

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EPDM SENTETİK KAUCUĞUNUN GERİLME GEVŞEMESİ  
DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Müh. Uğur MAZLUM**

**EKİM 2008  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EPDM SENTETİK KAUCUĞUNUN GERİLME GEVŞEMESİ DAVRANIŞININ  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Mak. Müh. Uğur MAZLUM**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Makina Yüksek Mühendisi”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.09.2008  
Tezin Savunma Tarihi : 23.10.2008**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sami KARADENİZ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU**

**Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2008**

## ÖNSÖZ

Kauçuk türü malzemeler elastikiyetlerinin yanında birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaya elverişli olmalarından dolayı tercih edilmektedir. Bu çalışmada kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden gerilme gevşemesi davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmayla EPDM kauçuğun oda sıcaklığındaki gerilme gevşemesi hakkında veri elde edilmiştir.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Sami KARADENİZ'e, tez çalışmamda yol gösterici olan Dr. Vahap VAHAPOĞLU'na ve ayrıca deney süresince yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Recep GÜMRÜK'e tüm yardım ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Uğur MAZLUM  
Trabzon 2008

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar (ÇİZELGELER) DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kauçuğun Tarihsel Gelişimi .....	1
1.3. Kauçukların Sınıflandırılması .....	3
1.3.1. Doğal Kauçuk(NR).....	4
1.3.2. Stiren-Bütadien Kauçuğu(SBR) .....	5
1.3.3. Bütadien Kauçuğu(BR) .....	6
1.3.4. Butil Kauçuk(IIR).....	6
1.3.5. Isopren Kauçuğu(IR).....	7
1.3.6. Kloropren Kauçuğu(CR) .....	7
1.3.7. Akrlonitril-Bütadien Kauçuk(NBR).....	8
1.3.8. Etilen-Propilen-Dien Kauçuğu(EPDM) .....	9
1.3.8.1. EPDM'nin Kimyasal Yapısı ve Özellikleri.....	9
1.3.8.2. EPDM'nin Kullanım Alanları .....	12
1.4. Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Deneyler .....	13
1.5. Gerilme Gevşemesi.....	18
1.5.1. Genel Davranış ve Ölçümü .....	18
1.5.2. Gerilme Gevşeme Modeli ve Gevşeme Zamanları.....	23
1.5.3. Gerilme Gevşemesine Sıcaklık ve Camsı Duruma Geçişin Etkileri .....	24
1.5.4. Molekül ağırlığının ve Çapraz Bağın Etkileri .....	24
1.5.5. Kristalleşmenin Etkileri.....	25

1.5.6.	Uzamanın Etkileri.....	26
1.5.7.	Sertliğin Etkileri .....	26
1.6.	Tezin Amacı ve Kapsamı .....	27
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
2.1.	Giriş .....	28
2.2.	Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği.....	28
2.3.	Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği Programı.....	32
2.3.1.	Mullins Etkileri Deneyi Programının Tanıtılması .....	34
2.3.2.	Gerilme Gevşemesi Deneyi Programının Tanıtılması.....	36
2.4.	Gerilme Gevşemesi Deney Prosedürü ve Deney Koşulları.....	38
2.5.	Deneyde Kullanılan Malzemeler .....	41
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	42
3.1.	Gerilme Gevşemesi Deneyleri.....	42
3.1.1.	EPDM Kauçuk Deneyleri.....	42
3.1.1.1.	Shore A60 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri .....	42
3.1.1.2.	Shore A70 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri .....	61
3.1.1.3.	Shore A80 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri .....	80
3.1.1.4.	Shore A60, 70, 80 Sertlik Deneyleri Kıyaslama .....	98
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	105
4.1.	Sonuçlar .....	105
4.2.	Öneriler.....	106
5.	KAYNAKLAR.....	107

ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında Etilen Propilen Dien (EPDM) kauçuğunun oda sıcaklığındaki gerilme gevşemesi davranışının sertlikle ilişkisi deneysel olarak incelenmiştir. EPDM kauçuklar endüstride özellikle kapı-cam fitili, sünger fitil, radyatör ve ısıtma hortumları, beyaz eşya, körük ve contalar, konveyör kayışları, tank ve silindir kapakları gibi çok yaygın uygulama alanı bulan bir mühendislik malzemesidir.

Çalışmada, çeşitli sertlikteki EPDM numuneler farklı yükleme programlarına tabi tutularak gerilme gevşemesi davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmayla, göreceli olarak kısa yükleme sürelerinde elde edilen sonuçlardan yararlanılarak uzun süreli gerilme gevşemesi tahminlerinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, çalışmada incelenen yükleme programları için aynı sertlikteki EPDM kauçukların uygulamada karşılaşılabilecek uzama oranları sınırları içindeki gerilme gevşemesi davranışlarının aynı bir eğriyle temsil edilebileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kauçuk, EPDM kauçuğu, Sertlik, Elastomer, Gerilme Gevşemesi, Uzama Oranı

## **SUMMARY**

### **Experimental Investigation of the Stress Relaxation Behaviour of EPDM Synthetic Rubber**

In this thesis, the effects of the hardness on the stress relaxation behaviour of EPDM rubber at the room temperature were experimentally investigated. EPDM rubber show outstanding heat, ozone and weather resistance and has excellent electrical properties. Therefore this rubber as an elastomer is an engineering material that has wide range of applications in industry such as door and window seals, radiator, garden and heating hoses, tubing, washers, belts, electrical insulation, roofing membrane and rubber mechanical goods.

In the study, stress relaxation experiments were carried out for different loading programs by using EPDM specimens having different hardness. As a result is found that it is possible to make a stress relaxation estimate by using the data obtained for short duration of stress relaxation experiments. In addition, for the loading programs that were implemented in this study, it is shown that the stress relaxation curves obtained at different stretch ratios may be represented by a single representative curve for EPDM specimens having the same hardness.

**Key Words:** Rubber, EPDM Rubber, Hardness, Elastomers, Stress Relaxation, Stretch Ratio

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. SBR'nin açık formülü .....	5
Şekil 2. EPM'nin kimyasal yapısı .....	10
Şekil 3. EPDM'nin kimyasal formülü .....	11
Şekil 4. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler .....	15
Şekil 5. Tek eksenli çekme deformasyonları.....	16
Şekil 6. Basit çekme deneyi genel prensibi .....	17
Şekil 7. Gerilme gevşemesi deneyleri .....	20
Şekil 8. Sabit uzama oranında gerilme-zaman verileri için tanımlamalar.....	21
Şekil 9. Maxwell modeli.....	23
Şekil 10. Tek eksenli çekme deney düzeneği krokisi .....	29
Şekil 11. Bilgisayar programına ait algoritma.....	33
Şekil 12. Mullins etkileri deneyinin bilgisayar ekran görüntüsü.....	36
Şekil 13. Gerilme gevşemesi deneyinin bilgisayar ekran görüntüsü.....	38
Şekil 14. $\lambda= 2.5$ değerine kadar direkt uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü.....	39
Şekil 15. Malzemeye uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü .....	40
Şekil 16. Malzemeye uygulanan ön deformasyon prosedürlü gerilme gevşemesi deney prosedürü.....	40
Şekil 17. Deneyde kullanılacak EPDM numune boyutları.....	41
Şekil 18. Shore A60 sertlik değerinde a) 25400, b) 36000, c) 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafikleri .....	44
Şekil 19. Shore A60 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	45
Şekil 20. Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 2.5$ uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen grafiğin gösterimi .....	46
Şekil 21. Shore A60 sertlik değerinde a) $\lambda= 1.5$ , b) $\lambda= 2.0$ , c) $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	47
Şekil 22. Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	48
Şekil 23. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman	



grafikleri .....	50
Şekil 24. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	50
Şekil 25. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	51
Şekil 26. Shore A60 sertlik değerinde Şekil 15'deki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi.....	52
Şekil 27. Shore A60 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. , b) 10. ve c) 15. yükleme boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi.....	53
Şekil 28. Shore A60 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	54
Şekil 29. Shore A60 sertlik değerinde a) $\lambda= 1.5$ , b) $\lambda= 2.0$ , c) $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	55
Şekil 30. Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	56
Şekil 31. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	57
Şekil 32. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	58
Şekil 33. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	58
Şekil 34. Shore A60 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi.....	59
Şekil 35. Shore A60 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi .....	59
Şekil 36. Şekil 35'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi .....	61
Şekil 37. Shore A70 sertlik değerinde a) 25400, b) 36000, c) 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı çizilmiş hali .....	63
Şekil 38. Shore A70 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	64
Şekil 39. Shore A70 sertlik değerinde $\lambda= 2.5$ uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen	

grafiğin gösterimi .....	65
Şekil 40. Shore A70 sertlik değerinde a) $\lambda = 1.5$ , b) $\lambda = 2.0$ , c) $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	66
Şekil 41. Shore A70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme- zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	67
Şekil 42. EPDM kauçuk malzemesinin Shore 70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	68
Şekil 43. EPDM kauçuk malzemesinin Shore 70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	69
Şekil 44. EPDM kauçuk malzemesinin Shore 70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	69
Şekil 45. Shore A70 sertlik değerinde Şekil 15'deki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi.....	70
Şekil 46. Shore A70 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. , b) 10. ve c) 15. yükleme boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi.....	71
Şekil 47. Shore A70 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	72
Şekil 48. Shore A70 sertlik değerinde a) $\lambda = 1.5$ , b) $\lambda = 2.0$ , c) $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	73
Şekil 49. Shore A70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	74
Şekil 50. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	75
Şekil 51. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri.....	76
Şekil 52. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde $\lambda = 1.5$ , $\lambda = 2.0$ , $\lambda = 2.5$ 'da 1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	76
Şekil 53. Shore A70 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi.....	77
Şekil 54. Shore A70 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi .....	77
Şekil 55. Şekil 54'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi .....	79

Şekil 56. Shore A80 sertlik değerinde a) 25400, b) 36000, c) 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı çizilmiş hali .....	81
Şekil 57. Shore A80 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	82
Şekil 58. Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 2.5$ uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen grafiğin gösterimi .....	83
Şekil 59. Shore A80 sertlik değerinde a) $\lambda= 1.5$ , b) $\lambda= 2.0$ , c) $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	84
Şekil 60. Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	85
Şekil 61. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	86
Şekil 62. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	87
Şekil 63. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	87
Şekil 64. Shore A80 sertlik değerinde Şekil 15'deki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi .....	88
Şekil 65. Shore A80 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. , b) 10. ve c) 15. yükleme boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi .....	89
Şekil 66. Shore A80 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	90
Şekil 67. Shore A80 sertlik değerinde a) $\lambda= 1.5$ , b) $\lambda= 2.0$ , c) $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi .....	91
Şekil 68. Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi .....	92
Şekil 69. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	93
Şekil 70. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	94
Şekil 71. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde $\lambda= 1.5$ , $\lambda= 2.0$ , $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	94

Şekil 72. Shore A80 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi.....	95
Şekil 73. Shore A80 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi .....	95
Şekil 74. Şekil 73'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi .....	97
Şekil 75. Şekil 14'teki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi .....	98
Şekil 76. Şekil 15'deki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi .....	99
Şekil 77. Şekil 16'daki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi .....	100
Şekil 78. Şekil 75 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri .....	101
Şekil 79. Şekil 76 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri .....	102
Şekil 80. Şekil 77 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri .....	102
Şekil 81. Şekil 75'teki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	103
Şekil 82. Şekil 76'daki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	103
Şekil 83. Şekil 77'deki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri .....	104

## TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. EPDM'nin özellikleri .....	11
Tablo 2. Tek eksenli çekme deney düzeneğinin özellikleri.....	30
Tablo 3. Deney düzeneği kasnak grupları .....	31
Tablo 4. Shore A60 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri.....	48
Tablo 5. Shore A60 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri .....	56
Tablo 6. Shore A70 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri.....	67
Tablo 7. Shore A70 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri .....	74
Tablo 8. Shore A80 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri.....	85
Tablo 9. Shore A80 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri .....	92

## SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Denklem sabiti
b	: Denklem sabiti
BR	: Polibütadien kauçuk
c	: Denklem sabiti
CR	: Neopren kauçuk
d	: Denklem sabiti
DCPD	: Dicyclopentadiene monomeri
E	: Gevşeme modülü
ENB	: Ethylidene norbornene monomeri
EPM	: Etilen-propilen monomer
EPDM	: Etilen-propilen dien monomer
HD	: Hexadien monomeri
IR	: Isopren kauçuğu
IIR	: Butil kauçuk
IRHD	: International rubber hardness degrees
ML	: Money viskozitesi
NBR	: Nitril bütadien kauçuk
NR	: Doğal kauçuk
$\eta$	: Viskozite
PTR	: Polisülfid kauçuğu
SBR	: Stiren-bütadien kauçuğu
Tg	: Camsı geçiş sıcaklığı
t	: Zaman
$\sigma$	: Mühendislik gerilmesi
$\sigma_0$	: Başlangıçtaki gerilme değeri
$\Delta\sigma$	: Gerilme azalması
$\tau$	: Gevşeme zamanı
L <sub>0</sub>	: Numune ilk boyu
L	: Numune boyu
$\dot{L}$	: Numune boyu değişim hızı
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme

$\lambda$  : Uzama oranı  
 $\alpha$  : Açı (derece cinsinden)

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Kauçuk malzemesi günlük yaşamda artan kullanım alanlarıyla pek çok uygulamada kullanılan bir malzemedir. Metallerin alternatifi olması, metallerin kullanılmadığı yerlerde kullanım kolaylığı sağlamasından dolayı pek çok avantajları vardır. Kauçuk malzemesi bazı tropik bitkilerin sütümsü öz suyundan (lâteks) doğal halde veya petrol ve alkolün karıştırılması sonucu suni olarak elde edilen bir malzeme olarak tanımlanabilir. Esas itibarıyla *Hevea Brasilliensis* ağacından elde edilen malzemeye denk gelir. Günümüzde ise uygulanan yükün serbest bırakılmasıyla tekrar eski konumuna gelebilen kauçuk türü malzemeler için kullanılmaktadır [1].

### 1.2. Kauçuğun Tarihsel Gelişimi

Kauçuk malzemesinin ilk olarak yapılan kazılar neticesinde 6. yüzyılda Aztekler tarafından kullanıldığı anlaşılmaktadır. Avrupalıların ilk defa kauçuk ile tanışmaları Kristof Kolomb'un 1493–1496 yılları arasında Amerika kıtasına yaptığı ikinci yolculuk sırasında Haiti adasındaki yerlilerin elastik reçineden yapılmış bir topla oynadıklarını görmesi neticesinde olmuştur. Maya medeniyeti ile ilgili araştırmalar bu oyunun 11. yy.'a dayandığını gösterir. Juan De Torquemada 1615'de yayınlanan eserinde Meksika yerlilerinin Ule isimli ağacın lâteksinden *Ulei* isimli su geçirmez bir malzeme ürettiklerini yazmaktadır[2].

18. yüzyılda o zamanın inanişına göre kare şeklinde olan dünyanın daha sonradan bazı bilim adamları tarafından küresel olduğu hipotezi ortaya atılınca bunu araştırmak için Fransız Bilimler Akademisi dünyanın şekli konusunda araştırmalar yapmak üzere 1735 yılında Charles Marie de la Condamine ve bir grup araştırmacıyı Ekvatorun başkenti olan Quito'ya diğer bir grup araştırmacıyı ise kuzey kutbuna göndermiştir. Bu seyahatler esnasında araştırmacılardan Charles Marie de la Condamine, o zamana kadar hiç görmemiş olduğu kauçukla Quito'da karşılaşmıştır ve muz yapraklarıyla sarılmış kauçuk meşalelerin akşamları aydınlanmak amacıyla kullanıldığını görmüştür. 1791 yılında Grossart, kauçuk



şeritleri ısıtıp eterle yapıştırarak kauçuk tüpler imal etmiştir. 1813 yılında ise Amerika da kauçuk ile ilgili ilk patent alınmıştır [3].

Kauçuk endüstrisinde Thomas Hancock; [1786–1865] mastikasyon ve mastikasyon makinasını bulmasından dolayı kauçuk sanayisinde adı çok anılanlardan biri olmuştur. Hancock ilk deneysel çalışmalarına 1819'da başlamıştır. Ham kauçuktan kestiği şeritlerden askı, çorap lastiği, ayakkabı tabanı vb. kauçuk eşyalar yapmış ve görmüştür ki kauçuk eşyalar yaparken çok fazla atık kauçuk kalıyor. Atık kauçukları değerlendirme düşüncesini ise 1820 yılı yazında yapmış olduğu makinayla sonuçlandırmıştır. Yapmış olduğu bu makine bir karıştırıcıydı. Atık haldeki ufak katı lastik parçaları makinanın içine atıp karıştırdığında ayrı ayrı lastik parçalar yerine tek bir biçimsiz katı lastik parçasını elde ettiğini görmüştür [4].

1839 yılında ise Charles Goodyear bir gün soba üzerindeki sülfür ve doğal kurşun oksit (kurşun monoksit, PbO) karışımı içine kazayla kauçuğu koymasıyla vulkanizasyon işlemini keşfetmiştir. Böylelikle kauçuğun sert ve elastik olmasını ayrıca soğuk ve sığa stabil hale gelmesini bu işlemlerle başarmıştır. Bu çalışmayla 1843 yılının sonunda patent başvurusunda bulunmuş ve 15 Haziran 1844 yılında Amerika'da patent almıştır. Hancock ise 1840 yılında vulkanizasyonu bulmuştur. Thomson 1845 yılında hava yastığını ve Dunlop 1898'de hava ile şişen ilk bisiklet lastiğini yaparak kauçuğa yeni uygulama sahaları açmıştır.

Faraday 1826'da doğal kauçuğun deneysel formülünün  $C_5H_8$  olduğunu açıklamıştır. 1860 yılında Liebig ve arkadaşları doğal kauçuğu damıtılarak berrak, saf bir madde olan ve adı daha sonra isopren olarak anılacak bir malzeme elde ettiler. 1879 yılında Bouchardat bu malzemeyi polimerleştirerek kauçuk gibi bir malzeme üretmiştir. 1884'te Tilden terebentin yağından isopren elde ederken, 1900 yılında da Kondakow 2–3 dimetilbütadienin uzun süre bekletildiği zaman polimer bir malzeme haline geldiğini gözlemlemiştir. 1910 yılında Strange ve Matthews bütadieni polimerize edip ilk patenti almışlar ve günde 1–2 kg kauçuk üretimine başlamışlardır [2].

Sentetik kauçuk doğal kauçukta başka ülkelere olan bağımlılıktan dolayı doğmuştur. Sentetik kauçuk çalışmaları ilk olarak 1879 yılında yapılmasına rağmen, esas gelişimi 1930'lu yıllarda olmuştur. Almanlar bütadienin sodyum içerisinde polimerizasyonundan B tipi Metil kauçuğu üretmişlerdir. Bu kauçuğa “Buna” ismini vermişlerdir. 1930'lu yılların başında Eduard Tschunter ve Walker Bock, %25 bütadien yerine, yine ucuz bir malzeme olan, stiren katarak emülsiyon polimerizasyonuna tabi tutmuşlar ve elde ettikleri bu yeni

ürünü *Buna S* (S=Stiren-phenyletilen,  $C_6H_5CH = CH_2$ ) sentetik kauçuğu olarak adlandırmışlardır. Elde edilen bu malzemenin bazı eksik özelliklerinden dolayı Buna-S kauçuğundaki stiren yerine daha pahalı olan akrilonitril kullanarak, *Buna-N* (N=Nitrile-acrylonitrile,  $H_2C = CHCN$ ) veya *Pernunan* sentetik kauçuğunu elde etmişlerdir [6].

2. Dünya Savaşı'nda, Japonların Güney Doğu Asya'yı işgal etmeleri, doğal kauçuk temininde zorluklarla karşılaşan Amerika ve müttefiklerini sentetik kauçuk araştırmalarına zorlamıştır.

Savaş başlarında Buna kauçuğu patentleri I.G. Farbenindustrie tarafından Standart Oil firmasına emanet edilmiştir. Amerika bu firmadan yapmış olduğu istihbarat çalışmalarıyla belirli bilgilere sahip olarak ve bu bilgileri kendi bünyesinde geliştirerek GR-S kauçuğu imal edildi. 1947 yılında Butil kauçuk üretilmiştir.

Sentetik kauçuk üretiminde soğuk polimerizasyonun keşfi çok önemli bir yer tutar. 1948'de Butadien ve Stiren +5, -10 °C ve hatta daha düşük sıcaklıklarda kopolimerize edildiler. Dupont firması 1952'de Hypalon üretmeye başlamıştır.

1954 yılında Almanya'da Ziegler ve İtalya'da Natta yeni bir polimerizasyon katalizörü geliştirmişler ve kullanmışlardır. 1962 yılında EPDM kauçuklar üretilmiştir. Bu buluş 1963 yılında bu iki bilim adamına Nobel ödülü getirmiştir.

1970'li yıllardan sonra ise, silikon kauçuk, epiklorohidrin, poliüretanlar, florlu elastomerler kullanılmaya başlandı [2].

### 1.3. Kauçukların Sınıflandırılması

1900'lü yıllardan itibaren teknolojik gelişmelerin hızlı bir şekilde artması, yeni teknolojik ürünleri de beraberinde getirmiştir. Bu durumun akabinde daha önce belirli sebeplerden pek kullanılmayan kauçuk malzemeler sanayide birçok kullanım alanı bulmuştur. Kauçuk ihtiyacının artması, doğal kauçuktaki üretimin belirli ülkelerde olması ve savaş yıllarının doğurduğu ihtiyaç, araştırmacıları sentetik kauçuk üretimine yöneltmiştir. Pek çok alanda üretilen kauçuk ürünlerden istenilen fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin, her bir üründe farklı olması ve istenilen özelliklerin tek bir kauçuk türü tarafından karşılanamaması farklı özelliklere sahip birçok sentetik kauçuk türlerinin araştırılmasına ve sonuçta yeni sentetik kauçuk malzemelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu sentetik kauçuk türleri de kendilerine belirli oranda kullanım alanı bulmuşlardır. Neticede bazı sentetik kauçuk türleri diğerlerine nazaran daha da fazla

alanlarda kullanılıp ülkelerin ihtiyacına cevap verecek seviyeye gelmiştir. En fazla tüketilen sentetik kauçuk türleri, sırasıyla, Stiren-Bütadien kauçuğu (SBR), Bütadien kauçuğu (BR), Butil kauçuğu (IIR), Etilen-Propilen kauçuğu (EPM ve EPDM), İsoopren kauçuğu (IR), Kloropren kauçuğu (CR), Akrlonitril-Bütadien kauçuğu (NBR) ve Polisülfid (PTR) sentetik kauçukları incelenerek genel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

### 1.3.1. Doğal Kauçuk(NR)

Doğal kauçuk tüm elastomerlerin ilk örnekleridir. Hevea brasiliens ağacının lâteksinden elde edilir. Lâteks, ağaç kabuğunun özel bıçakla çizilip özel kapta toplanması ile elde edilir. Normal koşullarda çizilen ağaçtan 4 saat kadar lâteks akar. %80 kadarı üretimde kullanılır geri kalan ertesı gününe kadar akar ve pıhtılaşır. Toplanan lâtekse koruyucu katılarak akışkan kalması sağlanır.

Doğal kauçuğun en basit formülü 1826'da Faraday tarafından  $C_5H_8$  olarak açıklanmıştı. Doğal kauçuğun molekül yapısı %99 cis-1,4 poliisoprendir.

Doğal kauçuk yapısındaki özellikler dolayısıyla gerilme uygulandığında veya düşük sıcaklıklarda kristalleşme eğilimi gösterir. Gerilme gevşetildiğinde ve ısıtıldığında kristalleşme kalkar.

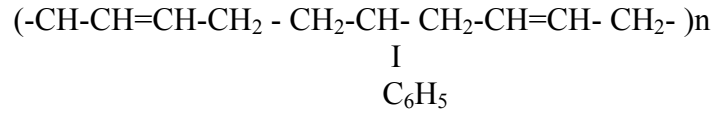
Doğal kauçuğun özelliklerini belirleyen camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ )  $\approx 75^\circ C$  civarında olması, doğal kauçuktaki düşük sıcaklık özelliklerinin çok iyi olmasını sağlamaktadır.

Çiğ mukavemeti ve tekstile iyi yapışma özelliği bakımından doğal kauçuk çok iyidir. Bu iki özelliği ile doğal kauçuk, lastik endüstrisinde birçok açıdan aranan malzemedir.

Doğal kauçuk çok iyi çekme dayanımı, elastisite, yırtılma dayanımı ve yorulma özelliğine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, dinamik uygulamalarda çok sık kullanılmaktadır.(motor takozları, köprü takozları, lastik karkasları gibi). Fakat doğal kauçuğun özellikle ısı ve ozon yaşlanma dayanımı ve yağlara ve solventlere dayanımı kötüdür. Yaşlanma özelliği uygun vulkanizasyon seçimi ve koruyucular ile iyileştirilebilir. Organik solventlerle kullanılmamasına karşı, polar sıvılara dayanıklıdır [5].

### 1.3.2. Stiren-Bütadien Kauçuğu(SBR)

Dünyadaki sentetik kauçukların yarısından fazlası Stiren-Bütadien kauçuktur. Endüstriyel olarak 1942 yılından beri üretilmektedir. SBR kauçuğu 75/25 oranında bütadien/stiren karışımlarının emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilmektedir. Polimer zinciri Bütadien ve Stiren polimerlerinin gelişigüzel karışımından oluşmaktadır. Yapı düzensiz olduğundan kristalleşme önlenmektedir. SBR kauçukları sıcak ve soğuk olmak iki gruba ayrılmaktadır. SBR kauçuklarının en çok kullanılanı +5 °C'de polimerleşen soğuk SBR'dir. Sıcak SBR ve çözelti SBR ancak %20 oranında kullanılmaktadır. Soğuk SBR kauçukları sıcak SBR kauçuklarından daha iyi fiziksel özelliklere sahip olduğundan otomobil lastiklerinde kullanılmaktadır [6].



Şekil 1. SBR'nin açık formülü

Genel olarak SBR kauçukları uygulamada doğal kauçuğun yerine kullanılmaktadır. SBR kauçuğunun karışım oluşturma özelliği ve daha kısa zamanda gerçekleşmesi bakımından doğal kauçuktan daha önemli özelliklere sahiptir. Kolay eritilebilirler. Elastik davranışları doğal kauçuk kadar iyi olmasa da ısıya dayanım, yaşlanma ve aşınma özellikleri doğal kauçuktan üstündür. Yakıt ve yağlara dayanıksız olmasına karşın polar olmayan sıvılara, çözücülere seyreltik asit ve bazlara dayanıklıdır. Sanayide en çok otomobil tekerleklerinde kullanılmakla birlikte V kayışı, ayakkabı tabanı, döşemelik, elektrik yalıtım malzemesi, boru contası, körük malzemesi, fren ve debriyaj balatası, şeffaf bantlar yapıştırıcılar ve konveyör bantı malzemesi olarak kullanılmaktadır [6].

Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR) Kullanım Alanları:

SBR 1500: Otomobil lastiği, taşıyıcı bant, hortum

SBR 1712: Ayakkabı taban ve ökçesi, mekanik eşyalar, oto paspası

SBR 1502: Oto lastiği, Beyaz yanak ve Karkas kısmı, mekanik eşya, lavabo contası, çizme, galoş, oyuncak, ayakkabı tabanı, çamaşır makinası merdanesi, spor eşyalar, lastik örtüler

SBR 1509: Ayakkabı sanayii

SBR 1778: Yer döşemesi, açık renkli çizme, ayakkabı tabanı, lavabo contası, spor eşyalar, suni sünger, oto lastiği[9].

### 1.3.3. Bütadien Kauçuğu(BR)

Yalnız başlarına kullanılmaları zor olan bu kauçuk türü diğer kauçuk türleriyle karıştırılarak kullanılır. BR kauçuğunun çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve tekrarlanan esneme gerilmelerine dayanımı SBR ve doğal kauçuğa göre kötüdür. Camsı geçiş sıcaklığının düşük olmasından dolayı düşük ısılarda çok iyi elastik özellikler verirler. İşlenmesi zordur. Aşınmaya dayanımı iyidir. Islak zemin üzerinde tutunma özelliği kötü olduğundan, yuvarlanma bantları imalatında SBR ve NR ile kullanıldığında önemlidir.

BR kauçuğunun %90'ı tekerlek imalatında kullanılmaktadır. Bunun yanında konveyör bant ve hortum imalatı, ayakkabı tabanı, yüksek aşınma mukavemeti istenen parçaların üretimi, golf topları ve yer döşemesi imalatında kullanılmaktadır [6].

### 1.3.4. Butil Kauçuk(IIR)

Butil kauçuğu isobutilen ve isoprenin kopolimerleridir. Doğal kauçuk gibi normalde amorf olup, uzatıldıklarında bir dereceye kadar kristalin hale gelirler. Bununla birlikte, doğal kauçuktan farklı olarak, butil kauçukları soğuma sırasında kristalize olmazlar. Birçok kauçuklarda olduğu gibi çapraz bağlama, kontrollü özellik sağlamak için gereklidir. Butil kauçuklar gerilme karşısında elastik tepki gösterirler. Elastik tepkideki yavaşlık, taşıt tekerleklerindeki yola tutunma özelliğini artırmada yararlıdır.

Butil kauçuğun en önemli özelliği düşük gaz geçirgenliğidir. Ozon, hava ve neme karşı mükemmel dayanıklılık gösterir. Dielektrik özellikleri ve şok emme kabiliyeti yüksektir. Isı mukavemeti yüksektir. Asitlere, bazlara, hayvansal ve bitkisel yağlara ve bazı esterlere karşı dayanıklılık gösterir.

Doymamışlık oranı 0.6–1.2 mol arasında olanlar sulama hortumu, tank kaplama, orta ve yüksek voltaj kablo imalatı; doymamışlık oranı 1.5–2.0 mol arasında olanlar iç lastik, pişirme takımları, yapışkan üretimi, düşük voltaj ızalasyonu, şok emiciler ve sportif eşya yapımında ve doymamışlık oranı 2.0 mol üzerinde olanlar sünger, konveyör kayışı, ayakkabı altı ve mekanik parça yapımında kullanılmaktadır [6].

### 1.3.5. Isopren Kauçuğu(IR)

Sentetik doğal kauçuk olarak da adlandırılan isopren kauçuğu uzun araştırmalar sonucu 1954 yılında yeni polimerizasyon katalizörlerinin bulunmasıyla elde edilebilmiştir (7).

Katalizör cinsine bağlı olarak farklı özelliklerde isopren üretilmektedir. Günümüzde ise genellikle Ziegler-Natta veya lityum katalizörleri kullanılarak isopren kauçuğu üretilmektedir [8].

Çiğ haldeki isopren kauçuğunun özellikleri doğal kauçuktan kötüdür. Isopren kauçuğu gerilme uygulandığında kristalleşme göstermez ve bu yüzden çiğ mukavemeti kötüdür.

Isopren kauçuğu molekül ağırlığının düşük olmasından dolayı, doğal kauçuğa göre daha hızlı yumuşarlar. Ayrıca proseste daha kolay işlenirler. Ekstrüzyon işlemi daha hızlıdır ve ayna çıkışında şişme daha azdır.

Isopren doğal kauçukla aynı özellikleri taşımasına rağmen renginin iyi, kalitesinin daha az değişken ve kokusuz, daha kolay parçalanabilmesi ve karıştırılması, daha kolay ekstrüzyon, kalıplama ve kalenderleme özellikleri ve düşük histeresis özelliklere sahip olması doğal kauçuktan üstün yanlarıdır. Buna karşın yapışma özelliğinin zayıf, karbon siyahı ile takviye edildiklerinde daha düşük fiziksel değerler vermesi ve daha pahalı olması olumsuz yanlarıdır.

Üretilen isoprenin %60'ı otomobil lastiği imalatında, bunun dışında konveyör kayışı, conta, ayakkabı tabanı ve yer döşeme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Gum karışım olarak ta kauçuk ip, biberon emziği ve çeşitli tıbbi malzemelerin imalatında kullanılmaktadır [6].

### 1.3.6. Kloropren Kauçuğu(CR)

Kloropren kauçuğu (2-klor-1,3-bütadien), gerçek ismi neopren olmasına karşın yaygın olarak bu isimle kullanılır. CR emülsiyon polimerizasyonu ile üretilir. CR genel olarak çinko oksit ve magnezyum oksitle veya su direncini artırmak için kurşun oksitle iyileştirilir. Polimerin yapısında klor bulunması kauçuğun yağa, havaya, ozona ve ısıya dayanıklılığını artırır. Düşük sıcaklık dayanımı ve fiyatının aksine CR kauçuğu doğal kauçuklar kadar çok yönlü olduğu söylenebilir [10].

Kloroprenin en önemli özelliklerinden bir tanesi karbon siyahı katkı maddesi katmadan iyi bir çekme dayanımına sahip olmasıdır. Soğuğa dayanımı, kristalizasyon özelliğine ve camsı geçiş sıcaklığına (-45 °C) bağlıdır. İyi soğuğa dayanım özellikleri istendiğinde, düşük kristalizasyon hızına sahip CR kullanılmalıdır.

Kloropren kauçuğu hortum imalatı (yüksek basınçlı hidrolik ve fren hortumları), conta, motor takozları, tamponlar, profil, taşıyıcı takoz, silecek lastikleri, membranlar, elektrik kablo izolasyonu silindir kaplamaları ve V kayışı imalatında kullanılmaktadırlar [8]. Kristalleşme eğilimi yüksek olanlar yapıştırıcı imalatında kullanılmaktadır.

### **1.3.7. Akrlonitril-Bütadien Kauçuğu (NBR)**

Nitril kauçuğu akrilonitril ve bütadien kopolimerlerinin emülsiyon polimerizasyonuna verilen isimdir. En önemli özelliklerinden biri çoğu yağ ve çözücülere karşı istisnai dayanımıdır. Ayrıca gaz geçirgenliği, abrasyon dayanımı, termal denge doğal kauçuk ve SBR kauçukları gibi genel amaçlı elastomerlerden daha iyidir. Ticari nitril kauçukları akrilonitril/bütadien oranlarına göre 18/82 veya 45/55 oranlarında karışım oluşturabilirler. Akrlonitril oranı arttıkça yağ dayanımı, çözücü dayanımı, çekme mukavemeti, sertlik, abrasyon dayanımı, ısı dayanımı ve gaz geçirgenliği artar [10].

NBR camsı geçiş sıcaklığı T<sub>g</sub>, akrilonitril oranına bağlı olarak, düşük oranlarda (%18) -40°C'den, yüksek oranlarda pozitif değerlere kadar değişebilmektedir. SBR kauçuğu gibi, çekme sırasında kristalize olmaz. Yüksek dayanım elde etmek için katkı maddeleri katılmalıdır. Aşınma, yorulma, yaşlanma dayanımı iyi olmasına karşın yırtılma direnci doğal kauçuktan daha kötü ve elektrik yalıtımı daha düşüktür. Genel olarak petrol esaslı yağlar, gazlar ve aromatik hidrokarbonlara karşı dayanımın gerekli olduğu yerlerde kullanılır [6].

NBR kauçuğu hortum imalatında, conta, bağlantı elemanları, fren balatası imalatında, mil, silindir ve kazan kaplamalarında, konveyör kayışında, işçi elbise ve botlarında kullanılır.

### 1.3.8. Etilen-Propilen-Dien Kauçuğu (EPDM)

Polietilen ve polipropilen gibi polimerlerin kullanımı günümüzde endüstride çok büyük bir yer teşkil etmektedir. Termoplastik polimerler olarak ta adlandırılmaktadır. Belirli seviyelerdeki kristalinite özelliği işlem sıcaklıklarında mukavemet sağlayabilmek için gereklidir. Ancak bu kristalinite proses sıcaklıklarında eriyebilmekte ve malzemeye tekrar form vermek gerekmektedir. Bu termoplastik malzemelerin düşük elastik özellikleri yüksek kristalinitelerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, etilen ve propilen kopolimerleri belirli mukavemet, esneklik ve elastikiyet özelliklerinden dolayı elastomer olarak nitelenmelerini sağlamaktadır. Bu malzemeler genel olarak peroksit ile vulkanize edilen (Etilen-Propilen, EPM) ve hem peroksit hem de sülfür ile vulkanize edilen (Etilen-propilen-dien-monomer, EPDM) malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır.

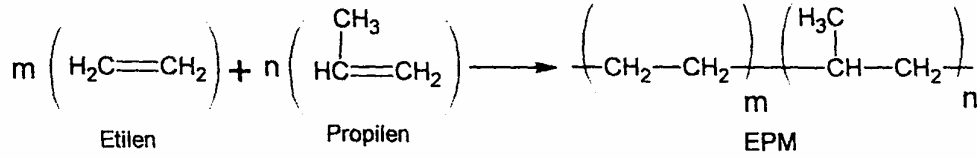
EPM sentetik kauçukları 1961 yıllarının sonlarına doğru küçük parçacıklar halinde üretilmeye başlanılmıştır. O yıllarda kauçuk üzerine çalışma yapan bilim adamlarının büyük bir çoğunluğu peroksit ile vulkanizasyon işleminin farkında değildiler. Elde edilen yeni ürün, EPM kauçukları, yalnızca peroksit ile vulkanize edilebilmekteydi. Yapısında doymamış bağ olmadığından sülfür ile vulkanize edilememekteydi. Bu özellik EPM kauçukları için çok büyük bir eksiklik olarak görülmekteydi. Fakat 1962'li yıllarda bilim adamları etilen-propilen-dien terpolimerlerini, yani EPDM sentetik kauçuklarını, geliştirmişlerdir. Elde edilen bu polimer vulkanize olmaktadır. Bu kauçuklar ticari olarak ilk kez 1963 yılında üretilmeye başlanılmıştır. Ticari olarak, Du Pont firması tarafından Nordel, Uniroyal firması tarafından Royalane, Eni Chem firması tarafından Dutral N, Copolymer Rubber Chemical Corp. Firması tarafından Epsyn, Exxon Chemicals Co. firması tarafından Vistalon, DSM firması tarafından Kelton, B.F. Goodrich Co. Firması tarafından Epcar, Bayer firması tarafından Buna EP ve Chemische Werke Hüls AG firması tarafından Buna AP ticari isimleri altında üretilmektedir [11].

#### 1.3.8.1. EPDM'nin Kimyasal Yapısı ve Özellikleri

Etilen ve propilen monomerleriyle kauçuğumsu, stabil, amorf, yarı kristal ve kristal yapıya sahip elastomerler üretilmektedir. Etilenin propilen ile olan polimerizasyonu sonucu kauçuğun özelliklerine sahip EPM kauçuğu (Etilen-propilen kauçuğu ) ve EPDM ( Etilen propilen dien monomer ) olmak üzere iki elastomeri elde edilmektedir. EPM doymuş



sentetik bir kauçuktur. Polimerin zincir yapısında çift bağ olmadığından ısı, ışık, oksijen ve ozona karşı dayanıklıdır. Ayrıca vulkanize olmayan ve çapraz bağlanmayan EPM kopolimeri termoplastik bir maddedir. Etilen ve propilenin kopolimerizasyonu sonucu Şekil 2’de gösterilen polimer zincirinde çift bağ bulunmayan yani tamamen doymuş bir yapıya sahip olan EPM kopolimeri oluşmuştur [12].



Şekil 2. EPM’nin kimyasal yapısı

EPM’ye karşılık etilen-propilene bağlı olmayan bir dien ilavesiyle etilen propilen terpolimeri olan EPDM elde edilmektedir. Dien’in reaksiyona katılması sonucu Şekil 3’de görüldüğü gibi zincirde çift bağ yani doymamışlık oluşmaktadır. Bu durum peroksitlerin yanı sıra kükürtle vulkanizasyonu ve diğer polimerlerle karıştırılabilme imkânını sağlamaktadır. EPDM dien monomeri olarak

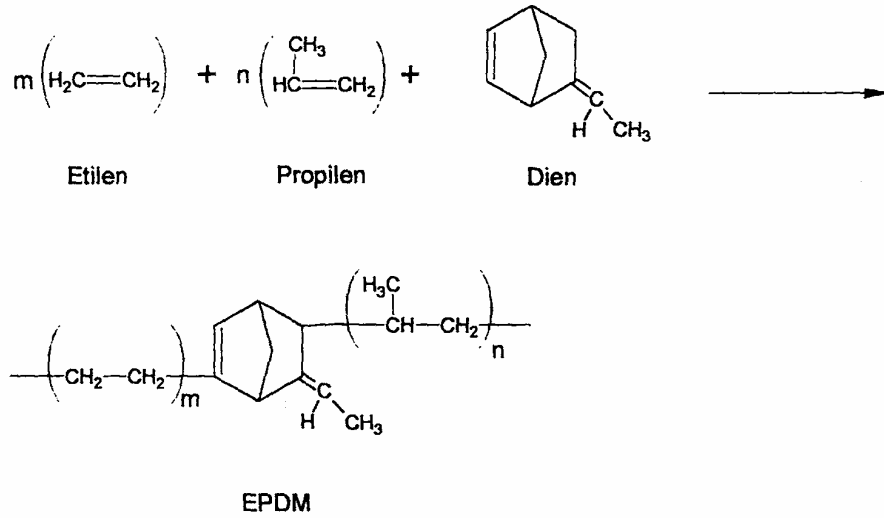
1. 1,4 hexadiene – 1,4 HD
2. Dicyclopentadiene – DCPD
3. Ethylidene norbornene – ENB

kullanılmaktadır. Bu üç durumda da polimerize edilmiş çift bağ molekülün sol tarafında gösterilir. Ethylidene norbornene en hızlı pişme ve çapraz bağlanma yoğunluğu vermektedir. Her 1000 karbon atomu için 4–16 arası çift bağ bulunur. En iyi mekanik özellikler ve en düşük kalıcı deformasyon değerleri, yüksek ENB içeren EPDM kullanımı ile sağlanmaktadır. Bu yüzden hazırlanan reçetelerde yaygın kullanılacak termonomer tipi ENB’dir. Ayrıca birleşmeyi kolaylaştırması ve de sülfür vulkanizasyonuna karşı oldukça büyük reaktivitesi söz konusu olmasından dolayı tercih edilir [12].

EPDM’nin işlenmesi, vulkanizasyonu ve özellikleri polimerin etilen içeriğine, dien içeriğine, molekül ağırlığı ve molekül ağırlığı dağılımına bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 1. EPDM'nin özellikleri

1. Yoğunluğu – gr/m <sup>3</sup>	0.855–0.88
2. Etilen miktarı - %	45–80
3. Dien miktarı - %	0–15
4. Money viskozitesi ML 1+4 125 C	5–200



Şekil 3. EPDM'nin kimyasal formülü

EPDM'nin vulkanizasyondan sonraki özellikleri işleme şartlarına ve karışıma bağlı olarak değişmektedir.

Etilen ve propilen oranının eşit olması amorf yapıda bir polimerin meydana gelmesini, etilenin polimerdeki oranının artması ( % 75 etilen , % 25 propilen gibi ) polimerin kısmen kristal bir yapı göstermesini, yüksek sıcaklıkta ekstrüzyonla kolay işlenmesini ve boyutsal kararlılığının artmasını sağlar. Ancak EPDM'de etilen oranının düşürülmesi, polimerin kristal yapısının azalmasına ve buna bağlı olarak sertlik ve elastisite modülünün azalmasına sebep olmaktadır. EPDM genel olarak ısıya, oksidasyona ve yaşlanmaya karşı üstün direnci olan bir polimerdir. Etilen miktarının düşük olması halinde, EPDM katkı maddeleriyle kolay ve hızlı karışmaktadır. Polimer düşük sıcaklıklarda daha stabildir ve yumuşak olan polimerin kalenderlenmesi ve yoğrulması kolay olmaktadır [12].

Dien miktarının yüksek olması halinde, EPDM kısa sürede kür olmaktadır. Elde edilen vulkanizatın üstün özellikleri bulunmaktadır. Dien içeriğinin düşük olması halinde, EPDM ısıya karşı daha fazla direnç göstermektedir. Ancak yumuşaktır ve elastisite modülü düşüktür.

Viskozitesi yüksek olan yağlar EPDM'nin fiziksel özelliklerini geliştirir, ısı direncini artırır ve büzülmesini azaltır. Bu yağlar elastomerin esnekliğini geliştirir ve düşük sıcaklıklardaki fleksibilitelerini artırır. EPDM'nin yağ emmesi oldukça fazladır.

EPM ve EPDM'nin viskozitesi mooney viskozitesi cinsinden belirtilir ve bu iki elastomerin mooney viskozitesi genel olarak 125 °C sıcaklıkta bir dakikalık ısıtmadan sonra dört dakikada bir ölçülür ve ML ( 1+4 ) 125 °C olarak ifade edilir. Money viskozitesi ve molekül ağırlığı arasında bir orantı bulunmaktadır. Money viskozitesi düşük olan etilen-propilen elastomerlerin molekül ağırlığı düşüktür.

Gerek EPM ve gerekse EPDM ısıya, kimyasallara, oksijene ve ozona karşı oldukça dayanıklıdır.

EPDM'nin elektriksel özellikleri vulkanizasyon sonucunda aynı kalmaktadır. EPM ve EPDM'nin dezavantajları arasında zayıf yapışkanlık özelliğine sahip olmaları yer almaktadır. Bu özellik katkı maddeleriyle giderilmektedir [12].

### **1.3.8.2. EPDM'nin Kullanım Alanları**

Etilen ve propilen monomerlerinin bol miktarda bulunması, ucuz olması ve de mekanik ve fiziksel özelliklerindeki farklılıklar günümüzde EPM ve EPDM kauçuklarını önemli bir ticaret malzemesi yapmıştır. 2000 yılı tüketim miktarı 870.000 ton olan bu malzemelerin ucuz olması kullanımlarını arttırmaktadır. Sürekli tip malzemelerin üretiminde ekstrüzyon yöntemi ile üretim yapılırken tek parçalı malzemeler ise baskı veya transfer kalıplama yöntemi ile üretim gerçekleştirilir. Halka-tipi conta ve sızdırmalık elemanları gerek baskı kalıplama veya kabuk sünger kalıplama yöntemi ile yapılabilir. EPDM günlük yaşamda kapı ve otomotiv camları için profil, sünger fitili, radyatör ve ısıtma hortumları, beyaz eşya körük ve contaları, konveyör kayışları, kablo kaplama, yapıştırıcı, mastik, çatı membranları, tekerlek, ses absorblama malzemesi, tampon, tank kaplama ve silindir kaplamada kullanılmakla birlikte hayatımıza çokça girdiği uygulamalar ve buralarda EPDM kauçuğu kullanılma sebepleri aşağıda belirtilmiştir [11].

- *Profil:* EPDM'in havaya ve ozona karşı direncinin yüksek olması bu malzemelerin otomobillerde, bina pencerelerinde sızdırmazlık elemanı olarak kullanımında ilk aranan malzeme yapmıştır.

- *Boru:* EPDM'in ısıcağa, suya ve ozona dayanıklı olmasından dolayı otomobil motorlarında tercih edilmektedir.

- *Çatı Kaplama:* EPDM'in havaya ve suya karşı direncin dolayı tercih edilmektedir.

- *Motor Kayışı:* Soğuk ve sıcak dayanımı ve dinamik esneklik özelliğinden dolayı tercih edilmektedir.

- *Kablo yapımında:* EPDM'in elektrik yalıtımı, su ve ısıya karşı olan direncinden dolayı tercih edilmektedir.

- *Plastik Modifikasyonlarında:* Soğuk darbe mukavemetinin yüksek olması, plastiğe esneklik verdiği için plastik modifikasyonlarında kullanılmaktadır [11].

Kullanılacak EPDM seçiminde etkili olan iki ana faktör vardır. Bunlar bileşim ve yapısal faktörlerdir. Molekül ağırlığı, Mooney Viskozitesi, etilen/propilen oranı, termonomerin cinsi ve miktarı bileşim faktörlerini belirleyen parametrelerdir. Yapısal faktörleri belirleyen parametreler ise molekül ağırlığı dağılımı, dallanma ve kristallenmedir.

#### 1.4. Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Deneyler

Kauçukla ilgili matematiksel formda belirli bağıntılar bulan araştırmacılar bu fonksiyonun içerisinde yer alan bağıntıların deneysel olarak nasıl ifade edildiğini ne tür bir formda karşımıza çıktığını gözlemleyebilmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kauçuk mekaniğinde deneylerin daha kolay yapılabilmesi ve sonuçların beklenildiği gibi çıkması için safi homojen deformasyona maruz kalmaları sağlanmıştır. Bu da numuneye uygulanan kuvvetlerin numunenin her tarafına eşit olarak dağılmasını sağladığından dolayı sonuçta aynı deformasyona karşı aynı oranda uzama elde edileceğinden uygulanan yük altında numune boyu değişim ölçümleri daha basit olmaktadır.

Literatürde aşağıda da görüldüğü üzere çekme, basma ve kayma deneyleri homojen deformasyon olarak yapılmıştır. Burulma ve çekmeli burulma deneyleri ise homojen olmayan deformasyon olarak yapılmıştır. Literatürdeki birçok deneyler standart olmayan çekme hızında ve numune boyutlarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler içerisinde en basit ve de en yaygın olarak kullanılan ise tek eksenli çekme deneyidir. Bunu yanında tek

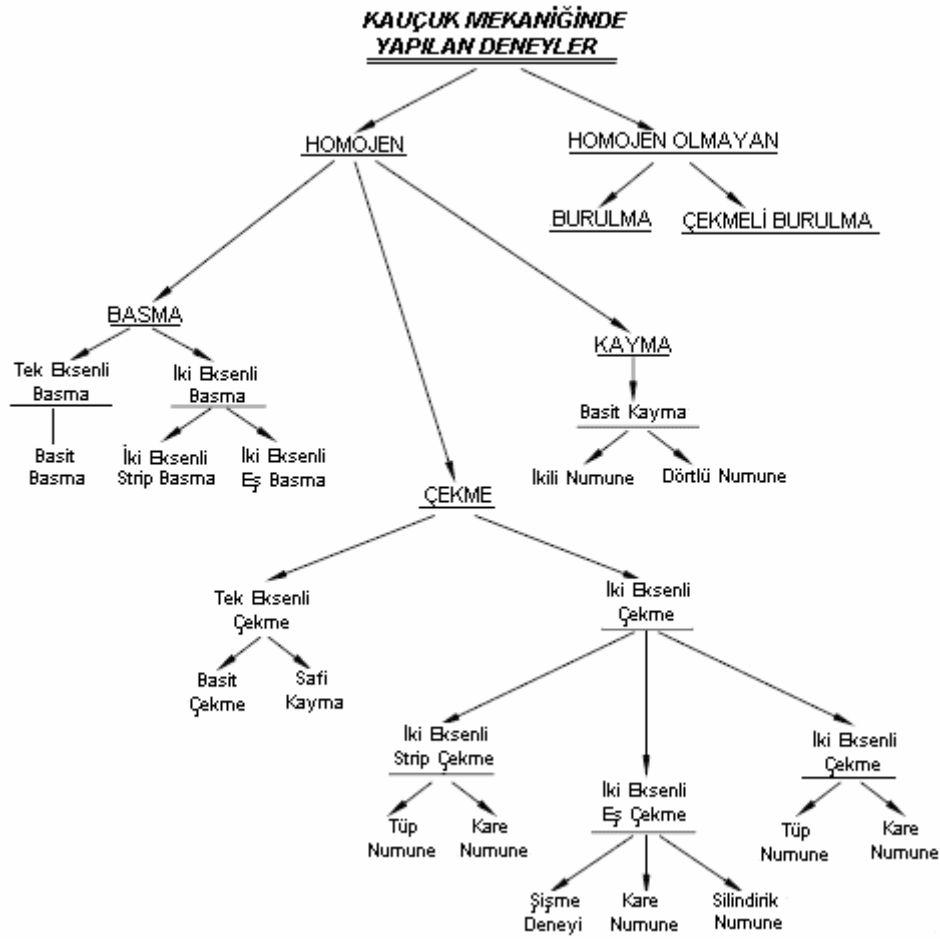
eksenli basma, iki eksenli çekme ve basma, burulma ve kayma deneyleri de yapılmaktadır [13].

Kauçuk türü malzemelerin mekanik özellikleri her zaman araştırma konusu olmuştur. Bunun için yapılabilecek en uygun deneyin hangisi olacağı konusunda yapılan araştırmalar sonucunda çekme deneyleri mevzu bahis olmuştur. Ayrıca Şekil 4'teki grafikten de görüleceği üzere çekme deneyleri 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. Tek eksenli basma deneylerinde basma yüzeylerindeki sürtünmenin oldukça fazla olması nedeniyle de, literatürde tek eksenli basma deneyi yerine, iki eksenli çekme deneyi yapılmaktadır. Yapılan çalışmada, sadece tek eksenli çekme deneyinden basit çekme deneyi gerçekleştirildiğinden bu kısımdaki bilgiler bu deneydeki deformasyon türüne yoğunlaşmıştır [13].

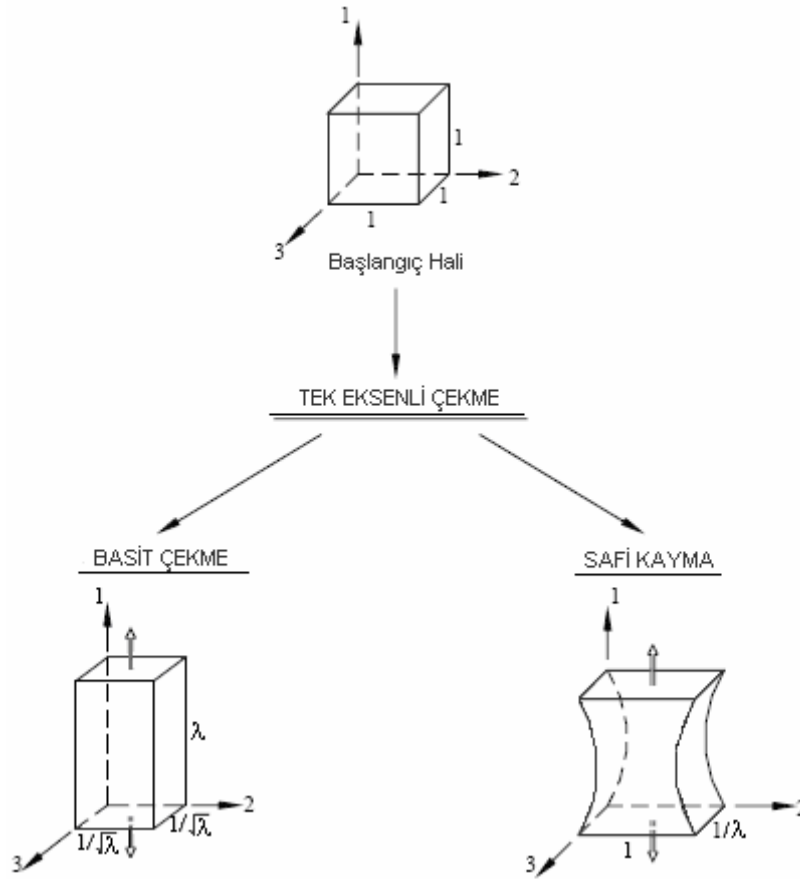


Şekil 4. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler[13]

Literatürde araştırmaları neticesinde kauçuk türü malzemeler için tek eksenli çekme deneyi olarak aşağıdaki deneyler gerçekleştirilmiştir.

- Basit Çekme
- Safi Kayma (Pure Shear)

Yukarıdaki deneylerle ilgili pek çok araştırmacı belli yıllarda araştırmalar yapmışlardır. Bu araştırmalar neticesinde 1805'ten günümüze kadar hem basit çekme hem de safi kayma hakkında bilgi mevcuttur. Şekil 5'de ise tek eksenli çekmede oluşan deformasyon görülmektedir.

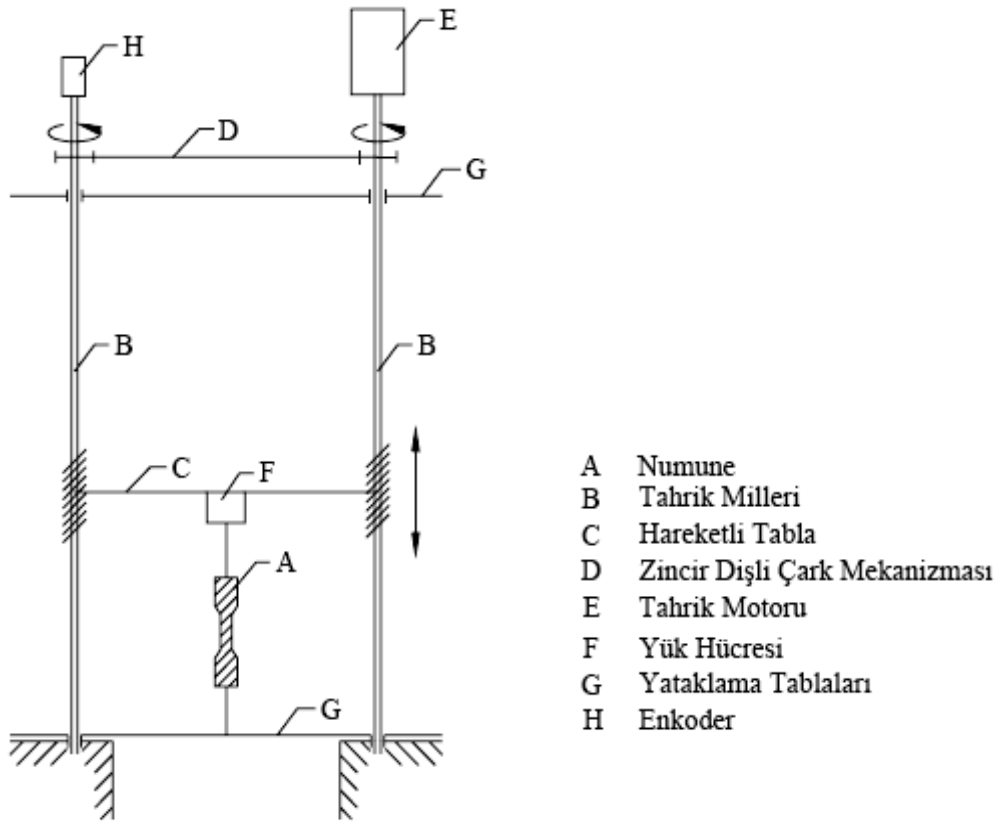


Şekil 5. Tek eksenli çekme deformasyonları[13]

Literatürde, basit çekme deneyi çok eskilere dayanmaktadır. 17. yüzyılın sonlarına Robert Hooke bu deformasyon ölçümleri ile metaller için gerilme ile numune boyu değişim arasında lineer bir ilişkinin olduğunu ifade etmiştir. Kauçuk türü malzemelerde ise bilinen ilk basit çekme deneyi Gough tarafından, 1805 yılında, yapılmıştır. Daha sonra benzer bir çalışma Joule tarafından 1859 yılında yapılmıştır. Böylece 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 için ASTM D 412, DIN 53 504 ve ISO 37 no'lu standartlara müracaat edilebilir. Ancak kauçuk türü malzemeler için yapılan diğer birçok deney için bu durumdan, yani standartların mevcudiyetinden, bahsetmek henüz mümkün değildir [13].

Tek eksenli çekme deformasyonu, genel olarak, Şekil 6'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 hücreinden kuvvet, H enkoder'ından (bunu yerine direkt olarak lazer ekstansometre veya video ekstansometrede kullanılabilir) ise yer değiştirme okunarak numunenin gerilme-numune boyu değişim davranışı elde edilmektedir [13].



Şekil 6. Basit çekme deneyi genel prensibi[13]

Genel olarak yukarıda bahsedilen tahrik sisteminde çalışan basit çekme deneylerinde kauçuk türü malzemeler için,

- Dumbbell Numune
- Halka Numune

olarak adlandırılan iki farklı numune kullanılmaktadır. Literatürde bu numunelerden, özellikle, C kesme kalıbıyla kesilmiş dumbbell numune kullanılmaktadır. İlave olarak halka formunda numuneler de bazı çalışmalarda kullanılmıştır. Fakat 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 numune boyunun, genişliğine oranının en az 10 olması gerektiği belirtilmektedir. Raporda numune boyutlarından amacın numunenin deformasyonu sırasında numunede hasarın meydana gelmemesi olduğunu belirtmiş ve bu nedenle numune boyutları için de Dumbbell numune kullanılmasının şart olmadığı vurgulanmıştır. Bu durumda kullanılacak numune boyunun tutma çeneleri arasında kalan uzunluk olarak alınabileceğini belirtmişlerdir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde dumbbell numune yerine dikdörtgen formunda ince uzun numunelerin de kullanıldığını görülmektedir [13].

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

$$\sigma_1 = \sigma \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (1)$$

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

$$\lambda_1 = \lambda \quad \lambda_2 = \lambda_3 = 1 / \sqrt{\lambda} \quad (2)$$

$\lambda$ , uzama oranı olarak alınmıştır. Pratikte yapılan çalışmalar, genellikle, ASTM, DIN ve ISO standartlarına göre yapılmaktadır. Çekme deneyi ile ilgili daha ayrıntılı bilgi ASTM, DIN ve ISO standartlarından elde edilebilir [13].

## 1.5. Gerilme Gevşemesi

### 1.5.1. Genel Davranış ve Ölçümü

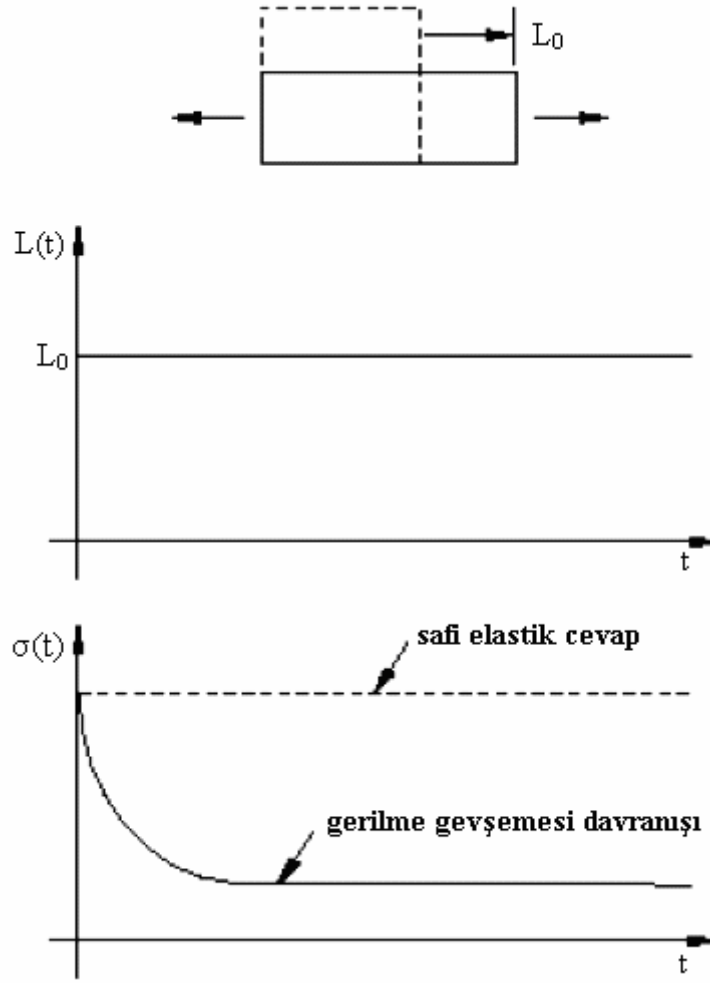
Gerilme gevşemesi deneyi kauçuk türü malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesinde her geçen gün önemi artan bir deneydir. İlk yıllarda sadece üniversitelerin bilimsel araştırma projelerinde çalışma yapılmasına rağmen günümüzde artık, özellikle o-ring, keçe ve conta imalatının yapıldığı kurumlarda ve otomobil endüstrisinde standart bir test metodu olma yolundadır [14].

Kauçuk türü malzemelerde sabit deformasyon altında gerilmenin zamanla azaldığı gözlenmiş ve kauçuk türü malzemelerin bu davranışı, literatürde, “Gerilme Gevşemesi” olarak adlandırılmıştır.

Gerilme gevşemesini meydana getiren proses fiziksel veya kimyasal olabilir. Normal koşullar altında her iki proses çeşidi eş zamanlı olarak gerçekleşir. Ancak normal ve düşük sıcaklıklar ve/veya kısa zamanlarda gerilme gevşemesi fiziksel proses olarak gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklar ve/veya uzun zamanlarda ise kimyasal proses gerçekleşir.

Gerilme gevşemesi testinde numune belirli bir deformasyona kadar belirli bir hızda çekilir. Bu deformasyon değerinde maksimum gerilme değerine ulaşmış olan numunede zamanla gerilmedeki düşüşün izlenmesi şeklinde bir prosedür izlenmektedir(Şekil 7).

Son yıllara kadar, malzemelerin mukavemet ve plastik özelliklerini belirleme çalışmalarında kullanılan iki ana deney, sabit hızda aktif deformasyon ve sürünme deneyleri idi. Son yıllarda gerilme gevşemesi olarak adlandırılan yöntem hızla popüler olmuştur.

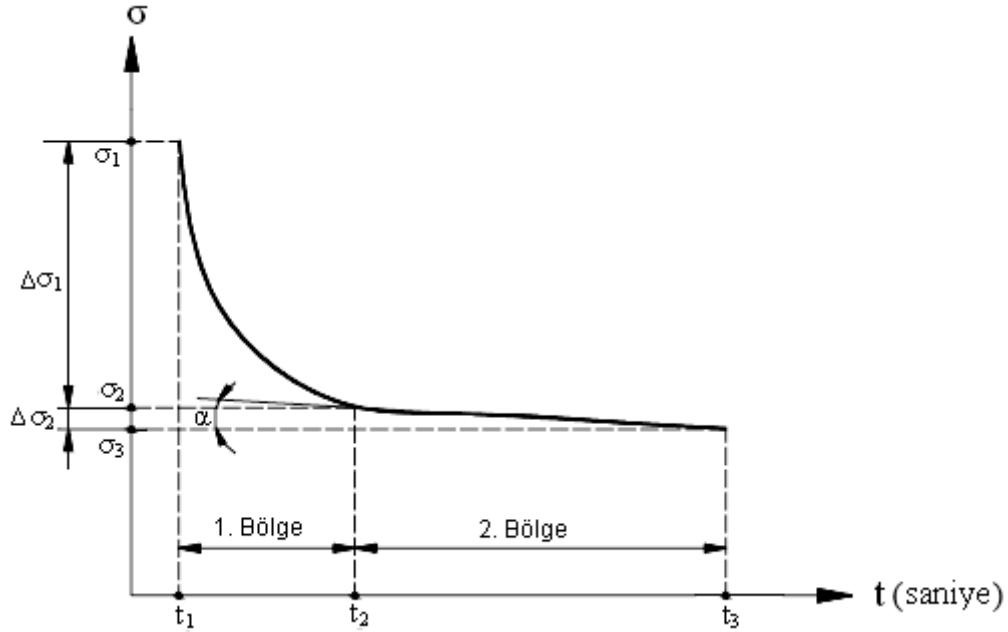


Şekil 7. Gerilme gevşemesi deneyleri

Şekil 8’de sabit uzama oranına göre gerilme-zaman verileri tanımlanmıştır. Burada gerilmenin maksimum olduğu  $\sigma_1$  değeri  $t_1$  zamanına karşılık gelmektedir.  $t_2$  zamanı 2 saat sonraki zaman dilimini  $\sigma_2$  ise eksponansiyelliğin bitip yaklaşık lineerliğin başladığı noktadaki gerilme değerini vermektedir. Burada  $\sigma_1$  maksimum gerilme değerinden  $\sigma_2$  gerilmesine kadar  $t_1-t_2$  zaman dilimi boyunca azalan bu grafiğin altındaki bölge 1. Bölge olarak ifade edilir. Ayrıca  $\sigma_3$  gerilmesi  $t_3$  zaman dilimi sonunda elde edilen minimum gerilme değeridir. Şekil 8’den görüldüğü gibi  $\sigma_2$  gerilmesinden  $\sigma_3$  gerilmesine kadar  $t_2-t_3$  zaman dilimleri arasında lineer bir azalma söz konusudur. Azalan bu lineer eğrinin altında kalan alan ise 2. Bölge olarak ifade edilir.

2.Bölge yani yaklaşık lineerliğin olduğu bölgedeki eğrinin yatayla yaptığı açı değeri  $\alpha$  olarak ifade edilmektedir. Eğrinin  $\sigma_1$ ’den  $\sigma_2$  gerilme değerine düşmesi sonucu  $(\Delta\sigma_1)$  gerilme düşüşü değeri elde edilir. Bu değer görüldüğü gibi ani düşüşten dolayı biraz

büyüktür. 2. Bölgede yani  $\sigma_2$  gerilme değerinden  $\sigma_3$  minimum gerilme değerine kadar düşüş ise ( $\Delta\sigma_2$ ) gerilme düşüşü değeri olarak ifade edilmektedir.



Şekil 8. Sabit uzama oranında gerilme-zaman verileri için tanımlamalar

Gerilme gevşemesi, germe halinde sabit boyda tutulmuş malzemede zamanla meydana gelen gerilme azalması olarak tanımlanır. Aynı temel olayın diğer bir oluşumu olan sürünme, sabit gerilme altındaki bir malzemenin boyundaki değişim olarak tanımlanır. Sürünme ve gerilme gevşemesi arasında genel olarak tatmin edici bir eşitliğin geliştirilmemiş olması nedeniyle, sürünme deneylerini gerçekleştirmek daha kolay olsa da, gerilme gevşemesi verilerinin gerektiği durumlarda, gevşeme deneyleri yapılmak zorundadır.

Diğer bir deyişle, gerilme gevşemesi, sürünme şartları altında sabit şekil değişiminde oluşan gerilme azalmasıdır. Gerilme gevşemesi oluştuğunda, gerilme sabit bir şekil değişimi sağlamak için zamanın fonksiyonu olarak azalır.

Kauçuk türü malzemelerden farklı olarak metallerin büyük gerilme neticesinde sabit boyda tutulması esnasında dislokasyonların tırmanması ve çapraz kayması sonucu zamanla bir plastik şekil değişimi diğer bir deyişle, gerilme gevşemesi meydana geldiği bilinmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi sürünme ve gevşeme aynı temellere

dayanmaktadır. Burada ilginç olan durum, metaller oda sıcaklığında hissedilebilir sürünme yapmazlarken, belirgin bir şekilde gevşeme olayı göstermektedirler.

Fizikte gevşeme prosesleri veya sadece gevşeme, bir cismin dengesiz bir durumdan denge durumuna geçmesidir. Belirli bir hızda herhangi bir katının deformasyonu termodinamik dengeyi bozar. Cismin denge durumuna dönme eğilimi ile gerilme gevşemesi oluşur. Gevşeme proseslerinin sonuçları, deformasyon hızı, malzeme türü ve özelliklerine bağlıdır.

Yaklaşık 25 yıl önce ISO TC 45 teknik komitesi tarafından, gerilme gevşemesi davranışını belirlemeye yönelik deney prosedürlerini standartlaştırma çalışmaları başlamıştır. Günümüzde ise ISO 3384 standardı basma deformasyonları için, ISO 6914 standardı ise çekme deformasyonları tarafından ISO tarafından hazırlanmış ve uygulamada kullanılmaktadır.

Metallerde gerilme gevşemesi deneyleri; çentikler, inklüzyonlar, çatlaklar, boşluklar v.b. nedenlerden dolayı yüksek gerilme etkisindeki bir malzemenin; gerilme gevşemesi kabiliyetini gösterir. Bu tür deney verileri, dövmede, dökümde, kaynakta, talaşlı imalat veya soğuk işlem görmüş yüzeylerde oluşan kalıntı iç gerilmelerin termal olarak giderilmesi için gerekli ısıtma işlem koşullarının belirlenmesinde kullanılır. Gerilme gevşemesi, eğme, burma, çekme, basma, çok eksenli veya kalıntı gerilme gibi, gerilme değişimi koşulları altında oluşabilir.

Gerilme gevşemesi verileri, malzemenin elastik olmayan davranışını yönlendiren bağıntıları değerlendirmek için konstrüksiyon mühendisleri tarafından kullanılmaktadır [15].

Gerilme gevşemesi deneyleri, aşağıdaki alanlarda da başarılı olarak kullanılmaktadır:

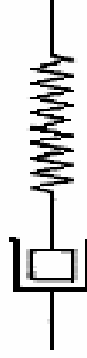
a) Gevşeme süresince, zamana bağlı gerilme veya plastik şekil değişimi hızının hesaplanması,

b) Elemanter dislokasyon prosesinin parametrelerinin belirlenmesi,

Bu konularda gerilme gevşemesi teknikleri basit olmakla birlikte, çok fazla bilgi verirler. Herhangi bir sıcaklık, Numune boyu değişim hızı ve numune boyu değişim miktarı ile sağlanan basit bir tek gevşeme eğrisi; akma gerilmesinin bileşenleri ve plastik şekil değişiminde dislokasyon hareketliliği için deneye dayalı bağıntıların parametreleri hakkında bilgiler verir [15].

### 1.5.2. Gerilme Gevşeme Modeli ve Gevşeme Zamanları

Gerilme gevşeme oluşumunun birçok özelliğini göstermek için çok basit bir model kullanılabilir. Bunun için sadece seri bağlanmış bir yay ve dashpot gereklidir.



Şekil 9. Maxwell modeli

Dashpot  $\eta$  ve yay  $E$ 'li seri bağlı modele Maxwell ünitesi adı verilir.  $\sigma$  gerilmesi Maxwell modeline uygulandığı zaman aşağıdaki eşitlik oluşur [16]:

$$dL/dt = \sigma/\eta + 1/E d\sigma/dt \quad (3)$$

Aynı gerilme hem yaya hemde dashpot'a uygulanır, fakat toplam uzama bu iki elemanın maruz kaldığı deformasyonların toplamına eşittir. Uzama ( $L$ )'nin gerilme gevşeme esnasında değişmediğinden,  $dL/dt = 0$ 'dır. Bu durumda denklem;

$$\sigma = \sigma_0 \exp(Et/\eta) = \sigma_0 \exp(-t/\tau) \quad (4)$$

eşitliğini verecek şekilde birleştirilir. Burada  $\sigma_0$  örneğin gerilmesinden hemen sonra maruz kaldığı başlangıç gerilmesini,  $\tau$  gevşeme zamanını gösterir [16].

$$\tau = \eta / E \quad (5)$$

Gerilme gevşemesi oluşumunun başlangıcında model hemen belli bir miktar gerinir. Baştaki bütün deformasyon gerinen yaya gider. Gerinen yay sonunda dashpot üzerindeki

pistona bir kuvvet uygulamaya başlar ve dashpot gerinmeye başlar, yay gerinme öncesi pozisyonuna döner ve model üzerindeki gerilme 0'a gelir [16].

Polimerlerin çoğu birden fazla gevşeme zamanına sahiptirler. Bunlar genelde sonlu sayıda gevşeme sürelerine sahiptirler.

### **1.5.3. Gerilme Gevşemesine Sıcaklık ve Camsı Duruma Geçişin Etkileri**

Polimerlerin gerilme gevşeme hareketleri özellikle camsı duruma geçiş bölgesinde sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir. Camsı durumdaki sıcaklığının biraz altında çoğu amorf polimerler gerilme gevşemesi oluşumunun başlangıcında  $3,0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$  civarında çekme modülüne sahiptirler. Modül zamanla azalır, fakat gerilmenin sıfır noktasına ulaşması yılları alabilir. Lastikler kısa süreyle gerilme gevşemesi oluşumları için  $1 \text{ N/mm}^2$  civarında çekme modülüne sahiptirler. Teoride eğer gerilme çok kısa bir zaman sürecinde ölçülebilseydi daha yüksek modül değeri bulunabilirdi. Bunun yanı sıra, pratikte bu yüksek değerlerin geçiş sıcaklığının biraz üzerindeki sıcaklıkta ölçülmeleri zordur. Sadece geçiş bölgesindeki ısıya hassas amorf polimerin gerilme gevşeme davranışı değil, aynı zamanda belirli sıcaklıkta geçiş bölgesinde bulunan gerilme zaman içinde hızla değişir [16].

### **1.5.4. Molekül Ağırlığının ve Çapraz Bağın Etkileri**

Polimerlerin fiziksel özellikleri Molekül ağırlığıyla ilişkilidir. Böylelikle polimerden beklenen özellikleri gösterebilmeleri için belirli bir molekül ağırlığına sahip olmaları gerekmektedir.

Genellikle molekül ağırlığının artması ile yapıda moleküller arası çekim artmakta ve buda polimerin mekanik ve ısı özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Tüm bunlardan hareketle molekül ağırlığına gerilme gevşemesinin etkileri özellikle polimer türü malzemelerde camsı duruma geçiş sıcaklığının üzerinde çok önemlidir. Herhangi bir polimerin molekül ağırlığını jel geçirgenlik kromatografisi, viskozimetrik ölçüm, ozmotik ve basınç ışık saçılması gibi yöntemlerle belirlemek mümkün olmaktadır.

Kauçuk malzemelerde çapraz bağlar gerilmenin sıfıra inmesini engeller yani zincirler arasındaki tersinir deformasyonu sağlayacak şekilde ağ gibi çapraz bağa sahip olmalıdır.

Düşük molekül ağırlıklı çapraz bağlı olmayan kauçuk türü malzemeler için gerilme zamanla düzenli olarak azalır.

### 1.5.5. Kristalleşmenin Etkileri

Kauçuk türü malzemelere kristalleşmenin etkisi eskiden beri araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde elimizde yeterince deneysel bilgiler mevcut değildir. Ama şunu söyleyebiliriz ki kristalleşme en çok gevşeme sürelerinin dağılımının genişlemesine ve gerilme gevşemesi deneyinin daha uzun sürelerle yayılmasına neden olmaktadır.

Kristalleşme derecesi bazı polimerlerde gerilme gevşemesi oluşumu sırasında değişebilir. Böyle bir durum  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  civarında gerilen doğal kauçuk için söz konusudur. İlk gerinmede, kauçukta kristalleşme çok az olur veya hiç olmaz. Fakat kristalleşme deney sırasında meydana gelir. Kauçuğun uzatılması içindeki moleküllerin, uzama yönünde birbirine paralel bir durumda olması söz konusudur. Böylece kristalleşme olur. Numune belirli bir süre daha gerdirilip sonra sabit deformasyon uygulanırsa gerilme doğal olarak gevşeme etkisinden dolayı zamanla hızlı bir şekilde azalacaktır.

Büyük uzamayla deneye başlandığında kristalleşmenin de buna paralel olarak hızlı bir şekilde meydana gelmesi beklenebilir. Gerilme, 10 saat içinde % 50 oranında uzatılan doğal kauçukta hızla azalmaz. Bununla birlikte % 200 uzatılmada gerilme 1 saat sonra hızla bozulur.

Yarı kristal polimerlerde kristal yüzdesi gerilme gevşemesini etkiler. Gerilme gevşemesi değerlerine göre kristal yüzdesi hakkında yani polimer hakkında bilgi sahibi olabiliriz.

Amorf polimerlerde gerilme gevşemesini  $T_g$ 'nin altında 0'a düşmesini beklemek yıllar sürer ve pratik değildir.

Yarı kristal polimerlerde oda sıcaklığında  $T_g$ 'nin üzerinde iseler gerilme direnci zamana karşı oldukça yavaş azalır ve çoğunlukla sifıra inmez. Bu da kristal yüzdesine bağlıdır. Kristal yüzdesi arttıkça gerilme direncinde de zamana bağlı olarak azalmaya başlar. Yarı kristal polimerlerde yönlenme ve plastik deformasyon olayı dikkate alınmaktadır. Yönlenmiş bir malzemede kristal yüzdesi artar. Dolayısıyla gerilme direncindeki azalma hızı yönlenmemiş polimere göre daha düşük olur.



Gerilme gevşemesi bu deneylerde fazla pratik değildir. Sert ve katı polimerler için çok az bir gerinim farkı polimerin yüksek gerilme direncine sahip olmasına neden olur.

### **1.5.6. Uzamanın Etkileri**

Gerilme gevşemesi modülü, genellikle uzama küçük olduğu sürece bağımsız haldedir. Uzamada bir kritik değer mevcuttur. Bu kritik değer üzerinde pek çok durumda gerilme gevşemesi hızı artar. Gerilme gevşemesi deneyinde numuneye uygulanan uzama neticesinde uzamanın artması nispetinde gerilmeye eş zamanlı olarak artar.

Polietilende ise yukarıdaki durumuna tam uyan bir durum söz konusu değildir. Yani uzamayı, % 2'den % 8'e çıkarmak gerilmeyi sadece %2 veya %3 oranında artırır. Kristalleşme bölümünde ifade edildiği gibi kauçuğun uzatılması sırasında içindeki moleküllerin uzama yönünde birbirine paralel bir şekil alması söz konusu olduğundan uzamadaki artma kristalleşmenin hızlanmasına sebep olmaktadır. Kristalleşme ilerlerken gerilme hızla azalır.

### **1.5.7. Sertliğin Etkileri**

Kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi testlerinin incelenmesi sırasında gerilme gevşemesine etki eden parametrelerden bir tanesi de sertliğin etkisidir. Shore sertliği yumuşak malzemeler için Tip A ve sert malzemeler için Tip D olmak üzere iki çeşit durometre aracılığıyla malzemelerin sertliğini belirleyen metod olarak tanımlanabilir. Kauçuk türü malzemelerin sertliği Shore Sclereskobu denilen cihaz yardımıyla sertlik ölçümü ve IRHD sertlik ölçümü ( International Rubber Hardness Degrees) şeklinde iki kategoride incelenebilir. Bu çalışmada shore sertliğiyle ölçüm yapılmış ve uygulanan yüke göre belirli numaralar almış olan numuneler kullanılmıştır. Şimdiye kadar kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi, Mullins etkileri, histeresis gibi inelastik özelliklerine sertliğin etkisi pek araştırılmamıştır. O yüzden bu çalışmayla EPDM kauçuk malzemesine uygulanan kuvvet neticesinde oluşan gerilme gevşemesine sertliğin etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

## 1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Kauçuk malzemelerin inelastik özelliklerinden biri olan gerilme gevşemesi davranışı incelenecektir. Bu davranış kauçuk malzemelerin sertliğini ölçen shore sertliğine sahip belirli boyda kesilmiş numuneler yardımıyla yapılacaktır. Böylelikle EPDM kauçuğunun uygulanan deformasyon altında gerilme gevşemesine olan yatkınlığı tek eksenli çekme deney cihazı yardımıyla gözlemlenecektir.

Tek eksenli deney düzeneğiyle deney yapılabilmesi için gereken zamanın uzaması ve istenilen sonuçların elde edilebilmesi için deney düzeneğinin donanımlarının bilgisayar kontrollü yapılması düşünülmüştür. Ayrıca herhangi bir olumsuzluk durumunda müdahale için elle kontrol de sisteme eklenmiştir. Deney numuneleri belirli numune boyu değişim hızı ve deformasyonlarında hem ön prosedürsüz hem de ön prosedür uygulanarak gerilme gevşemesi deneyine tabi tutulacaktır.

Deney, sentetik kauçuk türlerinden çeşitli sertlikte istenilen boyda kesilen EPDM kauçuk numunelerin yukarıda da ifade edildiği gibi inelastik özelliklerinden biri olan gerilme gevşemesi deneyi yapıldıktan sonra elde edilecek verilerin yorumlanmasıyla şekillenmiş olacaktır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Giriş**

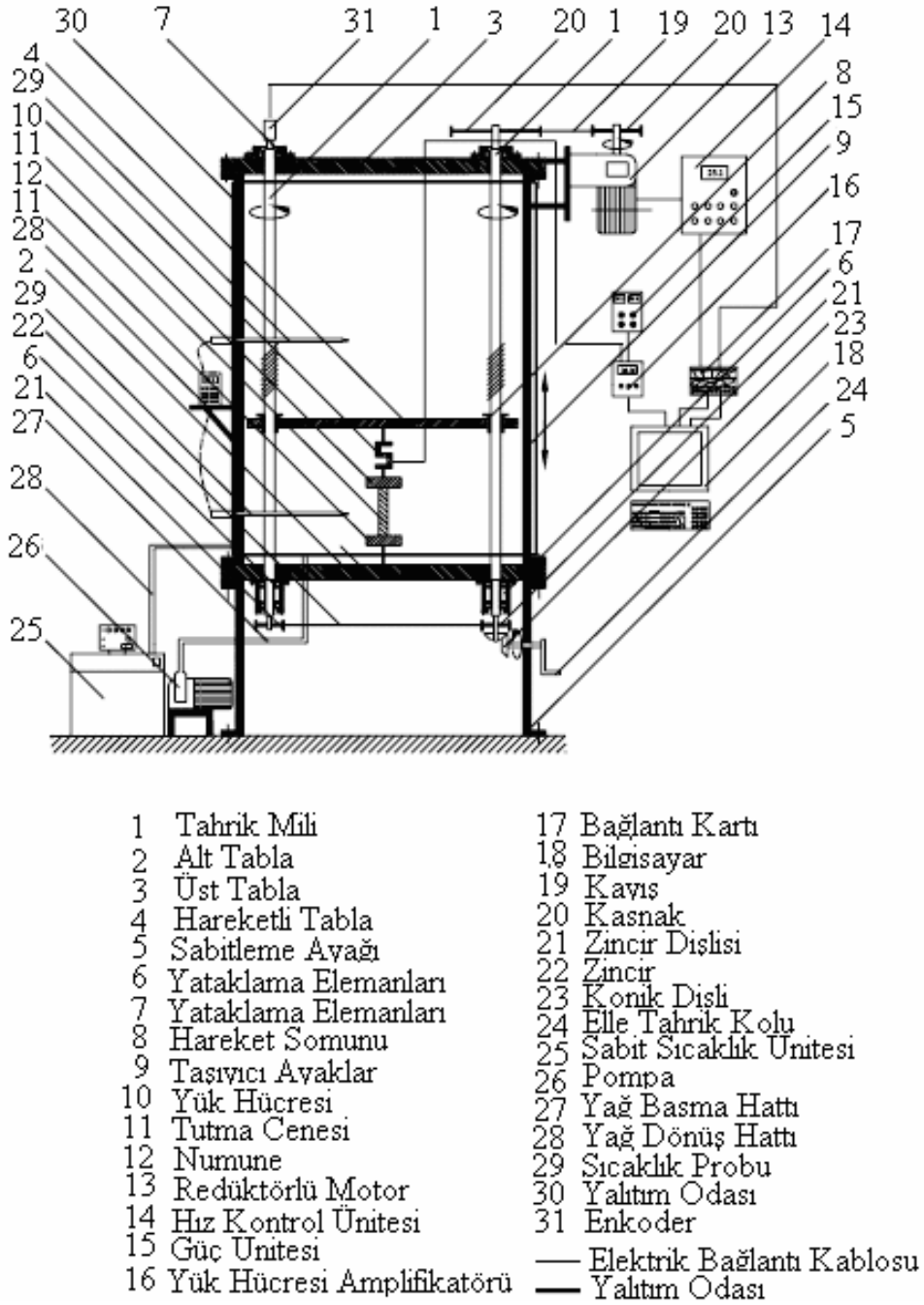
Kauçuk türü malzemeler metal ve benzeri malzemelere göre çok farklı özelliklere sahip olduğundan dolayı pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Kullanımının günden güne hızlı bir şekilde artması ve bu malzemeyle ilgili yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen olumlu sonuçlar bu malzemeye rağbeti artırmaktadır. Yapılan çalışmada pek çok uygulamada direkt olarak kullanılan EPDM sentetik kauçuğunun gerilme gevşemesi davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada gerilme gevşemesi ve benzeri deneyleri en uygun şekilde yapabilmek için gerekli deney düzeneğinin yapılan araştırmalar neticesinde tek eksenli çekme deney düzeneği olduğu belirtilmiştir.

Tek eksenli deney düzeneği, kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden biri olan gerilme gevşemesi deneyinin istenilen şekilde yapılabilmesi ve deney düzeneğine istenilen komutları daha hassas ve güvenilir bir şekilde verebilmek için bilgisayar kontrollü yapılmıştır. Aynı zamanda elle de kontrolü sağlanmıştır. Bilgisayara adapte edilen program vasıtasıyla da verilerin istenilen formda alınması sağlanmıştır.

Gerilme gevşemesi deneylerinde kullanılan numuneler çeşitli sertlik değerlerindedir. Bu şekilde elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerine sertliğin etkisini görmemiz mümkün olmaktadır.

### **2.2. Tek Eksenli Çekme Deney Düzeneği**

Şekil 10'da görüldüğü üzere çekme deney düzeneği kauçuk türü malzemelerin deneylerinin yapılabilmesi için oluşturulmuştur. Çekme deney düzeneğinde iki ana mil ve bu miller üzerinde verilen hıza göre hareket eden bir hareketli tabla yardımıyla numuneye belli bir deformasyon uygulanmaktadır. Ana miller altta ve üstte iki tane hareketsiz tablaya dönmelerine imkân verecek bir tasarımla monte edilmiştir. Tahrik millerinin alt ve üst tablaya hareketi sırasında herhangi bir deformasyona uğramaması için yataklama elemanları yardımıyla yukarıda da bahsettiğimiz gibi uygun bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 10. Tek eksenli çekme deney düzeneği krokisi[13].

Tablo 2. Tek eksenli çekme deney düzeneğinin özellikleri[13].

Özellikler	Kapasite
Deney Düzeneği Maksimum Yük Kapasitesi	10 kN
Yük Hücresi Kapasitesi	100 kg
Yük hücresi Okuma Hassasiyeti	0.005 kg
Artımsal Enkoder Darbe Sayısı	2000 darbe/çevrim
Artımsal Enkoder Okuma Hassasiyeti	0.75 $\mu$ m
Tutma Çenesi Yük Kapasitesi	5 kN
Numune Boyu Değişim Hız Aralığı	0–400 mm/dak.
Maksimum Yer Değiştirme	500 mm
Minimum Veri Okuma Hızı	0.4 s.

Çekme deney makinası taşıyıcı ayaklar, sabitleme ayakları, alt-üst tabla, tahrik mili, hareketli tabla vb. gibi kısımlardan oluşmaktadır. Çekme deneyi makinasını yere sabitlemek için sabitleme ayakları kullanılmıştır. Deney düzeneğinin kaba aksamını tanıdıktan sonra numuneye uygulanan kuvvet neticesinde oluşan deformasyondan alınan veriler nerede toplanıyor ve nasıl elde ediliyor bunlar incelenecektir.

Öncelikle numune bir deformasyona maruz kaldığında numuneye ne kadar bir kuvvet uygulandığı hareketli tablaya monte edilmiş yük hücresi vasıtasıyla anlaşılmaktadır. Yük hücresinden alınan analog haldeki sinyaller yük hücresi amplifikatöründe filtrelenmekte ve sinyal sayısallaştırılmaktadır. Yük hücresi amplifikatöründen çıkan sinyal bilgisayara seri porttan verilir. Yük hücresinin beslemesi ise yük hücresi amplifikatörüyle sağlanmaktadır.

Şimdide numunenin bağlandığı çene hakkında biraz bilgi verelim. Yapılan deneylerde görülmüştür ki tutma çenelerini iyi belirlemek gerekmektedir. Çünkü bazen numuneye uygulanan kuvvet sıkma prensibine dayanmaktadır. Numuneyi çok sıkıldığında bağlantı yerinden kesilebilmekte aksine çok sıkılmasa çenenin numuneyi kaçırmaması söz konusudur. Bu nedenle bu çalışmada tüm bu olumsuzluklar göz önüne alınarak bir tutma çenesi alt ve üst tablaya uygun bir şekilde monte edilmiştir.

Tüm bu sistemde hareketli tablanın tahrik milleri üzerinde hareket ederek numuneye belirli bir deformasyon uygulamak için redüktörlü motor kullanılmıştır. Bu elektrik motoru 1400 d/dk çıkış hızına ve 3 kW'lık güce sahiptir.

Deneyleri çok daha düşük devirlerde gerçekleştirebilmek ve istenilen aralıklarda hız kontrolünü sağlayabilmek için elektrik motoru 4 kW'lık hız kontrol ünitesiyle kontrol edilmiştir. Deney düzeneğimiz için üç ayrı hız grubu düşünülmüştür. Elektrik motorundaki yüksek devri redüktör ve kasnak sistemiyle daha düşük hız değerlerine düşürülebilir. Deneyde kullanacak olan kasnak grupları şu şekilde gösterilebilir.

Tablo 3. Deney düzeneği kasnak grupları[13]

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

Yukarıda da bahsedilen yük hücresi amplifikatörü 5A ve 0–30 V aralığında ayarlanabilen, DC güç kaynağıyla beslenmektedir.

Deney düzeneğinde tahrik millerinin hatvesi 1.5 mm olarak imal edilmiştir. Böylece hareket tablasının yer değiştirmesi dolayısıyla da numunenin uzaması 0.75  $\mu$ m hassasiyetle ölçülebilmektedir. Bu ölçümü yapabilmek için kullanılan enkoder 2000 darbe/çevrim özelliğine sahip artımsal enkoderdir. Bu enkoder tahrik millerinden birinin ucuna bir kaplin vasıtasıyla bağlanmıştır. Enkoder de üretilen darbe sinyalleri de Veri kaydetme bağlantı kartına girilmektedir. Deneyler sırasında tahrik motoru bir bilgisayar programı vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Hız kontrol ünitesinin, bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmesinden dolayı hız kontrol ünitesiyle bilgisayar, bağlantı kartı ve veri kaydetme kartı üzerinden haberleşmektedir.

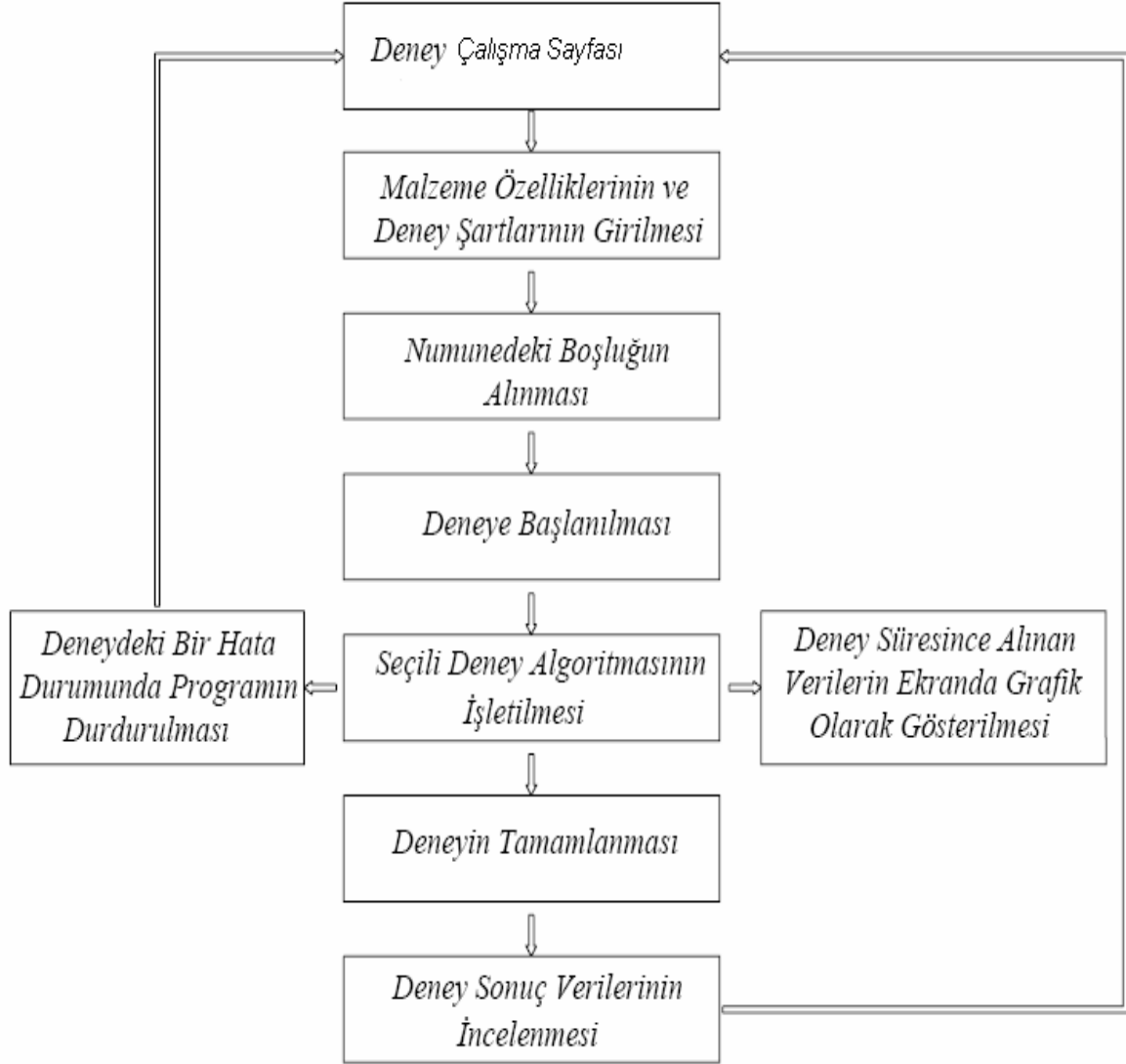
Tahrik milleri arasındaki hareket ise zincir-dişli çark mekanizması ile sağlanmaktadır. Ayrıca deney düzeneğini motor dışında elle de tahrik edebilmek için tahrik millerinden bir tanesine konik dişli çark mekanizması kurulmuştur.

### 2.3. Tek Eksenli Çekme Deney Düzenegi Programı

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden biri olan gerilme gevşemesi davranışını özel prosedürle inceleyebilmek için ve deneylerin çok uzun zaman sürecek olması sebebiyle deney düzenegi bir yazılım vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Ticari olarak piyasada satılan yazılımlar istenilen özellikleri tam olarak verememekle birlikte çok pahalı olmasında dolayı tercih edilmemektedir. Bu amaçla yapılan çalışmada tek eksenli çekme deney düzenegindeki tüm donanım ve sensörlerin kontrolü NI-LABVIEW ortamında yapılan bir yazılım vasıtasıyla kontrol edilmiştir.

Deney prosedürlerinin yürütülmesi, deney süresince kuvvet ve yer değiştirme ve uzama büyüklüklerinin ölçülmesi, verilerin ekrana aktarılması ve de verilerin deney esnasında birebir grafiğe aktarımı, tahrik motorunun kontrolü ve deney sonunda toplanan bütün verilerin rapor şeklinde sunulması, grafiksel programlama dili olan NI-LABVIEW'de oluşturulan ve Şekil 11'de da algoritması verilen, *Grafiksel Kullanıcı Arayüzü* (Graphical User Interfaces) ile sağlanmıştır. 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 imkân vermektedir. Şekil 11'den da görüleceği üzere çalışmada ilk önce yapılacak deneye ait çalışma sayfası açılır. 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, numune boyu değişimi veya uzama verileri birebir bilgisayar ekranında yer alır ve veriler eş zamanlı olarak grafiğe aktarılır. 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 text dosyasında veya MSExcel dosyası şeklinde deneye başlamadan önce kullanıcı tarafından tanımlanan klasördeki dosyaya kayıt edilir. Ayrıca

deney süresince alınan verilerin kullanıcıya gösterildiği osiloskop ekranı JPEG formatında kullanıcının tanımladığı klasöre kaydedilir [13].



Şekil 11. Bilgisayar programına ait algoritma[13]

Tez çalışmasında kauçuk türü malzemelerin gerilme gevşemesi deneyi yukarıdaki algoritmayla gerçekleştirilmiştir. Böylece EPDM kauçuk malzemesinin değişik sertliklerde gerilme gevşemesi deneyleri yapılmıştır.



### 2.3.1. Mullins Etkileri Deneyi Programının Tanıtılması

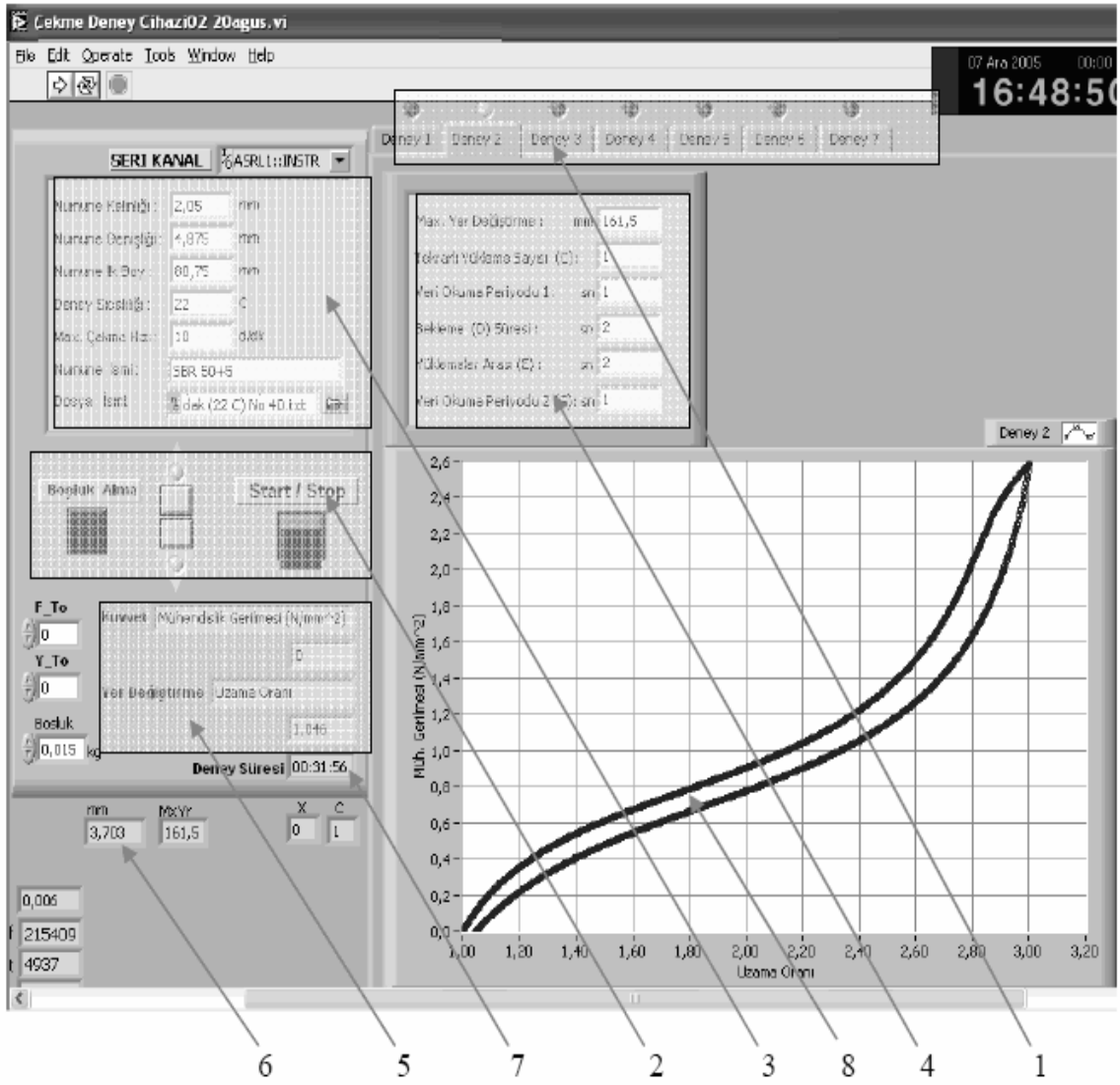
Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi Mullins etkileridir. Daha önce de belirtildiği üzere kauçuk malzemelerde sabit numune boyu değişimi altında gerilmeye azalma meydana gelmektedir. Malzemenin bu özelliğini inceleyebilmek için “*Mullins Etkileri Deneyi*” adı altında bir deney hazırlanmıştır. Bu deneyde bizim için önemli olan Mühendislik Gerilmesi-Uzama Oranı grafikleri elde edilmiştir.

Mullins etkileri deneyi sonundaki ekran görüntüsü Şekil 12’de görülmektedir. Şekil 12’de 1 numaralı bölgeden yapılacak olan deney seçilir. Seçim yapıldıktan sonra seçilen deney numarasının üzerinde yeşil ışık yanmasıyla hangi deneyin yapıldığı hakkında deney yapan kişiye bilgi verir. Deneyi yapılacak numuneyi tutma çenelerine bağlayabilmek için şekilde 2 numaralı bölgedeki boşluk alma ve start/stop düğmeleri arasında kalan kare butonlarla veya Hız kontrol ünitesi üzerinde çeşitli varyasyonlarla tutma çeneleri aşağı yukarı hareket ettirilir ve çeneler numunelerin bağlanabilmesi için uygun mesafeye getirilir. Numune çenelere belirli bir potluk ile bağlanır. Daha sonra numunenin potluğunu almak için boşluk alma butonuna basılarak numunenin potsuz ve yüksüz hale gelmesi sağlanır. Bu durumda numune deney için hazırdır. Şekil 12’de 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. Burada dikkat edilmesi gereken nokta dosya ismi yazılırken dosya isminin sağındaki butona basılıp deneyin uzantısıyla beraber kaydedilmesidir. 4 numaralı alanda ise deney prosedürü tanımlanır. Yani elde edilecek grafik için maksimum yer değiştirme, tekrarlı yükleme sayısı(C), veri okuma periyodu 1, Bekleme süresi(D), Yükleme Arası(E), Veri okuma periyodu 2 gibi değerler girilir. Deneylerde 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 değiştirmesi, uzama oranı ve doğal numune boyu değişim opsiyonları mevcuttur. Şekil 11’de görüleceği üzere kuvvet tanımlaması olarak mühendislik gerilmesi ( $N/mm^2$ ) ve yer değiştirme tanımlaması olarak ise uzama oranı(mm) alınmıştır. Ayrıca deneyler sırasında gerilme ve numune boyu değişim verileri deneyele birebir ekranda 5 numaralı bölgeden okunabilmektedir. Numunedeki, toplam yer değiştirmesi ise 6 numaralı bölgeden okunabilir. Deney için geçen toplam süre ise 7

numaralı yerden okunur. Deneyler sırasında 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 bölgedeki 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 deney prosedürü şu şekilde ifade edilebilir; Deney numunesi deney başladığında 38.25 mm ( $\lambda = 1+57.375 / 38.25 = 2.5$ ) yani uzama oranı 2.5'e kadar deforme edilecek, 57.375 mm yer değiştirmeden sonra motor duracak 1 saniye bekleyecek (D Bekleme Süresi) ve motor ters yönde dönerek malzemedeki kuvveti geri bırakarak gerilme sıfır oluncaya kadar motor ters yönde dönerek, gerilme sıfır olunca motor duracak ve 1 saniye bekleyecektir (E Yükleme Arası Bekleme Süresi).

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 işlemini "*Boşaltma*" ve hem yüklemeye hem de boşaltma işleminin her ikisinin birden gerçekleştirilmesi işlemini ise "*Çevrim*" olarak tanımlanacaktır. şekil 12'deki verilen ekran için malzeme bir defa çevrime (C, Tekrarlı Yükleme Sayısı) tabi tutulmuştur. Tez çalışmasında her bir uzama oranındaki  $N$  kez yapılan çevrim ise "*Döngü*" olarak tanımlanmuştur. Yapılan tez çalışmasında Mullins etkileri, birçok deneyde, 15 çevrim için incelenmiştir. Deneyde hem yüklemeye hem de boşaltma işleminin sırasında gerilme ve uzama oranı verileri 1'er saniye aralıkla (Veri Okuma Periyodu-1) kaydedilmiş, yüklemeye ve boşaltma sonlarındaki 1 saniyelik bekleme aralıklarında ise yine 1 saniye aralıklarla (Veri Okuma Periyodu-2) gerilme uzama verileri kaydedilmiştir.



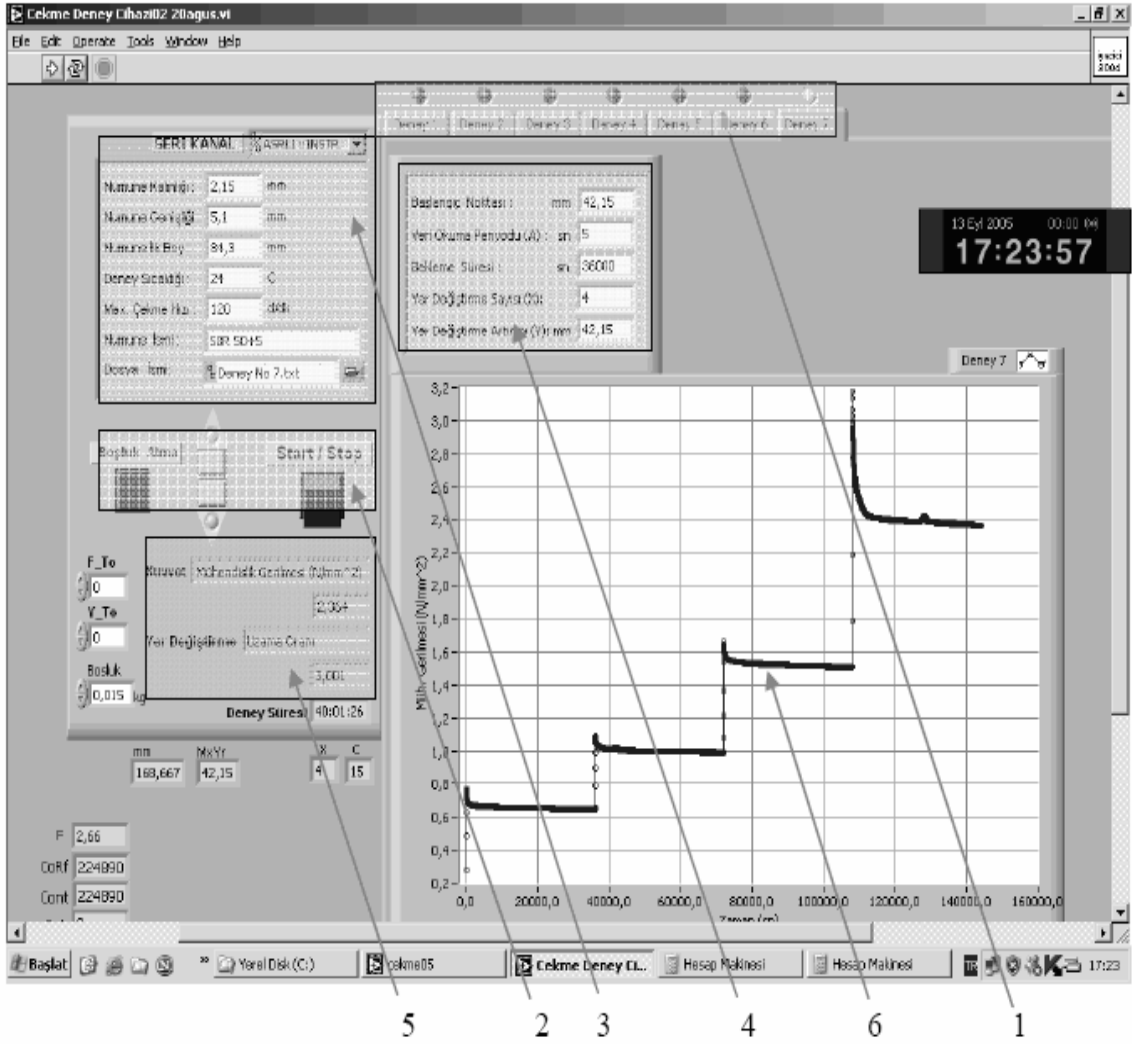
Şekil 12. Mullins etkileri deneyinin bilgisayar ekran görüntüsü[13]

### 2.3.2. Gerilme Gevşemesi Deneyi Programının Tanıtılması

Kauçuk türü malzemelerin ölçüm yöntemlerinden sürekli ölçüm yöntemi ile gerilme gevşemesi deneylerini gerçekleştirebilmek için daha önce tanıtılmış olan tek eksenli çekme deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. Şekil 13’de EPDM kauçuğuna ait gerçekleştirilen gerilme gevşemesi deneyinin deney bitimindeki bilgisayar ekranı görülmektedir. Öncelikle deney çalışma sayfası açılır. Deneyi yapılacak numuneyi tutma çenelerine bağlayabilmek için şekilde 2 numaralı bölgedeki butonlar ile numune bağlanarak boşluğu alınır ve numune deney için hazır hale getirilir. Şekilde 3 numaralı bölgede deneyi yapılacak numunenin numune kalınlığı, numune genişliği, numune ilk boyu, deney sıcaklığı, numune

çekme hızı, numune ismi, ve deneysel verilerin kaydedileceği dosyanın ismi ve bilgisayarda hangi klasöre kaydedileceği bilgileri girilir. 4 numaralı alanda ise deney prosedürü tanımlanır. 5 numaralı bölgeden kuvvet-yer değiştirme tanımlamaları seçilir. Şekil 13'den görüleceği üzere kuvvet tanımlaması olarak mühendislik gerilmesi ( $N/mm^2$ ) ve yer değiştirme tanımlaması olarak ise uzama oranı alınmıştır. Deneyler sırasında okunan gerilme ve zaman verileri birebir grafiğe aktarılarak 6 numaralı alanda gerilme-uzama oranı grafiği 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. Deney bittikten sonra 1 numaralı bölgedeki verilen dosya isminde ve ilgili klasörden deney verileri alınabilir. Ayrıca deney sonundaki 6 numaralı alandaki grafikler ise ayrı bir jpeg dosyasına kaydedilir.

Şekil 13'deki verilerle 3. kısım yorumlanırsa, deneyde malzemenin 19.125 mm arttırılma (Başlangıç Noktası) başlanılmak üzere 3 defa (X Yer Değiştirme Sayısı) yine 19.125 mm arttırımla (Y Yer Değiştirme Artırımı) gerilme–zaman verileri kaydedilecektir. Bu durumda 19.125 mm ( $\lambda = 1 + 19.125/38.25 = 1.5$ ), 38.25 mm ( $\lambda = 2.0$ ), 57.375 mm ( $\lambda = 2.5$ ) deformasyonlarda malzeme 36000 saniye (10 saat) süreyle (Bekleme Süresi) gerilme gevşemesi deneyine tabi tutularak gerilme zaman verileri alınacaktır. Deneylerde 5 saniye aralıklarla (A Veri Okuma Periyodu) gerilme-zaman verileri alınarak veri dosyasına kaydedilecek ve ekranda grafik çizimi gerçekleştirilecektir.

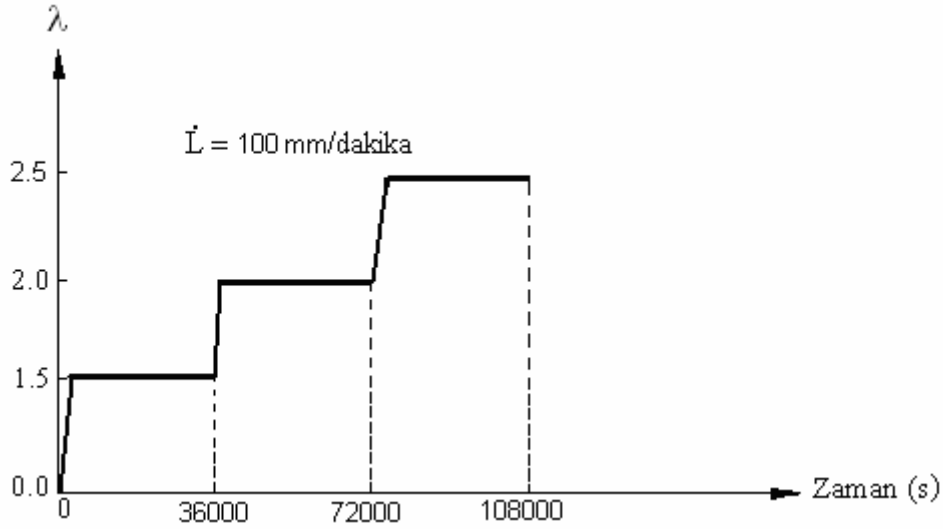


Şekil 13. Gerilme gevşemesi deneyinin bilgisayar ekran görüntüsü[13]

#### 2.4. Gerilme Gevşemesi Deney Prosedürü ve Deney Koşulları

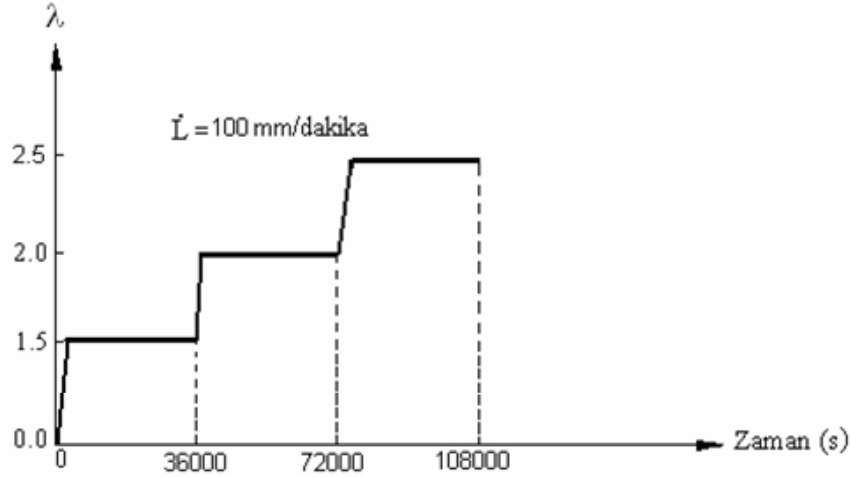
Gerilme gevşemesi deney çalışmasında sürekli tip ölçüm sistemi ile deneyler yapılmıştır. Deneyler hava ortamında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmasında Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'deki deney prosedürleri kullanılmıştır. Tek eksenli deney düzeneğine yerleştirilen Shore A 60, 70, 80 sertlik değerlerindeki numuneler  $\lambda=2.5$  uzama oranına kadar deforme edildikten sonra 108000 saniye beklenerek Şekil 14'deki deney prosedürü gerçekleştirilir. Böylece elde edilen Mühendislik Gerilmesi-Zaman grafikleri sonucunda 108000 saniye değerinde Mühendislik Gerilmesinin hangi değere düştüğü görülebilmektedir. Bu deney prosedürü ile aşağı göreceğimiz deney prosedürlerinden farklı olarak içyapılarında pek fazla bir hasar söz konusu olmamaktadır.

Yani moleküller arasındaki bağlar ilk duruma göre farklılık gösterse de Şekil 15 ve Şekil 16'daki kadar bağlarda hasar söz konusu değildir.



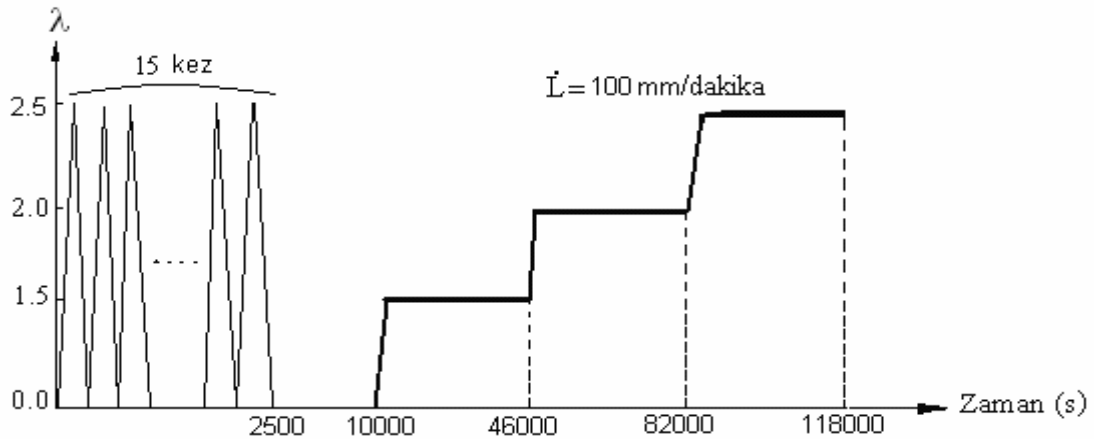
Şekil 14.  $\lambda = 2,5$  değerine kadar direkt uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü

Şekil 15'de ise aynı sertlik değerlerindeki numuneler  $\lambda = 1,5, 2,0, 2,5$  uzama oranlarında sırasıyla deforme edilmektedir. Şekil 15'deki deney prosedüründe numuneler çeneler arasına bağlandıktan sonra  $\lambda = 1,5$ 'a kadar  $100 \text{ mm/dak}$  çekme hızıyla deforme edilmiş ve  $36000$  saniye gerilme-zaman verileri kaydedilmiştir. Bundan sonra uzama oranı  $\lambda = 2,0$ 'ye çıkarılarak aynı şekilde  $36000$  saniye ( $10$  saat) beklenmiştir. Tüm bu işlemler  $\lambda = 2,5$ 'a kadar gerçekleştirilir. Böylelikle toplam olarak  $108000$  saniye Şekil 15'deki deney prosedürüyle deney yapılmış olmaktadır. Bu deney prosedürü ile uzama oranının gerilme gevşemesine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu deney ile malzemenin ömrü tahmin edilebilmektedir.



Şekil 15. Malzemeye uygulanan gerilme gevşemesi deney prosedürü

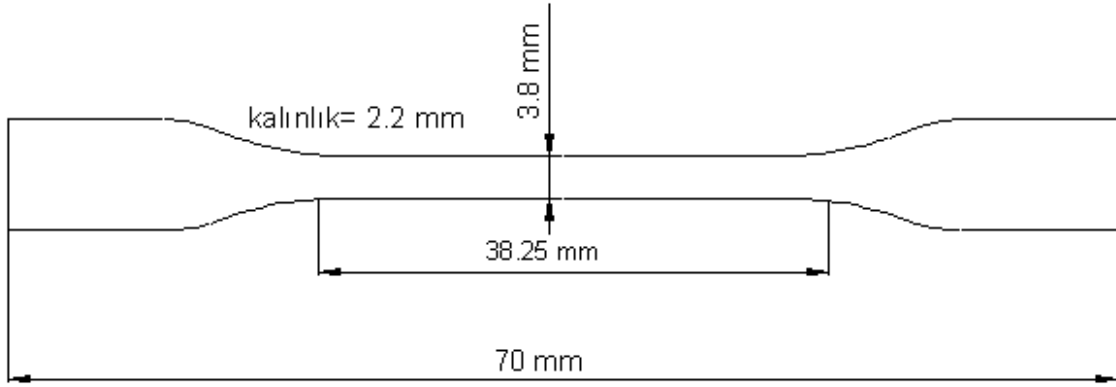
Şekil 16'da görülen uzama oranı-zaman grafiğinde malzemeye bir ön prosedür uygulanmıştır. Gerilme gevşemesi deneyinden önce uygulanan bu ön prosedür  $\lambda = 2.5$  değerine kadar 100 mm/dak çekme deneyi hızında gerçekleştirilmiş ve numuneler öncelikle 15 kez yükleme boşaltma prosedürüne tabi tutulmuştur. Bu deney prosedüründe tek eksenli çekme deney makinasında çeneler arasına tutturulmuş olan değişik sertlik değerlerindeki numuneler çenelerden sökülmeden 2 saat(7200 saniye) yüksüz konumda bekletilmiş ve daha sonra Şekil 16'daki deney prosedürü uygulanmıştır. Tüm deney 118000 saniye sürmüştür. Böylelikle ön prosedür uygulamanın EPDM kauçuk numunelerinin gerilme gevşemesi davranışı üzerinde ne gibi bir farklı duruma neden olduğu araştırılmış ve elde edilen verilerle birlikte bu sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 16. Malzemeye uygulanan ön deformasyon prosedürlü gerilme gevşemesi deney prosedürü

## 2.5. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Yapılan çalışmada kristalize olmayan EPDM kauçuğundan hazırlanan Shore A60, 70, 80 sertlik değerlerindeki numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler dumbbell şeklinde özel bir kesme makinasında hassas bir şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde numune olarak kristalize olmayan EPDM kauçuğu kullanılmıştır. Numune boyutları Şekil 17'de gösterildiği gibidir. Ölçüm uzunluğu ( yüksüz konumda çeneler arasındaki mesafe ) 38.25 mm alınmıştır.



Şekil 17. Deneyde kullanılacak EPDM numune boyutları



### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

#### **3.1. Gerilme Gevşemesi Deneyleri**

Kauçuk türü malzemelerin inelastik özelliklerinden bir tanesi sabit deformasyon altında gerilmenin zamanla azaldığı gerilme gevşemesi deney prosedürüdür. Yapılan çalışmada Shore A60, A70, A80 sertlik değerlerinde EPDM kauçuk malzemelerinin sürekli ölçüm yöntemiyle gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ön prosedür uygulanmadan elde edilen gerilme gevşemesi deneyleriyle prosedür uygulandıktan sonraki gerilme gevşemesi deneylerinin sonuçları karşılaştırılarak EPDM kauçuklarda sertliğin gerilme gevşemesi üzerine etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

##### **3.1.1. EPDM Kauçuk Deneyleri**

###### **3.1.1.1. Shore A60 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri**

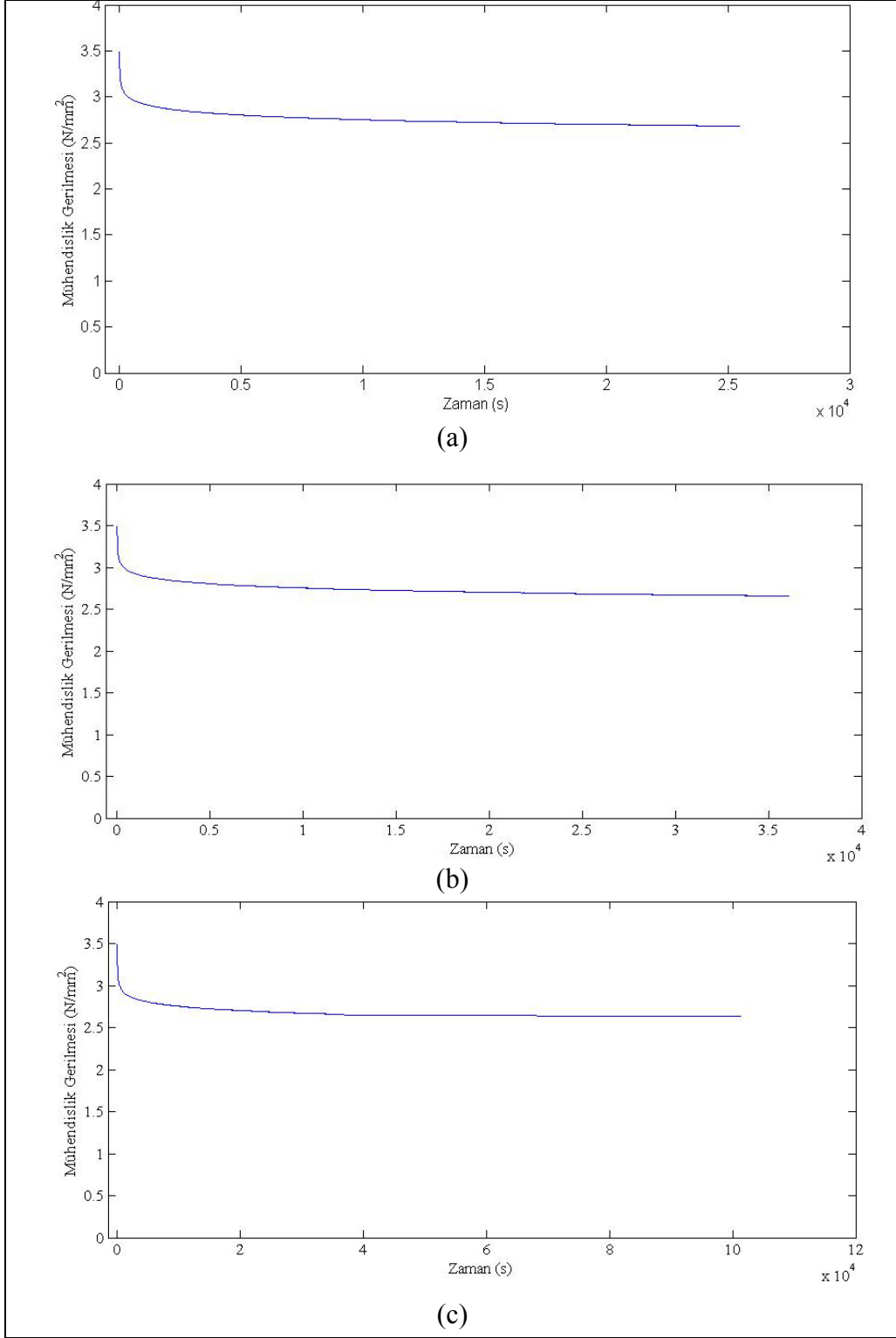
Öncelikle EPDM kauçuğunun Shore A60 sertlik değerinde 25400, 36000 ve 100800 saniye değerlerinde gerilme gevşeme grafikleri  $\lambda = 2.5$  için elde edilmiştir ve bu grafikler ayrı ayrı Şekil 18’de verilmiştir. Deneyin toplu haldeki grafikleri Şekil 19’de verilmiştir.  $\lambda = 2.5$  değerinde çizilen grafiklerde görüldüğü üzere 25400 ve 36000 saniye değerleri 100800 saniyelik grafik üzerine yapışmaktadır. Buradan 25400 saniye değeri gerilme gevşemesi grafiğinin ilk kısmı yani eksponansiyel kısmında tam uyum sağlamış görünürken, ikinci kısım olan lineere yakın bölgede başlangıçta 100800 saniye grafiğine çakışık olarak görülmektedir fakat ilerleyen saniye değerlerinde bu yapışık durum ortadan kalkmaktadır. 36000 saniye değerinde ise bu durum 25400 saniye değerine göre çok daha iyidir. Bu yüzden 36000 saniye değeri çizilen tüm grafikler için baz alınmıştır.

Şekil 18-a’da  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 3.487 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1 = 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır. Gerilme gevşemesi deneylerinde hızlı gerilme düşüşünün olduğu bölge birinci bölge, gerilme düşüşünün daha az olduğu lineere yakın bölge ise ikinci bölge olarak

adlandırılır.[13],  $\sigma_2= 2.776 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\min}=2.682 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 25400 saniyelik 18-a grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $0.711 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.094 \text{ N/mm}^2$  dir.

Şekil 18-b'de  $\sigma_1= \sigma_{\max} =3.490 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1= 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2= 2.779 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\min}=2.659 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 36000 saniyelik 18-b grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $0.711 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.12 \text{ N/mm}^2$  dir.

Şekil 18-c'de  $\sigma_1= \sigma_{\max} =3.490 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1= 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2= 2.779 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\min}=2.635 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 100800 saniyelik 18-c grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $0.711 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.144 \text{ N/mm}^2$  dir.



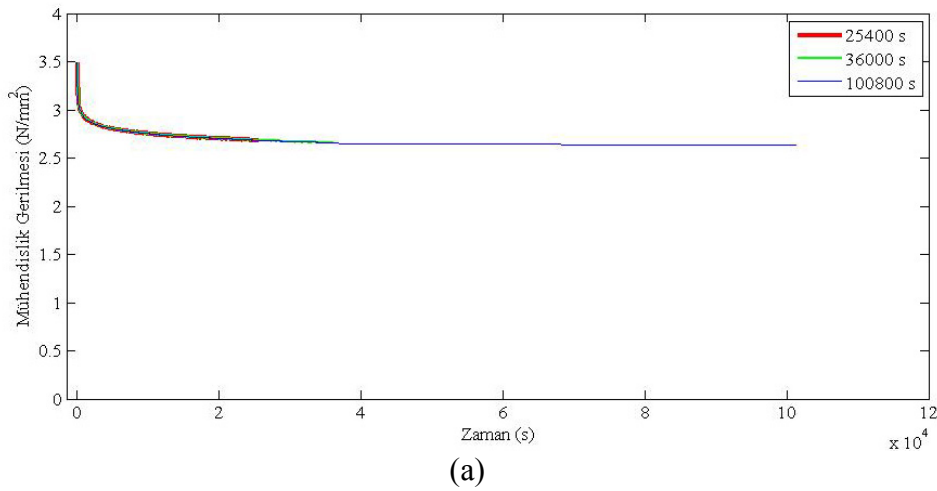
Şekil 18. Shore A60 sertlik değerinde a)25400, b)36000, c)100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafikleri

Bu tür verilerden her hangi bir t anındaki gerilme değerinin belirlemesi için Şekil 18-b grafiğine eğri uydurma işlemi yapılır. Burada aşağıdaki formda bir eğri denklemi seçilirse;

$$\sigma = \sigma_0 + a \exp(-bt) + c \exp(-dt) \quad (6)$$

Bu denklemde a,b,c,d ve  $\sigma_0$  sabit değerleri yukarıdaki deneysel sonuçlar için sırasıyla 0.2925, 0.002, 0.2402, 0.000084, 2.6531 olarak bulunur. Daha sonra 36000 saniye değerinden sonraki zaman değerleri için denklemde t yerine istenilen değer girilir. Girilen değerlerin Şekil 18-c'deki gerilme değerleriyle çakıştığı görülmektedir. Böylece bu malzeme için gerilme gevşemesi deneylerini daha uzun zaman diliminde yapmak yerine 36000 saniye sonundaki değer kullanılması uygun olduğu görülmektedir. 25400 saniye grafiğinde ise bu durum tam olarak elde edilememiştir.

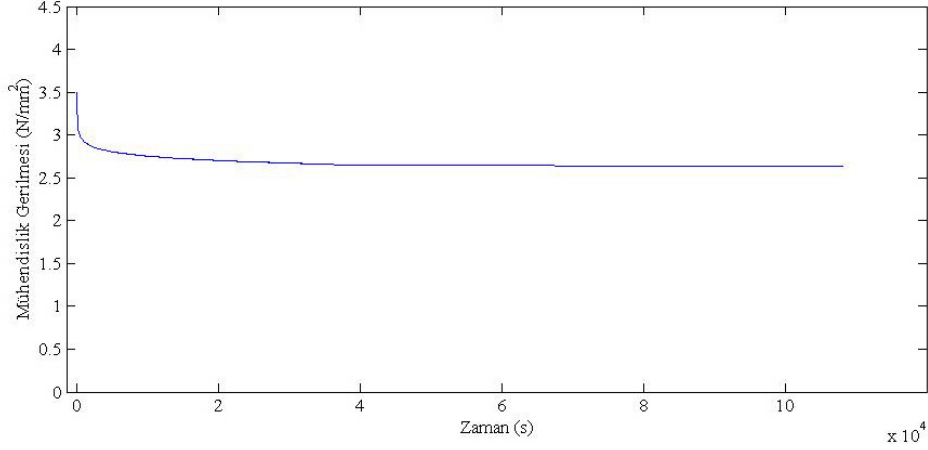
Şekil 18-a,b,c'de çizilmiş olan gerilme zaman grafikleri bir grafik üzerinde toplu olarak Şekil 19'da gösterilmiştir. Bu grafikte 25400, 36000, 100800 saniyelik deneylerin üst üste çakıştığı görülmektedir.



Şekil 19. Shore A60 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

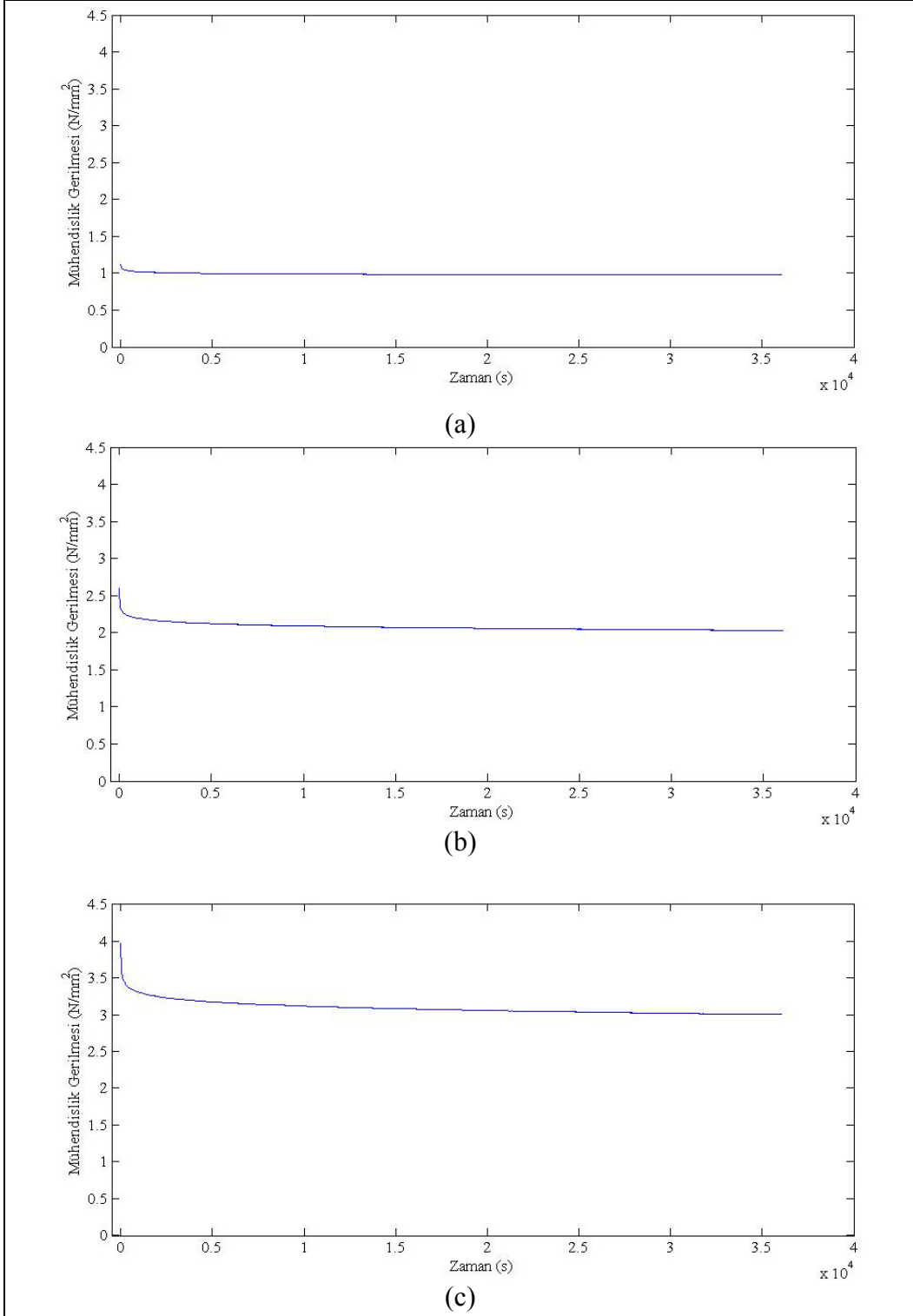
Uygulamada EPDM kauçuk numunesine öncelikle Şekil 14'dekine benzer bir yükleme prosedürü uygulanır. Bu prosedürle daha öncede açıklandığı gibi  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenmesiyle

gerilme gevşemesi grafiği elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 20’de görülmektedir. Maksimum gerilme değeri  $3.49 \text{ N/mm}^2$  deney sonucunda ise elde edilen gerilme değeri  $2.635 \text{ N/mm}^2$  değerine kadar düşmüştür. Gerilme gevşemesi değeri  $0.855 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Elde edilen grafik aşağıda uygulanmış olan prosedürlerle kıyaslanıp sonuçlar elde edilmiştir.

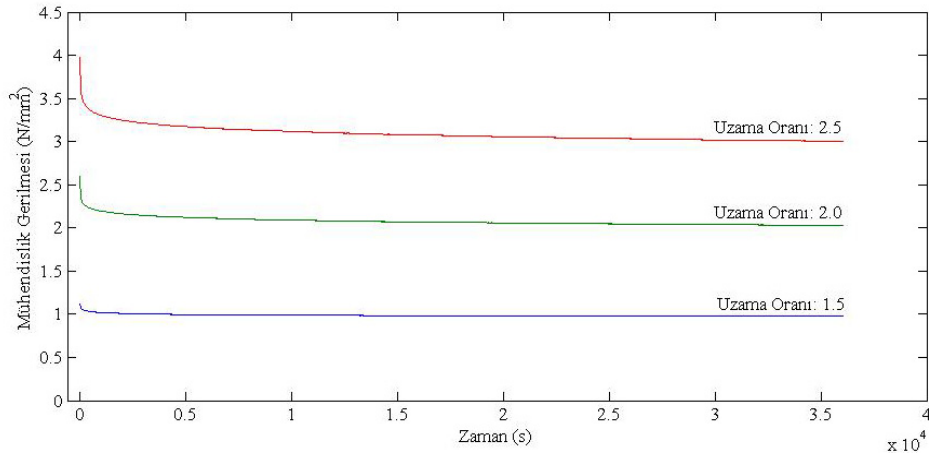


Şekil 20. Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen grafiğin gösterimi

EPDM kauçuk numunesine bir sonraki aşamada Şekil 15’deki prosedür uygulanmıştır. Bu prosedürde uzama oranı  $\lambda= 1.5$  değerine kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye(10 saat) beklenilmiş daha sonra  $\lambda= 2.0$  değerine kadar numune deforme edilmiş ve yine 36000 saniye beklenilmiş son olarak  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye beklenerek deney sonlandırılmıştır. Deney tümüyle 108000 saniyede tamamlanmıştır. Shore A60 sertlik değerinde elde edilen grafik değerleri Şekil 21’de ayrı olarak gösterilmiştir. Toplu olarak gösterim ise Şekil 22’dedir. Ayrıca EPDM kauçuk numunesine ön prosedür uygulandığında meydana gelen grafikler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 21. Shore A60 sertlik değerinde a)  $\lambda = 1.5$ , b)  $\lambda = 2.0$ , c)  $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi



Şekil 22. Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 4. Shore A60 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	1.124	0.993	0.974	0.131	0.019	0.151
$\lambda = 2.0$	2.598	2.105	2.030	0.493	0.075	0.596
$\lambda = 2.5$	3.973	3.142	3.004	0.831	0.138	1.098

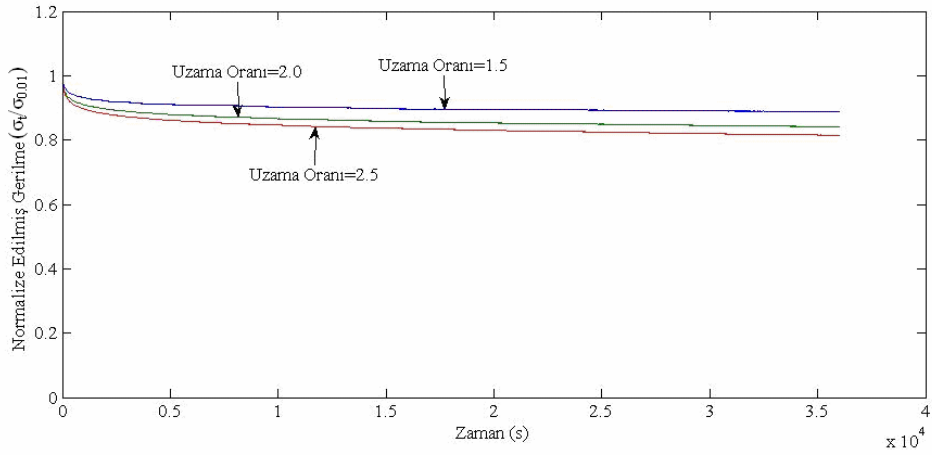
Şekil 21, Tablo 4'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri 1.124 N/mm<sup>2</sup> iken 7200. saniye sonunda 0.993 N/mm<sup>2</sup>'ye 36000. saniye sonunda ise 0.974 N/mm<sup>2</sup>'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma 0.131 N/mm<sup>2</sup> iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü 0.019 N/mm<sup>2</sup>'dir.  $\lambda = 2.0$ 'de 2.598 N/mm<sup>2</sup> ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda 2.105 N/mm<sup>2</sup>'ye 36000 saniye sonunda ise 2.030 N/mm<sup>2</sup>'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma 0.493 N/mm<sup>2</sup> iken geri kalan 28800 saniyede 0.075 N/mm<sup>2</sup>'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$ 'da ise 3.973 N/mm<sup>2</sup> ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda 3.142 N/mm<sup>2</sup>'ye 36000 saniye sonunda ise 3.004 N/mm<sup>2</sup>'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma 0.831 N/mm<sup>2</sup> iken geri kalan 28800 saniyede 0.138 N/mm<sup>2</sup>'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 4'te yer alan gerilme

gevşemesi deneylerinin incelenmesinden  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir. Tüm uzama oranları incelendiğinde EPDM kauçuğunun gerilme gevşemesinde iki farklı davranış söz konusu olmaktadır. Eğer 0 – 7200 saniyelik bölgeyi *I. Bölge* ve 7200 – 36000 saniyelik 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. II. Bölgede aynı zamanda malzemenin gerilmedeki düşüş değerinin stabil hale gelmesinin bir göstergesi olarak bu bölgedeki davranıştan malzemenin ömrü belirlenmektedir. Dolayısıyla  $\Delta\sigma_1$  gerilme düşüşü, deformasyon sebebiyle malzemede meydana gelen hasarı ifade ederken,  $\Delta\sigma_2$  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 [13].

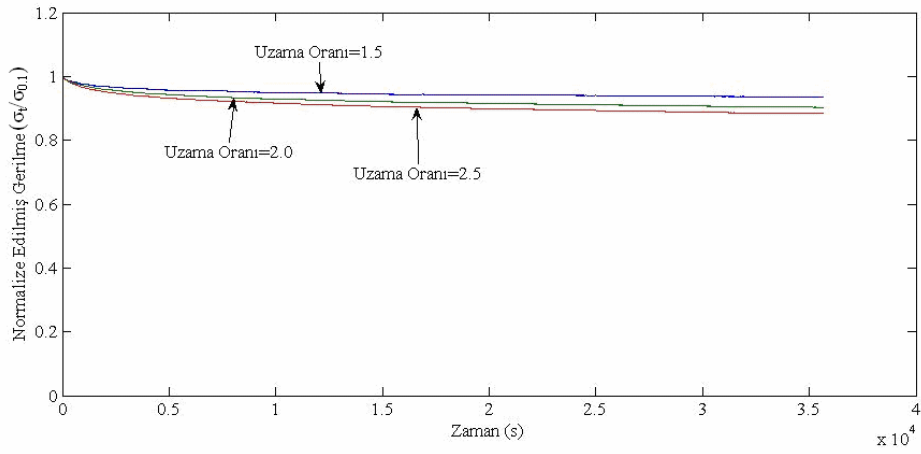
Gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen gerilme-zaman verilerinin farklı uzama oranlarındaki deney sonuçlarını kıyaslayabilmek için deneysel verilerin normalize edilerek grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir [17]. Literatürde bu tür uygulama ilk olarak Tobolsky ve arkadaşlarının çalışmalarında [18–19] görülmektedir. Literatürde gerilmenin normalize değeri, deneyde okunan gerilmenin 0.01. saatteki değerine [18–20–23], 0.1. saatteki değerine [21] veya 1.0. saatteki değerine [22] bölünmesiyle elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada gerilmenin normalize edilmiş değeri, deneyden okunan gerilme değerinin ( $\sigma_t$ ) 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine ( $\sigma_{0.01}$ ,  $\sigma_{0.1}$ ,  $\sigma_{1.0}$ ) bölünerek elde edilmiş ve grafikler buna göre çizilmiştir. Şekil 23, 24, 25'te, Şekil 22'deki gerilme gevşemesi deneysel verilerinin 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş gerilme gevşemesi grafikleri görülmektedir.

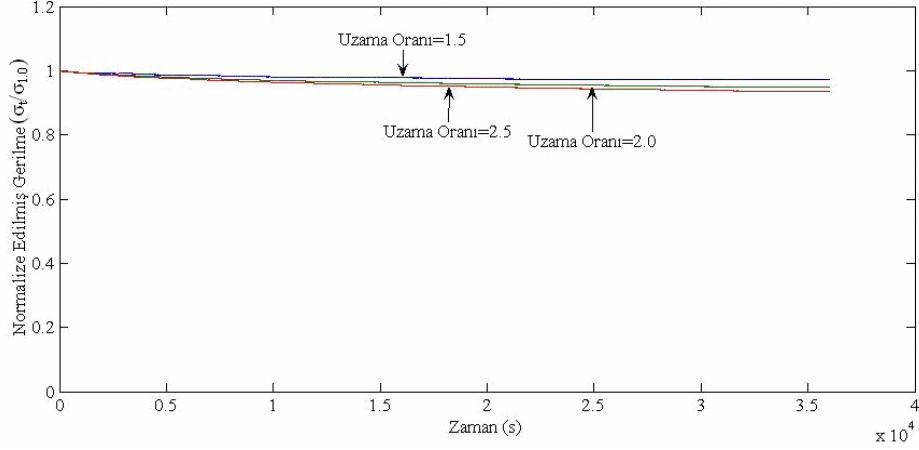




Şekil 23. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



Şekil 24. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



Şekil 25. EPDM kauçuk malzemesinin  $\lambda = 1.5$ ,  $\lambda = 2.0$ ,  $\lambda = 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

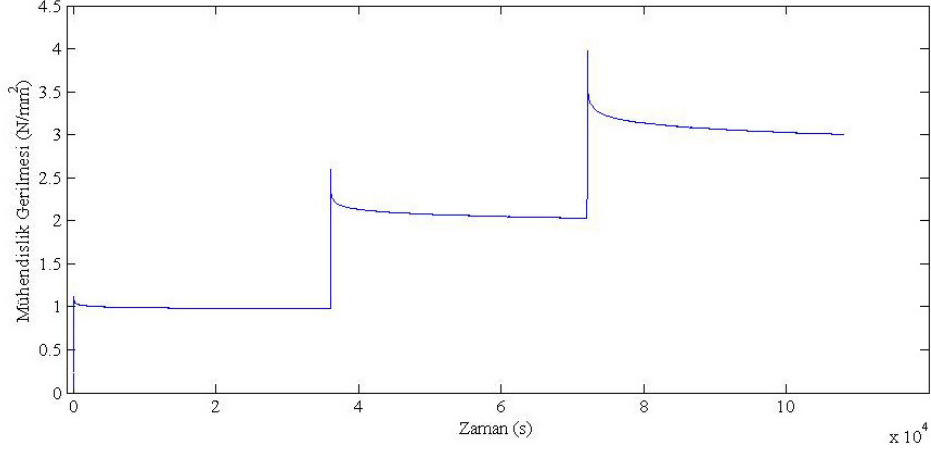
Şekil 23'de normalize gerilmede en fazla düşüş  $\lambda = 2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda = 1.5$  ile  $\lambda = 2.0$  uzama oranları arasında oluşan gerilme gevşemesi farkı,  $\lambda = 1.5$  ile  $\lambda = 2.5$  uzama oranları arası farka göre biraz daha azdır.  $\lambda = 2.5$  uzama oranında 1. bölgede gerilme düşüşü fazla olmaktadır. 2. bölgede ise 1. bölgedeki kadar olmasada yine de gerilmede doğrusal bir düşüş söz konusudur. Her üç uzama oranında lineere yakın bölgede  $\alpha$  eğim değeri en fazla olan  $\lambda = 2.5$  değeridir.  $\lambda = 2.0$ 'de eğim değeri  $\lambda = 1.5$ 'dakinden fazladır. 1.5 uzama oranı 2. bölgede yaklaşık olarak sabite yakın bir değerde devam etmektedir.

Normalize gerilme değerleri birbirleriyle kıyaslanacak olursa, 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize gerilme-zaman grafiklerinde uzama oranları arasında fark oldukça büyüktür. 0.1 ve 1.0. saatteki grafiklerde ise uzama oranları arasındaki fark gittikçe kapanmaktadır. Yani uzama oranları birbirlerine yaklaşmaktadır.

Şekil 23, 24, 25 grafikleri kıyaslandığında en ideal durum 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize gerilme-zaman grafiklerinden elde edilmektedir. Çünkü farklı uzama oranlarındaki numuneler hemen hemen çakışmaktadır. Şunu söyleyebiliriz ki gerilme-zaman grafiklerindeki eğrileri tek bir uzama oranıyla ifade etmek mümkündür.

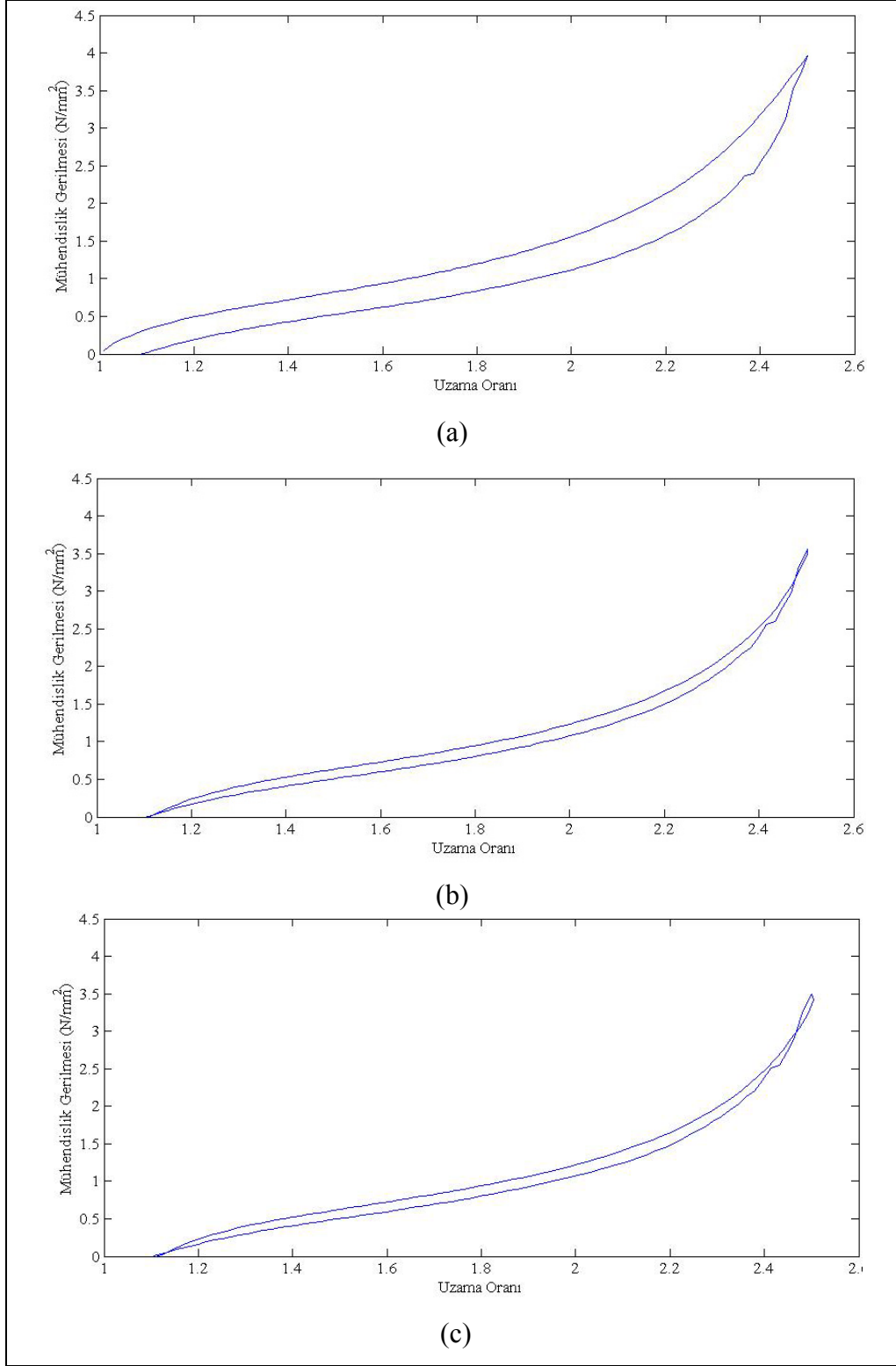
Şekil 15'deki prosedür uygulanması sonucunda  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilen numunede Şekil 21c'den görüldüğü gibi maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_{\max} = 3.973$ ,  $\sigma_{\min} = 3.004$  N/mm<sup>2</sup> dir. Uygulanan prosedür sonucunda elde edilen grafik tüm uzama oranları için Şekil 26'da görülmektedir. Deney üç aşama olarak toplam 108000 saniye sürmüştür. Burada  $\lambda = 2.5$  değerinde elde edilen minimum gerilme değeri daha sonra

elde edeceğimiz ön prosedürlü gerilme değeri ve Şekil 20'deki grafikten elde edilen minimum gerilme değeri arasında kıyaslama yapılacaktır.



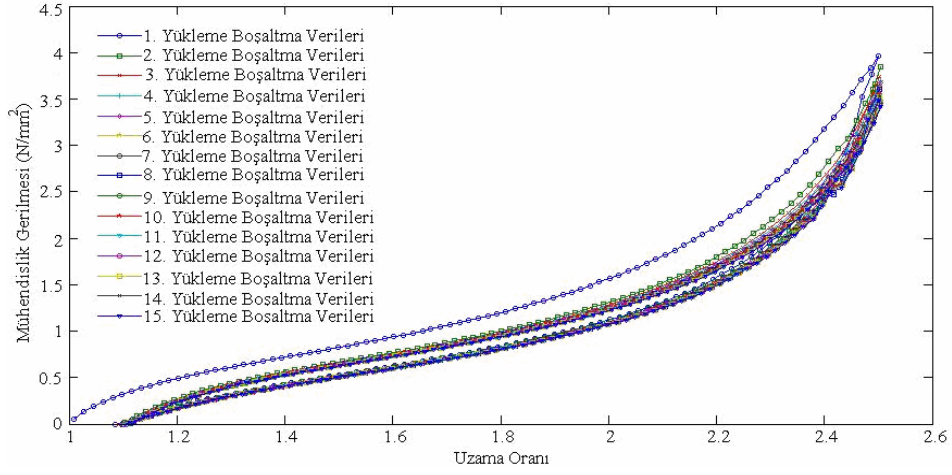
Şekil 26. Shore A60 sertlik değerinde Şekil 15'deki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

Kauçuk türü malzemelere ön prosedür uygulandığında numunenin iç yapısında meydana gelecek olan deformasyonu tespit edebilmek için Şekil 16'daki ön prosedürlü gerilme gevşemesi deneyi yapılmıştır. Numune sabit uzama oranına kadar yükleme-boşaltma işlemine tabi tutularak deforme edilmiş ve bu işlem 15 kez 100 mm/dak numune boy değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir. Malzemenin 1., 10. ve 15. yükleme-boşaltma eğrileri Şekil 27'de gösterilmiştir. Deneyin toplu halde grafikleri ise Şekil 28'de verilmiştir. Şekil 27'den görüldüğü gibi ilk yükleme-boşaltma eğrisinde gerilme-uzama oranı verileri arasında belirli bir fark söz konusudur. Boşaltma eğrisinde numune kalıcı deformasyondan dolayı başlangıçtaki uzama oranından daha büyük bir uzama oranına sahiptir. Artan yükleme-boşaltma eğrileri neticesinde gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve stabil hale gelmektedir.

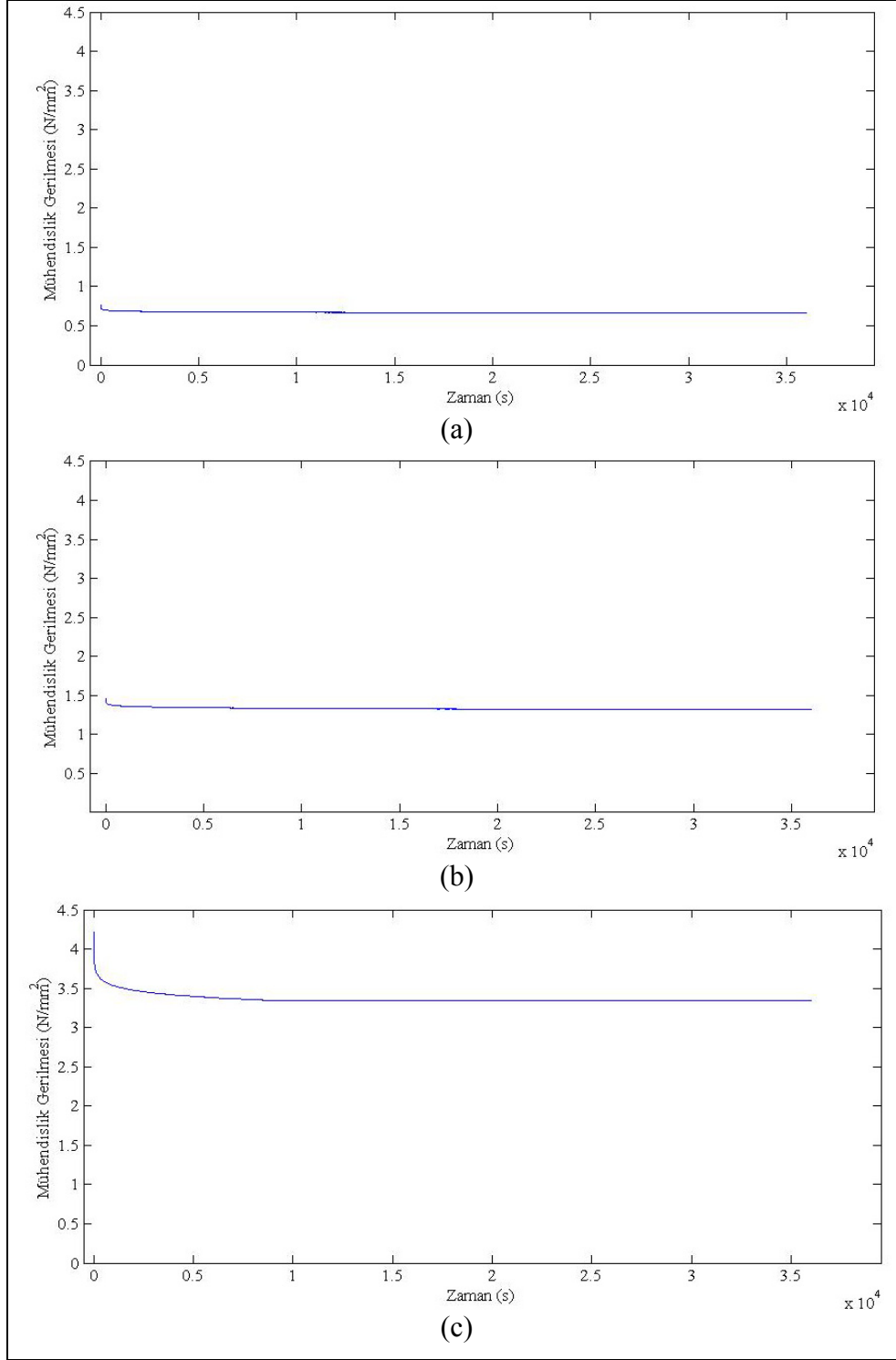


Şekil 27. Shore A60 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. , b) 10. ve c) 15. yükleme boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi

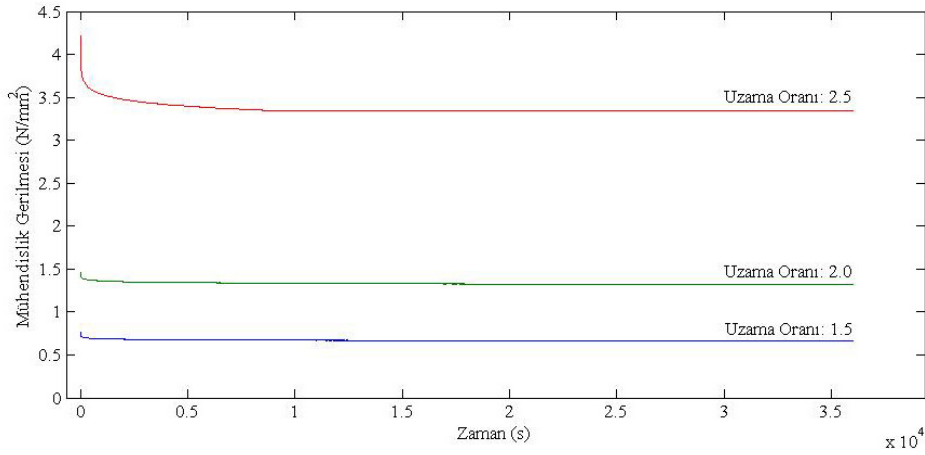
Kauçuk türü malzemeye 15 kez yükleme boşaltma işlemi uygulandıktan sonra numune tutma çeneleri arasından sökülmeden yüksüz konumda 7200 saniye (2 saat) bekletilmiştir. Bekleme işlemi bittikten sonra Şekil 15'teki prosedür uygulanmıştır. Böylece ön prosedür uygulamanın gerilme gevşemesi deneyleri üzerinde ne gibi etkileri olduğu araştırılmıştır. Elde edilen gerilme-zaman verileri Şekil 29'da verilmiştir. Tüm bu deneylerin toplu halde gösterimi ise Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 28. Shore A60 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme-boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi



Şekil 29. Shore A60 sertlik değerinde a)  $\lambda = 1.5$ , b)  $\lambda = 2.0$ , c)  $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı olarak gösterimi



Şekil 30. Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 5. Shore A60 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

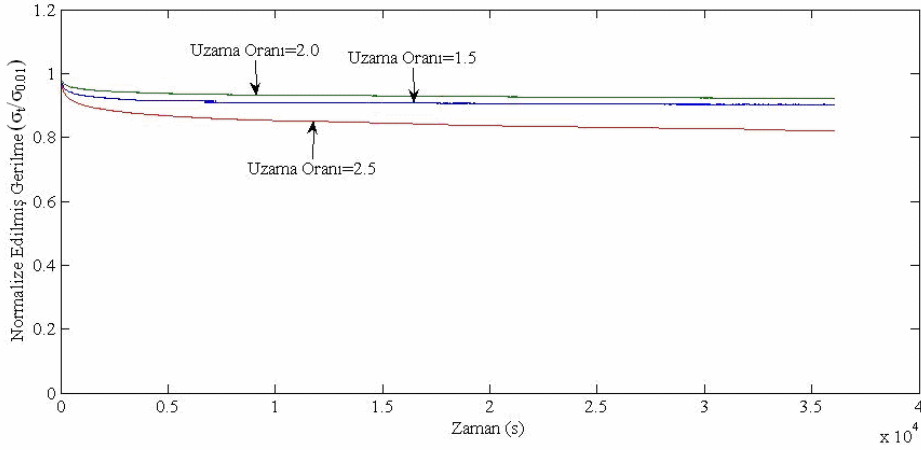
	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	0.760	0.671	0.664	0.089	0.007	0.055
$\lambda = 2.0$	1.464	1.338	1.319	0.126	0.019	0.151
$\lambda = 2.5$	4.217	3.365	3.342	0.852	0.023	0.183

Şekil 29, Tablo 5'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri  $0.760 \text{ N/mm}^2$  iken 7200. saniye sonunda  $0.671 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000. saniye sonunda ise  $0.664 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma  $0,089 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü  $0.007 \text{ N/mm}^2$ 'dir.  $\lambda = 2.0$ 'de  $1.464 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $1.338 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $1.319 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $0.126 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.019 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$ 'da ise  $4.217 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $3.365 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $3.342 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $0.852 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.023 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 5'te yer alan ön prosedür uygulanmış gerilme gevşemesi deneylerinin incelenmesinden normal prosedürde

olduğu gibi  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir.

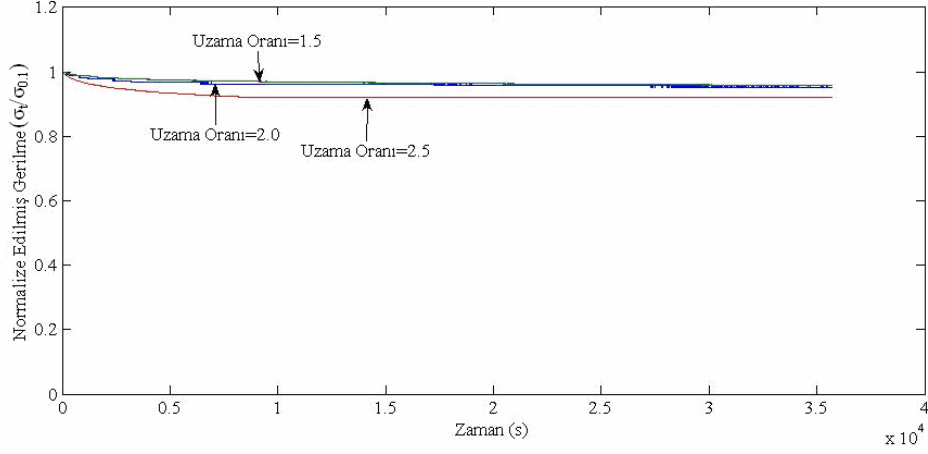
Şekil 31'de en fazla gerilme gevşemesi  $\lambda= 2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda= 1.5$  ile  $\lambda= 2.0$  uzama oranları arasında oluşan gerilme gevşemesi farkı oldukça azdır. Aksine  $\lambda= 1.5$  ile  $\lambda= 2.5$  uzama oranları arası fark fazladır.  $\lambda= 2.5$  uzama oranında 1. bölgede gerilme düşüşü daha fazla olmaktadır. 2. bölgede ise yani lineere yakın bölgede  $\alpha$  eğim değeri çok küçük olmasından dolayı nerdeyse sabite yakın bir değer alır.  $\lambda= 1.5$  ve  $2.0$ 'de ise 1. bölgede gerilme düşüşü az olmasına rağmen 2. bölgede  $\alpha$  eğimi  $\lambda= 2.5$  uzama oranındakine göre biraz daha büyüktür. Yani gerilmedeki azalma  $\lambda= 2.5$ 'dakine göre daha hızlıdır.

Şekil 16'daki prosedür kauçuk numuneye uygulandığında normalize gerilme-zaman verilerininin 1.0. saatteki grafikleri Şekil 25'teki verilere göre çok daha iyi sonuç vermektedir.

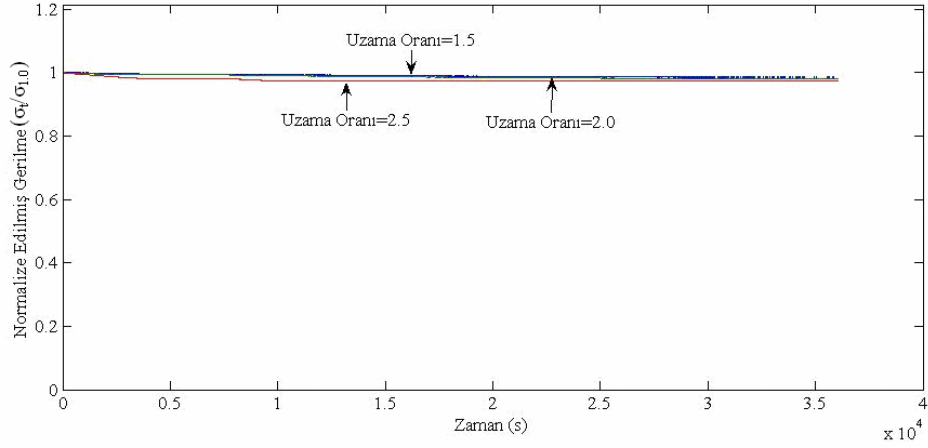


Şekil 31. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda=2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



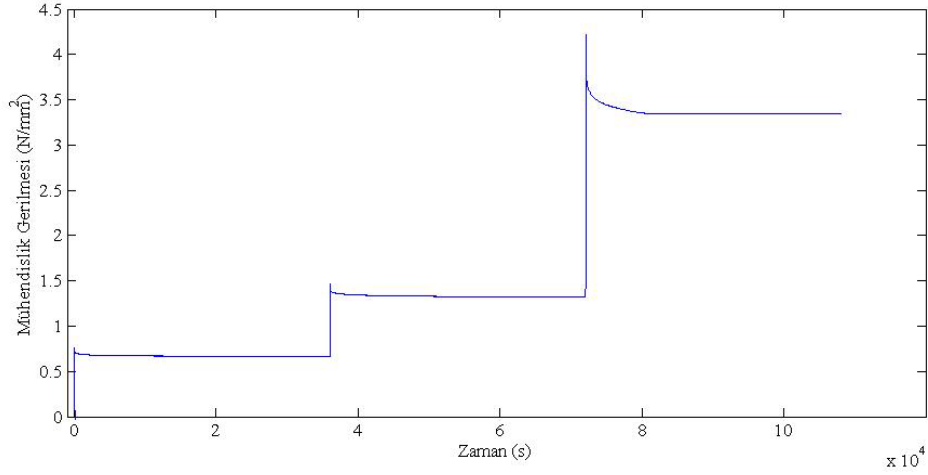


Şekil 32. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda=2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



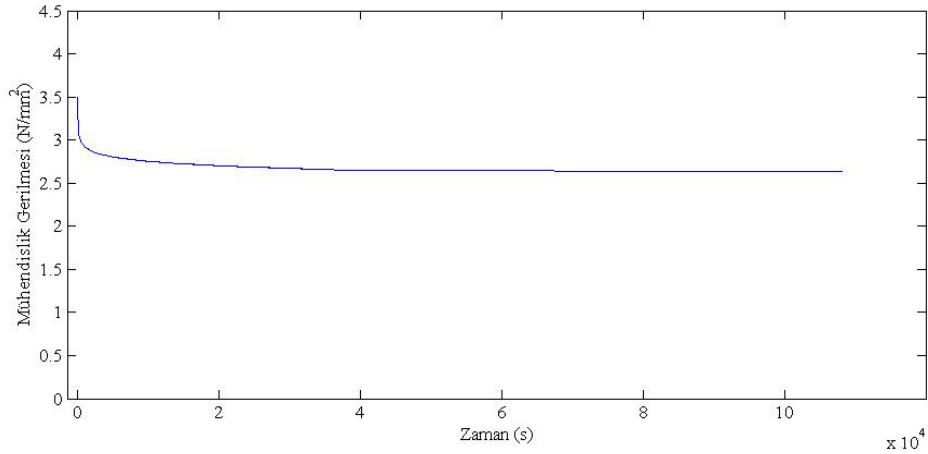
Şekil 33. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A60 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda=2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Şekil 16'daki prosedür EPDM kauçuk malzemesine uygulandığında elde edilen şekiller Şekil 29'da gösterilmiştir. Burada malzemenin her bir uzama oranında 36000 saniye gerilme gevşemesine tabi tutularak Şekil 34'deki grafik elde edilmiştir. Bu grafikte  $\lambda= 2.5$  uzama oranında elde edilen minimum gerilme değerinin  $\sigma_{\min} = 3.342 \text{ N/mm}^2$  olduğu görülmektedir.



Şekil 34. Shore A60 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

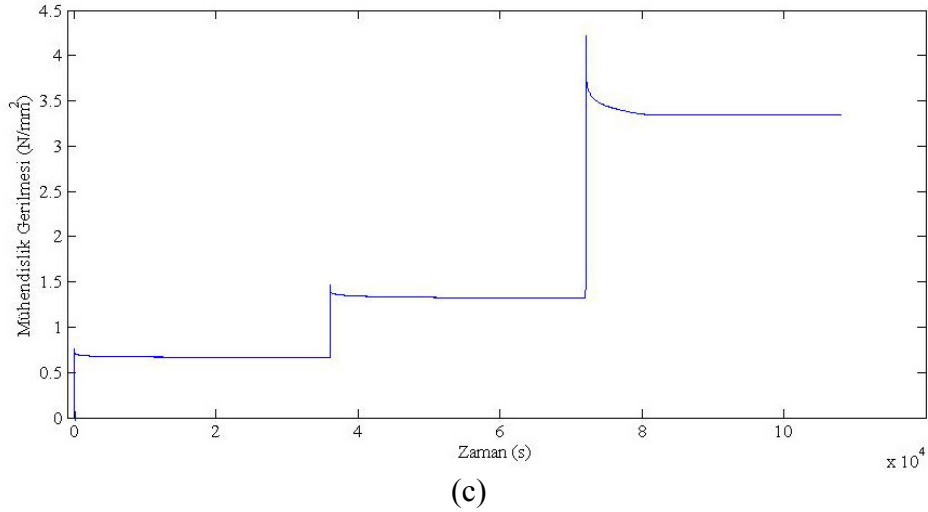
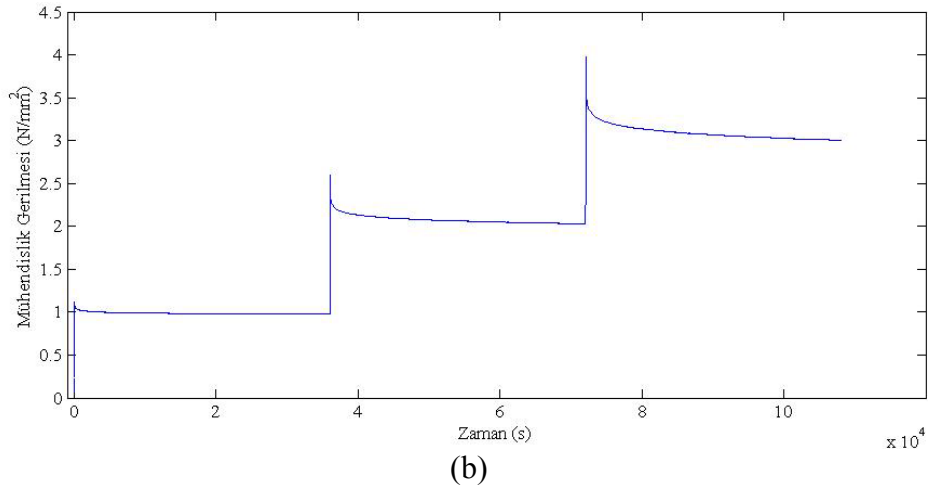
Tüm bu deneyler sonucunda birçok kez ifade edildiği gibi asıl vurgulanmak istenen Şekil 14, 15 ve 16'daki prosedürler arasında kıyaslama sonucu EPDM kauçuk numunesinin içyapısında meydana gelen deformasyonun tespiti. Bu deformasyonu tespit ederken sırasıyla uygulanan prosedürlerde deney sonucunda elde edilen gerilme değerleri dikkate alınmıştır.



(a)

Şekil 35. Shore A60 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedürlerin uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

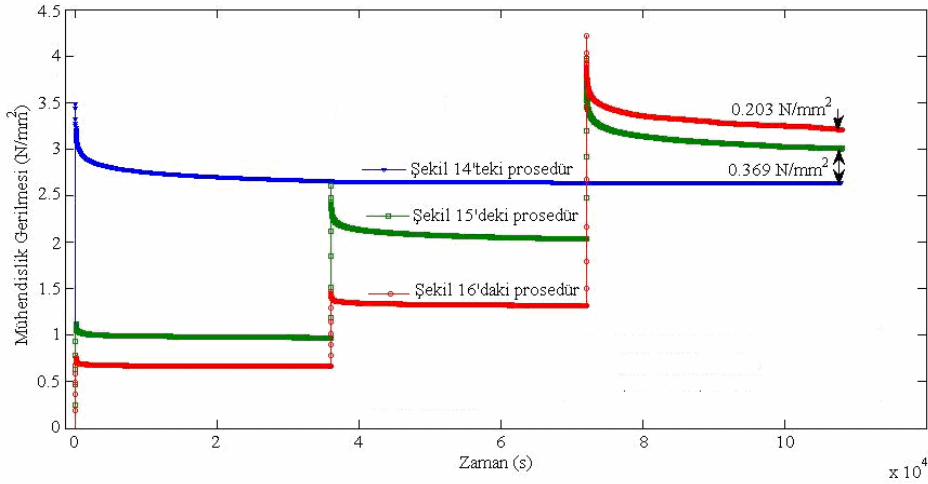
Şekil 35'in devamı



Şekil 36'dan görülmektedir ki EPDM kauçuk numunesi shore A60 sertlik değerinde uygulanan tüm prosedürler sonucunda normal prosedür ve ön prosedür uygulama gerilmeye düşüşe sebep olmaktadır. Normal koşullarda Şekil 14'deki prosedür uygulandığında kauçuk numunenin iç yapısındaki bağlar arasında çok fazla bir hasar sözkonusu olmamaktadır. Böylelikle malzeme üzerinde kalıcı deformasyon az olmaktadır. Yani malzeme herhangi bir deformasyon uygulandığında eski konumuna büyük oranda gelmektedir. Bu prosedürle numunede  $0.855 \text{ N/mm}^2$  kadar bir gevşeme olmaktadır. Şekil 15'teki prosedür uygulandığında yukarıda bahsedilen iç yapıda bağlar arası kopmalar ve dolaylı olarak malzemede kalıcı deformasyon Şekil 14'deki prosedürden biraz daha fazla olmaktadır. Gerilme düşüşü ise  $0.969 \text{ N/mm}^2$  seviyesindedir. Son olarak uygulanan ön

prosedürlü deneyde ise tahmin edildiği gibi numune çok fazla işleme tabi tutulduğundan dolayı numunenin içyapısındaki bağlarda kopma çok daha fazla olmaktadır. Böylece Şekil 16'daki prosedür uygulandığında gerilme düşüşü  $0.875 \text{ N/mm}^2$  olmaktadır. Numune  $4.217 \text{ N/mm}^2$  maksimum gerilme değerine ulaşmaktadır. Deney sonunda ise diğer prosedürlerden daha fazla bir gerilme değeri elde edilmektedir. Ancak gerilme düşüşü bir önceki prosedürden az olmaktadır. Yani  $0.875 \text{ N/mm}^2$  gevşeme değeri elde edilmektedir.

Şekil 36'da  $\lambda = 2.5$  uzama oranlarında Şekil 14, 15 ve 16 prosedürlerindeki gerilme gevşemesi grafikleri bir t zamanında çakışmaktadır. Bu grafiklerin eğimleri yardımıyla Şekil 14 ve Şekil 15'in  $\lambda = 2.5$  uzama oranındaki gerilme gevşemesi grafikleri 50,9 saat sonra çakışmaktadır. Bu zaman diliminden sonra Şekil 15'in eğiminin fazla olmasından dolayı elde edilen gerilme değerleri Şekil 14'tekinden az olmaktadır. Aynı şekilde Şekil 14 ve Şekil 15 prosedürlerinden elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin çakıştığı zaman ise 58,9 saat olarak elde edilmiştir. Şekil 16 grafiğinin  $\lambda = 2.5$  uzama oranında eğiminin Şekil 15'tekinden daha az olmasından dolayı daha büyük bir t zamanında çakışma gerçekleşmektedir.



Şekil 36. Şekil 35'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi

### 3.1.1.2. Shore A70 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri

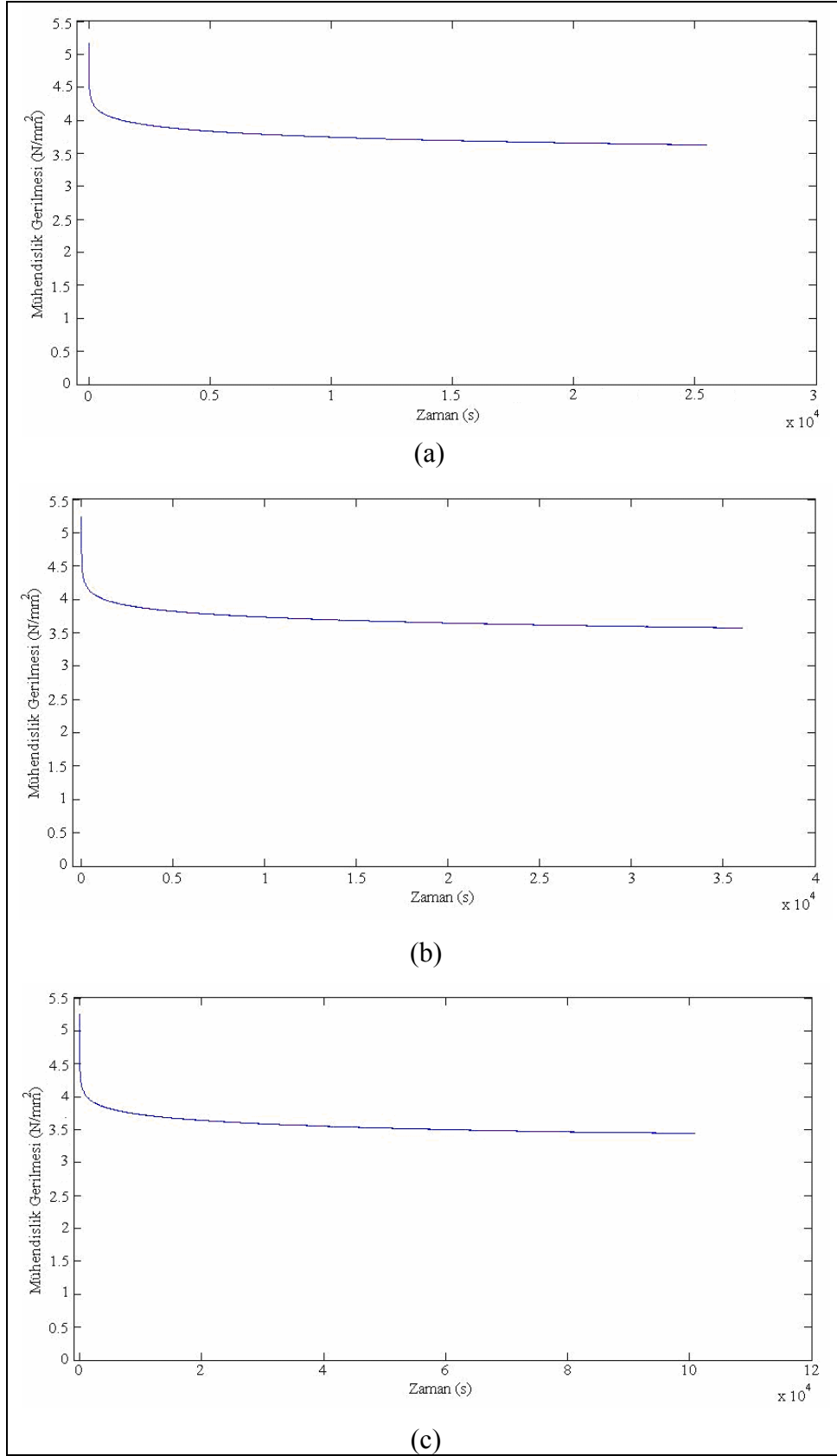
Shore A70 sertlik değerine sahip EPDM numunelerin  $\lambda = 2.5$  için 25400, 36000, 100800 saniye değerlerine kadar ki gerilme gevşeme davranışını gösteren grafikler şekil 37'de verilmiştir. Deneyin toplu haldeki grafikleri Şekil 38'de verilmiştir.  $\lambda = 2.5$  değerinde

çizilen grafiklerde görüldüğü üzere 25400 ve 36000 saniye değerleri 100800 saniyelik grafikte çakışmaktadır. Buradan 25400 saniye değeri gerilme gevşemesi grafiğinin ilk kısmı yani eksponansiyel kısmında tam uyum sağlamış görünürken, ikinci kısım olan lineere yakın bölgede başlangıçta 100800 saniye grafiğine çakışık olarak görülmektedir. Ancak ilerleyen saniye değerlerinde ikinci bölgenin eğiminin fazla olmasından dolayı gerilme değeri 100800 saniyedeki gerilme değerlerinin altına düşmektedir. 36000 saniye değerinde eğim değeri daha küçük olduğundan ilerleyen zaman değerlerinde hemen hemen 100800 saniyelik grafiğe yapıştığı görülmektedir. Bu yüzden 36000 saniye değeri çizilen tüm grafikler için baz alınmıştır.

Şekil 37-a'da  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 5.163 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1 = 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2 = 3.788 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık olarak lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3 = \sigma_{\text{min}} = 3.626 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 25400 saniyelik 36-a grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $1.375 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.162 \text{ N/mm}^2$  dir. Gerilme düşüşleri shore A 60 sertlik değerine sahip numunelerinkine göre hem birinci hem de ikinci bölgede çok daha fazla olmaktadır.

Şekil 37-b'de  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 5.243 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1 = 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2 = 3.776 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3 = \sigma_{\text{min}} = 3.572 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 36000 saniyelik 37-b grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $1.467 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.204 \text{ N/mm}^2$  dir.

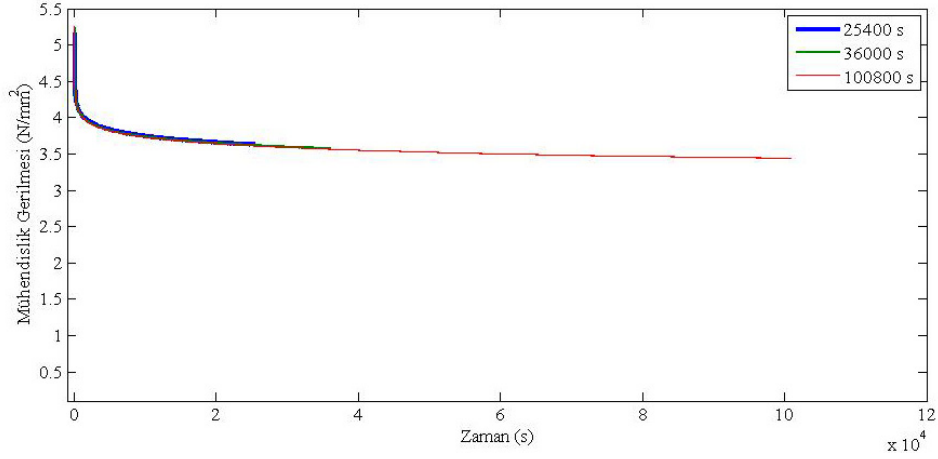
Şekil 37-c'de  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 5.255 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1 = 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2 = 3.771 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3 = \sigma_{\text{min}} = 3.443 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 100800 saniyelik 37-c grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $1.484 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.328 \text{ N/mm}^2$  dir.



Şekil 37. Shore A70 sertlik değerinde a) 25400, b) 36000, c) 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı çizilmiş hali

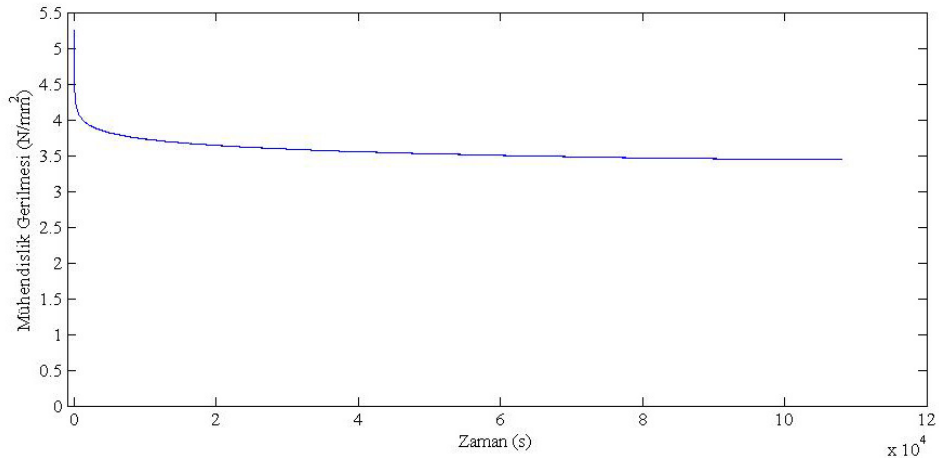
Şekil 37-b grafiğine (6) denklemiyle eğri yakıştırılması neticesinde bu denklemde a,b,c,d ve  $\sigma_0$  sabit değerleri sırasıyla 0.4726, 0.018, 0.4055, 0.000084, 3.5646 olarak bulunmuştur. Daha sonra 36000 saniye değerinden sonraki zaman değerleri için denklemde t yerine istenilen değer girilir. Girilen değerlerin Şekil 37-c'deki gerilme değerleriyle çakıştığı görülmektedir. Böylece deneyi daha uzun zaman diliminde yapmak yerine 36000 saniye değeri uygun olduğu görülmektedir. 25400 saniye grafiğinde ise bu durum tam olarak elde edilememiştir.

Şekil 38'de Şekil 37-a,b,c'de çizilmiş olan gerilme zaman grafikleri bir grafik üzerinde toplu olarak gösterilmiştir. Bu grafikte 25400, 36000, 100800 saniyelik deneylerin üst üste çakıştığı görülmektedir.



Şekil 38. Shore A70 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

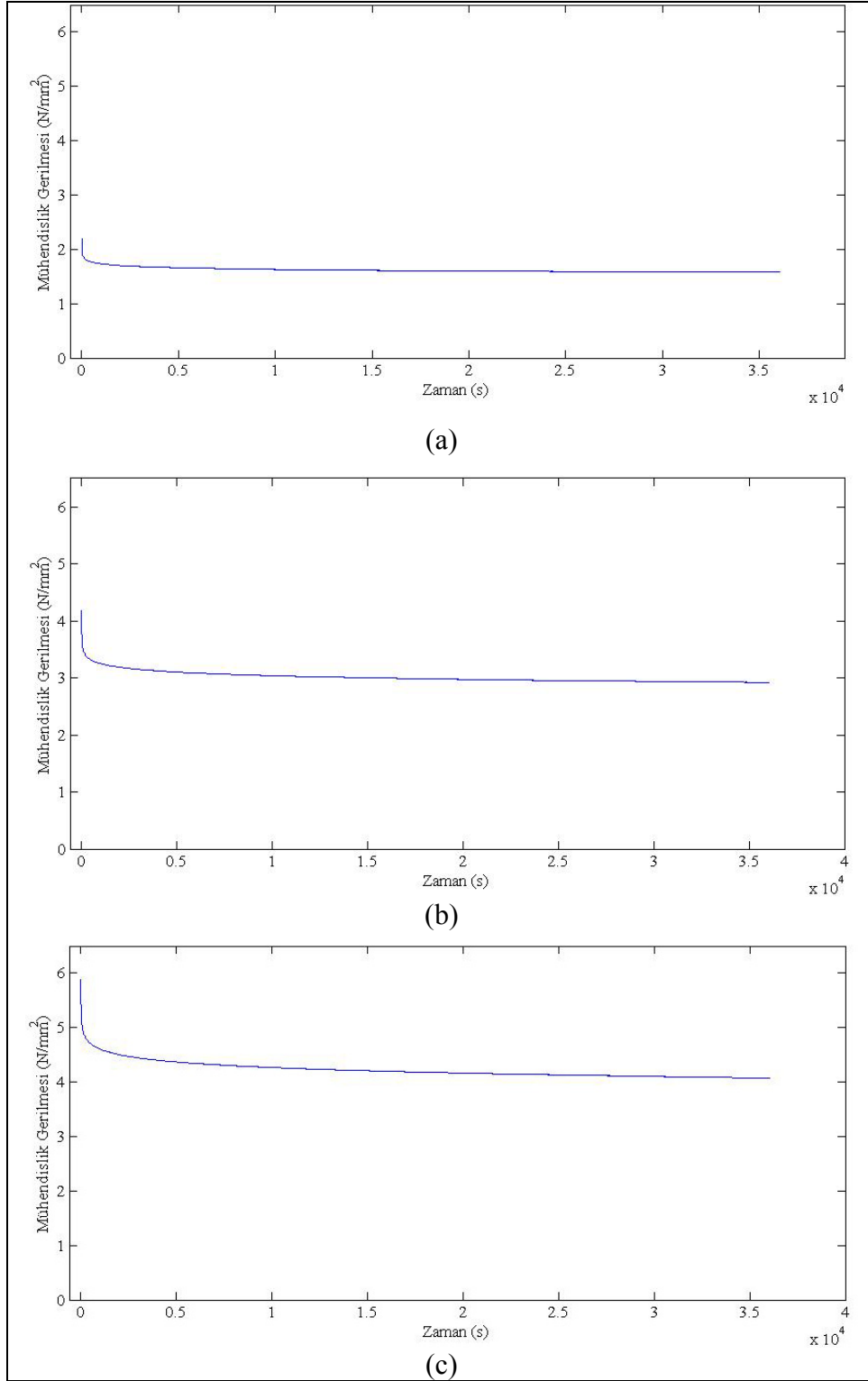
EPDM kauçuk numunesine önce Şekil 14'deki prosedür uygulanmıştır. Bu prosedürle daha öncede açıklandığı gibi  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesiyle gerilme gevşemesi grafiği elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 39'da görülmektedir. Maksimum gerilme değeri  $5.255 \text{ N/mm}^2$ , deney sonucundaki gerilme değeri ise  $3.443 \text{ N/mm}^2$  değerine kadar düşmüştür. Gerilme gevşemesi değeri  $1.812 \text{ N/mm}^2$  dir. Elde edilen grafik aşağıda uygulanmış olan prosedürlerle kıyaslanıp sonuçlar elde edilmiştir.



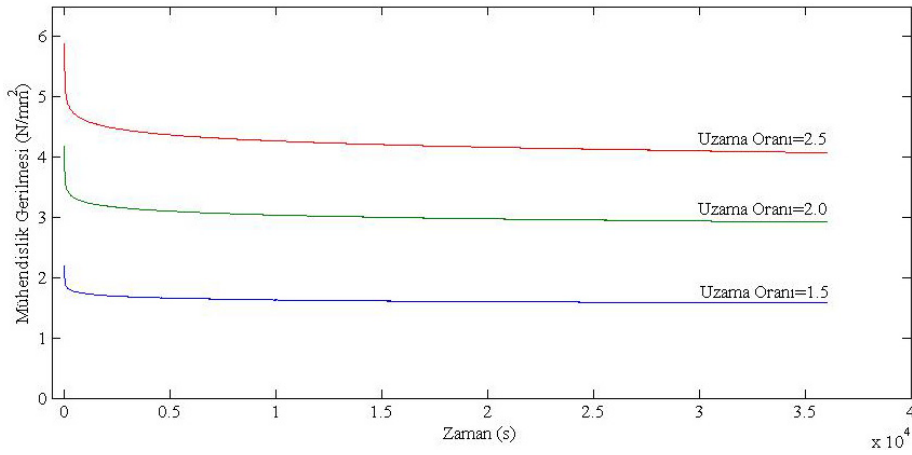
Şekil 39. Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen grafiğin gösterimi

EPDM kauçuk numunesine bir sonraki aşamada Şekil 15'teki prosedürü uygulanmıştır. Bu prosedürde uzama oranı  $\lambda= 1.5$  değerine kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye(10 saat) beklenilir daha sonra  $\lambda= 2.0$  değerine kadar numune deforme edilir ve yine 36000 saniye beklenilir son olarak  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye beklenerek deney sonlandırılmış olur. Toplam deney süresi 108000 saniyedir. Shore A70 sertlik değerinde elde edilen grafik değerleri Şekil 40'da ayrı olarak gösterilmiştir. Toplu olarak gösterim ise Şekil 41'dedir.





Şekil 40. Shore A70 sertlik değerinde a)  $\lambda = 1.5$ , b)  $\lambda = 2.0$ , c)  $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi



Şekil 41. Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 6. Shore A70 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	2.185	1.645	1.577	0.54	0.068	0.541
$\lambda = 2.0$	4.182	3.070	2.922	1.112	0.148	1.170
$\lambda = 2.5$	5.879	4.316	4.074	1.563	0.242	1.925

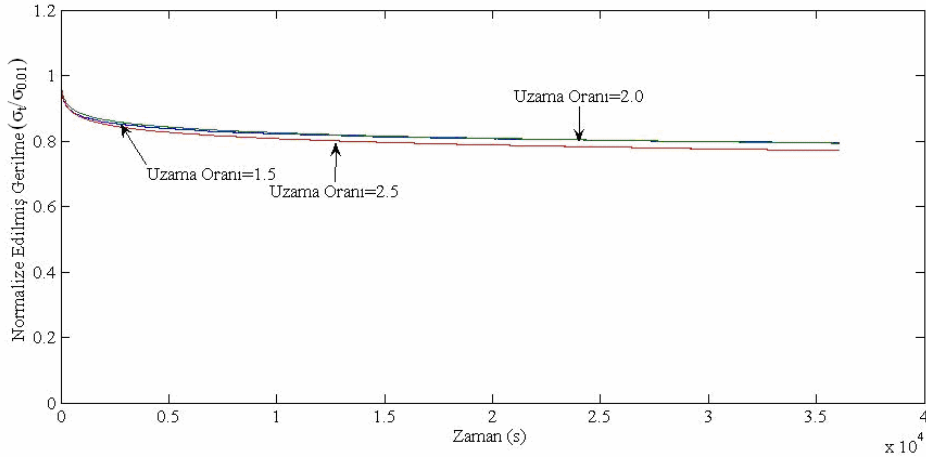
Şekil 40, Tablo 6'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri  $2.185 \text{ N/mm}^2$  iken 7200. saniye sonunda  $1.645 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000. saniye sonunda ise  $1.577 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma  $0,54 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü  $0.068 \text{ N/mm}^2$ 'dir.  $\lambda = 2.0$  'de  $4.182 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $3.070 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $2.922 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $1.112 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.148 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$  'da ise  $5.879 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $4.316 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $4.074 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $1.563 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.242 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 6'da yer alan gerilme

gevşemesi deneylerinin incelenmesinden  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir.

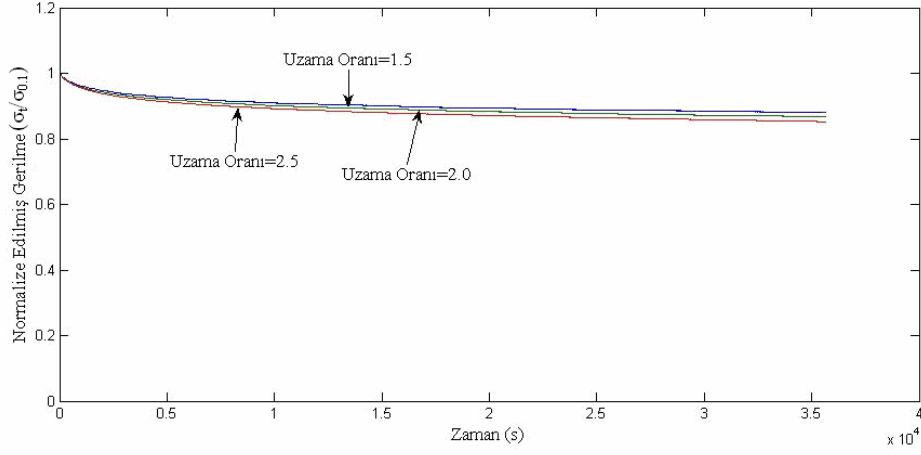
Yapılan bu çalışmada gerilmenin normalize edilmiş değeri, deneyden okunan gerilme değerinin ( $\sigma_t$ ) 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine ( $\sigma_{0.01}$ ,  $\sigma_{0.1}$ ,  $\sigma_{1.0}$ ) bölünerek elde edilmiş ve grafikler buna göre çizilmiştir. Şekil 42, 43, 44'te, Şekil 41'deki gerilme gevşemesi deneysel verilerinin 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş gerilme gevşemesi grafikleri görülmektedir.

Şekil 42'de normalize gerilmede en fazla düşüş  $\lambda = 2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda = 1.5$  ile  $\lambda = 2.0$  uzama oranları arasında gerilme gevşemesi farkı çok az olmaktadır.  $\lambda = 2.5$  uzama oranında 1. bölgede gerilme düşüşü fazla olmaktadır. 2. bölgede ise 1. bölgedeki kadar olmasına yinede gerilmede doğrusal bir düşüş söz konusudur. Her üç uzama oranında lineere yakın bölgede  $\alpha$  eğim değeri en fazla olan  $\lambda = 2.5$  değeridir.  $\lambda = 2.0$ 'de eğim değeri  $\lambda = 1.5$ 'dakinden fazladır.

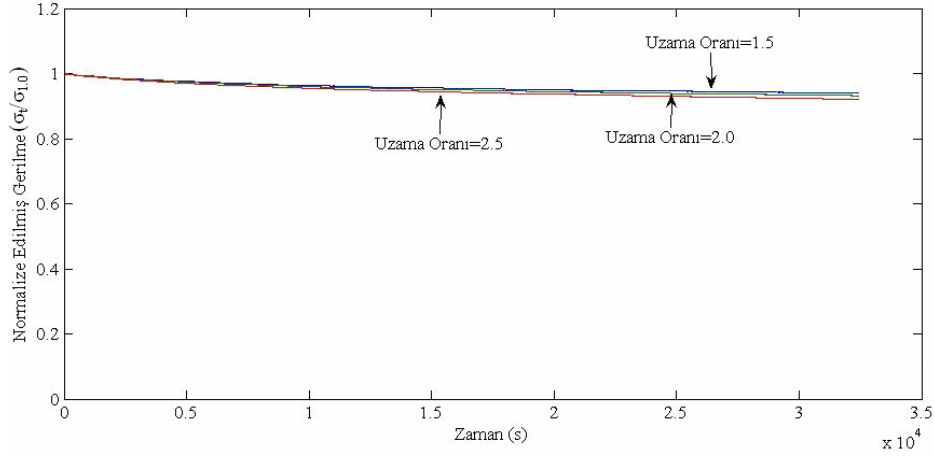
Shore A70 sertlik değerinde 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize gerilme–zaman eğrisinde 1. bölgede oluşan eksponansiyelliğin azaldığı hemen hemen lineere yakın bir eğri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 42. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda = 1.5$ ,  $\lambda = 2.0$ ,  $\lambda = 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

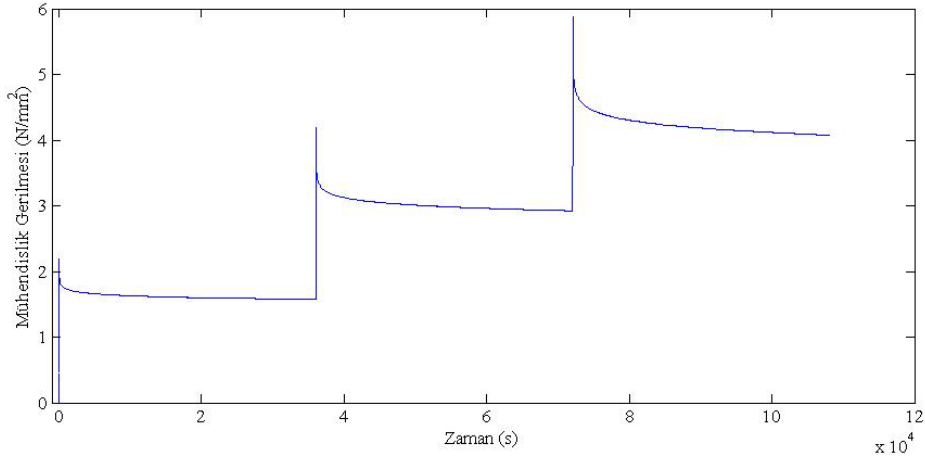


Şekil 43. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'de 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



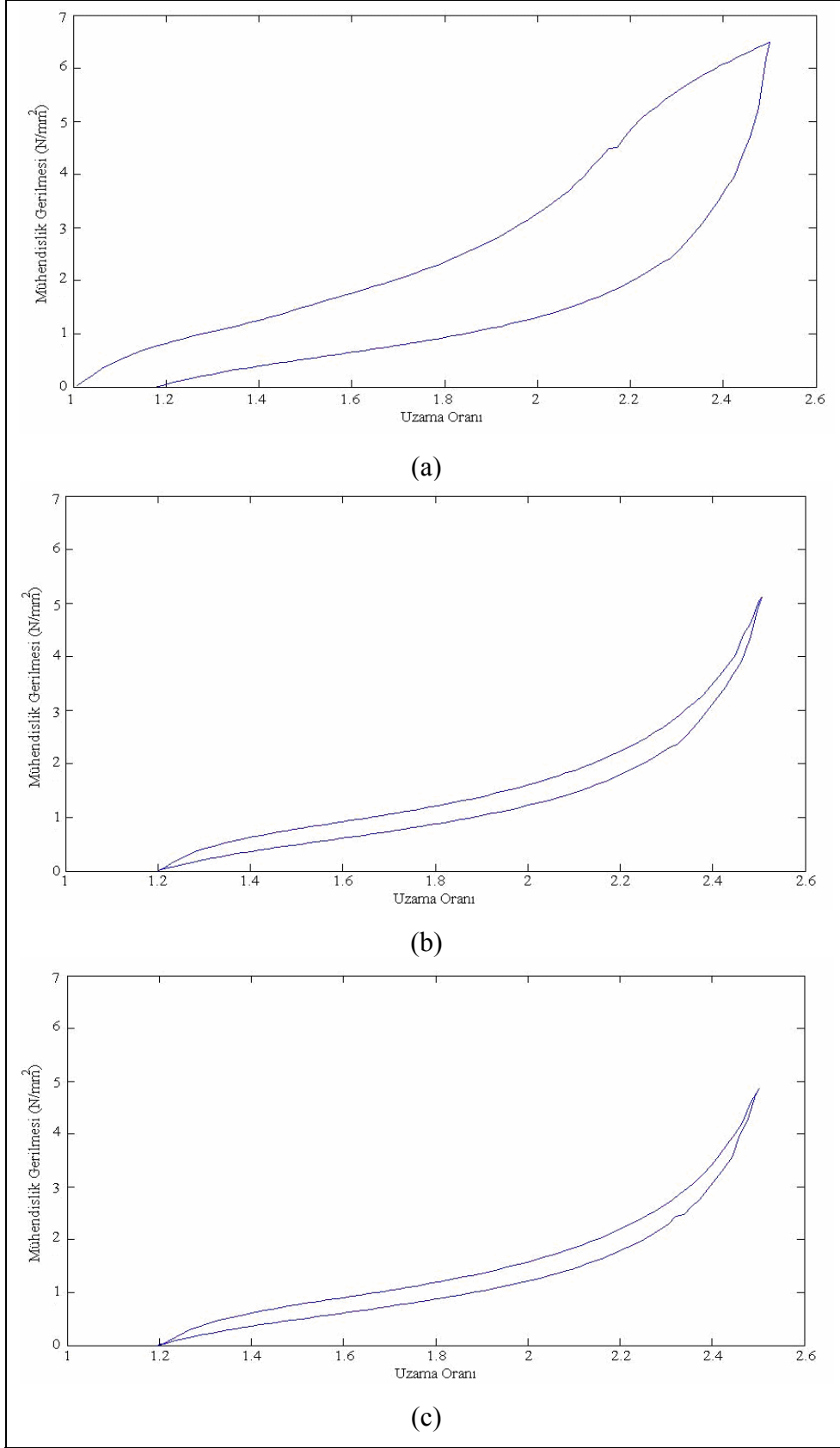
Şekil 44. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'de 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Şekil 15'teki prosedür uygulanması sonucunda  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilen numunede Şekil 40c'den görüldüğü gibi maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_{\text{mak}}=5.879$ ,  $\sigma_{\text{min}}=4.074$  N/mm<sup>2</sup> dir. Uygulanan prosedür sonucunda elde edilen gerilme gevşemesi grafiği tüm uzama oranları için Şekil 45'te görülmektedir. Deney üç aşama olarak 108000 saniye sürmüştür ve son olarak  $\lambda= 2.5$  değerinde elde edilen minimum gerilme değeri daha sonra elde edeceğimiz ön prosedürlü gerilme değeri ve Şekil 39'deki grafikten elde edilen minimum gerilme değeri arasında kıyaslama yapılacaktır.

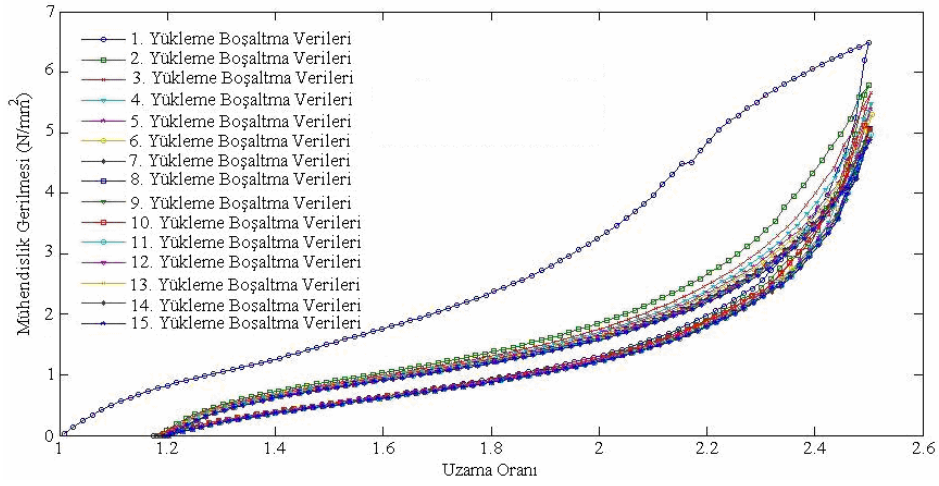


Şekil 45. Shore A70 sertlik değerinde Şekil 15'teki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

EPDM türü kauçuk malzemelere ön prosedür uygulandığında numunenin iç yapısında meydana gelecek olan deformasyonu tespit edebilmek için Şekil 16'daki ön prosedürlü gerilme gevşemesi deneyi yapılmıştır. Numune sabit uzama oranına kadar yükleme-boşaltma işlemine tabi tutularak deforme edilmiş ve bu işlem 15 kez 100 mm/dak numune boyu değişim hızında gerçekleştirilmiştir. Malzemenin 1. , 10. ve 15. yükleme-boşaltma eğrileri Şekil 46'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarını içeren grafikler ise Şekil 47'de verilmiştir. Şekil 46'dan görüldüğü gibi ilk yükleme-boşaltma eğrisinde gerilme-uzama oranı verileri arasında belirli bir fark söz konusudur. Boşaltma eğrisinde numune kalıcı deformasyondan dolayı başlangıçtaki uzama oranından daha büyük bir uzama oranına sahiptir. Artan yükleme-boşaltma eğrileri neticesinde gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve stabil hale gelmektedir.

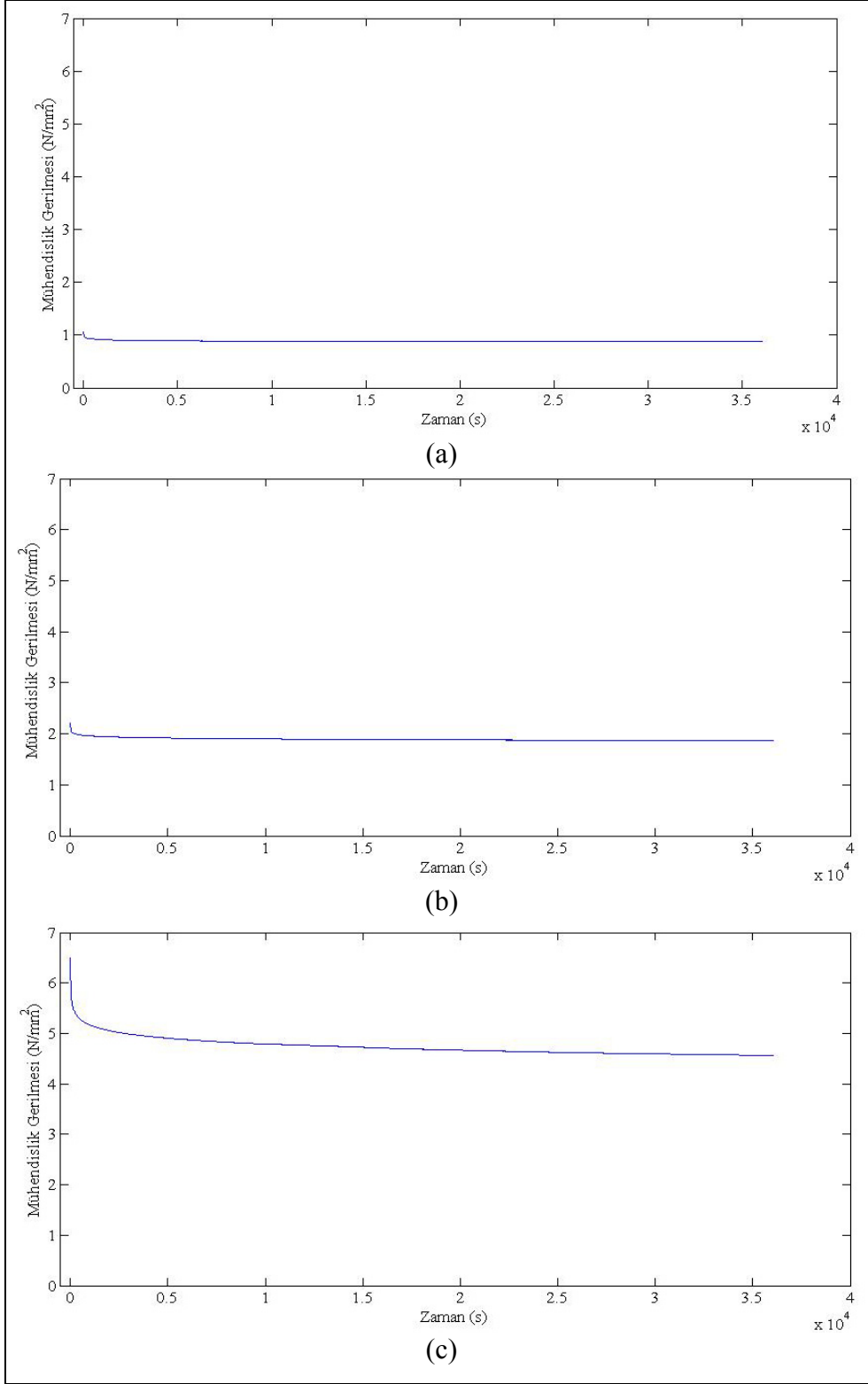


Şekil 46. Shore A70 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. ,  
b) 10. ve c) 15. yükleme boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi



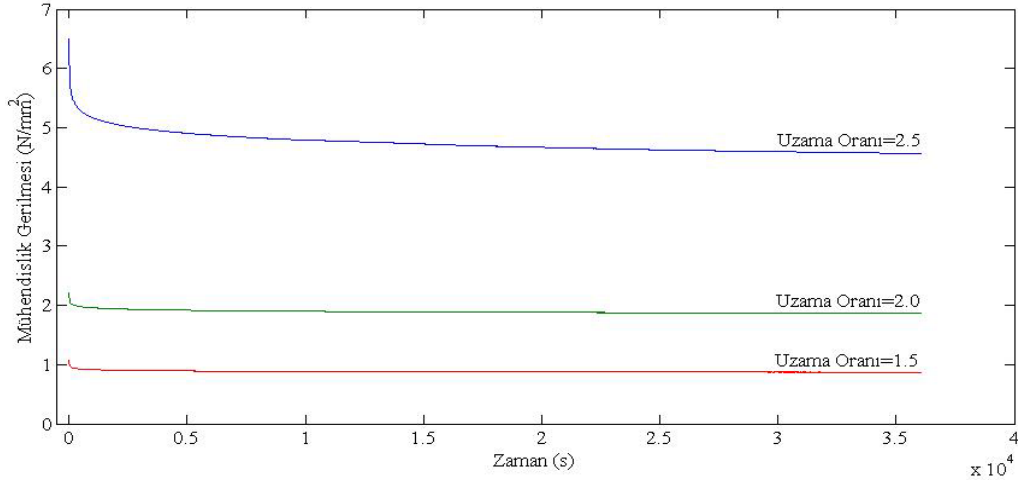
Şekil 47. Shore A70 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Shore A70 sertlikli EPDM kauçuk numunelere 15 kez yükleme boşaltma işlemi uygulandıktan sonra numune tutma çeneleri arasından sökülmeden yüksüz konumda 7200 saniye (2 saat) bekletilmiş ve ardından Şekil 15'teki yükleme prosedürü uygulanmıştır. Böylece ön prosedür uygulamanın gerilme gevşemesi deneyleri üzerinde ne gibi etkileri olduğu araştırılmıştır. Elde edilen gerilme-zaman verileri Şekil 48'de verilmiştir. Tüm bu deneylerin toplu halde gösterimi ise Şekil 49'da verilmiştir.



Şekil 48. Shore A70 sertlik değerinde a)  $\lambda= 1.5$ , b)  $\lambda= 2.0$ , c)  $\lambda= 2,5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi





Şekil 49. Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda = 1,5$ ;  $\lambda = 2,0$ ;  $\lambda = 2,5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 7. Shore A70 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

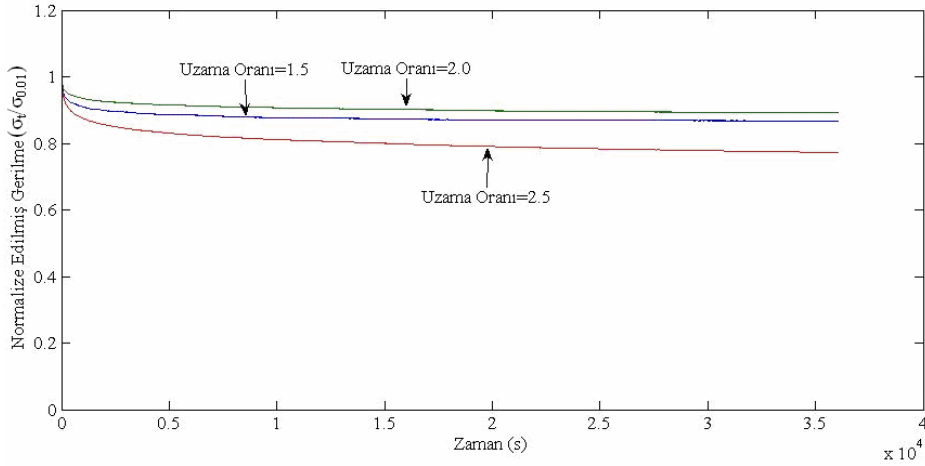
	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	1.063	0.887	0.871	0.176	0.016	0.127
$\lambda = 2.0$	2.206	1.908	1.868	0.298	0.04	0.318
$\lambda = 2.5$	6.506	4.846	4.562	1.66	0.284	2.26

Şekil 48, Tablo 7'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri  $1.063 \text{ N/mm}^2$  iken 7200. saniye sonunda  $0.887 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000. saniye sonunda ise  $0.871 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma  $0.176 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü  $0.016 \text{ N/mm}^2$ 'dir.  $\lambda = 2.0$ 'de  $2.206 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $1.908 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $1.868 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $0.298 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.04 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$ 'da ise  $6.506 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $4.846 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $4.562 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $1.66 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.284 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 7'de yer alan ön

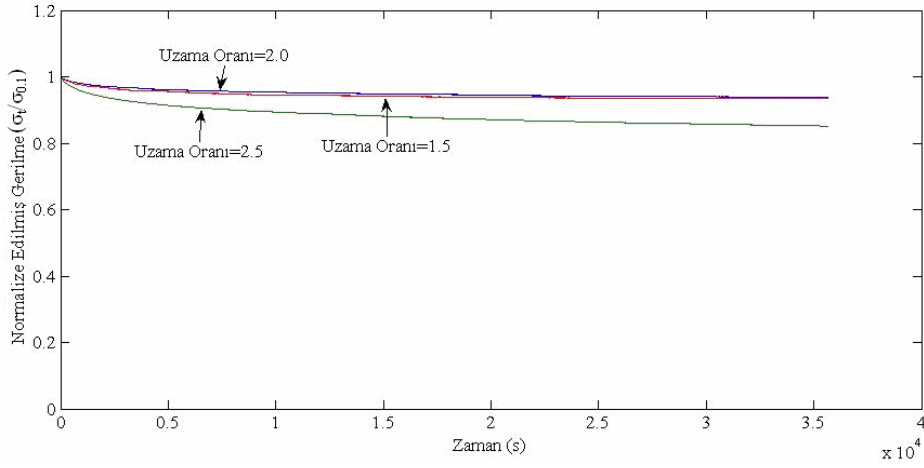
prosedür uygulanmış gerilme gevşemesi deneylerinin incelenmesinden normal prosedürde olduğu gibi  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir.

Şekil 50'de en fazla gerilme gevşemesi  $\lambda=2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda=1.5$  ile  $\lambda=2.0$  uzama oranları arasında oluşan gerilme gevşemesi farkı oldukça azdır. Aksine  $\lambda=1.5$  ile  $\lambda=2.5$  uzama oranları arası fark fazladır.  $\lambda=2.5$  uzama oranında 1. bölgede gerilme düşüşü daha fazla olmaktadır. 2. bölgede ise yani lineere yakın bölgede  $\alpha$  eğim değeri diğer uzama oranlarından büyüktür.  $\lambda=1.5$  ve  $2.0$ 'de ise 1. bölgede gerilme düşüşü az 2. bölgede  $\alpha$  eğimi  $\lambda=2.5$  uzama oranındakine göre küçük olmaktadır.

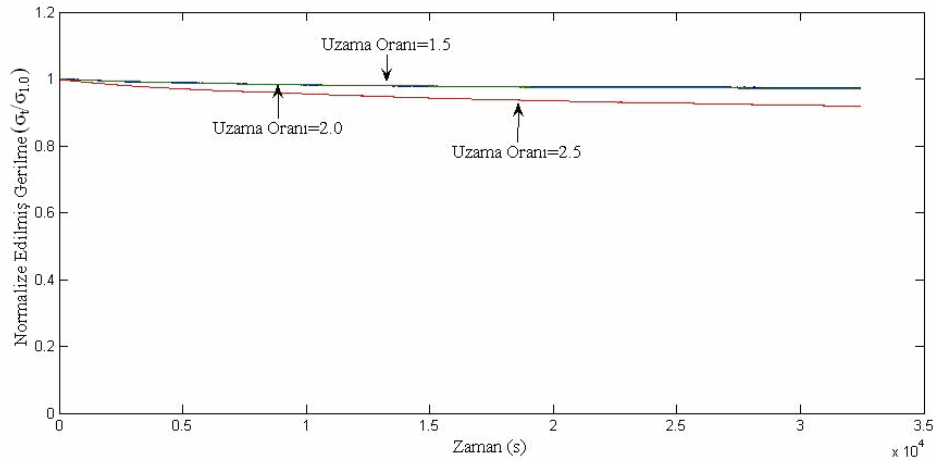
Şekil 50'de  $\lambda=2.5$  uzama oranında çok fazla gerilme düşüşü olduğundan Şekil 52'de elde edilen normalize gerilme değerinde  $\lambda=1.5$  ve  $\lambda=2.0$  uzama oranları çakışırken  $\lambda=2.5$  uzama oranı grafiği daha fazla bir eğime sahiptir.



Şekil 50. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda=1.5$ ,  $\lambda=2.0$ ,  $\lambda=2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

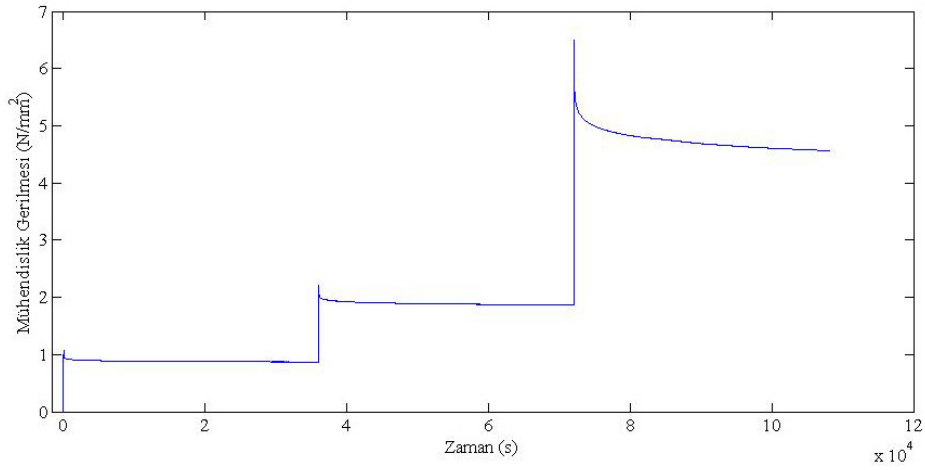


Şekil 51. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



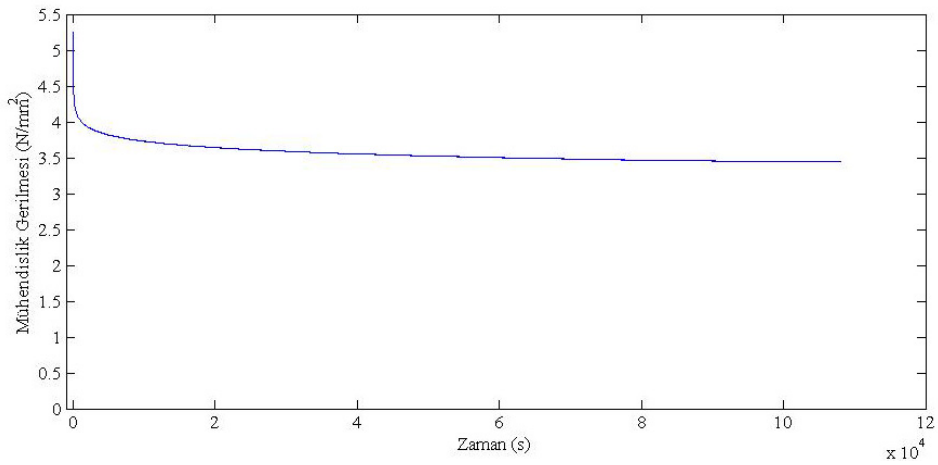
Şekil 52. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A70 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Şekil 16'daki prosedür EPDM kauçuk malzemesine uygulandığında elde edilen şekiller Şekil 48'de gösterilmiştir. Burada malzemenin ön prosedür uygulanması sonucu  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edildiğinde ve 36000 saniye gerilme gevşemesine tabi tutulduğunda elde edilen gerilme değeri  $\sigma_{\min} = 3.342 \text{ N/mm}^2$  olduğu görülmektedir.



Şekil 53. Shore A70 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

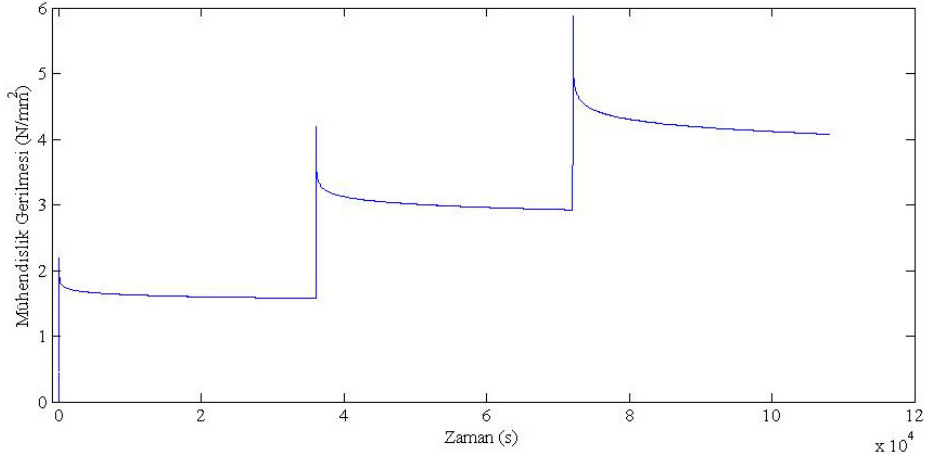
Tüm bu deneyler sonucunda birçok kez ifade edildiği gibi asıl vurgulanmak istenen Şekil 14 ve 15, 16'daki prosedürler arasında kıyaslama sonucu EPDM kauçuk numunesinin içyapısında meydana gelen deformasyonun tespitidir. Bu deformasyonu tespit ederken sırasıyla uygulanan prosedürlerde deney sonucunda elde edilen gerilme değerleri dikkate alınmıştır.



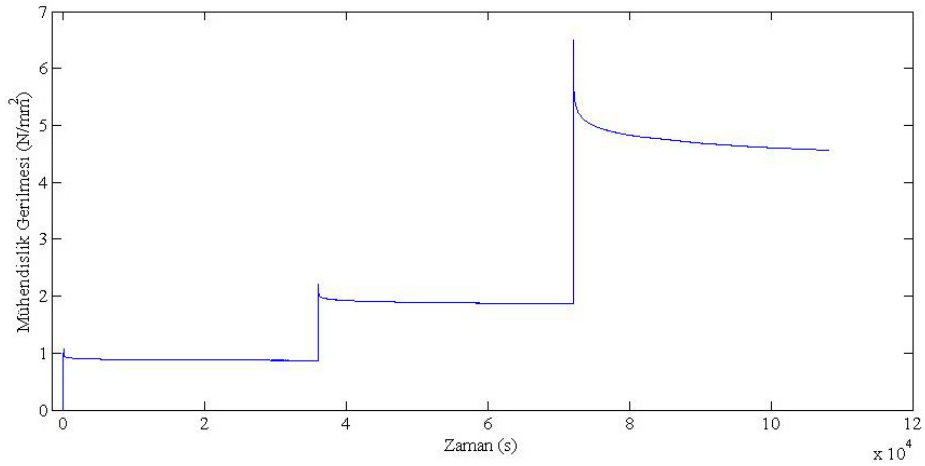
(a)

Şekil 54. Shore A70 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

Şekil 54'ün devamı



(b)

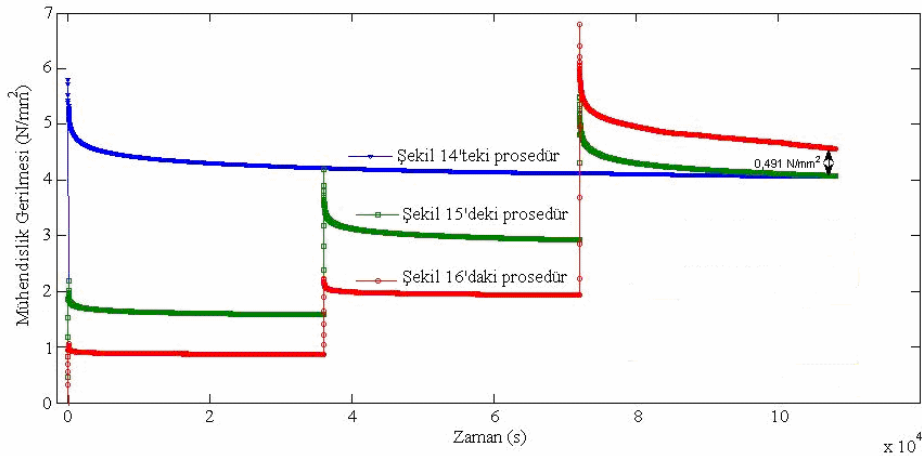


(c)

Şekil 55'den görülmektedir ki EPDM kauçuk numunesi shore A70 sertlik değerinde uygulanan tüm prosedürler sonucunda, normal prosedür ve ön prosedür uygulama gerilmeye düşüşe sebep olmaktadır. Normal koşullarda hiçbir prosedür uygulanmadan numune  $\lambda=2.5$  uzama oranına kadar deforme edildiğinde ve 108000 saniye beklenildiğinde kauçuk numunenin iç yapısındaki bağlar arasında çok fazla bir hasar söz konusu olmamaktadır. Böylelikle malzeme üzerinde kalıcı deformasyon az olmaktadır. Yani malzeme herhangi bir deformasyon uygulandığında eski konumuna büyük oranda gelmektedir. Bu prosedürle numunede 1.736 N/mm<sup>2</sup> kadar bir gevşeme olmaktadır. Şekil

15'teki prosedür uygulandığında yukarıda bahsedilen iç yapıda bağlar arası kopmalar ve dolaylı olarak malzemede kalıcı deformasyon Şekil 14'deki prosedürle hemen hemen aynı değere sahiptir. Sonuçta elde edilen gerilme değerleri üst üste çakışmaktadır. Şekil 15'teki prosedürün eğimi 2.5 uzama değerinde fazla olduğundan 108000 saniyeden sonraki değerlerde Şekil 15'teki prosedürün gerilme değeri Şekil 14'deki prosedürün altına düşmektedir. Gerilme düşüşü yaklaşık olarak ise  $1.805 \text{ N/mm}^2$  seviyesindedir. Son olarak uygulanan ön prosedürlü deneyde ise tahmin edildiği gibi numune çok fazla işleme tabi tutulduğundan dolayı numunenin içyapısındaki bağlarda kopma çok daha fazla olmaktadır. Bu değer  $1.944 \text{ N/mm}^2$  dir. Bundan dolayı numune  $6.506 \text{ N/mm}^2$  maksimum gerilme değerine ulaşmaktadır. Deney sonunda ise diğer prosedürlere göre daha fazla bir gerilme değeri elde edilmektedir. Şekil 15 ve Şekil 16'daki prosedürler arasında gerilme gevşemesi sonunda  $0.492 \text{ N/mm}^2$  bir gerilme farkı vardır. Gerilme düşüşü bir önceki prosedürlere göre fazla olmaktadır. Yani  $1.944 \text{ N/mm}^2$  gevşeme değeri elde edilmektedir.

Şekil 55'te  $\lambda= 2.5$  uzama oranlarında Şekil 14, 15 ve 16 prosedürlerindeki gerilme gevşemesi grafikleri bir t zamanında çakışmaktadır. Bu grafiklerin eğimleri yardımıyla Şekil 14 ve Şekil 15'in  $\lambda= 2.5$  uzama oranındaki gerilme gevşemesi grafikleri 36,1 saat sonra çakışmaktadır. Bu zaman diliminden sonra Şekil 15'in eğiminin fazla olmasından dolayı elde edilen gerilme değerleri Şekil 14'tekinden az olmaktadır. Aynı şekilde Şekil 14 ve Şekil 16 prosedürlerinden elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin çakıştığı zaman ise 46,75 saat olarak elde edilmiştir. Şekil 16 grafiğinin  $\lambda= 2.5$  uzama oranında eğiminin Şekil 15'tekinden daha az olmasından dolayı daha büyük bir t zamanında çakışma gerçekleşmektedir.



Şekil 55. Şekil 54'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi

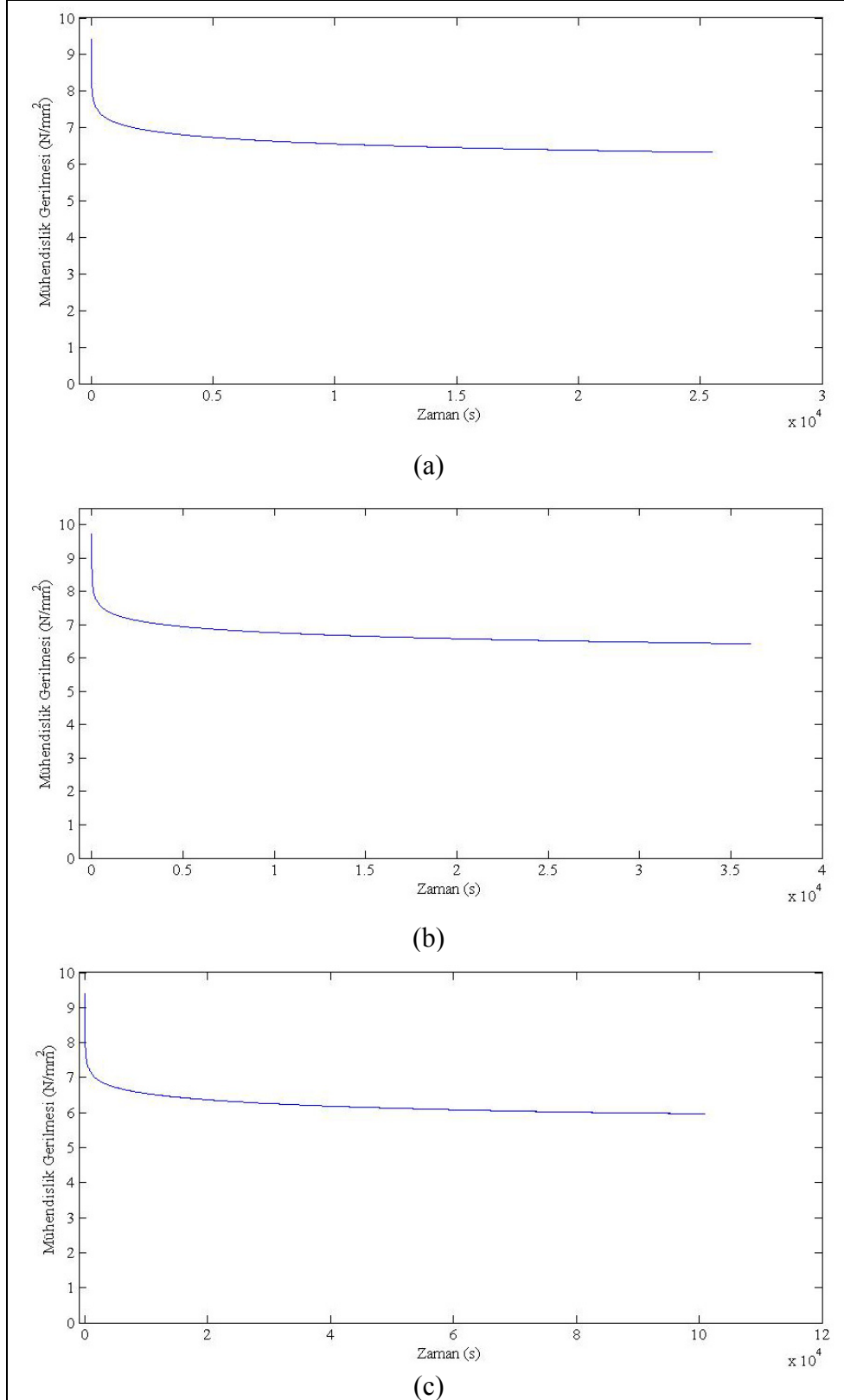
### 3.1.1.3. Shore A80 Sertlikli Numunelerle Yapılan Gerilme Gevşemesi Deneyleri

Bu bölümde de öncelikle EPDM kauçuğunun Shore A80 sertlik değerindeki numuneler 25400, 36000 ve 100800 saniye değerlerinde gerilme gevşemesine tabi tutulmuştur.  $\lambda= 2.5$  için elde edilen sonuçlar Şekil 56'da verilmiştir. Deneylerin toplu haldeki sonuçlarını içeren grafikler Şekil 57'de verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere 25400 ve 36000 saniye değerleri 100800 saniyelik grafik üzerine yapışmaktadır. Buradan 25400 saniye değeri gerilme gevşemesi grafiğinin ilk kısmı yani ekspanansiyel kısmında tam uyum sağlamış görünürken, ikinci kısım olan lineere yakın bölgede başlangıçta 100800 saniye grafiğine çakışık olarak görülmektedir fakat ilerleyen saniye değerlerinde bu yapışık durum ortadan kalkmaktadır. 36000 saniye değerinde ise bu durum 25400 saniye değerine göre çok daha iyidir. Bu yüzden 36000 saniye değeri çizilen tüm grafikler için baz alınmıştır.

Şekil 56-a'da  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 9.427 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1= 84$  saniye zamanına denk gelmektedir.  $\sigma_2= 6.642 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\text{min}}=6.325 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 25400 saniyelik 56-a grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $2.785 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.317 \text{ N/mm}^2$  dir.

Şekil 56-b'de  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 9.0368 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1= 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2=6.6394 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\text{min}}=6.2241 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 36000 saniyelik 56-b grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $2.3974 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.4153 \text{ N/mm}^2$  dir.

Şekil 56-c'de  $\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}} = 9.392 \text{ N/mm}^2$  değeri  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilmiş numunenin maksimum gerilme değeridir. Bu değer zaman skalası olarak  $t_1= 84$  saniye zamanına denk gelmektedir. Bu t zamanında maksimum gerilme değerinden sonra hızlı bir düşüş olmaktadır.  $\sigma_2= 6.630 \text{ N/mm}^2$  iki saat sonraki gerilme değerini yani yaklaşık lineerliğin başladığı değeri göstermektedir.  $\sigma_3=\sigma_{\text{min}}=5.963 \text{ N/mm}^2$  değeri ise en düşük gerilme değerini göstermektedir. 100800 saniyelik 56-c grafiğinde ilk bölgede gerilme düşüşü  $2.762 \text{ N/mm}^2$  iken ikinci bölgede gerilme düşüşü  $0.667 \text{ N/mm}^2$  dir.

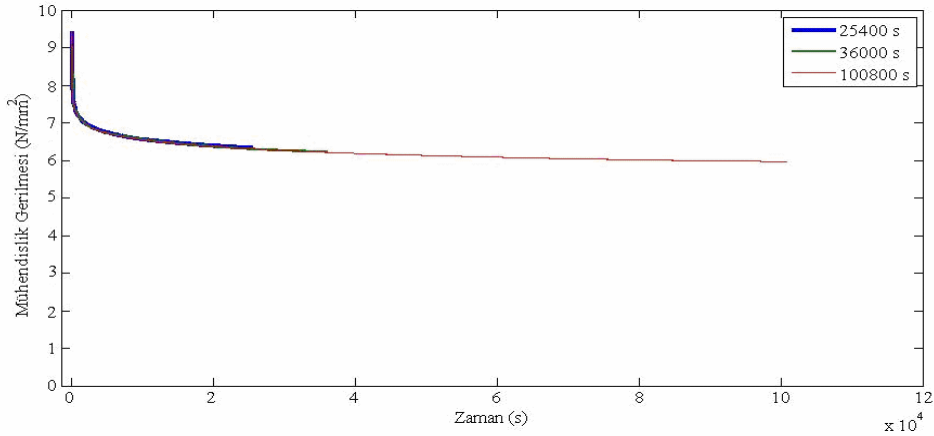


Şekil 56. Shore A80 sertlik değerinde a) 25400, b) 36000, c) 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı çizilmiş hali



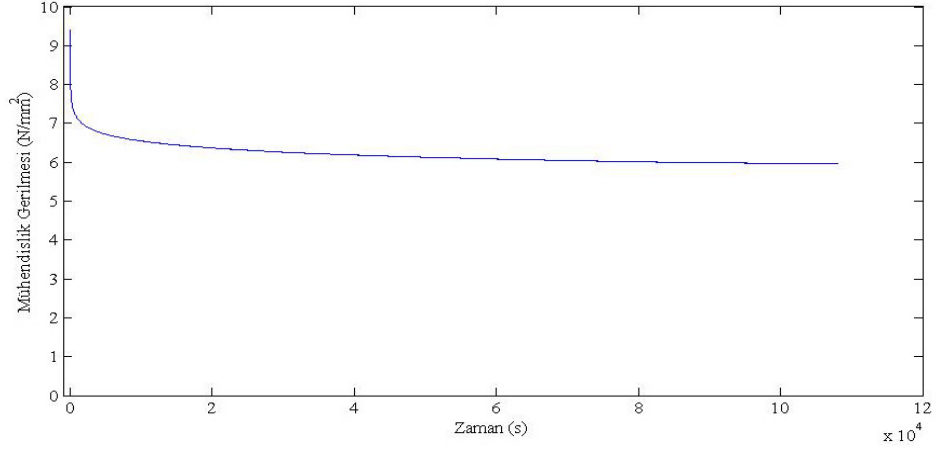
Şekil 56-b grafiğine (6) denklemiyle eğri yakıştırılması neticesinde bu denklemde a,b,c,d ve  $\sigma_0$  sabit değerleri sırasıyla 1.0239, 0.002, 0.8476, 0.000087, 6.4192 yakıştırılan program yardımıyla bulunmuştur. Bu denklem kullanılarak 36000 saniye değerinden sonraki zaman değerleri için denklemde t yerine istenilen değer girilerek gerilme gevşemesine ait değerler elde edilebilir. Girilen değerlerin Şekil 56-c'deki gerilme değerleriyle çakıştığı görülmektedir. Böylece deneyi daha uzun zaman diliminde yapmak yerine 36000 saniye değeri uygun olduğu görülmektedir. 25400 saniye grafiğinde ise bu durum tam olarak elde edilememiştir.

Şekil 57'de Şekil 56-a,b,c'de çizilmiş olan gerilme zaman grafikleri bir grafik üzerinde toplu olarak gösterilmiştir. Bu grafikte 25400, 36000, 100800 saniyelik deneylerin üst üste çakıştığı görülmektedir.



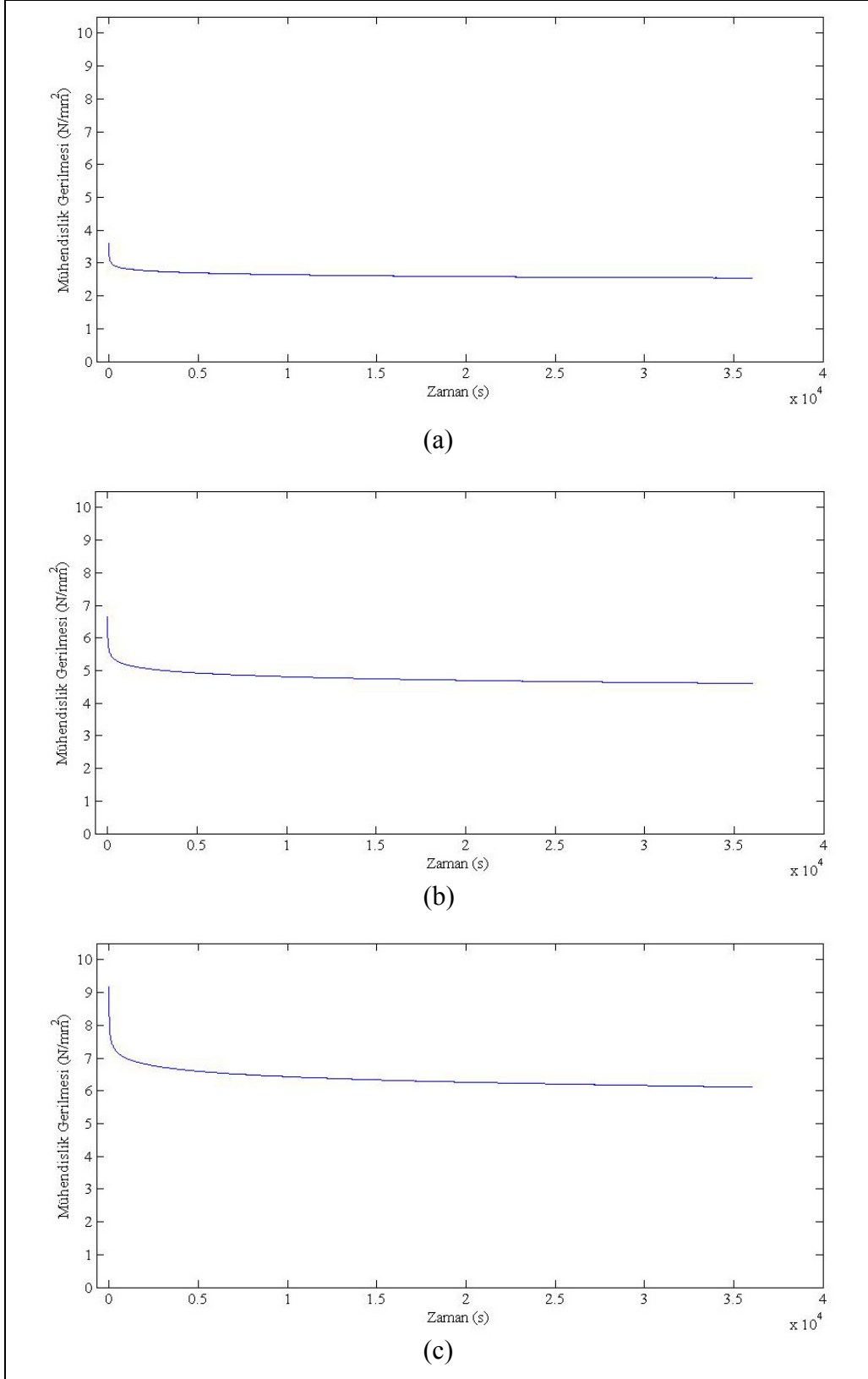
Şekil 57. Shore A80 sertlik değerinde 25400, 36000, 100800 saniye değerleri için gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Diğer sertlik derecesine sahip numunelere yapıldığı gibi Shore A80 sertlikli EPDM kauçuk numunesine öncelikle Şekil 14'deki prosedür uygulanmıştır. Bu prosedürle daha öncede açıklandığı gibi  $\lambda = 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesiyle gerilme gevşemesi grafiği elde edilmiştir. Bu grafik Şekil 58'de görülmektedir. Bu deneyde maksimum gerilme değeri  $9.392 \text{ N/mm}^2$  deney sonucunda ise elde edilen gerilme değeri  $5.963 \text{ N/mm}^2$  değerine kadar düşmüştür. Gerilme gevşemesi  $3.429 \text{ N/mm}^2$  dir. Elde edilen grafik aşağıda uygulanmış olan prosedürlerle kıyaslanıp sonuçlar elde edilmiştir.

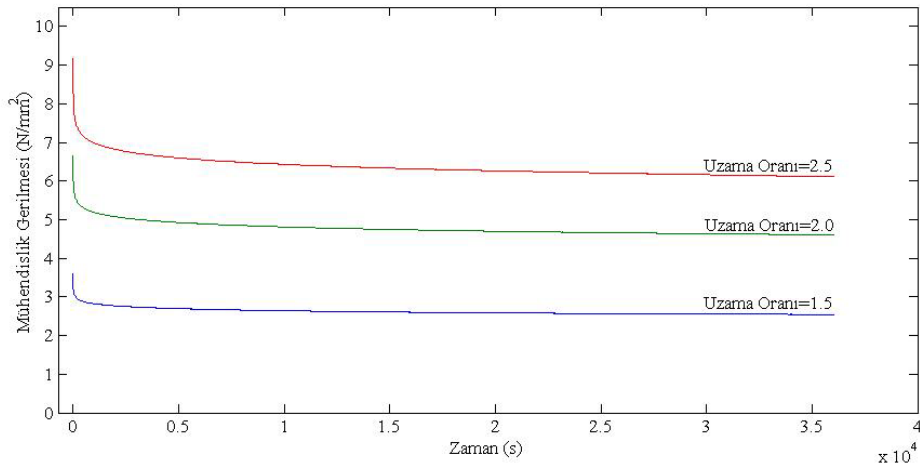


Şekil 58. Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar kauçuk numunenin deforme edilmesi ve 108000 saniye beklenilmesi sonucu elde edilen grafiğin gösterimi

EPDM kauçuk numunesine bir sonraki aşamada Şekil 15'deki prosedürü uygulanmıştır. Bu prosedürde uzama oranı  $\lambda= 1.5$  değerine kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye(10 saat) beklenilir daha sonra  $\lambda= 2.0$  değerine kadar numune deforme edilir ve yine 36000 saniye beklenilir son olarak  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edildikten sonra 36000 saniye beklenecek deney sonlandırılmış olur. Deney tümüyle 108000 saniye sürmüştür. Shore A80 sertlik değerinde elde edilen grafik değerleri Şekil 59'da ayrı olarak gösterilmiştir. Toplu olarak gösterim ise Şekil 60'dadır. Ayrıca EPDM kauçuk numunesine Şekil 16'daki prosedür uygulandığında meydana gelen grafikler aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 59. Shore A80 sertlik değerinde a)  $\lambda= 1.5$ , b)  $\lambda= 2.0$ , c)  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi



Şekil 60. Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda = 1.5$ ;  $\lambda = 2.0$ ;  $\lambda = 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 8. Shore A80 sertlik değerinde EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	3.612	2.668	2.544	0.944	0.124	0.986
$\lambda = 2.0$	6.656	4.865	4.607	1.791	0.258	2.05
$\lambda = 2.5$	9.169	6.510	6.114	2.659	0.396	3.148

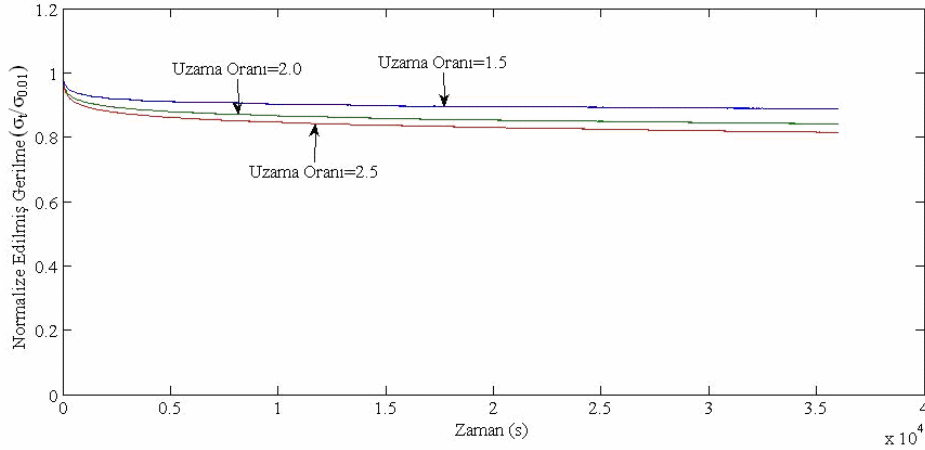
Şekil 59, Tablo 8'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri  $3.612 \text{ N/mm}^2$  iken 7200. saniye sonunda  $2.668 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000. saniye sonunda ise  $2.544 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma  $0.944 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü  $0.124 \text{ N/mm}^2$ 'dir.  $\lambda = 2.0$ 'de  $6.656 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $4.865 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $4.607 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $1.791 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.258 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$ 'da ise  $9.169 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $6.510 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $6.114 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $2.659 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.396 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 8'de yer alan gerilme

gevşemesi deneylerinin incelenmesinden  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir.

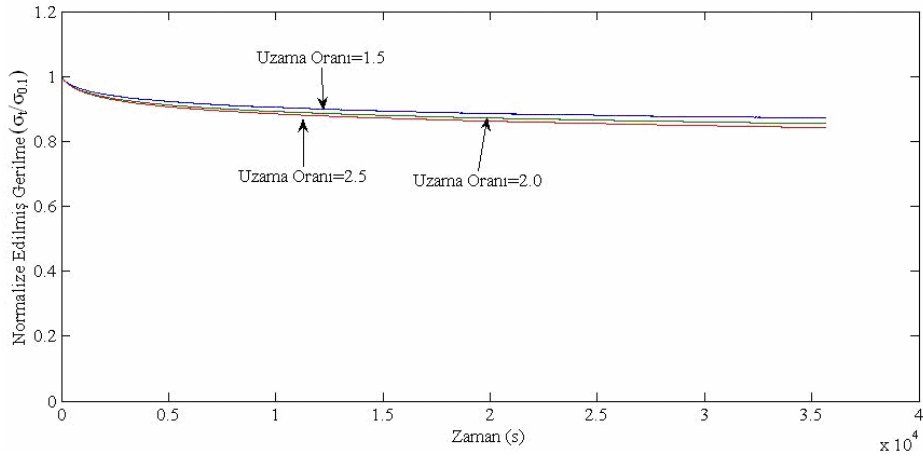
Gerilme gevşemesi deneyinden elde edilen gerilme-zaman verilerinin farklı uzama oranlarındaki deney sonuçlarını kıyaslayabilmek için deneysel verilerin normalize edilerek grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir[17].

Yapılan bu çalışmada gerilmenin normalize edilmiş değeri, deneyden okunan gerilme değerinin ( $\sigma_t$ ) 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine ( $\sigma_{0.01}$ ,  $\sigma_{0.1}$ ,  $\sigma_{1.0}$ ) bölünerek elde edilmiş ve grafikler buna göre çizilmiştir. Şekil 61, 62 ve 63'de, Şekil 60'daki gerilme gevşemesi deneysel verilerinin 0.01, 0.1, 1.0. saatteki gerilme değerlerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş gerilme gevşemesi grafikleri görülmektedir.

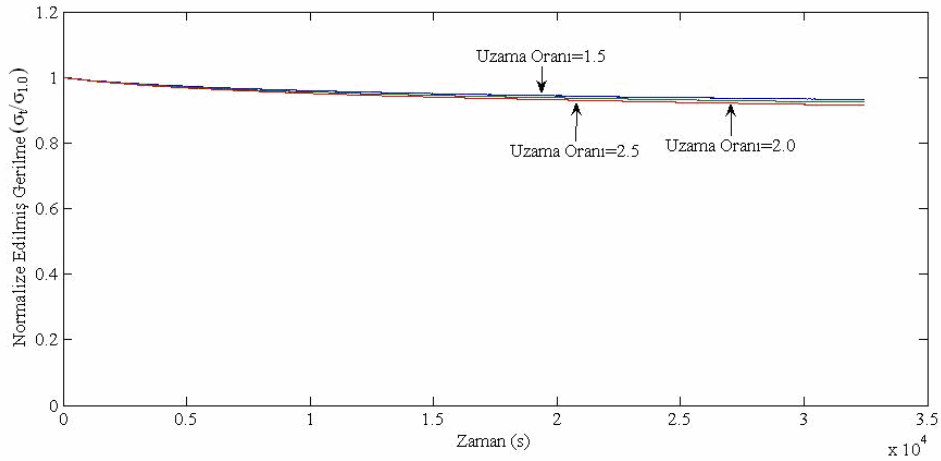
Şekil 61'de normalize gerilmede en fazla düşüş  $\lambda = 2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda = 1.5$  ile  $\lambda = 2.0$  uzama oranları arasında oluşan gerilme gevşemesi farkı,  $\lambda = 1.5$  ile  $\lambda = 2.5$  uzama oranları arası farka göre biraz daha azdır.  $\lambda = 2.5$  uzama oranında ile  $\lambda = 2.0$  uzama oranı grafikleri 1. bölgede hemen hemen çakışık gibidir. 2. bölgede zaman ilerledikçe ayrılma söz konusu olmaktadır. Tüm uzama oranlarında 2. bölgede doğrusal bir düşüş olduğu görülmektedir. Her üç uzama oranında lineere yakın bölgede  $\alpha$  eğim değeri en fazla olan  $\lambda = 2.5$  değeridir.  $\lambda = 2.0$ 'de eğim değeri  $\lambda = 1.5$ 'dakinden fazladır.



Şekil 61. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda = 1.5$ ,  $\lambda = 2.0$ ,  $\lambda = 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

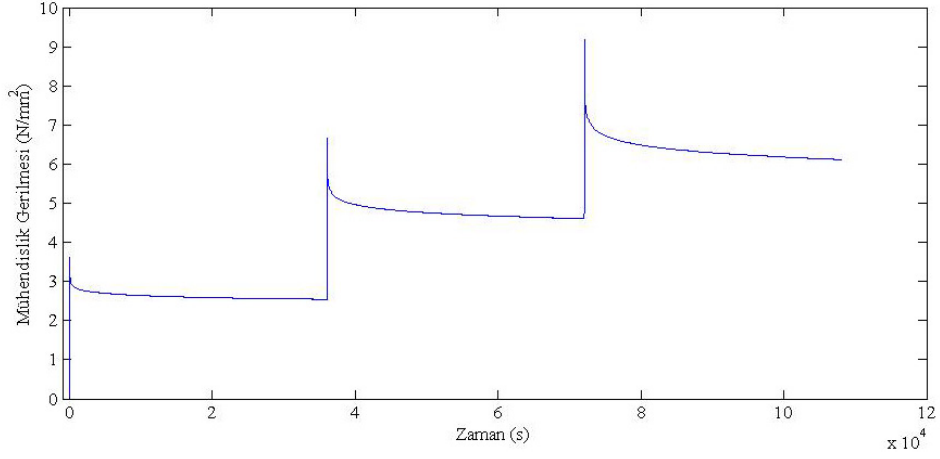


Şekil 62. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



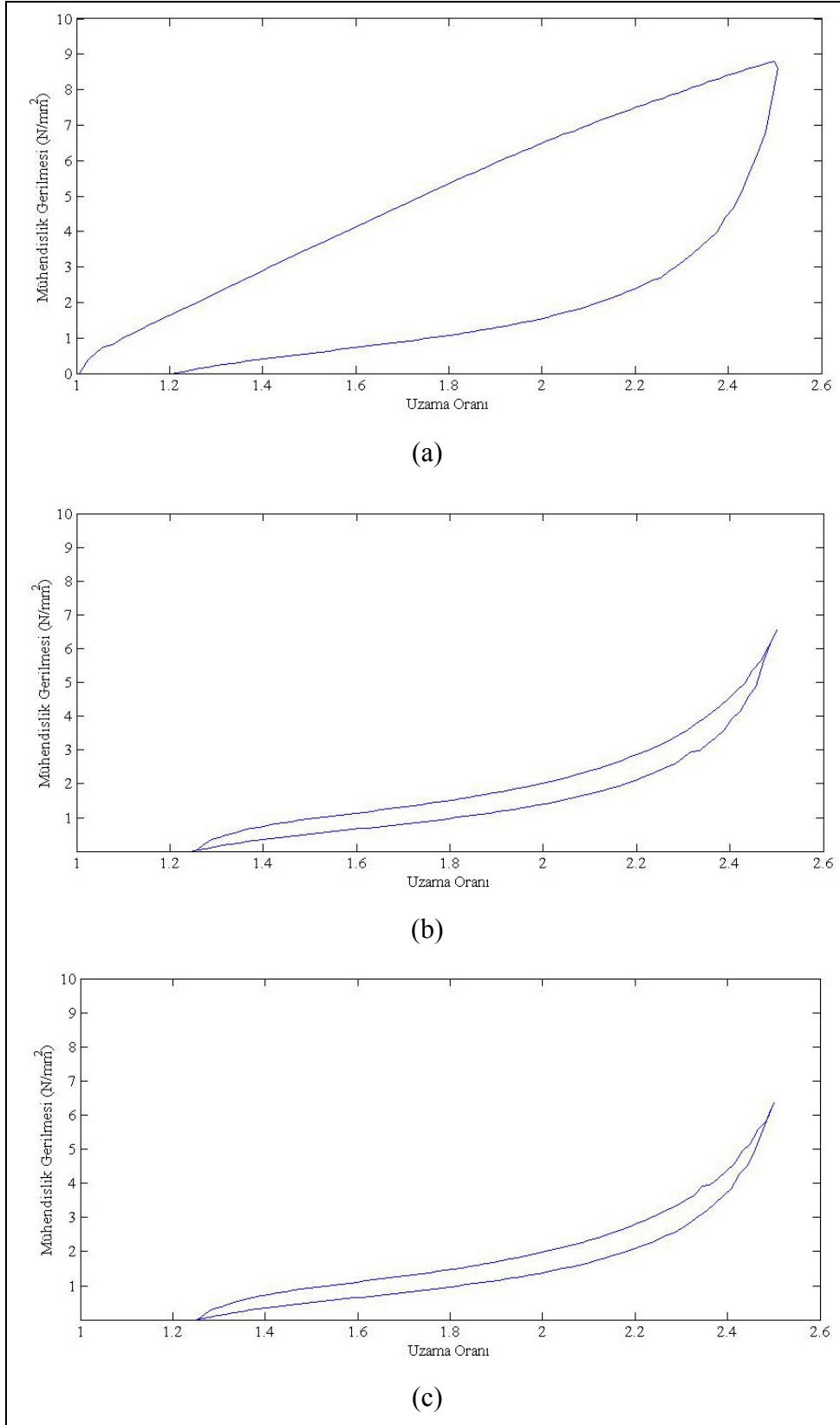
Şekil 63. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Şekil 15'teki prosedür uygulanması sonucunda  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edilen numunede Şekil 59c'den görüldüğü gibi maksimum ve minimum gerilme değerleri  $\sigma_{\text{mak}}=9.169$ ,  $\sigma_{\text{min}}=6.114$  N/mm<sup>2</sup> dir. Uygulanan prosedür sonucunda elde edilen grafiğin tüm uzama oranları için Şekil 64'te görülmektedir. Deney üç aşama olarak 108000 saniye sürmüştür ve son olarak  $\lambda= 2.5$  değerinde elde edilen minimum gerilme değeri daha sonra elde edeceğimiz ön prosedürlü gerilme değeri ve şekil 58'deki grafikten elde edilen minimum gerilme değeri arasında kıyaslama yapılacaktır.



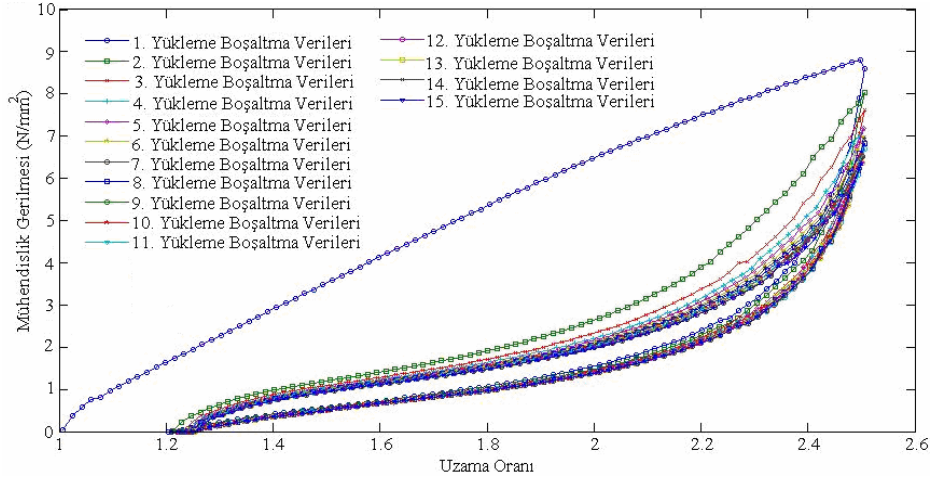
Şekil 64. Shore A80 sertlik değerinde Şekil 15'teki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için oluşan gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

Kauçuk türü malzemelere ön prosedür uygulandığında numunenin iç yapısında meydana gelecek olan deformasyonu tespit edebilmek için Şekil 16'daki ön prosedürlü gerilme gevşemesi deneyi yapılmıştır. Numune sabit uzama oranına kadar yüklenme-boşaltma işlemine tabi tutularak deforme edilmiş ve bu işlem 15 kez 100 mm/dak numune boyu değişim hızında gerçekleştirilmiştir. Malzemenin 1. , 10. ve 15. yüklenme-boşaltma eğrileri Şekil 65'de gösterilmiştir. Deneyin toplu halde grafikleri ise Şekil 66'da verilmiştir. Şekil 65'ten görüldüğü gibi ilk yüklenme-boşaltma eğrisinde Shore 60, 70 sertlik değerlerine göre daha fazla histeresis alanı oluşmaktadır. Boşaltma eğrisinde numune kalıcı deformasyondan dolayı başlangıçtaki uzama oranından daha büyük bir uzama oranına sahiptir. Artan yüklenme-boşaltma eğrileri neticesinde gerilme-uzama oranı verileri birbirine yakınsamakta ve stabil hale gelmektedir. Tüm ön prosedür grafiklerinde bazı bölgelerde uzama oranının artması veya azalması durumlarında gerilme sabit kalmakta veya çok az değişmektedir.



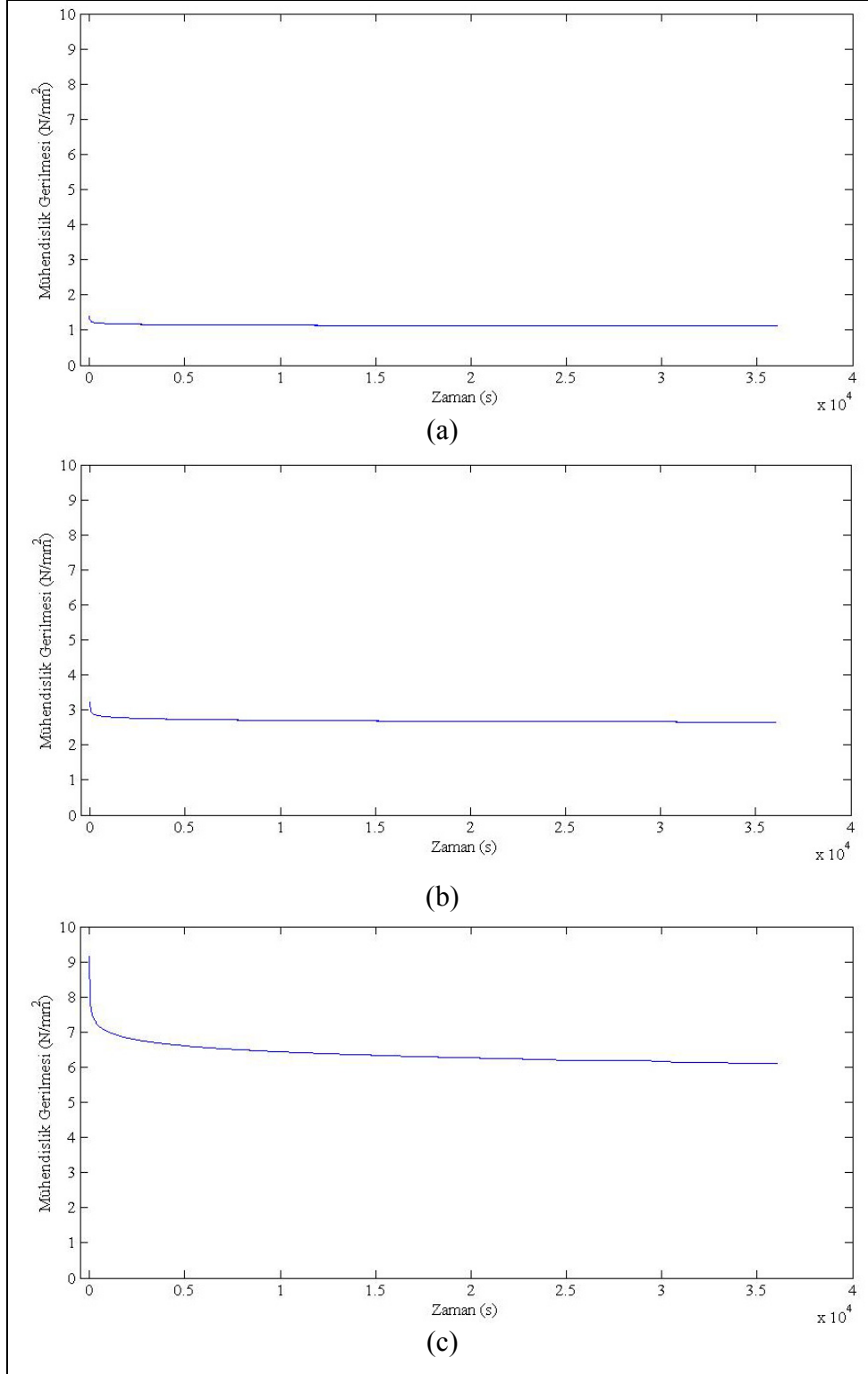
Şekil 65. Shore A80 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan a) 1. , b) 10. ve c) 15. yüklem boşaltma grafiklerinin ayrı olarak gösterimi



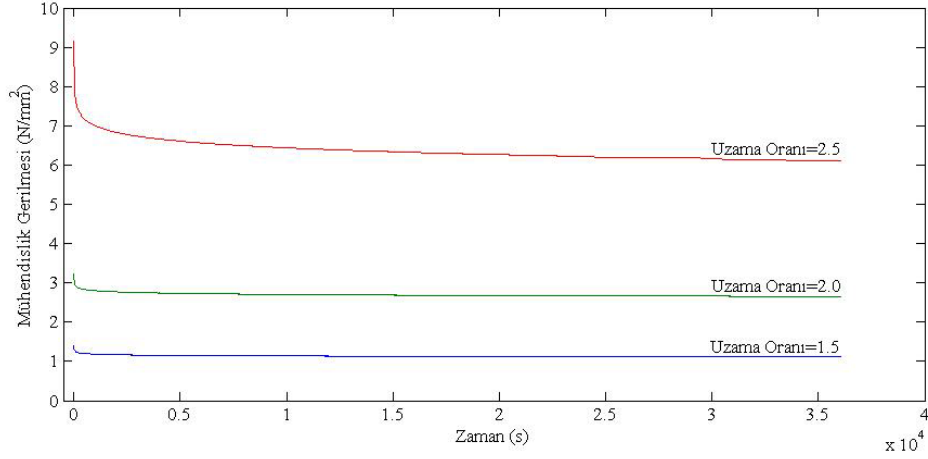


Şekil 66. Shore A80 sertlik değerindeki kauçuk numuneye uygulanan yükleme boşaltma grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Kauçuk türü malzemeye 15 kez yükleme boşaltma işlemi uygulandıktan sonra numune tutma çeneleri arasından sökülmeden yüksüz konumda 7200 saniye (2 saat) bekletilir. Bekleme işlemi bittikten sonra Şekil 15'teki prosedür aynen uygulanır. Böylece ön prosedür uygulamanın gerilme gevşemesi deneyleri üzerinde ne gibi etkileri olduğu araştırıldı. Elde edilen gerilme-zaman verileri Şekil 67'de verilmiştir. Tüm bu deneylerin toplu halde gösterimi ise Şekil 68'de verilmiştir.



Şekil 67. Shore A80 sertlik değerinde a)  $\lambda= 1.5$ , b)  $\lambda= 2.0$  ve c)  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin ayrı ayrı gösterimi



Şekil 68. Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'daki gerilme gevşemesine ait gerilme-zaman grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Tablo 9. Shore A80 sertlik değerinde ön prosedür uygulanmış EPDM kauçuğuna ait farklı uzama oranları ve farklı zamanlardaki gerilme azalması değerleri

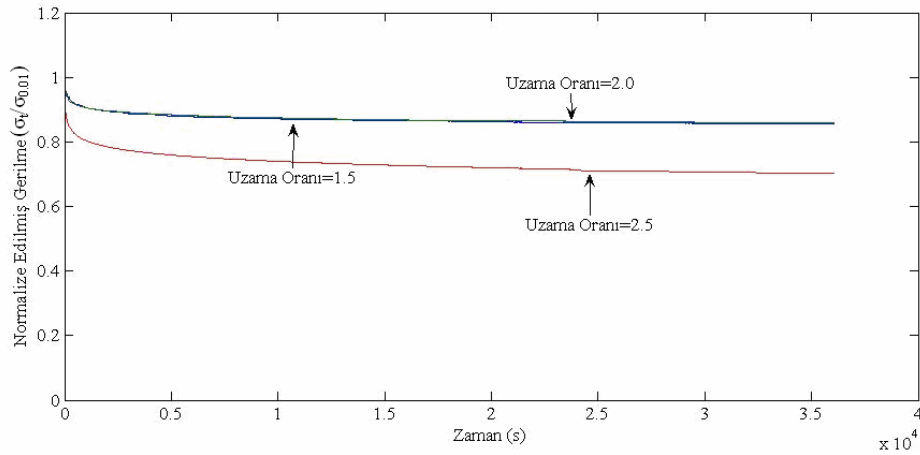
	$\sigma_1 = \sigma_{\text{mak}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_2$	$\Delta\sigma_2 = \sigma_2 - \sigma_3$	$\alpha$ (°)
$\lambda = 1.5$	1.394	1.143	1.117	0.251	0.026	0.206
$\lambda = 2.0$	3.225	2.718	2.652	0.507	0.066	0.525
$\lambda = 2.5$	9.155	6.520	6.119	2.635	0.401	3.188

Şekil 67, Tablo 9'deki verilerle birlikte incelenirse  $\lambda = 1.5$ 'da maksimum gerilme değeri  $1.394 \text{ N/mm}^2$  iken 7200. saniye sonunda  $1.143 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000. saniye sonunda ise  $1.117 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonundaki gerilmedeki azalma  $0.251 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniye sonundaki gerilme düşüşü  $0.026 \text{ N/mm}^2$ 'dir.  $\lambda = 2.0$ 'de  $3.225 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $2.718 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $2.652 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $0.507 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.066 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur.  $\lambda = 2.5$ 'da ise  $9.155 \text{ N/mm}^2$  ile başlayan gerilme değeri 7200 saniye sonunda  $6.520 \text{ N/mm}^2$ 'ye 36000 saniye sonunda ise  $6.119 \text{ N/mm}^2$ 'ye düşmektedir. İlk 7200 saniye sonunda gerilmede meydana gelen azalma  $2.635 \text{ N/mm}^2$  iken geri kalan 28800 saniyede  $0.401 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir azalma söz konusudur. Tablo 9'te yer alan ön prosedür uygulanmış gerilme gevşemesi deneylerinin incelenmesinden normal prosedürde

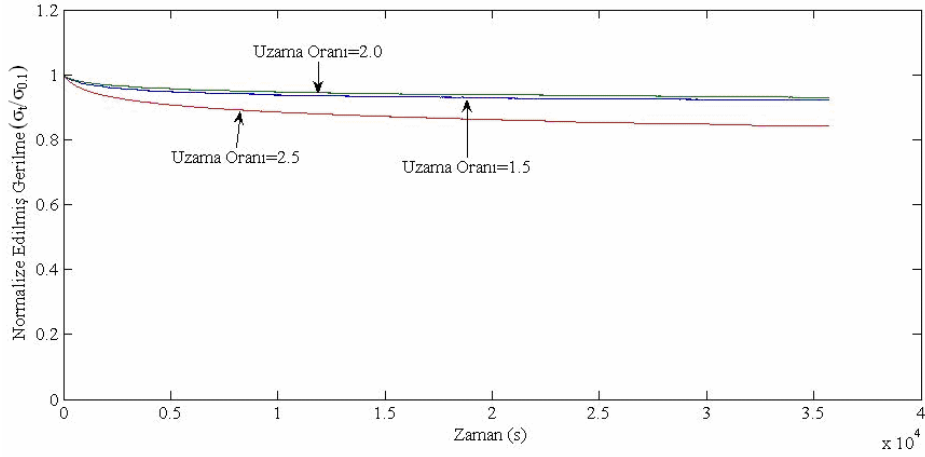
olduğu gibi  $\Delta\sigma_1$ 'de hızlı bir düşüşün olduğu,  $\Delta\sigma_2$ 'de ise oldukça küçük bir düşüşün olduğu görülmektedir.

Şekil 69'da en fazla gerilme gevşemesi  $\lambda= 2.5$ 'da olduğu görülmektedir.  $\lambda= 1.5$  ile  $\lambda= 2.0$  uzama oranları birbirine çok yakın olarak görülmektedir. Aksine  $\lambda= 2.5$  uzama oranı grafiği diğer iki uzama oranına göre çok fazla bir gerilme düşüşü olduğu görülmektedir.  $\lambda= 1.5$  ile  $\lambda= 2.0$  uzama oranları birbirine paralel ve ilerleyen zaman değerlerine yaklaşık olarak sabit bir değere doğru gitmektedir.  $\lambda= 2.5$  uzama oranında ise doğrusal bir şekilde azalma söz konusudur. Ayrıca  $\lambda= 2.0$  uzama oranı değerleri  $\lambda= 1.5$  uzama oranı değerlerinin üstüne çıktığı söylenebilir.

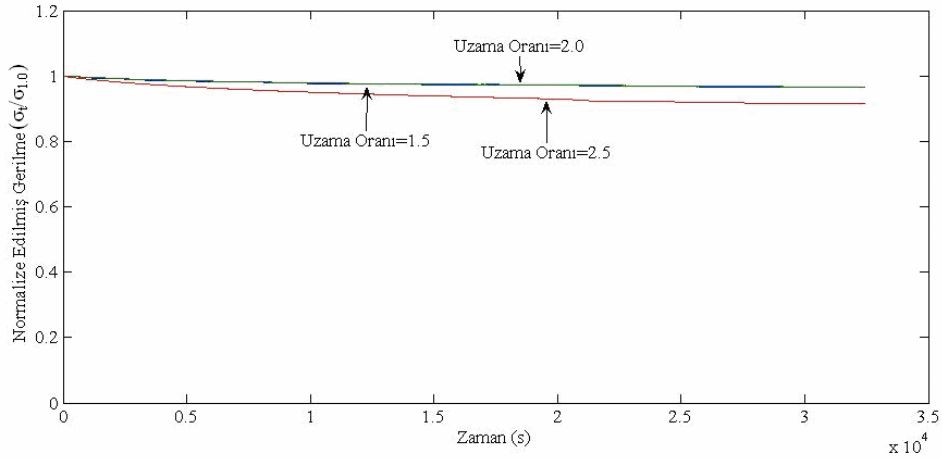
Şekil 52'de söz konusu olan durumun aynı gerçekteleşmiştir. Ancak  $\lambda= 1.5$  uzama oranı  $\lambda= 2.0$  uzama oranının altında yer almaktadır. Oluşan fark hemen hemen yok denecek kadar azdır.



Şekil 69. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.01. saatteki gerilme değerine ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

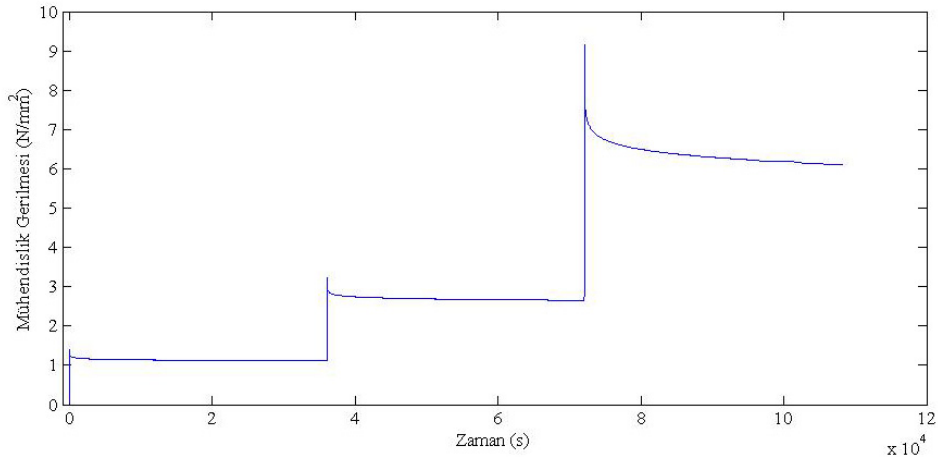


Şekil 70. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 0.1. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



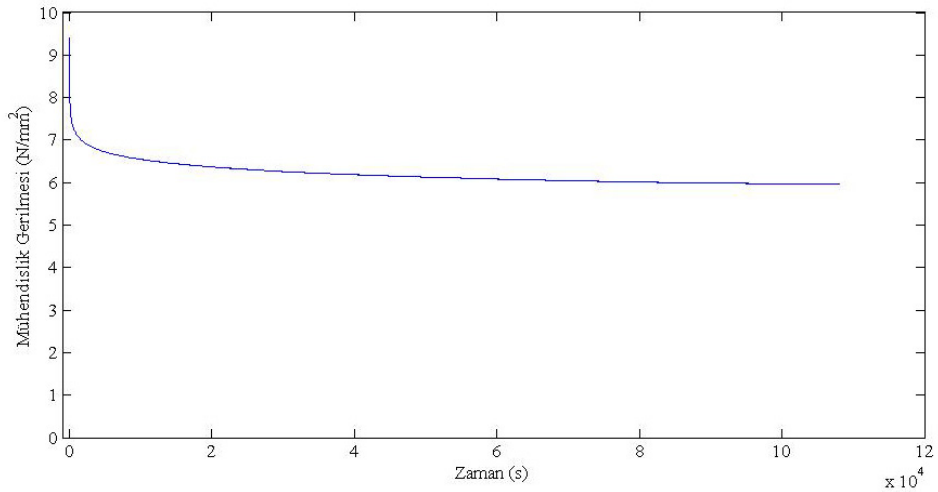
Şekil 71. EPDM kauçuk malzemesinin Shore A80 sertlik değerinde  $\lambda= 1.5$ ,  $\lambda= 2.0$ ,  $\lambda= 2.5$ 'da 1.0. saatteki gerilme değeri ile ön prosedür uygulanmış ve normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

Şekil 16'daki prosedür EPDM kauçuk malzemesine uygulandığında elde edilen şekiller Şekil 67'de gösterilmiştir. Burada malzemenin ön prosedür uygulanması sonucu  $\lambda= 2.5$  uzama oranına kadar deforme edildiğinde ve 36000 saniye gerilme gevşemesine tabi tutulduğunda elde edilen gerilme değeri  $\sigma_{\min} = 6.119 \text{ N/mm}^2$  olduğu görülmektedir.



Şekil 72. Shore A80 sertlik değerinde Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu tüm uzama oranları için elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

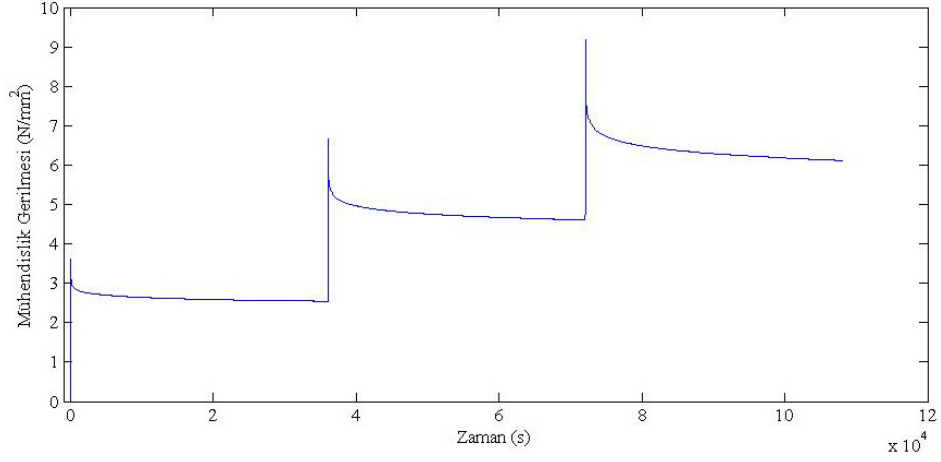
Tüm bu deneyler sonucunda birçok kez ifade edildiği gibi asıl vurgulanmak istenen Şekil 14, 15 ve 16'daki prosedürler arasında kıyaslama sonucu EPDM kauçuk numunesinin içyapısında meydana gelen deformasyonun tespitidir. Bu deformasyonu tespit ederken sırasıyla uygulanan prosedürlerde deney sonucunda elde edilen gerilme değerleri dikkate alınmıştır.



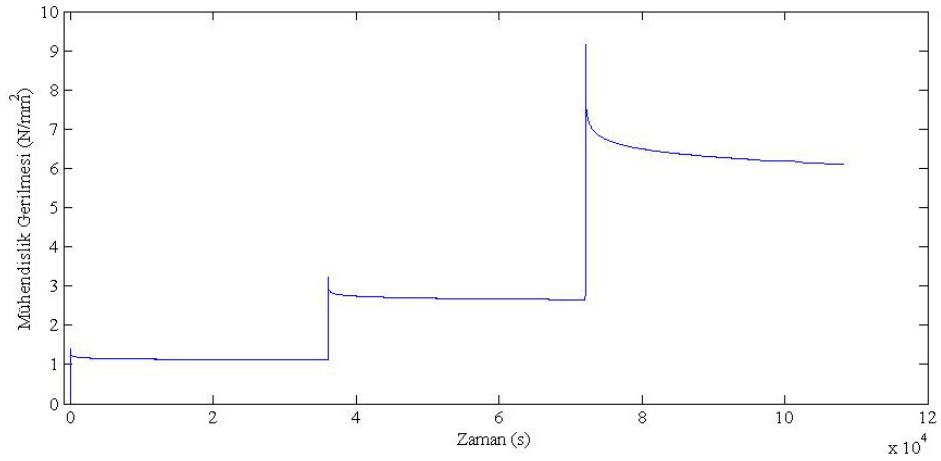
(a)

Şekil 73. Shore A80 sertlik değerinde a) Şekil 14, b) Şekil 15 ve c) Şekil 16'daki prosedür uygulanması sonucu elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin toplu gösterimi

Şekil 73'ün devamı



(b)

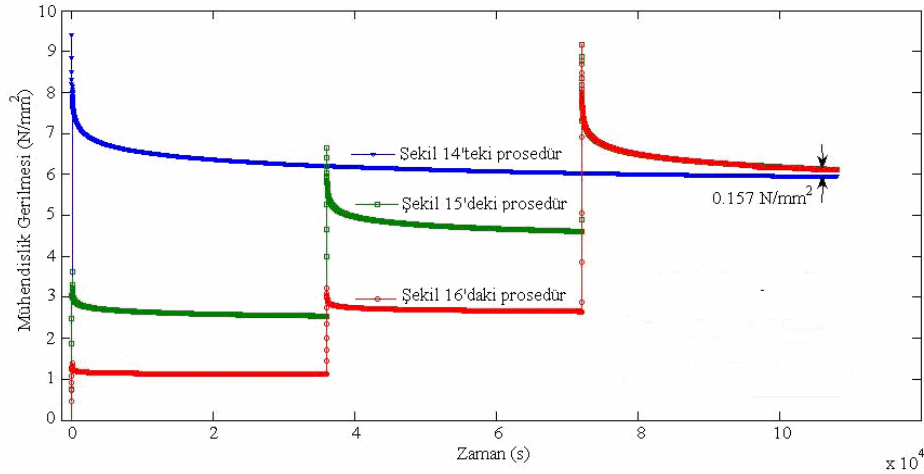


(c)

Shore A80 sertlik değerindeki EPDM kauçuk numunelerle yapılan tüm deney prosedürleri sonuçları Şekil 74'de görölmektedir. Normal koşullarda hiçbir prosedür uygulanmadan numune  $\lambda=2.5$  uzama oranına kadar deforme edildiğinde ve 108000 saniye beklenildiğinde kauçuk numunenin iç yapısındaki bağlar arasında çok fazla bir hasar sözü konusu olmamaktadır. Böylelikle malzeme üzerinde kalıcı deformasyon az olmaktadır. Yani malzeme herhangi bir deformasyon uygulandığında eski konumuna büyük oranda gelmektedir. Bu prosedürle numunede 3.429 N/mm<sup>2</sup> kadar bir gevşeme olmaktadır. Şekil 15'teki prosedür uygulandığında yukarıda bahsedilen iç yapıda bağlar arası kopmalar ve dolaylı olarak malzemede kalıcı deformasyon Şekil 14'teki prosedürden biraz daha fazla

olmaktadır. Gerilme düşüşü ise  $3.055 \text{ N/mm}^2$  seviyesindedir. Son olarak uygulanan ön prosedürlü deneyde ise tahmin edildiği gibi numune çok fazla işleme tabi tutulduğundan dolayı numunenin içyapısındaki bağlarda kopma çok daha fazla olmaktadır. Şekil 15 ve 16'daki prosedürler numuneye uygulandığında  $\lambda=1.5$ ,  $\lambda=2.0$  uzama oranlarında gerilme düşüşü yüksek değerdeyken son uzama oranı  $\lambda=2.5$ 'da bu prosedür eğrileri hemen hemen üst üste çakışmış olarak görülmektedir. Son prosedürdeki minimum gerilme değeri  $3.036 \text{ N/mm}^2$  dir.  $9.169 \text{ N/mm}^2$  maksimum gerilme değerine ulaşmaktadır.

Şekil 74'te  $\lambda= 2.5$  uzama oranlarında Şekil 14, 15 ve 16 prosedürlerindeki gerilme gevşemesi grafikleri bir t zamanında çakışmaktadır. Bu grafiklerin eğimleri yardımıyla Şekil 14 ve Şekil 15'ün  $\lambda= 2.5$  uzama oranındaki gerilme gevşemesi grafikleri 33,48 saat sonra çakışmaktadır. Bu zaman diliminden sonra Şekil 15'in eğiminin fazla olmasından dolayı elde edilen gerilme değerleri Şekil 14'tekinden az olmaktadır. Aynı şekilde Şekil 14 ve Şekil 16 prosedürlerinden elde edilen gerilme gevşemesi grafiklerinin çakıştığı zaman ise 33,59 saat olarak elde edilmiştir. Şekil 16 grafiğinin  $\lambda= 2.5$  uzama oranında eğiminin Şekil 15'tekinden daha az olmasından dolayı daha büyük bir t zamanında çakışma gerçekleşmektedir. Shore 80 sertlik değerindeki gerilme gevşemesi grafiklerinin çakıştığı zaman dilimlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



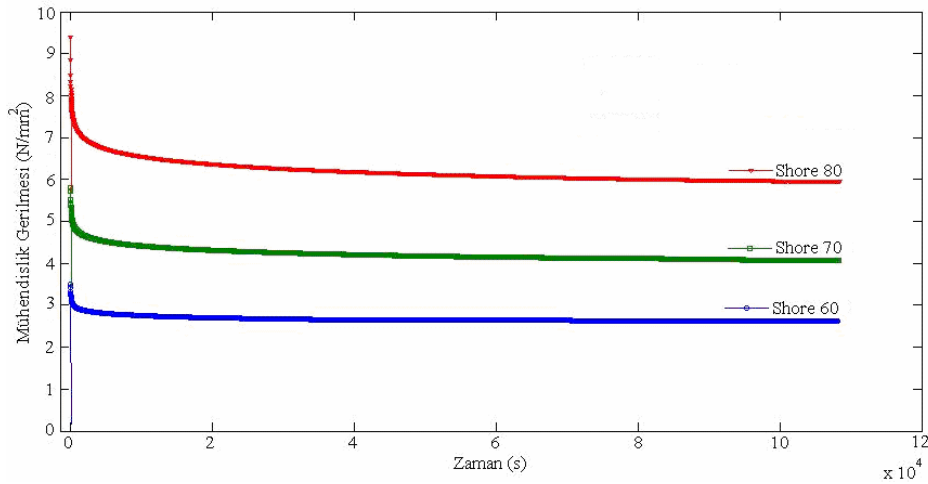
Şekil 74. Şekil 73'deki şekillerin tek grafik üzerinde gösterimi



### 3.1.1.4. Shore A60, 70, 80 Sertlik Deneyleri Kıyaslama

Şimdiye kadar ki ifade edilenler ayrı ayrı Shore A60, 70, 80 sertlik değerlerinin, Şekil 14, 15 ve 16'daki üç prosedür uygulanması sonucu grafiklerinin elde edilmesi ve elde edilen grafiklerin yorumlanması şeklinde özetlenebilir. Bu bölümü ise açıklanan üç prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik değerlerinde elde edilen şekillerin aynı grafik üzerinde çizilmesi ve yorumlanması şeklinde özetleyebiliriz.

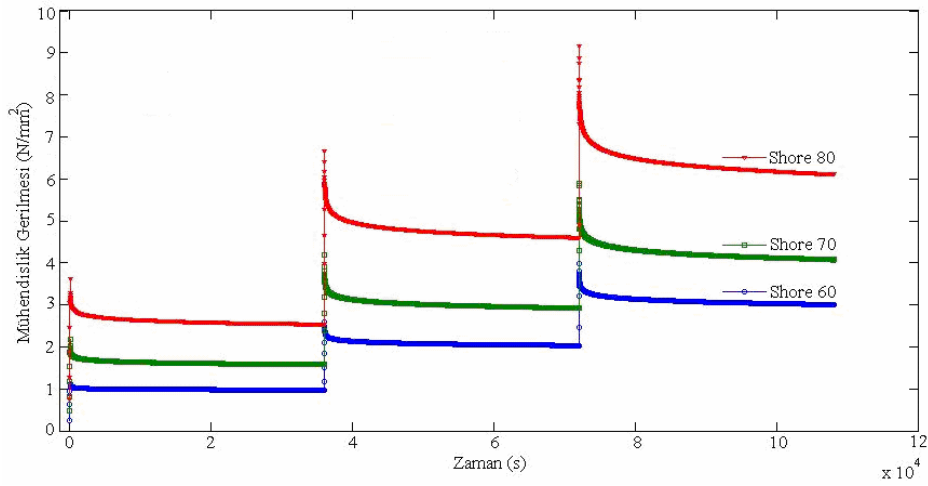
Şekil 75'te, Şekil 14'te ifade edilen deney prosedürü 60, 70, 80 shore sertlik değerleri için bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Shore A60 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla 3.49, 3.067 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 0.423 N/mm<sup>2</sup> dir. Shore A70 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla 5.806, 4.070 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 1.736 N/mm<sup>2</sup> dir. Shore A80 sertlik değerinde ise maksimum ve minimum gerilme değerleri sırasıyla 9.392; 5.963 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 3.429 N/mm<sup>2</sup> dir. Buradan görülmektedir ki sertlik değeri arttıkça hem gerilme gevşemesi deneyinin maksimum ve minimum gerilme değerleri hem de gerilmedeki düşüş doğru orantılı bir şekilde artmaktadır.



Şekil 75. Şekil 14'teki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi

Şekil 76'da, Şekil 15'te verilen deney prosedürünün Shore A60, 70, 80 sertlik değerleri için toplu olarak gösterilişi verilmiştir. Yukarıda ifade edilen sertlik arttıkça gerilmenin ve gevşemenin artması durumu aynen burada da geçerlidir. 1.5, 2.0 ve 2.5

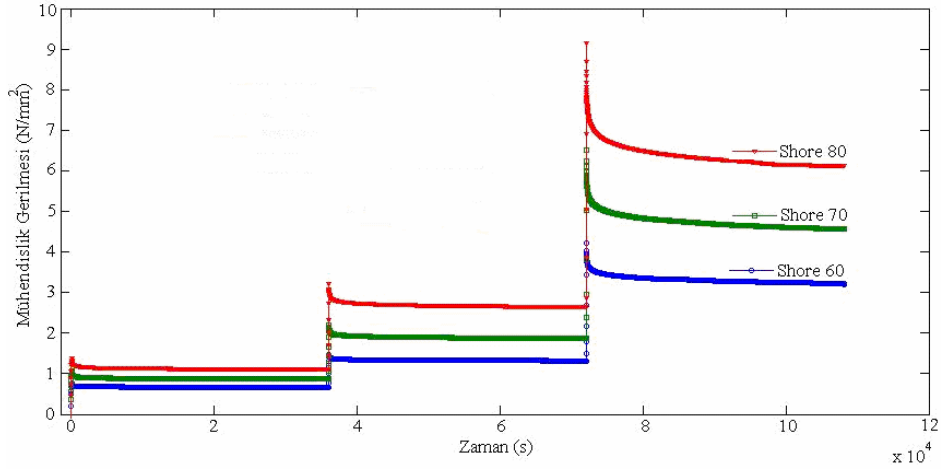
uzama oranlarında her bir sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki fark yani gevşeme değeri gittikçe artmaktadır. Ayrıca  $\lambda=2.5$  uzama oranı için elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri her bir sertlik değeri için şöyle yazılabilir. Shore A60 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 3.973, 3.004 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 0.969 N/mm<sup>2</sup> dir. Shore A70 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 5.879, 4.074 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 1.805 N/mm<sup>2</sup> dir. Son olarak Shore A80 sertlik değerinde ise maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 9.169, 6.114 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 3.055 N/mm<sup>2</sup> dir.



Şekil 76. Şekil 15'teki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi

Şekil 77'de, Şekil 16'da verilen deney prosedürünün Shore A60, 70, 80 sertlik değerleri için toplu olarak gösterilişi verilmiştir. Yukarıda ifade edilen sertlik arttıkça gerilmenin ve gevşemenin artması durumu aynen burada da geçerlidir. 1.5, 2.0 uzama oranlarında her bir sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki fark yani gevşeme değeri bir önceki prosedüre göre azalma göstermiştir. Fakat  $\lambda=2.5$  uzama oranında ise bu durumun aksi söz konusudur.  $\lambda=2.5$  uzama oranında elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri her bir sertlik değeri için şöyle yazılabilir. Shore A60 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 4.217, 3.204 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 1.013 N/mm<sup>2</sup> dir. Shore A70 sertlik değerinde maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 6.506, 4.562 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 2.24 N/mm<sup>2</sup> dir. Son olarak

Shore A80 sertlik değerinde ise maksimum ve minimum gerilme sırasıyla 9.155, 6.12 N/mm<sup>2</sup> ve gerilme gevşemesi ise 3.035 N/mm<sup>2</sup> dir.



Şekil 77. Şekil 16'daki prosedürün Shore A60, 70, 80 sertlik için toplu olarak gösterimi

Shore A60, 70, 80 sertlik değerleriyle Şekil 75, 76 ve 77'den elde edilen grafikler beraber incelenirse;

Shore A60 sertlik değeri için 108000 saniye sonunda elde edilen gerilme değerleri Şekil 75, 76 ve 77'de sırasıyla 3.067, 3.004, 3.204 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Tez çalışmasında elde edilmek istenen durum bu değerlerin hemen hemen aynı olması ve birbiri üzerine çakışık eğrilerin elde edilmesiydi.

Shore A70 sertlik değerinde de gerilme değerleri sırasıyla 4.070, 4.074, 4.562 N/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.

Shore A80 sertlik değerinde ise; 5.963, 6.114, 6.120 N/mm<sup>2</sup> gerilme değerleri elde edilmiştir.

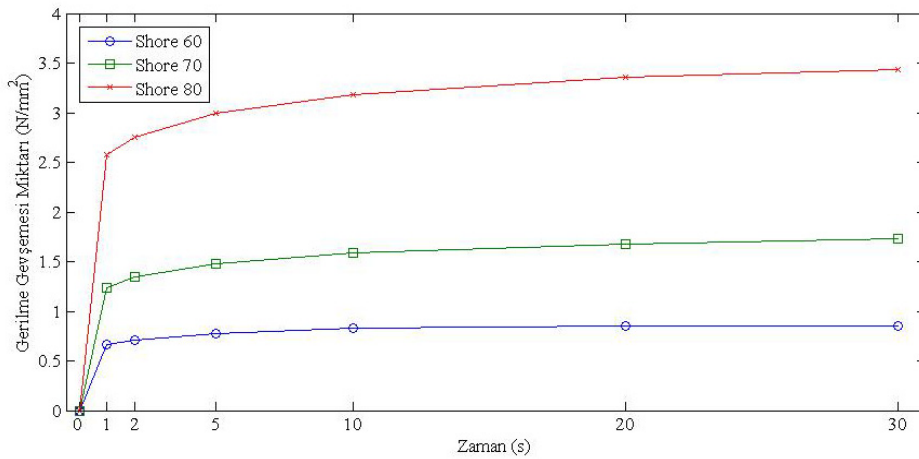
Shore A60, 70 ve 80 sertlik değerlerinde elde edilmiş olan gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri Şekil 78, 79 ve 80'de görülmektedir.

Şekil 14'deki prosedür uygulanarak elde edilmiş gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri için 1, 2, 5, 10, 20, 30. saat dilimlerinde gerilme gevşemesi miktarları Şekil 78'de görülmektedir. Shore A60, 70 ve 80 sertlik değerlerinde gerilme gevşemesi miktarlarının her bir zaman dilimi için arttığı görülmektedir. Shore A60 değerlerinde 10.

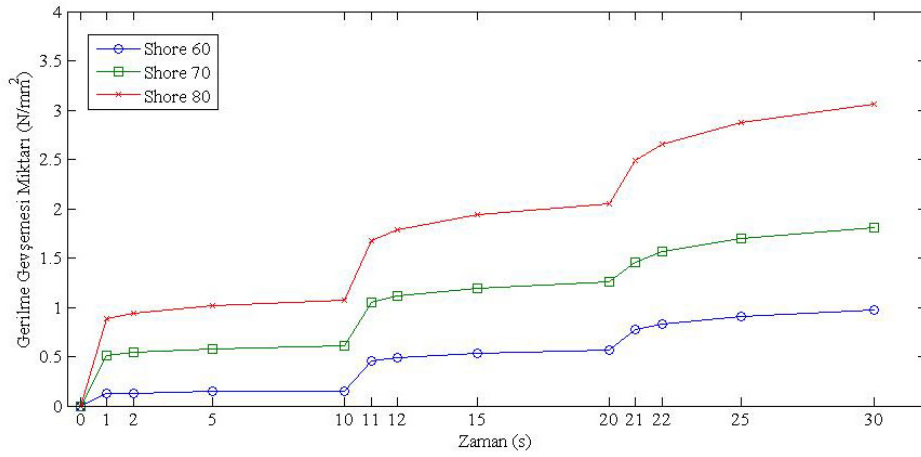
saatten sonra grafik sabit olarak devam etmektedir. Shore A 70 ve 80 değerlerinde ise grafikler lineer olarak artmaktadır.

Şekil 15'teki prosedür uygulanarak her bir uzama oranı için 1, 2, 5, 10, 20, 30. saat dilimlerinde elde edilmiş gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri Şekil 79'da görülmektedir. Shore A60, 70 ve 80 sertlik değerlerinde gerilme gevşemesi miktarlarının her bir zaman dilimi için arttığı görülmektedir. Ayrıca uzama oranı arttıkça da sertlik değerleri arasındaki gerilme gevşemesi miktarlarında da artış olduğu görülmektedir. Shore A 60, 70 ve 80 değerlerinde tüm uzama oranlarında elde edilen grafikler lineer olarak artmaktadır.

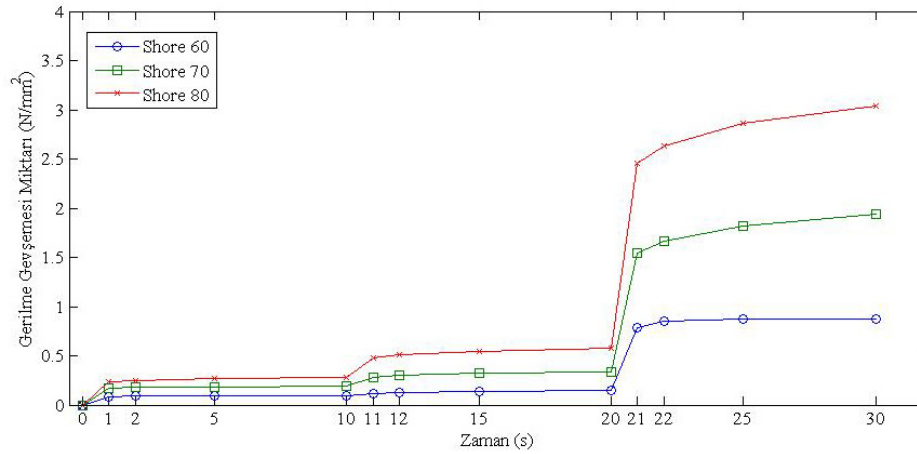
Şekil 16'daki prosedür uygulanarak her bir uzama oranı için 1, 2, 5, 10, 20, 30. saat dilimlerinde elde edilmiş gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri Şekil 80'de görülmektedir. Shore A60, 70 ve 80 sertlik değerlerinde gerilme gevşemesi miktarlarının her bir zaman dilimi için arttığı görülmektedir. Ayrıca uzama oranı arttıkça da sertlik değerleri arasındaki gerilme gevşemesi miktarlarında da artış olduğu görülmektedir. Bu artış Şekil 79'daki grafiklerdekinden fazla olmaktadır.  $\lambda=1.5$  uzama oranında Shore A 60, 70 grafikleri sabit olarak görülmektedir. Bunların dışında tüm sertlik değerlerinde ve tüm uzama oranlarında elde edilen grafikler lineer olarak artmaktadır.



Şekil 78. Şekil 75 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri



Şekil 79. Şekil 76 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri



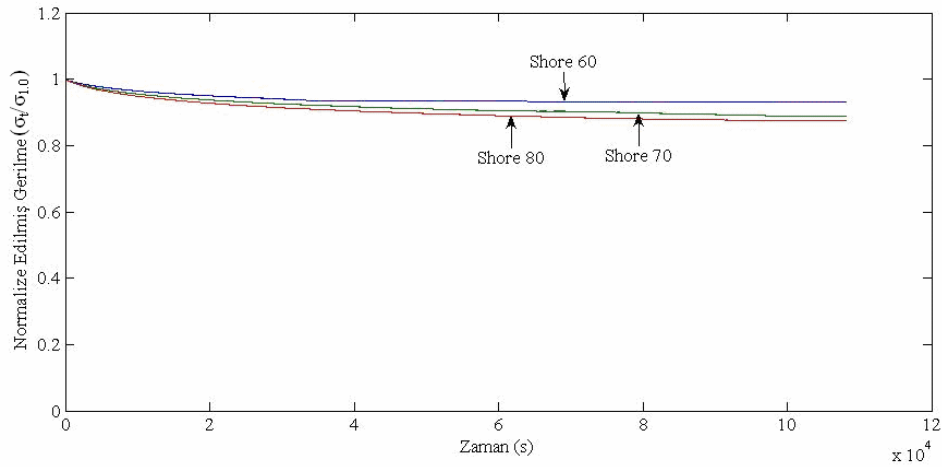
Şekil 80. Şekil 77 grafiklerinden elde edilen gerilme gevşemesi miktarı-zaman grafikleri

Şekil 75, 76 ve 77'deki grafikler 1.0. saatte normalize edilerek Shore A 60, 70 ve 80 sertlik değerleri için elde edilmiş normalize gerilme-zaman grafikleri Şekil 81, 82 ve 83'te görülmektedir.

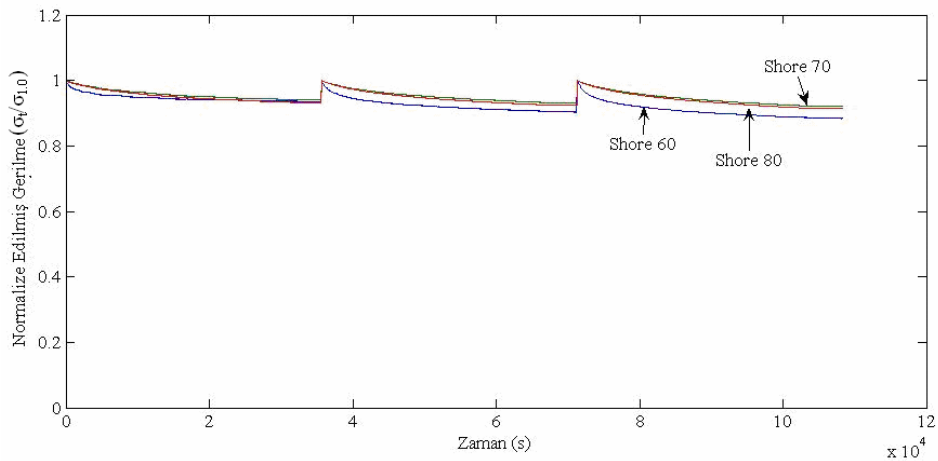
Şekil 81'de üç sertlik değerleri de 1. bölgede hemen hemen çakışık olarak görülmektedir. İlerleyen zaman dilimlerinde ise sertlik değerleri arasında açıklık artmaktadır. Shore 60 grafiği 2. bölgede sabit olarak görünürken shore 70 ve 80 grafikleri lineer olarak azalmaktadır.

Şekil 82’de  $\lambda=1.5, 2.0$  ve  $2.5$  uzama oranlarında shore 70 ve 80 sertlik değerlerindeki grafikler hemen hemen üst üste çakışmaktadır. Shore 60’ta ise uzama oranı arttıkça normalize edilmiş gerilme-zaman grafiğinde gerilme düşüşü artmaktadır.

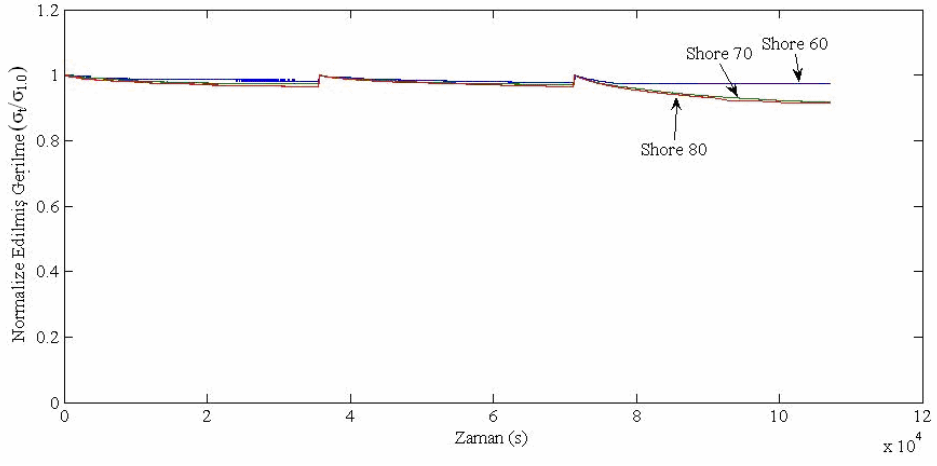
Şekil 83’de ise  $\lambda=1.5$  ve  $2.0$  uzama oranlarında her üç sertlik değerindeki grafikler birbirine çok yakın olarak görülmektedir.  $\lambda=2.5$  uzama oranında ise shore 70 ve 80 sertlik değerlerindeki grafikler hemen hemen üst üste çakışırken shore 60’taki grafik 2. bölgede sabit kalmaktadır.



Şekil 81. Şekil 75'teki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



Şekil 82. Şekil 76'daki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri



Şekil 83. Şekil 77'deki grafiklerin 1.0. saatteki gerilme değeri ile normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 4.1. Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasında;

- Mühendislik gerilmesi-zaman grafiklerini farklı uzama oranlarında kıyaslayabilmek için normalize edilmiş gerilme-zaman grafikleri çizilmiştir. Deneyden okunan gerilme değerlerinin 1.0. saatteki gerilme değerine bölünmesiyle  $\lambda=1.5, 2.0, 2.5$  uzama oranlarındaki grafiklerin birbiri üzerine çakıştığı görülmektedir. Böylece en ideal durum  $\sigma_t/\sigma_{1.0}$  saatte gerçekleşmektedir.
- Sadece bir uzama oranında belli süre ile gerçekleştirilen gerilme gevşemesi verilerinden (değişik uzama oranlarında deney yapmadan normalize edilmiş gerilme gevşemesi eğrileri kullanılarak) gerilme gevşemesi davranışı belirlenebilir.
- Sertlik değeri arttıkça  $\lambda=1.5, 2.0, 2.5$  uzama oranlarındaki gerilme gevşemesi miktarları artmaktadır.
- Sertlik değeri arttıkça farklı yükleme programlarıyla elde edilen gerilme gevşemesi eğrilerinin bir birine yakınsadığı zaman süreleri azalmaktadır.
- Gerilme gevşemesi deneyinde numune boyu değişim hızı 100 mm/dak (67 d/dak) alınmıştır. Numune boyutları ve içyapısı dikkate alındığında en ideal hız değerinin bu olduğu görülmüştür. Daha yüksek hız değerlerinde numunede kopma meydana gelmektedir.
- Numuneye uygulanan yükleme-boşaltma çevrimlerinde gerilme-uzama oranı grafiklerinde numune ilk konumuna gelememektedir. Yani numunede bir kalıcı deformasyon oluşmaktadır.
- Shore 60, 70 ve 80 sertlik değerleri göz önüne alındığında gerilme gevşemesi grafiklerinin eksponansiyel cevabın olduğu 1. bölgede ve lineere yakın bir cevabın olduğu 2. bölgede her bir sertlik değeri için gevşeme oranları artmaktadır. Bu gevşeme değerleri 1. bölgede, 2. bölgeye göre daha fazla düşüş göstermektedir.
- Gerilme gevşemesi deneylerinde Shore 60, 70, 80 sertlik değerlerinde değişik zaman skalalarında elde edilen grafiklerin birbiri üzerine çakıştığı görülmektedir.



- Numune boyutları dikkate alındığında  $\lambda > 2.5$  değerleri için tüm sertlik değerlerinde numuneye normal ve ön prosedür uygulandığında numunede kopma meydana gelmektedir.

#### 4.2. Öneriler

- Yapılan tez çalışmasında hem ucuz hem de çok bulunan EPDM kauçuk numunesiyle gerilme gevşemesi deneyleri gerçekleştirildi. Son zamanlarda pek çok uygulamada kullanılan Silikon kauçuk içinde deneyler gerçekleştirilebilir.
- Çalışmada gerilme gevşemesi tespit etmek için tek eksenli çekme deneyleri yapıldı. Bu kauçuk türü için tek eksenli basma deneyleri de yapılabilir.
- Ön prosedürlü gerilme gevşemesi deneylerinde yükleme boşaltma ve sonrasındaki bekleme süreleri farklı varyasyonlar şeklinde gerçekleştirilebilir ve bu varyasyonların gerilme gevşemesi deneyine etkileri araştırılabilir.
- EPDM kauçuk malzemesine ön deformasyon prosedürü uygulandıktan sonraki bekleme süresi yaklaşık 2 saat alınmıştı. Daha uzun ve kısa zaman dilimlerinde alınarak bekleme süresinin gerilme gevşemesi deneylerine ne gibi bir etkisi olacağı araştırılabilir.
- Yazılan program geliştirilerek hem yüksek sıcaklıklarda hem de çok düşük sıcaklıklar da deneyler yapılabilir
- Ayrıca programın geliştirilmesi ve deney düzeneğindeki sıcaklık odasının yeniden tasarlanmasıyla daha düşük sıcaklık değerlerindeki ortam koşullarında çalışmaya elverişli bir hale getirilebilir.
- Malzemenin boyutları ve içyapısı dikkate alınarak daha düşük ve daha yüksek hız ve uzama oranlarında deneyler gerçekleştirilebilir.
- EPDM numunesi için kauçuğun Mullins etkileri, histeresis, numune boyu değişim hızı, kalıcı deformasyon gibi inelastik özellikleri tek ve iki eksenli deney düzenekleriyle incelenebilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Anonim, Elastomers and Rubbers, Machine Design, 61(1989) 294–327.
2. Schidrowitz, P. ve Dawson, T.R., History of the Rubber Industry , W. Heffer Sons Ltd., Cambridge, 1952.
3. Morawetz, H., History of Rubber Research , Rubber Chemistry and Technology,73, 3 (2000) 405–426.
4. Vahapoğlu, V., Kauçuk Türü Malzemeler. I. Doğal Kauçuk, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 2007
5. Karataş, A., Elastomer Malzemelerin Statik ve Dinamik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001
6. Vahapoğlu, V., Kauçuk Türü Malzemeler. II. Sentetik Kauçuk, KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi, 2006
7. Morton, M. 1981. History of Synthetic Rubber. Journal of Macromolecular Science-Chemistry, A15, 7 (1981) 1289–1302.
8. Savran, H.Ö. 2001. Elastomer Teknolojisi-I. Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul, 158s.
9. DPT., Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001-2005), Yayın No:2809, Ankara, 2001
10. Ciullo Peter A. , Hewitt N. , The Rubber Formulary, William Andrew Inc., 1999
11. Vahapoğlu, V. ve Yüksel H.T., EPDM (Etilen-Propilen Dien Monomer) Sentetik Kauçuğu, 11th International Materials Symposium, 2006, Denizli, Bildiriler Kitabı, 333–338.
12. Kaya, F., Ana Hatlarıyla Pastikler ve Katkı Maddeleri, Birsen Yayınevi, 2005
13. Vahapoğlu, V., Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
14. Spetz, G., Stress Relaxation. Test Methods, Instruments and Lifetime Estimation, Technical Report, 2000.
15. Çalık, A., Soğuk Çekilmiş Karbonlu Çelik Tellerin Gevşeme Özelliğine Termomekanik Isıl İşlemin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993
16. Ataç, S., Değişik Yükleme Durumlarında Polipropilenin Gerilme Gevşemesine Bağlı Olarak Viskoelastik Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999
17. Berry, J., Helical Spring Stress Relaxometer, Rubber Chemistry and Technology, 30 (1957) 889–894.
18. 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.

19. 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.
20. Macdonald, W.S. ve Ushakoff, A., Instrument for Measuring Stress Relaxation of High Polymer Materials, Analytical Chemistry, 20, 8 (1948) 713–717.
21. Wilkinson, C.S. ve Gehman, S.D., Autopneumatic Apparatus for Measuring Stress Relaxation, Analytical Chemistry, 22, 11 (1950) 1439–1443.
22. Morris, R.E., James, R.R. ve Segman, I.P., India Rubber World, 119 (1949) 466.
23. Mercurio, A. ve Tobolsky, A., Stress Relaxation Studies of Scission in Rubber Vulcanizates, Rubber Chemistry and Technology, 33, 1 (1960) 72–77.
24. 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.
25. Mooney, M., Wolstenholme, W.E. ve Villars, D.S., Drift and Relaxation of Rubber, Journal of Applied Physics, 15 (1944) 324–337.
26. Cotten, G.R. ve Boonstra, B., Stress Relaxation in Rubbers Containing Reinforcing Fillers, Journal of Applied Polymer Science, 9 (1965) 3395–3408.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1998 yılında Trabzon Lisesi'nden mezun oldu. 1999 yılında Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik-Mimarlık Fakültesini kazandı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik-Mimarlık Fakültesinden fakülte birincisi olarak mezun oldu. 2004 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aralık 2007'de Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü kadrosuna Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmekte olup alanıyla ilgili kaynakları kullanabilecek derecede İngilizce bilmektedir.