



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

KAUÇUK ÜRÜNLERİN GERİLME -
GEVŞEME DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU

Merve YAVUZ ERKEK

Doktora Tezi



KAUÇUK ÜRÜNLERİN GERİLME -
GEVŞEME DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ, ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU

Merve YAVUZ ERKEK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAUÇUK ÜRÜNLERİN GERİLME - GEVŞEME DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ ,ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

Merve YAVUZ ERKEK

Prof. Dr. Necmettin KAYA
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Merve YAVUZ ERKEK tarafından hazırlanan "KAUÇUK ÜRÜNLERİN GERİLME - GEVŞEME DAVRANIŞININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necmettin KAYA

Başkan : Prof. Dr. Necmettin KAYA
BUÜ. Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Fatih KARPAT
BUÜ. Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erol SOLMAZ
BUÜ. Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
BTÜ. Doğa Bil. Mim-Müh Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY
BTÜ. Doğa Bil. Mim-Müh Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza
İmza
İmza
İmza
İmza

Ali Bayram

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
04/10/2018

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.././.....

İmza

Merve YAVUZ ERKEK

ÖZET

Doktora Tezi

KAUÇUK ÜRÜNLERİN GERİLME-GEVŞEME DAVRANIŞININ MODELLENMESİ, ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Merve YAVUZ ERKEK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr.Necmettin KAYA

Kauçuk malzemeler sızdırmazlık, aşınmaya dayanıklılık, titreşim sönümlenme, elektrik yalıtkanlığı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı endüstride çok geniş kullanım alanına sahiptir. Elastik bağlantı elemanı olarak kullanılmakla birlikte titreşim sönümlenme elemanı olarakta kullanılmaktadırlar. İstenen fonksiyonları yerine getirmesi beklenen bir kauçuk ürün için önce malzeme olarak reçetesi hazırlanır ve karışım oranları belirlenir. Daha sonra ürünün boyutlandırılması yapılır. Bu tez çalışmasında kauçuk ürünlerin istenen özellikleri sağlaması için test, modelleme, analiz ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kauçuk malzemelerin mekanik davranışlarını modellemek metalik malzemelere göre oldukça zordur. Üzerine gelen yüklemeler altında çok çeşitli davranışlar gösterebilmektedirler. Statik yüklemelerde rijitlik eğrileri belirleyici iken dinamik yüklemelerde zamana bağlı gerilme-gevşeme davranışı ve titreşim altında frekansa bağlı davranış öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında seçilen kauçuk ürünlerin hiperelastik modellemeleri yapılmış ve gerilme-gevşeme davranışları analiz edilmiştir. Ayrıca istenen özelliklerde ürün için deney tasarımı yaklaşımı ile şekil optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Kauçuk ürünlerin, çalışma şartlarında istenilen fonksiyonları yerine getirebilecek özelliklerde olması için bir yaklaşım ortaya konmuştur. Bu yöntem özellikle sızdırmazlık amaçlı kullanılan kauçuk ürünlerin zamanla özelliklerini kaybetme durumunun belirlenmesi için kullanılabilir. Böylece prototip üretilmeden daha kısa zamanda daha az maliyet ile istenilen özellikte kauçuk ürünler üretilenilecektir.

Anahtar Kelimeler: Gerilme-Gevşeme, Sürünme, Conta, Sızdırmazlık, EPDM Kauçuk, Malzeme Karakterizasyonu, Mullin Etkisi, Şekil Optimizasyonu.

2018, xvi + 165 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

MODELING, ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF STRESS-RELAXATION BEHAVIOR OF RUBBER PRODUCTS

Merve YAVUZ ERKEK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr.Necmettin KAYA

Rubber materials have a wide range of applications because of their good physical and mechanical properties such as sealing, abrasion resistance, vibration damping, electrical insulation. They are used as elastic coupling elements and vibration damping elements. For a rubber product that is expected to fulfill the desired functions, the formulation is first prepared as the material and the mixing ratios are determined. Then the product is resized. In this thesis study, tests, modeling, analysis and optimization studies have been carried out to ensure the desired properties of rubber products.

Modeling mechanical behaviors of rubber materials is rather difficult compared to metallic materials. They can show a wide variety of behaviors under load. In static loads, the rigidity curve is determinant, while in dynamic loads, the time dependent stress-relaxation behavior and the frequency dependent behavior under vibration are dominant.

In this thesis, hyperelastic models of selected rubber products were made and stress-relaxation behaviors were analyzed. In addition, shape optimization has been carried out with the experimental design approach for the product. An approach has been put in place to ensure that rubber products are capable of fulfilling the desired functions in working conditions. This method can be used in particular for determining the loss of properties of rubber products used for sealing purposes over time. Thus, rubber products with the desired characteristics can be produced in a shorter time with less cost.

Key words: Stress Relaxation, Creep, Gasket, Leakproofing, EPDM Rubber, Material Characterization, Mullins Effect, Shape Optimization.

2018, xvi + 165 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimimde ve tez çalışmalarımnda bana her zaman destek ve rehber olan çok değerli hocam Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Parça temini konusunda yardımları için Kavses Mühendislik A.Ş.'den Ayşe Mine BAYBURTLU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteğini esirgemeyen anneme ve babam Prof. Dr. Nurettin YAVUZ'a ve kardeşlerime, maddi ve manevi desteklerinden dolayı her zaman yanımda olan eşime, ailemin vazgeçilmezi olan ve bu süreçte desteklerini ve dualarını esirgemeyen eşimin anne, baba ve kardeşine teşekkürlerimi sunarım.

”-Doktora bitince bir daha hiç doktora gitmeyecek misin?-Makinelerin doktoru olunca makinelere mi iğne yapacaksınız? -Yaşasın Completed!” vb. cümleleri ile beni güldüren ve her gün “-Doktora bitti mi? “ diye soran canım oğluma teşekkürlerimi sunarım.

Merve YAVUZ ERKEK

13/08/2018

İÇİNDEKİLER

	sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1.Kaynak Araştırması.....	3
2.2. Kauçuk Tarihçesi ve Kauçuk Malzemelerin Kullanım Alanları.....	6
2.3. Kauçuk Molekül Yapısı ve Vulkanizasyon	9
2.4. Kauçuğa İlave Edilen Katkı Maddeleri.....	14
2.4.1. Dolgu Maddeleri	15
2.4.2. Kimyasal Yumuşatıcılar.....	16
2.4.3. Karbon Siyahları	16
2.4.4. Koruyucu Maddeler	19
2.4.5. Aktivatörler	20
2.4.6. Hızlandırıcılar	21
2.4.7. Geciktiriciler	21
2.5. Elastomer ve Elastomer Çeşitleri.....	21
2.5.1. Doğal Kauçuk (NR)	22
2.5.2.Sentetik Kauçuklar	24
2.5.2.1.Stiren Bütadien Kauçuk (SBR).....	24
2.5.2.2.Butil Kauçuk (IIR)	26
2.5.2.3. Nitril Kauçuğu (NBR).....	26
2.5.2.4.Etilen Propilen (EPDM).....	27
2.5.2.5. Polibütadien (BR)	28
2.5.2.6.Poliüretan Kauçuk (AU)	29

2.5.2.7.Hidrojene Nitril Kauçuk (HNBR).....	29
2.5.2.8.Neopren Kauçuk (EU)	30
2.5.2.9.Silikon Kauçuklar (SI)	30
2.5.2.10.Poliakrilatlar (ACM)	31
2.5.2.11.Floroelastomerler (FPM)	31
2.6. Kauçuk ve Polimerik Malzemelerdeki Sürünme ve Gerilme Gevşemesinin Ölçülmesine İlişkin Standartlar.....	32
2.7. Kauçuk Gerilme-Gerinme Davranışı	35
2.7.1. Hiperelastite Terimleri	40
2.7.2. Histerezis.....	41
2.7.3. Gerilme Gevşemesi.....	42
2.7.4.Cisimlerde Sürünme(Creep)	48
2.7.5. Mullin etkisi	52
2.8.Hiperelastik Malzemeler İçin Test Yöntemleri.....	53
2.8.1.Tek Eksenli Çekme Testi	54
2.8.2.Düzlem Çekme Testi.....	54
2.8.3.Basit Basma Testi.....	55
2.8.4.İki Eksenli Eş Çekme Testi.....	56
2.9.Hiperelastik Malzeme Modelleri	58
2.9.1. Mooney-Rivlin Modeli	59
2.9.2. Neo – Hooken Modeli.....	59
2.9.3.Ogden Modeli	60
2.9.4.Yeoh Modeli	60
2.10. Viskoelastik Davranış	61
2.11. Şekil Değişirme Türleri.....	63
2.12.Zaman Alanında Viskoelastik Modelleme.....	65
2.12.1. Elastik Davranış Modeli.....	65
2.12.2. Viskoz Davranış Modeli.	65
2.12.3. Maxvell Modeli, Kelvin Modeli ve Karışık Model.	66
2.12.4.Gerilme Gevşeme Davranışının Modellenmesi	68
3.MATERYAL VE YÖNTEM	71
3.1. Kauçuk Ürünler ve Malzeme Testleri.....	72

3.1.1. Tek Eksenli Çekme Testinde Kullanılan Kaşık Numunesi.....	72
3.1.2. Basma Testinde Kullanılan Disk Numunesi	74
3.1.3. Contalar	78
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	82
4.1. Kauçuk Ürünler için Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis	82
4.1.1. Çekme Testinde Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis	82
4.1.2. Basma Testinde Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis	87
4.1.3. Contalarda Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis.....	97
4.2. Kauçuk Malzemelerin Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi.....	100
4.2.1. Tek Eksenli Çekme Testi ile Hiperelastik ve Viskoelastik Modelleme.....	100
4.2.2. Kaşık Test Numunesi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu	108
4.2.3. Basit Basma Testi ile Hiperelastik ve Viskoelastik Modelleme	112
4.2.4. Basit Basma Numunesi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu	118
4.3. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Modellenmesi, Testi ve Analizi.....	123
4.3.1. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi..	123
4.3.2. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu	126
4.3.2.1. Büyük Contanın Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları.....	126
4.3.2.2. Küçük Contanın Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları.....	130
4.4. Hareketli Sistemlerde Sızdırmazlık İçin Conta Kesiti Şekil Optimizasyonu	133
4.4.1. Deney Tasarımı	134
4.4.2. Conta Kesit Optimizasyonu	134
4.4.2.1. X Kesitli Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi.....	138
4.4.2.2. X Kesitli Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Analiz Sonuçları.....	142
4.4.3. X Kesitli Contaların Optimizasyonu.....	149
5. SONUÇ	155
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	165

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Kesit alanı
a	Deney numunesinin genişliği
d	Numunenin yoğunluğu
dk	Dakika
Fk	Kopma kuvveti
h	Deney numunesinin kalınlığı
l	Numunenin maksimum uzama sonrasında ölçülen son boyu
lo	Numunenin ölçülen ilk boyu
Mpa	Mega paskal
N	Newton
Shore A	Sertlik birimi
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
σ	Mühendislik gerilmesi
σ_i	Asal doğrultulardaki mühendislik gerilmesi (i = 1,2,3)
σ_k	Kopma gerilmesi
ϵ	Şekil değiştirme
% ϵ	Yüzde uzama değeri
λ	Uzama oranı
λ_i	Asal doğrultulardaki uzama oranı (i = 1,2,3)
α	Açı (derece cinsinden)
$\Delta\lambda$	Kalıcı deformasyon
Pi	Basma yükü,
o	Numunenin orijinal kesit alanı,
% e	% Birim şekil değişimi,
h0	Numunenin orijinal uzunluğu,

hi Numunenin Pi yükü altındaki uzunluğu,
 Δh Numunenin Pi yükü etkisi altında boyundaki kısalma miktarı
olarak tanımlanır.

Kısaltmalar	Açıklama
AU	Poliüretan kauçuk
BR	Bütadien kauçuk
CO	Epiklorohidrin kauçuk
CR	Neopren (kloropren) kauçuk
CSM	Klorosülfon polietilen kauçuk
DM	Dibenzotiazol disülfid
ECO	Epiklorohidrin kauçuk
EPDM	Etilen propilen dien kauçuk
EPM	Etilen propilen kauçuk
FEF	Karbon siyahı
FKM	Floroelastomer
FSI	Florosilikon kauçuk
HNBR	Hidrojene nitril kauçuk
IIR	Butil kauçuk
IR	İzopren kauçuk
NBR	Nitril kauçuk
NR	Doğal kauçuk
SBR	Stiren-bütadien kauçuk
SI	Silikon kauçuk
TPE	Termoplastik elastomer

ŞEKİLLER DİZİNİ

sayfa

Şekil 2. 1. Kauçuk ham maddesinin elde edilmesi.....	6
Şekil 2. 2. Kauçuk ürünler	8
Şekil 2. 3. Otomotivde kullanılan kauçuk parçalar	9
Şekil 2. 4. Kauçuk yer kaplamaları	9
Şekil 2. 5. Stereo-izomerler.....	10
Şekil 2. 6. Vulkanizasyon öncesi ve sonrasındaki polimer yapısı	11
Şekil 2. 7. Vulkanizasyon mekanizması	13
Şekil 2. 8. Vulkanizasyonun gerilme-gerinme eğrilerine etkisi.....	14
Şekil 2. 9. Zincir şeklinde bağlı karbon siyahı taneleri.....	17
Şekil 2.10. Vulkanizasyon sisteminde çinko oksitinin görevi	20
Şekil 2.11. Elastomer yapısı	21
Şekil 2.12. Kauçuk türü malzemelerin sınıflandırılması.....	23
Şekil 2.13. Doğal Kauçuk	24
Şekil 2.14. Stiren Bütadien Kauçuğu	25
Şekil 2.15. SBR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler.....	25
Şekil 2.16. İzobütilen ve isopren karışımından bütül kauçuk oluşumu	26
Şekil 2.17. NBR Oluşum reaksiyonu	27
Şekil 2.18. NBR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler	27
Şekil 2.19. EPDM kauçuklarla imal edilmiş malzemeler	28
Şekil 2.20. BR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler	29
Şekil 2.21. Poliüretan Kauçuk	29
Şekil 2.22. Silikon kauçuktan imal edilen ürünler	31
Şekil 2.23. Kauçuğun çekme testi altındaki davranışı	36
Şekil 2.24. Şekil değiştirme oranı	37
Şekil 2.25. Karbon karası kullanımının sertliğe etkisi	38
Şekil 2.26. Şekil değişimi etkisi ile kristalleşme	39
Şekil 2.27. Kalıcı şekil değişimi	40
Şekil 2.28. Histerezis çemberi.....	41
Şekil 2.29. Uzama ve geri şekil değişimi içeren histeresiz grafiği	42
Şekil 2.30. Gerilme gevşeme eğrisinde tanımlanan bölgeler	43
Şekil 2.31. Gerilme gevşemesi deneyleri.....	44

Şekil 2.32. Gerilme gevşeme davranışı.....	47
Şekil 2.33. Gerilme Gevşeme Testi	48
Şekil 2.34. Sürünme (Creep) eğrisi yük kaldırılması durumunda ϵ -t davranışı.....	49
Şekil 2.35. Sürünme Testi (Nandi ve ark. 2014).....	50
Şekil 2.36. Yüksek(a) ve düşük(b) gerilme durumlarında şekil değişimleri	51
Şekil 2.37. Mullin etkisi (Bauman 2008)	52
Şekil 2.38. Hiperelastik Malzeme Test Yöntemleri	53
Şekil 2.39. Tek eksenli çekme testi.....	54
Şekil 2.40. Düzlem çekme testi.....	55
Şekil 2.41. Basit basma testi	56
Şekil 2.42. İki eksenli eş çekme testi	57
Şekil 2.43. Gerilme - şekil değişimi grafikleri.....	57
Şekil 2.44. Yükleme hızının şekil değişimine etkisi	63
Şekil 2.45. Genel yükleme ve boşaltma eğrileri	63
Şekil 2.46. Elastik şekil değişimi	64
Şekil 2.47. Plastik(kalıcı) şekil değiştirme	64
Şekil 2.48. İç sürtümlü viskoelastik şekil değiştirme	64
Şekil 2.49. Hooke cismi ve elastik davranış modeli.	65
Şekil 2.50. Newton cismi ve viskoz davranış modeli.	66
Şekil 2.51. Maxwell modeli, Kelvin modeli ve Birleşik Modeli	67
Şekil 2.52. Genelleştirilmiş Maxwell modeli	68
Şekil 2.53. Maxwell modeli	69
Şekil 3. 1. Kauçuk sızdırmazlık elemanları (Yavuz Erkek 2016).....	71
Şekil 3. 2. Kullanılan kaşık test numunesinin TS ISO 37 standartlarına göre şekli	72
Şekil 3. 3. Testte kullanılan kaşık test numuneleri.....	73
Şekil 3. 4. Test numunesi h ve a ölçüleri	73
Şekil 3. 5. Basma testinde kullanılan disk numune.....	74
Şekil 3. 6. Basma numunesi ve ölçüleri	75
Şekil 3. 7. Contaların kullanıldığı transformatör burç izalatör çeşitleri	79
Şekil 3. 8. Porselen transformatör burcunda contanın konumu	79
Şekil 3. 9. Büyük conta	80
Şekil 3.10. Küçük conta	80
Şekil 3.11. Büyük conta ölçüleri	81
Şekil 3.12. Küçük conta ölçüleri	81

Şekil 4.1. Kaşık numunesinin gerilme gevşeme testi.....	82
Şekil 4.2. Kaşık numunesinin 20 çevrimli histerezis grafiği	83
Şekil 4.3. Ön çevrimsiz gerilme gevşemesi kuvvet-zaman grafiği.....	85
Şekil 4.4. Ön çevrimsiz gerilme gevşemesi gerilme-zaman grafiği.....	86
Şekil 4.5. Ön çevrimli gerilme gevşemesi kuvvet-zaman grafiği	86
Şekil 4.6. Ön çevrimli gerilme gevşemesi gerilme-zaman grafiği.....	87
Şekil 4.7. Basma test numunesinin gerilme gevşeme testi	87
Şekil 4.8. %20 sıkıştırma histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği	89
Şekil 4.9. %20 sıkıştırma histeresiz gerilme-şekil değişimi grafiği.....	89
Şekil 4.10. %40 sıkıştırma histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği	91
Şekil 4.11. %40 sıkıştırma histeresiz gerilme-şekil değişimi grafiği.....	91
Şekil 4.12. %20 Sıkıştırma ön çevrimsiz test kuvvet-zaman grafiği	93
Şekil 4.13. %20 Sıkıştırma ön çevrimsiz test gerilme-zaman grafiğ	93
Şekil 4.14. %40 Sıkıştırma ön çevrimsiz test kuvvet-zaman grafiği	94
Şekil 4.15. %40 Sıkıştırma ön çevrimsiz test gerilme-zaman grafiği	94
Şekil 4.16. %20 Sıkıştırma ön çevrimli test kuvvet-zaman grafiği.....	95
Şekil 4.17. %20 Sıkıştırma ön çevrimli test gerilme-zaman grafiği	95
Şekil 4.18. %40 Sıkıştırma ön çevrimli test kuvvet-zaman grafiği.....	96
Şekil 4.19. %40 Sıkıştırma ön çevrimli test gerilme-zaman grafiği	96
Şekil 4.20. Büyük ve küçük contanın gerilme gevşeme testi.....	97
Şekil 4.21. %20 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği	98
Şekil 4.22. %40 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği	98
Şekil 4.23. %20 sıkıştırılan küçük contanın kuvvet-zaman grafiği	99
Şekil 4.24. %40 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği	99
Şekil 4.25. Kullanılan kaşık test numunesi çeneler arasında kalan kısmın modeli.....	101
Şekil 4.26. Test numunesinin 20 çevrim sonrası boyu	102
Şekil 4.27. Kullanılan kaşık test numunesi ön yüklemdeki boyut değişimi.....	102
Şekil 4.28. Kaşık test numunesinin gerilme-şekil değişimi grafiği	103
Şekil 4.29. Malzeme modelleri ve test verisinin gerilme-şekil değişimi grafiği	105
Şekil 4.30. Marlow modeli ve test verisinin gerilme-şekil değişimi grafiği.....	105
Şekil 4.31. Elde edilen viskoelastik model ve gerilme gevşeme test verisi grafiği	106
Şekil 4.32. Kullanılan kaşık test numunesi sınır şartları.....	107
Şekil 4.33. Kullanılan kaşık test numunesi sonlu elemanlar modeli	107
Şekil 4.34. Numune üzerinde analiz sonucu bulunan gerilme dağılımı.....	108

Şekil 4.35. Test sonucu elde edilen rijitlik eğrisi	109
Şekil 4.36. Analiz sonucu elde edilen rijitlik eğrisi	110
Şekil 4.37. Analiz ve test sonucu elde edilen rijitlik eğrileri	110
Şekil 4.38. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi	111
Şekil 4.39. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi.....	111
Şekil 4.40. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri	112
Şekil 4.41. Kullanılan basma test numunesi CAD modeli ve plakalarla montajı.....	112
Şekil 4.42. Basma numunesinin gerilme-şekil değişimi grafiği	113
Şekil 4.43. Malzeme modelleri ve gerilme-şekil değişimi grafiği	114
Şekil 4.44. Kararlı malzeme model eğrileri	115
Şekil 4.45. Ogden N=1 malzeme modeli ve test verisi uyumu.....	115
Şekil 4.46. Basma testi normalize gerilme-şekil değişimi grafiği	116
Şekil 4.47. Viskoelastik malzeme test ve model eğrileri	117
Şekil 4.48. Kullanılan basma test numunesi sınır şartları	117
Şekil 4.49. Sonlu elemanlar için yapılan temas tanımlamaları	117
Şekil 4.50. Kullanılan kaşık test numunesi sonlu elemanlar modeli	118
Şekil 4.51. Sıkışma öncesi ve sonrasındaki basma numunesi.....	118
Şekil 4.52. Test sonucu elde edilen rijitlik eğrisi	119
Şekil 4.53. Analiz sonucu elde edilen rijitlik eğrisi	119
Şekil 4.54. Analiz ve test sonucu elde edilen rijitlik eğrileri	119
Şekil 4.55. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi.....	120
Şekil 4.56. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi	120
Şekil 4.57. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri	121
Şekil 4.58. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi.....	121
Şekil 4.59. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi	122
Şekil 4.60. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri	122
Şekil 4.61. Büyük ve küçük conta.....	123
Şekil 4.62. Büyük ve küçük conta katı modeli.....	123
Şekil 4.63. Büyük conta sınır şartları	124
Şekil 4.64. Küçük conta sınır şartları	124
Şekil 4.65. Büyük conta sonlu elemanlar için yapılan temas tanımlamaları	125
Şekil 4.66. Küçük conta üst ve alt yüzey temas tanımlamaları.....	125
Şekil 4.67. Büyük conta sonlu elemanlar model.....	126
Şekil 4.68. Küçük conta sonlu elemanlar modeli.....	126

Şekil 4.69. Büyük conta analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği	127
Şekil 4.70. Büyük conta test sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği	128
Şekil 4.71. Büyük conta gerilme gevşeme eğrileri	128
Şekil 4.72. Büyük contanın temas basıncı azalması	129
Şekil 4.73. Küçük conta test sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği	131
Şekil 4.74. Küçük conta analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği	131
Şekil 4.75. Küçük conta gerilme - gevşeme eğrileri	132
Şekil 4.76. Küçük contada temas basıncı azalması.....	133
Şekil 4.77. Dairesel conta kullanımında oluşan dönme	134
Şekil 4.78. X kesitli conta	135
Şekil 4.79. X contası model ölçüleri	135
Şekil 4.80. Şekil optimizasyonu parametresi (R).....	136
Şekil 4.81. Parametrik X kesit, daire kesit,kare kesit geometrileri	137
Şekil 4.82. R=1 mm modelinin X kesit katı modeli.....	138
Şekil 4.83. R=1 mm modelinin X kesit katı modeli ve plakaların montaj görünümü ..	138
Şekil 4.84. R=1 mm modelinin hiperelastik modellenmesi	139
Şekil 4.85. R=1 mm modelinin viskoelastik modellenmesi.....	139
Şekil 4.86. R=1 mm modelinin sınır şartları	140
Şekil 4.87. R=1 mm modelinin temas tanımları	140
Şekil 4.88. R=1 mm sonlu elemanlar modeli.....	141
Şekil 4.89. R0.75mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	142
Şekil 4.90. R0.75 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	142
Şekil 4.91. R1mm(a) ve R0.75mm(b) modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	143
Şekil 4.92. R1 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	143
Şekil 4.93. R1.25 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	144
Şekil 4.94. R1.25 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	144
Şekil 4.95. R1.5 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	144
Şekil 4.96. R1.5 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	145
Şekil 4.97. R1.75 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	145
Şekil 4.98. R1.75 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	146
Şekil 4.99. R2 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	146
Şekil 4.100. R2 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	146
Şekil 4.101. Kare modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı.....	147
Şekil 4.102. Kare modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	147

Şekil 4.103. Daire modelinin $t=3600$ s 'deki gerilme dağılımı.....	147
Şekil 4.104. Daire modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği.....	148
Şekil 4.105. $R1=1$ mm $R2=1.5$ mm için temas basıncı dağılımı	149
Şekil 4.106. $R1=1$ mm için temas basıncı değişimi	150
Şekil 4.107. $R1=1.5$ mm $R2=1.5$ mm için temas basıncı dağılımı	150
Şekil 4.108. $R1=1.5$ mm için temas basıncı değişimi	151
Şekil 4.109. $R1=2$ mm $R2= 1.5$ mm için temas basıncı dağılımı	151
Şekil 4.110. $R1=2$ mm için temas basıncı değişimi	152
Şekil 4.111. X Conta Tasarımındaki $R1$ ve $R2$ değerleri.....	152



ÇİZELGELER DİZİNİ

sayfa

Çizelge 2.1. Lastik üretiminde tercih edilen fırın siyahları.....	18
Çizelge 2.2. Kauçukların temel özellikleri.....	21
Çizelge 2.3. Kauçuk malzemelerin ASTM D2000 standartlarına göre tip ve sınıfları ...	33
Çizelge 3.1. TS ISO 37 Standartlarına göre kaşık test numunesinin ölçüleri	71
Çizelge 3.2. Bu çalışmada kullanılan contalardan istenen teknik özellikler.....	80
Çizelge.4.1. Kaşık numunesinin 20 çevrimli histerezis değerleri	83
Çizelge.4.2. Ön çevrimsiz testte kauçuk kaşık numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri	83
Çizelge.4.3. Ön çevrimli testte kauçuk kaşık numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri	84
Çizelge.4.4. Basma numunesinin %20 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz değerleri ...	87
Çizelge.4.5. Basma numunesinin %40 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz değerleri ...	89
Çizelge.4.6. %20 sıkıştırmada ön çevrimsiz testte kauçuk basma numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri.....	91
Çizelge.4.7. %40 sıkıştırmada ön çevrimsiz testte kauçuk basma numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri.....	91
Çizelge.4.8. %20 sıkıştırmada ön çevrimli (20 kez) testte kauçuk basma numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri	91
Çizelge.4.9. %40 sıkıştırmada ön çevrimli (20 kez) testte kauçuk basma numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri	91
Çizelge.4.10. %20 (3.2 mm) sıkıştırılan büyük conta gerilme gevşeme testinde kuvvet, zaman değerleri.....	96
Çizelge.4.11. %40 (6.4 mm) sıkıştırılan büyük conta gerilme gevşeme testinde kuvvet, zaman değerleri.....	96
Çizelge 4.12. Analizde kullanılan gerilme-şekil değişimi değerleri	102
Çizelge 4.13. Elde edilen prony katsayısı değerleri.....	105
Çizelge 4.14. Elde edilen Prony katsayıları	115
Çizelge 4.15. Büyük conta analiz sonucunda bulunan kuvvet-zaman değerleri.....	126
Çizelge 4.16. Küçük conta analiz sonucunda bulunan kuvvet-zaman değerleri.....	129
Çizelge 4.17. Tüm modellerin analiz sonucu Fmax, Fmin, %Gevşeme değerleri.....	147
Çizelge 4.18. X Conta Tasarım Parametreleri	152

Çizelge 4.19. Eğri Uydurma Doğrulama (V).....	153
Çizelge 4.20. Eğri Uydurma Doğrulama (Pmax).....	153



1. GİRİŞ

Metalik olmayan otomotiv malzemelerinden en önemlilerinden birisi olan kauçuktan imal edilmiş ürünler otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Bu ürünler genellikle rijit bağlantı noktalarında, süspansiyon bağlantılarında, kapı fitillerinde, tekerleklerde, motor ile araç şasisinin bağlantı noktalarında kullanılmaktadır. Bu ürünlerin kullanımının amaçlarından en önemlileri; çeşitli titreşim kaynaklarından gelen titreşimlerin sönümlenmesi, bağlantı noktalarında belirli bir elastikiyet sağlanması ve bu davranışlarını istenen ömür boyunca devam ettirmeleri olarak sayılabilir.

Kauçuk ürünlerin modellenmesi ve tasarımlarının doğrulanması istenen özelliklerde ürün elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Kauçuğun farklı formülizasyonları türetilerek istenilen özelliklerde sentetik kauçuklar üretilebilir. Elastiki özellikleri, aşınmaya dayanıklılığı, elektrik yalıtkanlığı ve su geçirmezlik gibi özellikleri kauçuğu modern endüstrinin gözbebeği hammaddelerinden biri haline getirmiştir. Kauçuk kullanımının en yoğun görüldüğü alan araç lastikleri olsa da, araçların süspansiyon sistemlerinde, bağlantı hortumlarında, contalarda, motor ve yürüyen aksam bağlantı noktalarında, sileceklerde ve paspaslarda bol miktarda kauçuk kullanımı görülmektedir.

Kauçuk malzemeden imal edilen sızdırmazlık elemanlarının zaman içinde görevlerini yerine getirmeleri beklenir. Ancak kauçuk malzemeler gerilme-gevşemesi nedeniyle özelliklerini kaybederler. Kauçuk malzemelerden imal edilen ürünlerin özelliklerinin zaman içinde nasıl değiştiğinin modellenmesi ile ürün ömürleri belirlenebilir.

Bu çalışmada, seçilen bir sızdırmazlık elemanının zaman alanında viskoelastik modelleme ile gerilme-gevşeme analizleri gerçekleştirilmiştir. Modellenen sızdırmazlık elemanı yağın dışarıya çıkmasını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak zamanla kauçuğun özelliklerini kaybetmesi beklenen bir sonuçtur. Bu sürecin modellenmesi ile daha tasarım aşamasında ürünün istenen sızdırmazlığı ne kadar süre içinde sağlayabileceği hesaplanabilir.

Bu çalışmada 70+5 Shore A Sertlik değerine sahip NBR- Nitril Bütadien Kauçuk parçalar üzerinde çalışılmıştır. Kaşık test numunesi ve basma test numunesi üzerinde tek eksenli çekme testleri ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan test sonuçları

kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile hiperelastik ve viskoelastik analizler yapılarak malzeme modeli belirlenmiştir. Prony katsayıları hesaplanarak gerilme - gevşeme grafikleri elde edilmiştir. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme grafiklerinin korelasyonu sağlanmıştır.

Ürün olarak seçilen büyük ve küçük contalar üzerinde sıkıştırma gerçekleştirilerek gerilme gevşeme testleri ve gerilme gevşeme analizleri yapılmıştır. Test sonuçları ile analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır. Parçaların gerilme gevşeme oranları tespit edilmiştir.

8 farklı conta tasarımı yapılmış ve tasarlanan bu contaların gerilme gevşeme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda tüm contaların aynı oranda gevşediği tespit edilmiştir.

7 mm x 7 mm kesit alanı içerisinde olacak şekilde 9 farklı X kesitli conta tasarlanmıştır. Bu contalar için minimum hacime sahip belirli bir maksimum basınca dayanıklı olan en ideal tasarım, deney tasarımı ve şekil optimizasyonu ile belirlenmiştir.

Contaların hiperelastik ve zaman alanında viskoelastik modellenmesi yapılmış, sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme-gevşeme analizi gerçekleştirilmiştir. Ürün üzerine uygulanan kuvvet sonucu oluşan temas gerilmesinin zaman içerisinde azaldığı tespit edilmiştir.

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Kaynak Araştırması

Rey ve ark.(2013), sıcaklığın silikon kauçukların mekanik özelliğine etkisini incelemişlerdir. Kristalleşme ve erime sıcaklıklarının tespitinde DFC (Diferansiyel tarama kalorimetresi) kullanmışlardır. Farklı sıcaklıklar altında doldurulmuş ve doldurulmamış silikon kauçuk numunelerinin histeri, gerilme- gevşeme ve gerilme – yumuşama grafiklerini elde etmişlerdir. Bunun sonucunda gerilme gevşemesi değerlerinin sıcaklığın artması ile azaldığını tespit etmişlerdir.

Rosen ve ark. (1993), gergin kauçuk lastiğin gerilme gevşemesi esnasındaki serbest titreşimini incelemişlerdir. Zaman arttıkça eksenel kuvvetin azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda gerilme gevşeme esnasında yüksek gerinim oranları elde edilmiştir.

Yamaguchi ve ark. (2015), çapraz bağlanmamış, doldurulmamış doğal kauçuğun orta şiddette gerilmeye maruz kaldığı durumdaki gerilme gevşemesi, sürünme davranışlarını incelemişlerdir. Boltzman süper pozisyon ilkesinden faydalanarak kauçuk numunenin %24 ile %200 uzama miktarlarındaki sürünme ve geri kazanım davranışları değerlendirilmiştir.

Le ve ark. (2009), karbon karası doldurulmuş kauçuk kompozitlerin gerilme gevşeme davranışlarını incelemişlerdir. Karbon karası ilavesi ile kompozitlerin zaman ve sıcaklığa bağlı mekanik davranışının ve mekanik özelliklerinin değişebildiğini tespit etmişlerdir.

Wang ve ark. (2009), sıkışma gevşeme durumundaki gerilmeyi ölçen kablosuz ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde karbon karası dolgulu silikon kauçuk sensorler kullanmışlardır.

Vaidyanathan ve ark. (2014), diş hekimliğinde kullanılan malzemelerin gerilme gevşeme analizini yapmışlardır. İmplant yerleştirilmesini müteakip geçici kuron uygulaması yapma işlemine “temporizasyon” denilmektedir. Sürünme ve gerilme gevşeme çalışmaları, temporizasyondaki polimerik malzemelerin sertlik derecesini ve boyutsal stabilitesini optimize etmek için önemlidir. Çok sayıda temporizasyon

materyali piyasada mevcuttur, fakat bunlar genel olarak iki tipe ayrılır: toz-sıvı akrilik reçineler ve kompozitler reçineleri. Vaidyanathan ve Ark., akrilik reçineler ve bis-akril kompozit reçineler üzerinde çalışmışlardır. Sabit gerinim altında moleküler gevşemeden kaynaklanan zamana bağlı gerilme gevşeme verileri, sistematik olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. Farklı malzemelerin gerilme gevşeme davranışlarında önemli farklar olduğunu tespit etmişlerdir. Bu davranış, malzemelerin klinik uygulamalar sırasındaki dayanıklılıklarında oldukça önemlidir. Sabit gerinim altında Poli (etil) metakrilat (PEMA) reçinelerinin, poli (metil) metakrilat (PMMA) moleküllerine ve bis-akril kompozitlerine göre daha çok gevşediğini tespit etmişlerdir. Sabit gerinim altında PMMA ve kompozit reçinelerin PEMA reçinesinden daha üstün olduğunu ve moleküler gevşemeden kaynaklı iç gerilimin PEMA'da bozulmaya sebep olabileceğini belirtmişlerdir.

Zhao ve ark. (2015), Nitril Kauçuk' un gerilme gevşeme davranışında termo-oksidasyonun etkisini incelemişlerdir. Nitril Kauçuk (NBR)' un gerilme gevşemesi, %4 ve %25 uzama oranlarında, havada ve azotlu ortamda, yüksek sıcaklıklarda (125 ° C ve 165 ° C) gerçekleştirilmiştir. Gerilme gevşemesine atmosferin etkisini ve sıcaklık etkisini incelemişlerdir. Gevşeme sonrası gerilme artışı ("rebound") havada gözlemlendiğini fakat N₂ ortamında görülmediğini tespit etmişlerdir. Bu davranışı anlamak için kimyasal yapı, çapraz bağlanma yoğunluğu ve sertlik araştırmaları yapılmıştır.

Mitra ve ark. (2006) sabit gerilme altında çapraz bağlanmış kauçuğun kimyasal bozunumunun izlenmesi için yeni bir test yöntemi geliştirmişlerdir. Sülfür ile vulkanize edilmiş EPDM kauçuğunu havada ve %50 sulu nitrik asit çözeltisi(HNO₃) içerisinde %50 uzamadaki gerilme gevşemesini incelemişlerdir. Özel bir deney düzeneği tasarlamışlar ve çekme deneyi numunesini bu düzende %50 uzatarak değişen gerilme değerlerini kaydetmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda gerilme gevşeme testinde kimyasala maruz kalan numunenin daha çabuk gevşeyerek bozulduğunu tespit etmişlerdir.

Patel ve ark. (2004) Köpüklü polisiloksan kauçuk numunelerinin gerilme gevşeme çalışmalarını, termomekanik bir analizör (TMA) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Farklı derecelerde %25 uzama oranındaki gerilme değerlerini incelemişlerdir. Veriler, zaman-sıcaklık süperpozisyonu ilkesi ve deneysel sonuçlar ile elde edilmiştir. 21° C ve 100° C

arasındaki gerilme gevşeme izotermelerinin birinci ve ikinci dereceden hız denklemlerinde çok fazla korelasyon göstermediğini fakat 120 ° C ve 175 ° C arasındaki yüksek sıcaklıktaki gerilme gevşeme izotermelerinin ikinci dereceden kinetiklere uygun olduğu tespit edilmiştir.

Ehabe ve ark. (2005) Doğal kauçukta Mooney viskozite gevşemesini modellemişlerdir. Doğal poliizopren ve iki sentetik poliizoprenin 12 model örneği Mooney tork gevşemesi açısından standart ISO289 metodu kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu çalışmanın amacı deneysel verilere daha iyi uyum sağlayan bir modeli tanımlamaktır.

Fernandes ve ark. (2014) zamana bağlı deneyler yardımıyla kauçuğun gevşemesinde deformasyon kayıtlarının rolünü incelemişlerdir. Bu çalışmada karbon siyahı dolgulu EPDM kauçuğu tek eksenli çekme testinde farklı yükleme boşaltma deformasyona maruz bırakılmıştır. Farklı yükleme boşaltma durumlarında gerilimin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Tek eksenli yüklemelerde gerilme gevşemesi uzama oranları ile büyük ölçüde ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Fazekas B. ve ark.(2018) Polimer köpüklerin ve kauçuk benzeri malzemelerin hiper viskoelastik model parametrelerinin doğruluğu üzerinde çalışma yapmışlardır.

Hajikarimi ve ark. (2018).Gerilmeye bağlı doğrusal olmayan viskoelastik modelin tanıtılması konusunda çalışmışlardır. Viskoelastik davranışı belirlemek için sürünme testleri gerçekleştirmişlerdir.

Li ve ark. (2014) tek eksenli metal matris kompozitlerinde iki eksenli çapraz yük altında arayüz difüzyonuna bağlı sürünme ve gerilme gevşemesi için analitik çözümler geliştirmişlerdir.

Maria ve ark. (2012) montmorillonit dolgulu doğal kauçuk / nitril kauçuk nanokompozitlerinin gerilme gevşeme davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada Kohlrausch denklemi ve Maxwell-Weichert modeli kullanılmıştır ve deneylerde bulunan eğriler bu iki teorik model ile uyumlu bulunmuştur. Kauçuktaki dolgu miktarının gevşemeyle ilgili olduğu tespit edilmiştir. Dolgu miktarının artması durumunda gerilme gevşeme oranının arttığı gözlenmiştir. Deneysel bulgulardan elde edilen değerler ile teorik değerler uyum sağlamıştır.

Mostafa ve ark. (2008) Karbon karası dolgusunun SBR ve NBR kauçuğundaki sürünme ve gerilme gevşeme davranışlarına etkisini araştırmışlardır.%100 uzama durumundaki gerilme gevşeme davranışını ve üç farklı gerilme değerinde sürünme davranışını incelemiştir. Karbon karası yüklemesi arttıkça sürünme direncinin arttığını tespit etmişlerdir. SBR ve NBR kauçuğuna farklı miktarda karbon karası ilave edilmiştir. Karbon karası miktarı fazla olan kauçuğun ilk gerilme değerinin fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Karbon karası fazla olan kauçuğun karbon karası az olan kauçuğa göre gevşeme miktarı daha fazladır.

2.2. Kauçuk Tarihçesi ve Kauçuk Malzemelerin Kullanım Alanları

Christopher Columbus'un Amerika'ya yaptığı ikinci sefer notlarında, şimdiki Haiti'nin yer aldığı bölgede yerlilerin kauçuktan bir top ile oynadığından bahsedilir. Kauçuğun Avrupa'daki kayıtları ise 1530 yılında İtalyan Pietro Martire d'Anghiera tarafından yazılmış notlardaki "gummi optimum" ifadesidir.

Amerikanın keşfinden sonra bölgeye giden ilk ziyaretçilerin kauçukla tanışması yine Aztekler'in gösterilerindeki toplarla oldu. Burada kauçuğun suya dayanıklı kıyafetlerde kullanımı da ilk defa görüldü. 16.yüzyıldan 18. Yüzyıla kadar Avrupa literatüründe kauçuktan oldukça az bahsedildi. 1735 yılında Fransız akademisi adına Charles Marie Condamine Güney Amerika'ya bir sefer başlattı ve ağlayan ağaç benzetmesi yaptıkları kauçuk örneklerini gönderdi.

1747'de ise Cayenne'de yaşayan bir başka Fransız Fresneau, yerlilerde gördüğü kauçuk ürünlerin kaynağını aramak için Guiana ormanlarını araştırdı ve bu araştırma sırasında Hevea braziliensis olarak bilinen lateks üreten ağaçları keşfetti (Şekil 2. 1.).



Şekil 2. 1. Kauçuk ham maddesinin elde edilmesi (<https://www.bilgitimi.com/kaucuk-nedir-nasil-yapilir-nerelerde-kullanilir.html> ,2018.)

1770 yılında Joseph Priestly kurşun kalem izlerinin kauçukla ovalanması ile silindiğini fark ederek 'silgi'yi buldu. (Bauman 2008)

İlk keşiften yüzyıllar sonra bile kauçuğun kullanım alanları su geçirmez kumaşlar ve silgiden daha ileriye gidememişti. Vulkanize edilmemiş kauçuk şeklini koruyamaz ve ısındığında yapışkan özellikte bulunur. 1839 yılında Charles Goodyear kauçuğu kükürt ile karıştırdıktan sonra ısıtıldığında yapışkanlık özelliğini kaybettiğini ve üzerine uygulanan kuvvet ortadan kalktığında tekrar eski haline döndüğünü keşfetti. Bu keşif kauçuğun daha yaygın bir şekilde kullanımının kapısını araladı.

Goodyear'ın keşfinden sonra yüzyılı aşkın bir süre boyunca, tüm kauçuk ürünler kükürt ile vulkanize edilerek üretildi. 20. yüzyılda insan yapımı sentetik ham kauçuklar geliştirildi. Düşük molekül ağırlıklı monomerlerin uzun zincirli polimerler oluşturmak için reaksiyona girmesi ile hazırlanan ürünler yüksek miktarlarda üretilmeye başlandı. Doğal kauçuk ve birlikte anılan sentetikler, elastik polimerden türetilen 'Elastomer' adıyla anılmaya başlandı.

Kauçuğun mekanik özelliklerini iyileştiren karbon siyahının 1900'lü yılların başına kadar kauçuk üzerindeki güçlendirici etkisi keşfedilemedi. Elastomerin sağlamlığını önemli ölçüde artıran bu keşfin ardından özellikle lastik üreticileri büyük bir ilerleme kaydetmiş oldu. Günümüzde neredeyse tüm doğal kauçuk ürünler karbon siyahı ile takviye edilmektedir.

Kauçuk 'Hevea brasiliensis' yani lateks ağacının kabuğunda yapılan kesiklerden toplanır. Malezya, Endonezya gibi tropikal ülkelerde yetişen ağacın gövdesine yapılan kesikler ağacın süt halinde kauçuk üretmesine neden olur. Bu aşamada hala ham kauçuktur ve pratik olarak az kullanılır. Yük altında akışkandır ve deforme olur. Sıfır derecenin altında kristalleşirken sıcak havalarda yumuşak ve yapışkan bir formdadır.

Çoğu doğal kauçuk lateksi bugün Tayland ve Güneydoğu Asya'da üretilmektedir. 2007 yılında, dünya genelinde 9.9 milyon metrik ton doğal kauçuk üretildi. Bu tonajın yaklaşık dörtte üçü lastik üretiminde kullanıldı.

Metalik olmayan otomotiv malzemelerinden en önemlilerinden birisi olan kauçuktan imal edilmiş ürünler otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Motor ile araç

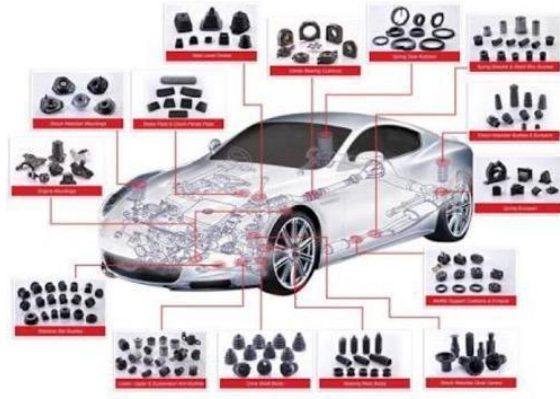
şasisinin bağlantı noktalarında, rijit bağlantı noktalarında, süspansiyon bağlantılarında, kapı fitillerinde, tekerleklerde kauçuk ürünler tercih edilmektedir. Bu ürünlerin kullanımının amaçlarından en önemlileri; çeşitli titreşim kaynaklarından gelen titreşimlerin sönümlenmesi, bağlantı noktalarında belirli bir elastikiyet sağlanması ve bu davranışlarını istenen ömür boyunca devam ettirmeleri olarak sayılabilir.



Şekil 2. 2. Kauçuk ürünler (<http://www.malcorp.net/our-products/rubber-automotive-parts/>, 2018).

Kauçuk, endüstride çok geniş kullanım alanına sahiptir. Titreşim, gürültü ve şok engelleyici olarak otomotiv sektöründe tamponda, amortisörlerde, motor ve makine takozlarında, burçlarda, konveyör bantlarda kullanılmaktadır. Ayrıca sileceklerde, fitillerde, kayar kapı durdurucularında, hortumlarda, körüklerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe contalar, köpükler, cam silecekleri, paspaslarda kullanılan kauçuğun en çok kullanıldığı alan ise araç lastikleridir. (Şekil 2. 2.)Yıllık toplam kauçuk üretiminin yüzde 56'sından fazlası araç lastiği üretiminde kullanılır.

Kauçuk malzemesinin diğer kullanım alanları şöyledir: Ayakkabı tabanları, kablolar, yer döşemeleri, kayışlar, tıbbi ve endüstriyel eldivenler demiryolu destekleri, diyaframlar, membranlar, yapışkan imalatı, sünger imalatı, sağlık ürünleri, gıda sanayi contaları, ebonit malzemeler, eldiven, bebek emzikleri, balonlar, çeşitli yapıstırıcı türleri.



Şekil 2. 3. Otomotivde kullanılan kauçuk parçalar

(<https://dir.indiamart.com/rajkot/automotive-rubber-parts.html>, 2018)

Koşu parkurları, atletizm pistleri, tenis kortları, basketbol ve voleybol sahalarında yüksek darbe emiciliği nedeniyle sporcu yaralanmalarını minimuma indirmesinden dolayı kauçuk yer kaplamaları tercih edilmektedir. (Şekil 2. 4)

Kauçuk; su geçirmezlik, aşınmaya dayanıklılık, elektrik yalıtkanlığı gibi özelliklerinden dolayı endüstrinin olmazsa olmaz hammaddelerinden biri haline gelmiştir.



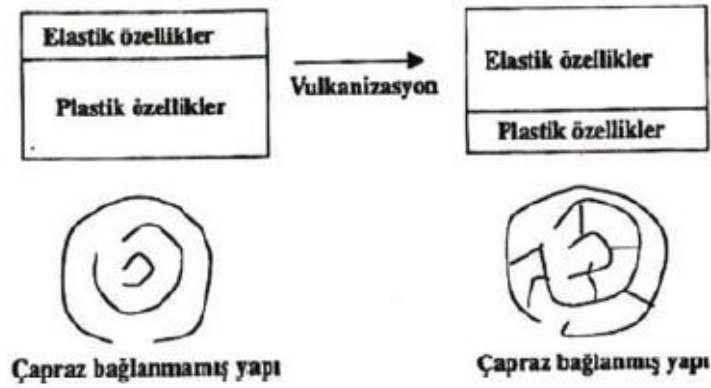
Şekil 2. 4. Kauçuk yer kaplamaları (<http://www.epdmkauçukgranul.com/tr/sayfa/4-kullanim-alanlari> , 2018).

2.3. Kauçuk Molekül Yapısı ve Vulkanizasyon

Termoplastik elastomer grubunda bulunan kauçuk türü malzemeler, 1839 yılında vulkanizasyon işleminin bulunmasıyla Termoset Elastomer olarak tanımlanmıştır (Rosen ve ark. 1993)

birbirlerinden ayırt edildiklerinde stereo-izomerler denir. Böylece, poliizopren iki izomer, cis-poliizopren ve trans-poliizoprene sahiptir.

Straudinger'in kauçuğu makro molekül olarak açıklaması sonrasında, doğal kauçuk sentezleme veya değiştirme çalışmaları yoğun bir şekilde başladı. 1929 yılında Thiokol A, ticari olarak üretilen ilk sentetik kauçuk olmuştur. 1920 ve 1930'ların sonlarında özellikle Almanya ve ABD'deki şirketler kauçuk benzeri bileşikler geliştirmeye başladı. Almanya'da Farben tarafından üretilen nitril (NBR) ve Standard Oil tarafından üretilen Butil kauçuk (IIR) II. Dünya Savaşı sırasında bu yarışa katıldı. Doğal kauçuğun büyük kısmının üretildiği Güney Doğu Asya ile lojistik anlamında sıkıntılar yaşanıyordu. Bu yüzden sentetik kauçuk malzemelerine ihtiyaç duyuldu. Savaşın sonra, elde edilen tecrübelerden esinlenerek yeni keşifler ve gelişmeler devam etti. (Bauman 2008)



Şekil 2. 6. Vulkanizasyon öncesi ve sonrasındaki polimer yapısı (Savran 2001)

“Vulkanize olmamış lastik yüksek çevre sıcaklıklarında yumuşamaz ve düşük çevre sıcaklıklarında sertleşmeden zarar görür. Bu problemin üstesinden gelmek için çok çeşitli kimyasal işlemler denenmiştir.1839 yılında Charles Goodyear kazara “S” kaplı lastiği ısıtma ile vulkanizasyon olayını keşfetti. Isıtma ve soğutma durumunda lastiğin özelliğinin sabit kaldığını gördü. Çünkü lastik vulkanizasyon ile çapraz bağlantı yapmaktaydı.”(<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>, 2018).

Vulkanizasyon(çapraz bağlanma reaksiyonu), kauçuğun kimyasal yapı değişikliğine uğraması işlemidir. Bu işlem ile kauçuk, geri dönüşümsüz olarak elastik özelliklere sahip duruma getirilir. Kauçuklar vulkanize olabilen polimerlerdir. Çapraz bağlanmamış, ama çapraz bağlanabilme özelliğine sahiplerdir. Kauçuk, deforme edecek

kadar kuvvet altında ve yüksek sıcaklıkta koyu kıvamda bir akışkandır. Kauçuk vulkanize edilmeden önce plastik özellik gösterirken vulkanizasyon işleminden sonra elastik özellik gösterir.

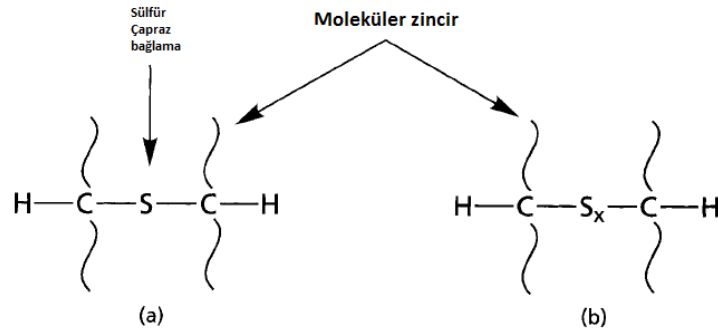
Kauçuk karışımının ısıtılmasıyla, vulkanizasyon veya kürleme adı verilen bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Vulkanizasyon, zincirlerin bir ağı oluşturmak üzere kimyasal olarak birbirine yapıştırılması ve böylece elastomerik sıvının elastik bir katıya dönüştürülmesi işlemidir. Bu kimyasal bağlar ve bunları oluşturan atomlara çapraz bağlar denir. Bu süreçte, zincir molekülleri, bu çapraz bağlantılar vasıtasıyla uzunluklarının çeşitli yerlerinde bir araya getirilir.

Çapraz bağlar genellikle birbirinden uzak olurlar ve arasında yüzlerce karbonu barındırabilirler ve bunun etkisi olarak malzeme özellikleri önemli ölçüde değişebilir. Kauçuğa elastik özelliklerini çapraz bağlanma verir. Elastomerlerin çoğunda, çapraz bağlama atomu kükürttür. Kauçukların yapısı genellikle kükürt çapraz bağlama ile vulkanize edilerek geliştirilir. Plastik durumdaki kauçuk hamurunun, elastik hale geçmesi işlemine vulkanizasyon denir.

Vulkanizasyon (veya kürleme) işlemi genel olarak metal kalıplarda en az 140 ° C'lik bir sıcaklıkta basınç altında gerçekleştirilir ve kullanılan vulkanizasyon sisteminin türüne bağlı olarak birkaç dakika veya birkaç saat sürebilir.

Peroksitler, elastomerler için başka bir kürleme maddesi türüdür. Kükürt kürlenmesinin aksine, peroksit vulkanizasyonu için çift bağlar gerekli değildir ve bu nedenle doymuş kauçukları çapraz bağlamak için kullanılabilirler. Peroksit kürü, karbon-karbon çapraz bağlanmasını sağlar. Bu bağ da oldukça kararlıdır ve yaşlanmaya ve sıkıştırmaya karşı koyma direncine neden olur.

Peroksitle sertleştirilmiş elastomerler şunları içerir: etilen-propilen: poli (etilen-ko-propilen-ko-dien) (EPDM) ve silikon: polidimetilsiloksan (Q).Polikloropren gibi bazı elastomerler metal oksitlerle sertleştirilebilir.

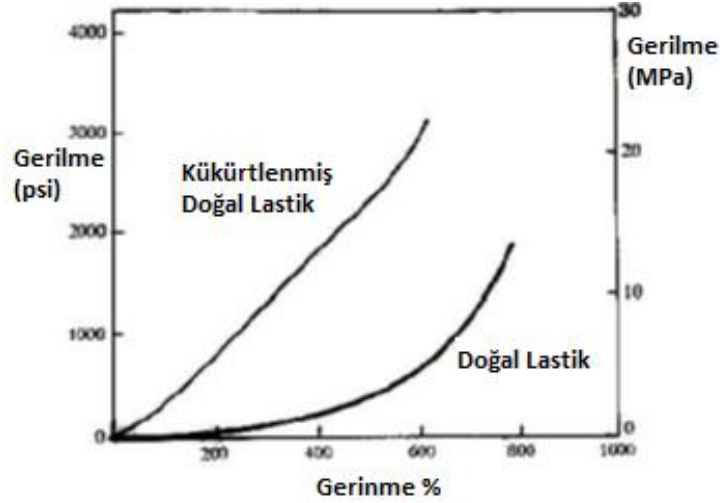


Şekil 2. 7. Vulkanizasyon mekanizması (Ciesielski 1999)

Çağraz bağlama elastomerik davranış için gereklidir. Çapraz bağlama tekrarlanabilen bir işlemdir ve yüksek sıcaklıklarda genelde 'S' bileşikleriyle kimyasal yolla elde edilen bir uygulamadır. 'S' ve 'C' atomları çift bağlanarak köprü şeklinde çapraz bağlantılar oluşturur.

Vulkanize olmamış kauçuk; yapışkan, yumuşak, düşük mukavemete sahip, ısıdan etkilenen, yüksek kalıcı deformasyona sahip, çözünebilen ve termoplastik özelliklere sahip bir malzemedir. Vulkanize olmuş kauçuk ise yapışkan olmayan, sert, yüksek mukavemete sahip, ısıdan az etkilenen, düşük kalıcı deformasyona sahip, çözünmeyen veya az çözünen yapıda, elastik özelliklere sahip özelliktedir.

Vulkanizasyonda katkı maddelerinin miktarı, cinsi, aktivitesine bağlı olarak çapraz bağlanma özelliği farklılık gösterebilir. Vulkanize olmuş kauçuğun özellikleri vulkanizasyon derecesine, çapraz bağlanma yoğunluğuna ve çapraz bağlanma şekline bağlıdır (Erkek 2007).



Şekil 2. 8. Vulkanizasyonun gerilme-gerinme eğrilerine etkisi (Kınıkoğlu 2006)

Şekil 2. 8' de vulkanizasyonun gerilme-gerinme değerlerine etkisi görülmektedir. Vulkanizasyon işlemi esnasında gerçekleşen çapraz bağlanma öncesi ve sonrasındaki durumlar için gerilme-gerinme eğrileri görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi, vulkanizasyon işlemi esnasında kükürt atomlarının çapraz bağlanmalarıyla malzeme rijitliği, çekme dayanımı artmıştır.

2.4. Kauçuğa İlave Edilen Katkı Maddeleri

Yıllar geçtikçe kauçuğu ucuzlaştırmak ve sertleştirmek için çok sayıda malzeme eklenmiştir. Karbon karasının ve Silis' in kauçuğun güçlendirilmesinde en iyi iki katkı maddesi olduğu ortaya çıkmıştır. Karbon siyahı, petrol veya gazın tam yanmasıyla hazırlanır. Çapı sadece 10 ila 100 nanometre olan kaynaşmış minik küresel parçacıkların agregalarından oluşur. Agregalar en fazla 100 ila 500 nanometre boyutlarında olabilir.

Ayrıştırılmış silis (silikon dioksit), silikon tetraklorürü yakarak veya bir sodyum silikat çözeltisinden asit çöktürerek hazırlanır. Agregaların büyüklüğü karbon karası ile aynıdır.

Kauçuk reçetelerinde dolgu maddesi miktarı, kilo başına kilo dolgu maddesi cinsinden ölçülür. Formül yüzde pound olarak ifade edilir, kısaltılmışı phd.

Yaklaşık olarak 30 phd'de bir karışıma ilave edildiğinde, dolgu maddesi elastik modülü iki ila üç faktör oranında artıracaktır. Aynı zamanda tokluğu ve aşınmaya karşı direnci

büyük ölçüde artıracaktır. Literatürde pek çok teori olmasına rağmen, mekanik özelliklerdeki iyileşmelerin kesin fiziksel mekanizması anlaşılamamıştır.

Kauçuk karışımında kullanılabilen maddeler şöyledir; Elastomerler (doğal-sentetik), geciktiriciler, vulkanizasyon ajanları (kükürt, organik peroksitler, kükürt verici akseleratörler, metalik oksitler, ikincil vulkanizasyon ajanları), yumuşatıcılar, yaşlanmaya karşı koruyucular (antioksidant - antiozonatlar), inert dolgu maddeleri akseleratör aktivatörleri, akseleratörler, güçlendirici pigmentler plastikleştiriciler, yapıştırıcılar, proses yardımcıları, reçineler, özel amaçlı kullanılan maddeler (aşındırıcı, renklendiriciler, şişirici ajanlar, kokular), maliyet düşürücüler. (Annicelli ,R. ve ark.1990)

Kauçuk formülasyonunun önemli bir kısmı, kükürtün çapraz bağlanmasını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla eklenen katkı maddeleri, çapraz bağlanma reaksiyonunu hızlandıran ve daha verimli hale getiren sülfenamidler, tiuramlar ve tiyazoller gibi hızlandırıcıları içerir. Buna ek olarak, genellikle çinko oksit ve stearik asit ilave edilir. Bu bileşikler çapraz bağlanma reaksiyonunu geliştirmek için hızlandırıcılarla birlikte çalışırlar.

Kürlemeyi hızlandırmak veya iyileştirmek için bileşenlere ek olarak, çeşitli özellikleri etkilemek için ham kauçuğa ilave edilmiş birçok madde bulunmaktadır. Bunlara antidegradantlar, proses iyileştiriciler, genişleticiler ve yapışkanlaştırıcılar, üfleme ajanları veya renklendiriciler gibi özel katkı maddeleri dahildir.

2.4.1. Dolgu Maddeleri

Polimerin teknik özelliklerini geliştirmek ve son ürün maliyetini azaltmak için eklenen katı haldeki maddeler dolgu maddesi olarak tanımlanır (ASTM D 176). Lastik parçaların siyah olması istenmediği durumlarda kullanılır. Karışım maliyetini azaltma özelliği vardır.(Babapour 2013)

Lastik güçlendirmek için karbon siyahından sonra en çok silikalar kullanılır. Silikalar yalıtkan olduğu için elektirik alanındaki uygulamalarda tercih edilir. Aşındırıcı özelliğinden dolayı silika dolgu malzemelerinin işlenmesi zordur.

Diğer dolgu maddelerine örnek olarak sodyum alüminyum silikat, kaolin ve kalsiyum karbonat (tebeşir) verilebilir.

2.4.2. Kimyasal Yumuşatıcılar

Kimyasal yumuşatıcılar, kauçuk karışımında dolgu maddelerinden sonra en çok kullanılan karışımın ana bileşenlerinden biridir. İşlem kolaylaştırıcıdır. Karıştırma sıcaklığının düşmesini sağlar. Yumuşama sırasındaki serbest radikallerin geri dönüşümünü engeller. Oksidasyon hızının artmasını sağlayan bu yumuşatıcılar aynı zamanda ezilme süresini kısaltır. (Babapour 2013).

Yumuşatıcılar sayesinde kimyasallar hamur içerisinde kolayca dağılırlar. Yumuşatıcılar aynı zamanda karıştırma sıcaklığını düşürür. Dolgu maddelerinden sonra en çok kullanılan malzeme yumuşatıcılardır.

Yumuşatıcıların elastomerle uyumu, düşük ayrışma, düşük uçuculuk, vulkanizasyon sistemi ile karışma yapmaması, yağ ve yakıt dayanımını arttırması, kirlilik yapmaması ve zehirli olmaması istenir (Brydson 1988).

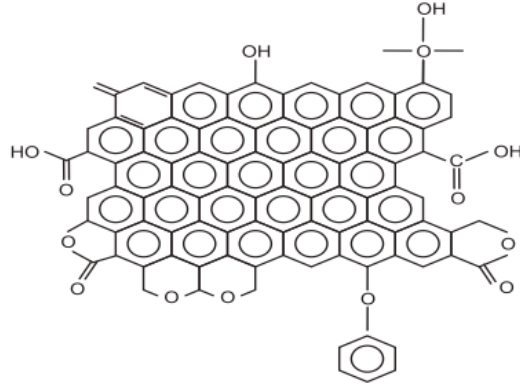
Yumuşatıcılar; doğal yağlar sentetik yağlar, petrol türevli mineral yağlar olmak üzere üçe ayrılır.

Petrol türevli mineral yağlar, en çok tercih edilen yağ çeşitidir. Birçok kauçuk türü ile uyumlu olmasının yanı sıra ucuzdur. Aromatik yağlar, parafinik yağlar gibi yağlar bu sınıftadır. Doğal yağlar ise fındık yağı, zeytinyağı, gibi bitkisel yağlar ve don yağı gibi hayvansal yağlardan oluşur. Sentetik yağlar, NBR ve CR vb. gibi kauçuklarda kullanılır. Bu kauçuklar mineral yağlar ile uyumlu olmadığı için sentetik yağlar tercih edilir. Sentetik yağların etkileri diğer yağlara göre daha fazladır fakat pahalı olmalarından dolayı pek tercih edilmemektedirler.

2.4.3. Karbon Siyahları

Yarı grafit yapıda olan karbon siyahları kauçuklarla karıştırıldığında kopma, yırtılma, aşınma dayanımını arttıran bir karbondur.

İngiltere’de 1904 yılında S.C.Mote karbon siyahlarının kuvvetlendirici dolgu maddesi olduğunu keşfetmiştir. Karbon siyahları 1910 yılından sonra çinko oksit yerine lastik üretiminde kullanılmıştır. Karbon siyahı günümüzde %70 araç lastiğinde,%20 diğer lastik ürünlerde, %10’u kauçuk olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2. 9. Zincir şeklinde bağlı karbon siyahı taneleri (Babapour 2013)

Şekil 2.9’da gösterilen karbon siyahının yapısı birbirine zincir şeklinde bağlanan karbon siyahı taneciklerinden oluşmaktadır (Edge ve ark.1999).

Karbon siyahı 1-100 nm çapındaki ince taneciklerden oluşan sıvı ve gaz hidrokarbonların yanmasıyla oluşan maddedir.Karbon siyahı kauçuğun güçlenmesini sağlar.Karbon siyahındaki tane boyutu küçük olduğunda karbon siyahının fiziksel özellikleri daha iyi olur fakat tane boyutu büyük olduğunda karışımın işlenmesi daha kolay olur (Auchter 2005).

Karbon siyahı kauçuklarda en yaygın ve en fazla kullanılan dolgu maddesidir. Aktif dolgu maddesi görevi yaparak kauçuğun mekanik özelliklerini ilerletir. Karbon siyahı ayrıca, renklendirme (siyah), UV-ışınlarından koruma ve iletkenliği artırmak amacıyla kauçuklar dışında diğer polimerlerde de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. En fazla tüketildiği alan ise %85’lik payla araç lastikleridir.

Karbon siyahı, bozunma ile elde edilen hidrokarbon buharındaki karbonun bir yüzey üzerinde toplanması ile oluşur. Karbon siyahları dört kısma ayrılır.

1) Fırın siyahı ; petrol rafinerilerindeki aromatik atıkların 1200°C-1700°C arası sıcaklıklarda aşırı hava ile yakılmasıyla üretilirler, beslemenin bir kısmı yanarken çoğu

karbon ve hidrojene parçalanır. Fırın siyahı asidiktir ve kauçukların vulkanizasyonunu yavaşlatır.

2) Kanal siyahı; doğal gazın kısmi yanması ile üretilir, kauçuklarda en fazla kullanılan karbon siyahıdır ve pahalıdır.

3) Isı siyahı; havasız ortamda 1300°C' de doğal gazın ısıl parçalanması ile üretilir. Kauçukları takviye açısından zayıftır.

4) Asetilen siyahı; asetilenden elde edilir ve iletken polimerler hazırlamada kullanılır.

Karbon siyahları biçim ve büyüklüklerine göre ayrıca üç gruba ayrılırlar. Tanecikli yapıdaki karbon siyahlarının boyutları 10-500 nm arasında değişirken, taneciklerin bir araya gelerek oluşturduğu kümeli yapıdaki karbon siyahlarının boyutları 40-600nm arasında değişir. Ayrıca kümeler küçük yığınlar halinde toplanarak boyutları farklı karbon siyahı toprakları verirler. Yüzey alanı büyük olduğu için tanecikli karbon siyahları takviye açısından en uygundur, ancak kauçuk içerisine homojen karıştırılmaları zordur. (Soyel 2008)

Fırın siyahları, eksik oksijen ortamında hidrokarbonların 1200-1600 °C 'de yakılması ile oluşur. Karbon siyahları ASTM D – 1765 standardına göre kodlanır. Bu kodlama S (slow), N(neutral), F(fast) harflerini içerir. S harfi asidik kanal siyahını gösterir. Asidik kanal siyahı vulkanizasyon hızını yavaşlatır. N harfi, bazik siyahlarını (vulkanizasyon hızında etkisizdir) gösterir. F ise vulkanizasyon hızını arttıran siyahları gösterir. 2.Hanedeki rakam tanecik çapı büyüklüğünü gösterir. 3.Hane karbon siyahının yapısı ile ilgilidir. 4.Hane ise karbon siyahının farklı özelliklerini belirtmede kullanılır. (Long 2001)

Çizelge 2. 1. Lastik üretiminde tercih edilen fırın siyahları (Babapour 2013)

ASTM Sınıfı	İsmi	Özelliği	Tanecik Büyüklüğü (nm)	Yüzey Alanı (m ² /g)
N110	SAF	Super Abrasion Furnace (Üstün Aşınma)	11-19	121-150
N220	ISAF	Intermediate Super Abrasion Furnace (Orta Üstün Aşınma)	20-25	100-120
N234	ISAF	Intermediate Super Abrasion Furnace (Orta Üstün Aşınma)	20-25	100-120
N330	HAF	High Abrasion Furnace (Yüksek Aşınma)	26-30	70-99
N440	FF	Fine Furnace (İnce Fırın Siyahı)	31-39	50-69
N539	FEF	Fast Extrusion Furnace (Hızlı ekstrüzyon) Siyahı	40-48	40-49
N550	FEF	Fast Extrusion Furnace (Hızlı ekstrüzyon)Siyahı	40-48	40-49
N660	GPF	General Purpose Furnace (Genel amaçlı)Siyahlar	49-60	33-39
N762	SRF	Semi-reinforcing Furnace (Yarı kuvvetlendirici) siyahlar	61-100	21-32
N990	MT	Semi-reinforcing Furnace (Yarı kuvvetlendirici) siyahlar	250-350	<10

2.4.4. Koruyucu Maddeler

Elastomerler; sertleşme, yorulma, yumuşama, bozulma vb. birçok değişime uğrayarak zaman içinde özelliklerini kaybedebilirler. Elastomerlerin içindeki çift bağlar; oksijen, ozon ve diğer aktif maddeler ile etkileşime girerek elastomer özelliklerinin değişmesine neden olur (Hofmann 1989).

Oksidasyon, elastomerin yumuşamasına ve yaşlanmasına sebep olan bir dış faktördür. Nem, sıcaklık ve gerilmeler ozon çatlaklarının oluşmasına sebep olurlar.

Mekanik gerilmelere maruz kalan elastomerler zamanla yorulur ve yüzeylerinde çatlaklar meydana gelir. Meydana gelen bu çatlakların büyümesi ürünün tamamen kopmasına neden olurlar. Bu çatlaklar vulkanize NR’de hızlı oluşup yavaş büyürken, SBR’de yavaşça oluşur ve hızlı büyür.

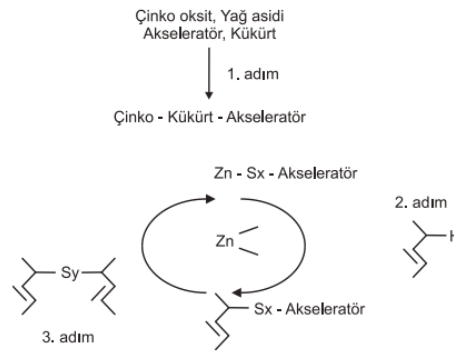
Elastomerleri yorulma, yaşlanma, bozulma gibi etkenlerden korumak için karışımlarına koruyucu maddeler eklenir. Bu koruyucular amin türevleri ve fenol türevleri olarak sınıflandırılabilirler. Amin türevleri tekrarlı yüklemelerdeki gerilmelerde, ısıl gerilmelerde, yaşlanma etkilerinde koruyuculuğa sahiptir.

Fenol türevleri ise amin türevlerine göre daha az koruyucudur. Fakat amin türevleri leke verir ve renk bozabilir. Fenol türevleri leke vermediği için açık renkli elastomerlerde tercih edilir.

2.4.5. Aktivatörler

Vulkanizasyonu hızlandıran akselatörlerin organik maddelere ihtiyacı vardır.. Aktivatörler, hızlandırıcıların en verimli etkiyi göstermesi için kullanılır (Heideman ve ark. 2004) . Metal oksit, yağ asitleri aktivatörlere örnek olarak verilebilir. Kauçukta hızlandırıcı ve yumuşatıcı aktivatör olarak stearik asit kullanılabilir. Aktivatörlerin etkinlikleri cinslerine göre farklılık göstermektedir.

En önemli aktivatörlerden birisi çinko oksittir. Kauçukta çinko oksitin çözünürlüğünü stearik asit arttırmaktadır. Şekil 2.10.'da Vulkanizasyon işleminde çinko oksitin görevi gösterilmektedir (Babapour 2013).



Şekil 2.10. Vulkanizasyon sisteminde çinko oksitin görevi (Babapour 2013)

2.4.6. Hızlandırıcılar

Vulkanizasyonda hızlandırıcı olmadan kükürt kullanıldığında çapraz bağlanma reaksiyon hızı düşük olur. Kükürt ile hızlandırıcı birlikte kullanıldığında kısa sürede ve ekonomik pişirme oluşur. Ürünün eskimeye karşı direnci artar.

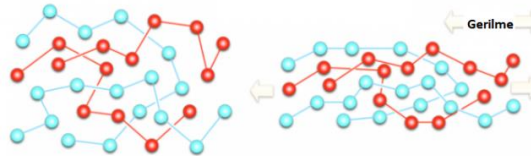
Hızlandırıcı kullanılan vulkanizasyon yöntemi ile kauçuk ürünün ısı dayanımı, yorulma dayanımı, dinamik özellikleri, yaşlanma özelliklerinde iyileşme sağlanır. Hızlandırıcı olarak organik hızlandırıcılar inorganik hızlandırıcılara göre daha çok kullanılır. Hızlandırıcı kullanımı ile çapraz bağlanma tepkimesi hızlanır. Vulkanizasyon daha ekonomik olur. .

2.4.7. Geciktiriciler

Ön vulkanizasyon veya erken pişme söz konusu olan durumlarda hamurun imalatta işlenmesi çok zordur. Yanma zamanını uzatmak ve erken pişme durumunu önlemek için geciktirici kimyasallar kullanılır. Asitler ve Nitrozo bileşikler olmak üzere iki çeşit geciktirici tipi vardır. Ftalik anhidrit, benzoik asit, salisilik asit geciktiricilere örnek olarak verilebilir.

2.5. Elastomer ve Elastomer Çeşitleri

Kauçuğun temelini oluşturan elastomerler çekme kuvveti altında yüksek oranda uzayabilir. Kuvvet ortadan kaldırıldığında ise ilk uzunluğuna geri dönerler. Elastomerlerin bu özelliği düşük çapraz bağ yoğunluğu ve düzensiz yapısından kaynaklıdır. Elastomerler çapraz bağlanmış kauçuğumsu polimerlerdir. Elastomerler, doğal kauçuk ve sentetik kauçuk olarak ikiye ayrılır.



Şekil 2.11. Elastomer yapı (<http://www.differencebetween.com/difference-between-elastomer-and-vs-polymer/#Summary> , 2018)

Başlıca kauçuk çeşitleri;doğal kauçuk (NR), nitril kauçuk (NBR), stiren butadien kauçuk (SBR), , etilen propilen kauçuk (EPM, EPDM), butadien kauçuk (BR)poliakrilik kauçuk (ACM), kloropren kauçuk (CR), silikon kauçuk(VMQ MQ, , PVMQ), florokarbon kauçuk (FKM), politetrafloroetilen (PTFE), hidrojene nitril kauçuk (HNBR), epiklorohidrin kauçuk (CO, ECO), isopren kauçuk (IR), termoplastik poliüretan (TPU), poliamid (PA) şeklinde sıralanabilir. En çok kullanılan kauçukların temel özellikleri 2.2. no'lu çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Kauçukların temel özellikleri (Özgün 2010)

	NR	EPDM	NBR	SBR	CR	BR
Yoğunluk (g/cm ³)	0,93	0,86	1	0,94	1,23	0,94
Sertlik (Shore A)	30-100	40-95	20-100	40-100	40-95	45-80
Kopma Mukavemeti (MPa)	>30	>21	>24	>24	>28	>21
Max. Çalışma Sıcaklığı (°C)	100	145	105	100	100	100
Min. Çalışma Sıcaklığı (°C)	-60	-40	-30	-50	-45	-40

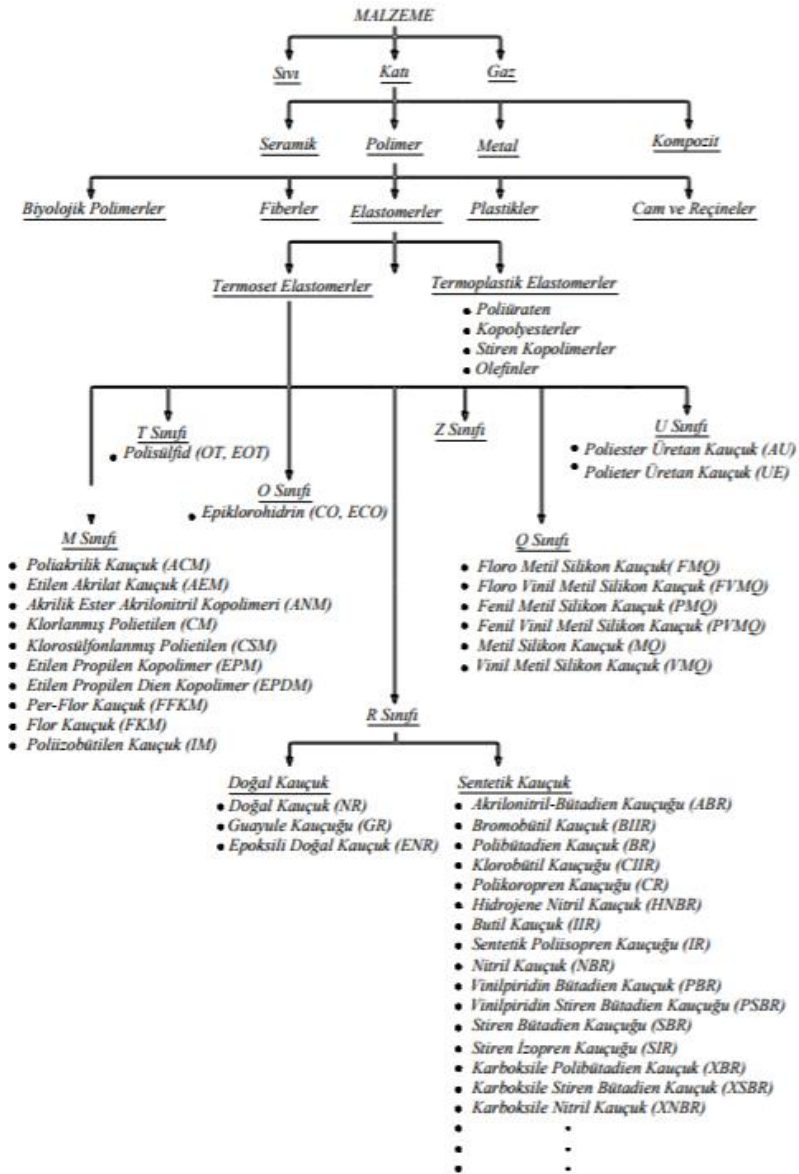
2.5.1. Doğal Kauçuk (NR)

Hevea brasiliensis denilen kauçuk ağacından doğal kauçuk elde edilir. Doğal kauçuk süte benzer yoğun kıvamlı sıvı halde bir akışkandır. Bu akışkan,%2 reçine% 2-5 lipid ve protein,% 60-65 su, % 30-40 cis-1,4 polyisoprene (lastik) içerir.

Bu ağaçtan elde edilen lateks, ağaç kabuğunun bıçakla kesildikten sonra akan sıvının özel kaplarda toplanmasıyla elde edilir. Doğal kauçuğun formülü 1826 yılında C₅H₈ olarak Faraday tarafından belirlenmiştir. Doğal kauçuk gerilme uygulandığında kristalleşme eğilimindedir. Camsı geçiş sıcaklığı $\approx 75^{\circ}\text{C}$ civarında olduğu için doğal kauçuktaki düşük sıcaklık özellikleri oldukça iyidir.(Mazlum 2008)

Doğal kauçuk, yüksek mukavemetli, yüksek yorulma direnci, makul maliyeti, iyi sıkıştırma özellikleri ile dikkat çekmektedir. Doğal kauçuk esnek ve yüksek dayanıma sahiptir. Kolay işlenebilirEn yaygın kullanımı, özellikle SBR ile harmanlandığında, otomobil, arazi aracı ve kamyon lastiklerindedir. . Ayakkabı ve araç lastiklerinde çok fazla kullanılır. Bunun dışında doğal kauçuk, motor takozları, lastik karkasları, fan kayışları, oyuncaklar, radyatör hortumları, sıhhi ürünler konveyör kayışları, lastik

tekerlekler, lateks ürünler ve yapışkanlar, köprü takozları vb. yerlerde kullanılır. Spor ayakkabıları, hortumlar, v kayışları, konveyör bantları, köprü ve inşaat temelleri rulmanları, helikopter rotor yatakları, kıyı şeridindeki gerilim bacak platformları için tether rulmanları ve benzeri yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Listedeki de anlaşılacağı üzere, birçok yapısal cihaz ve ürünün mühendislik tasarımında öncelikli malzemelerden biridir.



Şekil 2.12. Kauçuk türü malzemelerin sınıflandırması (Vahapoğlu 2006).



Şekil 2.13. Doğal Kauçuk (https://www.alibaba.com/product-detail/NATURAL-RUBBER-SVR-3L_170248502.html , 2018)

2.5.2.Sentetik Kauçuklar

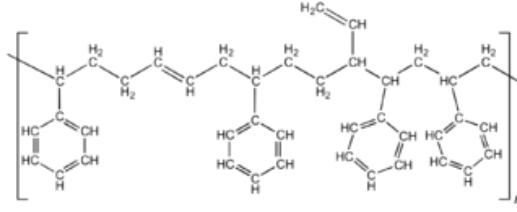
Doğal kauçuğun sadece belirli ülkelerde yetişiyor olması, kauçuk ihtiyacının artması ve doğal kauçuğun farklı kullanım alanlarındaki istenilen fiziksel, mekanik, kimyasal ihtiyaçları karşılayamaması farklı sentetik kauçukların araştırılmasını ve yeni sentetik kauçukların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Sentetik kauçuklar yüksek elastikiyet göstermektedir.

20. yüzyılın ortalarında Almanya’da ortaya çıkan sentetik kauçuk, lastik hamurunda en çok tercih edilen kimyasal bileşiktir. Günümüzde kauçuk talebinin çoğunu sentetik kauçuk karşılar. Stiren ve bütadiyen monomerlerin polirazasyonu ile üretilmektedir. Conta, hortum, taşıyıcı bant, ayakkabı ve terlik vb. yerlerde kullanılmaktadır.

Çin, ABD, Japonya, Kore Cumhuriyeti ve Almanya sentetik kauçuk üretiminde en önde gelen ülkelerdir(<http://www.resinex.com.tr/polimer-turleri/natural-rubber.html>).

2.5.2.1.Stiren Bütadien Kauçuk (SBR)

En fazla üretilen sentetik kauçuk çeşitidir. SBR Kauçuk, %25 stiren ve %75 bütadien içeren karışımların emülsüyon polimerizasyonu ile üretilir. Yapı olarak düzensiz olduğu için kristallenmeye engel olur. Doğal kauçuk yerine kullanılmaktadır fakat doğal kauçuka göre hazırlanma süresi daha kısadır. Kolay eritilebilen SBR’nin yaşlanma, ısıya dayanım, aşınma özellikleri doğal kauçuğa göre daha iyidir. Elastik özellikleri doğal kauçuktan daha kötüdür.



Şekil 2.14. Stiren Bütadien Kauçuğu (Erkek 2016)

Stiren Bütadien Kauçuğu kolay işlenebilir. Ekstrüzyon metodu ile işlenmeye elverişlidir. Yüksek sıcaklığa karşı dirençlidir. Yüksek aşınma mukavemeti ve yüksek yaşlanma mukavemetine sahiptir. Kopmaya, yırtılmaya, aşınmaya karşı direnimleri iyidir. Düşük sıcaklıklarda fiziksel özelliklerini kaybetmezler, fiyatları ucuz ve temini kolaydır. Daha iyi fiziksel özelliklere sahip olması için karbon siyahı ve ilave dolgu maddelerine ihtiyaç vardır.



Şekil 2.15. SBR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler (<http://www.paromak.com/stiren-butadien-kaucuk.html>,2018)

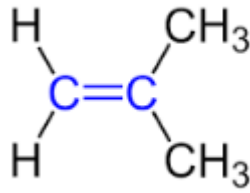
Takviye malzeme gerektirmeleri, aşınma hariç mekanik özelliklerinin tabii kauçuktan düşük olması, hidrokarbonlara dayanımlarının zayıflığı, sıcak yaşlanma, oksijene ve ozona dayanımlarının düşük olması dezavantajlarıdır fakat yine de bu yönlerden tabii kauçuktan iyidir. Glikol esaslı fren yağlarına, alkole, asitlere, bazlara karşı dirençlidir. SBR, -50° C - 100° C arasında kullanılır.

SBR doğal kauçuk ile iyi bir şekilde karışır ve aşınma mukavemetine önemli katkısı olur. SBR doğal kauçuk, özellikle araç lastikleri, kemerler ve hortumlarında kullanılır Otomobil lastiği ve paspasında, ayakkabı tabanında, taşıyıcı bantlarda, ekstrüzyon malzemelerinde, kablo ve elektrik malzemelerinde, fren ve debriyaj balatalarında, şeffaf bantlarda, yapıştırıcılarda, dinamik parçalarda (V kayışları) , açık renkli teknik malzemelerde kullanılır.

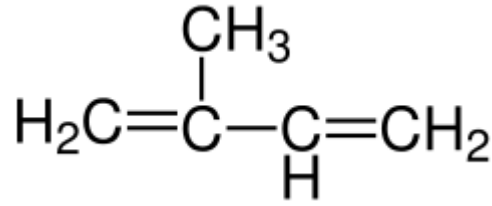
2.5.2.2. Butil Kauçuk (IIR)

Bu kauçuklar, gazlara karşı düşük geçirgenliğe sahiptir, termal olarak kararlıdır, ozon ve hava şartlarına direnç gösterirler, yüksek titreşim sönümlenme yeteneğine ve yüksek sürtünme katsayısına sahiptirler. Yüksek sıcaklık şartlarına dayanıklılığın gerektiği alanlarda kullanılırlar.

İzobütien polimerizasyonu ile elde edilir. İnert yapısı olan Butil kauçuğun çapraz bağlanması için isopren grupları gerekir. İzobütylene % 0,5- % 3 oranlarında isopren ilavesi ile butil kauçuk oluşur. Gerilmede kristalleşir. Geçirgenliği ve esnekliği azdır. Deformasyonu yavaştır. Yağ ve yakıt dayanımı zayıf olan butil kauçuğun vulkanizasyon süresi uzun ve imalatı zordur. IIR kısaltması ile gösterilir. Isıya dayanıklıdır. Düşük gaz geçirgenliğinden dolayı ozona, neme, havaya karşı dayanıklıdır. Çatı kaplaması gibi dayanım gerektiren uygulamalarda ve iç lastik gibi hava geçirgenliği az olan uygulamalarda kullanılır.



İsobütilen



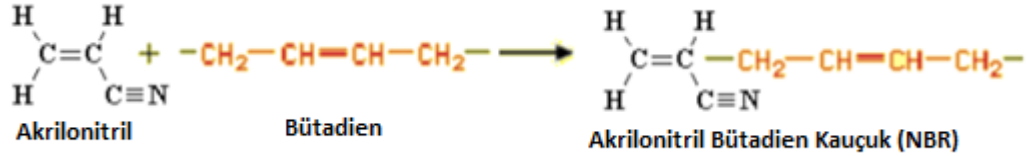
İsopren

Şekil 2.16. İzobütilen ve isopren karışımından butil kauçuk oluşumu

2.5.2.3. Nitril Kauçuğu (NBR)

Akrilonitril ve Bütadien monomerlerinin kopolimerizasyonu sonucu oluşur. Karışım içindeki akrilonitril oranı nitril kauçuğun özelliklerini belirler. NBR Kauçuk karışımında akrilonitril oranı %18 ile %50 arasında değişir. Akrilonitril miktarı arttıkça yoğunluk, sertlik, pişme hızı, yağa-yakıtlara-gazlara karşı dayanıklılık, mekanik özellik artar ve karışımın işlenebilirliği kolaylaşır. . Akrilonitril, SBR karışımına polar özellik sağlayarak hidrokarbonlara karşı çözünmeyi azaltır. Akrilonitril miktarı azaldıkça elastikiyeti azalır. Düşük sıcaklıklarda dayanım azalır ve üretimi zorlaşır. Çalışma sıcaklığı -40°C / +100°C arasındadır.

Akrilonitril-bütadien kauçukları, yağ, yakıt ve kimyasallara dayanıklıdır. Buna ek olarak, NR'ye kıyasla yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklıdır ve gaz geçirgenliğine dirençlidirler. Uygulamaları alanları; contalar, depo astarları, ayakkabı tabanlıkları ve topuklar, elektronik cihazlar, konveyör bantları, hortum tüpleri ve kapakları ile nükleer denizaltı boru bağlantıları sayılabilir.



Şekil 2.17. NBR Oluşum reaksiyonu (MEB 2011)

Aşınma ve ısı dayanımı iyidir, yakıt, yağ dayanımı ve geçirgenlik avantajlarıdır. Elektrik izolasyonu zayıftır. Düşük ısı özellikleri ve düşük resiliens ve takviye malzemesi ihtiyacı dezavantajlarıdır. Hidrolik hortum, keçe, conta, konveyör kayışı, oyuncak, işçi elbiseleri ve botları, yakıt deposu imalatında kullanılır.



Şekil 2.18. NBR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler(<http://www.paromak.com/nitril-kaucuk.html>)

2.5.2.4.Etilen Propilen (EPDM)

Etilen ve propilenin kopolimerizasyonundan üretilir. Bu bileşikler, ozon, oksidasyon ve aşınma proseslerine karşı oldukça dirençlidir ve bu nedenle lastik imalatında yoğun şekilde kullanılırlar. Buna ek olarak, EPDM'ler diğer kauçuklardan daha yüksek sıcaklıklarda çalışabiliyor olmaları nedeni ile ve otomotiv kapı fitillerinde, davlumbazlarda ve contalarda, çatı membranları ve endüstriyel hortumlarda

kullanılırlarYüksek dolgulu olması, yaşlanma dayanımı, işlenme özelliği, ozon dayanımı, dielektrik özelliği nedeniyle avantajlıdır.



Şekil 2.19. EPDM kauçuklarla imal edilmiş malzemeler (<http://www.paromak.com/etilen-propilen-dien-kaucuk.html>)

Doymuş yapıda olup hareketliliği düşüktür. Ozon ve oksijene karşı dayanıklıdır. Sızdırmazlık elemanlarında kullanılır. Özel pişirici sistem gerektirmesi ve diğer kauçuklarla iyi karışmaması dezavantajıdır. Asite ve bazlara dayanıklıdır.

Düşük yoğunluğa sahiptir. Bu yüzden hafif malzemelerin üretiminde tercih edilir. Kablo, konveyör bant, sünger fitil, körük ve conta, radyatör hortumu vb. imalatında kullanılır. Çalışma sıcaklığı -40°C / $+150^{\circ}\text{C}$ arasındadır. (<http://www.paromak.com/etilen-propilen-dien-kaucuk.html>,2018)

2.5.2.5. Polibutadien (BR)

Yüksek içerikli BR, lastik tabanları, yanaklar, karkaslar ve diğer lastik bileşenleri için kullanılır. Polibutadien kauçuğu Doğal Kauçuk (NR), Stiren Bütadien Kauçuk (SBR) ile birlikte kullanılır Tek başında polibutadien kauçuğunun kopma mukavemeti düşük ve işlenmesi zordur. İyi yorulma direncine, iyi aşınma direncine, çatlak direncine, düşük histerezise ve düşük sıcaklıkta iyi mekanik özelliklere sahiptir. Kullanımı cis-1,4 izomer içeriğine bağlıdır. Aşınma ve çatlama mukavemetleri çok iyidir. Düşük ısılarda çok iyi elastik özellikleri gösterir. Yüksek reziliens, mükemmel aşınma dayanımı ve elektrik yalıtımı polibutadienlerin avantajlarıdır. Düşük yırtılma dayanımı, hidrokarbonlara direnç, ısı ve ozon dayanımının düşüklüğü dezavantajlarıdır. Diğer kauçuklarla karıştırıldığında daha verimli hale gelir. Otomotiv sektöründe kullanılır.



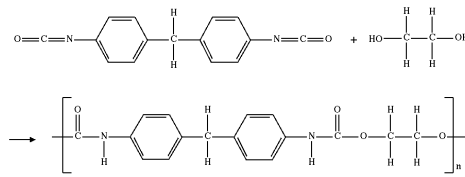
Şekil 2.20. BR kauçuklarla imal edilmiş malzemeler

(<http://www.paromak.com/polibutadien-kaucuk.html>,2018)

2.5.2.6.Poliüretan Kauçuk (AU)

Bir isosiyanat ve bir alkoln reaksiyonu ile oluşur. İsoasiyanatlar hidroksil uçlu büyük reaksiyonlar ile poliüretanlar elde edilir. İsoasiyanatlar reaktiftir. Kendi türevleri ile reaksiyona girerek istenmeyen ürünler oluşturabilmektedir (Soyubol 2006) .

H₂O ile CO₂ çıkararak süngerleşen poliüretan yapısının sonsuz değişkenliği vardır. Poliüretanın yapısı, yakıt ve yağ dayanımı verir. Hidrolize olur. Hava, ozon, su, yağ ve karışımlarına dirençlidir. Yüksek basınca, yırtılmaya, kopma ve aşınmaya karşı dayanıklılığı mükemmeldir. Yağ ve aşınma dayanımı gerektiren dolgu tekerleklerinde, keçelerde, dökme contalarında vb.işlerde kullanılır. Aşınma, kopma, yırtılma, yağ, yakıt, oksijen, ozon özellikleri iyidir. Sıvı halde temin edilebilir. Reziliensinin düşük olması, hidrolize olması ve pahalı olması kötü özellikleridir(DPT 2001).



Şekil 2.21. Poliüretan Kauçuk (Erkek 2016)

2.5.2.7.Hidrojene Nitril Kauçuk (HNBR)

HNBR, yüksek sıcaklıklara ve NBR'den çok çeşitli yağ ve kimyasallara direnci ile bilinir. Son zamanlarda otomotiv sektöründe statik ve dinamik contalarda, hortumlar ve kayışlar için kullanılmaktadır. Petrol endüstrisinde şişirilebilir paketleyicide, patlama koruyucularda, şaftlarda kullanılmaktadır.

2.5.2.8. Neopren Kauçuk (EU)

Oksidasyon oranının düşük olması ve ozon saldırısına direnç göstermesi nedeniyle hava şartlarından kaynaklı yaşlanmaya karşı dirençlidir. Buna ek olarak orta yüksek sıcaklıklarda özelliklerini korur ve aşınma ve esnek çatlama ve kırılmaya karşı iyi direnç gösterir. Otomotiv contaları ve keçeleri, köprü yatak pedleri, su geçirmez kıyafetler, otomotiv hortumları, boru ve kapaklar, güç aktarma kemerleri ve lateks kaplanmış eşyalarda (eldivenler, balonlar, vb.) kullanılır (Gent 1992).

Oto lastiği hariç tabii kauçuğa benzer sahalarda kullanılır. Yanma dayanımı istenen yerlerde, ozon, yakıt, hava, yağ dayanımı istenen yerlerde kullanılır. Kullanım alanı düşük ısı dayanımı özelliğinin iyi olmama sebebi ile sınırlıdır. Fiyatı yüksektir.

Geniş servis ısı aralığı, ısıya, oksijene ve ozona dayanıklı olması iyi özellikleridir. Esneme dayanımı ve elektrik izolasyon özelliği iyidir. Fiziksel özelliklerinin düşük olması, aşınma dayanımı, yakıt ve yağ dayanımının kötü olması, pahalı olması, hidrolize uğrayabilmesi iyi olmayan özellikleridir.

2.5.2.9. Silikon Kauçuklar (SI)

Yüksek sıcaklık performansları, düşük sıcaklıktaki elastikiyetleri ve düşük sıkıştırma özellikleri sebebiyle otomotiv sektöründe, valf kapaklarında, yağ karterlerinde, emme manifoldlarında ve su pompalarında kullanılır. Ayrıca havacılık sektöründe kapı contalarında, yangın direncinin gerekli olduğu parçalarda da kullanılmaktadır.

Silikonlar, silika, SiO_2 ya da $\text{O}=\text{Si}=\text{O}$ türevleridir. Atomlar bir araya getirildiğinde, çift bağlar kırılır ve metil grupları bağlara girer ve silikon kauçuk oluşur. Silikon kauçukların diğer adı polisiloksandır. Silikonlar çoğu elastomerin karbon yapısından farklı olarak silisyum ve oksijen atomlarını içerir. Silikon ve florosilikon kauçuklar güneşe ve ozona karşı dayanıklıdır. Yaşlanmaya karşı mükemmel direnç gösterirler. (Schweitzer 2006)



Şekil 2.22. Silikon kauçuktan imal edilen ürünler (<http://www.paromak.com/silikon-kaucuk.html>,2018)

Silikon kauçuklar kablo, kablo uçları, tuş takımları, izolatörler, buji kabloları, buji başlıkları, radyatör hortumları, distribütör kapak contaları, gaz maskeleri, bebek emzikleri, O’Ringler, yağ keçeleri; fırın contaları gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.(Soyubol 2006).

2.5.2.10.Poliakrilatlar (ACM)

Kristalleşmeyen bir kauçuk çeşitidir. Kullanım alanı sınırlıdır. Isıya, ozona ve oksijene dayanıklıdır. Esneklik özellikleri iyidir. Geçirgenliği düşüktür. Yakıt ve yağ karşı dayanıklıdır. Su, alkali ve asit dayanımı düşüktür. İşleme maliyetleri fazladır.

2.5.2.11.Floroelastomerler (FPM)

Yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında, iyi gerilme mukavemetine sahiptirler ve hidrokarbonlara karşı mükemmel direnç gösterir. Conta ve o-ring contalarında, tencere setlerinde, yakıt tankları yalıtım bölgelerinde, yakıt hortumunda ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılırlar.

Isı dayanımı çok iyidir. Oksijene ve ozona dayanıklıdır. Geçirgenliği düşüktür. Yağ, kimyasallara, yakıt ve çözücülere karşı dayanıklıdır. Alevlenme özelliği düşüktür. Pahalı bir kauçuktur. Askeri ve uzay uygulamaları gibi özel üretim gerektiren ve yüksek performans istenen yerlerde kullanılır (Boşnak 2010).

2.6. Kauçuk ve Polimerik Malzemelerdeki Sürünme ve Gerilme Gevşemesinin Ölçülmesine İlişkin Standartlar

A.B.D’de en çok kullanılan test metodu ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarıdır. Diğer önemli standart test yöntemi ise SAE (Society of Automotive Engineers) ve BSI (British Standards Institution)’ dir. Kauçuk test yöntemlerinin Uluslararası standartları ISO/TC 45 (International Organization for Standardization Technical Committee 45) tarafından kabul edilmiştir. Kauçuk için uluslararası standartlar olmasına rağmen bu standartların kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Bu standartlar her beş yılda bir revize edilerek güncellenir.

Kauçuk ASTM standartlarında kuvvet uygulandığında şekil değiştiren, kuvvet kaldırıldığında tekrar eski konumuna dönebilen malzemeler olarak tanımlanır(Vahapoğlu 2006).

İlk bilimsel çalışmalarda kauçuk malzemelerin deneyleri basit çekme testi ile yapılmıştır. Bu test yönteminin kolay olması ve bu konuda önemli bir bilgi birikimi olmasından dolayı basit çekme testinde kullanılan numune ölçüleri ve deney prosedürleri standartlaştırılmıştır. ASTM D 412, DIN 53 504 ve ISO 37 standartlarında kauçuk türü malzemelerin çekme deneyi ile ilgili bilgiler verilmektedir. (Spetz 2000)

Birley, Fernondo ve Tahir, 1986 yılında, ASTM ve BS standartlarındaki gerilme gevşemesi ile ilgili bazı eksiklikleri ve deney prosedürlerindeki yetersizlikleri gündeme getirerek çalışmalarını bu konular üzerine yoğunlaştırmışlardır (Birley 1986).

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(Mazlum 2008).

Gerilme gevşemesi deneyinden önce malzemeye ön deformasyon prosedürü uygulaması İngiliz standartlarında olmasına rağmen ABD standartlarında ön deformasyon prosedürü uygulaması yoktur. İngiliz BS standartlarında malzemenin tek eksenli basma deformasyonu ile gerilme gevşemesi deneylerinde numunenin beş defa $\lambda = 0.75$ 'e

kadar yükleme-boşaltma işlemine tabi tutulmasını ve bu işlemden sonra numunenin minimum 16 saat, maksimum 48 saat beklemeden sonra gerilme gevşemesi deneyinin yapılması gerektiğini belirtmektedir. (Vahapoğlu 2006).

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

ASTM'nin hazırladığı üç standart kauçuk türü malzemelerin sınıflandırılması konusunda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu standartlar ASTM D1418, ASTM D1566 ve ASTM D2000 standartlarıdır.

1. ASTM D1418-Rubber and Rubber Lattices-Nomenclature: Kauçuklar kimyasal bileşiklerine göre bu standartta tanımlanmakta ve kategorilere ayrılmaktadır.
2. ASTM D1566-Standart Definitions of Terms Relating to Rubber: Kauçuk üreticileri ve tasarımcıları için hazırlanmıştır.
3. ASTM D2000-Standart Classification System for Rubber Parts in Automotive Applications: En yaygın şekilde kullanılan standarttır. Sadece otomobillerde kullanılan kauçuklar için değil tüm kauçuk parçalar için geçerli bir standarttır. Bu standart SAE normlarında kendine J200 koduyla yer bulmuş ve kauçuk malzemeleri karakteristik özelliklerine göre sınıflandırmaktadır.

Bu standarta göre kauçuk; ısıyla yaşlanmaya karşı gösterdiği dirence göre ve yağ içerisinde şişmesinde gösterdiği dirence göre iki gruba ayrılmaktadır. Bu standart kauçuğun termal testlerinde ve yağ emme testlerinde göstermiş olduğu performansa göre tanımlanmaktadır. Bu testlere göre malzemenin tipi belirlenmektedir. Yağ emme testinde yağ içerisinde bekletilen kauçuğun maksimum yağ emme miktarı tespit edilir, bu miktar A-K harf aralığında belirlenir(Çizelge 2.3.) Kauçuğun tip ve sınıf teriminin yanyana yazılmasıyla kauçuk malzemenin ismi belirlenmektedir.

Çizelge 2.3. Kauçuk malzemelerin ASTM D2000 standartlarına göre tip ve sınıfları (Vahapoğlu 2006)

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

BS903:Bölüm A15: 1990: Kauçukların fiziksel testi: Sıkıştırma veya kayma sürünmesinin tayini için yöntem. (ISO 8013 ile aynıdır).

BS903: Bölüm A34: 1978: Kauçukların fiziksel kontrolü: Sıkıştırmada kauçuk halkaların gerilme gevşemesinin belirlenmesi.

BS903: Bölüm A42: 1992: Kauçukların fiziksel testi: Ortamdaki ve yüksek sıcaklıktaki kompresyonda gerilme gevşemesinin belirlenmesi için yöntem. (ISO 3384 ile aynı)."

BS903: Bölüm A52: 1986 (1995): Kauçukların fiziksel testi: Belli bir uzatmada stresin ölçülmesiyle yaşlanma karakteristiğinin belirlenmesi. (ISO 6914 ile aynı).

BS4618: 1970 (1994): Plastik tasarım verilerinin sunumu için öneriler.

BS5350: Yapıştırıcıların test yöntemleri; Bölüm C7: 1990: Sürünme vesürekli uygulanan dirence direncin belirlenmesi

ISO 899-1: 1993: Plastikler - Sürünme davranışının belirlenmesi - Bölüm 1: Gerilim sürünmesi

ISO 899-2: 1993: Plastikler - Sürünme davranışının belirlenmesi - Bölüm 1: Üç noktalı yük ile eğilme direnci.

ASTM D1646-94, Kauçuk için test yöntemi: viskozite, stres gevşemesi ve vulkanizasyon özellikler (Mooney viskozimetre).

ASTM D1780-94, Metal-metal yapıştırıcıların sürünme testlerini yapmak için uygulama.

ASTM D2990-95, Çekme, basma ve bükülme sürünmesi için standart test yöntemi ve plastiklerin kopma sürünmesi

ASTM D2293-92, Sıkıştırma yüklemesi ile yapıştırıcıların sürünme özellikleri için standart test yöntemi (metal-metal).

ASTM D2294-92, Gerilme yükü altındaki (Metal-metal) yapıştırıcıların sürünme özelliklerinin belirlenmesi için standart test yöntemi.

ASTM D2295-92, Yüksek sıcaklıklarda çekme yükü ile kayma yaşayan yapıştırıcıların mukavemet özellikleri için standart test yöntemi (metal-metal).

ASTM D2992 (1977), Termoset Reçine Boru ve Ek Parçaları. İçin hidrostatik tasarım esaslarının belirlenmesi için yöntem. (Olusanya 1997)

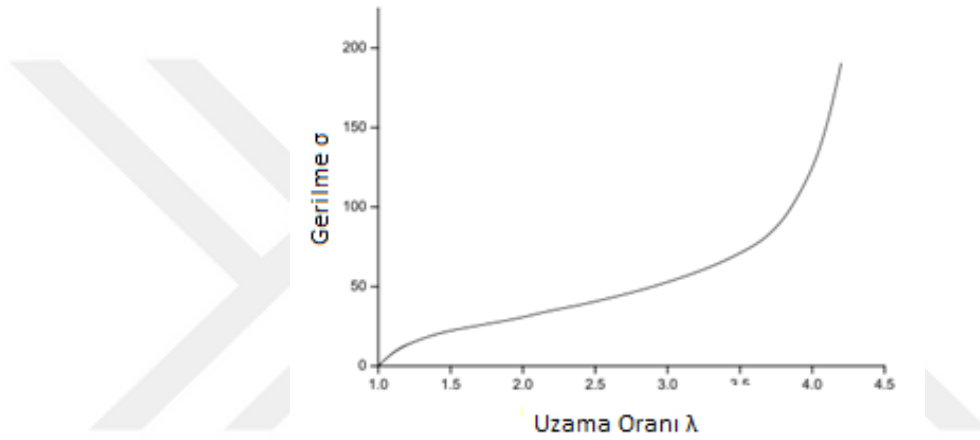
2.7. Kauçuk Gerilme-Gerinme Davranışı

Elastomerlerin gerilme-gerinme davranışlarının üç farklı şekilde olması bu malzemeler için mühendislik tasarımını zorlaştırmaktadır. Bunlar: döngüsel özellik değişiklikleri, geniş deformasyon tepkisi ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin lineer olmamasıdır. Sonlu elemanlar analizi gibi çoğu analitik çalışma, doğrusal olmayan ve geniş deformasyon tepkilerini çözmeyi amaçlamaktadır. Yük çevrimi veya deformasyon ile davranış değişiklikleri, mekanik davranışın öngörülmesinde hayati önem taşır.

Kauçuk gerilme-gerinme davranışı üç bölümde incelenebilir. İlk bölüm; kauçuk test parçasına ilk yüklemmeden sonra gerilme-uzama eğrisinin değişmesidir. İkinci bölüm; deformasyonların büyüklüğü ve geniş deformasyon tepkisidir. Bu önemli davranış, uygulanan yüklere veya deformasyonlara bağlı olarak yumuşak veya düşük modül tepkisi olarak görülür. Belirli bir parça veya bileşen için bir elastomer seçmedeki en önemli kriterdir. Üçüncü bölüm ise zamana bağlı olan davranış değişiklikleridir. Bu

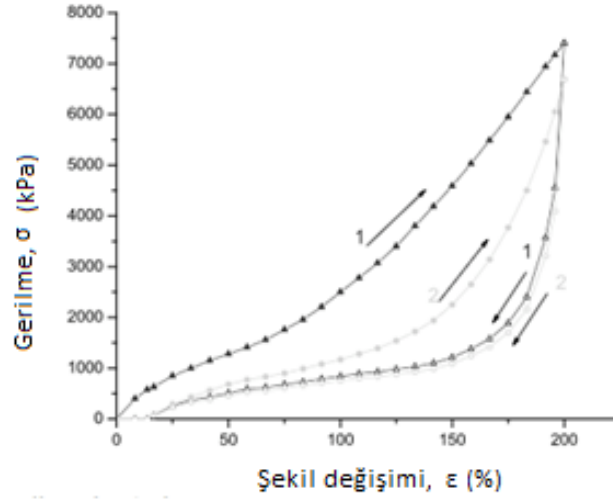
davranış incelenirken çevrimsel veya zamana bağlı özellikler incelenebilir. Doğrusal olmayan gerilme-uzama tepkisi, tasarım aşamasında karşımıza çıkan üçüncü davranış biçimidir.

Bu üç kategori kauçuk davranışında karşılaşılan benzersiz özelliklerin tamamı olmasa da tasarım mühendisleri için en zorlu öğelerdir. Kauçuk sıcaklık ile gerilme-gerinme özelliklerinde diğer yapısal malzemelerden çok daha farklı özelliklere sahiptir. Aynı zamanda birçok sıvı ve bazı gazların etkisi ile mekanik özelliklerinin bozulmasına karşı daha savunmasızdır.



Şekil 2.23. Kauçuğun çekme testi altındaki davranışı (Bauman 2008)

Kauçuğun çeşitli tipik özellikleri açıklarken, basit bir gerilme-uzama eğrisini ele alalım. Şekil 2.23. tipik bir elastomer çekme numunesinin gerilme-uzama grafiğini göstermektedir. Doğrusal olmayan bu grafikte deformasyonun büyük kısmının belirli bir gerilim miktarından sonra oluştuğu görülmektedir. Elastite modülünün sabit bir değeri olmadığı, yani E'nin bir değişken olması durumunda sadece $\sigma = E\varepsilon$ olduğu unutulmamalıdır. Bu özellikten dolayı doğrusal davranışa dayanan basit tasarım denklemlerinin kullanımını sınırlanır.

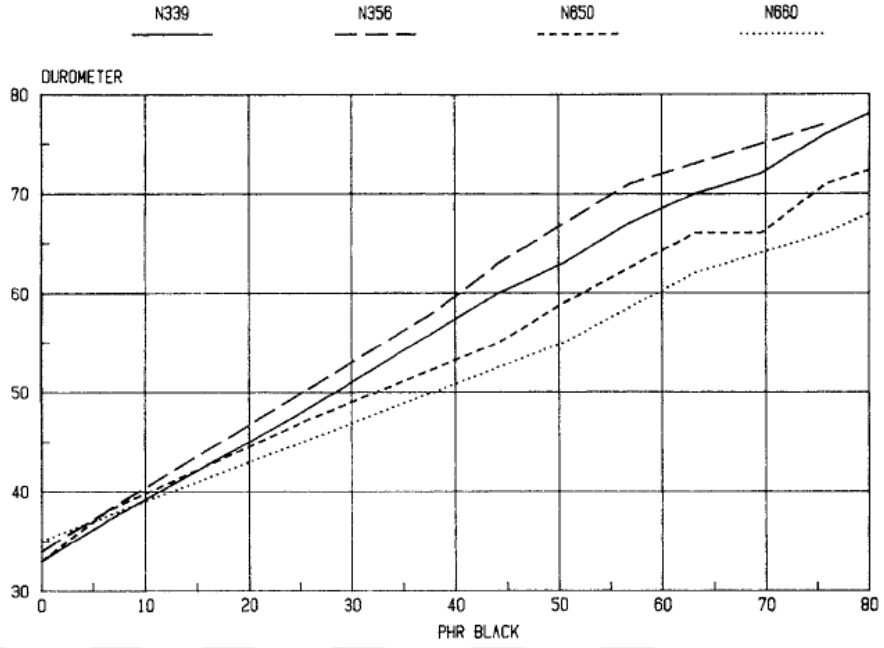


Şekil 2.24. Şekil değiştirme oranı (Bauman 2008)

Kauçuğun yükleme boşaltma durumunda ise her döngü sonucu malzemede plastik deformasyonlar artar ve elastisite modülünde azalma meydana gelir. (Şekil 2.24.)

Elastomerlerde takviye malzemelerin kullanımı genellikle, mukavemet yerine sertlikte bir artış anlamına gelir, ancak nihai mukavemette bir miktar artış da görülmektedir. Tipik bir durumda ilave malzeme kullanımı, gerilimi arttırarak dayanımı yalnızca % 10 oranında arttırır. Vulkanizasyon öncesinde elastomer karışımına ince parçacıklar ilave ederek dayanım arttırılabilir. Kauçun sertleştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan karbon karası aynı zamanda en fazla sertliğe neden olan maddedir (Şekil 2.25).

Karbon karası haricinde sıklıkla ince silika karıştırılarak sertleştirme yapılır. Bazı durumlarda maliyet düşürücü önlem olarak "dolgu maddeleri" olarak adlandırılan ucuz partiküller eklenir. Takviye edici bir partikül ile dolgu maddesi arasında sert bir çizgi yoktur. Çoğu dolgu malzemesi bir dereceye kadar güçlendirme sağlar.



Şekil 2.25. Karbon karası kullanımının sertliğe etkisi (Bauman 2008)

Daha önce açıklanan kısımların tümü sıcaklıktan etkilenir. Sıcaklığın etkisi, sıcaklık artışıyla ilişkili herhangi bir kimyasal eylemden ayrı olarak düşünülür. Bu nedenle, düşünülen sıcaklık etkileri kalıcı bozulmaya veya fiziksel özelliklerin değişimine neden olmayan sıcaklık etkileridir. Bu sınırlar içinde artan sıcaklığın etkileri:

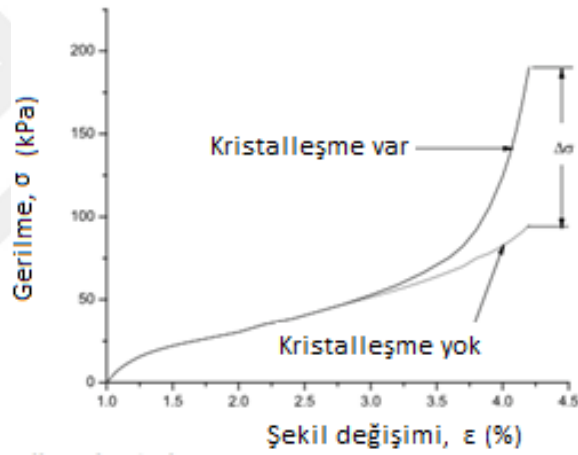
- Histerezis büyüklüğü azalır.
- Yorulma ömrü kısalır.
- Gerilme gevşemesi daha hızlıdır.
- Sürünme daha hızlıdır (Bauman 2008).

Bazı sıvılar ve çeşitli elastomerler arasındaki kimyasal reaksiyonlar elastomerlerin mekanik özellikleri üzerinde ciddi zararlı etkilere neden olabilir. Bu etkilerin incelenmesi doğrudan kimya alanına girmektedir. Tasarım mühendisi, beklenen çalışma ortamında mekanik özellik testleri yaparak bu değişkeni ele alabilir. Beklenen çalışma sıcaklığındaki özelliklerin azalmasını ön görmek için test esnasında sıcaklık yükseltilebilir.

Çeşitli elastomerler, yüksek gerinimde kristalleşir. Bu elastomerler içerisinde takviyesiz doğal kauçuk en göze çarpanıdır. Gerinim kristalleşmesi meydana geldiğinde, gerilme-gerinme eğrisi belirgin bir şekilde yükselir ve nihai kopma mukavemeti artar.

Elastomerin yapısındaki, uzun polimerik zincirler, geniş uzantı ile paralel hizaya getirilir böylece bitişik zincirlerle düzenli bir kristal yapı oluştururlar. Şekil 2.26'da kristalleşen elastomer eğrisi ve kristalleşmeyen elastomer eğrisi arasındaki fark açıkça görülmektedir. Aralarında van der Waals ile bağlanan bir grup paralel zincir, tüm zincirlerin aynı anda kopup çıkmasına neden olur. Bu nedenle, kristalize grubun gücü, tek zincirde kırılma yüküne ulaşan farklı uzantılara sahip bir zincirlerden oluşmuş kristalize edilmemiş elastomere kıyasla çok daha büyüktür.

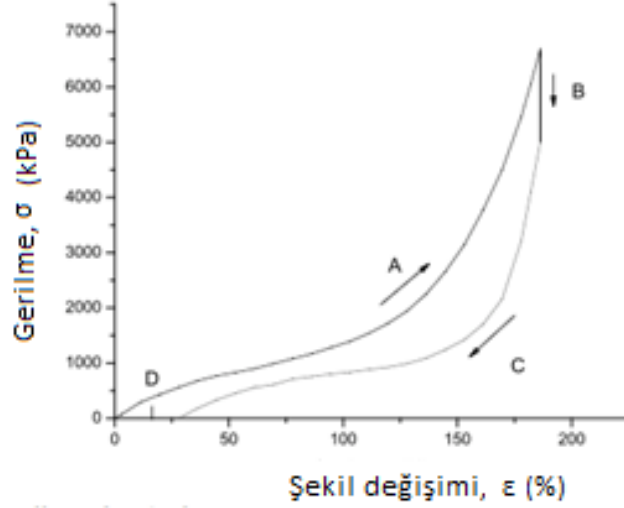
Gerinim kristalleşmesinin, özellikle doğal kauçuk ve polikloropren (neopren) gibi belirli elastomerlerde en belirgin şekilde olduğu görülmektedir. Parçacık takviyesi kristalleşme etkisini azaltır veya ortadan kaldırır. Akrilo-nitril gibi büyük ve polar sınıftaki zincir takviyelerinin elastomere etkisi yoktur.



Şekil 2.26. Şekil değişimi etkisi ile kristalleşme (Bauman 2008)

Kalıcı şekil değiştirme elastomer davranışının eşsiz bir özelliğidir. Elastomer parça uygulanan kuvvet ortadan kalktıktan sonra kalıcı bir deformasyona uğrayabilir.. Bunu ölçmek zordur, çünkü kuvvetin veya strokun süresi gerilme gevşemesi ve / veya sürünme üretir. Şekil 2.27'de elastomer % 100 uzatılmış ve 30 dakika bekletilmiştir. Bu süreçte test numunesinin gerilme-gerinim eğrisi elde edilmiş ve sonrasında parça serbest bırakılmıştır. Geri bırakılan parça % 8 gerinime geri dönmüştür. Birkaç saat sonra ise parça uzunluğunda % 4'lük bir azalma ölçülmüştür. Şekil 2.27, gerçek etkileri en iyi şekilde göstermek için deneysel deneyime göre oluşturulmuştur, ancak gerçek test verileri değildir.

Kalıcı şekil değişimi maksimum deformasyon halinde artar. Eski haline döndüğünde ise tıpkı gerilim gevşemesi gibi zamana bağlıdır. Eski şeklini alma süreci ilk bir kaç saniyede çok hızlıdır, daha sonra yavaşlayan bir şekilde devam eder. (Bauman 2008).



Şekil 2.27. Kalıcı şekil değişimi (Bauman 2008)

Yeni bir numune ilk defa uzatıldıktan sonra, aynı miktarda ikinci kez uzatıldığında daha düşük gerilim üretecektir. Bir süre sonra fazla deformasyona uğramadan, kaybolan gerilimin bir kısmı geri gelecektir. Buna rağmen kalıcı şekil değiştirme sebebiyle numunenin eski şekline dönmesi mümkün değildir.

2.7.1. Hiperelastite Terimleri

Hiperelastik malzemeler metalik malzemelerden farklı olduğu için mekanik özelliklerinin tespiti zordur. Tek eksenli çekme testinde parçanın şekil değişimi sonrası olan boyunun ilk boya oranına uzama oranı (λ) denir

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \epsilon + 1 \quad (2.1)$$

Hiperelastik bir malzemenin bünye denklemi için gerinme enerjisi potansiyeli kullanılır. Bu tanım için invaryant ve uzama oranı değerleri tanımlanır. İnvaryantlar, koordinat sisteminden bağımsız gerinmeleri ölçmek için kullanılır. Gerinme enerjisi potansiyelinin tanımlanması için üç yönde uzama ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) oranı tanımlanır. Burada λ_1

ve λ_2 düzlemdaki uzamaları temsil ederken λ_3 ise düzlem dışı uzamayı temsil etmektedir. Üç yöndeki gerilme invariantları şu şekilde yazılır

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2.3)$$

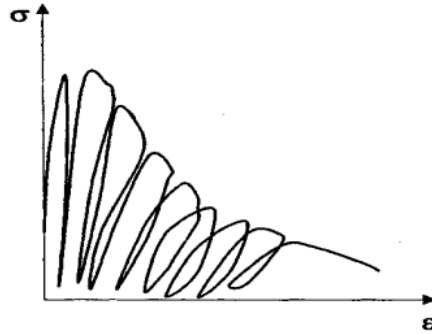
$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2.4)$$

İzotropik ve mükemmel sıkıştırılamaz bir malzeme için $I_3=1$ 'dir. Gerilme enerjisi potansiyeli (W), uzama oranları ve gerilme invariantlarının fonksiyonudur. (Kaya N. ve ark. 2014)

Malzeme testleri ile tespit edilen veriler yardımıyla kauçuk malzemenin hiperelastik malzeme modeli belirlenir. Testlerden elde edilen grafiklere göre sonlu elemanlar malzeme modeli tanımındaki katsayılar tespit edilir. Böylece sonlu elemanlar analizleri yardımıyla kauçuk ürünlerin davranışı hesaplanabilir.

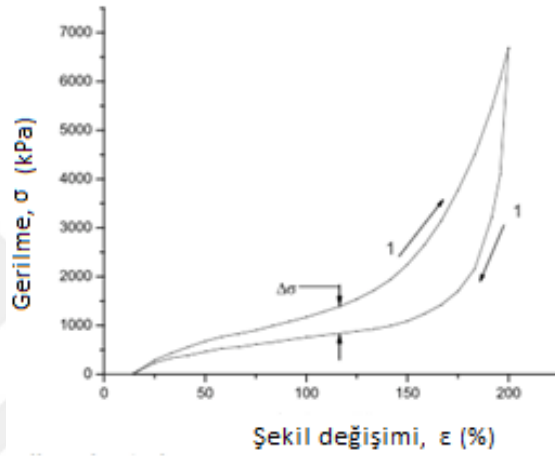
2.7.2. Histerezis

Gerilme- deformasyon diyagramında yükleme boşaltma sonucu oluşan eğriler arasında kalan alan "Histerezis" "Histerezis çemberi veya döngüsü" olarak adlandırılmaktadır. Malzeme sürekli bir yükleme boşaltmaya maruz kalırsa her döngü sonucu malzemede plastik deformasyonlar artar ve elastisite modülünde azalma meydana gelir. Histerezis çemberi içinde kalan alan malzemede yükleme ve boşaltma sırasında ısıya dönüşerek kaybolan enerjidir.



Şekil 2.28. Histerezis çemberi (http://kisi.deu.edu.tr//kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf)

Şekil 2.29 'daki grafik, gerilim maksimum noktaya çıktıktan sonra tekrar başlangıç seviyesine dönerken gerilim ve gerinimdeki farkları göstermektedir. Gerilme farkı $\Delta\sigma$, histeridir. Histerezis iç sürtünmelerden kaynaklanır ve bu da uzama ve kısaltmaya karşı direnç olarak görülür. Histeri elastomerin yapısına bağlı olarak değişir. Elastomerlerin içinde histeri takviyesiz doğal kauçukta en azdır. Mevcut takviye edici madde miktarı arttıkça, testin gerinim oranı artar. Uzama eğrisi sıfır gerilimden önce başlar ve geri çekme eğrisi de sıfır gerinim üzerinde biter.



Şekil 2.29. Uzama ve geri şekil değişimi içeren histeresiz grafiği (Bauman 2008)

Şekil 2.29. , kauçuğun geniş deformasyonunu ve doğrusal olmayan davranışını temsil etmektedir. Sonlu elemanlar analizi için tasarım denklemleri ve sabitlerinin birçoğu bu grafiklerdeki davranışları yeterince temsil etmemektedir. Buna ek olarak, uzama eğrisi sadece kısmen temsil edilebilir. Bazı modeller artan eğimi yansıtmaz ve bazıları test eğrisinin kıvrımlı kısmını temsil etmez. Dolayısıyla, analitik yöntemler, gerilme ve stroke yönlerini her aralıkta temsil edemez. (Bauman 2008).

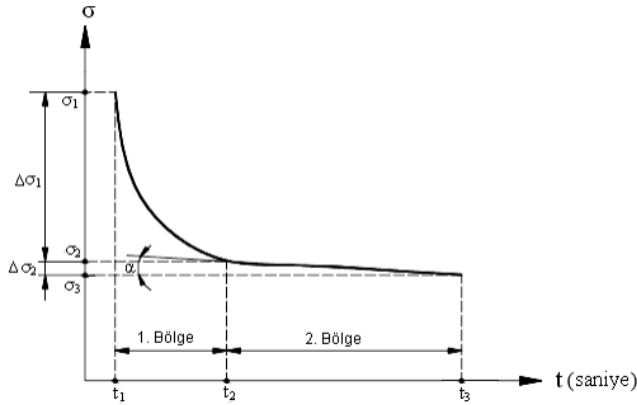
2.7.3. Gerilme Gevşemesi

Kauçuk malzemelerde oluşan gerilme sabit deformasyon altında zamanla azalır. Kauçuk malzemelerin bu davranışı gerilme gevşemesi olarak tanımlanır. Gerilme gevşemesi deneyi malzemenin mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.

Gerilme gevşemesi deneyi önceleri üniversitelerin araştırma projelerinde kullanılırken günümüzde o-ring, keçe, conta gibi ürünlerin imalatının yapıldığı kurumlarda ve otomobil endüstrisinde test metodu olarak kullanılır(TS EN 681-1).

Sabit hızda aktif deformasyon ve sürünme deneyleri malzemelerin plastik özelliklerini ve mukavemetini tespit etmek için kullanılan en önemli deneylerdi. Fakat son yıllarda gerilim gevşemesi popüler olmuştur.

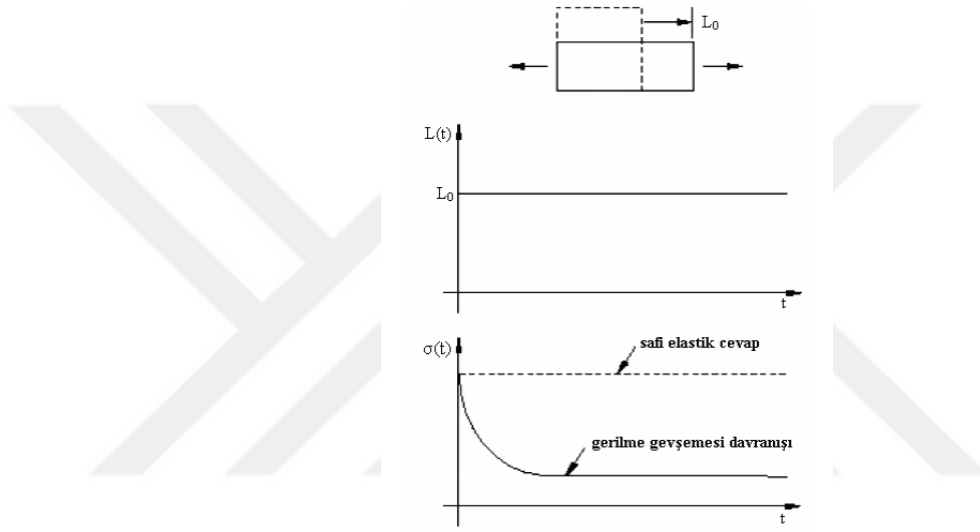
Gerilme gevşemesi deneyinde numune belirli bir şekil değişimine kadar belirli bir hızda çekilir. Parçaya verilen bu deformasyon değerinde parçadaki gerilme maksimumdur. Numune sabit deformasyon altında bekletilir. Bu esnada gerilme zamanla azalır.



Şekil 2.30. Gerilme gevşeme eğrisinde tanımlanan bölgeler (Mazlum 2008)

Şekilde gerilme zaman verileri sabit şekil değiştirme oranına göre tanımlanmıştır. σ₁ - t₁ değerinde gerilme maksimumdur. σ₁ değeri t₁ zamanına karşılık gelmektedir. σ₂ gerilmesi eksponansiyelliğin biterek yaklaşık lineerliğin başladığı noktadaki gerilme değeridir. σ₁ ve σ₂ arasında gerilme azalmaktadır. Gerilmenin azaldığı t₁ ve t₂ zaman aralığı 1.Bölge olarak tanımlanır. σ₃ - t₃ noktasındaki gerilme minimum gerilme değeridir. σ₂ gerilmesinden σ₃ gerilmesine kadar t₂-t₃ zaman dilimleri arasındaki bölgeye 2.Bölge denilir ve bu bölgede gerilme lineer olarak azalır. 2.Bölge' deki eğrinin yatayla yaptığı açı değeri α olarak tanımlanır. Eğrinin σ₁'den σ₂ gerilme değerine düşmesi ile Δσ₁ gerilme düşüşü değeri bulunur. Δσ₁, Gerilmenin hızlı azalmasından dolayı büyüktür. σ₂ gerilme değerinden σ₃ minimum gerilme değerindeki azalma Δσ₂ gerilme düşüşü değeridir. Δσ₁, Δσ₂ 'ye göre daha büyüktür (Bauman 2008).

Gerilme gevşemesinde şekil değişimi sabittir ve parçada oluşan gerilmede zamanla azalma oluşur. Gerilme gevşemesi, sürünme şartları altında sabit şekil değişiminde oluşan gerilme azalmasıdır. Gerilme sabit bir şekil değişimi sağlamak için zamanın fonksiyonu olarak azalır. Bu konuda çalışılan benzer deney sürünme deneyidir. Sürünme ve gerilme gevşemesi aynı temellere dayanmaktadır. Sürünme deneyinde ise gerilme sabittir. Sabit gerilme altındaki parçanın boyundaki değişim incelenir. Gerilme gevşemesi ve sürünme arasında henüz bir eşitlik geliştirilmemiştir.



Şekil 2.31. Gerilme gevşemesi deneyleri (Mazlum 2008)

“Kauçuk türü malzemelerden farklı olarak metallerin büyük gerilme neticesinde sabit boyda tutulması esnasında dislokasyonların tırmanması ve çapraz kayması sonucu zamanla bir plastik şekil değişimi (gerilme gevşeme davranışı) meydana geldiği bilinmektedir.

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.

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.

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.

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 $3,0 \times 10^3$ N/mm² civarında çekme modülüne sahiptirler. Modül zamanla azalır, fakat gerilmenin sıfır noktasına ulaşması yılları alabilir. Lastikler kısa süreyle gerilme gevşemesi oluşumları için 1 N/mm² 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.

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.

Kauçuk türü malzemelere kristalleşmenin etkisi eskiden beri araştırılmaktadır. Kristalleşme en çok gevşeme sürelerinin dağılımının genişlemesine ve gerilme gevşemesi deneyinin daha uzun sürelere yayılmasına neden olmaktadır.

Kristalleşme derecesi bazı polimerlerde gerilme gevşemesi oluşumu sırasında değişebilir. Böyle bir durum -20 °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 Tg'nin altında 0'a düşmesini beklemek yıllar sürer ve pratik değildir.

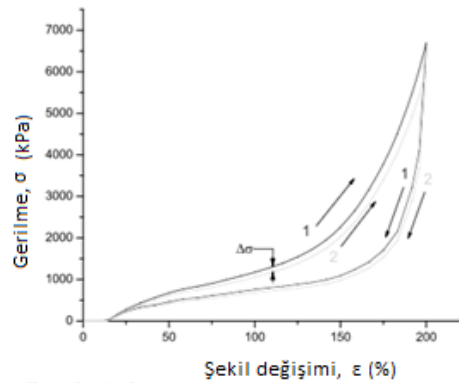
Yarı kristal polimerlerde oda sıcaklığında Tg'nin üzerinde iseler gerilme direnci zamana karşı oldukça yavaş azalır ve çoğunlukla sifıra inmez. Bu da kristal yüzdesine bağlıdır. Kristal yüzdesi arttıkça gerilme direncinde de zamana bağlı olarak azalmaya başlar. Yarı kristal polimerlerde yönlenme ve plastik 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.” (Mazlum 2008).

Gerilme gevşeme deneyinde numuneye uygulanan uzama arttığında gerilmede de artış görülür. Kauçuğun uzatılması sırasında içindeki moleküllerin uzama yönünde birbirine paralel şekil alması durumunda uzamadaki artış kristalleşmenin hızlanmasına neden olur. Kristalleşme artarken gerilme hızla azalır. 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.

Kauçuk malzemelerde sertlik gerilme gevşemesine etki eden parametrelerden bir tanesidir. Sertlik, yumuşak malzemelerde Tip A ve sert malzemelerde Tip D olmak üzere iki çeşit durometre ile tanımlanabilir. Kauçuk türü malzemelerin sertliği Shore Sclereskobu cihazı ile sertlik ölçümü ve IRHD sertlik ölçümü (International Rubber Hardness Degrees) yöntemiyle iki kategoride incelenebilir. (Mazlum 2008).

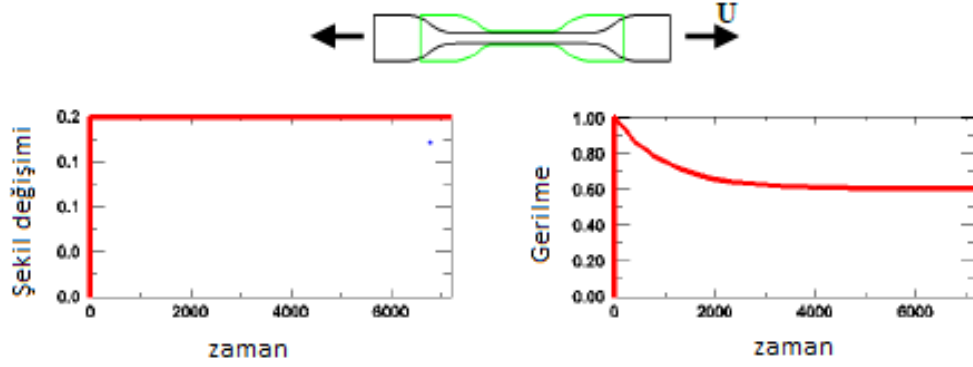
Şekil 2.32' de, aynı maksimum strokta alınan iki ardışık uzama- geri çekme çevrimi vardır. İkinci çevrimin ölçülen gerilmesinin azalması gerilme gevşemesinden kaynaklanmaktadır. Gerilme gevşemesi, sabit şekil değişiminde zamanla gerilme düşüşü olarak tanımlanır. Kauçukta gerilme gevşemesi, moleküler zincir ağını gevşeterek dolaşmalarının kaybolması nedeniyle daha az kuvvet uygulayarak meydana gelir. Bu eylem hem sabit deformasyon hem de çevrimsel deformasyon altında gerçekleşir.

Gerilme gevşeme etkilerinin büyüklüğü, özellikle ilk birkaç deformasyon çevriminde, mühendislik hesaplarında dikkate alınmalıdır. Çevrimsel yükleme altındaki gerilme gevşemesi, kauçuğun sıklık davranışını temsil eder (Bauman 2008).



Şekil 2.32. Gerilme gevşeme davranışı (Bauman 2008)

Gerilme gevşemesinde şekil değişimi sabit tutulur. Şekil değişimi sabitken uygulanan gerilimin nasıl değiştiği incelenir. Cisme kuvvet uygulanır ve şekil değişimi incelenir. Uygulanan kuvvet sonucunda şekil değişimi sabit tutulursa, gerilmelerin zamanla azaldığı tespit edilir.



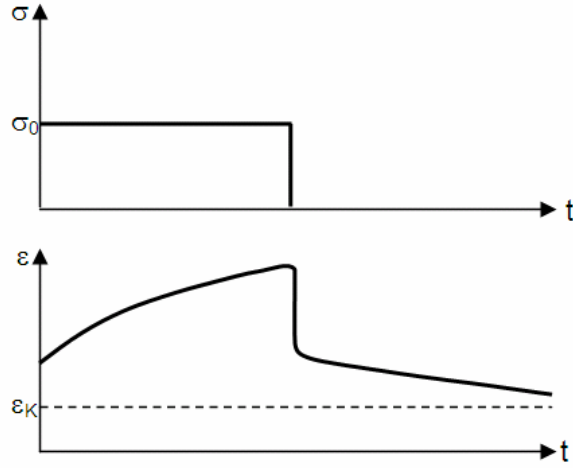
Şekil 2.33. Gerilme Gevşeme Testi (Nandi ve ark. 2014)

“Gevşeme, reolojide incelenen önemli olaylardan biridir. Sürünmede sabit gerilmeden etkilenen malzemede şekil değişimleri incelenir. Gerilme gevşeme olayında ise şekil değişiminin sabit tutulur ve uygulanan gerilmenin nasıl değiştiği incelenir. Şekil değişimi sabit tutulursa, gerilmeler zamanla azalır (Şekil 2.33). Gevşeme olayı özellikle çelik yapıların bulon ve perçinli birleşimlerinde ara sıra görülen gevşekliklerde ve ön gerilmeli beton çeliklerinin uzaması olaylarında kendini gösterir. Benzer şekilde motor silindir kapaklarını sıkın civatalar yeterli ön gerilme ile sıkılmazlar ise zamanla gevşerler.” (http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoel_atisie-reolo.pdf,2018)

2.7.4.Cisimlerde Sürünme(Creep)

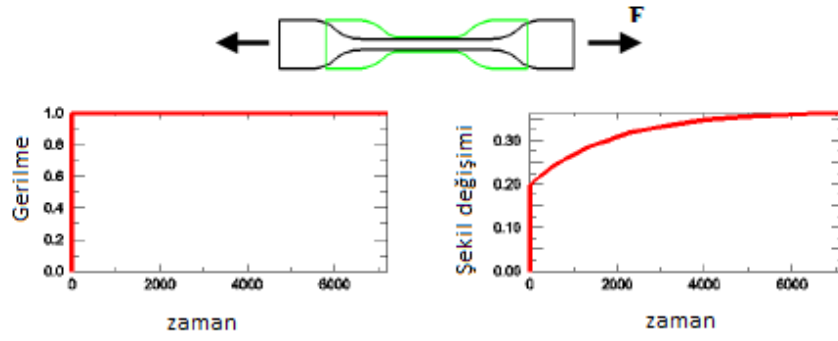
Sürünme kavramı elastomerlerde oldukça önemlidir. Yük altındaki zamana bağlı uzama olarak tanımlanabilir. Bir numunenin uzunluğunun üzerindeki kuvvet etkisi kalktığında kalıcı hale gelen deformasyon sonucu artışı sürünmedir. Sürünme etkisi Şekil 2.34’de gösterilmektedir. Çoğu kauçuk bileşeni tasarlanırken gerilme veya sürünme göz önüne alınır. Gerilme gevşeme ve sürünme kolaylıkla kopma ile başarısızlığa neden olabilir. Her zamanki tasarım yaklaşımı sıkıştırımda yüksek yükleri kabul etmektir.

Sürünme olayında sabit gerilmeye maruz kalmış cisimdeki şekil değişimi incelenir. Gerilmenin kaldırılması halinde cisimde ani bir elastik şekil değişimi azalması görülür. Ancak geciken elastik şekil değişimi sonucunda cisimde kalıcı bir (plastik) şekil değişimi oluşur.



Şekil 2.34. Sürünme (Creep) eğrisi yük kaldırılması durumunda ϵ - t davranışı (http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisier-reolo.pdf)

Özellikle kauçuk cisimlerde araştırılan dayanım halleri kısa süreli deneyler sonucu saptanan parametrelerle belirlenmektedir. Sürünme olayının etkisini anlayabilmek için çok sayıda uzun süreli deneyler yapılmıştır. Bu uzun süreli zorlanma altında kalan cisimlerin çok değişik mekanik özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır. Genel olarak herhangi bir cisme belirli büyüklükte bir kuvvet uygulanıp bu kuvvetin uygulanmasına devam edilince, cismin iki tür şekil değişimi gösterdiği belirlenmiştir. Bunlardan bir tanesi kuvvetin uygulandığı an gösterdiği ani şekil değişimi, diğeri zamanla artan gecikmeli şekil değişimidir. Toplam şekil değişimi bu iki şekil değişiminin toplamıdır. Bu olay ilk olarak 1910 yıllarında metallerde Andrede ve Chalmers, 1905 yıllarında betonda VVoolson tarafından incelenmiştir.



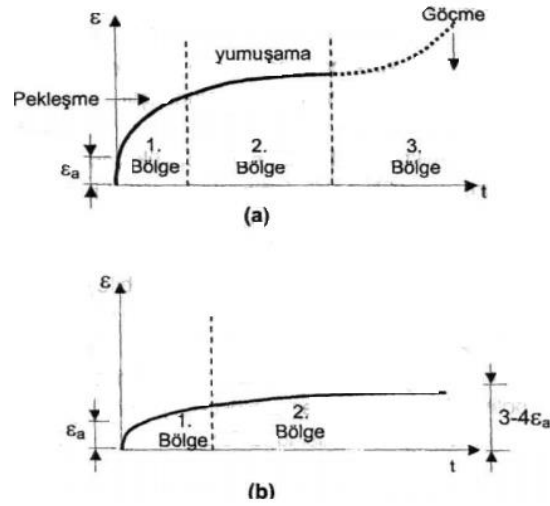
Şekil 2.35. Sürünme Testi (Nandi ve ark. 2014)

Cisimlerde sürünme miktarının bilinmesinde büyük yararlar vardır. Sürünme olayının meydana getirdiği şekil değişimleri belirli bir büyüklüğü aştığında kullanım, görünüş ve emniyet açısından önemli sakıncalar ortaya çıkabilir.

Sürünme çatlaklar meydana getirebilir ve zamanla bu çatlaklar büyüyebilir. Büyüyen çatlaklar yapıyı hem görünüş hem de işlevsellik açısından bozabilir. Isı altındaki metaller, yüksek gerilme değeri altında bazı kayalar, seramikler, polimerler (özellikle termoplastikler) ve beton gibi önemli yapı malzemeleri sürünme olayının etkisindedirler (Mazlum 2008).

“Sürünme Deney örneği belirli bir σ_1 gerilmesi altında tutulup, birim şekil değişimleri kaydedilirse yükün mertebesine ve zamana bağlı karakteristik eğriler elde edilir. Şekil 2.36’da görülen ani bir şekil değişiminden sonra sürünme değerleri oldukça hızlı artar (1. bölge). Sonra şekil değişim artım hızlarının azaldığı 2. bölge vardır. Eğer yükler yeterince büyük ise Şekil 2.36-a’da görülen şekil değişimlerin arttığı 3. bölge oluşur ve bu durum kırılmaya kadar gider. Şekil değişim hızının belirli bir değere varması ile ikinci kısım, diğer bir deyişle sürünme başlar. Bu bölgede sürünme basit bir V_0 hızı ile devam eder. Belirgindir ki bu V_0 birinci bölgedeki şekil değişim hızının en az değeridir.

Gerilmenin kaldırılması halinde cisimde derhal ani bir elastik şekil değişimi azalması ve bunu takiben gecikmeli bir şekil değişimi azalması görülür. Ancak geciken elastik şekil değişimi sonucunda cisimde ek kalıcı bir (plastik) şekil değişimi oluşur (Şekil 2.36).



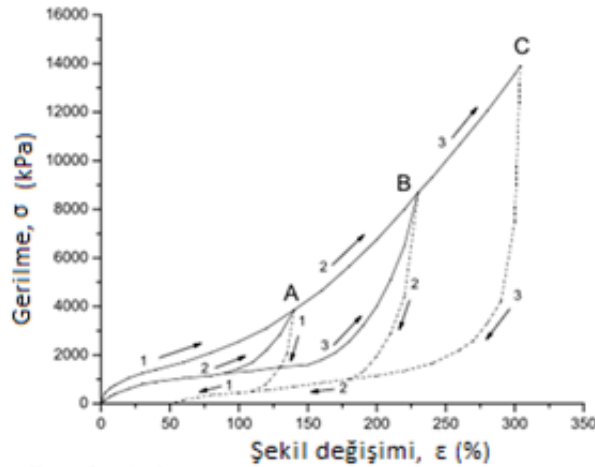
Şekil 2.36. Yüksek(a) ve düşük(b) gerilme durumlarında şekil değişimleri(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastis-reolo.pdf)

Sünme olayı üzerinde, deneysel verilere dayanarak yapılan kuramsal çalışmalar sonucunda, çeşitli araştırmacılar tarafından bu olayı matematiksel olarak tanımlayan, birçok bağıntı öne sürülmüştür. Bunlar genellikle üstel, hiperbolik, kuvvet ve logaritmik formlarda ifadelerdir. Sünme olayını, en önemli yapı malzemesi beton üzerinde kısaca incelemekte yarar vardır. Betonun zamana bağlı şekil değişimi uzun zamandır bilinen bir gerçektir. 30 yıl süreli deneylerde bile betonun sünme yaptığı gözlenmiştir. Eğer uygulanan gerilmeler betonun kırılma gerilmesinden küçük büyüklüklerde ise bu olayın çok önemli sakıncaları olmayabilir. Ancak sünme olayının önemi kısaca şöyle belirtebilir; başlangıçta (yükleme anında) malzeme pratik değeri az olan şekil değişimi gösterirse de, sünme olayı sonucunda şekil değişimlerinin başlangıç şekil değişiminin 3-4 katına ulaştığı görülmüştür. Örneğin deneyler sonucu, betonun etkilendiği gerilme değeri, basınç dayanımının 0.70'ini aştığı takdirde, sünme etkisiyle belirli bir süre sonra betonun dayanımını kaybedip yıkılma durumuna geçebildiği anlaşılmıştır.

Yapılarda toplam şekil değişimlerin sınırlandırılması şeklinde çeşitli ülkelerin şartnamelerinde hükümler vardır. Ayrıca sünme, öngerilmeli betonda önemli gerilme kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle ilk öngerilmeli beton yapılar başarısızlığa uğramışlardır ve aynı nedenle mukavemet hesaplarında sünme etkisi gözönüne alınır.”(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastis-reolo.pdf)

2.7.5. Mullin etkisi

Mullins etkisi belki de çevrimsel deformasyonda ortaya çıkan etkilerin en çarpıcı olanıdır. Şekil 2.37 'de, art arda daha yüksek maksimuma kadar üç uzatma - geri çekme çevrimi gösterilmektedir. Burada, ilk çevrim uzatımı ve maksimum % 100 gerinime geri çekme (A noktası) görüyoruz. İkinci uzamada, gerilme büyük ölçüde azalır fakat gerilmeye devam edilir. İkinci uzatma durdurulur ve % 150'de tersine çevrilir (B noktası). Uzatma eğrisinin geri çekme eğrisinin üzerinde bulunduğu histeretik etki burada görülebilir. Geriye çekme eğrisinin % 100'ün altındaki gerinimde üç döngü içinde aynı seviyeye gelmekte olduğu fark edilmektedir. 3. Üçüncü uzantı, ikinci gibi, birinciden daha aşağıda bir şekilde oluşmaktadır. İkinciye benzer şekilde, üçüncü uzantı yalnızca ikinci ile en çok % 150 eşleşecek şekilde ortaya çıkar. Yine aynı şekilde, ikinci döngü uzantısının % 150'den sonra bir devamı olduğu görülmektedir. % 200 (C noktası) uzatmada, üçüncü çevrim ters çevrilir ve geri çekme ikinci çevrim geri çekmeyi, ikinci çevrimin birinci çevrimi kesmesi gibi keser. Mullins Etkisinin açıklığa kavuşturulması için Şekil 2.37, gerçek bir numunenin hem uzatılmasında hem de geri çekilmesinde ortaya çıkan döngüdeki gerilme gevşemesi ile oluşturulmuştur.



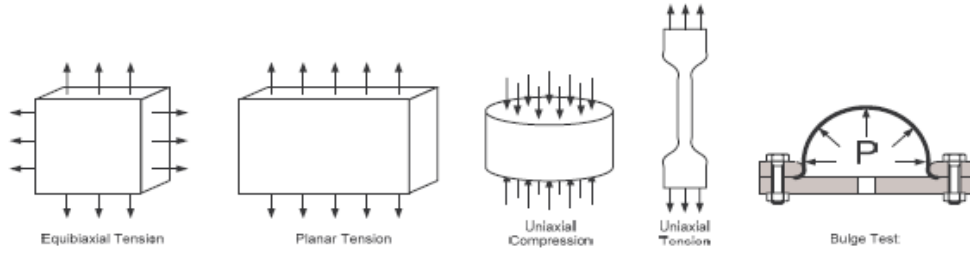
Şekil 2.37. Mullin etkisi (Bauman 2008)

Birinci çevrimden sonra gerilimdeki ani düşüşü gösteren bu grafik ilk uzatma sırasındaki gerilmiş zincir bölümlerinin kopması sebebiyle oluşmaktadır.

Bu nedenle ikinci döngüde uzamanın ortasında birçok zincir zaten kırılmış ve uzatmaya artık direnmiyor ve böylece gerilme daha düşük oluyor. Bu grafik ile gerçek bir test

arasında fark mevcut. Uygulamada, birinci çevrimin maksimum gerginliğine geri döndüğünde, ikinci çevrimin tepe gerilmesinin daha az olacağı düşünülmektedir. Aynı şekilde, üçüncü ikincinin maksimumundan daha az olacak ve bu şekilde devam edecektir. Art arda uzama çevriminde, çevrimden döngüye düşen bir pik gerilimi görülecektir. Buna ek olarak, gerilme düşüşü uzatma ve geri çekme çevrimleri boyunca görülecektir. Bu etki gerilme gevşemesinden kaynaklanmaktadır. Azalan bu gerilme değerlerinden sonra, etkisi kaybolmuş gibi görünebilir, çünkü büyüklüğü negatif üssel bir fonksiyon olarak azalır. Her durumda, gerilme gevşemesi tepkisinin büyüklüğü, ilk uzatma sert polimer zincirlerinin parçalanması nedeniyle ortaya çıkan ani düşüşten daha küçük olacaktır. Gerilme gevşemesi, döngüsel gerilim-gerinme tepkisinin yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. (Bauman 2008).

2.8.Hiperelastik Malzemeler İçin Test Yöntemleri



Şekil 2.38. Hiperelastik Malzeme Test Yöntemleri (Sasso 2008)

Kauçuk üzerine yapılan çalışmalarda araştırmacılar şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu çeşitli matematiksel formlarda elde etmişlerdir. Bu fonksiyon elde edildikten sonra, fonksiyon içerisinde yer alan malzeme sabitleri deneysel olarak bulunmaya çalışılmıştır. Bu amaçla birçok farklı numune ile ve farklı çekme hızları ile deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden en basit ve kolay olanı ise tek eksenli çekme deneyidir. Fakat bu deney tek başına şekil değiştirme enerji fonksiyonu hakkında sınırlı ve yetersiz bilgi vermektedir. Kauçuğun kullanılacağı durumdaki yükleme durumuna göre ve kauçuk malzemenin çeşidine göre yapılacak testlerin sayısı artırılarak daha doğru malzeme modelleri elde edilebilir. Tek eksenli çekme deneyi tüm malzemelere yapıldığı için en çok bilineni ve uygulananıdır. Bunun dışında kauçuk malzemeler için en çok tek eksenli basma, safi kayma, çift eksenli çekme, basit basma, hacimsel basma testleri uygulanmaktadır.

2.8.1. Tek Eksenli Çekme Testi

Robert Hooke 17. yüzyılda tek eksenli çekme deneyi ile metaller için gerilme ve şekil değiştirme arasında lineer bir ilişki olduğunu tespit etmiştir. Kauçuk malzemeler için çekme testleri ilk olarak 19. yüzyılda Gough ve Joule tarafından yapılmıştır. Tek eksenli çekme testi çok eskilere dayandığından numune boyutları ve test standartlara bağlanmıştır. Kauçuk türü malzemelerin tek eksenli çekme testi için ASTM D412, DIN 53504 ve ISO 37 numaralı standartlara başvurulabilir.



Şekil 2.39. Tek eksenli çekme testi

Çekmenin uygulandığı doğrultuda numune boyu genişliğinin en az 10 katı olmalıdır. Tek eksenli çekme testinde sadece bir doğrultuda çekme uygulanmakta ve çekme uygulanan doğrultuda uzama, diğer iki doğrultuda daralma meydana gelmektedir. Test esnasında numune üzerinde oluşan gerilmeler aşağıdaki gibidir;

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2.5.)$$

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2} \quad (2.6.)$$

2.8.2. Düzlem Çekme Testi

Düzlem çekme testinde de tek doğrultuda kuvvet uygulanmaktadır. Bu testte boyu çok kısa ve geniş bir numune kullanılmaktadır. Safi kayma testinde, kuvvetin uygulandığı doğrultuda uzama meydana gelmektedir ancak tek eksenli çekme deneyinden farklı olarak ikinci boyutta kısalma meydana gelirken, üçüncü boyutta değişiklik görülmemektedir.



Şekil 2.40. Düzlem çekme testi (Kaya N. ve Ark.)

$$\sigma_1 = \sigma , \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2. 7.)$$

$$\lambda_1 = \lambda , \lambda_2 = 1 , \lambda_3 = 1/\lambda \quad (2. 8.)$$

2.8.3.Basit Basma Testi

Basma testi, metalik ve metalik olmayan malzemelerin statik yükleme koşulları altında, basma akma mukavemeti, basma mukavemeti, basma elastisite modülü, şekil değişimi, % kesit değişimi gibi mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır.

Basma testi, yükün uygulanması ve bunun numune üzerindeki etkileri açısından çekme deneyinin tam tersidir. Basma deneyi de universal cihazlarında yapılır ve iki basma kafası arasına yerleştirilen numuneye sabit hızla artan bir basma yükü uygulanır. Bu basma yükü neticesinde, numune boyu sürekli kısalırken, numunenin kesit alanı da sürekli artar(<http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/Basma-Deneyi.pdf>).

Basma testi, silindirik kauçuk numunenin iki metal plaka arasında basılmasıyla gerçekleştirilir. Ancak plaka ve kauçuk numune arasındaki sürtünme katsayısının büyük olması nedeniyle basma kuvveti uygulanırken kauçuk test numunesi genişleyememektedir. Bu nedenle hatalı test verileri elde edilmektedir. Sürtünme katsayısı 0,1 olması durumunda bile kayma şekil değişimi meydana gelmektedir. Bazı durumlarda meydana gelen kayma şekil değişimi, basma şekil değişimini aşmaktadır. Bu olumsuzluklardan dolayı bu test yerine iki eksenli eş çekme testi yapılmaktadır.

$$\sigma_1 = \sigma , \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (2. 9.)$$

$$\lambda_1 = \lambda , \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2} \quad (2.10.)$$



Şekil 2.41. Basit basma testi

Basma deneyi sonunda, cihaz tarafından basma yükü – kısalma eğrisi çizilir. Bu eğri çekme deneyinde elde edilen yük – uzama eğrisiyle tamamen aynıdır. Ancak eksenler, basma yükünü ve bu yük neticesinde numunenin boyunda meydana gelen kısalmayı gösterir. Basma yük-kısalma eğrisi de, mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılmayıp, çekme deneyinde olduğu gibi, mühendislik basma gerilmesi (σ) ve mühendislik birim şekil değişimi (% e) değerlerine dönüştürülür

2.8.4.İki Eksenli Eş Çekme Testi

Kauçuk malzemelerin doğru modellenebilmesi için basma bölgelerindeki davranışlarının da bilinmesi gerekmektedir. Ancak tek eksenli basma testinde kauçuk numune ile metal plakalar arasında oluşan sürtünme kuvveti nedeniyle homojen sonuçlar elde edilememektedir. Bu nedenle doğru basma testi sonuçları elde edebilmek amacıyla yapılan araştırmalar sonucunda iki eksenli eş çekme testinin basma testi sonuçlarını verebileceği anlaşılmıştır. Kauçuk malzemelerin sıkıştırılmaz özellikleri nedeniyle tek eksenli basma deformasyonu ile birlikte hidrostatik çekme uygulamak deformasyonu değiştirmemektedir. Bu iki yükleme toplamda iki eksenli eş çekme testine eşittir. Sonuç olarak basma testinde meydana gelen sürtünme etkisinden dolayı da eş iki eksenli çekme testi uygulanmaktadır.(Güven 2014)

İki eksenli eş çekme testinde uygulanan yükler ve oluşan deformasyonlar eşittir.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = 0 \quad (2.11.)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad (2.12.)$$

Kalınlık boyunca uzama oranı sıkıştırılmazlık konumundan bulunur.

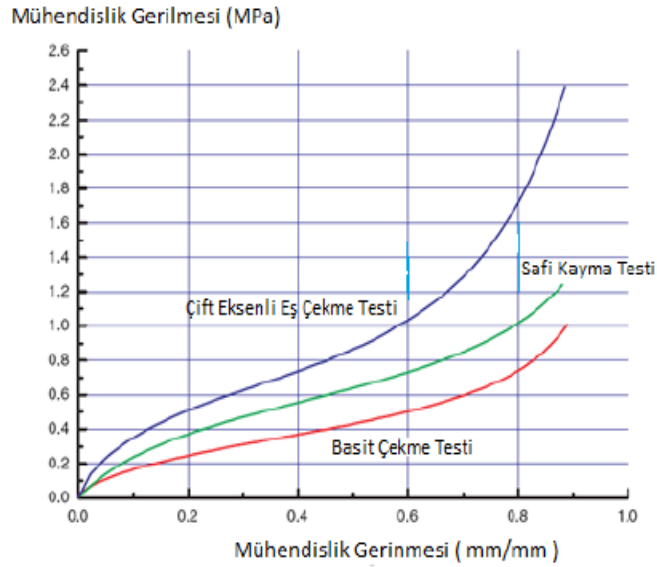
$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1, \lambda_3 = \lambda^{-2}$$

(2.13.)



Şekil 2.42. İki eksenli eş çekme testi (Miller 2000)

Günümüzde hiperelastik malzeme test yöntemlerinden iki eksenli eş çekme testi en az kullanılan testtir. Bu test yönteminde numune ve test fikstürü diğerlerine göre daha karmaşık olduğu için çok tercih edilmemektedir.



Şekil 2.43. Gerilme - şekil değişimi grafikleri (Miller 2000)

2.9.Hiperelastik Malzeme Modelleri

Hiperelastik malzemeler, kuvvet uygulandığında yüksek miktarda şekil değişimi gösterebilir ve kuvvet ortadan kalktığında tekrar eski şekline dönebilir. Bu malzemelerin yük altında uzama davranışı doğrusal değildir. Uzama davranışı hemen hemen sıkıştırılmaz yapıdadır.

Hiperelastik malzemelerin davranışı için birçok malzeme modeli geliştirilmiştir. Ogden Potential, Mooney-Rivlin, , Neo-Hookean, Polynomial Form, Gent, Arruda-Boyce, Yeoh, Marlow gibi birçok malzeme modeli bulunmaktadır. (Karen 2008)

Malzeme testleri ile elde edilen veriler ile malzeme modeli belirlenir. Testlerden elde edilen değerlere göre eğri uydurma yöntemi kullanılarak malzeme modeli tanımındaki katsayılar belirlenir. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ile kuvvet altındaki cismin malzeme davranışı hesaplanır.

Hiperelastik malzemeler için test yöntemleri ulusal ve uluslararası standartlarda henüz tanımlanmamıştır. Çeşitli test yöntemlerinin kauçuk test numunelerine uygulanması ile gerilme-gerinme (stress-strain) verileri elde edilir. Bu veriler eğri uydurma yöntemi ile malzeme modellerinin seçimini ve tanımlanmasını sağlar. (Kaya ve ark.2013)

Hiperelastik malzemelerde küçük yükler altında büyük şekil değişimleri gerçekleşir. Uygulanan yük ve gerçekleşen şekil değişimi doğrudan orantılı değildir. Hiperelastik malzemedeki gerilme ve şekil değişimi arasında da tanımlı bir oran yoktur. Bu değerler arasındaki ilişkilerin tespiti için şekil değiştirme enerji fonksiyonuna ihtiyaç duyulur. Araştırmacılar şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu farklı şekillerde değerlendirmişlerdir.

Hiperelastik malzemeler küçük yükler altında özelliklerini koruyarak elastik büyük şekil değişikliklerine uğrarlar. Hiperelastik malzemenin şekil değişimi ve bu malzemeye uygulanan yük arasında doğru oranı yoktur ve bu ilişkiyi tanımlayacak oran yoktur. Bu ilişkileri tanımlamak için şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu gereklidir. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu farklı şekillerde tanımlamışlardır.

2.9.1. Mooney-Rivlin Modeli

İlk çalışma Mooney tarafından 1940 yılında gerçekleştirilmiştir. Mooney çalışmasını özel ve genel durum olmak üzere iki kısma ayırmıştır. Özel durumda malzemeyi sıkıştırılmaz, izotrop ve kayma gerilmesini kayma şekil değiştirmesi ile orantılı kabullerini yaparak bu kabulleri sağlayan malzemeleri de hiperelastik malzeme olarak adlandırmıştır. Mooney-Rivlin malzeme modelinin uygulamaları çoğunlukla tek eksenli çekme deneyi ile sınırlıdır. Diğer deformasyon çeşitleri ile deneysel veriler elde edilmek istenildiğinde ciddi uyumsuzluklar görülmektedir (Soyel 2008).

Mooney-Rivlin modelinin sonsuz seri şeklindeki gösterimi (3. 7.) numaralı denklemde verilmiştir (Garcia ve ark. 2005).

Mooney-Rivlin:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{ij=0}^{n \rightarrow \infty} C_{ij} \left(I_1 - 3 \right)^i \left(I_2 - 3 \right)^j \quad (2.14.)$$

Burada C_{ij} katsayılarıdır. Mooney-Rivlin modeli %100 gerinmelere kadar çekme testleri için uygundur fakat bası deformasyonlarında kötü sonuçlar vermektedir.

2.9.2. Neo – Hooken Modeli

Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu bu şekilde ilk defa Treloar kullanmıştır. Treloar, yapmış olduğu çalışmada Neo-Hookeen malzeme modelini farklı deformasyonlarda deneysel ve teorik verileri karşılaştırmıştır. Tek eksenli çekme deneyinde %40 şekil değişimi, basit kaymada %90 şekil değişimi ve eş iki eksenli çekme deneyinde %200 şekil değişimine kadar deneysel verilerle teorik veriler uyuşmaktadır. Tek eksenli basma deneyinde teorik ve deneysel sonuçlar oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Buradan bu modelin küçük şekil değiştirme bölgesinde yeterli fakat büyük şekil değiştirme bölgesinde yetersiz olduğu görülmüştür (Soyel 2008). Mooney Rivlin modelinin tek terimli hali bize Neo- Hookeen modelini vermektedir (Garcia ve ark. 2005).

Neo-Hookean:

$$W(I_1) = C_{10}(I_1 - 3) \quad (2.15.)$$

2.9.3.Ogden Modeli

Ogden modeli deneysel verilere eğri uydurma yaklaşımını kullanmaktadır. Herhangi bir gerilme durumu istenilen derecede hassasiyet ile temsil edilebilmektedir. Ogden malzeme modeli üç terime kadar açılır ise tek eksenli, eş-iki eksenli ve basit kayma deneylerinin sonuçları yeterli oranda temsil edilebilmektedir. (Soyel, 2008)

Ogden modeli katı gibi sıkıştırılmaz kauçuklar için kullanılır. Bu model için enerji, (3.10) numaralı denklemde verildiği gibi temel uzamaların fonksiyonudur (Garcia ve ark. 2005).

Ogden:

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=0}^{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_r}{\mu_r} (\lambda_1^{\alpha_r} + \lambda_2^{\alpha_r} + \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (2.16.)$$

Buradaki μ_r ve α_r katsayılarıdır. Malzeme testlerinden elde edilir. Ogden modeli %700'e kadar olan gerinmelerde iyi sonuç sağlar.

2.9.4.Yeoh Modeli

Birçok araştırmacı deney numunesi olarak vulkanize edilmiş fakat katkı maddesi içermeyen kauçuk malzeme kullanmıştır. Yeoh, bu durumun aksine çalışmalarında vulkanize edilmiş ve katkı maddesi içeren malzemeyi test numunesi olarak kullanmış ve bu malzeme için şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu elde etmeye çalışmıştır. Deneysel çalışmalarını daha kolay ve standartlaştırılmış olan tek eksenli çekme deneyi üzerinde gerçekleştirmiştir. İki eksenli çekme deneyinin zor olması ve standart olarak uygulanmayışı nedeniyle kullanmamıştır.

Bu şekil değiştirme enerji fonksiyonunun en büyük faydası sonlu elemanlar paket programlarından birçoğunda üçüncü dereceden deformasyon modelinin bulunmasıdır. Yeoh çalışmalarını vulkanize edilmiş, kauçuğa karbon siyahı katılmış ve katılmamış numuneler için yapmıştır. Her ikisinde de kayma modülünün, Neo-Hookean ve Mooney-Rivlin malzeme modelinin aksine, deformasyonla değiştiğini belirtmiştir. Yeoh önermiş olduğu malzeme modelinde tek eksenli çekme deneyinden elde edilen verilerin farklı deformasyonlardaki gerilme-şekil değiştirme davranışını yeterli ölçüde tanımladığını bu nedenle diğer deneylerin özellikle de iki eksenli çekme deneyine gerek

kalmadan malzemenin davranışının tek eksenli çekme deneyi ile belirlenebileceğini belirtmiştir. (Soyel 2008)

Yeoh malzeme modeline göre şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu (3.11) numaralı denklemde görülmektedir.

Yeoh:

$$W(I_1) = \sum_{n=1}^i C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (2.17.)$$

2.10. Viskoelastik Davranış

Viskozite cismin akmaya karşı gösterdiği direnç olarak cismin akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir.

Kauçuk malzemelerin viskoelastik malzeme özelliklerinin ölçümünde dinamik test cihazında malzeme numunesine sürekli artan ve azalan gerinim, belirli bir frekans aralığında uygulanır. Gerinim ve gerilim arasındaki faz farkı ölçülür. Malzeme ideal bir elastik malzeme davranışı gösterirse, oluşan gerilim, gerinim ile doğru orantılıdır. Gerilim ve gerinim eğrileri aynı fazdadır. İdeal yapışkan bir malzeme için, gerilim ile gerinim hızı doğru orantılıdır. Gerilim ile gerinim arasında 90 derecelik bir faz farkı vardır. Viskoelastik malzemeler için gerilim ve gerinim arasındaki faz farkı elastik (0°) ve yapışkan (90°) davranışların arasında bir değer alır.

Viskoelastik malzemelerin frekans alanında modellenmesinde kullanılan malzeme parametreleri saklanan modül ve kayıp modülüdür.

Saklanan modül (Storage modulus - G'): Bir malzemenin enerjiyi elastik olarak saklayabilmesini temsil eder. Elastik gerilimin gerinime oranıdır.

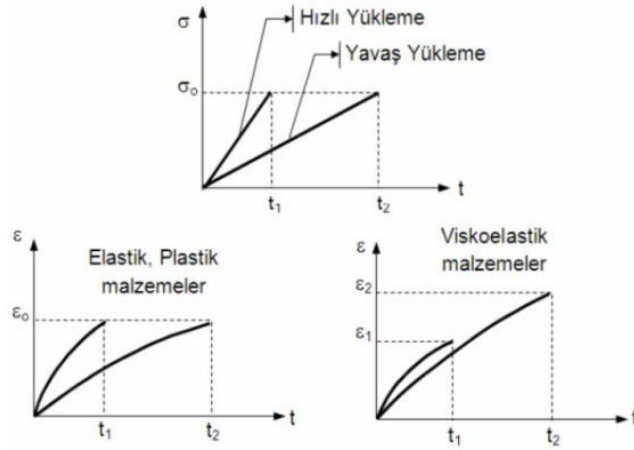
Kayıp modülü (loss modulus - G'') : Bir malzemenin enerjiyi dağıtabilmesini temsil eder ve yapışkan gerilimin gerinime oranı. (Kaya ve ark. 2013)

Reoloji, malzemenin deformasyon ve akış özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Reoloji sözcüğü Yunanca rheo (akış) ve logy (bilimi) sözcüklerinden türemiştir. Akış davranışları bilimi anlamına gelir. Sıvıların akış özelliklerini ve katıların deformasyonunu belirlemek için kullanılır(Yılmaz 2007).

Reoloji kayma oranı ve zamanın bir fonksiyonu olarak viskoz davranışların göstergesidir. Reoloji ilk defa Bingham tarafından ortaya atılmıştır. 1929 yılında Amerikan Reoloji Birliği tarafından kabul edilmiştir. Boya, kauçuk, yağ, plastik, asfalt gibi çok çeşitli malzemeler ile farklı alanlarda reoloji çalışmaları yapılmaktadır. Günümüzde reoloji, süspansiyon reolojisi, biyoreoloji, polimer reolojisi gibi dallara ayrılmaktadır(Barnes ve ark.1989).

Her malzeme uygulanan gerilme altında şekil değiştirir. Hiç gerilme uygulanmasa bile malzemelerin kendi ağırlığı gerilme oluşturur. Her malzeme dış yükleme olmasa da deformasyona uğrar. Katı cisimler için kendi ağırlığından kaynaklanan deformasyonlar ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Şekil değişimi miktarı; gerilmenin şiddetine, uygulama hızına ve doğrultusuna, cismin yapıldığı malzemenin viskozitesine göre değişiklik gösterir. Viskozite cismin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Örneğin, bal suya göre çok daha zor aktığı için viskozitesi daha fazladır(Kalkan 2010).

Viskoelastisite, cisimlerin elastik ve viskoz davranışdır. Bazı malzemeler gerilme altında hem viskoz hem de elastik davranış gösterir. Bir cisme dışarıdan kuvvet uygulanırsa cisimde şekil değişimi meydana gelir. Bu uygulanan dış kuvvet kaldırıldığında cisim ilk şekline geri dönüyorsa cisim elastik davranış gösterir. Eğer dış kuvvet uygulandığında cisimde gecikmeli şekil değişimi oluyorsa cisim viskoz davranış gösterir. Viskoz davranışta zaman önemli iken elastik davranış zamandan bağımsızdır. Viskoz davranış zamana bağlı olduğu için viskoelastik davranış da zamana bağlıdır. Elastik ve plastik davranışlarda yükleme hızı şekil değişimini etkilemez iken viskoelastik cisimde yükleme hızı önemlidir. Viskoelastik davranan bir cisimde yavaş yükleme sonucu oluşan şekil değişimi hızlı yükleme ile oluşan şekil değişimine göre daha büyüktür (Şekil 2. 44.). (http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf).

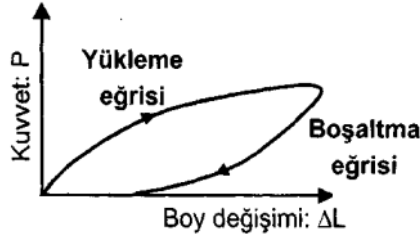


Şekil 2.44. Yükleme hızının şekil değişimine etkisi

(http://kisi.deu.edu.tr//kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf,2018)

2.11. Şekil Değişirme Türleri

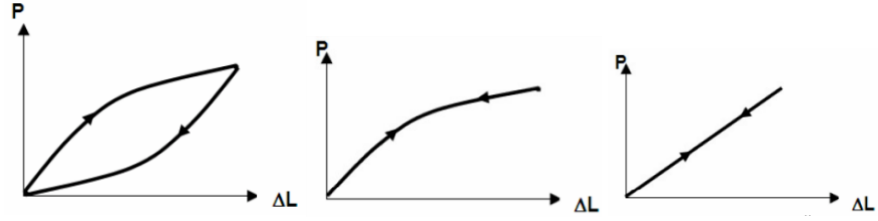
Malzemeler uygulanan yükler karşısında aynı şekil değişimi özelliğini göstermezler. Her malzemenin yükleme karşısında gösterdiği direnç iç dirence bağlı olarak değişebilir. Bir malzemenin deformasyonlara karşı koyması (iç direnci) sıvılar için viskozite katsayısı ile ve katı cisimler için elastisite modülü ile karakterize edilebilir.



Şekil 2.45. Genel yükleme ve boşaltma eğrileri

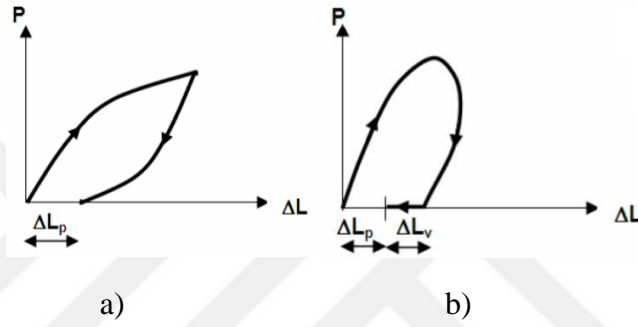
(http://kisi.deu.edu.tr//kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf)

Yükleme ve boşaltma durumu farklı eğriler üzerinde oluşur. Yükleme eğrisinin başladığı nokta ile boşaltma eğrisinin sonlandığı nokta çakışırsa bu şekil değişimine iç sürtümlü elastik şekil değişirme denilir. (Şekil 2.45.). Şekil değişimi dış etkinin kalkması ile tamamen geri dönüyorsa ve cisim eski haline geliyorsa bu tür cisimlere elastik cisim denir.



Şekil 2.46. Elastik şekil değişimi (http://kisi.deu.edu.tr//kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf,2018)

Yüklemeye başlangıcı ile boşaltma sonu çakışmayan şekil değiştirmelerine plastik şekil değişimi denir (Şekil 2.47). ΔL_p kalıcı şekil değiştirmeyi gösterir.

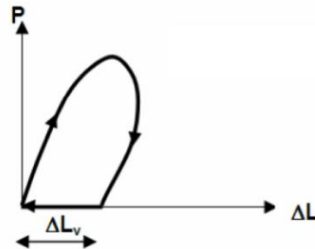


Şekil 2.47. Plastik(kalıcı) şekil değiştirme

(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisie-reolo.pdf)

Bazı durumlarda boşaltma sonunda kalan şekil değiştirme zamanla azalmakla beraber tamamen sıfıra inmez. Burada ΔL_v viskoz şekil değiştirmenin geri dönen kısmını, ΔL_p ise kalıcı şekil değiştirmeyi göstermektedir .

Boşaltma sonunda kalan şekil değiştirmeler zamanla sıfıra inerse viskoelastik şekil değiştirme adımı alır ve ΔL_v ile gösterilir (Şekil 2.48).



Şekil 2.48. İç sürtümlü viskoelastik şekil değiştirme

(http://kisi.deu.edu.tr//kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf)

2.12.Zaman Alanında Viskoelastik Modelleme

2.12.1. Elastik Davranış Modeli.

Robert Hooke, yayda oluşan şekil değişimi ile yaya etkiyen gerilme arasında doğrusal bağıntı olduğunu 1678 yılında yazdığı "Elastisite Teorisi" adlı kitabında yer vermiştir. Hooke cismi olarak adlandırılan sistemde yay tam bir elastik elemandır.

Elastik davranışı simgeleyen bağıntı,

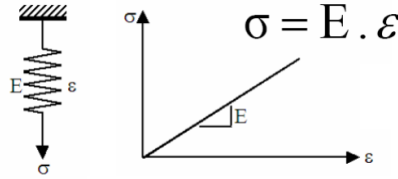
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.18.)$$

şeklindedir.

σ : Gerilme,

E: Elastisite modülü

ε : Birim şekil değiştirme



Şekil 2.49. Hooke cismi ve elastik davranış modeli.

(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisierelo.pdf)

2.12.2. Viskoz Davranış Modeli.

Isaac Newton ise 1687 yılında "Principia" adlı kitabında sıvıların kayma gerilmesi altında gecikmeli şekil değişimi gösterdiğini açıklamış ve tamamıyla viskoz davranış gösteren yağ kutusu (iç sürtümlü amortisör, sönüm kutusu) ile modellemiştir. Bu model Newton cismi olarak da adlandırılmaktadır. Newton cisminde sabit gerilme altında şekil değişimi zamanla sürekli olarak artar. Gerilme kaldırıldığında Newton cismi aldığı son şekil değişimini korur.

Bu viskoz davranışı simgeleyen bağıntıda, normal gerilme durumunda:

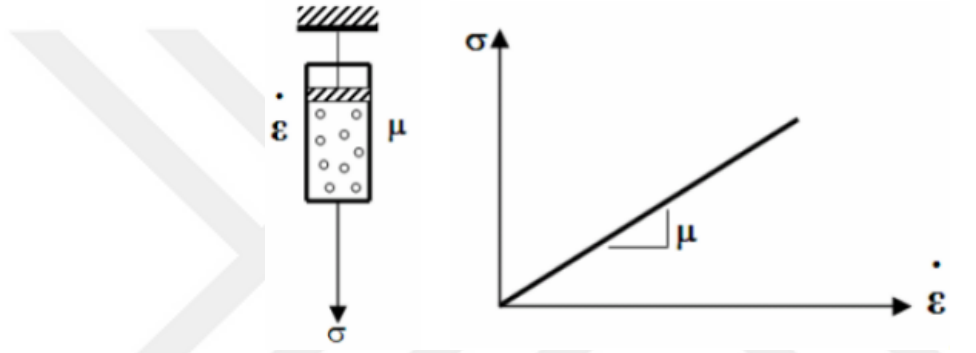
$$\sigma = \mu \cdot \dot{\epsilon} \quad (2.19.)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2.20.)$$

σ : Gerilme,

μ :Viskozite katsayısı

$\dot{\epsilon}$: Birim şekil değıştirmenin zamana göre türevi



Şekil 2.50. Newton cismi ve viskoz davranış modeli.(http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoe lastisie-reolo.pdf)

Sıvılar için Newton yasası, katılar için Hooke yasası kullanılmaktadır.19. yüzyıldan itibaren endüstrileşme ile birlikte bilim adamları sıvı davranışı gösteren katılar ve katı davranışı gösteren sıvılar keşfetmişlerdir Aynı malzemenin farklı gerilmede farklı davranış gösterebildiği keşfetmişlerdir. Yükün uygulama hızının ve büyüklüğünün reolojik davranışa etki ettiğini tespit etmişlerdir. (http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisie-reolo.pdf)

2.12.3. Maxwell Modeli, Kelvin Modeli ve Karışık Model.

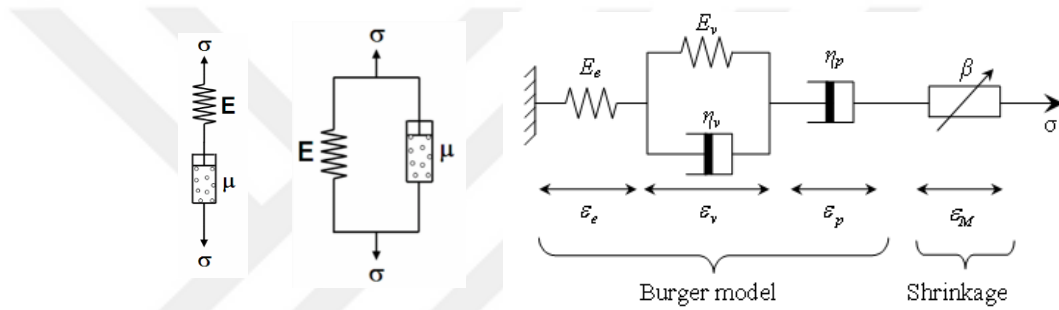
Plastiklerin en belirgin özelliği aynı anda hem elastik hem de viskoz (sıvı) anlamına gelen viskoelastik davranış göstermeleridir. Yani yük altındaki plastikte zamanla uzama meydana gelir. Uzamayı sabit kabul edersek zaman içerisinde gerilmede azalma oluşur.

Bu yüzden plastikler metallerden farklı davranış sergilerler. Bu da sünme ve gevşeme şeklinde kendini göstermektedir.

(<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>)

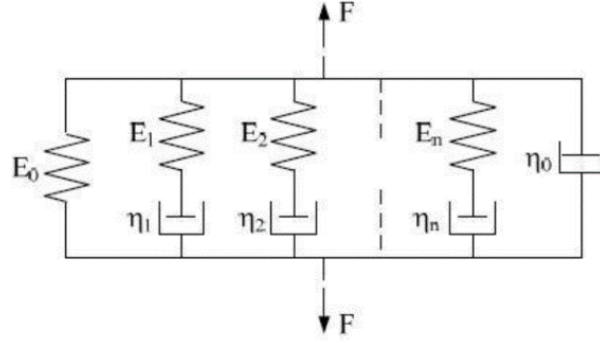
Sünme, sabit bir gerilme altında malzemenin sürekli şekil değiştirmesidir.. Gevşeme ise; sabit şekil değiştirme miktarında iken gerilmenin sürekli azalmasıdır.

Plastik malzemelerin bu davranışı matematiksel model ile açıklanabilir. Bu konu ile ilgili esas itibariyle iki model mevcuttur. Bunlar Maxwell Modeli ve Voight - Kelvin modelidir. Fakat bir üçüncüsü de bu iki modelin karışımı olan karma model vardır (Yavuz Erkek 2016)



Şekil 2.51. Maxwell modeli, Kelvin modeli ve Birleşik Modeli (<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>)

Zaman alanında viskoelastik davranışın modellenmesi için birçok model geliştirilmiştir. Bu modellerde yay ve sönüm elemanından faydalanılır. Eğer yay ve sönüm elemanı seri bağlı ise bu model “Maxwell” modeli, eğer paralel bağlı iseler “Kelvin-Voigt” modeli olarak isimlendirilir. Maxwell modelinde toplam yer değiştirme, yay ve sönüm elemanı üzerindeki yer değiştirmelerin toplamıdır. Kelvin ve Maxwell modellerinin düzenleri ile viskoelastik malzemeler çok iyi simgelenebilir. Bunlardan Maxwell modeli akışkan özelliği üstün cisimlerde tercih edilir. Kelvin modeli ise katı cisimleri daha iyi simgeler. Ancak bu modeller kauçuğun sünme/gevşeme davranışını tam olarak modelleyemezler. Daha doğru modelleme için “Genelleştirilmiş Maxwell” modeli geliştirilmiştir (Şekil 2.51).



Şekil 2.52. Genelleştirilmiş Maxwell modeli (Düşmezkalender 2011)

Genelleştirilmiş Maxwell modelinde, belli sayıda Maxwell modeli paralel bağlanmıştır. Belirtilen modellere viskoelastisite katmak için modeller matematiksel model ile birleştirilmelidir, böylece zaman etkisi modele eklenir(Ghoreishy 2011). Modele ek olarak kalıcı durumu modellemesi için tek başına yay elemanı (G_{∞}) da modele eklenmiştir. Her yay-sönüm elemanı çifti aynı toplam gerinmeye sahip olur. Bu modelin zamana göre kayma (shear) davranışı Prony serisi katsayıları ile şu şekilde ifade edilmektedir:

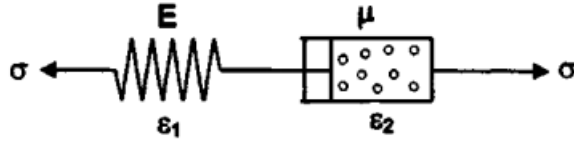
$$G(t) = G_{\infty} \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i e^{\left(\frac{-t}{\tau_i}\right)} \right) \quad (2.21.)$$

Burada;

G_{∞} : kalıcı zaman modülü; g_i, τ_i : Prony serisi katsayıları (malzeme katsayıları); n: Terim sayısı; t: zaman

2.12.4. Gerilme Gevşeme Davranışının Modellenmesi

Gerilme gevşeme oluşumunun birçok özelliğini göstermek için çok basit bir model kullanılabilir. Bunun için sadece seri bağlanmış bir yay ve sönümleyici gereklidir. Sönümleyici ve yayın seri bağlı olduğu modele Maxwell ünitesi adı verilir.



Şekil 2.53. Maxwell modeli

(<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>)

Yay için gerekli değerler σ_1, ϵ_1, E (2.22.)

Daspot için gerekli değerler $\sigma_2, \epsilon_2, \eta$ (2.23.)

Yay için;

Çekme gerilmesi $\sigma = E \cdot \epsilon$ (2.24.)

Kayma gerilmesi $\tau = G \cdot \gamma$

Daspot için;

Çekme gerilmesi $\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$

(2.25.)

Kayma gerilmesi $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$ (2.26.)

formülleri ile ifade edilir.

Alan sabit kabul edilirse kuvvet uygulandığında yay ve daspot seri bağlı olduğundan doğan “gerilme” ;

$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ olur. (2.27.)

$E \cdot \epsilon_1 = \eta \cdot \dot{\epsilon}_2 = \eta \cdot (d\epsilon / dt)$ (2.28.)

Uygulanan yük sonucu yay hemen şekil değiştirir ϵ_1 kadar şekil değiştirirken daspot zamana bağlı şekil değiştirir. Bu uygulanan kuvvet sonucu oluşan deformasyonun hem yay hem daspotta toplam “şekil değiştirme” miktarı;

$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ olur. (2.29.)

Sürünme için şekil değişimi;

$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ (2.30.)

$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\epsilon_1}{dt} + \frac{d\epsilon_2}{dt}$ (2.31.)

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.32.)$$

$$d\varepsilon = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_1}{dt} \cdot dt + \frac{\sigma}{\eta} \cdot dt \quad (2.33.)$$

$$d\varepsilon = \frac{1}{E} d\sigma_1 + \frac{\sigma}{\eta} \cdot dt \quad (2.34.)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \cdot t \quad (2.35.)$$

Gerilme gevşemesi için; (2.36.)

$$\varepsilon t = \text{sabit} \quad (2.27.)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \quad (2.38.)$$

$$0 = \frac{1}{E} \frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.39.)$$

$$t = 0 \text{ başlangıcında durum } \sigma = \sigma_0 \quad (2.40.)$$

Uygulanan gerilme σ_0 ,

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\left(\frac{\sigma_0}{\eta}\right) / E \quad (2.41.)$$

$$d\sigma = -\left(\frac{\sigma_0}{\eta}\right) / E \cdot dt \quad (2.42.)$$

integrali alınırsa;

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right) t} \quad (2.43.)$$

Bu denklemin eğrisi gerilme gevşeme eğrisini verir. Bu model “gerilme gevşeme” davranışını açıklama bakımından yeterli fakat “sürünmeyi”, şekil değiştirmeyi açıklama bakımından yetersizdir(<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>).

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 sönümleyici gerinmeye başlar, yay gerinme öncesi pozisyonuna döner ve model üzerindeki gerilme 0'a gelir (Ataç 1999).

3.MATERYAL VE YÖNTEM

Kauçuk malzemeden imal edilen sızdırmazlık elemanlarının zaman içinde görevlerini yerine getirmeleri beklenir. Ancak kauçuk malzemeler gerilme-gevşemesi nedeniyle özelliklerini kaybederler. Kauçuk malzemelerden imal edilen ürünlerin özelliklerinin zaman içinde nasıl değiştiğinin modellenmesi ile ürün ömürleri belirlenebilir. Bu çalışmada kauçuk sızdırmazlık elemanının hiperelastik ve zaman alanında viskoelastik modellenmesi yapılmış, sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme-gevşeme analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3. 1.'de bazı kauçuk sızdırmazlık elemanları görülmektedir(Yavuz Erkek 2016).



Şekil 3. 1. Kauçuk sızdırmazlık elemanları (Yavuz Erkek 2016).

Sızdırmazlık elemanları makinaların içerisindeki sıvının dışarıya çıkmasını engeller. Dışarıdaki sıvının, tozun içeri girmemesini sağlamak için kullanılırlar. Ancak zamanla kauçuğun özelliklerini kaybetmesi beklenen bir sonuçtur. Bu sürecin modellenmesi ile daha tasarım aşamasında ürünün istenen sızdırmazlığı ne kadar süre içinde sağlayabileceği hesaplanabilir. Bu çalışmada sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan örnek ürünlerin sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme-gevşeme modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar gerçek test verileri ile karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi "parçadan bütüne gitme" genel prensibine dayanmaktadır. Sonlu eleman; iki veya üç boyutlu yapıların bir parçası veya bir bölgesidir. Bu yöntemin ilk ve en geniş uygulama alanı "gerilme analizi"dir. Sonraları ısı analizi, akışkan analizi, piezoelektrik analizi, elektrik analizi vb. alanlarda da kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle geometrik modeli oluşturmak gerekir. Ardından mesh işlemi ile eleman ve node (düğüm noktaları) oluşturulur.

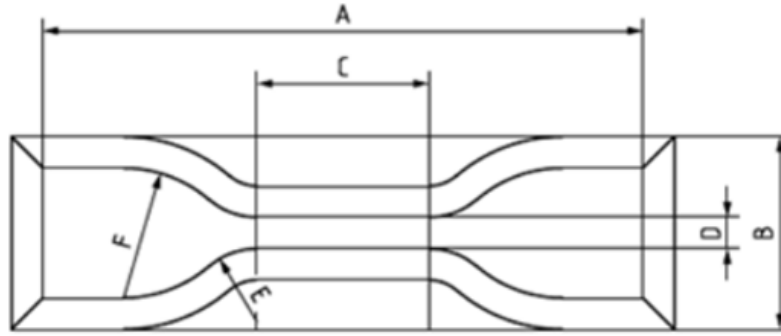
3.1. Kauçuk Ürünler ve Malzeme Testleri

Bu çalışmada kullanılan tüm kauçuk test numuneleri ve ürünlerin ana hammaddesi 70+5 Shore A Sertlik değerine sahip NBR- Nitril Bütadien Kauçuktur.

3.1.1. Tek Eksenli Çekme Testinde Kullanılan Kaşık Numunesi

Tek eksenli çekme testi için kaşık test numunesi kullanılmıştır (Şekil 3. 2.). Test numunesi için referans alınan standart TS ISO 37-s.11.'dir.

Her bir numune kalınlığı $2,00 \pm 0,20$ [mm] dir. Yapılan testte Tip 1 kaşık test numunesi kullanılmıştır. Çizelge 3. 1. ' de görüldüğü gibi Tip 1'in Şekil 3. 2 de gösterilen C uzunluğu 33 ± 2 [mm] 'dir.



Şekil 3. 2. Kullanılan kaşık test numunesinin TS ISO 37 standartlarına göre şekli

Çizelge 3.1. TS ISO 37 Standartlarına göre kaşık test numunesinin ölçüleri

Uzunluk	Tip 1	Tip2	Tip3	Tip4	Tip 5
A Toplam uzunluk(minimum) (mm)	115	100	75	50	35
B Uçların genişliği (mm)	25 ± 1	25 ± 1	$12,5 \pm 1$	$8,5 \pm 0,5$	$6 \pm 0,5$
C Dar bölümün uzunluğu (mm)	33 ± 2	21 ± 1	25 ± 1	16 ± 1	$12 \pm 0,5$
D Dar bölümün genişliği (mm)	$6,2 \pm 0,2$	$5 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
E Dış çap (mm)	14 ± 1	11 ± 1	$8 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
F İç çap (mm)	25 ± 2	25 ± 2	$12,5 \pm 1$	$10 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$



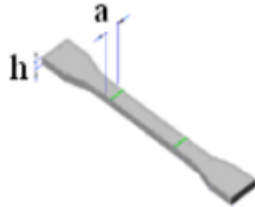
Şekil 3. 3. Testte kullanılan kaşık test numuneleri

Kesit alanı Şekil 3. 4' de görülen test numunesinin kalınlık (h) ve genişlik (a) değerleri kullanılarak eşitlik 4. 1 ile hesaplanır.

$$A= h \times a \quad (3. 1.)$$

%ε: yüzde uzama; l_0 : numunenin ölçülen ilk boyu, l: numune kopmadan önce max. uzamada ölçülen son boyu olmak üzere eşitlik (3.2.) kullanılarak hesaplanır.

$$\% \varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.2.)$$



Şekil 3. 4. Test numunesi h ve a ölçüleri

Bu çalışmada kullanılan test numunesi için;

C=33 mm (Şekil 3. 2'deki C değeri)

a= 6.2 mm

h=2 mm

$A=ha = 6,2 \times 2 \text{ mm} = 12,4 \text{ mm}^2$ olarak bulunmuştur.

3.1.2. Basma Testinde Kullanılan Disk Numunesi

Basma deneyi numunelerinde, homojen bir gerilme durumu elde etmek amacıyla dairesel kesitli numuneler tercih edilir(Şekil 3. 5.). Fakat kare ya da dikdörtgen kesitli numuneler de kullanılabilir. Basma deneyi numunelerinde önemli olan bir özellik, numunenin çapı (d_0) ile yüksekliği (h_0) arasındaki orandır. Bu oranın h_0/d_0 çok büyük olması, numunenin deney sırasında bükülmesine ve gerilmenin numune üzerinde homojen olarak dağılmamasına neden olur, dolayısıyla yanlış sonuçlar elde edilir. Bu nedenle, pratikte üst limit olarak $h_0/d_0 \leq 10$ oranı önerilir. Basma numunesinde yüksekliğin çapa oranının çok kısa olması da istenmez, alt limit olarak da $h_0/d_0 \geq 1.5$ oranı önerilir. Numune boyutlarının $h_0/d_0 < 1.5$ olması durumunda, numune ile numunenin basıldığı plakalar arasında meydana gelen sürtünme deney sonuçlarını etkileyecek kadar yükselir. Genel olarak, basma numunelerinde $h_0/d_0 \geq 2$ oranı en fazla kullanılan orandır.

Bununla beraber, farklı malzemeler için farklı h_0/d_0 oranları kullanılmaktadır.



Şekil 3. 5. Basma testinde kullanılan disk numune

Gerilme ve birim şekil değişimi hesaplamalarında, numunenin orijinal kesit alanı ve orijinal uzunluğu esas alınmakta ve bu şekilde hesaplanan gerilme ve birim şekil değişimi değerleri, mühendislik gerilme ve mühendislik birim şekil değişimi değerleri olarak tanımlanmaktadır. Basma deneyinde, deney ilerlerken numune boyu kısalarak, numunenin kesit alanı sürekli olarak arttığı için, çekme deneyinde olduğu gibi gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerleri de hesaplanır. Ancak gerçek gerilme değerleri hesaplanırken, yük, numunenin orijinal kesit alanından daha büyük “o anki” kesit alanına (A_i) bölüldüğü için, basma gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi, basma mühendislik gerilme birim şekil değişimi eğrisinden daha düşük değerler

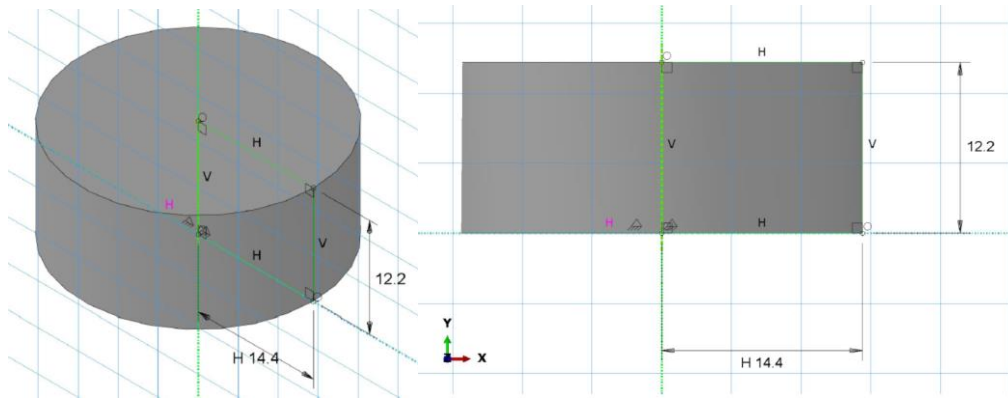
verir. Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma eğrilerinde gerçek gerilme değerleri birbirine eşittir. Ancak, mühendislik çekme ve basma eğrilerinde plastik bölgedeki mühendislik basma gerilmesi değerleri, çekme gerilmesi değerlerinden daha fazladır.

Basma deneyinde gerçek gerilmeler, çekme deneyinde olduğu gibi, herhangi bir andaki yük değerinin o andaki kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Basma deneyinde % birim şekil değişimi, numunenin boyundaki kısalmanın, orijinal boyuna oranının % olarak ifadesidir. Basma deneyinde numunenin yüksekliği azaldığından, % birim şekil değişimi negatif bir değerdedir ve % birim şekil değişimi % yığılma olarak da tanımlanır.([http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/Basma Deneyi.pdf](http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/Basma_Deneyi.pdf))

Basma test numunesi için referans alınan standart TS 4595 ISO 815'dir.Standartlarda geçen basma numunesinin standart ölçüleri;

Çap= 29 mm

Kalınlık=12,5 (+/-0,50) mm 'dir.



Şekil 3. 6. Basma numunesi ve ölçüleri

Bu çalışmada kullanılan basma numune ölçüleri ise;

Çap= 28,8

Kalınlık=12,2 mm 'dir.(Şekil 3. 6)

Basma gerilmesi (σ),

$$\sigma = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.3.)$$

Basma birim şekil değişimi(ϵ),

$$\% e = \frac{h_i - h_0}{h_0} \times 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (3.4.)$$

σ : Basma gerilmesi

P_i : Basma yükü,

A_0 : Numunenin orijinal kesit alanı,

$\% e$: % Birim şekil değişimi,

h_0 : Numunenin orijinal uzunluğu,

h_i : Numunenin P_i yükü altındaki uzunluğu,

Δh : Numunenin P_i yükü etkisi altında boyundaki kısalma miktarı olarak tanımlanır.

Basma deneyinde gerçek gerilmeler, çekme deneyinde olduğu gibi, herhangi bir andaki yük değerinin o andaki kesit alanına bölünmesiyle,

$$\sigma_g = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.5.)$$

şeklinde bulunur.

σ_g : Gerçek basma gerilmesi,

P_i : Herhangi bir andaki basma yükü,

A_i : P_i yükünün uygulandığı anda numunenin kesit alanı olarak tanımlanmıştır.

Mühendislik gerilme ve birim şekil değişimi değerlerinden,

$$\sigma_g = \sigma_m (1 + e) \quad (3.6.)$$

Eşitliği ile hesaplanır.

σ_g : Gerçek basma gerilmesi,

σ_m : Mühendislik gerilmesi,

e: Basma mühendislik birim şekil değişimi değeri olarak tanımlanmıştır.

Basma mühendislik birim şekil değişimi değerinin negatif olduğu göz önünde tutulmalıdır. Basma mühendislik birim şekil değişimi değerinin mutlak değeri alındığında gerçek basma gerilmesi,

$$\sigma_g = \sigma_m (1-e) \quad (3.7.)$$

Eşitliği ile hesaplanır. Basmada gerçek birim şekil değişimi de yine çekmedekine benzer şekilde,

$$\varepsilon = \ln (1+e) \quad (3.8.)$$

Eşitliği ile tanımlanır. Ancak, burada mühendislik birim şekil değişiminin negatif değerlerde olduğu göz önüne alınarak ve “e” değerinin mutlak değeri alınarak,

$$\varepsilon = \ln (1-e) \quad (3.9.)$$

Eşitliği ile hesaplanır.

ε : Gerçek birim şekil değişimi,

e: Mühendislik birim şekil değişimi olarak tanımlanmıştır.

Elastisite modülü (E), çekme deneyinde olduğu gibi, gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin başlangıçtaki elastik deformasyon bölgesinin eğimi olarak tanımlanır. Buna göre basma da elastisite modülü (E),

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3.10.)$$

Eşitliği ile hesaplanır.

E: Elastisite modülü,

σ : Elastik bölge içerisinde herhangi bir gerilme değeri,

e: Söz konusu gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değişimi değeri olarak tanımlanır. Elastik bölge içerisinde ise çekme ve basma değerleri eşit olduğundan, bir malzemenin çekme ve basma da elastisite modülü eşittir.

Çekme deneyinde hesaplanan % kesit daralması, basma deneyinde % kesit değişimi olarak,

$$\% \text{ Kesit değişimi} = \frac{A_f - A_0}{A_0} \times 100 \quad (3.11.)$$

eşitliği ile hesaplanır.

A_f: Numunenin basmadan sonraki kesit alanı,

A₀: Numunenin orijinal kesit alanı olarak tanımlanmıştır. (<http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/Basma-Deneyi.pdf>)

3.1.3. Contalar

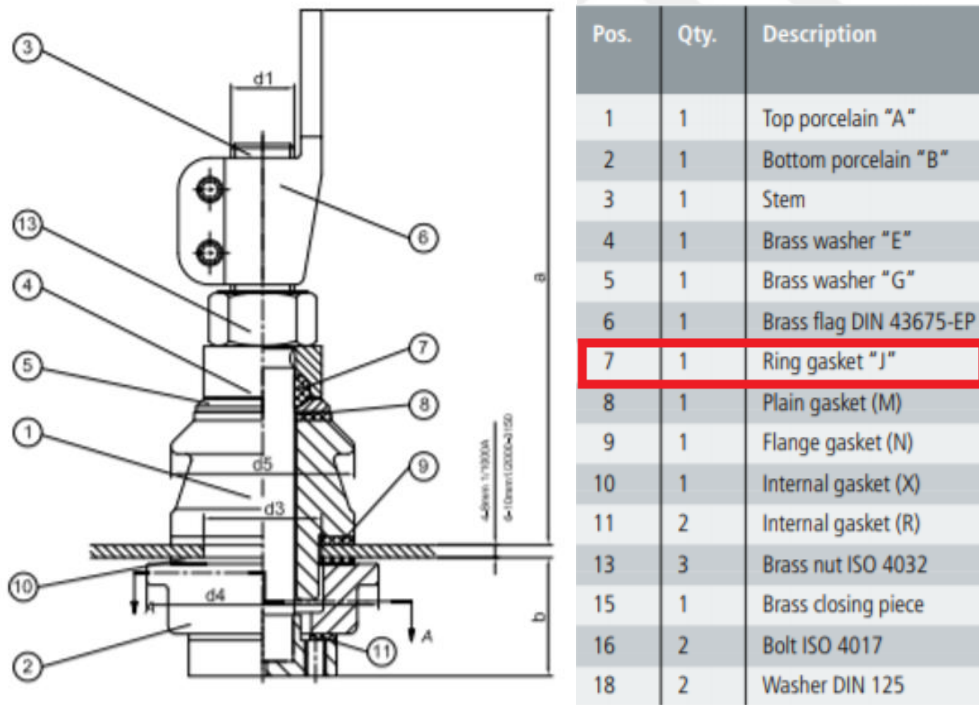
Bu çalışmada analizi ve testleri gerçekleştirilen ürün, yağlı tip transformatörlerde sızdırmazlık sağlanması için kullanılan contalardır (Şekil 3. 8). Bu contalar düşük voltajlı porselen transformatör burçlarında kullanılır (Şekil 3. 7). Kullanılan bu contalar, transformatör yağına dayanıklılık ve yapıştırıcısız kullanım söz konusu olduğu yerlerde kullanılır.

Transformatör (trafo), A.C sistemlerde gerilimin seviyesini frekans değiştirilmeden manyetik indüksiyon yoluyla dönüştürmek için kullanılan ve hareketli parçası bulunmayan bir elektrik makinesidir.

Transformatörler genellikle enerji iletiminde ve dağıtımında kullanılır. Elektrik enerjisinin santrallerden, kullanım alanlarına iletimi sırasında hatlarda ısı şeklinde güç kaybı ve gerilim düşümü olur. Bu durumu asgariye indirmek için güç sabit tutulup gerilimin yükseltilmesi gerekir. Bu akımın düşürülmesi demektir. Böylece hatlarda kullanılan iletkenlerin kesitleri küçülür, kayıplar azalır ve iletken maliyeti dolayısıyla da iletim maliyetleri düşer. (http://www.robotiksistem.com/transformator_nedir_transformator_yapisi.html)



Şekil 3. 7. Contaların kullanıldığı transformatör burç ızalatör çeşitleri (<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A5011&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>)



Şekil 3. 8. Porselen transformatör burcunda contanın konumu (http://www.flister-elektrotechnik.de/files/content/Elektrotechnik/trafozubehoer/pdfs_trafozubehoer/Durchfuehrungen.pdf)

Transformatör burçlar, tüm elektrik şebekelerinde kritik rol oynarlar, çünkü bunların başlıca görevi, topraklanmış bir bariyerden yüksek voltajda akım geçirmektir. Bu burçlar basit tasarım ve sağlam yapı nedeniyle periyodik temizlik dışında çok az bakım gerektirir. Burçlar, yataydan dikeye herhangi bir açıda monte edilebilir. 1,2 kV ile 34,5 kV arasındaki voltaj değerlerinde mevcuttur.

Büyük conta ölçüleri;

Kalınlık=16 mm

İç çap= 30 mm

Dış çap= 47 mm' dir.(Şekil 3.11.)

Küçük conta ölçüleri;

Kalınlık=18 mm

İç çap= 12 mm

Dış çap= 30 mm' dir (Şekil 3.12.)

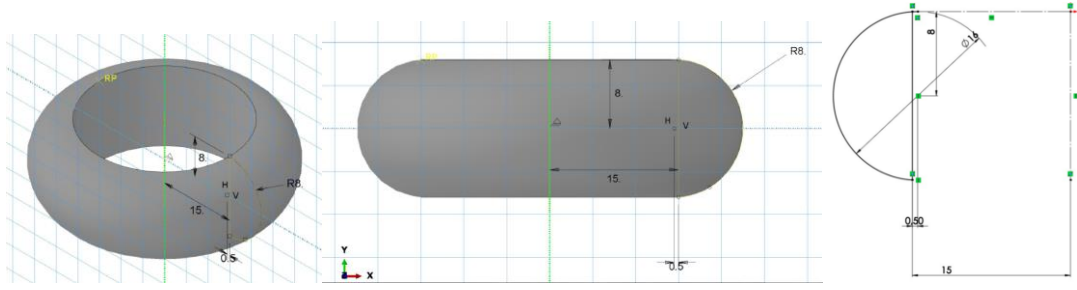
Bu çalışmada iki farklı conta üzerinde çalışılmıştır(Şekil 3.9-Şekil 3.10).Contaların teknik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Büyük conta ölçüleri;



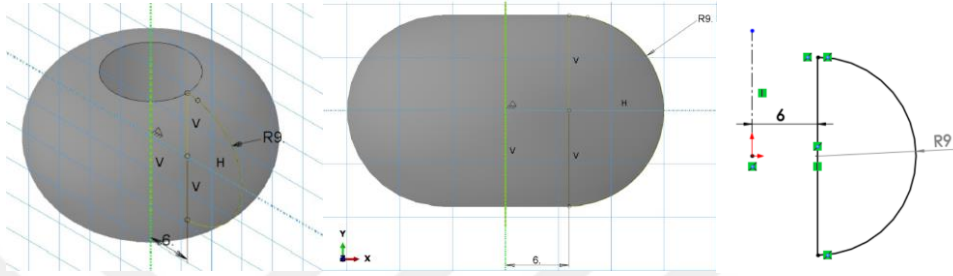
Şekil 3. 9. Büyük conta



Şekil 3.10. Küçük conta



Şekil 3.11. Büyük conta ölçüleri



Şekil 3.12. Küçük conta ölçüleri

Çizelge 3. 2. Bu çalışmada kullanılan contalardan istenen teknik özellikler (ABB Elektrik sanayi teknik şartname)

TEKNİK ÖZELLİKLER	GEREKLİ SARTLAR	TEST METODU
Renk	Siyah	Gözle muayene
Uzama	min. %200	ISO 37
Yoğunluk	-1.3 gr/cm ³	ISO 2781
Serilik	70±5 Shore A	ISO 868
Cekme Mukavemeti	Min. 7 N/mm ²	ISO 37
Dayanıklılık	Güneş ışığına dayanıklı olmalıdır.	—
Kirilganlık Noktası	max. -30°C	ISO/R 812
Çalışma Sıcaklığı	-20 — +100°C	
Kalıcı deformasyon 100°C'de 22 saat sonra	max. %20	ISO 815
Kalınlık Toleransı	O-ring ve seriflerde resim üzerinde verilir.	
	Fitil contalarda; ± d/20 (d: conta çapı)	
70 +2/-0 saat yaşlandırma sonrası hacimdeki değişim		ISO 1817
* 100°C yağda nr.1	-%10 — +%5	
* 100°C yağda nr.3	-%5 — +%10	
İzolasyon Yağını Yaşlandırma %PF	max. 1.5	ASTM D 3454
100°C'de havada 72 saat yaşlandırıldıktan sonra		ISO 188
a) Serilik Artışı	max. 10 Shore A	
b) Çekme mukavemetinde azalma	Max. %20	
c) Uzama Azalması	Max. %35	

Transformatör (trafo), A.C sistemlerde gerilimin seviyesini frekans değiştirilmeden manyetik indüksiyon yoluyla dönüştürmek için kullanılan ve hareketli parçası bulunmayan bir elektrik makinesidir.

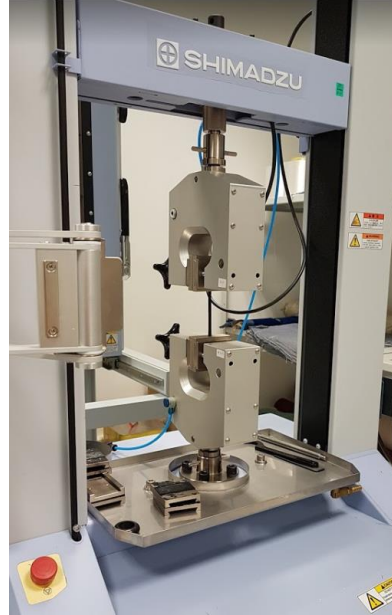
4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1.Kauçuk Ürünler için Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis

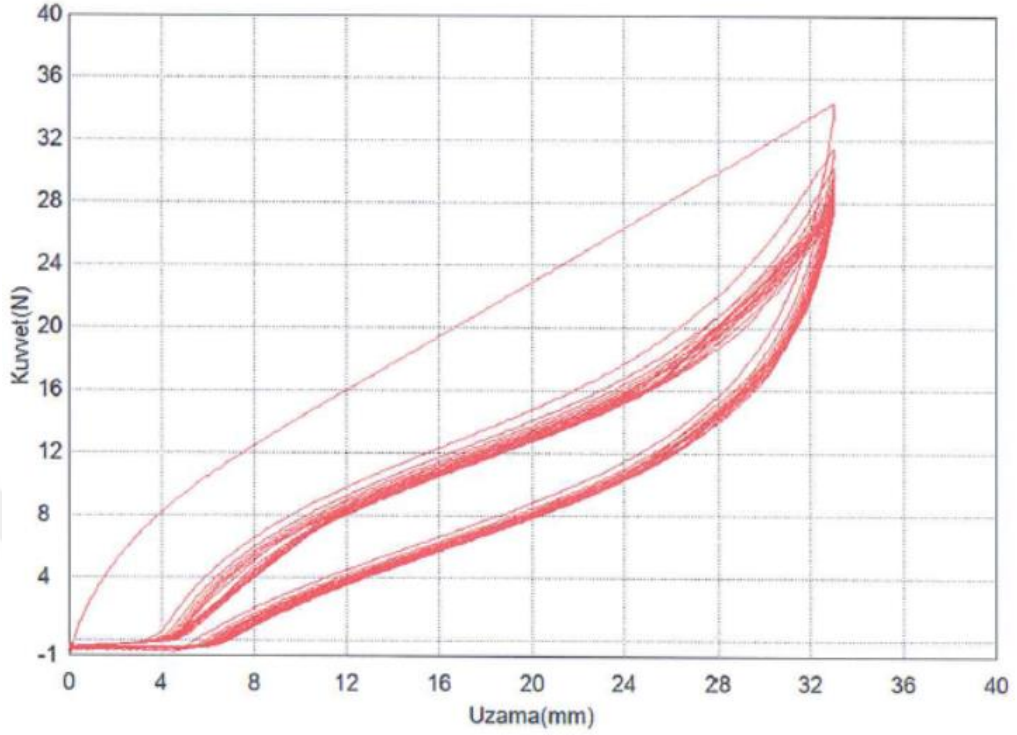
Bu çalışmada yapılan testler Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi (BUTEKOM)'nde yapılmıştır. Kullanılan cihaz Shimadzu AGS-X 'dir(Şekil 4.1.).Tüm testler $20\pm 2^{\circ}$ C de yapılmıştır. Nem oranı 65 ± 4 %RH 'dır. Kaşık Test numunesi ve basma test numusinde histerezis,gerilme gevşeme testleri yapılmıştır.Büyük ve küçük contalarda ise farklı yüzde sıkıştırılmalarda gerilme gevşeme testleri yapılmıştır.

4.1.1. Çekme Testinde Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis

Test hızı 100 mm/dakika ve çeneler arası mesafe 33 mm'dir.Uzama oranı 33 mm (%100) 'dir.Ön çevrimli ve ön çevrimsiz iki ayrı test uygulanmıştır.Ön çevrim sayısını belirlemek için histeresiz yapılmıştır.



Şekil 4.1. Kaşık numunesinin gerilme gevşeme testi



Şekil 4.2. Kaşık numunesinin 20 çevrimli histerezis grafiği

Uzatılıp bırakılan numunede her çevrimde farklı kuvvet uzama değerleri görülmektedir. Bu farklılık gösteren kuvvet-uzama eğrileri her çevrimde birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 4.2'deki grafikte 'Mullin etkisi' görülmektedir. Açığa çıkan enerji ısıya dönüşür. Çevrim sonucu kalıcı set (permanent set) oluşur.

Histeresiz değerlerine göre yirmi çevrimde kuvvet ve gerilme değerlerinin yakınsadığı ve parçanın stabil hale geldiği anlaşılmıştır(Çizelge.4.1.). Çevrimli gerilme gevşeme testlerinde numune yirmi kez uzatılıp bırakılmıştır. Bu işlemde sonra tekrar uzatılıp gevşemeyi tespit etmek için beklenmiştir. Çizelge.4. 2.- Çizelge.4. 3'de kaşık numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri görülmektedir.

Çizelge.4.1. Kaşık numunesinin 20 çevrimli Histerezis değerleri

Numune Adı Sample Description	Kauçuk Kaşık Numunesi / Rubber Spoon Sample				
	15 mm Uzamadaki Kuvvet / Force at 15 mm Elongation	15 mm Uzamadaki Gerilme / Stress at 15 mm Elongation	Histeresiz / Hysteresis	Histeresiz Kaybı / Lost Hysteresis	32 mm Uzamadaki Kuvvet / Force at 32 mm Elongation
Birim/Unit	N	N/mm ²	Joule	%	N
[1Çevrim/Cycle]	18,6062	1,57680	0,37689	58,4143	33,5545
[2Çevrim/Cycle]	11,7221	0,99339	0,16841	39,9062	29,3246
[3Çevrim/Cycle]	11,1526	0,94514	0,14932	37,6088	27,7443
[4Çevrim/Cycle]	10,8745	0,92156	0,14142	36,6670	26,9881
[5Çevrim/Cycle]	10,7007	0,90684	0,13688	36,1499	26,5135
[6Çevrim/Cycle]	10,5794	0,89655	0,13413	35,8728	26,2179
[7Çevrim/Cycle]	10,4857	0,88861	0,13230	35,7276	25,9880
[8Çevrim/Cycle]	10,4110	0,88229	0,13091	35,6296	25,8212
[9Çevrim/Cycle]	10,3449	0,87668	0,12972	35,5326	25,6932
[10Çevrim/Cycle]	10,2811	0,87128	0,12887	35,5282	25,5334
[11Çevrim/Cycle]	10,2139	0,86559	0,12723	35,3133	25,4092
[12Çevrim/Cycle]	10,1575	0,86081	0,12566	35,0825	25,2816
[13Çevrim/Cycle]	10,1121	0,85695	0,12453	34,9324	25,1426
[14Çevrim/Cycle]	10,0860	0,85474	0,12364	34,8294	25,0379
[15Çevrim/Cycle]	10,0566	0,85226	0,12316	34,8026	24,9807
[16Çevrim/Cycle]	10,0181	0,84899	0,12283	34,8011	24,9355
[17Çevrim/Cycle]	9,99094	0,84669	0,12253	34,8067	24,8839
[18Çevrim/Cycle]	9,97768	0,84557	0,12208	34,7787	24,8280
[19Çevrim/Cycle]	9,94740	0,84300	0,12150	34,7045	24,7716
[20Çevrim/Cycle]	9,92036	0,84071	0,12107	34,6524	24,7374

Ön çevrimsiz ve yirmi kez uzatılıp bırakılan yirmi çevrimli test sonucunda kuvvet zaman ve gerilme zaman grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.3 'de görüldüğü gibi kuvvet başlangıçta 34 N iken 3600 sn. sonra 22 N'a düşmektedir.

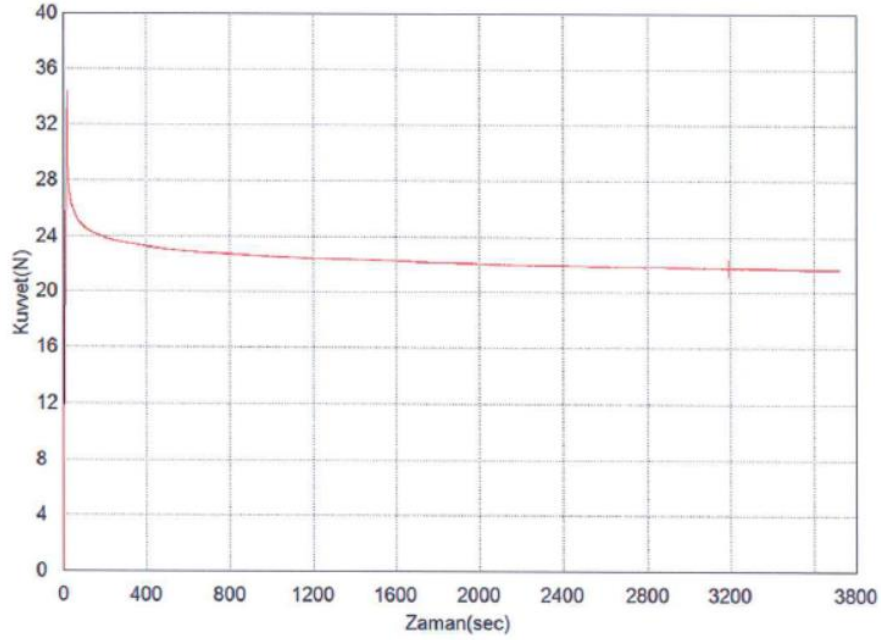
Çizelge 4.2. Ön çevrimsiz testte kauçuk kaşık numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri

Numune Adı Sample Description	Kauçuk Kaşık Numunesi / Rubber Spoon Sample										
	Zaman/Time (s/sec)	80	140	200	380	620	920	1220	1820	2720	3620
Kuvvet/Force (N)	24,73	24,15	23,83	23,28	22,87	22,62	22,41	22,13	21,85	21,67	
Gerilme/Stress (N/mm ²)	2,10	2,05	2,02	1,97	1,94	1,92	1,90	1,88	1,85	1,84	

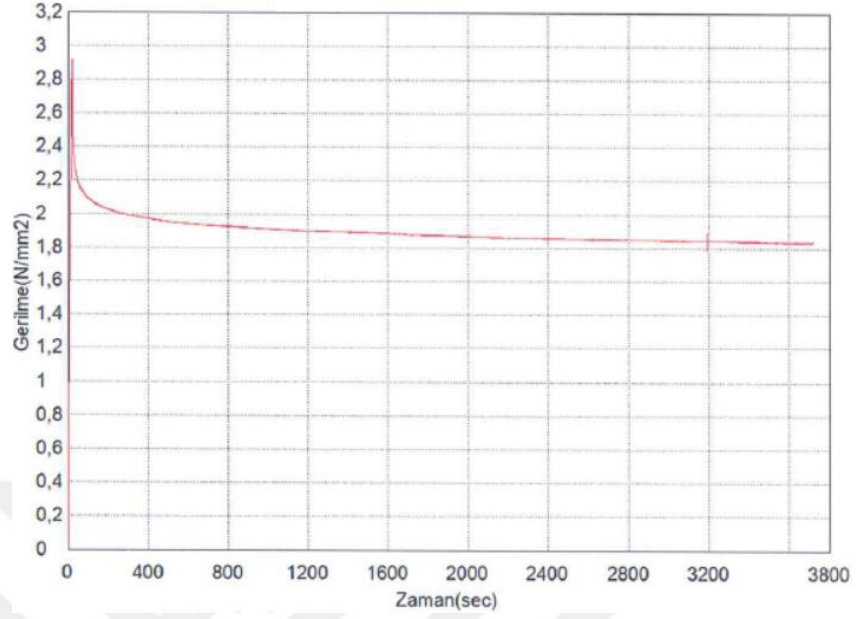
Çizelge 4.3. Ön çevrimli testte kauçuk kaşık numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri

Numune Adı Sample Description	Kauçuk Kaşık Numunesi / Rubber Spoon Sample									
Zaman/Time (s/sec)	80	140	200	380	620	920	1220	1820	2720	3620
Kuvvet/Force (N)	23,02	22,66	22,43	22,08	21,78	21,59	21,43	21,25	21,02	20,88
Gerilme/Stress (N/mm ²)	1,95	1,92	1,90	1,87	1,85	1,83	1,82	1,80	1,78	1,77

Şekil 4.4' de Mullin etkisi olmadan(ön çevrim yapılmadan uzatılıp bekletilen test numunesinin gevşeme değerleri görülmektedir. Başlangıçta 2. 9 N/mm² olan gerilme değeri yaklaşık 1.85 N/mm² değerine düşmüştür.

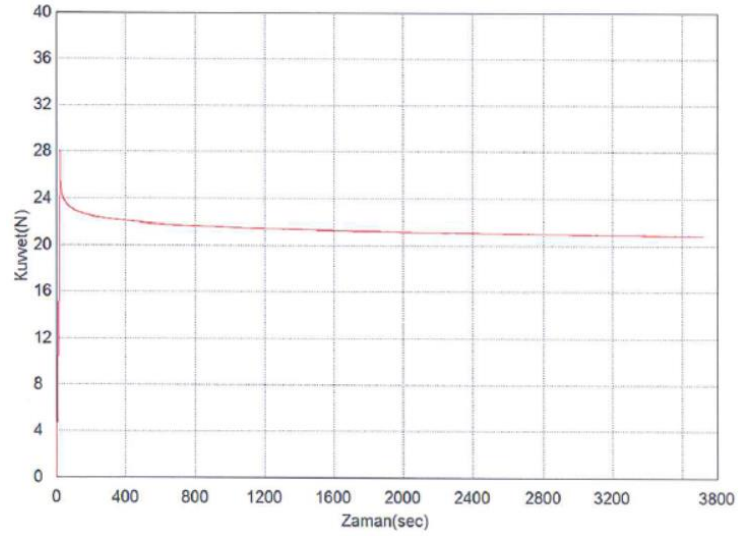


Şekil 4.3. Ön çevrimsiz gerilme gevşemesi kuvvet-zaman grafiği

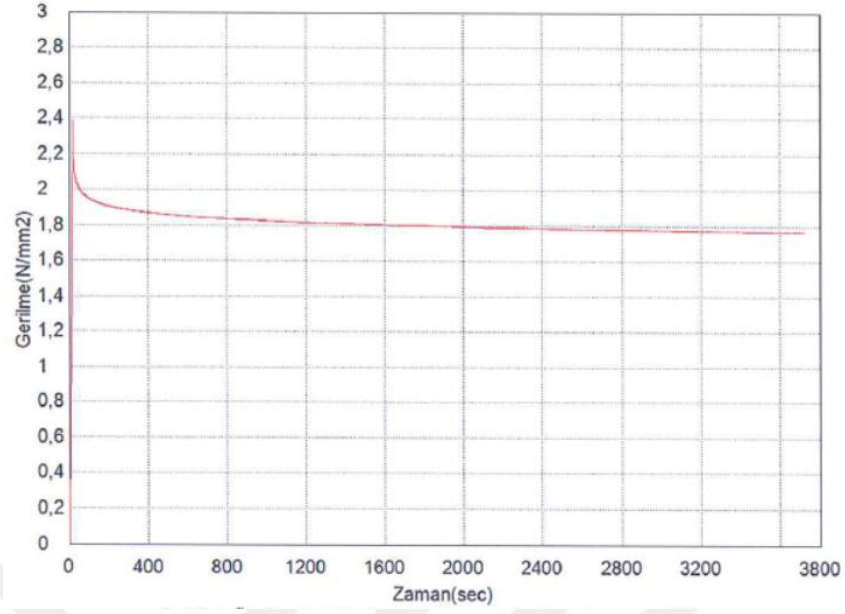


Şekil 4.4. Ön çevrimsiz gerilme gevşemesi gerilme-zaman grafiği

Ön çevrimli(20 kez çekilip bırakılan) test numunesinin reaksiyon kuvveti çevrimsiz teste göre daha düşük tespit edilmiştir. Çevrimsiz testte yaklaşık 34 N olan reaksiyon kuvveti çevrimli testte 28 N civarındadır. Gevşeme sonucunda ise bu değer yaklaşık 21 N'a düşmüştür(Şekil 4.5).Gerilme değeri ise 2. 4 N/mm²'den 1.78 N/mm² 'ye düşmüştür.



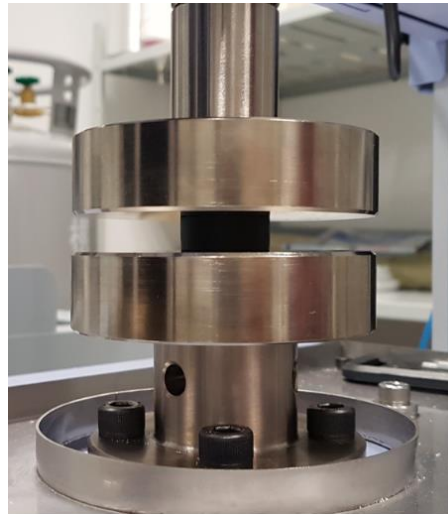
Şekil 4.5. Ön çevrimli gerilme gevşemesi kuvvet-zaman grafiği



Şekil 4.6. Ön çevrimli gerilme gevşemesi gerilme-zaman grafiği

4.1.2. Basma Testinde Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis

Çapı 28.8 mm, yüksekliği 12.2 mm olan basma test numunesi üzerinde çalışma yapılmıştır (Şekil 4.7.). %20 ve %40 basma ile histerezis testleri yapılmıştır. Histerezis testleri ile parçanın stabil olduğu çevrim sayısı 20 olarak tespit edilmiştir (Çizelge.4.6.- Çizelge 4.7.).

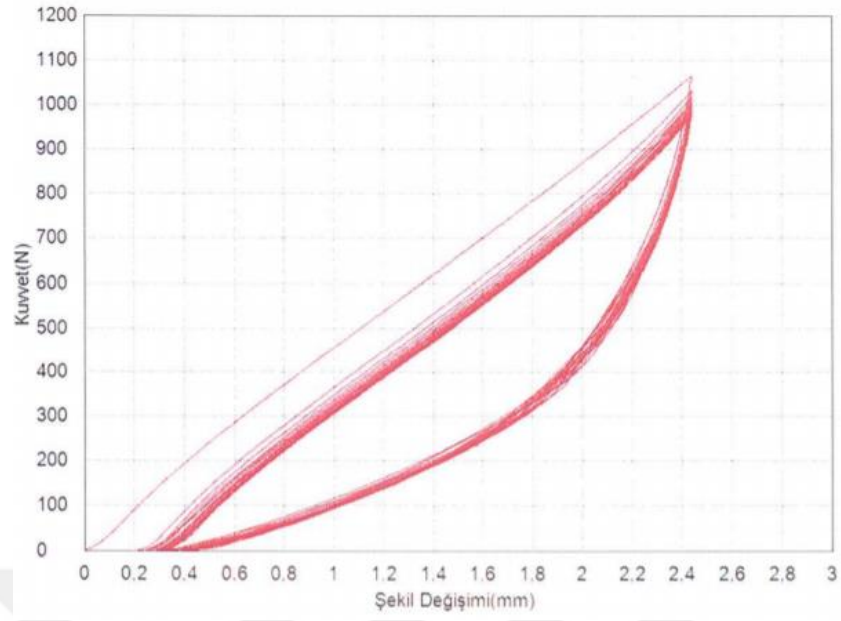


Şekil 4.7. Basma test numunesinin gerilme gevşeme testi

Basma test numunesi üzerinde ön çevrimli parçada ve ön çevrimsiz parçada gerilme gevşeme testleri yapılmıştır. Her iki durum için parçada %20(2.44 mm) ve %40 (4.88 mm) basma değerlerinde gerilme gevşeme testleri yapılmış ve sonuç grafikleri kuvvet zaman ve gerilme-zaman olarak elde edilmiştir. Yapılan bu testlerinde test hızı 3 mm/dak. , ön yük =1N ‘dur. Elde edilen histeresiz grafikleri Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11’de görülmektedir.

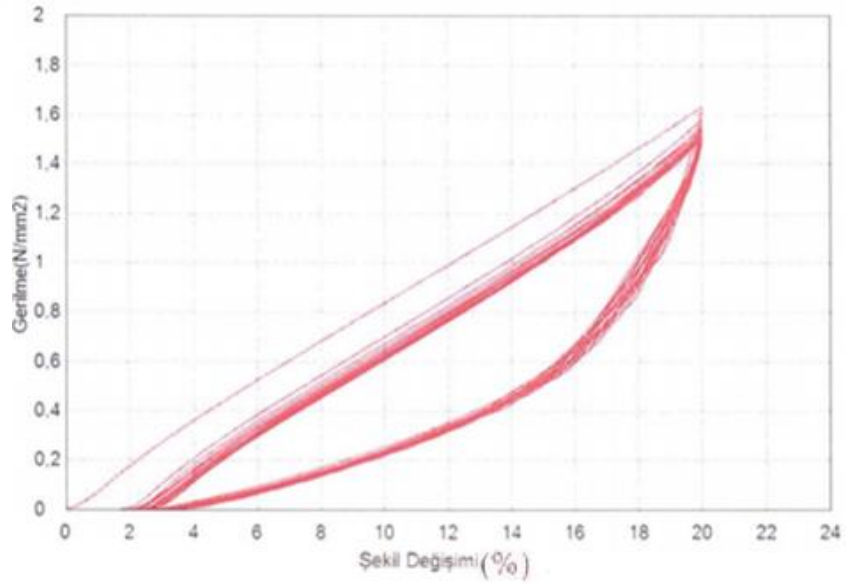
Çizelge 4.4. Basma numunesinin %20 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz değerleri

Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample							
	Kuvvet/ Force (1 mm)	Gerilme/ Stress (1 mm)	Kuvvet/ Force (2 mm)	Gerilme/ Stress (2 mm)	Kuvvet/ Force (2,4 mm)	Gerilme/ Stress (2,4 mm)	Histeresiz / Hysteresis	Histeresiz Kaybı / Hysteresis Loss
Birim/Unit	N	N/mm ²	N	N/mm ²	N	N/mm ²	Joule	%
[1Çevrim/ Cycle]	455,426	0,69911	868,743	1,33357	1045,68	1,60518	0,72748	55,1889
[2Çevrim/ Cycle]	364,906	0,56015	793,885	1,21866	1006,32	1,54476	0,55404	49,4476
[3Çevrim/ Cycle]	347,779	0,53386	774,897	1,18951	990,558	1,52057	0,52579	48,6125
[4Çevrim/ Cycle]	338,575	0,51973	764,681	1,17383	981,231	1,50625	0,51166	48,2262
[5Çevrim/ Cycle]	332,647	0,51063	758,010	1,16359	975,117	1,49686	0,50270	47,9941
[6Çevrim/ Cycle]	328,193	0,50380	753,010	1,15592	970,511	1,48979	0,49619	47,8276
[7Çevrim/ Cycle]	324,763	0,49853	749,290	1,15021	966,891	1,48424	0,49133	47,7169
[8Çevrim/ Cycle]	322,003	0,49429	746,118	1,14534	964,005	1,47981	0,48747	47,6284
[9Çevrim/ Cycle]	319,731	0,49081	743,556	1,14140	961,566	1,47606	0,48416	47,5534
[10Çevrim/ Cycle]	317,639	0,48759	741,382	1,13807	959,521	1,47292	0,48139	47,4876
[11Çevrim/ Cycle]	315,877	0,48489	739,444	1,13509	957,829	1,47032	0,47903	47,4388
[12Çevrim/ Cycle]	314,368	0,48257	737,772	1,13252	956,212	1,46784	0,47696	47,3956
[13Çevrim/ Cycle]	313,119	0,48066	736,144	1,13002	954,704	1,46553	0,47515	47,3577
[14Çevrim/ Cycle]	311,916	0,47881	734,870	1,12807	953,489	1,46366	0,47362	47,3312
[15Çevrim/ Cycle]	310,819	0,47713	733,609	1,12613	952,293	1,46183	0,47216	47,3046
[16Çevrim/ Cycle]	309,716	0,47543	732,477	1,12440	951,165	1,46009	0,47064	47,2641
[17Çevrim/ Cycle]	308,781	0,47400	731,407	1,12275	950,159	1,45855	0,46936	47,2351
[18Çevrim/ Cycle]	307,982	0,47277	730,454	1,12129	949,142	1,45699	0,46824	47,2145
[19Çevrim/ Cycle]	307,134	0,47147	729,494	1,11982	948,302	1,45570	0,46708	47,1864
[20Çevrim/ Cycle]	306,365	0,47029	728,679	1,11857	947,538	1,45453	0,46615	47,1712



Şekil 4.8. %20 sıkıştırma histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği

Şekil 4.8’de basma numunesinin %20 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği verilmektedir. Şekil 4.9 ‘de ise aynı testin gerilme-şekil değişimi gösterilmektedir.

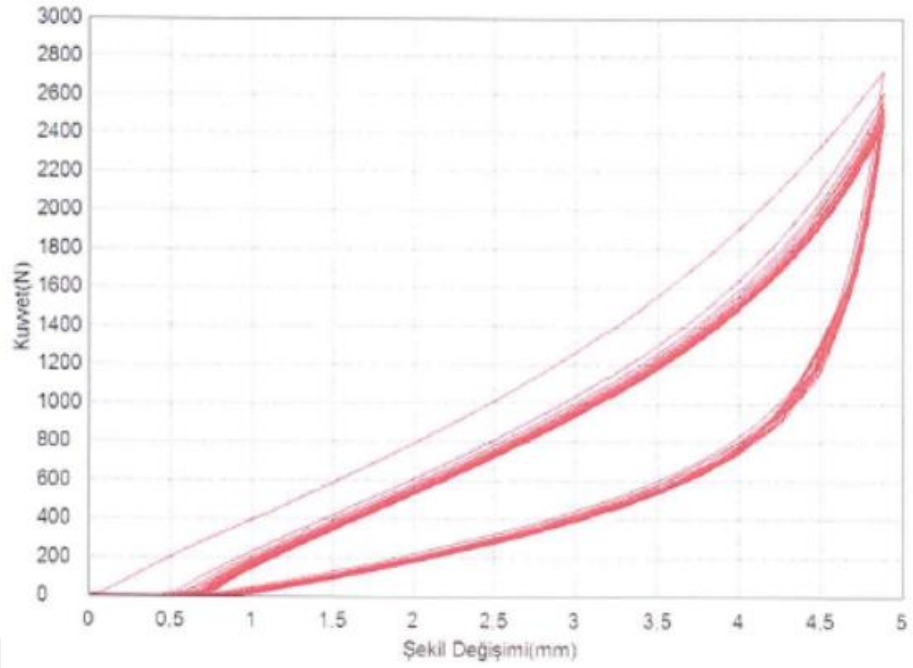


Şekil 4.9. %20 sıkıştırma histeresiz gerilme-şekil değişimi grafiği

Çizelge 4. 5. Basma numunesinin %40 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz değerleri

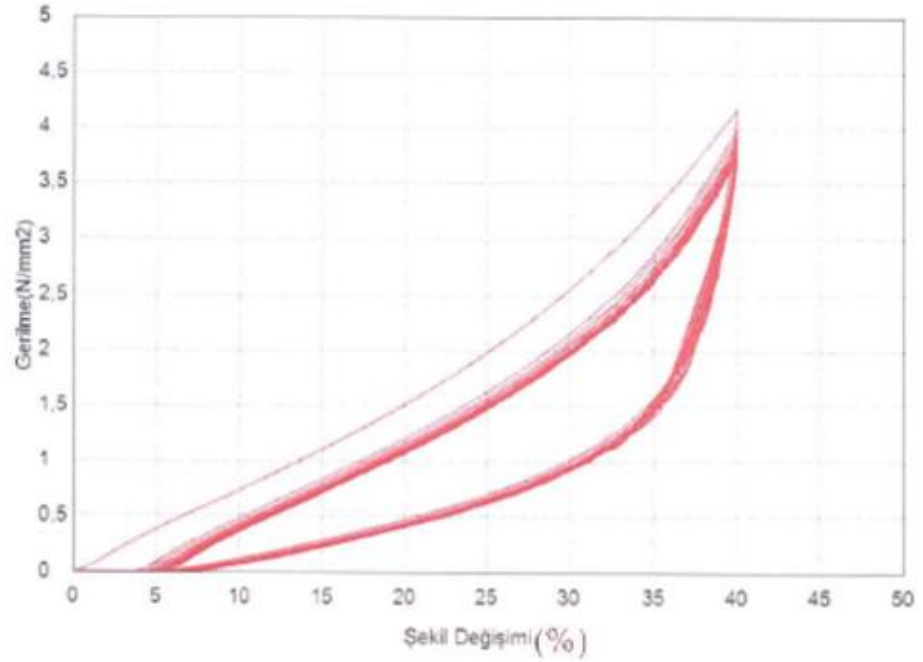
Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample					
	Kuvvet/ Force (1 mm)	Gerilme/ Stress (1 mm)	Kuvvet/ Force (2 mm)	Gerilme/ Stress (2 mm)	Kuvvet/ Force (3 mm)	Gerilme/ Stress (3 mm)
Birim/Unit	N	N/mm ²	N	N/mm ²	N	N/mm ²
[1Çevrim/ Cycle]	395,926	0,60777	793,044	1,21737	1265,37	1,94242
[2Çevrim/ Cycle]	229,631	0,35250	610,368	0,93695	1037,94	1,59330
[3Çevrim/ Cycle]	206,342	0,31675	584,275	0,89690	1003,68	1,54071
[4Çevrim/ Cycle]	193,962	0,29774	571,336	0,87703	986,986	1,51508
[5Çevrim/ Cycle]	185,608	0,28492	563,029	0,86428	976,422	1,49887
[6Çevrim/ Cycle]	179,492	0,27553	557,105	0,85519	968,855	1,48725
[7Çevrim/ Cycle]	174,506	0,26788	552,422	0,84800	963,079	1,47838
[8Çevrim/ Cycle]	170,392	0,26156	548,778	0,84241	958,364	1,47115
[9Çevrim/ Cycle]	166,838	0,25611	545,565	0,83747	954,373	1,46502
[10Çevrim/ Cycle]	163,693	0,25128	542,834	0,83328	950,899	1,45969
[11Çevrim/ Cycle]	160,804	0,24684	540,557	0,82979	948,126	1,45543
[12Çevrim/ Cycle]	158,342	0,24306	538,482	0,82660	945,560	1,45149
[13Çevrim/ Cycle]	156,198	0,23977	536,784	0,82400	943,572	1,44844
[14Çevrim/ Cycle]	154,055	0,23648	535,093	0,82140	941,612	1,44543
[15Çevrim/ Cycle]	152,157	0,23357	533,773	0,81937	939,900	1,44280
[16Çevrim/ Cycle]	150,298	0,23071	532,382	0,81724	938,356	1,44043
[17Çevrim/ Cycle]	148,654	0,22819	531,115	0,81529	936,845	1,43811
[18Çevrim/ Cycle]	147,118	0,22583	529,972	0,81354	935,620	1,43623
[19Çevrim/ Cycle]	145,576	0,22347	528,944	0,81196	934,390	1,43435
[20Çevrim/ Cycle]	144,198	0,22135	527,860	0,81030	933,260	1,43261

Ön çevrimli ve ön çevrimsiz testlerde kauçuk basma numunesine uygulanan kuvvet, zaman, gerilme değerleri Çizelge.4.4, Çizelge.4.5’de görülmektedir. Yapılan testler sonucunda yükleme altında bulunan kauçuk basma numunesinin zamanla gerilme ve kuvvet değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.10. %40 sıkıştırma histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği

Şekil 4.10'da basma numunesinin %40 sıkıştırma ile 20 çevrimli histeresiz kuvvet şekil değişimi grafiği verilmektedir. Şekil 4.11 'de ise aynı testin gerilme-şekil değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.11. %40 sıkıştırma histeresiz gerilme-şekil değişimi grafiği

Çizelge 4.6. %20 sıkıştırımda ön çevrimsiz test sonuçları

Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample									
Basma Miktarı/ Compression	2,44 mm (%20)									
Zaman/Time (s/sec)	100	120	140	160	200	500	1000	1600	2600	3600
Kuvvet/Force (N)	888,101	881,786	876,513	871,983	864,546	835,824	816,409	804,433	792,892	785,702
Gerilme/Stress (N/mm ²)	1,36329	1,35359	1,34550	1,33855	1,32713	1,28304	1,25324	1,23485	1,21714	1,20610

Çizelge 4.7. %40 sıkıştırımda ön çevrimsiz test test sonuçları

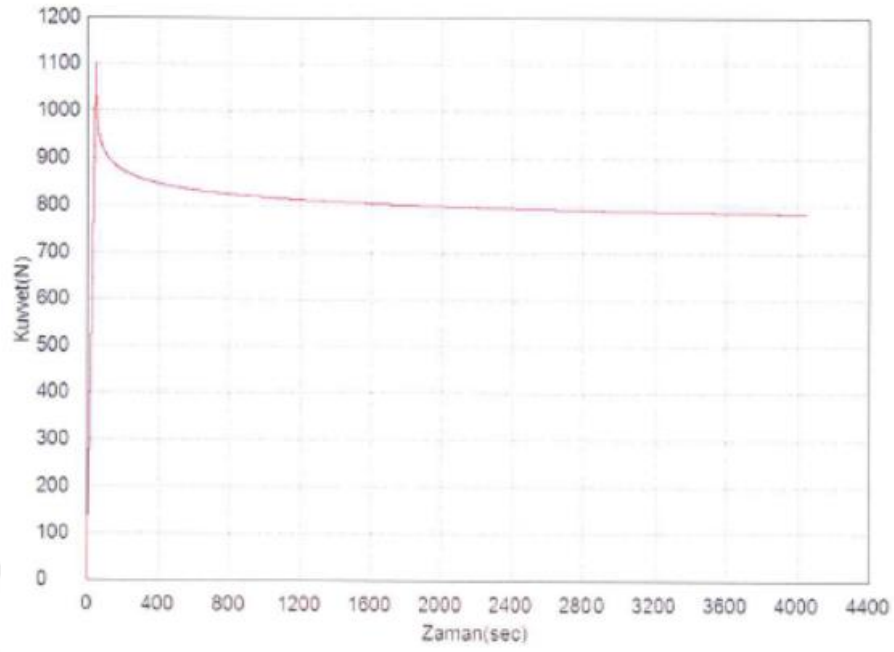
Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample									
Basma Miktarı/ Compression	4,88 mm (%40)									
Zaman/Time (s/sec)	100	120	140	160	200	500	1000	1600	2600	3600
Kuvvet/Force (N)	2226,96	2214,45	2203,90	2194,68	2179,14	2114,88	2071,75	2044,81	2018,64	2001,38
Gerilme/Stress (N/mm ²)	3,41851	3,39931	3,3312	3,36896	3,34512	3,24647	3,18027	3,13890	3,09873	3,07224

Çizelge 4.8. %20 sıkıştırımda ön çevrimli (20 kez) test test sonuçları

Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample									
Basma Miktarı/ Compression	2,44 mm (%20)									
Zaman/Time (s/sec)	100	120	140	160	200	500	1000	1600	2600	3600
Kuvvet/Force (N)	988,360	982,122	976,915	972,426	965,115	936,511	916,700	904,352	891,566	883,326
Gerilme/Stress (N/mm ²)	1,51719	1,50762	1,49962	1,49273	1,48151	1,43760	1,40719	1,38823	1,36861	1,35596

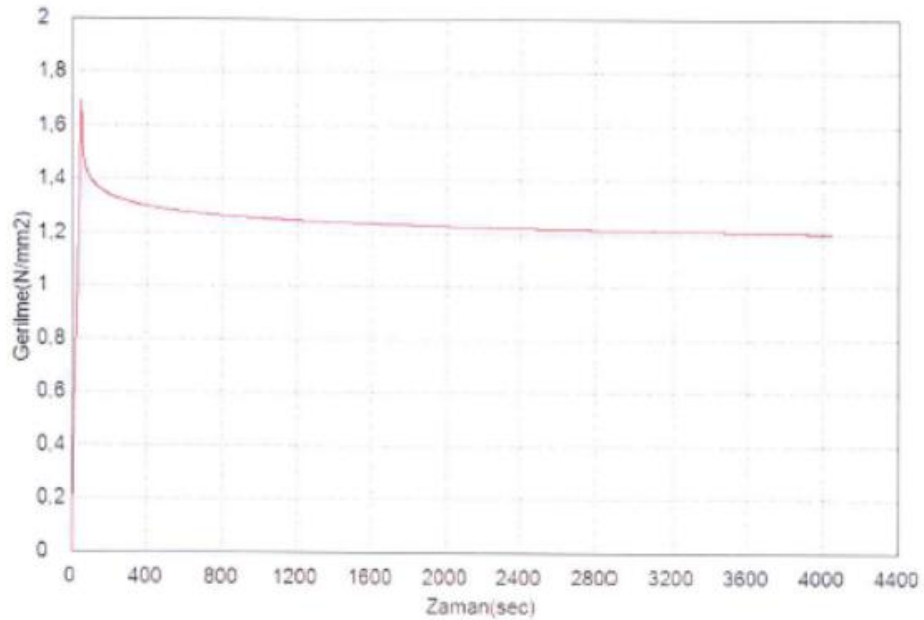
Çizelge 4.9. %40 sıkıştırımda ön çevrimli (20 kez) test test sonuçları

Numune Adı Sample Description	Basma Numunesi / Compression Sample									
Basma Miktarı/ Compression	4,88 mm (%40)									
Zaman/Time (s/sec)	100	120	140	160	200	500	1000	1600	2600	3600
Kuvvet/Force (N)	2734,88	2721,68	2710,68	2700,97	2684,76	2615,91	2569,33	2539,39	2510,05	2490,36
Gerilme/Stress (N/mm ²)	4,19820	4,17795	4,16106	4,14616	4,12127	4,01557	3,94407	3,89811	3,85307	3,82284

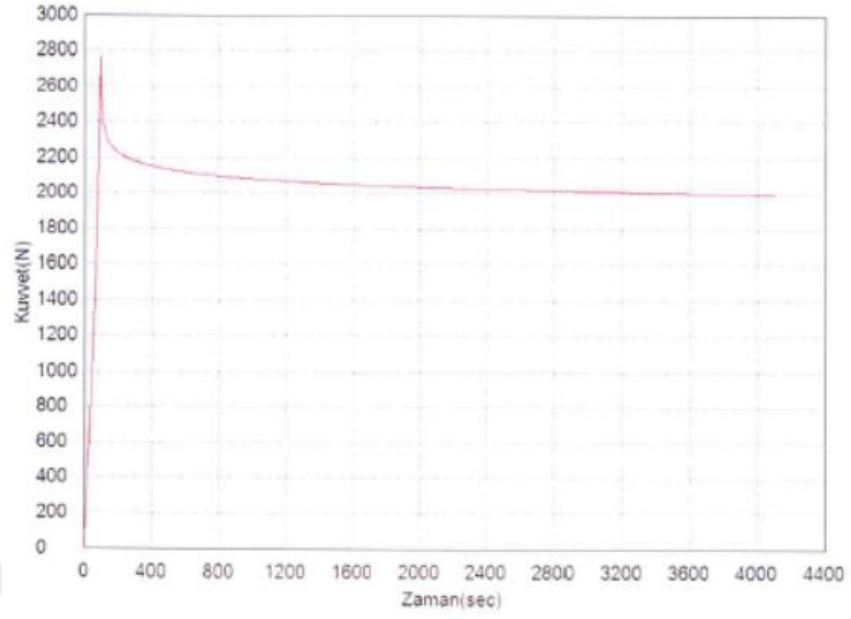


Şekil 4.12. %20 Sıkıştırma ön çevrimsiz test kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.12’de basma numunesinin %20 sıkıştırma ile ön çevrimsiz basma testinde gerilme gevşeme kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.13 ‘de ise aynı testin gerilme-zaman değişimi gösterilmektedir.

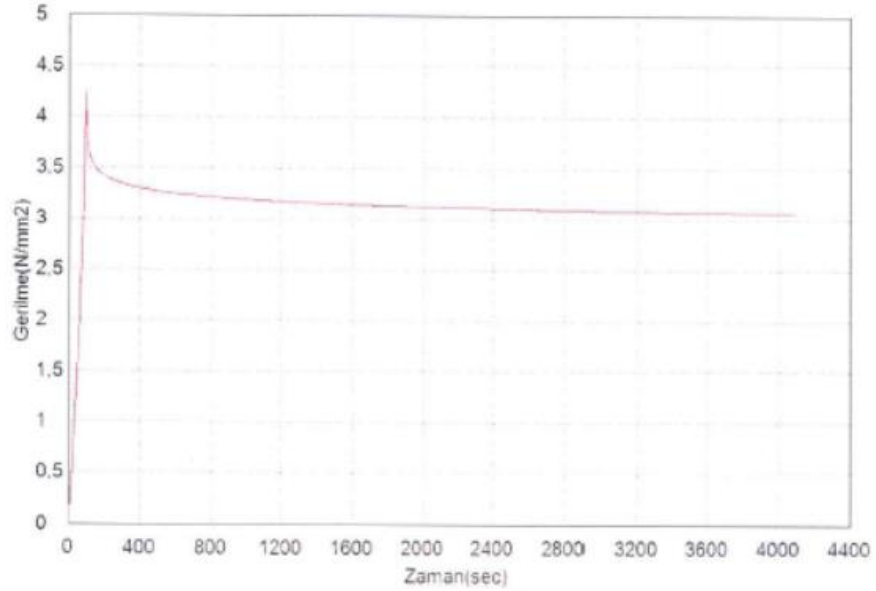


Şekil 4.13. %20 Sıkıştırma ön çevrimsiz test gerilme-zaman grafiği

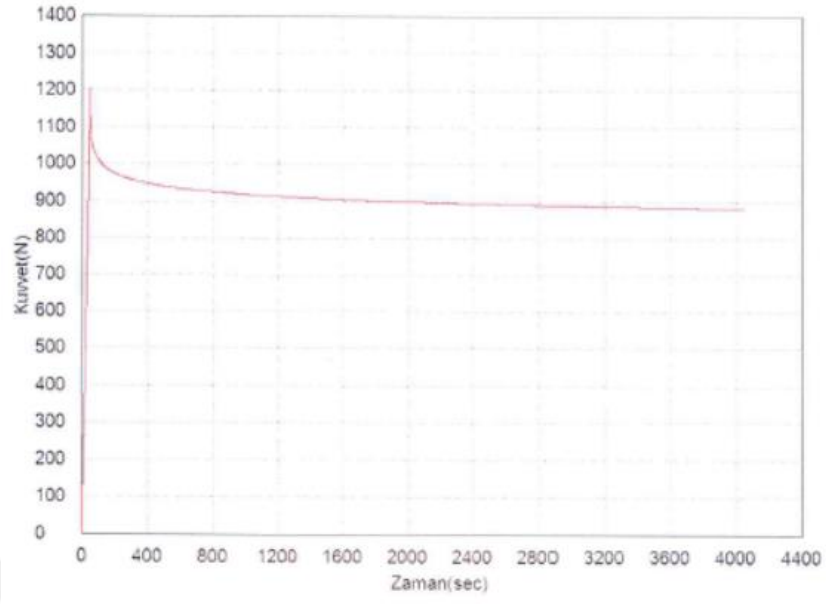


Şekil 4.14. %40 Sıkıştırma ön çevrimsiz test kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.14'da basma numunesinin %40 sıkıştırma ile ön çevrimsiz basma testinde gerilme gevşeme kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.15'de ise aynı testin gerilme-zaman değişimi gösterilmektedir.

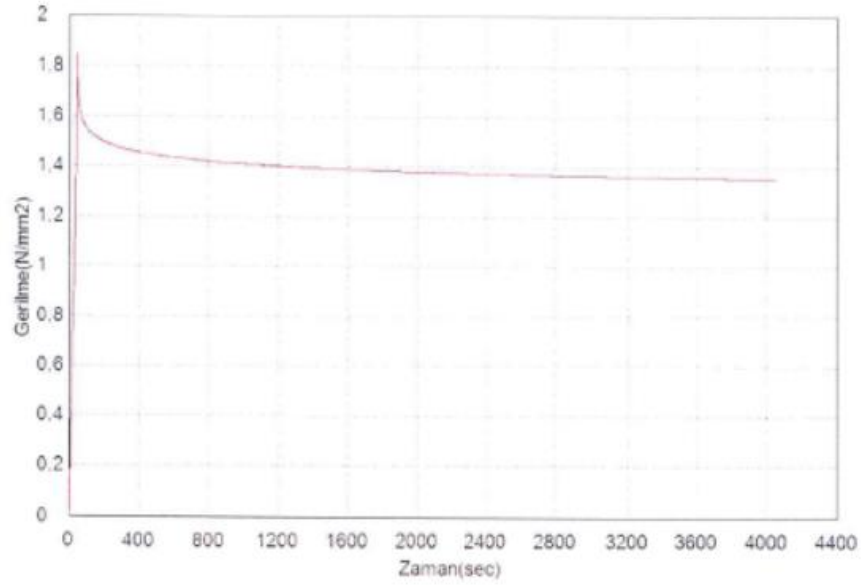


Şekil 4.15. %40 Sıkıştırma ön çevrimsiz test gerilme-zaman grafiği

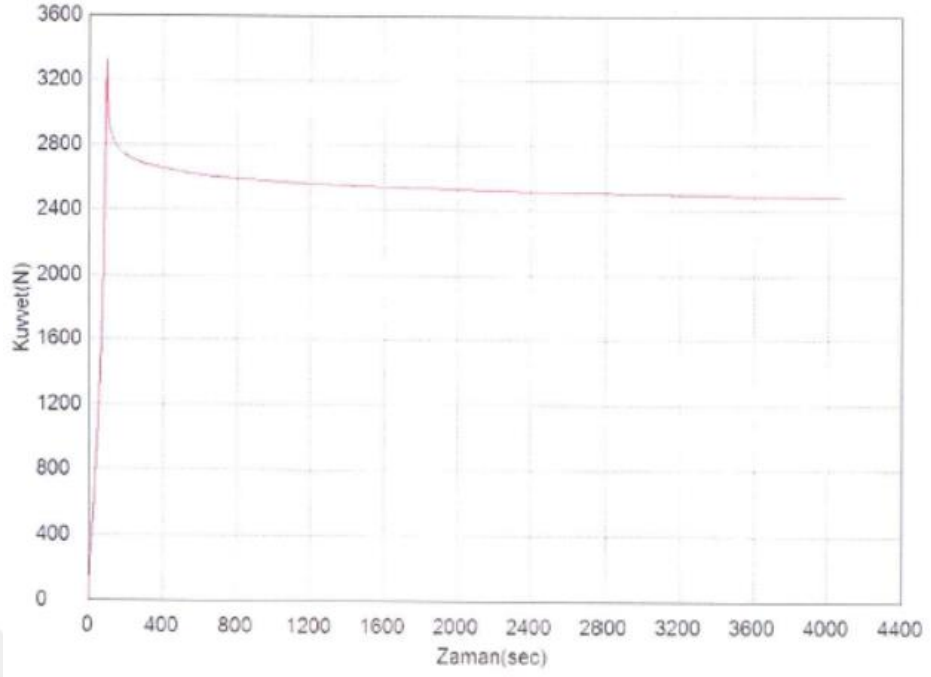


Şekil 4.16. %20 Sıkıştırma ön çevrimli test kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.16'da basma numunesinin %20 sıkıştırma ile ön çevrimli basma testinde gerilme gevşeme kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.17'de ise aynı testin gerilme-zaman değişimi gösterilmektedir.

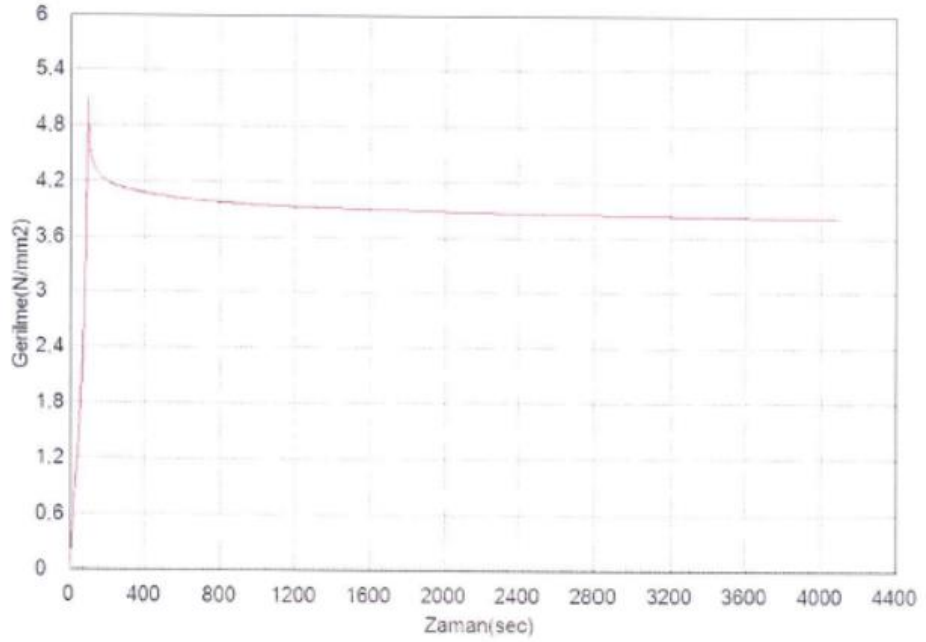


Şekil 4.17. %20 Sıkıştırma ön çevrimli test gerilme-zaman grafiği



Şekil 4.18. %40 Sıkıştırma ön çevrimli test kuvvet-zaman grafiği

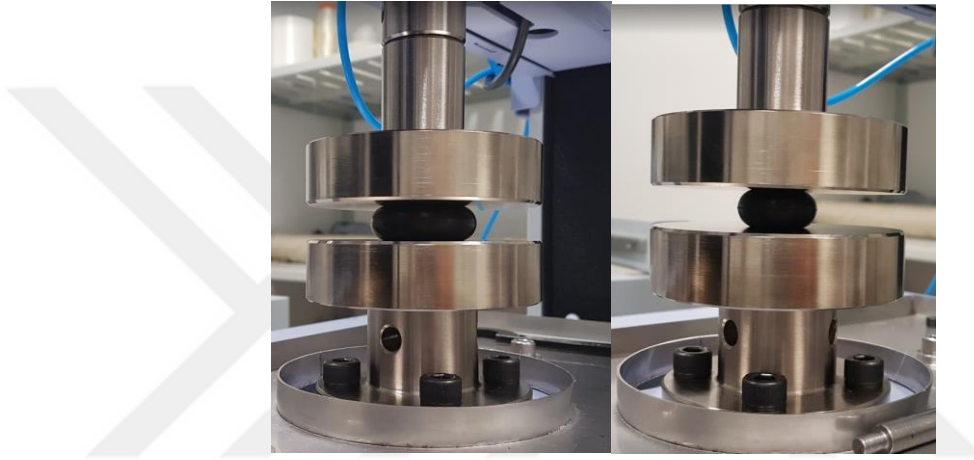
Şekil 4.18’de basma numunesinin %40 sıkıştırma ile ön çevrimli basma testinde gerilme gevşeme kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.19’de ise aynı testin gerilme-zaman değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.19. %40 Sıkıştırma ön çevrimli test gerilme-zaman grafiği

4.1.3.Contalarda Uygulanan Gerilme Gevşeme Testleri ve Histerezis

Büyük conta ve küçük conta olmak üzere iki farklı conta üzerinde çalışma yapılmıştır(Şekil 4.20).16 mm yüksekliğinde olan büyük conta 3. 2mm(%20) ve 6.4mm (%40) sıkıştırılarak iki farklı test yapılmıştır.18 mm yüksekliğinde olan küçük conta ise 3.6 mm (%20) ve 7.2 mm (%40) sıkıştırılarak iki farklı test yapılmıştır. Test sonuçları kuvvet–zaman değerleri Çizelge 4.10 ve 4.11 ‘de görülmektedir. Bu sıkışma sonrasında gerilme gevşeme değerleri kuvvet zaman ve gerilme zaman olarak elde edilmiştir. Yapmış olduğumuz conta testlerinde test hızı 3 mm/dak, ön yük =1N ‘dur.



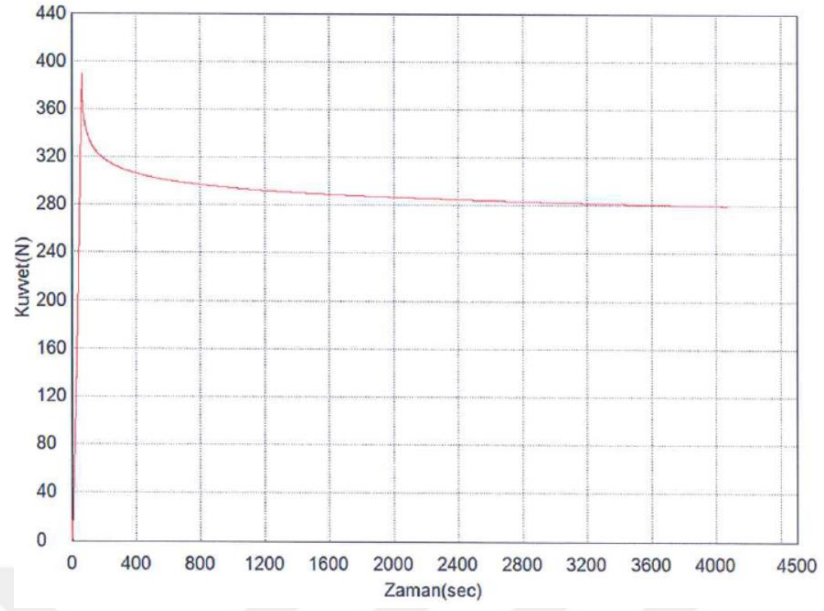
Şekil 4.20. Büyük ve küçük contanın gerilme gevşeme testi

Çizelge 4.10. %20 sıkıştırılan büyük conta gerilme gevşeme değerleri

Numune Adı Sample Description	Büyük Conta / Big Gasget									
Zaman/Time (s/sec)	80	140	200	380	620	920	1220	1820	2720	3620
Kuvvet/Force (N)	326,04	318,03	313,12	304,73	298,86	294,41	291,40	287,23	283,40	280,64

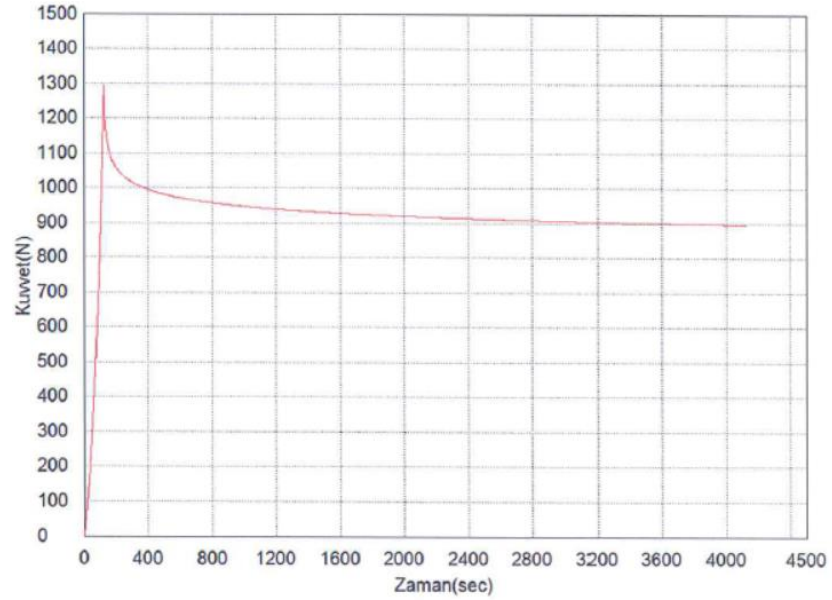
Çizelge 4.11. %40 sıkıştırılan büyük conta gerilme gevşeme değerleri

Numune Adı Sample Description	Büyük Conta / Big Gasget									
Zaman/Time (s/sec)	80	140	200	380	620	920	1220	1820	2720	3620
Kuvvet/Force (N)	1053,74	1026,21	1009,34	980,67	960,54	945,36	935,11	921,24	908,51	899,51

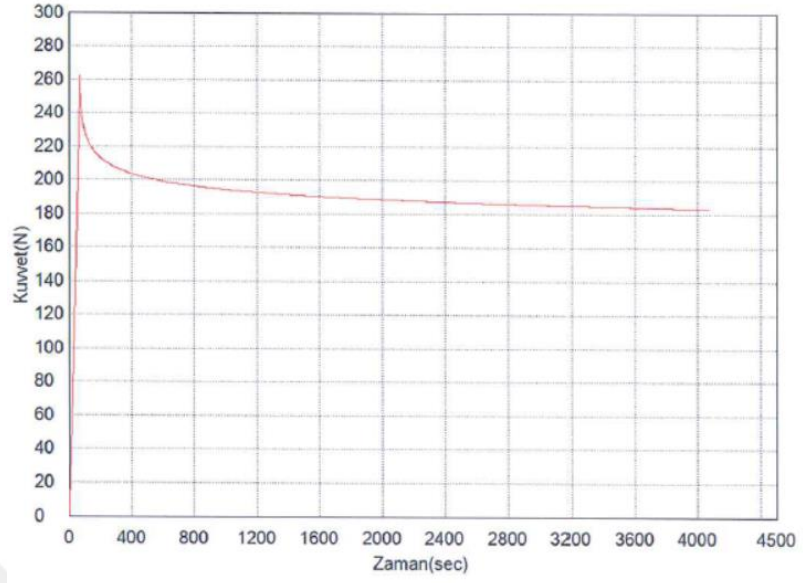


Şekil 4.21. %20 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.21'de %20 (3. 2. mm) sıkıştırılan büyük contanın gerilme gevşeme testindeki kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.22'de ise %40 (6.4mm) sıkıştırılan büyük contanın gerilme gevşeme testindeki kuvvet-zaman grafiği gösterilmektedir.

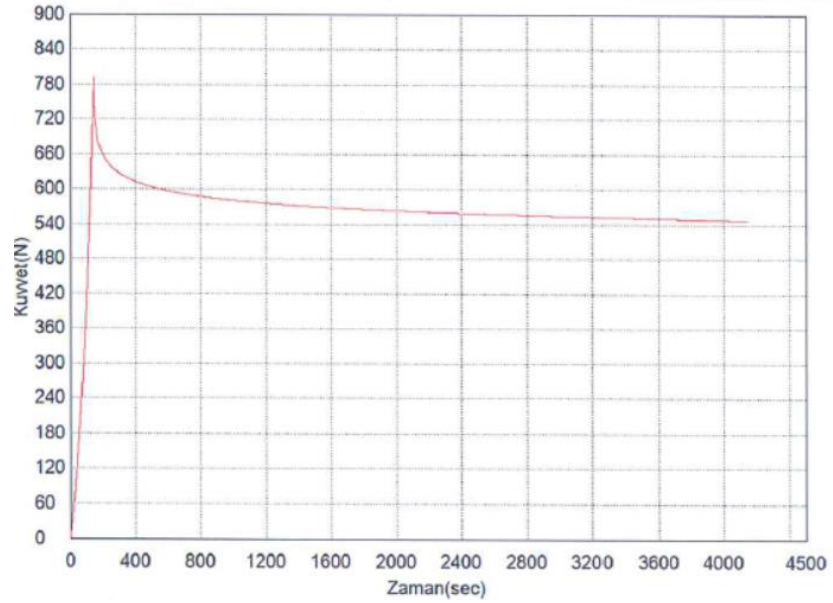


Şekil 4.22. %40 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği



Şekil 4.23. %20 sıkıştırılan küçük contanın kuvvet-zaman grafiği

Şekil 4.23'de %20 (3. 6. mm) sıkıştırılan küçük contanın gerilme gevşeme testindeki kuvvet-zaman grafiği verilmektedir. Şekil 4.24'da ise %40 (7. 2. mm) sıkıştırılan küçük contanın gerilme gevşeme testindeki kuvvet-zaman grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.24. %40 sıkıştırılan büyük contanın kuvvet-zaman grafiği

4.2.Kauçuk Malzemelerin Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi

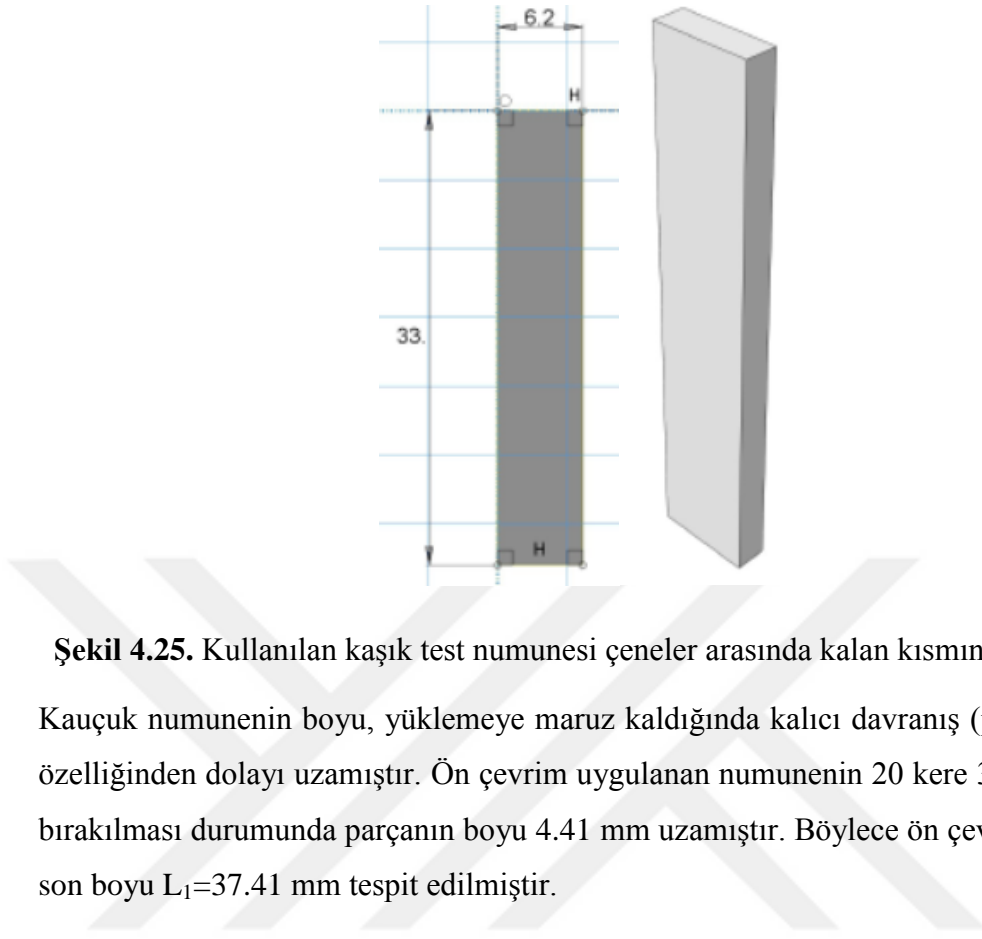
Hiperelastik malzemelerin yük altındaki uzama davranışları doğrusal olmadığı gibi hemen hemen sıkıştırılmaz yapıdadırlar. Çekme ve basma numuneleri üzerinde testler yapılır, test verilerine en iyi uyum gösteren hiperelastik bir malzeme modeli seçilerek katsayılar hesaplanır veya paket program içerisindeki hazır malzeme modellerinden birisi seçilir. Kauçuk bir malzemenin mekanik davranışı, malzemeye uygun bir şekil değiştirme enerjisi modelinin seçimi ile tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada yapılmış olan tek eksenli çekme testi ve basma testi sonucundaki test değerleri programa girilerek ideal malzeme modeli belirlenmiştir. Hiperelastik malzeme modelinin belirlenmesi için malzeme testleri Butekom'da yapılmıştır.

4.2.1.Tek Eksenli Çekme Testi ile Hiperelastik ve Viskoelastik Modelleme

Bu bölümde önceki aşamalarda yapılan malzeme test verileri kullanılarak kauçuk ürünlerin sonlu elemanlar ile modellenmesi ve analiz sonuçları verilmiştir. Önce test numunesi üzerinde modelleme ve hesaplamalar yapılmıştır. Tek eksenli çekme testinde kaşık test numunesi iki uçtan çenelere sıkıştırılır ve çekilir. Bu çalışmada çeneler arasında kalan numune boyu 33 mm uzunluğundadır(Şekil 4.25.) ve toplam 33 mm daha çekilerek çeneler arası mesafe toplanda 66 mm 'ye çekilmiştir.

Kaşık test numunesinin uc kısımları herhangi bir gerilmeye maruz kalmadığı için modellenmemiştir. Sadece dikdörtgen kısım ele alınmıştır.



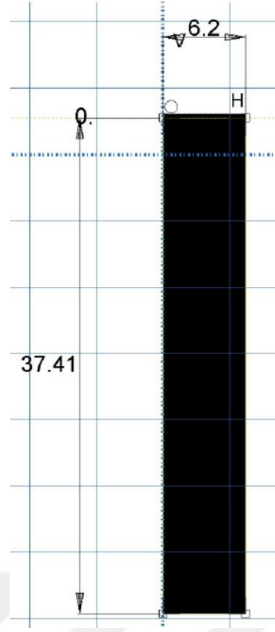
Şekil 4.25. Kullanılan kaşık test numunesi çeneler arasında kalan kısmın CAD modeli
Kauçuk numunenin boyu, yüklemeye maruz kaldığında kalıcı davranış (permanent set) özelliğinden dolayı uzamıştır. Ön çevrim uygulanan numunenin 20 kere 33 mm uzatılıp bırakılması durumunda parçanın boyu 4.41 mm uzamıştır. Böylece ön çevrimli parçanın son boyu $L_1=37.41$ mm tespit edilmiştir.

$$L1 = L_0 + L_0 \times \frac{a}{100} \quad (4.1.)$$

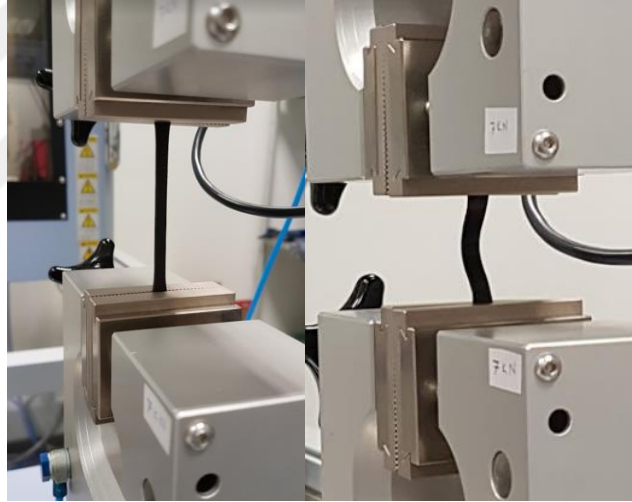
$$37,41 = 33 + 33 \times \frac{a}{100}$$

$a=13,36$ bulunur.

Ön yükleme (20 kez 33 mm uzatıp bırakmak) sonucunda parçanın boyu ilk boya göre %13 uzamıştır. Hiperelastik ve viskoelastik modellemede parçanın boyu 37.41 mm olarak alınmıştır(Şekil 4.26.).



Şekil 4.26. Test numunesinin 20 çevrim sonrası boyu

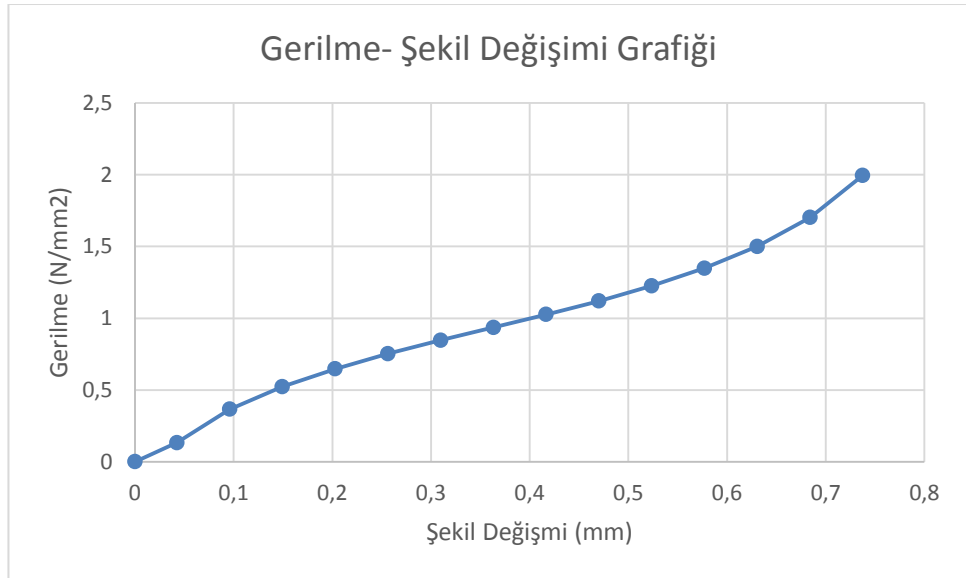


Şekil 4.27. Kullanılan kaşık test numunesi ön yüklemdeki boyut değişimi

Hiperelastik malzeme modelini belirlemede Şekil 4.2.'de gösterilen histeresiz grafiğindeki 20. Çevrimden elde edilen gerilme-şekil değişimi değerleri (Çizelge 4.12.) Abaqus yazılımına tanımlanmıştır. Bu testte elde edilen gerilme –şekil değişimi grafiği Şekil 4.28.'de gösterilmektedir. Material_Hyperelastic_Uniaxial Test Data kısmında Stress-Strain bölümünde elde edilen gerilme_şekil değişimi değerleri tanımlanmıştır.

Çizelge 4.12. Analizde kullanılan gerilme-şekil değışimi değeri

Gerilme	Şekil Değişimi
0	0
0,132861	0,057720058
0,365767	0,115440115
0,523495	0,173160173
0,647114	0,230880231
0,752775	0,288600289
0,846898	0,346320346
0,936114	0,404040404
1,026546	0,461760462
1,120542	0,519480519
1,226292	0,577200577
1,349001	0,634920635
1,500704	0,692640693
1,702821	0,75036075
1,995551	0,808080808



Şekil 4.28. Kaşık test numunesinin gerilme-şekil değışimi grafiği

Şekil 4.28'de ön çevrimli testten elde edilen kaşık test numunesinin 20.çevrimdeki gerilme-şekil değişimi grafiği verilmektedir.

Malzeme modeli belirlemek için tüm malzeme modelleri içerisinde;

Ogden N=1,

Reduced Polynomial(Neo Hooke) N=1,

Reduced Polynomial N=2,

Reduced Polynomial N=3,

Reduced Polynomial N=4,

Reduced Polynomial N=6,

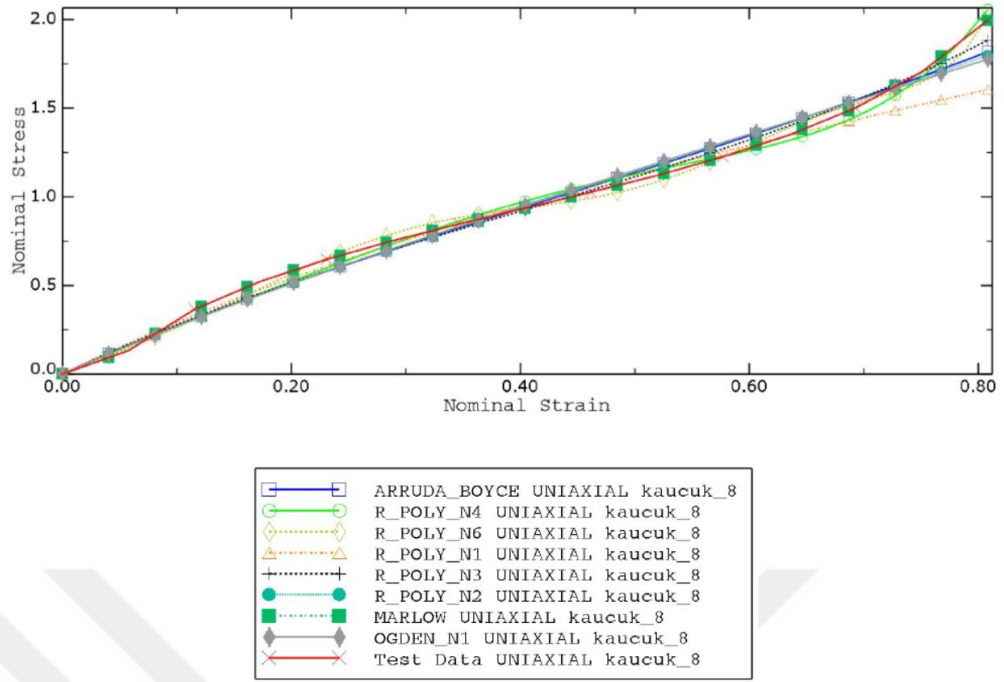
Arrude Boyce,

Marlow modellerinin kararlı (Stable) olduğu tespit edilmiştir. Kararlı olma durumu Drucker formülü ile aşağıdaki formül ile açıklanmıştır.(Eşitlik 4. 2.)

Malzemelerin bünye bağıntılarının belirlenmesinde kullanılan pek çok matematiksel model; betonun mekanik davranışını, plastik ve visko plastik teoriler yardımıyla ifade edebilmektedir. Bunlardan en çok kullanılanı ise; Drucker-Prager malzeme modelidir. Drucker-Prager malzeme modelinde akma kriteri, von Mises kriterinde hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak;

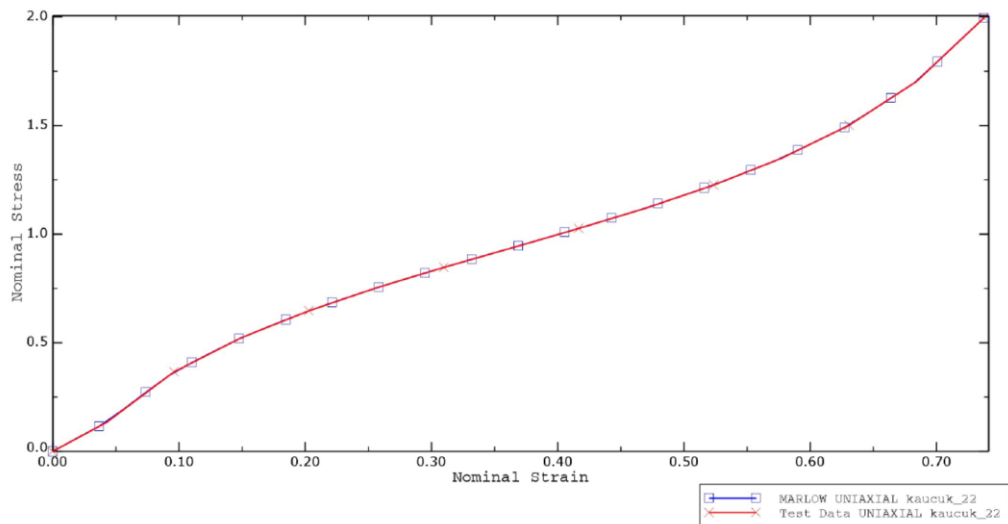
$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + J_2 - k = 0 \quad (4.2.)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada α ve k , malzeme sabitleri, I_1 gerilme tansörünün birinci invaryantı ve J_2 ise deviyatör tansörünün ikinci invaryantıdır. $\alpha=0$ olması durumunda kriter Von Mises kriteri ile aynı olacaktır (Hacısalıhoğlu M.)



Şekil 4.29. Malzeme modelleri ve test verisinin gerilme-şekil değişimi grafiği

Kararlı olan modellerin gerilme-şekil değişimi grafikleri ile yapmış olduğumuz testten elde ettiğimiz gerilme şekil değişimi grafiklerindeki (Şekil 4.29.) eğrileri karşılaştırdığımızda en uyumlu eğriye sahip hiperelastik malzeme modelinin ‘‘Marlow’’ olduğu tespit edilmiştir. (Şekil 4.30.)

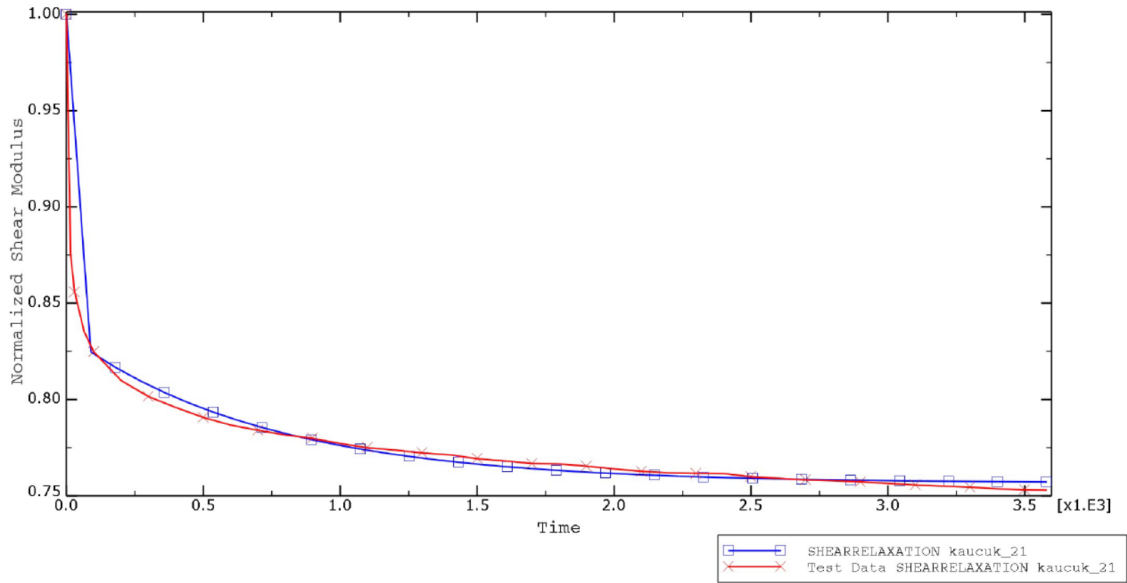


Şekil 4.30. Marlow modeli ve test verisinin gerilme-şekil değişimi grafiği

Viskoelastik malzeme modelinin tanımlanması için kaşık test numunesinde yapılan gerilme - gevşeme test verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada ön çevrimli ve %100 uzama değerlerinde yapılan gerilme - gevşeme test sonuçları kullanılmıştır. Test sonuçlarından elde edilen gerilme değerleri en büyük gerilme değerine bölünerek normalize edilmiştir. Normalize gerilme değerleri ve zaman değerleri Abaqus Programında Edit Material-Viscoelastic-Shear Test Data bölümünde kullanılmıştır. Zaman alanında viskoelastik malzeme modeli için gerilme gevşeme test değerlerinden faydalanarak Prony serisi katsayıları Abaqus yazılımında belirlenmiştir. Elde edilen prony serisi katsayı değerleri Çizelge 4.13'de gösterilmektedir.

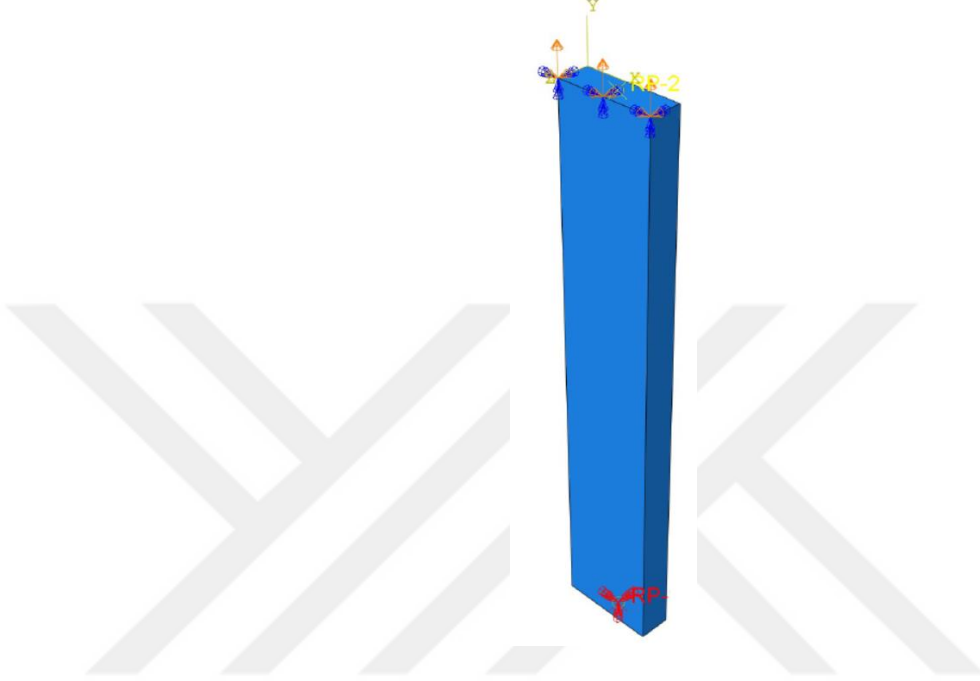
Çizelge 4.13. Elde edilen prony katsayısı değerleri

	G(I)	TAU(I)
1	0,16661	12,545
2	7,68E+03	730,52
3	-0,24343	1,58E+08

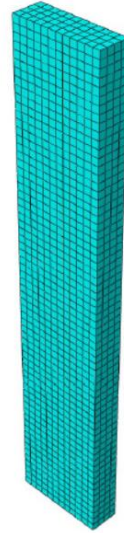


Şekil 4.31. Elde edilen viskoelastik model ve gerilme gevşeme test verisi grafiği

Malzeme modeli tespit edildikten sonra sınır şartları değerlendirilmiştir. Her çevrimde parça 33 mm uzatılıp bırakılmıştır. 20.çevrimde parçanın boyu 4.41mm uzadığı için parça $33 - 4 \cdot 4 = 28.6$ mm uzatılmıştır. Sınır şartı olarak st kısımdan y ekseninde 28.6 mm yer değiştirme ve alt kısımdan sabitleme tanımlanmıştır. (şekil 4.32).



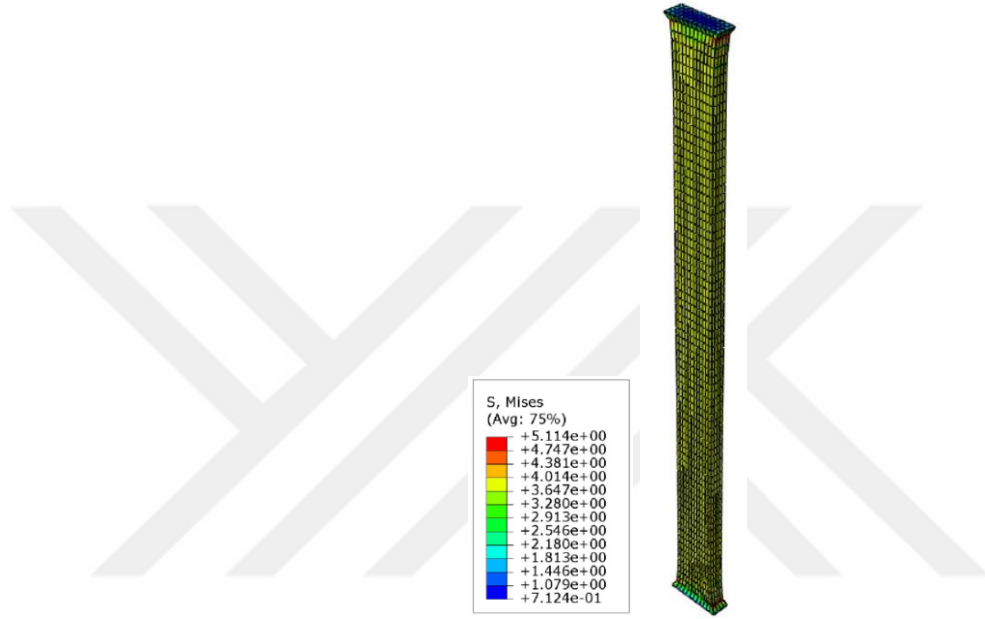
şekil 4.32. Kullanılan kaşık test numunesi sınır şartları



şekil 4.33. Kullanılan kaşık test numunesi sonlu elemanlar modeli

Parçanın sonlu elemanlar yapısında 4940 adet düğüm noktası, 3600 adet doğrusal hexahedral C3D8RH tipi eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu 0.5mm olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.33’de verilmiştir.

4.2.2. Kaşık Test Numunesi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu



Şekil 4.34. Numune üzerinde analiz sonucu bulunan gerilme dağılımı

Kaşık numunesinin uzama esnasında kesit alan ölçüsü anlık olarak değişmektedir. Abaqus yazılımında gerilme değerleri hesaplanırken anlık olarak değişen yüzey alanını dikkate almaktadır. Yazılım ile elde edilen gerilme gerçek gerilmedir.

Gerçek gerilme;

$$\sigma_g = \frac{F1}{A1} \quad (4.14.)$$

formülü ile elde edilir.

Test cihazında elde edilen gerilmelerde numunenin sahip olduğu ilk yüzey alan değeri kullanılmaktadır. Bu değer mühendislik gerilmesidir.

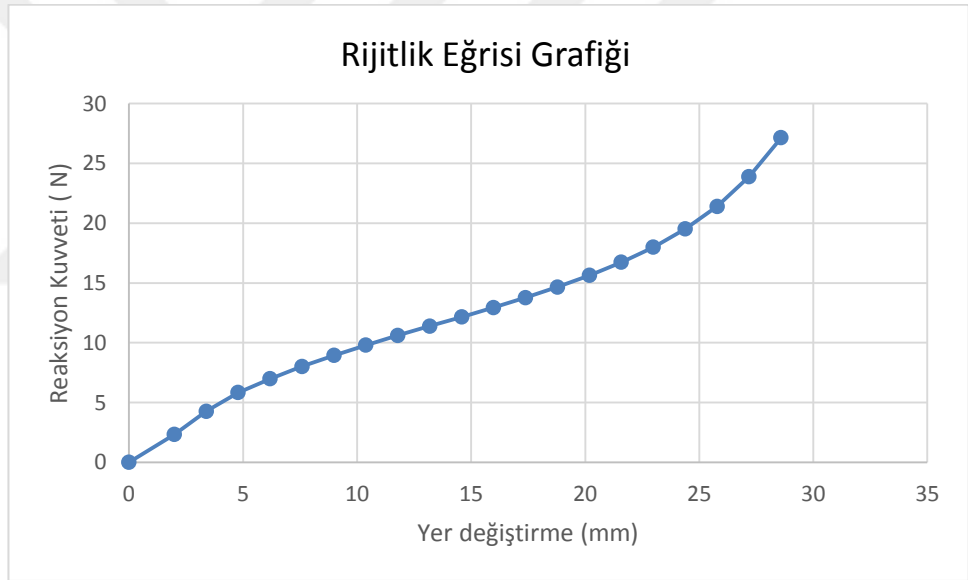
Mühendislik gerilmesi;

$$\sigma_m = \frac{F1}{A0} \quad (4.3.)$$

Test sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının korelasyonunu sağlamak için testte elde edilen gerçek gerilme değerlerinin mühendislik gerilmesine çevrilmesi gerekmektedir.

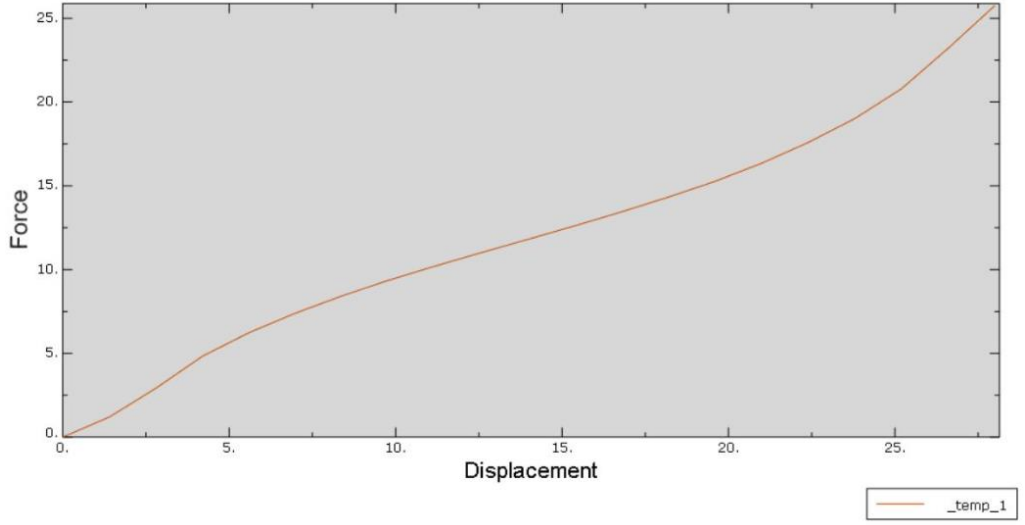
$$\sigma_m = \sigma_{gx} \frac{A1}{A0} \quad (4.4.)$$

Test verileri ile elde edilen reaksiyon kuvveti ve yer değiştirme grafiği ile Abaqus yazılımı ile elde edilen reaksiyon kuvveti ve yer değiştirme grafiği karşılaştırılmıştır. Analiz çalışmaları ile elde edilen rijitlik eğrisi (Şekil 4.36.) ile malzeme test sonuçlarında elde edilen rijitlik eğrisi (Şekil 4.35.) karşılaştırılmıştır.

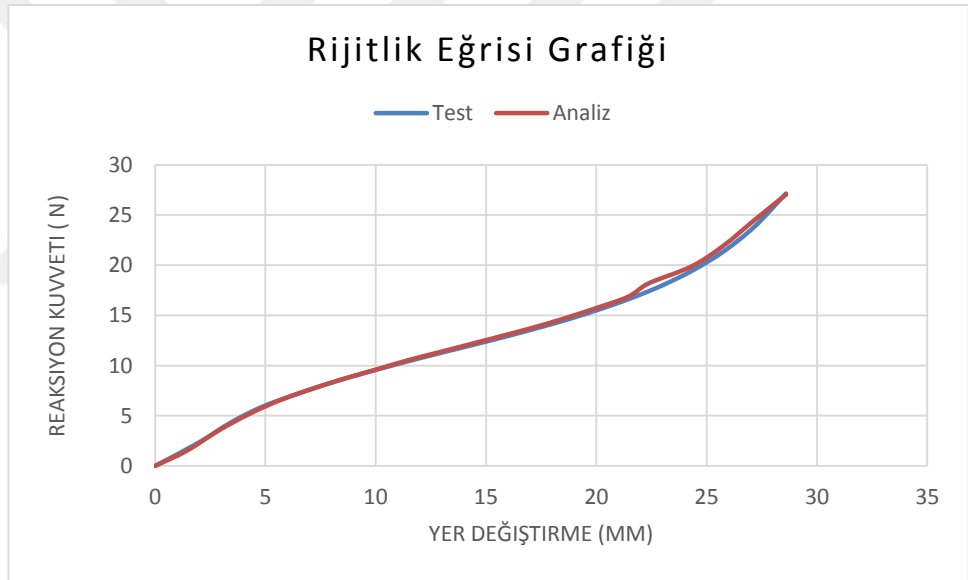


Şekil 4.35. Test sonucu elde edilen rijitlik eğrisi

Şekil 4.37. da görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen hiperelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Böylece bulunan hiperelastik malzeme modelinin doğruluğu tespit edilmiştir.

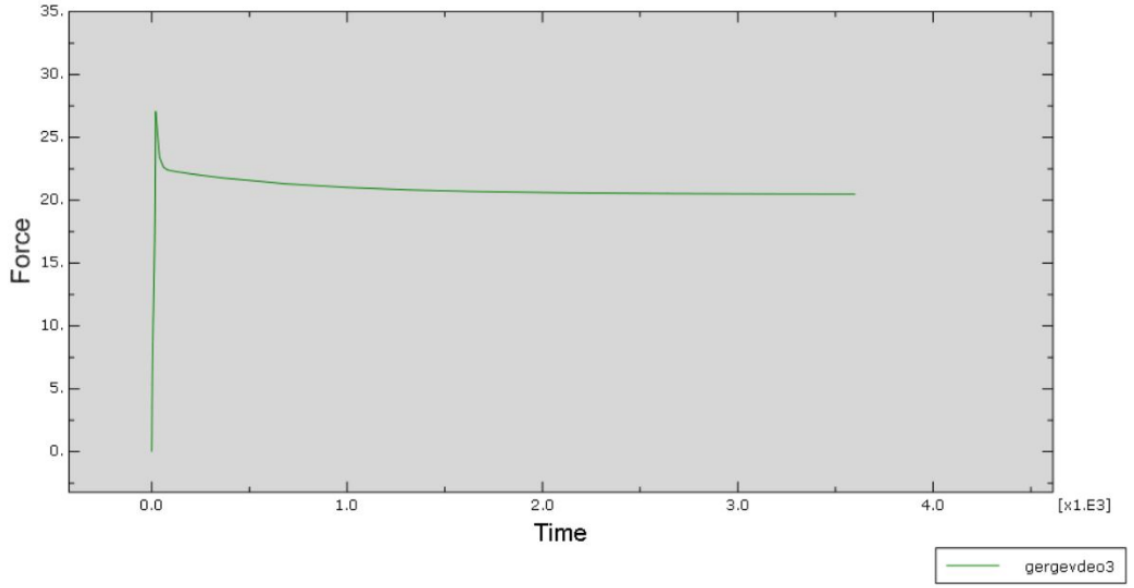


Şekil 4.36. Analiz sonucu elde edilen rijitlik eğrisi

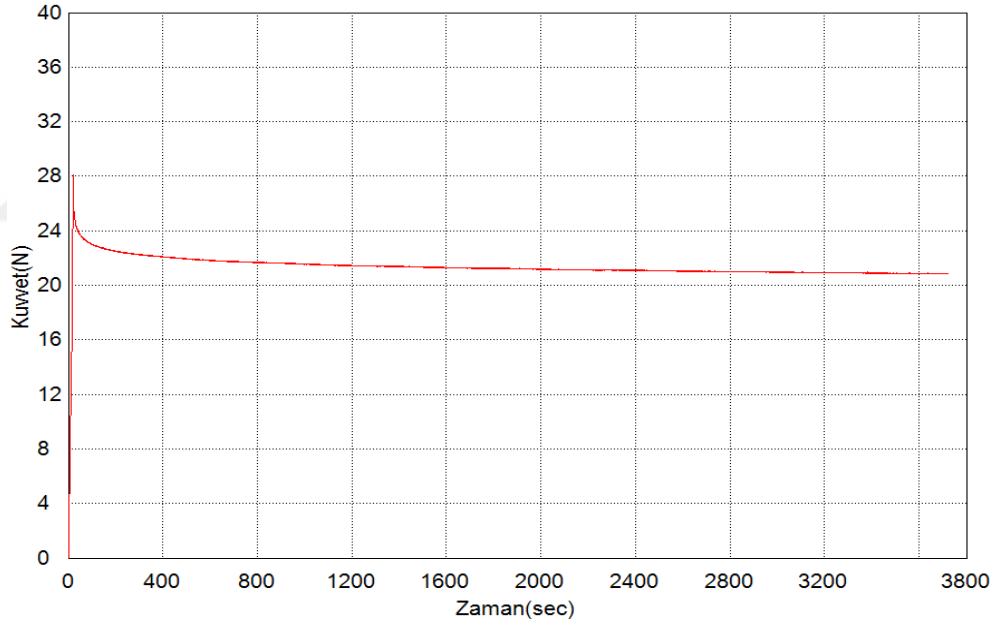


Şekil 4.37. Analiz ve test sonucu elde edilen rijitlik eğrileri

Hiperelastik olarak modellenen kauçuk test numunesinin viskoelastik olarak gerilme-gevşeme durumu incelenmiştir. 20 çevrim sonucu 4.4. mm uzayan ve 20.çevrimde 28.6mm uzatılıp çeneler arasında 3600 sn. bekletilen kauçuk kaşık test numunesinin kuvvet değerlerinin zamanla azaldığı hem analiz sonuçları(Şekil 4.38.) ile hem de test sonuçları (Şekil 4.39.) ile tespit edilmiştir.

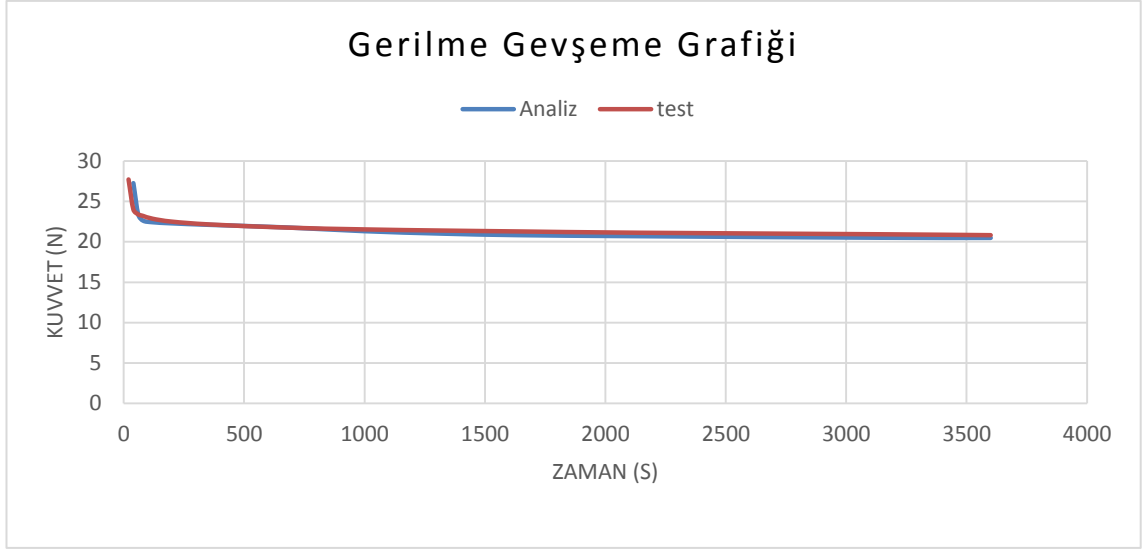


Şekil 4.38. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi



Şekil 4.39. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi

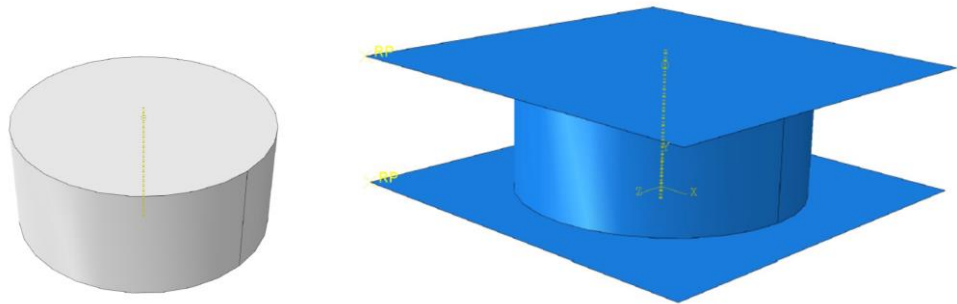
Abaqus yazılımı ile elde edilen gerilme gevşeme grafiği ve malzeme test sonuçları ile elde edilen gerilme gevşeme grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.40’ de görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen viskoelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Şekil 4.40. ‘da anlaşıldığı üzere malzeme testi ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır.



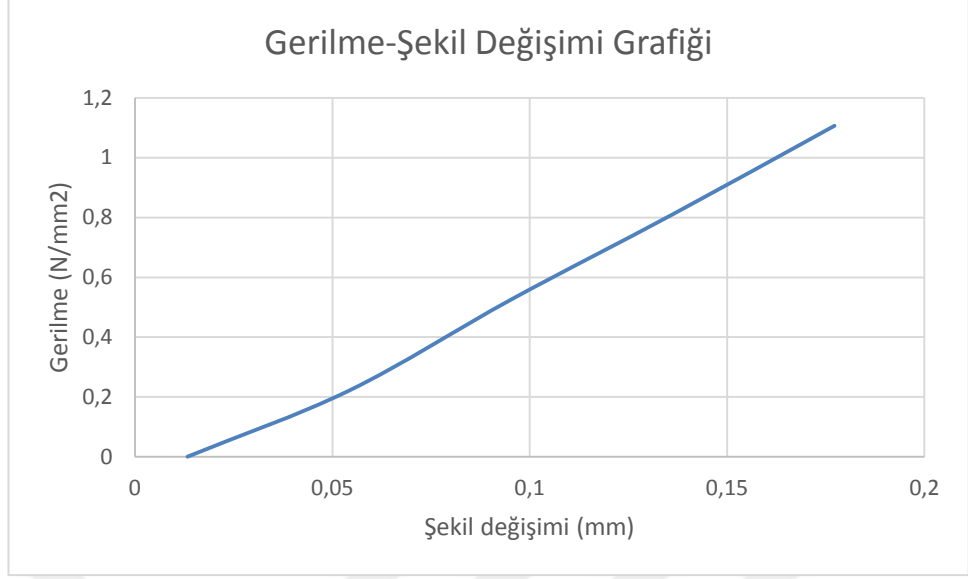
Şekil 4.40. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri

4.2.3. Basit Basma Testi ile Hiperelastik ve Viskoelastik Modelleme

Basit basma testinde silindirik kauçuk disk numunesi kullanılmıştır. Basma testi disk numunesinin iki metal plaka arasında basılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışması için disk numunesi, alt ve üst plakalar üç boyutlu olarak katı modellenmiştir (Şekil 4.41). Disk numunesi elastik, plakalar ise rijit olarak modellenmiştir. Böylece plakaların sıkışma esnasında şekil değiştirmemesi sağlanmıştır.

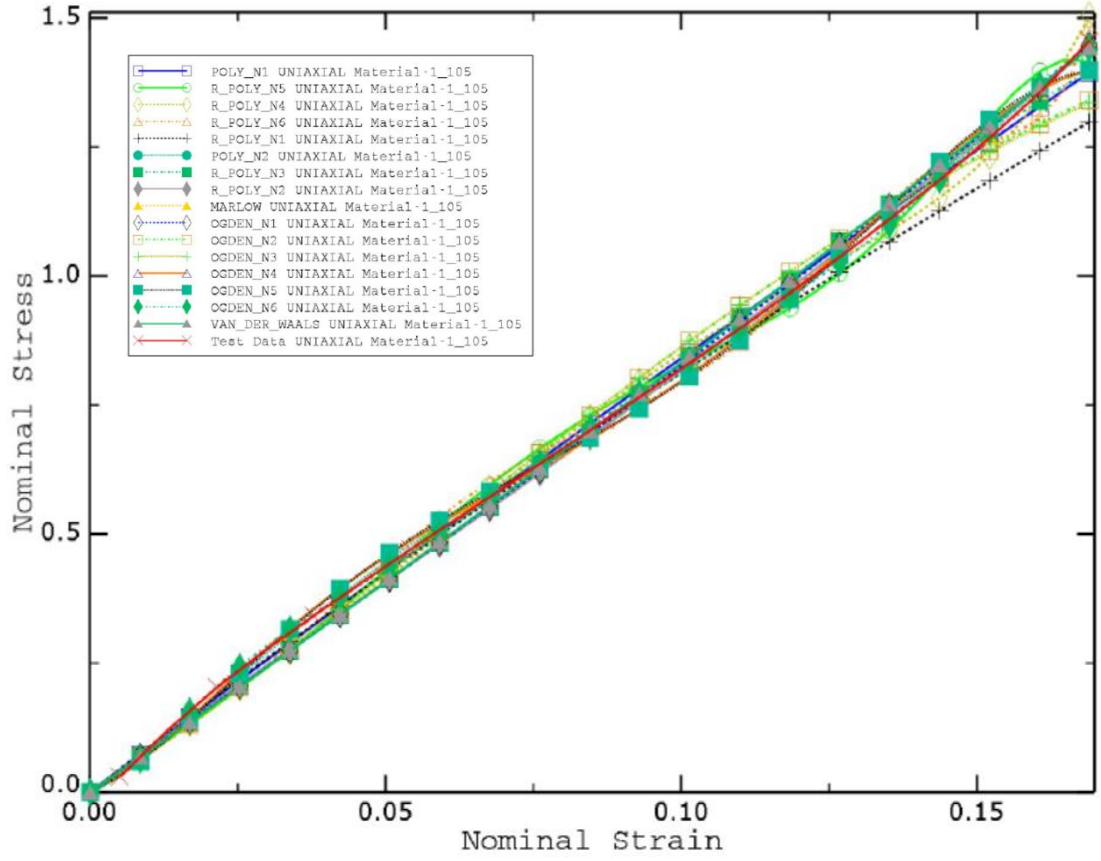


Şekil 4.41. Kullanılan basma test numunesi CAD modeli ve plakalarla montajı



Şekil 4.42. Basma numunesinin gerilme-şekil değişimi grafiği

Literatürde contaların sıkıştırma oranı genellikle %15-30 arasında alınmaktadır (Eriks-Sealing Elements Technical Handbook O-rings). 12,2 mm yüksekliğindeki disk numunesinin – y yönünde 2,4 mm (%20) sıkıştırılması ve geri çekilmesi gerçekleştirilmiş ve bu işlem 20 kez tekrarlanmıştır. 20 çevrimin sonundaki gerilme şekil değişimi değerleri ABAQUS programında malzeme kısmında kullanılmıştır. Bu test ile elde edilen 20 çevrimli %20 sıkıştırılan basma numunesinin gerilme –şekil değişimi grafiği Şekil.4.42.'de gösterilmektedir. Material_Hyperelastic_Uniaxial Test Data kısmında Stress-Strain bölümünde elde edilen gerilme_şekil değişimi değerleri tanımlanmıştır.



Şekil 4.43. Malzeme modelleri ve gerilme-şekil değişimi grafiği

Malzeme modeli belirlemek için tüm malzeme modelleri içerisinde;

Ogden N=1,

Reduced Polynomial(Neo Hooke) N=1,

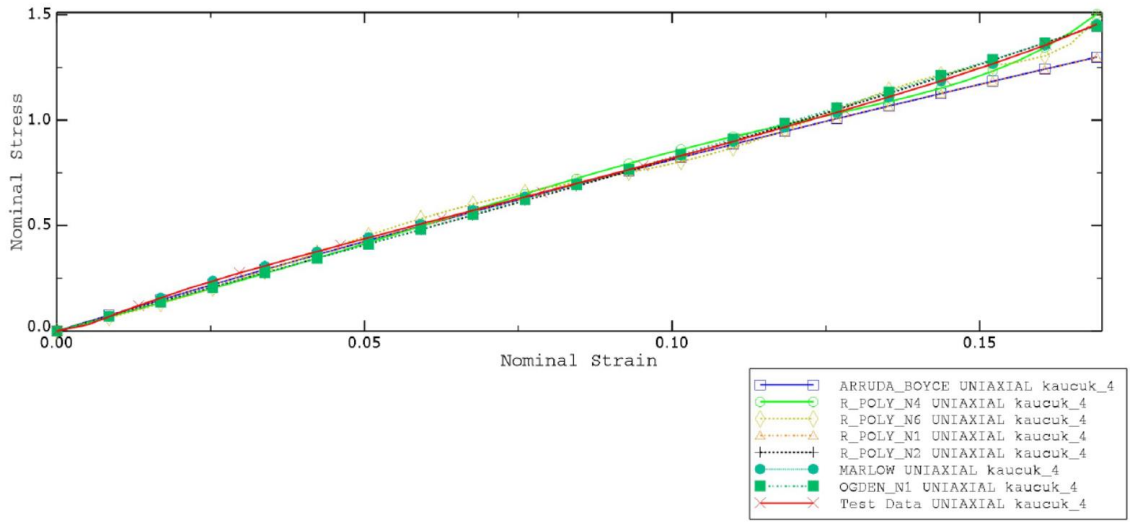
Reduced Polynomial N=2,

Reduced Polynomial N=4

Reduced Polynomial N=6

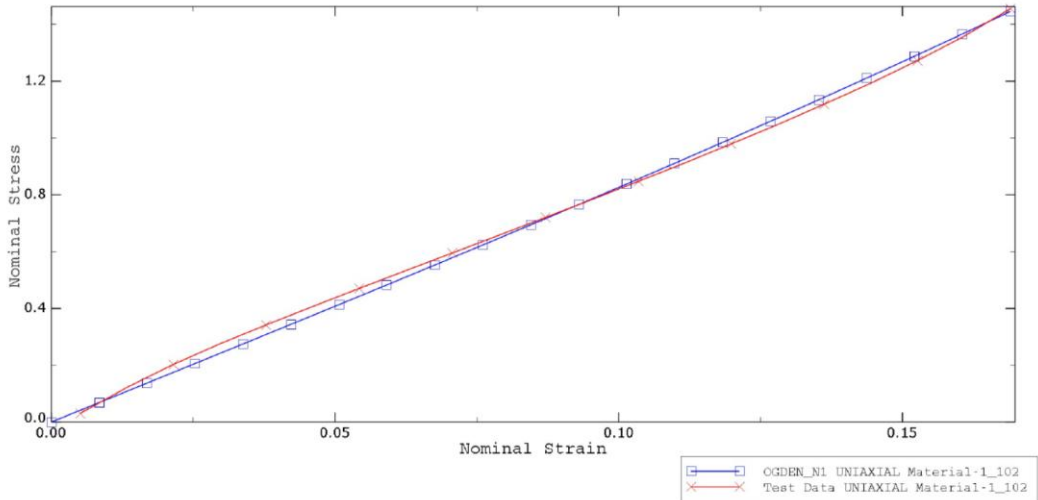
Arrude Boyce,

Marlow modellerinin kararlı (Stable) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.44.).



Şekil 4.44. Kararlı malzeme model eğrileri

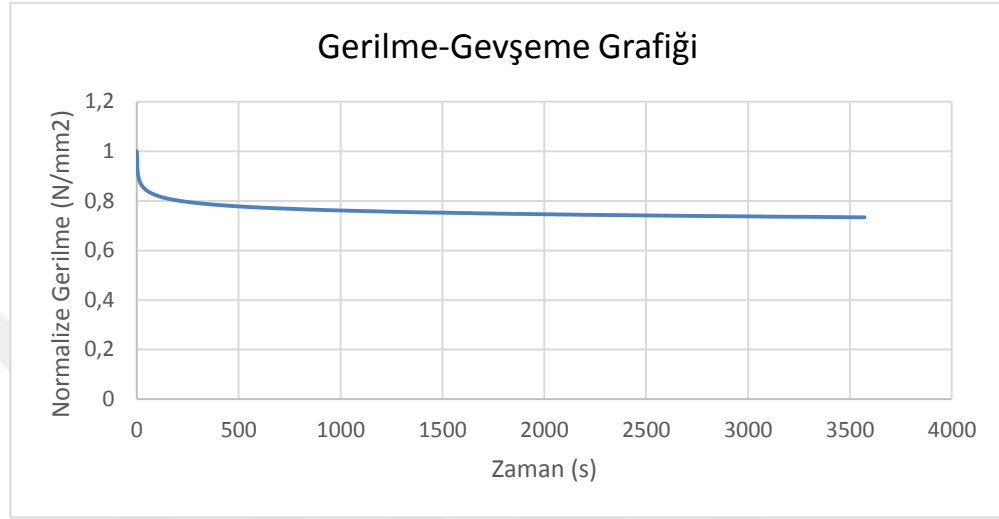
Şekil 4.44’da kararlı malzeme modelleri ve basma test verisinin gerilme-şekil değişimi grafiği verilmektedir. Kararlı olan bu modellerin gerilme-şekil değişimi grafikleri ile yapmış olduğumuz testten elde ettiğimiz gerilme şekil değişimi grafiklerindeki eğrileri karşılaştırdığımızda en uyumlu eğriye sahip hiperelastik malzeme modelinin “ Ogden N=1” olduğu testpit edilmiştir (Şekil 4.45.).Ogden N=1 kat sayıları $MU_I=2.7156$ ve $ALPHA_I=5.51044504$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.45. Ogden N=1 malzeme modeli ve test verisi uyumu

Viskoelastik malzeme modelinin tanımlanması için basma test numunesi ile yapılan gerilme gevşeme test verileri kullanılmıştır.Bu çalışmada ön çevrimli ve %20 sıkıştırma değerlerinde yapılan gerilme gevşeme test sonuçları kullanılmıştır.

Test sonuçlarından elde edilen gerilme değerleri en büyük gerilme değerine bölünerek normalize edilmiştir (Şekil 4.46.). Normalize gerilme değerleri ve zaman değerleri Abaqus Programında Edit Material-Viscoelastic-Shear Test Data bölümünde kullanılmıştır. Zaman alanında viskoelastik malzeme modeli için gerilme gevşeme test değerlerinden faydalanarak Prony serisi katsayıları Abaqus yazılımında belirlenmiştir.

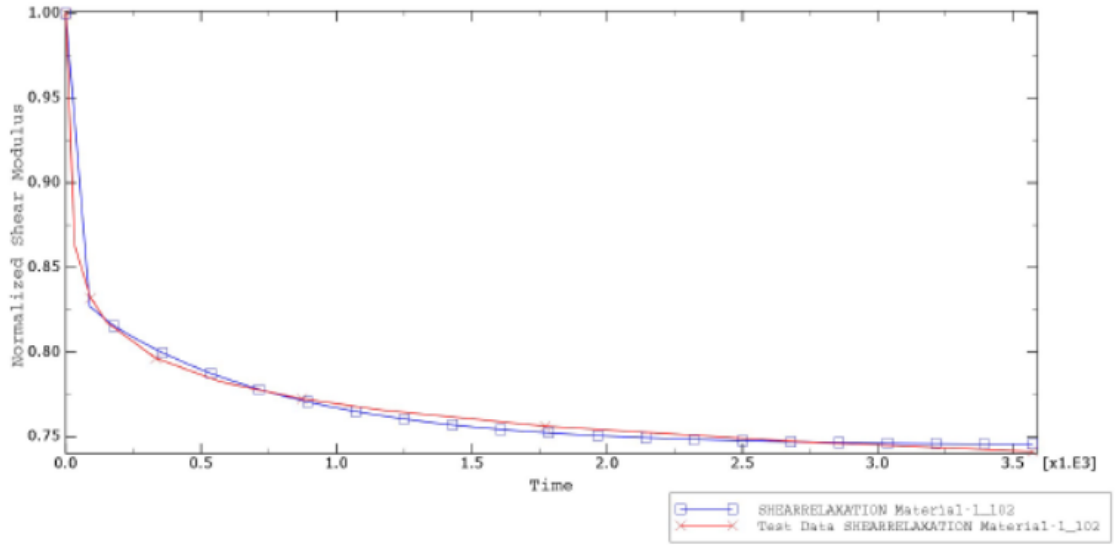


Şekil 4.46. Basma testi normalize gerilme-şekil değişimi grafiği

Malzeme test verilerine uyan Prony serisi katsayıları Çizelge 4.14.'de görülmektedir. Viskoelastik malzeme testi ve Abaqus yazılımındaki model eğri uyumlu çıkmıştır(Şekil 4.47).

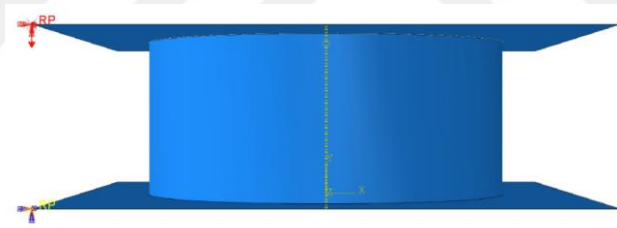
Çizelge 4.14. Elde edilen Prony katsayıları

	G(I)	TAU(I)
1	0.16446	20.193
2	9.05116E-02	707.66
3	-0.30497	1.51599E+08



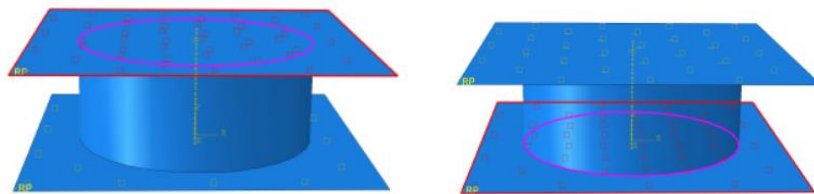
Şekil 4.47. Viskoelastik malzeme test ve model eğrileri

Malzeme modeli tanımının arkasından tanımlanan sınır şartları belirlenmiştir. Sınır şartı olarak üst plakadan y ekseninde -2. 4 mm yer değiştirme alt plakadan sabitleme tanımlanmıştır(Şekil 4.48).

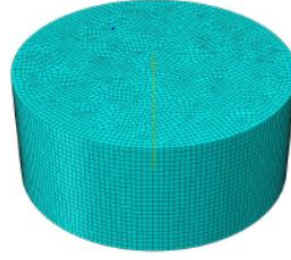


Şekil 4.48. Kullanılan basma test numunesi sınır şartları

Kauçuk model ve modelin sıkıştırılmasını sağlayan rijit plakalar arasında temas tanımı yapılmıştır. Böylece kauçuk parça ve plakalar iç içe geçmeyecektir. Kauçuk yumuşak yüzey (slave surface), plakalar sert yüzey (master surface) olarak tanımlanmıştır.(Şekil 4.49.)

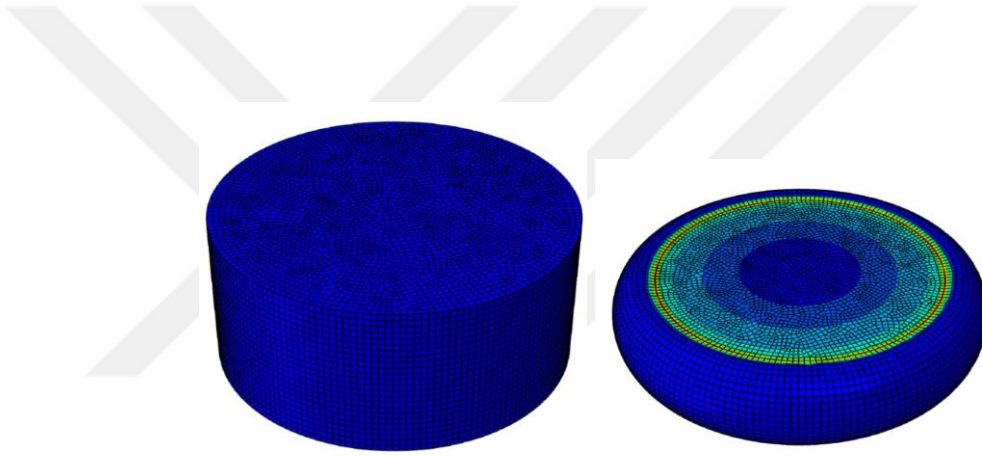


Şekil 4.49. Sonlu elemanlar için yapılan temas tanımlamaları



Şekil 4.50. Kullanılan kaşık test numunesi sonlu elemanlar modeli

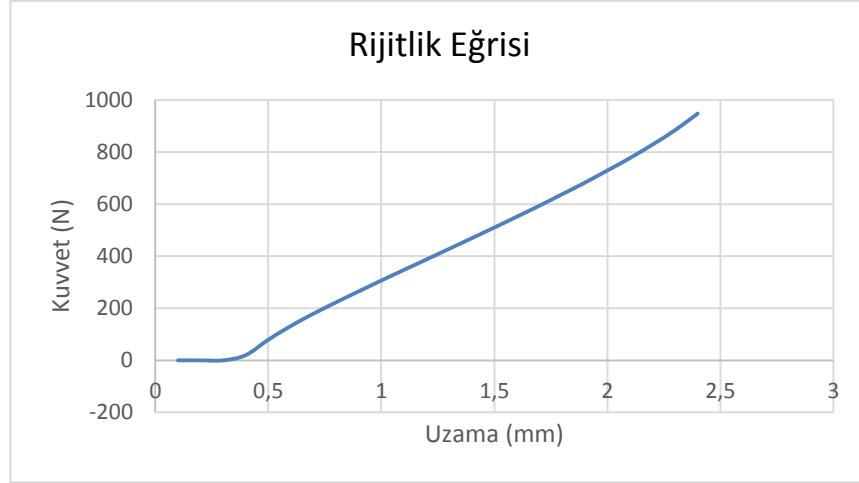
Parçanın sonlu elemanlar yapısında 83100 adet düğüm noktası, 77568 adet doğrusal hexahedral C3D8RH tipi eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu 0.5mm olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.50’de verilmiştir.



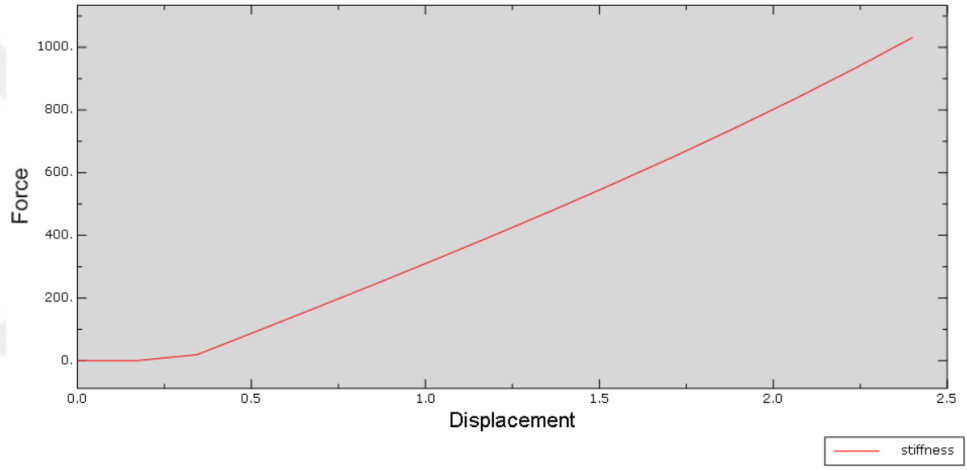
Şekil 4.51. Sıkıştırma öncesi ve sonrasındaki basma numunesi

4.2.4. Basit Basma Numunesi Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu

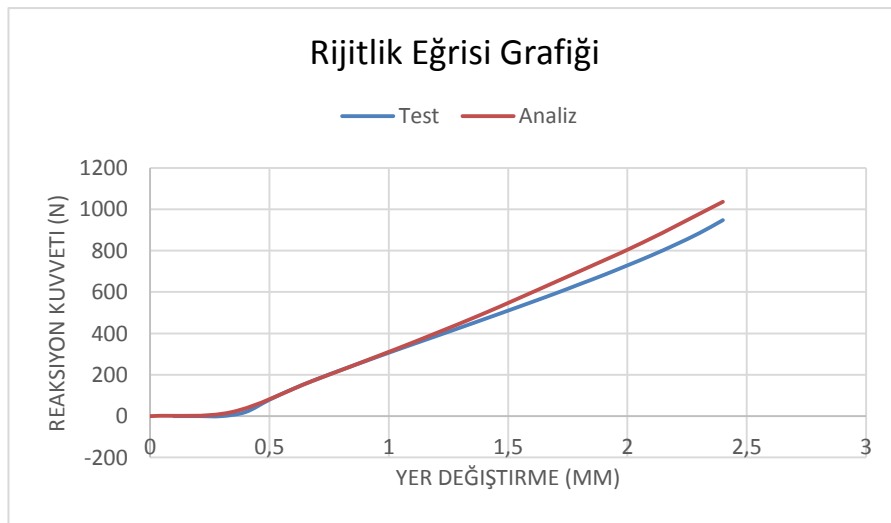
Basma numunesinin doğrusal olmayan çözümleri gerçekleştirilmiş ve yer değiştirme uygulama noktalarındaki reaksiyon kuvvetleri hesaplanmış, rijitlik eğrileri çıkarılmıştır. Kauçuk modeller sıkıştırılmaz olduğundan temas bölgelerinde malzemenin dışarı doğru genişlemeye çalıştığı Şekil 4.51’de görülebilir. Analizler sonucu elde edilen grafiklerde yer değiştirme arttıkça kauçuğun sıkıştırılmaz özelliğinden dolayı rijitliğin gittikçe arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.52. Test sonucu elde edilen rijitlik eğrisi



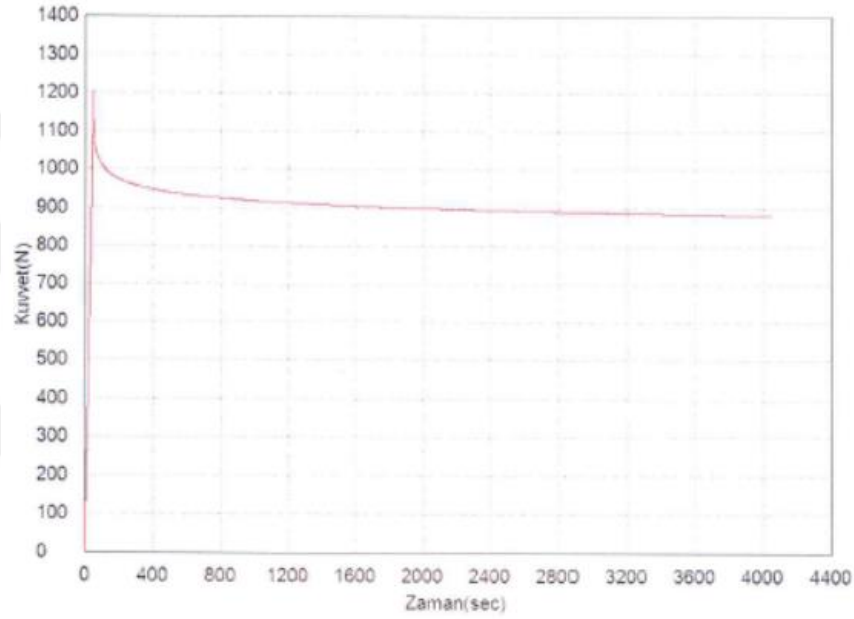
Şekil 4.53. Analiz sonucu elde edilen rijitlik eğrisi



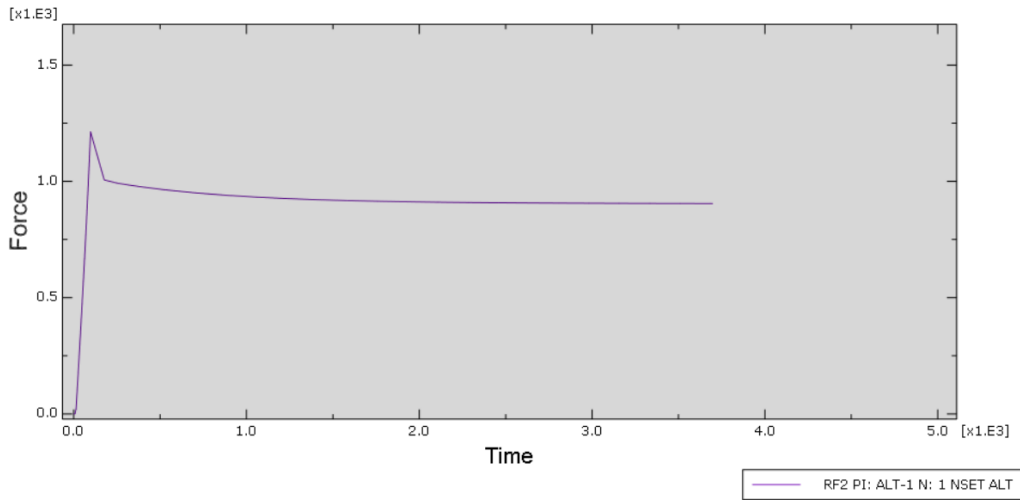
Şekil 4.54. Analiz ve test sonucu elde edilen rijitlik eğrileri

Test verileri ile elde edilen gerilme zaman grafiği(Şekil 4.52.) ile Abaqus yazılımı ile elde edilen gerilme-zaman grafiği (Şekil 4.53.) karşılaştırılmıştır. Şekil 4.54’de görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen hiperelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Test sırasında plakalar ile kauçuk numune arasında 0. 4 mm boşluk bırakıldığı için reaksiyon kuvveti 0,4 mm ye kadar düz gitmiş, temas sağlandıktan sonra rijitlik eğrisi artma eğilimini göstermiştir.

Abaqus yazılımında sonlu elemanlar yöntemini ile gerilme gevşeme analizi yapılmıştır.

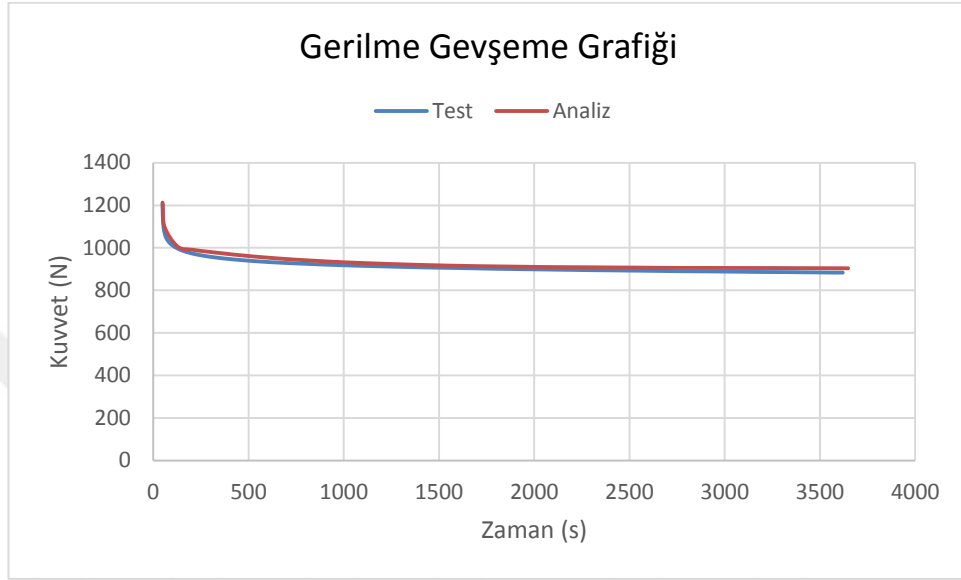


Şekil 4.55. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi

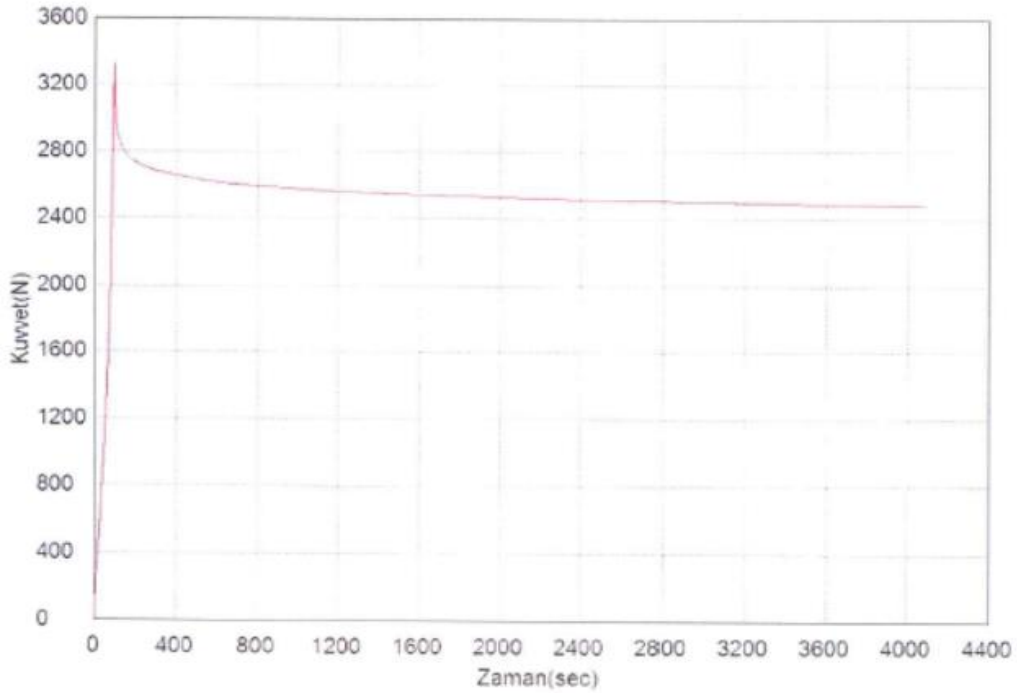


Şekil 4.56. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi

Test sonucu elde edilen değerler(Şekil 4.55) ile analiz sonucu elde edilen değerler (Şekil 4.56) uyumludur. Yüzde yirmi sıkışma ile test ve analiz sonuçlarının % 97,7 korelasyonu sağlanmıştır. (Şekil 4.57). Yüzde yirmi sıkıştırma test değerleri kullanılarak elde edilen hiperelastik ve viskoelastik modelin basma test numunesinin yüzde kırk sıkıştırması durumunda da doğru sonuç verdiği tespit edilmiştir.

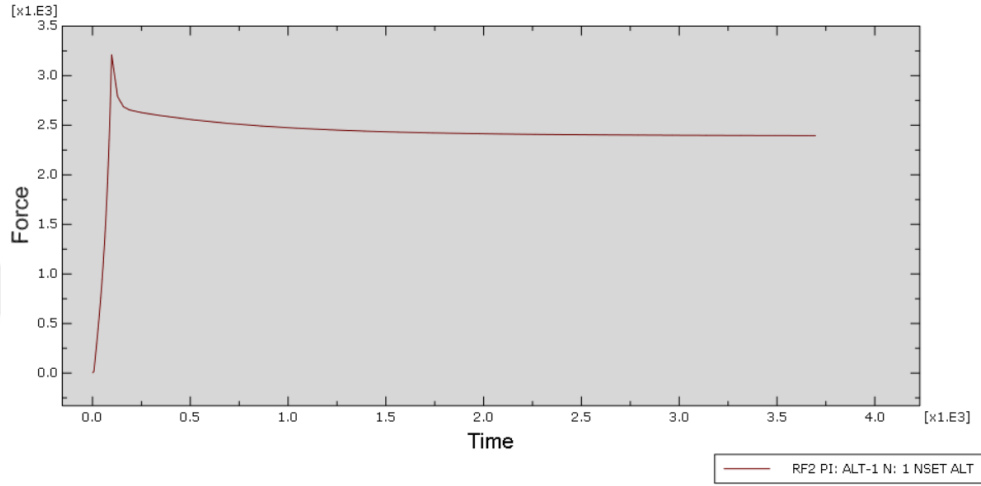


Şekil 4.57. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri

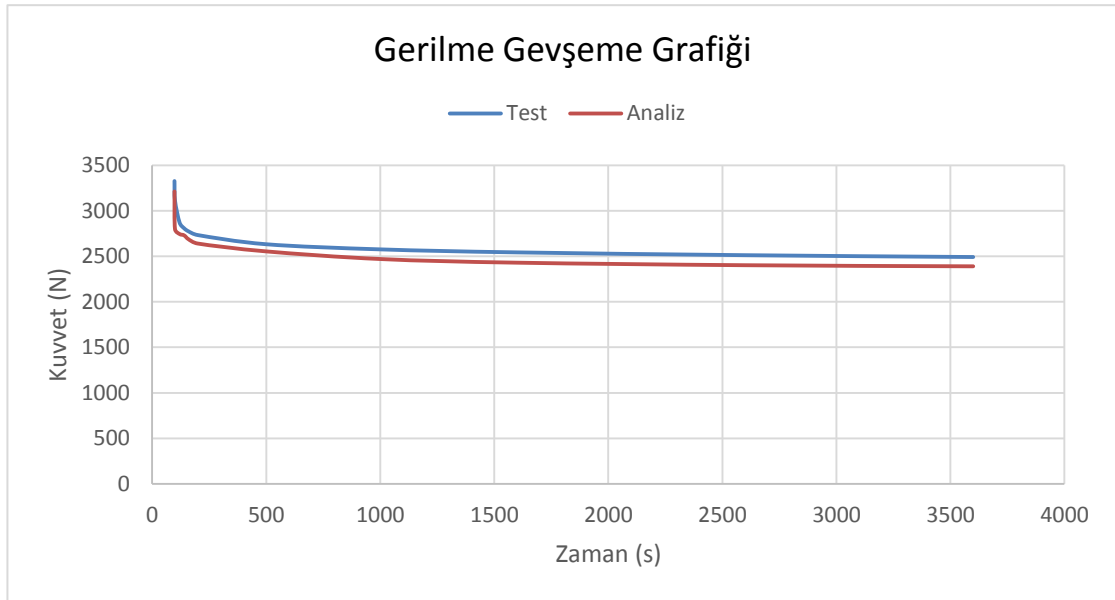


Şekil 4.58. Test sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi

%40 sıkıştırma için malzeme test sonuçları ile elde edilen gerilme gevşeme grafikleri(Şekil 4.58) ve Abaqus yazılımı ile elde edilen gerilme gevşeme grafiği(Şekil 4.59) karşılaştırılmıştır. Şekil 4.60' de görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen viskoelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Malzeme testi ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır. Korelasyon miktarı % 94,5 tespit edilmiştir.



Şekil 4.59. Analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme eğrisi



Şekil 4.60. Analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri

4.3. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Modellenmesi, Testi ve Analizi

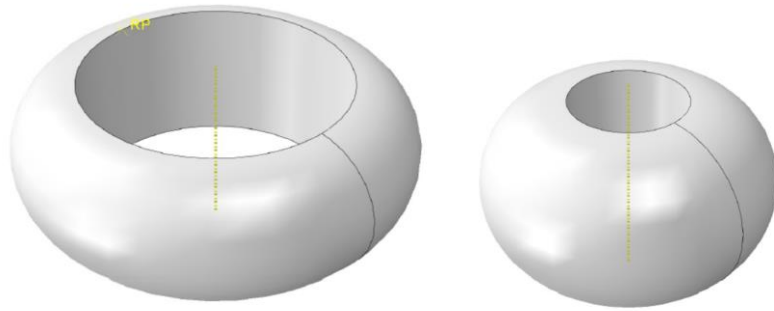
4.3.1. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi

Büyük conta ve küçük conta olarak isimlendirdiğimiz iki farklı sızdırmazlık ürünü üzerinde gerilme gevşeme analizleri yapılmıştır (Şekil 4.61). Contanın gerilme gevşeme testi, basit basma testine benzer şekilde kauçuk parçanın iki metal plaka arasında basılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Contaların hiperelastik ve viskoelastik modellenmesinde %20 sıkıştırılan basma numunesi test sonuçlarındaki gerilme gevşeme değerleri kullanılmıştır. Literatürde contaların sıkışma oranı genellikle %15-30 arasında alınmaktadır(Eriks-Sealing Elements Technical Handbook O-rings). .



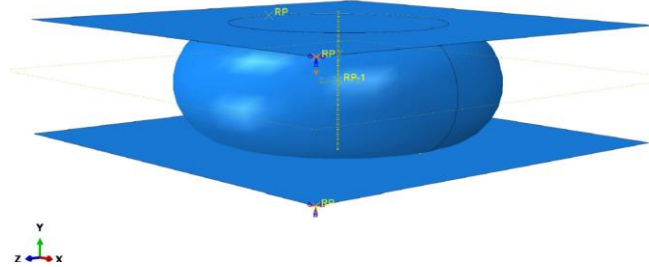
Şekil 4.61. Büyük ve küçük conta

Analiz çalışması için conta, alt ve üst plakalar üç boyutlu olarak katı modellenmiştir. Contaların katı modeli Şekil 4.62’de görülmektedir. Disk numunesi elastik, plakalar ise rijit olarak modellenmiştir. Böylece kauçuk conta basınç etkisi ile şekil değişimine uğrayabilirken plakalar şekil değiştirmeden kalacaktır.



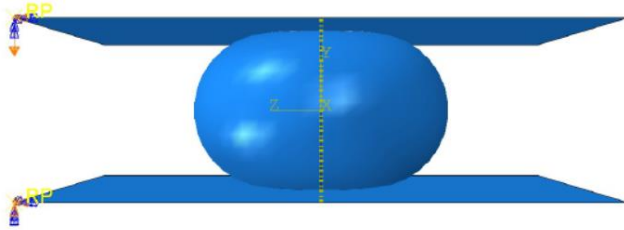
Şekil 4.62. Büyük ve küçük conta katı modeli

Malzeme modeli tanımından sonra sınır şartları belirlenmiştir. Büyük conta için sınır şartı olarak üst plakadan y ekseninde -3. 2 mm yer değiştirme alt plakadan sabitleme tanımlanmıştır (Şekil.4.63).



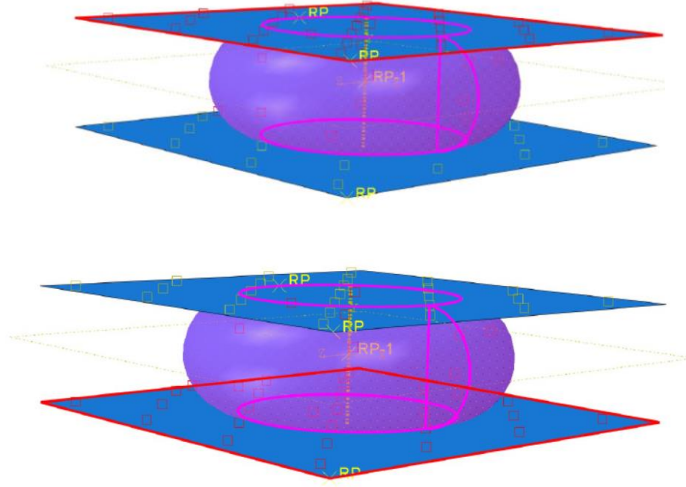
Şekil 4.63. Büyük conta sınır şartları

Contaların hiperelastik ve viskoelastik malzeme modelleri için %20 sıkıştırma yapılan basma test değerleri kullanılmıştır. Malzeme modeli basma analizindeki gibi Ogden $N=1$ ’ dir. Sınır şartı olarak üst plakadan y ekseninde -3. 6 mm yer değiştirme alt plakadan sabitleme tanımlanmıştır (Şekil 4.64).



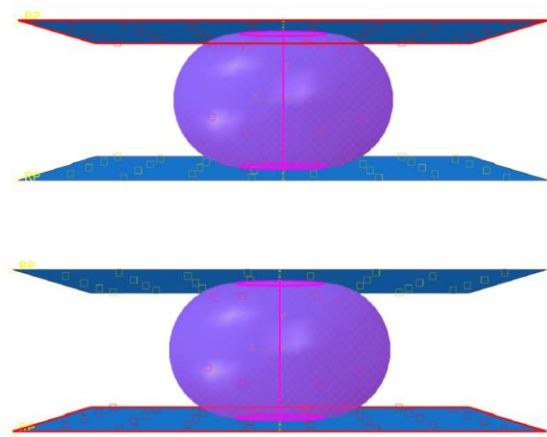
Şekil 4.64. Küçük conta sınır şartları

Kauçuk model ve modelin sıkıştırılmasını sağlayan rijit plakalar arasında temas tanımlanmıştır. Böylece kauçuk parça ve plakalar iç içe geçmeyecektir. Kauçuk yumuşak yüzey (slave surface), plakalar sert yüzey (master surface) olarak tanımlanmıştır.(Şekil 4.65) Temas tanımında teğetsel yönde temas için Penalty yöntemi ile 0.001 sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Normal yönde temas tanımları için yazılımda “Hard Contact” seçeneği uygulanmıştır.



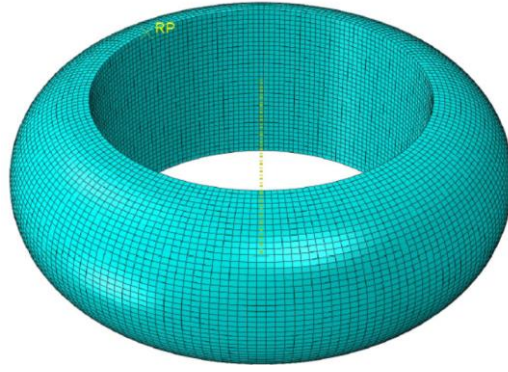
Şekil 4.65. Büyük conta sonlu elemanlar için yapılan temas tanımlamaları

Küçük contanın temas tanımları da büyük conta ve basma analizinde olduğu gibidir. Kauçuk yumuşak yüzey (slave surface), plakalar sert yüzey (master surface) olarak tanımlanmıştır(Şekil 4.66).



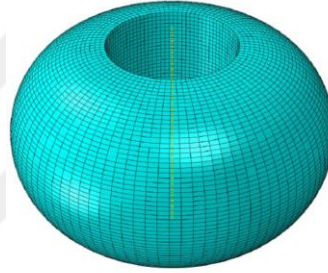
Şekil 4.66. Küçük conta üst ve alt yüzey temas tanımlamaları

Büyük contanın sonlu elemanlar yapısında 102084 adet düğüm noktası, 94188 adet doğrusal hexahedral C3D8RH tipi eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu 0.5mm olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.67’de verilmiştir.



Şekil 4.67. Büyük conta sonlu elemanlar model

Küçük contanın sonlu elemanlar yapısında 56250 adet düğüm noktası, 52650 adet doğrusal hexahedral C3D8RH tipi eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu 0.5mm olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.68’te verilmiştir.



Şekil 4.68. Küçük conta sonlu elemanlar modeli

4.3.2. Sızdırmazlık Elemanı Contaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu

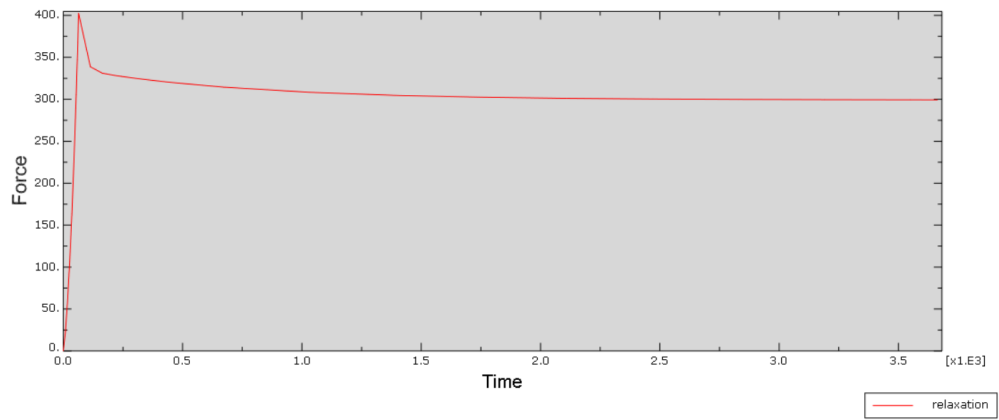
4.3.2.1. Büyük Contanın Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları

16 mm yüksekliği olan kauçuk sızdırmazlık elemanı (büyük conta) y ekseninde - 3.2 mm sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma sonucu reaksiyon kuvveti analiz sonucunda 402.6 N’den 3600 saniye süresi sonunda 299.3 N’ a düştüğü Çizelge 4.15 ’de görülmektedir.

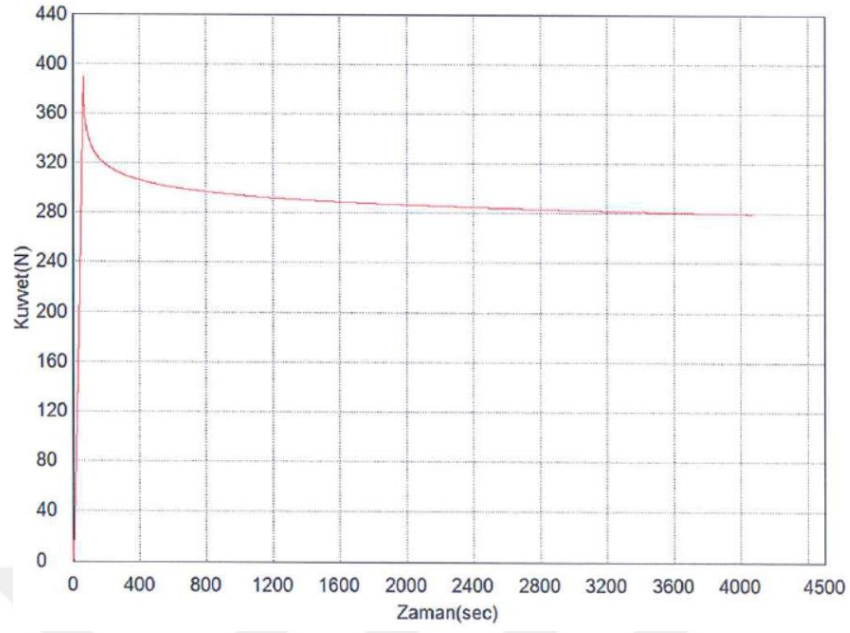
Çizelge 4.15. Büyük conta analiz sonucunda bulunan kuvvet-zaman değerleri

Name: relaxation		
	X	Y
1	0	0
2	9	23.3736
3	18	60.8604
4	27	107.826
5	36	163.837
6	45	229.328
7	54	305.05
8	58.5	346.707
9	60.75	367.798
10	63	391.533
11	64	402.633
12	64	402.633
13	113.532	338.735
14	163.065	331.164
15	212.597	328.564
16	262.13	326.532
17	336.428	323.794
18	447.876	320.193
19	670.772	314.488
20	1030.77	308.357
21	1390.77	304.669
22	1750.77	302.451
23	2110.77	301.118
24	2470.77	300.316
25	2830.77	299.834
26	3190.77	299.544
27	3550.77	299.37
28	3664	299.331

Quantity Types
X: Time Y: Force

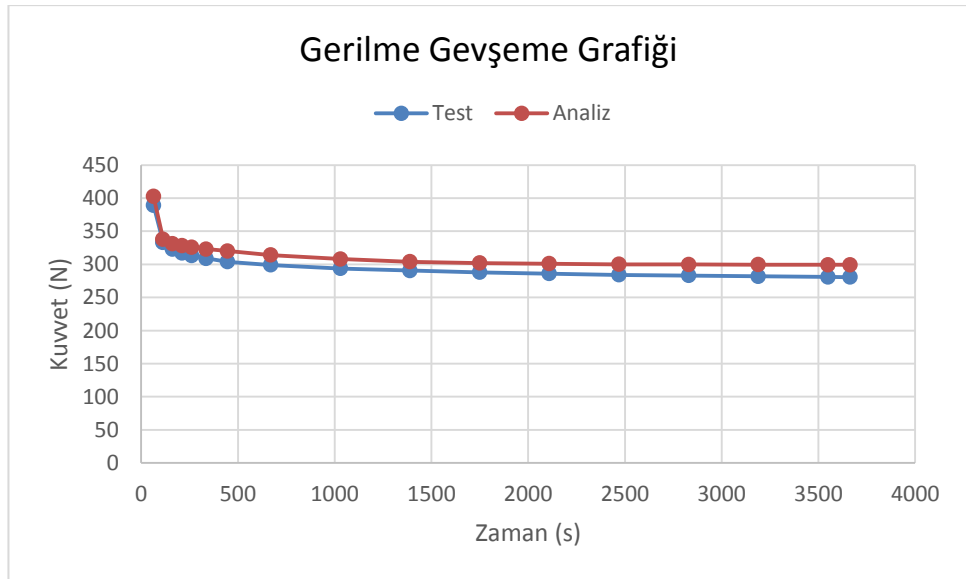


Şekil 4.69. Büyük conta analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği



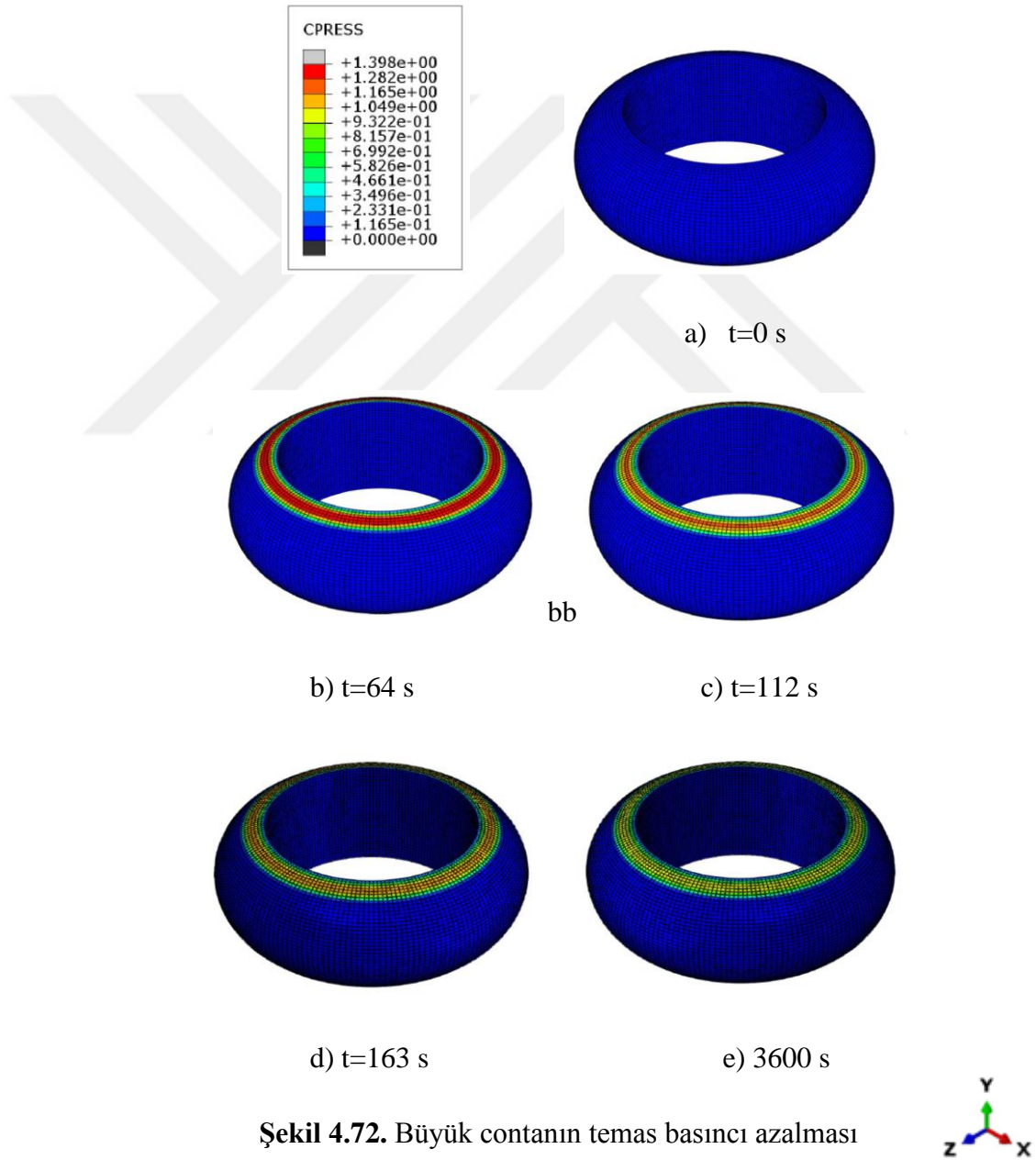
Şekil 4.70. Büyük conta test sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği

Abaqus yazılımı ile elde edilen gerilme gevşeme grafiği(Şekil 4.69) ve malzeme test sonuçları(Şekil 4.70) ile elde edilen gerilme gevşeme grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.71’ de görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen viskoelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Malzeme testi ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır. Elde edilen korelasyon oranı %93,7 ‘dir.



Şekil 4.71. Büyük conta gerilme gevşeme eğrileri

Şekil 4.71’de büyük conta analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri verilmektedir. Sızdırmazlık elemanı (büyük conta) üst bölgesindeki sıkışma sonucu oluşan basınç değişimi dağılımları belli zaman aralıklarında Şekil 4.72’ de verilmiştir. Burada başlangıçta 1.39 MPa olan basınç değerinin 3550 saniye sonra 1.04 MPa değerine düştüğü görülmektedir. Bu ürün %11,1 oranında gerilme gevşemesi göstermektedir. 1.04 MPa temas basıncını yenecek dış ortam basıncı oluşması durumunda ürün sızdırmazlık fonksiyonunu yerine getiremeyeceği sonuç olarak söylenebilir.



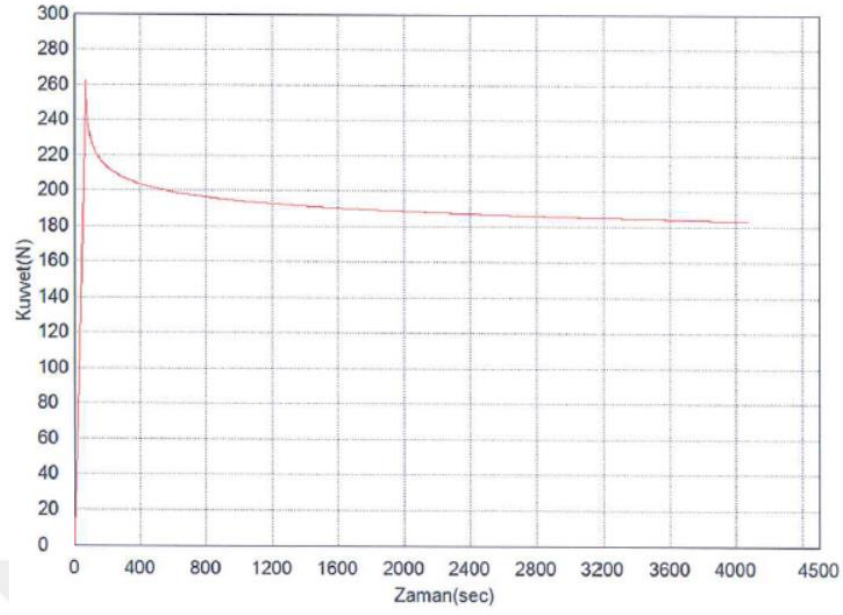
4.3.2.2.Küçük Contanın Gerilme Gevşeme Analizi ve Test Sonuçları

18 mm yüksekliği olan kauçuk sızdırmazlık elemanı (küçük conta) y eksenini yönünde - 3.6 mm sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırma sonucu reaksiyon kuvveti analiz sonucunda 285.575 N'dan 3600 saniye süresi sonunda 213.15 N' a düştüğü Çizelge 4.16'de görülmektedir.

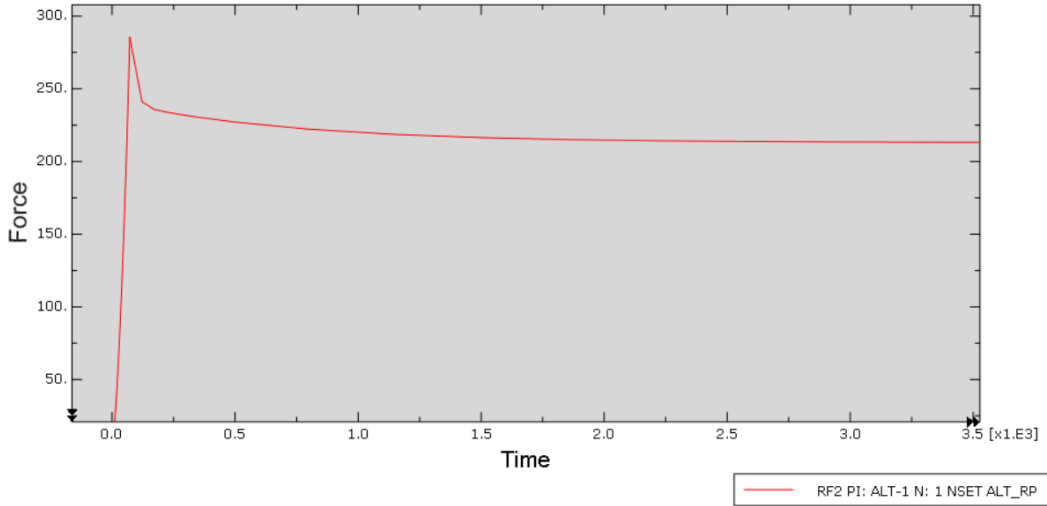
Çizelge 4.16. Küçük conta analiz sonucunda bulunan kuvvet-zaman değerler

Name: Relaxation		
	X	Y
1	0	-0
2	10	17.7701
3	20	44.6318
4	30	77.544
5	40	116.334
6	50	161.125
7	60	212.679
8	70	272.556
9	72	285.575
10	72	285.575
11	121.78	241.111
12	171.56	235.792
13	221.34	233.957
14	271.121	232.509
15	345.791	230.555
16	495.131	227.211
17	793.812	222.312
18	1153.81	218.592
19	1513.81	216.357
20	1873.81	215.014
21	2233.81	214.207
22	2593.81	213.722
23	2953.81	213.43
24	3313.81	213.255
25	3672	213.15

Quantity Types
X: Time Y: Force

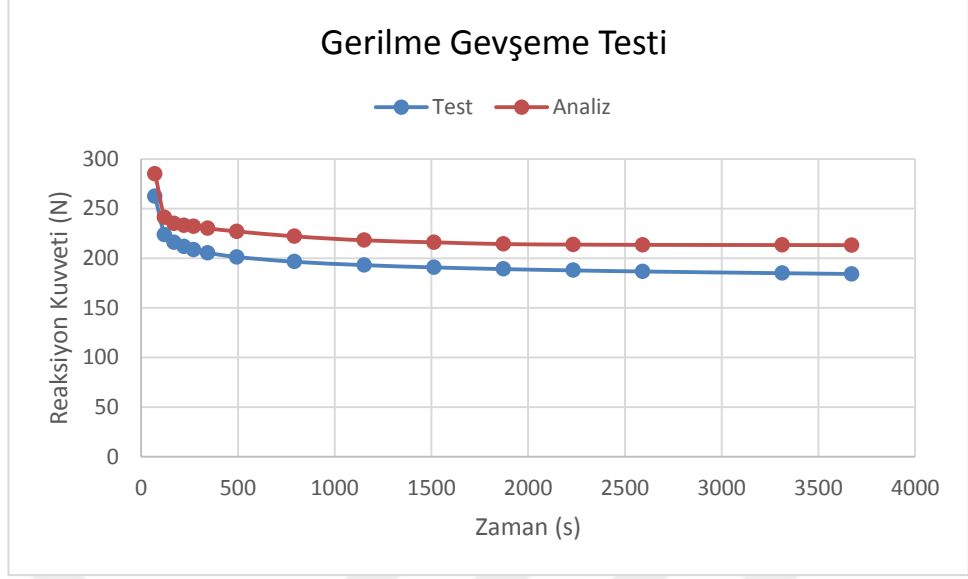


Şekil 4.73. Küçük conta test sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği



Şekil 4.74. Küçük conta analiz sonucu elde edilen gerilme gevşeme grafiği

Şekil 4.73. %20 (3.6 mm) sıkıştırılan küçük contanın gerilme gevşeme testi kuvvet-zaman grafiği gösterilmektedir. Abaqus yazılımı ile elde edilen gerilme gevşeme grafiği ve malzeme test sonuçları ile elde edilen gerilme gevşeme grafikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.75’de küçük conta analiz ve test sonucunda elde edilen gerilme gevşeme eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.75’ de görüldüğü üzere şekil ve model eğrileri uyumlu çıkmıştır. Grafiklerin uyumlu çıkması elde edilen viskoelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Malzeme testi ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının korelasyonu sağlanmıştır.



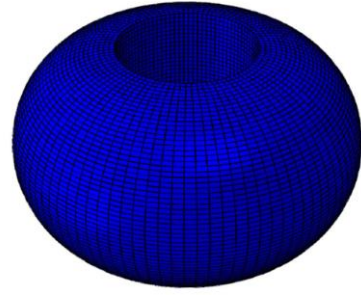
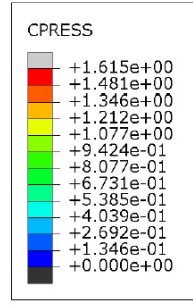
Şekil 4.75. Küçük conta gerilme - gevşeme eğrileri

Küçük conta analiz sonucu (Şekil 4.74) ve test sonucu (Şekil 4.73) arasında %86.37 korelasyon sağlanmıştır. Sıkışan kesit büyük contaya göre daha dar alanda olduğu için test ile analiz sonucu arasındaki korelasyon büyük contaya göre daha az gerçekleşmiştir.

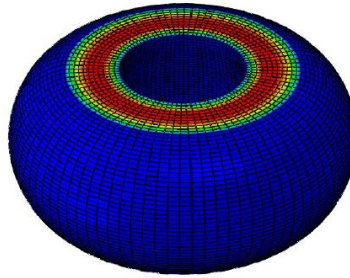
Elastomer malzemelerin basma testleri yapılırken sıkıştırma plakaları ile elastomer arasındaki sürtünmenin sıfır olması gerekmektedir. Ancak pratikte test sırasında sürtünmeyi azaltmak için yüzeyler arasında yağlayıcı malzemeler kullanılır. Bu durumda da sıkıştırma sırasında numunenin plakalar arasından kayıp testin yapılamaması söz konusu olabilmektedir. Analizlerde alınan 0.01 sürtünme katsayısı test sırasındaki sürtünme katsayısından farklı olabileceğinden hareketle sonlu elemanlar analizi sonuçları ile test sonuçları arasında çıkan fark buna yorumlanabilir.

Sızdırmazlık elemanı (küçük conta) üst bölgesindeki sıkışma sonucu oluşan basınç değişimi dağılımı Şekil 4.76' de verilmiştir. Burada başlangıçta 1.213 MPa olan basınç değerinin 3600 saniye sonra 0.9 MPa değerine düştüğü görülmektedir. Bu değer üzerinde bir ortamda çalışacak olan bir sızdırmazlık elemanının fonksiyonunu yerine getiremeyeceği sonuç olarak söylenebilir.

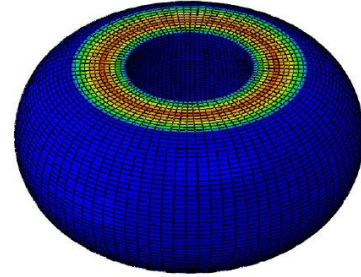
Bu sıkışma sonucunda yapı üzerinde ilk anda maksimum von Mises gerilmesi 1.508 MPa iken, maksimum gerilme 3600 s sonunda azalarak 1.116 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerden de kauçuk üzerinde gerilme - gevşemesi gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



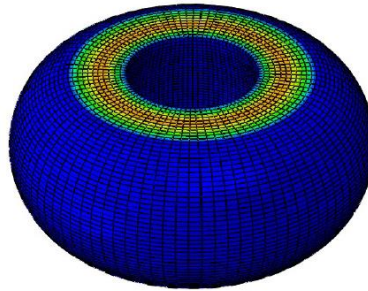
a) t=0 s



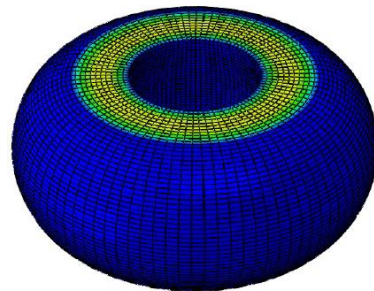
b) t=72 s



c) t=49.7

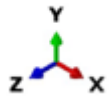


d) t=423 s



e) t=3600 s

Şekil 4.76. Küçük conta da temas basıncı azalması



4.4. Hareketli Sistemlerde Sızdırmazlık İçin Conta Kesiti Şekil Optimizasyonu

Bu bölümde hareketli parçalar arasında sızdırmazlık sağlayan contaların kesitlerinin şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Deney Tasarımı yaklaşımı ile sayısal deneyler yapılmış, bu verilere eğriler uydurulmuş ve son olarak istenen şartları sağlayan optimum kesit değerlerine ulaşılmıştır.

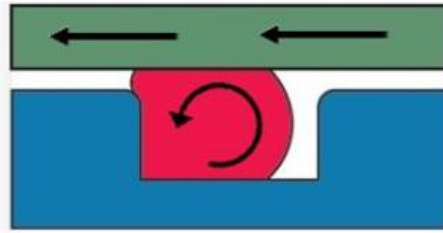
4.4.1. Deney Tasarımı

Deney tasarım yöntemleri genel olarak klasik ve istatistikî olarak iki farklı metodolojiye ayrılır; Klasik metod dışında, istatistikî yöntemlerden; rasgele blok düzeni (randomized experiments), kesirli veya tam faktöryel tasarım (factorial design), cevap yüzeyi metodu (response surface), Taguchi yöntemi, yarı deneysel tasarım (quasi-experimental) en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Bu yöntemler içinde tam faktöryel yöntemi, diğer yöntemlere göre tüm deney sonuçlarını dikkate alarak fazla sayıda veri ile çalışmayı gerektirir. Hesaplama süresi diğer istatistikî yöntemlere nazaran uzun olması, yanında hata payı bakımından kıyaslandığında daha hassas sonuçlar elde edilebilir(Yücel 2018).

Bu çalışmada, kesitlerin şekil optimizasyonunda kullanılmak üzere sonlu elemanlar modeli yerine geçen yaklaşık denklemler elde edilmiştir. Deney Tasarım tablosu için seçilen tasarım parametrelerinin seviyeleri belirlenmiş ve sayısal deneyler yapılarak çıktı değerleri hesaplanmıştır. Deney tasarımı tablosundan, istenen çıktı değerlerinin tasarım parametrelerine bağlı olarak elde edilmesi için eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır.

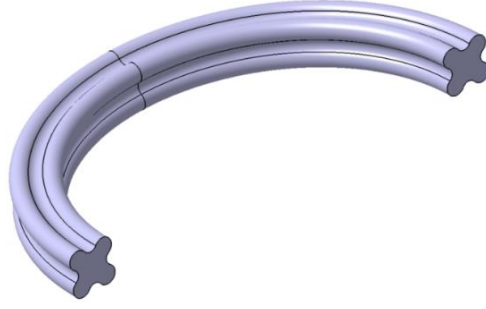
4.4.2. Conta Kesit Optimizasyonu

Birbirleri arasında hareketin olmadığı elemanlar arasında conta kullanımında genellikle dairesel kesitli contalar (o-ring) kullanılmaktadır. Ancak piston ve silindir gibi birbirleri ile izafi hareket yapan parçalar arasında dairesel kesitli conta kullanımında contanın kesit eksenini etrafında dönmesi sonucu hasar görülebilmektedir. Şekil 4.77’de hareketli parçalar arasında dairesel conta kullanımı durumunda oluşan dönme belirtilmektedir.



Şekil 4.77. Dairesel conta kullanımında oluşan dönme

Bu tür hasarları önlemek için dairesel kesitli conta yerine farklı kesitler kullanılır. Bu amaçla kullanılan contaların başında X kesitli contalar gelmektedir (Şekil 4.78).



Şekil 4.78. X kesitli conta

X kesitli contalar sıkışma altında izafi hareket durumunda kendi eksenini etrafında dönmeyeceği için bu tür hasarlar görülmez.

Aynı kanal içine aynı yüksekliğe sahip dairesel kesitli conta ile X kesitli contanın %20 sıkışma durumu, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek maksimum temas basıncı ve gerilme - gevşeme sonuçları karşılaştırılmıştır.

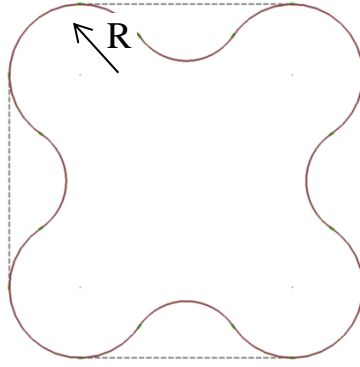


Şekil 4.79. X contası model ölçüleri

(<https://www.marcorubber.com/downloads/marco-x-ring-size-chart.pdf>)

Kullanılan model Marco Rubber Plastics Quad-Ring® Seals and Rubber XRing Seal Standard Size Chart kataloğundan alınmıştır. Tasarımı ve optimizasyonu yapılan conta modeli katalogdaki 400 numaralı modeldir.Şekil 4.79’de ID ve CS uzunlukları belirtilmiştir.Kullandığımız conta ölçülerinde ID=34.29 mm ve CS=6.99 mm’ dir.(<https://www.marcorubber.com/downloads/marco-x-ring-size-chart.pdf>)

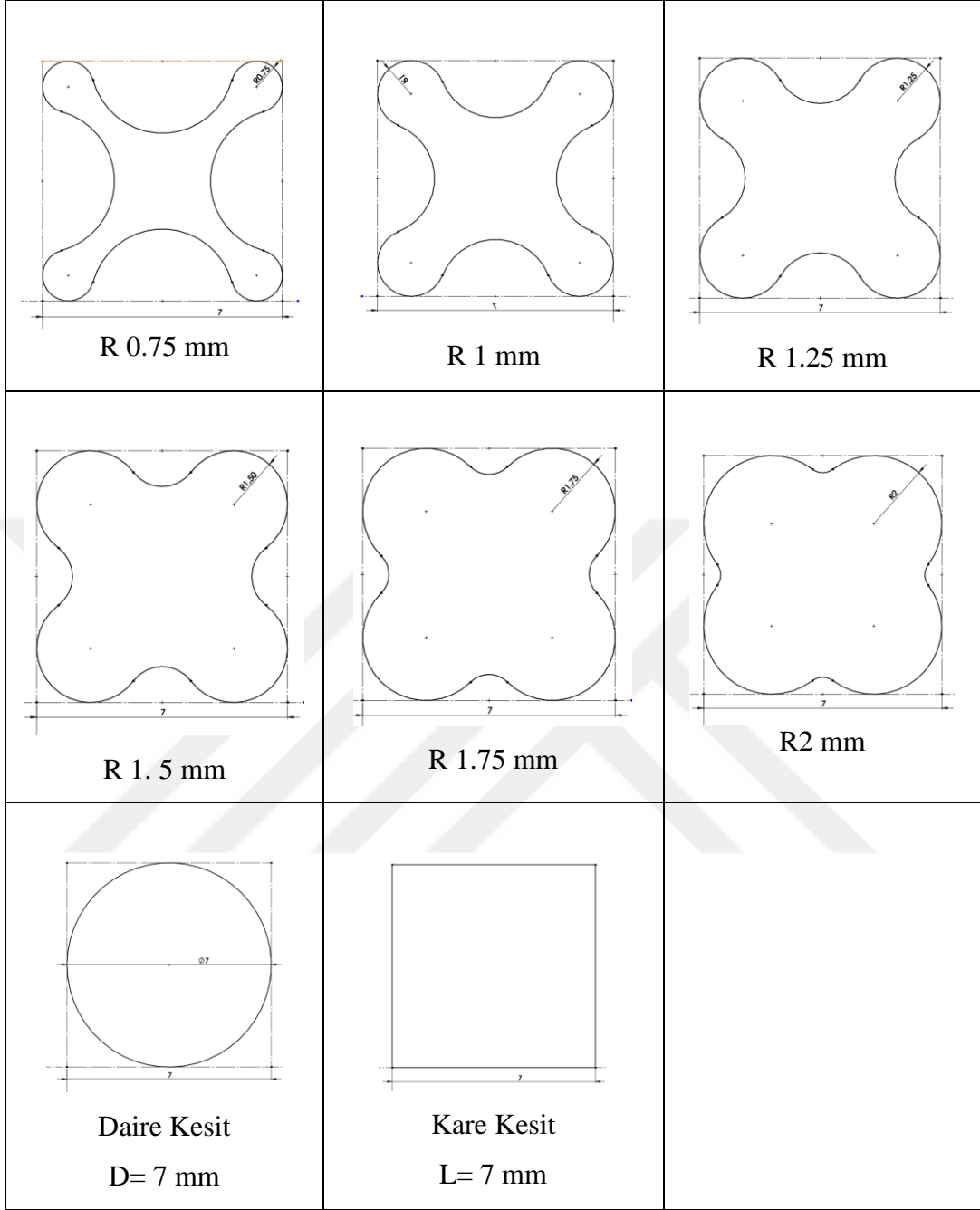
X kesitli contanın %20 sıkışma için maksimum temas basıncı oluşturması amacıyla şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Kanal geometrisi sabit kalmak üzere X kesitinde R parametresi şekil parametresi olarak alınmıştır (Şekil 4.8092)



Şekil 4.80. Şekil optimizasyonu parametresi (R)

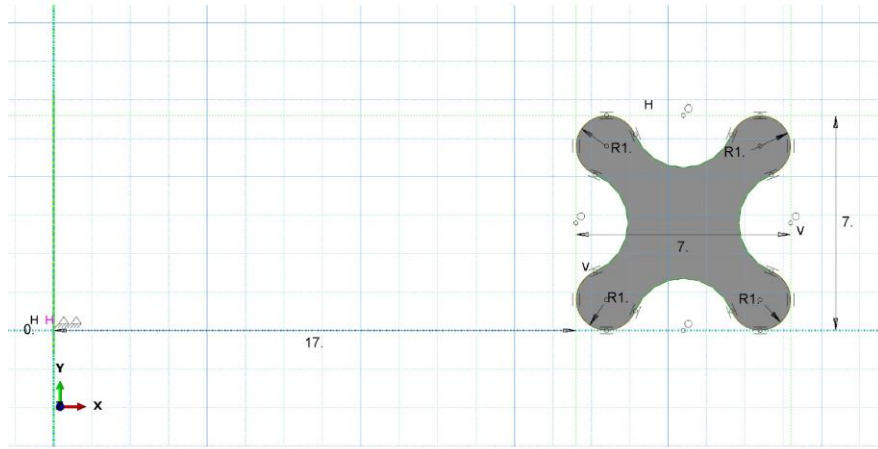
Parametrik tasarım için oluşturulan X kesit geometrisi farklı R değerleri için Şekil 4.81’de verilmiştir. Tüm kesitler 7x7 mm boyutlarında kare kesiti içinde kalmaktadır.

Öncelikle Tam Faktöriyel yöntemine göre Deney Tasarım tablosu oluşturulmuş ve analizler yapılarak temas basıncı ve gerilme - gevşeme sonuçları elde edilmiştir. R parametresine bağlı olarak temas basıncı denklemi eğri uydurma ile elde edilmiş ve maksimizasyon problemi çözümlenerek maksimum temas basıncı için optimum X kesitli conta geometrisi elde edilmiştir.



Şekil 4.81. Parametrik X kesit, daire kesit,kare kesit geometrileri

4.4.2.1. X Kesitli Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Modellenmesi

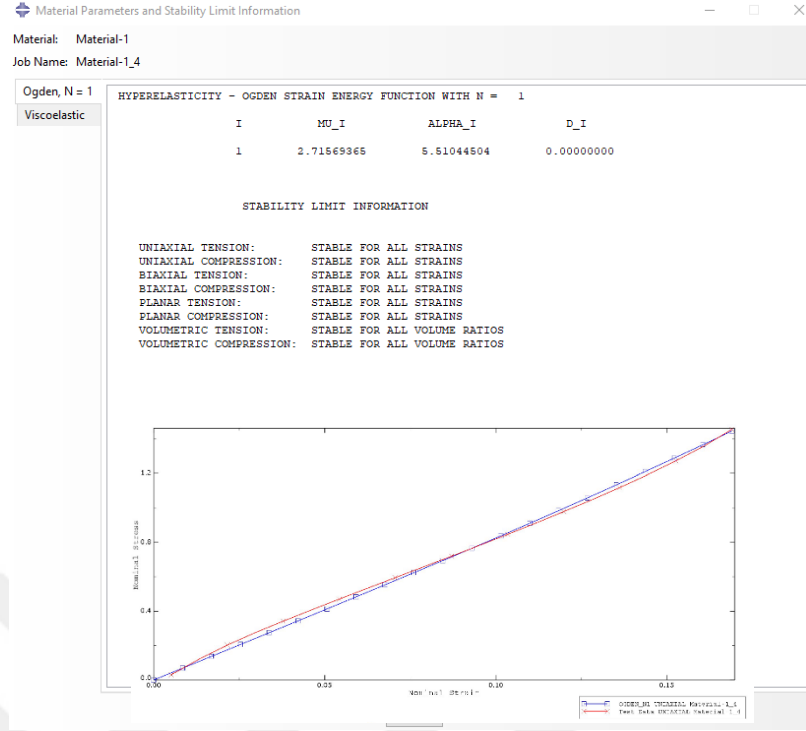


Şekil 4.82. R=1 mm modelinin X kesit katı modeli

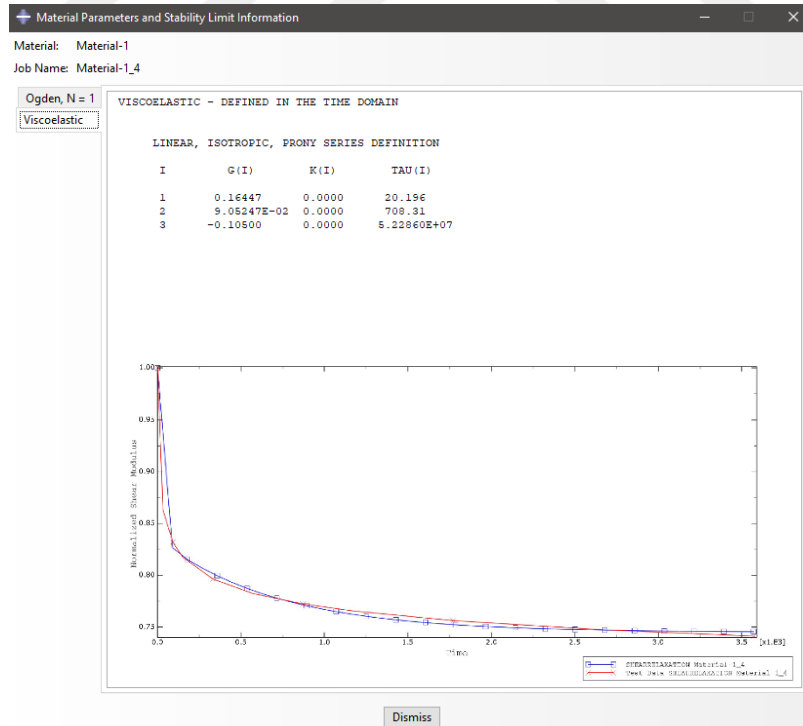
Kauçuk katı modeli 2D Axisymmetric – Deformable olarak tasarlanmıştır. Conta gibi kesiti eksen üzerinde döndürülerek katı model oluşturulan parçalarda 3D katı modellemek yerine 2D Axisymmetric seçeneği tercih edilebilir. Böylece analiz çözüm süresi kısalmış olmaktadır. Alt ve üst plaka ise 2D Axisymmetric – Analytical rigid olarak modellenmiştir.



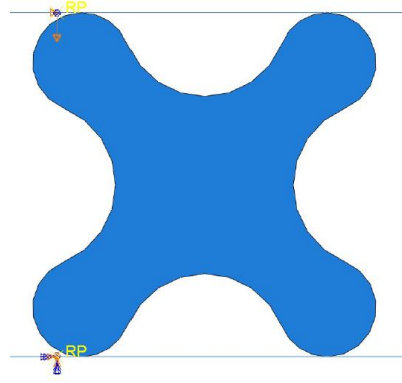
Şekil 4.83. R=1 mm modelinin X kesit katı modeli ve plakaların montaj görünümü Hiperelastik ve viskoelastik modellemede basma testi ön çevrimli %20 sıkıştırma değerleri kullanılmıştır. Malzeme modeli Ogden N=1 alınmıştır. Ogden katsayıları ve hiperelastik test ve model eğri uyumu Şekil 4.84’de görülmektedir. Prony katsayıları ve viskoelastik test ve model eğri uyumu ise Şekil 4.85’de görülmektedir.



Şekil 4.84. R=1 mm modelinin hiperelastik modellenmesi

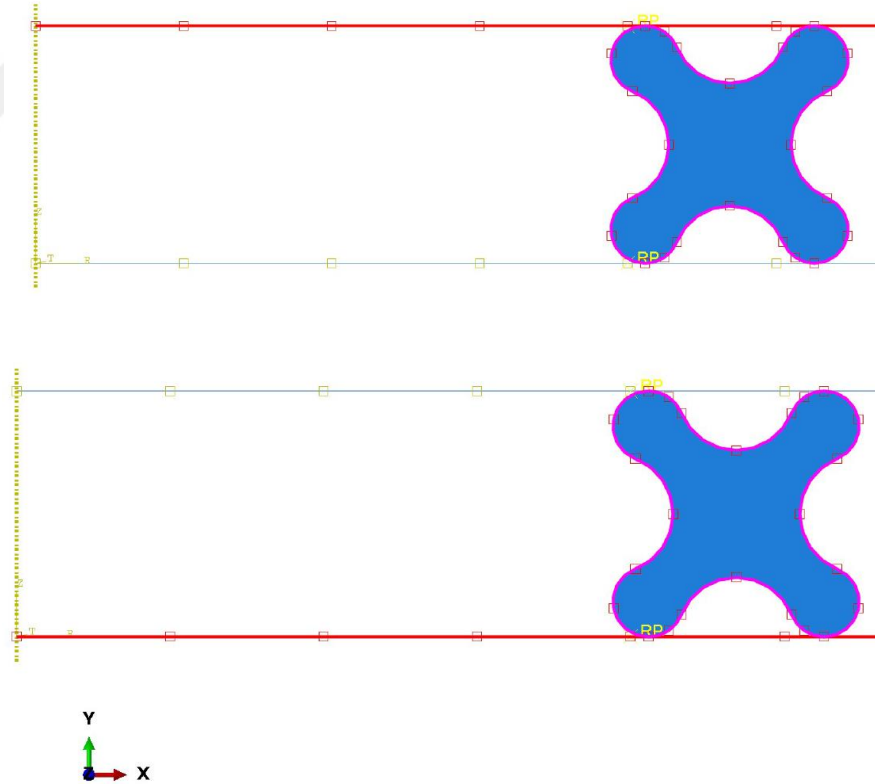


Şekil 4.85. R=1 mm modelinin viskoelastik modellenmesi



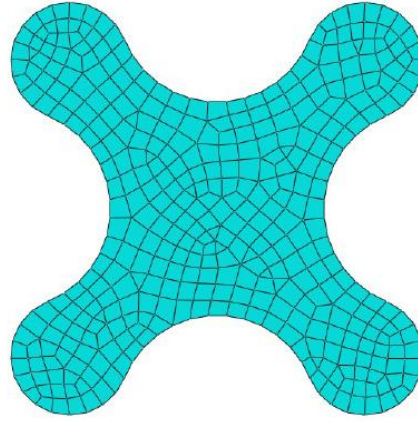
Şekil 4.86. R=1 mm modelinin sınır şartları

Sınır şartı olarak üst plakadan y ekseninde -2 mm yer değiştirme alt plakadan sabitleme tanımlanmıştır.(Şekil 4.86.) Kauçuk model ve modelin sıkıştırılmasını sağlayan rijit plakalar arasında temas tanımlı yapılmıştır.



Şekil 4.87. R=1 mm modelinin temas tanımları

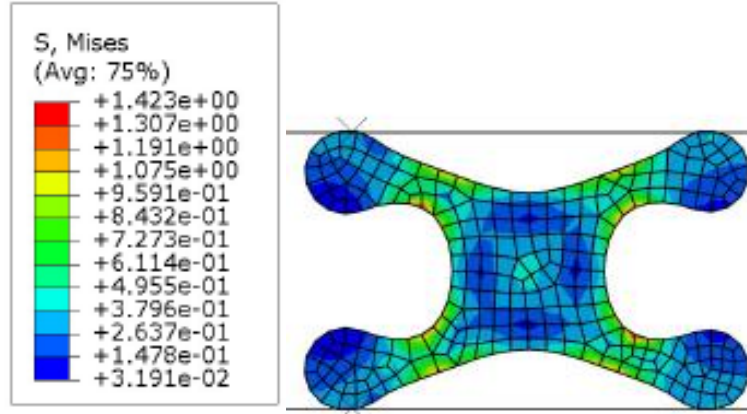
Kauçuk yumuşak yüzey (slave surface), plakalar sert yüzey (master surface) olarak tanımlanmıştır(Şekil 4.87).Temas tanımında teğetsel yönde temas için Penalty yöntemi ile 0.1 sürtünme katsayısı kullanılmıştır. Normal yönde temas tanımı için yazılımda “Hard Contact” seçeneği uygulanmıştır.



Şekil 4.88. R=1 mm sonlu elemanlar modeli

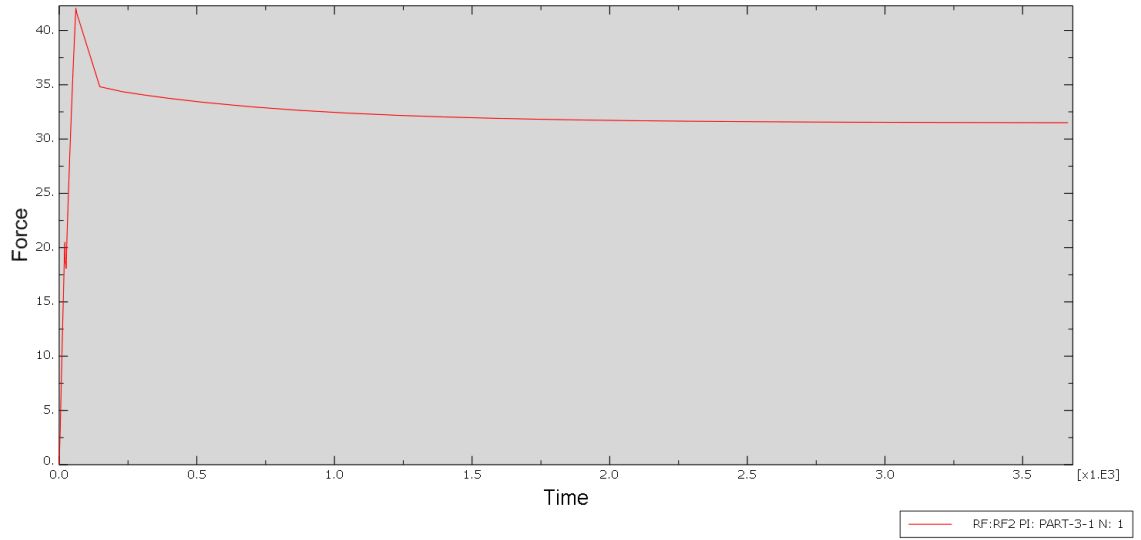
R=1 mm x kesitli conta modeli sonlu elemanlar yapısında 425 adet düğüm noktası, 365 adet doğrusal quadrilateral CAX4H tipi eleman ve 14 doğrusal CAX3H tipi eleman kullanılmıştır. Eleman boyutu 0.3 mm olarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 4.88’de verilmiştir. Şekil 4.81 ’de verilen tüm kesit geometrileri için modelleme, malzeme seçimi, montaj, temas tanımları ve sonlu elemanlar modeli oluşturma benzer şekilde yapılmıştır. R=0.75 mm modelinin çok ince hatlara sahip olması nedeni ile -2 mm sıkıştırma analizi çözülememiştir. R=1mm modeli ve diğer modellerin analizi başarılı şekilde çözümlenmiştir. Farklı kesit tasarımları için analiz sonucu elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4.89,Şekil 4.91,Şekil 4.93, Şekil 4.95,Şekil 4.97,Şekil 4.99,Şekil 4.101, Şekil 4.103’de görülmektedir.

4.4.2.2. X Kesitli Contaların Hiperelastik ve Viskoelastik Analiz Sonuçları

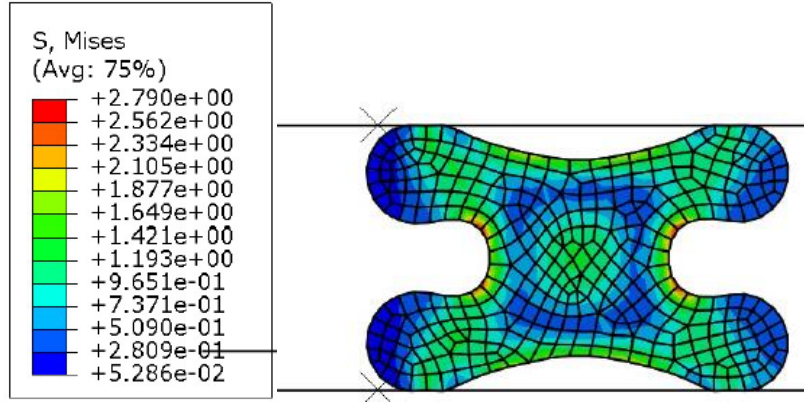


Şekil 4.89. R0.75mm modelinin $t=3600$ s 'deki gerilme dağılımı

R=0.75 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 42 N'dan 31.5 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.90).



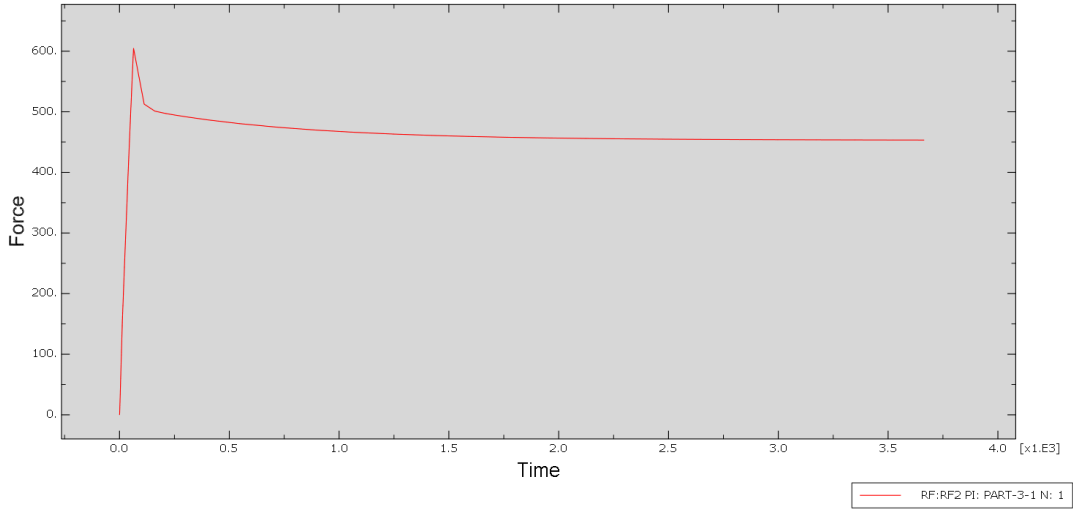
Şekil 4.90. R0.75 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği



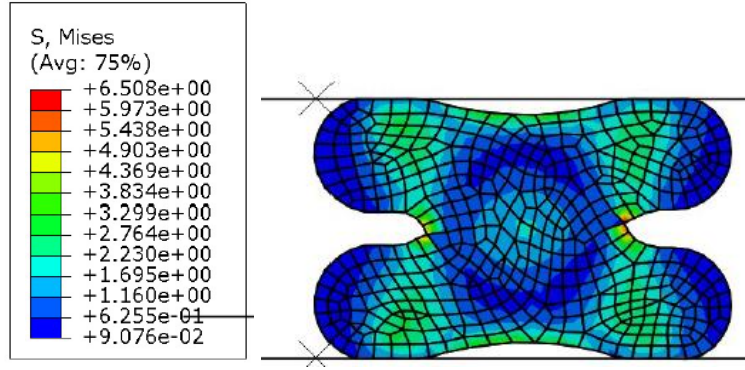
(b)

Şekil 4.91. R1mm(a) ve R0.75mm(b) modelinin $t=3600$ s 'deki gerilme dağılımı

R=1 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 604 N'dan 453 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.92).

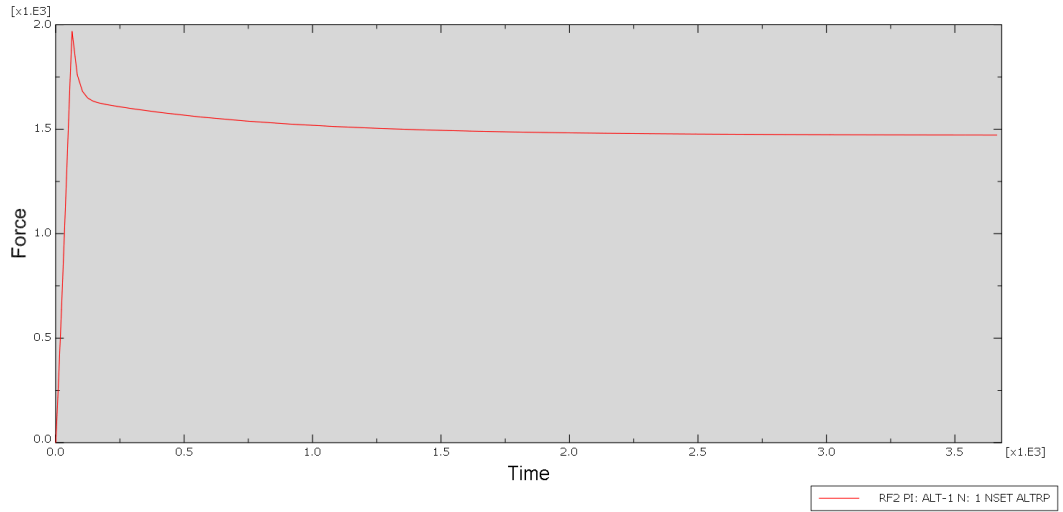


Şekil 4.92. R1 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği

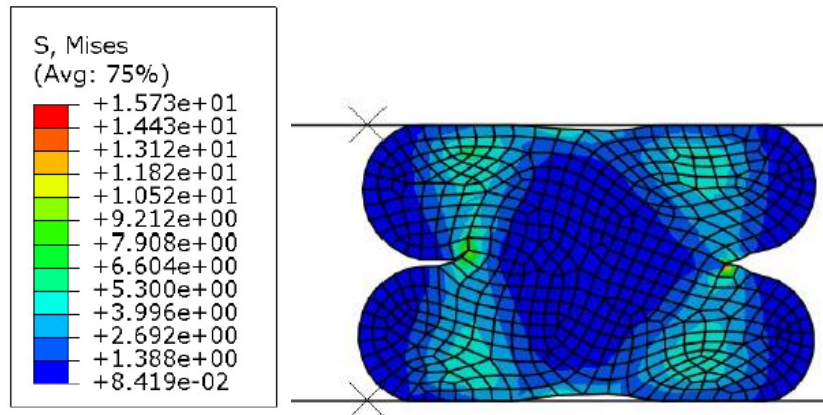


Şekil 4.93. R1.25 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı

R=1.25 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 1968 N'dan 1427 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.94).

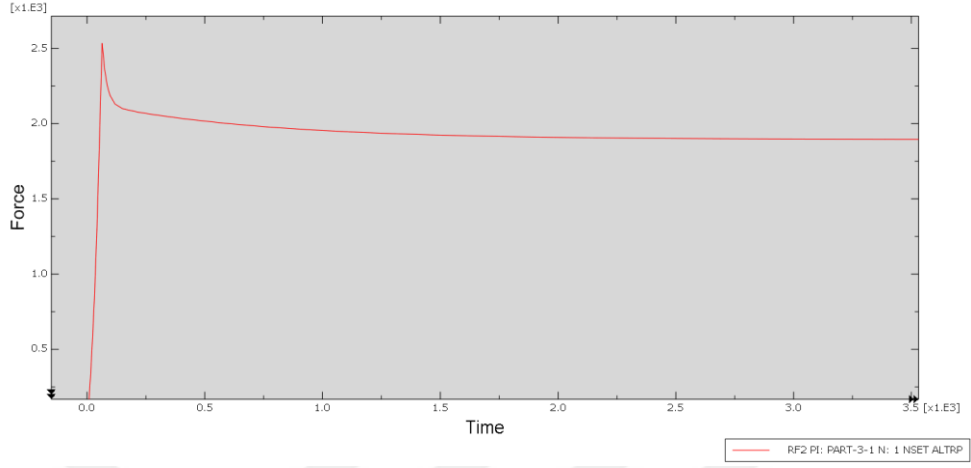


Şekil 4.94. R1.25 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği



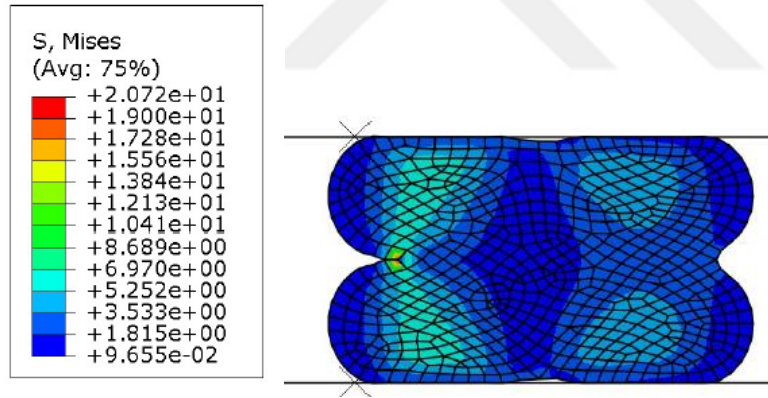
Şekil 4.95. R1.5 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı

R= 1.5 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 2534 N'dan 1896 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.96).

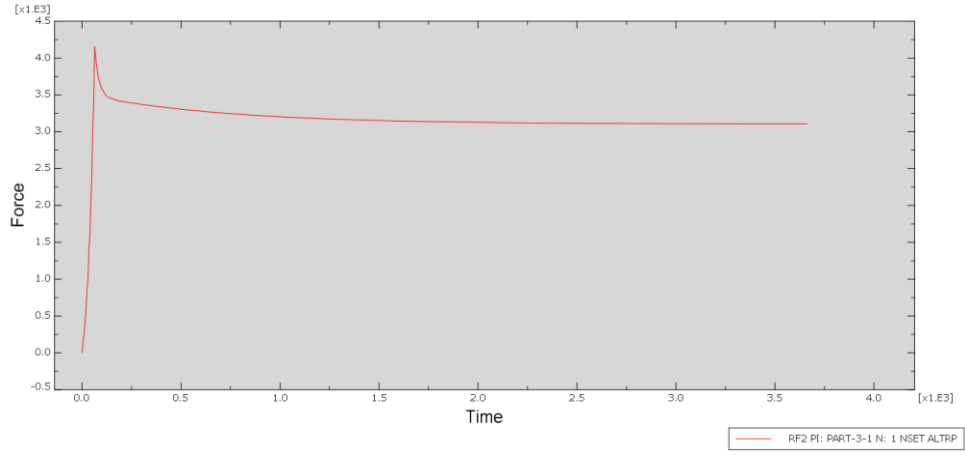


Şekil 4.96. R1.5 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği

R=1.75 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 4156 N'dan 3105 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.98).

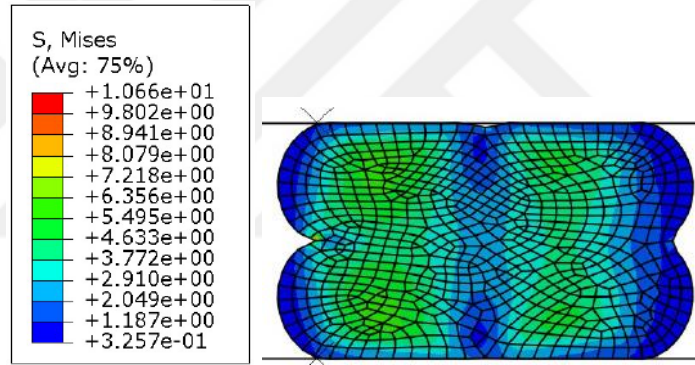


Şekil 4.97. R1.75 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı

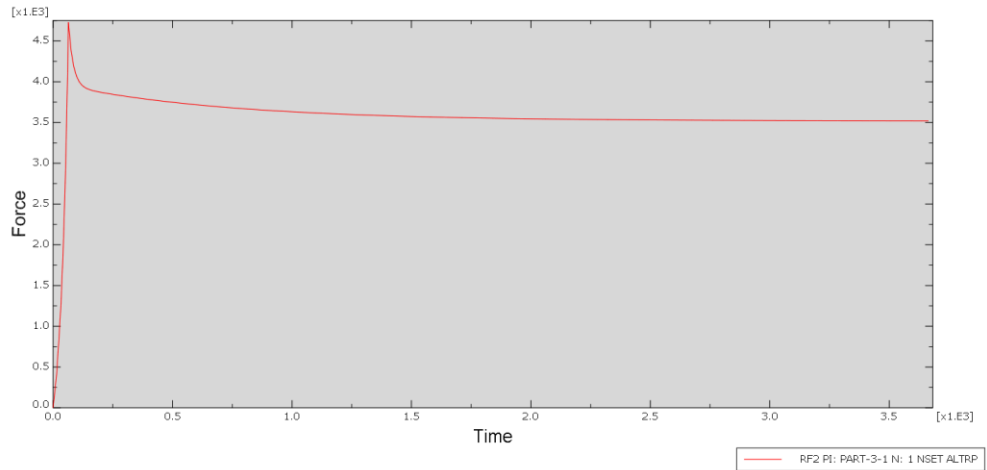


Şekil 4.98. R1.75 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği

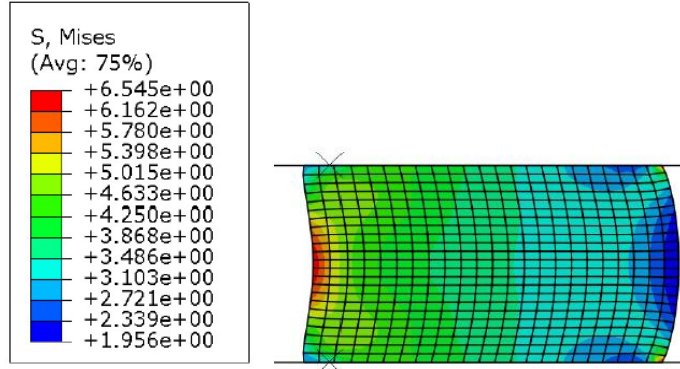
R=2 mm modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 4728 N'dan 3520 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.100).



Şekil 4.99. R2 mm modelinin t=3600 s 'deki gerilme dağılımı

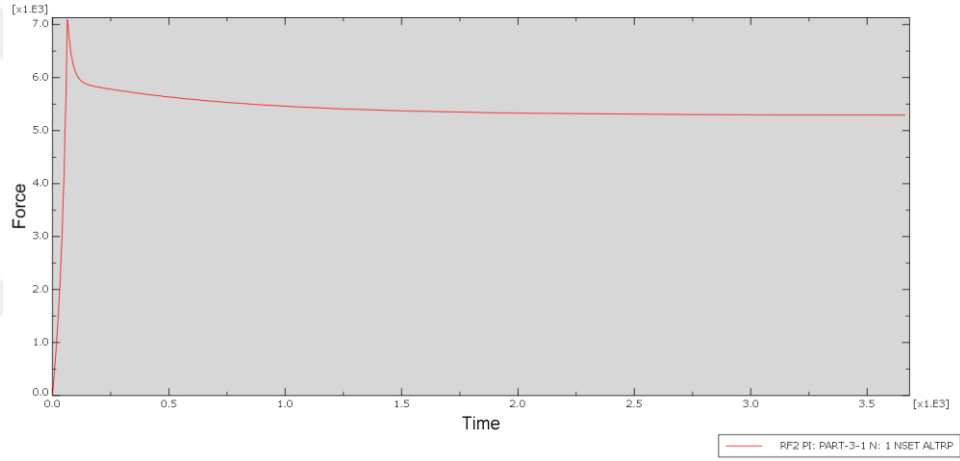


Şekil 4.100. R2 mm modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği

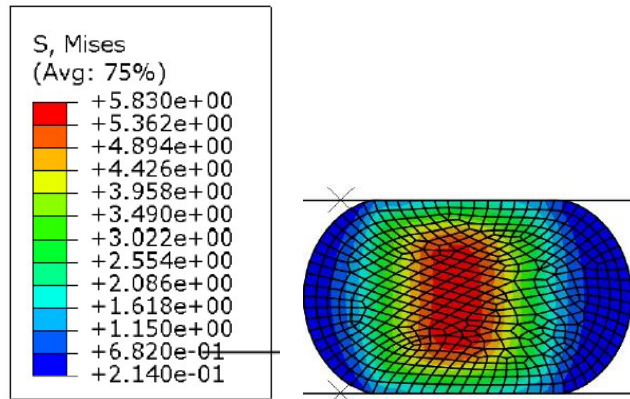


Şekil 4.101. Kare modelinin $t=3600$ s 'deki gerilme dağılımı

Kenar uzunluğu 7 mm olan kare kesit modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 7097 N'dan 5293 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.102).

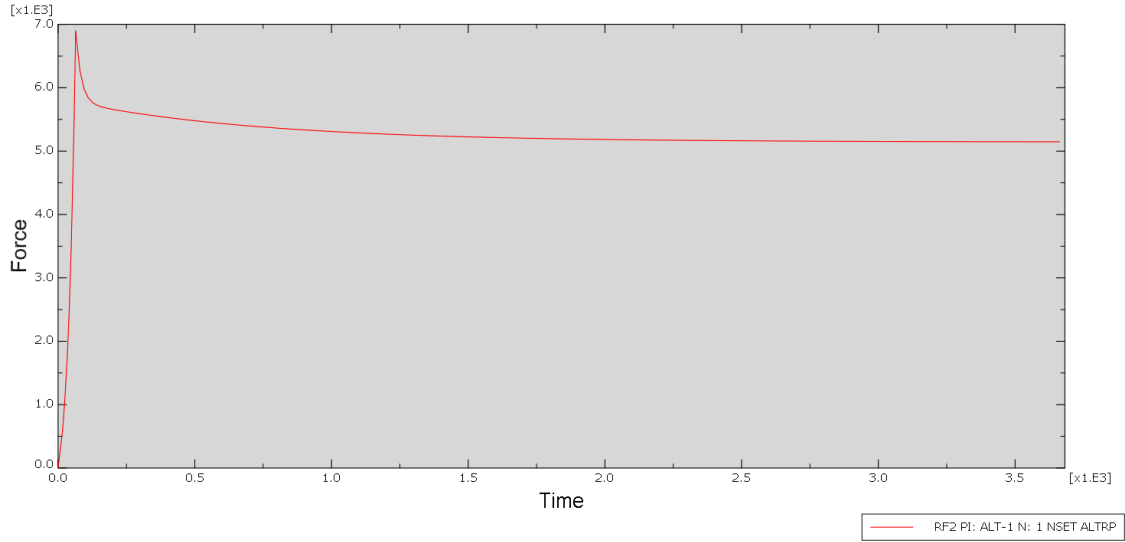


Şekil 4.102. Kare modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği



Şekil 4.103. Daire modelinin $t=3600$ s 'deki gerilme dağılımı

Çapı 7 mm olan daire kesit modelinin modelinin -2 mm sıkışma sonucu reaksiyon kuvvetinin 6899 N 'dan 5147 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 4.104).



Şekil 4.104. Daire modelinin gerilme - gevşeme kuvvet zaman grafiği

Çizelge 4.17. Tüm modellerin analiz sonucu Fmax, Fmin, % Gevşeme değerleri

Deney No.	R (Yarıçap)	Fmax	Fmin	%Gevşeme
1	0,75	42	31.5	25
2	1	604	453	25
3	1,25	1968	1472	25,20
4	1,5	2534	1896	25,17
5	1,75	4156	3105	25,28
6	2	4728	3520	25,54
7	Kare	7097	5293	25,41
8	Daire	6899	5147	25,39

Bu 8 farklı tasarım gerilme - gevşeme bakımından incelenmiştir (Çizelge 4.17.).Gevşeme oranının tüm tasarımlar için %25 olduğu ve kesit alanı arttıkça reaksiyon kuvveti değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.Tüm tasarımlar için gevşeme durumları aynı olduğu için gerilme - gevşeme açısından bu tasarımlarda optimizasyon yapmak mümkün değildir.Bunun için iki değişken parametrelili yeni tasarımların minimum hacim ve ideal temas basıncına sahip optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

4.4.3. X Kesitli Contaların Optimizasyonu

Tasarlanan parçalar 7 mm x 7 mm kesit alanı içerisinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Analizlerde %20 sıkıştırma gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon problem tanımı;

Amaç: Min. Hacim (V)

Kısıt: $P_{max} \geq 5 \text{ MPa}$

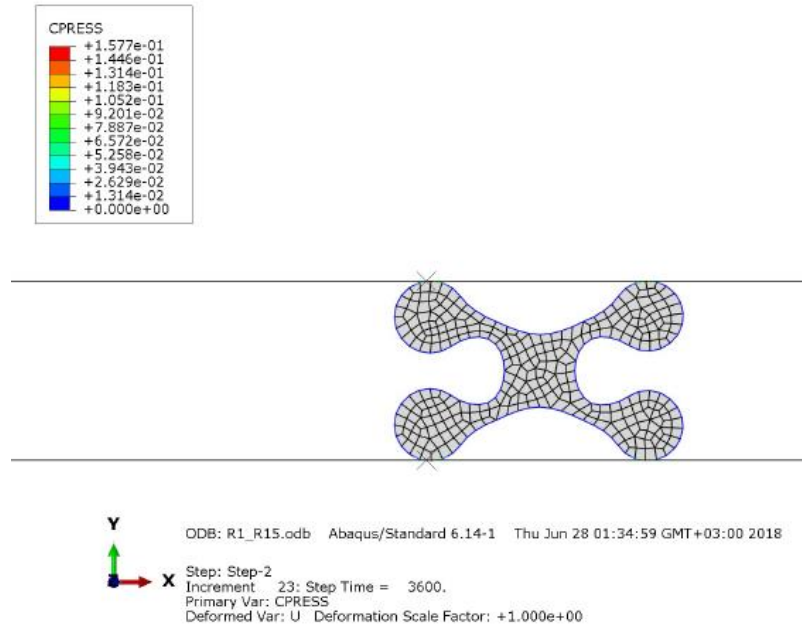
Tasarım Parametreleri:

$$1.0 < R1 < 2.0$$

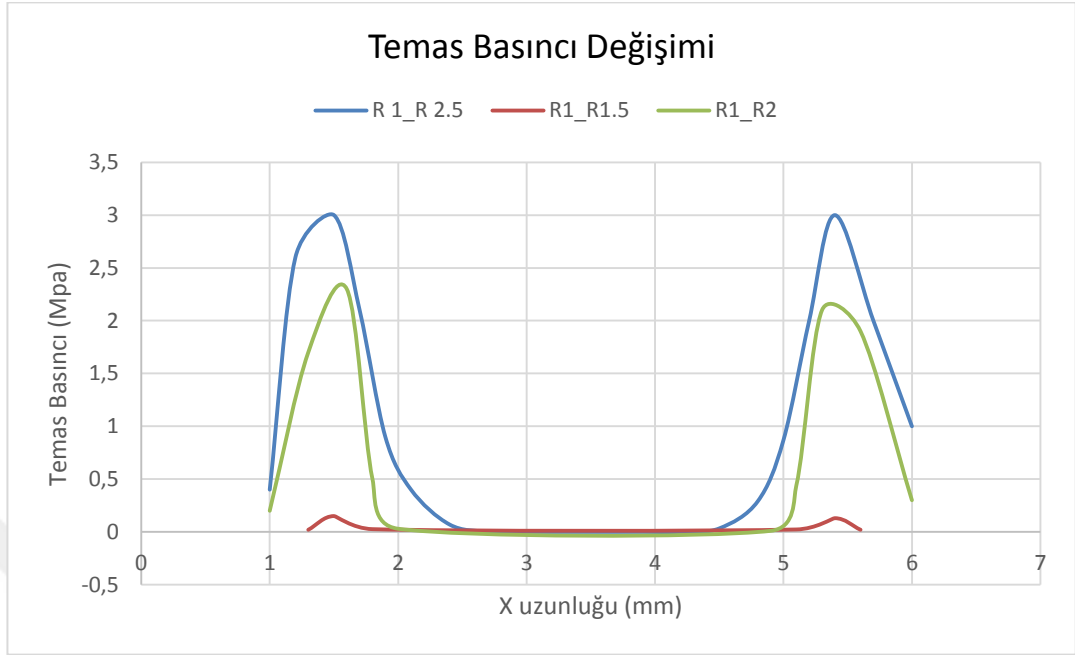
$$1.5 < R2 < 2.5$$

olmalıdır.

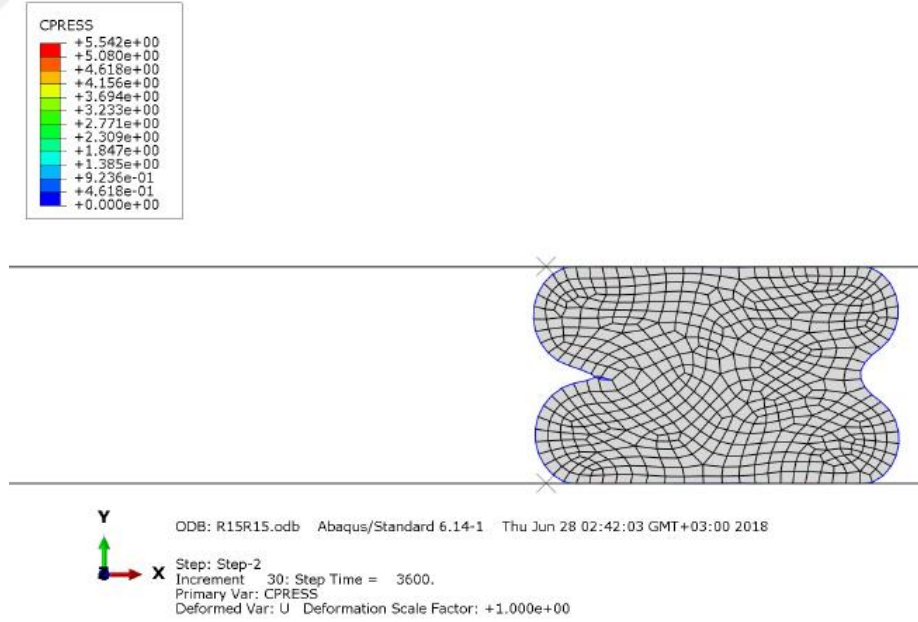
R1 ve R2 ölçüleri değiştirilerek 9 farklı tasarım elde edilmiştir. Bu farklı tasarımlar için gerilme - gevşeme analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda bulunan P_{max} değerleri ve Hacim (V) değerleri Çizelge 4.18'de verilmiştir.



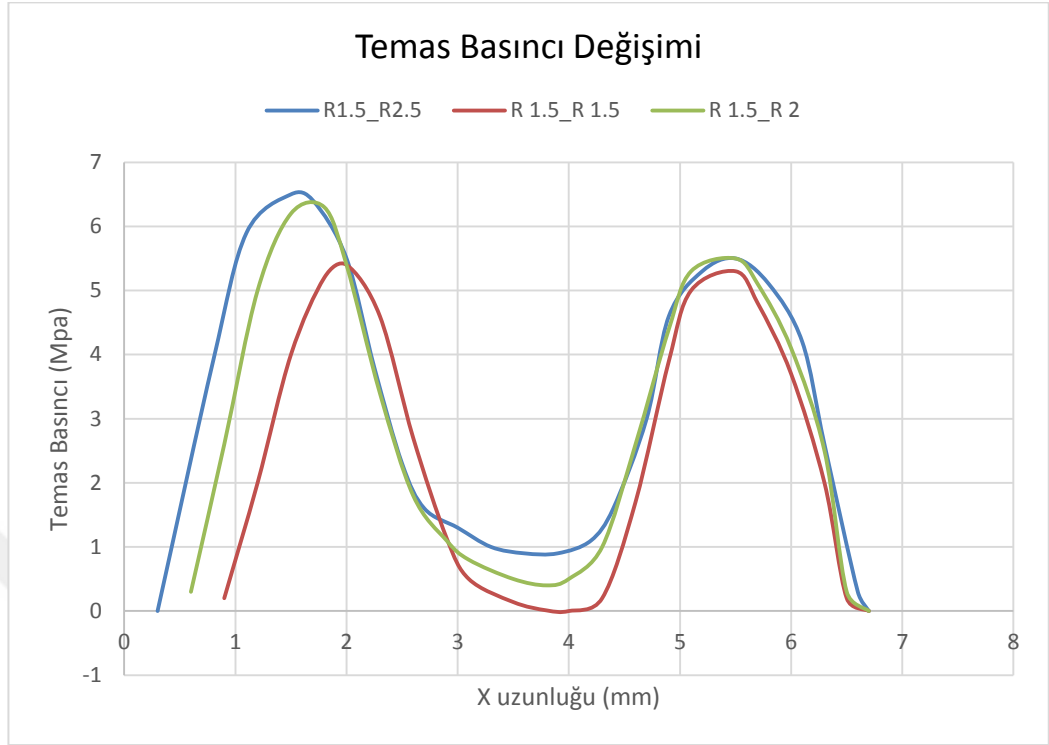
Şekil 4.105. R1=1 mm R2=1.5 mm için temas basıncı dağılımı



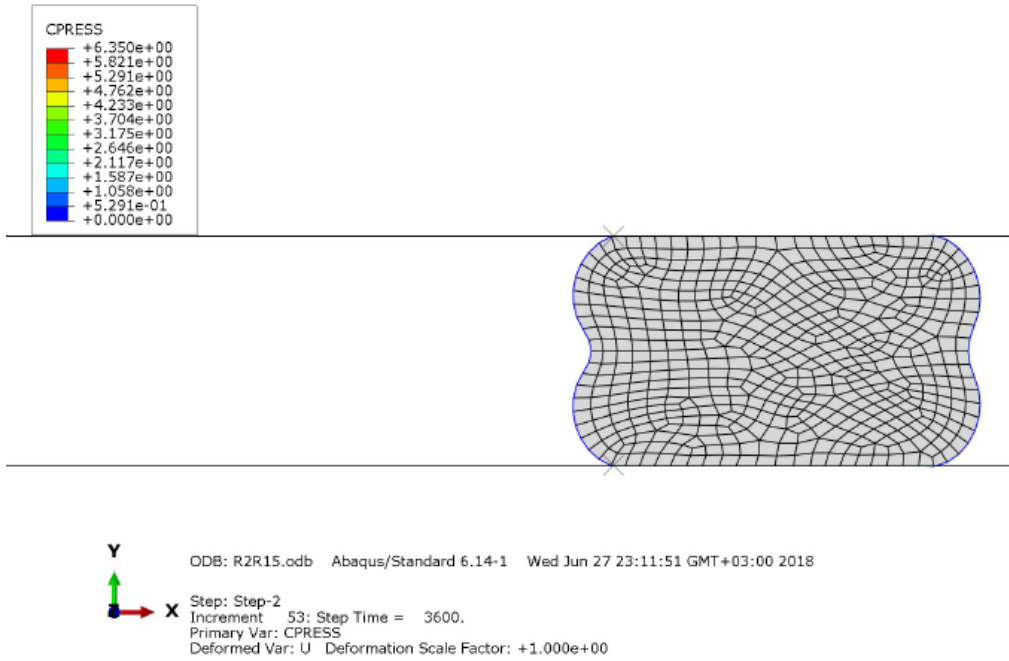
Şekil 4.106. R1=1 mm için temas basıncı değişimi



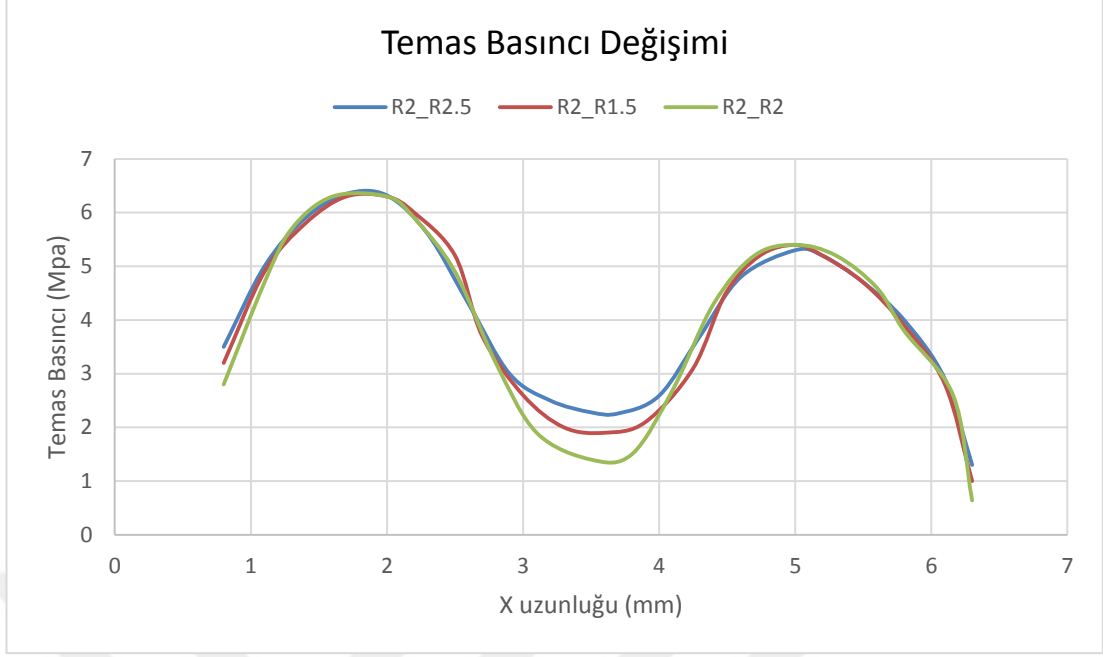
Şekil 4.107. R1=1.5 mm R2=1.5 mm için temas basıncı dağılımı



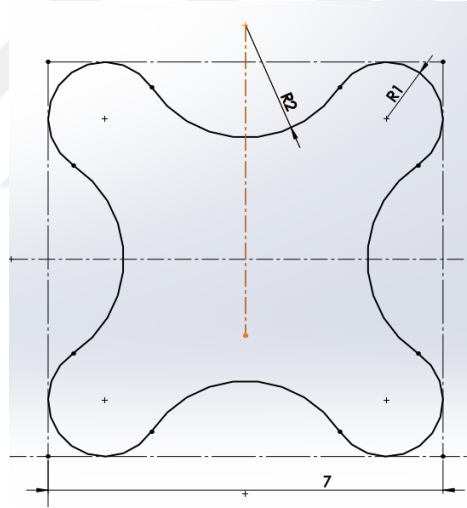
Şekil 4.108. R1=1. 5 mm için temas basıncı değişimi



Şekil 4.109. R1=2 mm R2= 1. 5 mm için temas basıncı dağılımı



Şekil 4.110. R1=2 mm için temas basıncı değişimi



Şekil 4.111. X Conta Tasarımındaki R1 ve R2 değerleri

Yapılan tüm deneylerin girdi ve çıktıları Çizelge 4.18’ de gösterilmektedir. Hacim için eğri uydurma doğrulama değerleri Çizelge 4.19’da, basınç için eğri uydurma doğrulama değerleri ise Çizelge 4.20 ‘de verilmiştir. En büyük hata oranı % 6,5 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.18. X Conta Deney Tasarım Parametreleri

S.No.	R1	R2	Pmax	V
1	1 mm	1.5 mm	0.15 MPa	2612.1 mm ³
2	1 mm	2 mm	2,34 MPa	4235,5 mm ³
3	1 mm	2.5 mm	3 MPa	4625,6 mm ³
4	1.5 mm	1.5 mm	5.54 MPa	5273,19 mm ³
5	1.5 mm	2 mm	6,33 MPa	5380 mm ³
6	1.5 mm	2.5 mm	6.5 MPa	5458,5 mm ³
7	2 mm	1.5 mm	6.35 MPa	5619,5 mm ³
8	2 mm	2 mm	6,39 MPa	5640 mm ³
9	2 mm	2.5 mm	6.37 MPa	5659,4 mm ³

Deney tasarım tablosundan faydalanarak eğri uydurma yöntemi ile gerekli denklemler aşağıda verilmiştir:

Minimum hacim için elde edilen denklem;

$$V(r_1, r_2) = -19\,379.5 + 18\,571.1 R_1 + 7672.26 R_1^2 - 3768.37 R_1^3 + 11\,249.4 R_2 - 21\,928. R_1 R_2 + 3365.6 R_1^2 R_2 + 4460.33 R_2^2 + 2464.4 R_1 R_2^2 - 1499.79 R_2^3 \quad (4.5.)$$

Maksimum basınç için elde edilen denklem;

$$P_{max}(r_1, r_2) = -5.01415 R_1^3 - 1.82526 R_2^3 + 1.9 R_1^2 R_2 + 2.94 R_1. R_2^2 + 10.703 R_1^2 + 5.06821 R_2^2 - 20.29 R_1. R_2 + 24.581 R_1 + 11.5666 R_2 - 31.6776 \quad (4.6.)$$

Elde edilen her iki denklemin doğruluğu için oluşturulan tablolar Çizelge 4.19 ve 4.20’de görülebilir. Bu sonuçlardan bu denklemlerin sonlu elemanlar modeli yerine kullanılabilceği görülmüştür.

Çizelge 4.19. Eğri Uydurma Doğrulama (V)

R1	R2	V	3. dereceden model	%Hata
1,0	1,5	2612,1	2644,84	1,3
1,0	2,0	4235,5	4170,09	-1,5
1,0	2,5	4625,6	4658,33	0,7
1,5	1,5	5273,2	5207,79	-1,2
1,5	2,0	5380,0	5510,89	2,4
1,5	2,5	5458,5	5393,08	-1,2
2,0	1,5	5619,5	5652,23	0,6
2,0	2,0	5640,0	5574,58	-1,2
2,0	2,5	5659,4	5692,12	0,6

Çizelge 4.20. Eğri Uydurma Doğrulama (Pmax)

R1	R2	P _{max}	3. dereceden model	%Hata
1,0	1,5	0,15	0,16	6,5
1,0	2,0	2,34	2,32	-0,8
1,0	2,5	3,00	3,01	0,3
1,5	1,5	5,54	5,52	-0,4
1,5	2,0	6,33	6,37	0,6
1,5	2,5	6,50	6,48	-0,3
2,0	1,5	6,35	6,36	0,2
2,0	2,0	6,39	6,37	-0,3
2,0	2,5	6,37	6,38	0,2

Yapılan optimizasyon sonucunda bulunan optimum değerler;

$$R_1 = 1.38 \text{ mm}$$

$$R_2 = 1.7 \text{ mm}$$

$$V = 4895 \text{ mm}^3 \text{ bulunmuştur.}$$

5. SONUÇ

Bu çalışmada kauçuk sızdırmazlık elemanı contaların sonlu elemanlar yöntemi ile hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme-gevşeme analizleri gerçekleştirilmiştir. Kauçuk malzemelerin hiperelastik ve viskoelastik malzeme modelleri malzeme testleri sonucu belirlenmiştir. Kauçuk malzemelerin hiperelastik ve viskoelastik malzeme modelleri malzeme testleri sonucu belirlenmiştir. Contaların y ekseninde sıkıştırılması sonucu oluşan gerilmeler ve yer değişimleri incelenerek statik rijitlik eğrileri çıkarılmıştır. Böylece tasarlanan contanın imal edilmeden rijitlik eğrisinin önceden belirlenerek uygun tasarım olup olmadığı belirlenebilir. Rijitlik eğrilerinin doğrusal olmadığı ve yer değiştirme arttıkça sıkıştırılamaz özelliğinden dolayı rijitliğin gittikçe arttığı gözlenmiştir.

Kaşık test numuneleri, basma test numuneleri ve contalar üzerinde gerilme - gevşeme testleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarında elde edilen gerilme - gevşeme eğrileri ile analiz sonucunda elde edilen gerilme - gevşeme eğrilerinin korelasyonu sağlanmıştır. Gerilme - gevşemesi sonucunda sıkıştırılan kauçuk parçaların içindeki gerilmenin ve temas basıncının zamanla azaldığı tespit edilmiştir. Ürün üzerine uygulanan kuvvet sonucu oluşan temas gerilmesinin zaman içerisinde azaldığı tespit edilmiştir. Bu da sızdırmazlık özelliği bulunan ürünlerin tasarımında dikkate alınması gereken bir özelliktir. Ürünler belli bir süre sonunda özelliklerini kaybetmektedirler. Tasarımların bu duruma göre yapılması gerekmektedir. Yapılan analizlerde sıkıştırılan parça üzerindeki oluşan büyük kuvvetlerin hangi bölgelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitten yararlanılarak yeni conta tasarımında optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Son olarak hareketli parçalar arasında kullanılan X kesitli contaların kesitlerinin şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 2 parametrelilik kesit tanımlanmış ve minimum hacim ve istenen temas basıncına sahip optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmalarında en büyük hata oranı % 6,5 olarak bulunmuştur.

Kauçuk ürünlerin tasarımında istenen özellikleri elde etmek için genellikle deneme-yanılma metodu kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında elde edilen verilerden, daha tasarım aşamasında iken kauçuk ürünün mekanik davranışının sonlu elemanlar yöntemi

ile modelenip sonuçların yüksek doğruluk oranlarında elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada kauçuk ürünlerin hiperelastik ve zaman alanında viskoelastik modellemeleri yer almıştır. Bu sonuçlardan, kauçuk sektöründe ürün tasarımında deneme-yanılma yerine modelleme yapılarak istenen ürün özelliklerine kısa zamanda ulaşılabileceği ve maliyetten fayda sağlanabileceği söylenebilir.



KAYNAKLAR

Anonim ,2018. <https://www.bilgitimi.com/kaucuk-nedir-nasil-yapilir-nerelerde-kullanilir.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.malcorp.net/our-products/rubber-automotive-parts/> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <https://dir.indiamart.com/rajkot/automotive-rubber-parts.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.epdmkaucukgranul.com/tr/sayfa/4-kullanim-alanlari> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim,2018.http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisie-reolo.pdf (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim,2018.http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/49007/30546/5._elast_omerlerin_s%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1r%C4%B1lmas%C4%B1,_%C3%B6zellikleri_ve_kullan%C4%B1m_alanlar%C4%B1.pdf (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim , 2018. <http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/07.reoloji.pdf> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim , 2018. <http://www.liderconta.com/sozluk.asp> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim , 2018. <http://www.differencebetween.com/difference-between-elastomer-and-vs-polymer/#Summary> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. https://www.alibaba.com/product-detail/NATURAL-RUBBER-SVR-3L_170248502.htm (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.resinex.com.tr/polimer-turleri/natural-rubber.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.paromak.com/stiren-butadien-kaucuk.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.paromak.com/nitril-kaucuk.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.paromak.com/etilen-propilen-dien-kaucuk.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.paromak.com/polibutadien-kaucuk.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. <http://www.paromak.com/silikon-kaucuk.html> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim ,2018. http://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/7_Reoloji-web.pdf (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim,2018.<http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/27/2016/12/Basma-Deneyi.pdf> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim,2018.<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A5011&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Anonim,2018.http://www.robotiksistem.com/transformator_nedir_transformator_ya_pisi.html (Erişim tarihi: 16.03.2018)

Annicelli,R.,Balodis,R.,Boyce,W.,Coreau,A.,Davis, C., Dvornek, J., Dvornek, L., Gibbs, I., Gorman, D., Hogan, J.,Price, R., Supp, G., Taylor, W., Waters, G., Wilson, W., 1990. Vanderbilt Associates, Vanderbilt World Trade Corporation, Canada, 832s.

Armah, J.C., Birley, A.W., Fernando, K.P., Hepburn, C.,Tahir, M.1986. Stress Relaxation Measurements on Rubbers in Compression. Equipment and Methodology, Rubber Chemistry and Technology, 59, 5 (1986) 765-778.

ASTM D – 1765, 10 Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products 2013.

ASTM D5289 – 12, Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters 2012.

ASTM D395-98, Standard Test Methods for Rubber Property-Compression Set 1998.

ASTM D2240 - 05(2010), Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, 2010.

ASTM D573, Standard Test Method for Rubber—Deterioration in an Air Oven, 2010.

ASTM D5963, Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader), 2010.

Ataç, S. ,1999. Değişik Yükleme Durumlarında Polipropilenin Gerilme Gevşemesine Bağlı Olarak Viskoelastik Davranışının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999

Auchter, J.F. 2005.Chemical Economics Handbook: Carbon Black, Menlo Park, CA, SRI Consulting, 2005.

Ay, İ. Plastik Malzemeler, Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, 47-56. Plastik Malzemeler Ders Notu.
<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>

Babapour, A. 2013. Doğal Kauçuk/Bütadien Kauçuk Esaslı Silecek Lastiği Malzemelerinin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. Hacettepe Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*,2013.

Barnes, H.A., Hutten, J.F., Walters, K., 1989. “An Introduction to Rheology”, Rheology Series-3. Elsevier Science, Amsterdam.

Bauman, J.T. 2008. Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components, A Guide for Design Engineers. The Author: Ph. D., P. E. Judson T. Bauman, Arlington, TX, 2008, USA , pp:1-4.

Birley, A.W., Fernando, K.P., Tahir, M. 1986. Appraisal of the Current Standards for Stress Relaxation Measurements of Rubbers in Compression, *Polymer Testing*, 6 (1986) 85-105.

Boşnak B. 2010. Kauçuktan Yarı Mamül Üretim Teknolojileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Brydson, J.A. 1988. Rubbery Materials and Their Compounds, London, 1988.

Ciesielski A. 1999. An Introduction to Rubber Technology, United Kingdom, 1999.

D41 1099, Vulcanised Rubber And Thermoplastic Rubber – Tensile Testing, Renault Automobiles Standardisation, DPMI / Department 67210

DPT 2001. Kauçuk Ürünleri Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Karbon Siyahı ve Sentetik Kauçuk Alt Komisyonu Raporu. DPT: 2809 – ÖİK: 612. Ankara.

Düşmezkalender, H.Y. 2011. Experimental Characterization of Rubber Polymer. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Ehabe, E. Bonfils, F. Aymard, C. Akinlabi, A.K. Sainte Beuve J. 2005. Modelling of Mooney viscosity relaxation in natural rubber *Polymer Testing* 24 (2005) 620–627

Erkek, S. 2007. Karbon siyahı/yağ ve karbon siyahı/dolgu maddesi oranının farklı vulkanizasyon sistemlerinde epdm, nbr ve sbr elastomerlerinin fiziko-mekaniksel özellikleri üzerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Erkek, S. 2016. Kauçuk kapı stoperinin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Eriks-Sealing Elements Technical Handbook O-rings. www.eriks.info ((Erişim tarihi: 16.03.2018))

Fernandes, V.A. Focatiis, D.S.D. 2014. The role of deformation history on stress relaxation and stress memory of filled rubber. *Polymer Testing* 40 (2014) 124-132.

Garcia, R.M.J., Ruiz, S.O.E., Lopez, C., Gonzalez, L.Y.S., Botero, M.G., Betancur, M. 2005. Hyperelastic Material Modeling-Technical Report. Laboratorio CAD/CAM/CAE Departamento De Ingenieria Macanica Universidad EIFAT. Medellin.

Gent A.N. 1992. ‘‘Engineering with Rubber’’ ,Oxford University Press, New York, NY (1992)

Ghoreishy, M.H.R. 2011. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. Iran Polymer and Petrochemical Institute, PO Box 14965/115, Tehran, Iran.

Güven, C.2014. Kauçuk burcun hiperelastik modellenmesi ve şekil optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Güven, C. Yavuz Erkek, M. Kaya, N.2014. Kauçuk Burçların Şekil Optimizasyonu. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi.26 – 27 Mayıs 2014, Bursa.

Hacısalihoğlu M. doğrusal olmayan sonlu eleman çözümlenmeleri ile betonarme kolonlarda boyut etkisinin irdelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hajikarimi P. ,Nejad F. M. , Khodaii A. , Fini E.H. 2018 Introducing a stress-dependent fractional nonlinear viscoelastic model for modified asphalt binders Construction and Building Materials. 183, 102-113,

Heideman, G., Datta, R.N., Noordermeer, J.W.M. 2004. Activators in Accelerated Sulfur Vulcanization, Rubber Chemistry and Technology, 3rd Ed, Vol. 77, Netherland, pp. 512-54, 2004.

Hofmann, W.1989. Rubber Technology Handbook, Hanser Publishers, Munich, Germany, 1989.

Edge, M., Norman, S.A., Gonzalez, R.S., Christopher, M.L., Simon, J., Robert, B., The influence of cure and carbon black on the hightemperature oxidation of natural rubber I. Correlation of physicochemicalchanges, Polymer Degradation and Stability , 1999.

EN 681-1: Elastomeric seals - Materials requirements for pipe joint seals used in water and drainage applications - Part 1: Vulcanized rubber.

Fazekas B., Goda T.J.2018. Determination of the hyper-viscoelastic model parameters of open-cell polymer foams and rubber-like materials with high accuracy, Materials & Design, Volume 156, Pages 596-608, 2018.

ISO 3384: Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of stress relaxation in compression at ambient and at elevated temperatures (revision of ISO 3384:1991)

ISO 6914: Rubber vulcanized or thermoplastic - Determination of ageing characteristics by measurement of stress relaxation in tension.

ISO 11346: Rubber, vulcanized and thermoplastic - Estimation of lifetime and maximum temperature of use.

Karen, İ.2011. Taşıt elemanlarının optimum tasarımı için bilgisayar destekli analiz ve simülasyon tabanlı bütünleşik bir algoritma geliştirilmesi. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Kaya, N. Yavuz Erkek, M. Güven, C. 2013.Kauçuk malzemelerin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi. XI. Türkiye Abaqus Kullanıcılar Toplantısı. 7-8 Kasım 2013 .İstanbul

Kaya, N. Yavuz Erkek, M. Güven, C. 2014. Taşıt kauçuk burçlarının hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve analizi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi 26 – 27 Mayıs 2014, Bursa.

Kaya, N. Yavuz Erkek, M. Güven, C. 2016. Hyperelastic modelling and shape optimisation of vehicle rubber bushings. Int. J. Vehicle Design, Vol. 71, Nos. 1/2/3/4, 2016

Kalkan Fatih Can.2010. Arıtma çamurlarında reolojik karakterizasyonun belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı. Isparta.

Kınkoğlu, N.G. 2006. Polimer Malzemeler: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Editör : Özkal, S., Literatür Yayıncılık, İstanbul, s.370-371.

Le, H.H. Ilisch, S. Radusch, H.J.2009. Characterization of the effect of the filler dispersion on the stress relaxation behavior of carbon black filled rubber composites. Polymer 50 (2009) 2294–2303

Li, Y. Li, S. Li, Z. 2014. Interface diffusion-induced creep and stress relaxation in unidirectional metal matrix composites under biaxial loading. Mechanics of Materials 76 (2014) 20–26

Long, J.C.2001. The History of Rubber-A Survey of Sources About The History of Rubber, Rubber Chemistry and Technology, 3rd Ed, Vol. 74, Akron, pp. 493-508, 2001.

Marco Rubber Plastics Quad-Ring® Seals and Rubber XRing Seal Standard Size Chart.<https://www.marcorubber.com/downloads/marco-x-ring-size-chart.pdf> (Erişim tarihi:11.06.2018)

Maria, H. J. Lyczko, N. Nzihou, A. Joseph, K. Mathew, C. Thomas, S.2012. Stress relaxation behavior of organically modified montmorillonite filled natural rubber/nitrile rubber nanocomposites. Applied Clay Science 87 (2014) 120–128.

Mazlum, U. 2008. Epdm sentetik kauçuğunun gerilme gevşemesi davranışının deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

MEB, 2011. Kimya Teknolojisi Sentetik Kauçuk Özellikleri Ve Testleri. Ankara. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sentetik%20Kau%20C3%A7uk%20C3%96zellikleri%20Ve%20Testleri.pdf

Miller, K. 2000. Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis. Axel Products Inc., Ann Arbor, Michigan, USA.

Mitra, S. Ghanbari-Siahkali, A. Almdal, K. 2006. A novel method for monitoring chemical degradation of crosslinked rubber by stress relaxation under tension. *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 2520e2526

Mostafa, A. Abouel-Kasem, A. Bayoumi, M.R. El-Sebaie. M.G. 2008. On the influence of CB loading on the creep and relaxation behavior of SBR and NBR rubber vulcanizates. *Materials and Design* 30 (2009) 2721–2725.

Nandi, B. Dalrymple, T. Yao, J. Lapczyk, J. 2014. Importance of Capturing Non-linear Viscoelastic Material Behavior in Tire Rolling Simulations. Meeting of the Tire Society. 8-10 September 2014

Olusanya F.A. 1997 Measurement Of Creep And Stress Relaxation In Rubber And Rubber Type Materials. Mts Adhesives Programme 1996-1999 Performance Of Adhesive Joints. 1997.

Özgün, R.E. 2010. Kauçuk- Metal Burçlarda Kauçuk Sertliği ve Çaplama işlemlerinin Kopma Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa

Patel, M. Morrell, P.R. Murphy, J.J. 2004. Continuous and intermittent stress relaxation studies on foamed polysiloxane rubber. *Polymer Degradation and Stability* 87 (2005) 201e206

Rey, T. Chagnon, G. Le Cam, J.B. Favier, D. 2013. Influence of the temperature on the mechanical behaviour of filled and unfilled silicone rubbers. *Polymer Testing* 32 (2013) 492–501.

Rosen, S.L. Wiley & Sons, J. 1993. Fundamental principles of polymeric materials. 2nd edition, New York.

Savran, H., 2001. Elastomer Teknolojisi-1. Acar Matbaacılık, İstanbul, 136 s.

Sasso, M. Papalini, S. Chiappini, G. Palmieri G. Meccanica, D. 2008. Characterization of Time-Dependent Materials by Biaxial Stretching Tests. Università Politecnica delle Marche via Breccie Bianche. Italy.

Soyel, D. 2008. Sonlu Elemanlar Metodu ile NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modellerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.

Soyel D. Demirer A. Nart E. 2009. Mika Tozu Dolgulu Nr/Sbr Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modelinin Belirlenmesi. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.

Soyubol, B. 2006. Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Spetz, G., Stress Relaxation. Test Methods, Instruments and Lifetime Estimation, Technical Report, 2000.

Schweitzer, P. A. 2006. Corrosion of Polymers and Elastomers, Corrosion Engineering Handbook, CRC Press, New York.2006.

TS EN 681-1 Elâstomerik contalar-Su ve drenaj uygulamalarında kullanılan-Malzeme özellikleri- Bölüm 1: Lastik

TS ISO 37- Lastikler ve termoplastikler. Çekme gerilmesi-uzama özelliklerinin tayini. s.11

TS 4595 ISO 81- Lastikler ve termoplastikler- ortam sıcaklığında, yüksek ve düşük sıcaklıklarda basınç altında ezilme oranının tayini.

Vahapoğlu, V. 2006. Kauçuk Türü Malzemelerin İnelastik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Doktora Tezi*, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Vahapoğlu V. Karadeniz S. 2006. Stiren Bütadien Kauçuğunda (SBR) Gerilme Gevşemesinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 11th International Materials Symposium, 19-21 Nisan 2006, Denizli.

Vahapoğlu V. 2012. Kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.19(1) 33-60

Vahapoğlu V. 2013 Kauçuk Türü Malzemeler: Sınıflandırma. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 4 (1): 25-34

Vaidyanathan, T. Vaidyanathan, T. Manasse, M. 2014.Analysis of stress relaxation in temporizationmaterials in dentistry. Dental materials.31 (2015) e55–e62

Yamaguchi, K. , Thomas, A. G. Busfield, J. C. 2015. Stress relaxation, creep and set recovery of elastomers. International Journal of Non-Linear Mechanics 68 (2015) 66-70.

Yavuz Erkek, M. Kaya, N. Güven, C. 2015. Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 20, Sayı 1, 2015

Yavuz Erkek, M. Kaya, N. 2016. Kauçuk sızdırmazlık elemanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme gevşeme analizi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi 23-24 Mayıs 2016, Bursa.

Yılmaz, R. , 2007. Viskoz Malzemelerin Akışı Ve Modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Yücel, Ö. 2018. Araç aydınlatma sistemlerinde sızdırmazlık contası tasarımı ve optimizasyonu. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Wang, S.L. Wang, P. Ding T.H. 2009. Development of wireless compressive/relaxation-stress measurement system integrated with pressure-sensitive carbon black-filled silicone rubber-based sensors. *Sensors and Actuators A* 157 (2010) 36–41.

Zhao, J. Yang, R. Iervolino, R. Vorst, B. Barbera, S. The effect of thermo-oxidation on the continuous stress relaxation behavior of nitrile rubber. *Polymer Degradation and Stability* 115 (2015) 32e37



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Merve YAVUZ ERKEK

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa 1987

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: Turhan Tayan Anadolu Lisesi 2005

Lisans: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği 2009

Yüksek Lisans: Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği 2011

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

DTA Mühendislik(Yarı Zamanlı): Ocak 2009-Haziran 2009

Rollmech Otomotiv: Kasım 2010-Ocak 2011

Asteknik Vana: Şubat 2011 –Kasım 2011

Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu: Kasım 2011 –Halen

İletişim (e-posta) : merveyavuztr@gmail.com

Yayınları:

Kaya, N. Yavuz Erkek, M. Güven, C. 2013. Kauçuk Malzemelerin Hiperelastik Ve Viskoelastik Modellenmesi. Necmettin Kaya¹, Merve Yavuz Erkek², Caner Güven³ Simulia Abaqus Kullanıcılar Toplantısı.

Güven, C. Yavuz Erkek, M. Kaya, N. 2014. Kauçuk Burçların Şekil Optimizasyonu. Otekon Bildiri 2014.

N. Güven, Yavuz Erkek, M. Kaya, C. 2014. Taşıt Kauçuk Burçlarının Hiperelastik Ve Viskoelastik Modellenmesi ve Analizi. Otekon, Bildiri.2016

Yavuz Erkek, M. Kaya, N. Güven, C. 2015. Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 20, Sayı 1, 2015

Yavuz Erkek, M. Kaya, N. 2016. Kauçuk sızdırmazlık elemanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme gevşeme analizi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi 23-24 Mayıs 2016, Bursa.

Kaya, N. Yavuz Erkek, M. Güven, C. 2016. Hyperelastic Modelling and Shape Optimisation of Vehicle Rubber Bushings. Int. J. Vehicle Design, Vol. 71, Nos. 1/2/3/4, 2016

Yavuz Erkek, M. Erkek, S. Hyperelastic Modeling And Stress Relaxation Analysis of Vehicle Rubber Products. International Congress On Natural And Engineering Sciences, Macedonia, September 01-05, 2016