (2000) 369-392.
147. Beatty, M.F., ve Krishnaswamy, S., The Mullins Effect in Equi-biaxial Deformation, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik, 51, 6 (2000) 984-1015.
148. Krishnaswamy, S., ve Beatty, M.F., Damage Induced Stress Softening in the Torsion, Extension and Inflation of a Cylindrical Tube, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 54 (2001) 295-327.
149. Clement, F., Bokobza, L., ve Monnerie, L., On The Mullins Effect In Silica-Filled Polydimethylsiloxane Networks, Rubber Chemistry and Technology, 74, 5 (2001) 847-870.
150. DeSimone A., Marigo, J.-J., ve Teresi, L., A Damage Mechanics Approach to Stress Softening and its Application to Rubber, European Journal of Mechanics – A: Solids, 20 (2001) 873-892.
151. Gentot, L., Brieu, M., ve Mesmacque, G., Modeling of Stress-Softening for Elastomeric Materials, Rubber Chemistry and Technology, 77, 4 (2004) 759-775.
152. Spetz, G., Stress Relaxation. Test Methods, Instruments and Lifetime Estimation, Technical Report, 2000.
153. Ferry, F.D., Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley and Sons, 3. Basım, New York, 1980.
154. Watanabe, K., Stress Relaxation and Creep of Several Vulcanized Elastomers, Rubber Chemistry and Technology, 35, 1 (1962) 182-199.

155. ISO 3384, Rubber Vulcanizate or Thermoplastic–Determination of Stress Relaxation in Compression at Ambient and at Elevated Temperatures, I.S.O., 1999.
156. ISO 6914, Rubber Vulcanizate or Thermoplastic–Determination of Aging Characteristics by Measurement of Stress Relaxation, I.S.O., 1999.
157. Brown, R.P., Stress Relaxation of Rubbers in Tension–The Simple Approach, Polymer Testing, 1 (1980) 59-64.
158. Tobolsky, A.V., Prettyman, I.B., Dillon, J.H., Stress Relaxation of Natural and Synthetic Rubber Stocks, Journal of Applied Physics, 15 (1944) 380-395.
159. Andrews, R.D., Tobolsky, A.V., ve Hanson, E.E., The Theory of Permanent Set at Elevated Temperatures in Natural and Synthetic Rubber Vulcanizates, Journal of Applied Physics, 17, 5 (1946) 352-361.
160. Mooney, M., Wolstenholme, W.E., ve Villars, D.S., Drift and Relaxation of Rubber, Journal of Applied Physics, 15 (1944) 324-337.
161. Macdonald, W.S., ve Ushakoff, A., Instrument for Measuring Stress Relaxation of High Polymer Materials, Analytical Chemistry, 20, 8 (1948) 713-717.
162. Wilkinson, C.S., ve Gehman, S.D., Autopneumatic Apparatus for Measuring Stress Relaxation, Analytical Chemistry, 22, 11 (1950) 1439-1443.
163. Morris, R.E., James, R.R., ve Segman, I.P., India Rubber World, 119 (1949) 466.
164. Baxter, S., ve Vodden, H.A., An Unbonded Strain Gauge, Journal of Scientific Instruments, 27, 7 (1950) 187-188.
165. Robinson, H.W.H., ve Vodden, H.A., Stress Relaxation in Rubber. I. Evaluation of Antioxidants, Industrial and Engineering Chemistry, 47, 7 (1955) 1477-1481.
166. Eller, S.A., Stress Relaxation of Vulcanized Rubber in Compression and Tension, Rubber Chemistry and Technology, 29, 1 (1956) 263-268.
167. Danjard, J.C., Apparatus for the Continuous Measurement of Stress Relaxation in Vulcanized Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 29, 3 (1956) 834-837.
168. Bartenev, G., ve Galil-Ogly, F., Dynamic Fatigue of Rubber and the Mechanism of Failure by Repeated Deformations, Rubber Chemistry and Technology, 29, 2 (1956) 504-508.
169. Berry, J., Helical Spring Stress Relaxometer, Rubber Chemistry and Technology, 30 (1957) 889-894.
170. Berry, J.P., The Stress Relaxation of Sulfur Vulcanizates of Natural Rubber, Journal of Polymer Science, 21 (1956) 505-517.

171. Dunn, J.R., ve Scanlan, J., A Modified Helical Spring Stress Relaxation for Automatic and Manual Operation, Journal of Applied Polymer Science, 4, 10 (1960) 34-37.
172. Tobolsky, A.V., ve Eyring, H., Mechanical Properties of Polymeric Materials, Journal of Chemical Physics, 11 (1943) 124-134.
173. Bernstein, B., Kearsley, E.A., ve Zapas, L.J., A Study of Stress Relaxation with Finite Strain, Transactions of the Society of Rheology, 7 (1963) 391-410.
174. Bernstein, B., Kearsley, E. A., ve Zapas, L.J., Thermodynamics of Perfect Elastic Fluids, Journal of Research of the Bureau of Standarts, 68 (1964) 103-113.
175. Tanner, R.I., From A to (BK)Z in Constitutive Relations, Journal of Rheology, 32, 7 (1988) 673-701.
176. Cotten, G.R., ve Boonstra, B., Stress Relaxation in Rubbers Containing Reinforcing Fillers, Journal of Applied Polymer Science, 9 (1965) 3395-3408.
177. Bartenev, G.M., ve Lyalina, N.M., Stress Relaxation Mechanisms in Rubbers Reinforced with Carbon Blacks, Rubber Chemistry and Technology, 45, 1 (1972) 82-93.
178. Kusano, T., ve Murakami, K., Characterization of Polymers Under Large Deformation. I. Repeated Chemical Stress Relaxation of Vulcanized Rubbers, Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, 10, 10 (1972) 2823-2831.
179. Curro, J., ve Salazar, E.A., Physical and Chemical Stress Relaxation of Elastomers, Rubber Chemistry and Technology, 50 (1977) 895-905.
180. Kusano, T., ve Murakami, K., Chemical Stress-Relaxation of Filled Vulcanizates under Large Cyclic-Deformation, Rubber Chemistry and Technology, 51 (1978) 194-200.
181. Brown, R.P., ve Bennett, F.N.B., Compression Stress Relaxation, Polymer Testing, 2 (1981) 125-133.
182. James, D.I., ve Peppiatt, A., Stress Relaxation in Compression: A Method Discussion of the Experimental Method for Ring Test Pieces, Polymer Testing, 2 (1981) 235-248.
183. Meier, U., ve Kuster, J., Stress Relaxation of NR and NBR: Comparison of Measured Data with Reduced Variables Estimates, Rubber Chemistry and Technology, 57, 2 (1984) 254-264.
184. ASTM D 1390-76, Standard Test Method for Rubber Property: Stress Relaxation in Compression, A.S.T.M., 1976.

185. BS 903: Part A34, Methods of Testing Vulcanized Rubber. Determination of Stress Relaxation of Rubber Rings in Compression, B.S.I., London, 1978.
186. BS 903: Part A42, Methods of Testing Vulcanized Rubber. Determination of Stress Relaxation, B.S.I., London, 1983.
187. Birley, A.W., Fernando, K.P., ve Tahir, M., Appraisal of the Current Standards for Stress Relaxation Measurements of Rubbers in Compression, Polymer Testing, 6 (1986) 85-105.
188. Armah, J.C., Birley, A.W., Fernando, K.P., Hepburn, C., ve Tahir, M., Stress Relaxation Measurements on Rubbers in Compression. Equipment and Methodology, Rubber Chemistry and Technology, 59, 5 (1986) 765-778.
189. Stenberg, B., ve Jansson, J.F., A Compression Relaxometer for Rubber Materials, Rubber Chemistry and Technology, 46, 5 (1973) 1316-1319.
190. Stenberg, B., ve Jansson, J.F., Studies of Viscoelastic Relaxation of Some Nitrile Rubbers under Compressive Stress, Rubber Chemistry and Technology, 50, 2 (1977) 906-914.
191. Stenberg, B., Björkman, T., ve Dickman, O., Dynamic Mechanical Relaxation of Compressed Rubber Cylinders, Polymer Testing, 3 (1982) 63-68.
192. Stenberg, B., Peterson, L.-O., Flink, P., ve Björk, F., Effect of Butyl Rubber Coating on Accelerated Aging of Natural Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 59, 1 (1986) 7076.
193. Björk, F., ve Stenberg, B., Effects of *Trans*-Polyoctenylene on the Mechanical Properties of NBR, Journal of Applied Polymer Science, 34 (1987) 2649-2655.
194. Björk, F., ve Stenberg, B., Effects of Air and Oil on Stress Relaxation of Nitrile Rubber, Silicone Rubber and Fluorocarbon Rubber, Kautschuk and Gummi Kunststoffe, 41, 1 (1988) 44-47.
195. Björk, F., ve Stenberg, B., Comparison of Mechanical and Thermal Properties of Phosphonitrilic Fluoroelastomer and Fluorosilicone Rubber, Plastics and Rubber Processing and Applications, 9 (1988) 227-232.
196. Björk, F., Dickman, O., ve Stenberg, B., Long-Term Studies of Rubber Materials by Dynamic Mechanical Stress Relaxation, Rubber Chemistry and Technology, 62, 3 (1989) 387-425.
197. Othman, A.B., ve Hepburn, C., Stress Relaxation Measurement of Rubber in Tension –A New Technique, Polymer Testing, 11 (1992) 47-59.
198. Davies, C.K.L., De, D.K., ve Thomas, A.G., Characterization of the Behavior of Rubber for Engineering Design Purposes: Stress Relaxation Under Repeated Stressing, Progress in Rubber and Plastics Technology, 12, 3 (1996) 208-220.

199. Riemersa, D.J., ve Schamhardt, H.C., The Cryo-Jaws, A Clamp Designed for in Vitro Rheology Studies of Horse Digital Flexor Tendons, Journal of Biomechanics, 15 (1982) 619-620.
200. Sharkey, N.A., Smith, T.S., ve Lundmark, D.C., Freeze Clamping Musculo-Tendinous Junctions for in Vitro Simulation of Joint Mechanics, Journal of Biomechanics, 28 (1995) 631-635.
201. Miller, K., How to Test Very Soft Biological Tissues in Extension, Journal of Biomechanics, 34 (2001) 651-657.
202. Hani, İ., Madeni Yağlar ve Petrol Ofisi Ürünleri, 4. Baskı, İstanbul, 2002.
203. Chugani, M.L., Samant, A.R., ve Cerna, M., Labview Signal Processing, 1. Baskı, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998.
204. Christensen, R.M., A Nonlinear Theory of Viscoelasticity for Application to Elastomers, Journal of Applied Mechanics, 47 (1980) 762-768.
205. Lubliner, J., A Model for Rubber Viscoelasticity, Mechanics Research Communications, 12 (1985) 93-99.
206. Simo, J.C., On a Fully Three-Dimensional Finite Strain Viscoelastic Damage Model: Formulation and Computational Aspects, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 60 (1987) 153-173.
207. Ogden, R.W., Mechanics of Rubber-like Solids, Proceedings of the 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 2004, Warsaw, Poland.
208. Miehe, C., Discontinuous and Continuous Damage Evolution in Ogden-Type Large-Strain Elastic Materials, European Journal of Mechanics A.Solids, 14, 5 (1995) 697-720.
209. Haupt, P., and Sedlan, K., Viscoplasticity of Elastomeric Materials: Experimental Facts and Constitutive Modelling, Archieve of Applied Mechanics, 71 (2001) 89-109.
210. Miehe, C., ve Keck, J., Superimposed Finite Elastic-Viscoelastic-Plastoelastic Stress Response with Damage in Filled Rubbery Polymers. Experiments, Modeling and Algorithmic Implementation, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48 (2000) 323-365.
211. Lion, A., Constitutive Modeling in Finite Thermoviscoplasticity: A Physical Approach Based on Nonlinear Rheological Models, International Journal of Plasticity, 16, 5 (2000) 469-494.

212. Kar, K.K., ve Bhowmick, A.K., High Strain Hysteresis Loss of Rubber Vulcanizates Under Pure Shear and Constrained Extension and Influence of Filler, Rubber Chemistry and Technology, 73, 1 (2000) 56-73.
213. Mercurio, A., ve Tobolsky, A., Stress Relaxation Studies of Scission in Rubber Vulcanizates, Rubber Chemistry and Technology, 33, 1 (1960) 72-77.
214. Tobolsky, A.V., Stress Relaxation Studies of the Viscoelastic Properties of Polymers, Chapter: 2, in Rheology—Theory and Applications, Ed. Erich, F.R., Vol: 2, 1969, 63-81.
215. Derham, C.J., ve Thomas, A.G., Creep of Natural Rubber Vulcanizates Filled With Carbon Black, Nature, 218, 5136 (1968) 81-81.
216. Gent, A.N., Relaxation Processes in Vulcanized Rubber. III. Relaxation at Large Strains and the Effect of Fillers, Rubber Chemistry and Technology, 36, 3, (1963) 697-708.
217. Sircar, A.K., Voet, A., ve Cook, F.R., Relaxation of Stress and Electrical Resistivity in Carbon-Filled Vulcanizates at Moderate and High Extensions, Rubber Chemistry and Technology, 44, 1 (1971) 185-198.
218. Voet, A., Cook, F.R., ve Sircar, A.K., Relaxation of Stress and Electrical Resistivity in Carbon-Filled Vulcanizates at Minute Shear Strains, Rubber Chemistry and Technology, 44, 1 (1971) 175-184.

ÖZGEÇMİŞ

Vahap VAHAPOĞLU; 1975 yılında ANTALYA'nın Alanya ilçesinde doğdu. İlk ve Orta öğrenimi Alanya'da tamamladı. 1991 yılında Alanya lisesinden mezun oldu ve aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1995 yılında bu bölümden bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans programına kaydoldu. 1996 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1998 yılında Yüksek Lisans programını tamamlayarak aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında doktora başladı. 2003 yılında Araştırma görevlisi kadrosundan ayrılıp D.S.İ. XXII. Bölge Müdürlüğüne geçiş yaptı. Halen D.S.İ. XXII. Bölge Müdürlüğü, Makine, İmalat ve Donatım Şube Müdürlüğü, Merkez Atelyede, Atelye Mühendisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.