

**KAUÇUK TAKOZLARIN ZAMAN ALANINDA
DAVRANIŞININ MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Fırat KORKMAZ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAUÇUK TAKOZLARIN ZAMAN ALANINDA DAVRANIŞININ
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Fırat KORKMAZ
0000-0002-7155-3978

Prof. Dr. Necmettin KAYA
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Fırat KORKMAZ tarafından hazırlanan “KAUÇUK TAKOZLARIN ZAMAN ALANINDA DAVRANIŞININ MODELLENMESİ VE ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necmettin KAYA

Başkan : Prof. Dr. Necmettin KAYA
0000-0002-8297-0777
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Abdil KUŞ
0000-0002-4626-0719
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İsmail ÖZTÜRK
0000-0003-2641-5880
Pamukkale Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

../../....

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.

.../.../.....

Fırat KORKMAZ

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans

KAUÇUK TAKOZLARIN ZAMAN ALANINDA DAVRANIŞININ MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Fırat KORKMAZ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

İyi bir titreşim sönümleyici olan kauçuk günümüzde araç lastikleri başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kauçuk malzemelerin sıkıştırılmaz ve hiperelastik yapısından dolayı doğrusal davranışa sahip değildir. Bu yüzden çoğu kauçuk ürünün davranışı deneme yanılma yöntemiyle tespit edilmektedir. Kauçuk malzemelerin mekanik davranışlarını önceden tahmin edebilmek metalik malzemelere göre oldukça zordur. Kauçuk malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyebilmek için bir takım malzeme testlerine ihtiyaç duyulur. Modelleme işlemi ile tasarım aşamasında kauçuk malzemelerin istenilen özelliklerde üretimi sağlanabilir. Bu sayede oluşacak zaman kaybı ve maliyet en aza indirilebilir.

Bu çalışmada seçilen bir kauçuk takozun Abaqus programında hiperelastik ve viskoelastik modellemesi yapılmıştır. Hiperelastik ve viskoelastik model belirlenirken kauçuk malzemeye yapılan testler kullanılmıştır. Hiperelastik malzeme modeli belirlendikten sonra sonlu elemanlar yöntemi ile bir yönde sıkıştırılan kauçuk takozun zaman alanında viskoelastik modellemesi yapılarak gerilme gevşeme değerleri elde edilmiştir. Kauçuk takoz üzerinde yapılan testler ile analiz sonuçları değerlendirilerek, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin uygunluğu kontrol edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kauçuk, kauçuk takoz, sonlu elemanlar, hiperelastik modelleme, viskoelastik modelleme, gerilme-gevşeme

2022, viii + 52 sayfa.

ABSTRACT

MSc

MODELING AND ANALYSIS OF RUBBER MOUNTS BEHAVIOR IN TIME- DOMAIN

Fırat KORKMAZ

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

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Rubber, which is a good vibration damper, is used in many areas today, especially vehicle tires. They do not have linear behavior due to the irrepressible and hyperelastic structure of rubber materials. Therefore, the behavior of most rubber products is detected by trial-and-error method. It is very difficult to predict the mechanical behavior of rubber materials compared to metallic materials. Several material tests are needed to model rubber materials with finite elements method. With the modeling process, rubber materials can be produced in the desired characteristics during the design phase. In this way, the time loss and cost can be minimized.

In this study, hyperelastic and viscoelastic modeling of a selected rubber mount was performed in the Abaqus program. Tests on rubber material were used when determining hyperelastic and viscoelastic model. After the hyperelastic material model is determined, viscoelastic modeling of the rubber mount compressed in one direction by finite elements method is obtained by viscoelastic modeling. The results of the analysis were evaluated with the tests carried out on the rubber mount and the suitability of the finite element model was checked.

Key words: Rubber, rubber mount, finite elements method, hyperelastic modeling, viscoelastic modeling, stress relaxation

2022, viii + 52 pages.

ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve tez çalışmalarımda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Malzeme temini, test cihazları kullanımı ve tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen MAKELPORT MAK. LTD. ŞTİ Genel Müdürü Emre ÖKTEM'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fırat KORKMAZ

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kaynak Araştırması.....	3
2.2. Kauçuğun Tarihçesi	6
2.3. Kauçuk Malzeme Bilgisi ve Vulkanizasyon İşlemi.....	7
2.4. Kauçuk Çeşitleri.....	10
2.4.1. Doğal Kauçuk (NR):	10
2.4.2. Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR):.....	11
2.4.3. Etilen Propilen Kauçuğu (EPM-EPDM):.....	12
2.4.4. Nitril Kauçuğu (NBR):.....	13
2.4.5. Butil Kauçuğu (IIR):	14
2.4.6. Polibütadien Kauçuğu (BR):.....	14
2.4.7. Kloropren Kauçuğu (CR):.....	14
2.4.8. Silikon Kauçuğu (SI):	15
2.4.9. Poliüretan Kauçuğu (AU):	15
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	16
3.1. Hiperelastik Malzeme Modelleri.....	16
3.1.1. Mooney-Rilvin Hiperelastik Malzeme Modeli	17
3.1.2. Neo-Hookean Hiperelastik Malzeme Modeli	17
3.1.3. Ogden Hiperelastik Malzeme Modeli	18
3.1.4. Yeoh Hiperelastik Malzeme Modeli	18
3.1.5. Polinom Hiperelastik Malzeme Modeli	19
3.1.6. İndirgenmiş Polinom (Reduced Polynominal) Hiperelastik Malzeme Modeli.....	19
3.2. Katsayıların Belirlenmesi.....	19
3.3. Hiperelastik Malzeme Modelinin Belirlenmesi İçin Yapılan Testler	20
3.3.1. Tek Eksenli Çekme Testleri	20
3.3.1.1. Basit Çekme Testi	21
3.3.1.2. Düzlem Çekme (Safı Kayma) Testi	22
3.3.1.3. Basit Basma Testi.....	23
3.3.2. İki Eksenli Eş-Çekme Testi.....	24
3.4. Viskoelastik Davranış	27
3.4.1. Cisimlerde Sürünme Davranışı	28
3.4.2. Gerilme Gevşemesi	29
3.4.3. Zamana Bağlı Viskoelastik Modelleme	30
3.4.3.1. Lineer Elastik Davranış Modeli	30
3.4.3.2. Viskoz Davranış Modeli	30
3.4.3.3. Maxwell Modeli, Kelvin Modeli ve Karışık Model	31
3.5. Kullanılan Kauçuk Malzeme Testleri ve Kauçuk Takozlar.....	32
3.5.1. Tek Eksenli Çekme Testinde Kullanılan Kaşık Test Numunesi.....	33
3.5.2. Düzlem Çekme Testinde Kullanılan Test Numunesi.....	33
3.5.3. Kauçuk Takozlar	33

4. BULGULAR ve TARTIŞMA	35
4.1. Hiperelastik Malzeme Modelinin Belirlenmesi	35
4.2. Viskoelastik Malzemenin Tanımlanması	39
4.3. Kauçuk Takozun Üç Boyutlu Modelinin Oluşturulması	40
4.4. Kauçuk Takozun Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	41
4.5. Kauçuk Takozun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Zaman Alanında Gerilme Gevşeme Davranışının Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu	43
5. SONUÇ.....	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
I	İnvaryant
I_i	Asal doğrultulardaki gerinme invaryantı (i=1,2,3)
E	Elastisite Modülü
J_{el}	Elastik hacim oranı
L	Numunenin son boyu
L_0	Numunenin ilk boyu
MPa	Megapaskal
N	Newton
n	Terim sayısı
t	Zaman
W	Şekil değiştirme enerjisi potansiyeli
ε	Gerinme
λ	Uzama oranı
λ_i	Asal doğrultulardaki uzama oranı (i=1,2,3)
σ	Gerilme
σ_i	Asal doğrultulardaki gerilme oranı (i=1,2,3)

Kısaltmalar	Açıklama
AU	Poliüretan kauçuk
BR	Bütadien kauçuk
CR	Kloropren (neopren) kauçuk
EPDM	Etilen propilen dien kauçuk
EPM	Etilen propilen kauçuk
IIR	Butil kauçuk
NBR	Nitril kauçuk
NR	Doğal kauçuk
SBR	Stiren bütadien kauçuk
SI	Silikon kauçuk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kauçuk ham maddesinin elde edilmesi	6
Şekil 2.2. Vulkanizasyon öncesi ve sonra oluşan çapraz bağ yapısı	8
Şekil 2.3. Vulkanizasyon işlemi öncesi ve sonrası gerilme-gerinme eğrileri	9
Şekil 2.4. Lastik hamurunda kullanılan hammaddelerin sınıflandırılması	10
Şekil 2.5. Doğal Kauçuk	10
Şekil 2.6. Stiren Bütadien kauçuğunun molekül yapısı	11
Şekil 2.7. SBR kauçuk ile üretilen yer döşemesi	12
Şekil 2.8. EPM kauçuğunun molekül yapısı	12
Şekil 2.9. EPDM kauçuğunun molekül yapısı	13
Şekil 3.1. Tek eksenli çekme deformasyonları.	21
Şekil 3.2. Basit tek eksenli çekme testi	21
Şekil 3.3. Basit çekme testinde kullanılan test numunesi	22
Şekil 3.4. Düzlem çekme testi.....	23
Şekil 3.5. Basit basma testi	24
Şekil 3.6. Kauçuk malzemeler için iki eksenli eş çekme deformasyonun elde edilmesi	25
Şekil 3.7. İki eksenli eş çekme testi	26
Şekil 3.8. Farklı çekme testleri ile elde edilen gerilme-şekil değişimi grafiği.....	26
Şekil 3.9. Sabit gerilme altında şekil değiştirme davranışı	27
Şekil 3.10. Yükleme hızının şekil değişimine etkisi	28
Şekil 3.11. Gerilme kuvvetinin kaldırılması durumunda ϵ -t davranışı	28
Şekil 3.12. Gerilme gevşemesi deneyi	29
Şekil 3.13. Hooke cismi ve elastik davranış modeli	30
Şekil 3.14. Newton cismi ve viskoz davranış modeli	31
Şekil 3.15. Maxwell modeli, Kelvin-Voight modeli ve Karışık model	31
Şekil 3.16. Genelleştirilmiş Maxwell Modeli	32
Şekil 3.17. Kauçuk takoz çeşitleri.....	33
Şekil 3.18. A tipi kauçuk takoz	34
Şekil 4.1. Tek eksenli çekme testi verilerinin Abaqus programına girilmesi	35
Şekil 4.2. Düzlem çekme testi verilerinin Abaqus programına girilmesi	36
Şekil 4.3. Tüm hiperelastik malzeme modellerini seçilmesi.....	37
Şekil 4.4. Tek eksenli çekme testi ve tüm modellerin test eğrilerinin karşılaştırılması..	37
Şekil 4.5. Düzlem çekme test ve tüm modellerin test eğrilerinin karşılaştırılması.....	38
Şekil 4.6. Tek eksenli çekme test eğrisi ve hiperelastik malzeme modeli	38
Şekil 4.7. Düzlem çekme test eğrisi ve hiperelastik malzeme modeli	39
Şekil 4.8. Çekme testi normalize edilmiş gerilme gevşeme grafiği	39
Şekil 4.9. Gerilme gevşemesi test eğrisi ve elde edilen viskoelastik malzeme modeli ..	40
Şekil 4.10. Analiz sonucunda elde edilen Prony serisi katsayıları.....	40
Şekil 4.11. Kauçuk takozun üç boyutlu katı modeli	41
Şekil 4.12. Kauçuk takoz elemanlarının üç boyutlu modeli	41
Şekil 4.13. Kauçuk takozun sonlu elemanlar modeli	42
Şekil 4.14. Kontrol noktaları ve sınır şartları	43
Şekil 4.15. Kauçuk takozun sıkıştırılmadan önceki ve sonraki görünümü	43
Şekil 4.16. Kauçuk yüzeyde oluşan gerilmenin zamanla azalması.....	44
Şekil 4.17. Kauçuk takozun analiz sonucu elde edilen gerilim gevşeme grafiği.....	45
Şekil 4.18. Kauçuk takozun sıkıştırma öncesi ve sıkıştırılmış hali.....	45
Şekil 4.19. Kauçuk takozun test sonucu elde edilen gerilim gevşeme grafiği.....	46

Şekil 4.20. Kauçuk takozun analiz ve test eğrileri	46
Şekil 4.21. Kauçuk takozun gerilme-gevşeme değerlerinin analiz ve test eğrileri	47

1. GİRİŞ

Kauçuk, kauçuk ağacı olarak bilinen tropikal bölgelerde yetişen bitkilerin özsuyundan (lateks) elde edilen bir üründür. Doğal kauçuk ve sentetik kauçuklar olmak üzere iki farklı türü vardır. Artan kauçuk ihtiyacını gidermek ve maliyeti düşürmek için bulunan sentetik kauçuklar petrol ve alkolün bileşimlerinden suni olarak üretilir.

Kauçuk malzemeler günümüzde genellikle sızdırmazlık elmanı, titreşim, gürültü ve darbe sönümleyici olarak kullanılmaktadır. Dünyada kauçuk kullanımının %56'sı araç lastiği sektörüdür. Bunun dışında kauçuk; konveyör bantlarda, contalarda, kayışlarda, ayakkabı tabanlarında, tıbbi ürünlerde, hortumlarda, yer döşemelerinde, otomobil sektöründe, inşaat sektöründe, makine bağlantı elemanlarında kullanılmaktadır.

Kauçuk takozlar diğer bir adıyla titreşim takozları bağlı bulunduğu mekanizmalarda titreşim ve darbeleri sönümlemek için kullanılır. Ayrıca kullanıldığı yerlerde gürültüyü engeller, radyal ve eksenel kuvvetleri absorbe eder.

Kauçuk takozlar titreşimli ve darbeli çalışmanın olduğu her mekanizmada kullanılabilir. Farklı tip ve ölçülerde tasarımı yapılabilen kauçuk takozlar makine elemanlarının birbiri ile olan bağlantılarında ve yüzey ile olan bağlantılarında kullanılabilir. Kauçuk takozlar; konveyör sistemlerde, jeneratörlerde, amortisörlerde, pompa, pres tezgahlarında, cnc makinalarda, otomobil sektöründe ve darbeli çalışan tüm parçalarda kullanılabilir.

Kauçuk malzemelerden üretilen takozların bağlı bulunduğu mekanizmalarda zaman içinde titreşim, gürültü ve darbeleri sönümlemesi beklenir. Fakat kauçuk malzemelerin yapısında oluşan gerilme-gevşemesi sebebiyle özelliklerini kaybederler. Kauçuk malzemelerden üretilen kauçuk takozların davranışlarının değişimini zamana bağlı modellemesi yapılarak ürün ömürleri belirlenebilir.

Kauçuk parçaların kullanım yerine göre ve istenilen mekanik davranışına göre üretimi yapılırken hangi tür kauçuğun kullanıldığı çok önemlidir. Kauçuk formüllerinde farklı karışımlar yaparak istenilen özellikleri sağlayan sentetik kauçuk formları üretilebilir. Bir

diğer durumda kauçuk malzemelerin dinamik davranışlarının üretim öncesi tespit edilmesinin zor olmasıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemiyle kauçuk malzemelerin dinamik davranışları üretim aşamasından önce tespit edilebilir.

Bu çalışmada A tipi bir kauçuk takozun sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi yapıp, yük altındaki davranışları incelenmiştir. 55 Shore A sertlik değerine sahip NR kauçuğundan alınan numuneler ile malzeme testleri yapılmıştır. Yapılan testler ile hiperelastik ve viskoelastik malzeme modeli belirlenmiştir. Malzeme modeli belirlendikten sonra kauçuk takozun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmış ve gerilme gevşeme değerleri elde edilmiştir. Gerilme gevşeme değerleri incelendiğinde gerilmenin zamanla azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kauçuk takoz üzerinde test yapılarak gerilme gevşeme değerleri elde edilmiştir. Analiz ve test sonuçlarından elde edilen gerilme gevşeme değerleri karşılaştırılarak zaman alanında viskoelastik modellemenin doğru çalıştığı tespit edilmiştir. Analiz ve test sonuçlarından elde edilen gerilme gevşeme değerlerinin korelasyonu sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasından elde edilen veriler ile kauçuk malzemelerin davranışları önceden belirlenerek üretimi yapılacak kauçuk takozun henüz tasarım aşamasında iken istenilen özelliklere göre üretimini sağlayabilir. Bu sayede deneme yanılma yöntemiyle yapılan üretim şeklinde oluşan maliyet ve zaman kaybını azaltabilir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Yavuz Erkek (2018), çalışmasında kaşık test numunesi ve basma test numunesi kullanarak tek eksenli çekme testi ve basma testlerini yapmıştır. Testlerini ön çevrimli ve çevrimsiz olacak şekilde yapmıştır. Elde ettiği test sonuçlarını Abaqus programına girerek hiperelastik ve viskoelastik malzeme modelini belirlemiştir. Abaqus programında tek eksenli ve basma testlerini belirlediği model ile analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçları ile test sonuçlarını karşılaştırmıştır. Daha sonra sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan contalar üzerinde sıkıştırma kuvveti uygulayarak gerilme gevşeme testlerini ve Abaqus programında analizini yapmıştır. Test verileri ile analiz verileri arasında benzerlik olduğunu bulmuştur. Uygulan gerilimin zamanla azaldığını tespit etmiştir. 8 farklı tasarıma sahip contalar üzerinde yaptığı gerilme gevşeme sonuçlarının tüm tasarımlar için aynı oranda olduğunu tespit etmiştir.

Vahapoğlu (2013), yaptığı çalışmada kauçuk türü malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemek için yapılan çekme, basma ve kayma testlerini incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışmaları sınıflandırmış ve teorik bilgiden çok yaptığı deneysel çalışmalara yer vermiştir.

Vahapoğlu (2007), araştırmasında doğal kauçuğun tarihsel sürecini inlemiştir. Doğal kauçuğun yapısı hakkında bilgiler vermiş ve vulkanizasyon işleminin kauçuğun fiziksel yapısını geliştirdiğini belirtmiştir. Doğal kauçuğun dünya üzerinde üretim alanlarından bahsetmiş ve kauçuk üretimi hakkında bilgiler vermiştir.

Shahzad ve ark. (2015), Kauçuk bir malzemenin sonlu elemanlar yöntemi ile hiperelastik malzeme modelini belirlemek için yaptıkları düzlemsel ve çift eksenli çekme testi verilerini Abaqus programına girmiş ve Yeoh malzeme modelini belirlemişlerdir.

Kim ve ark. (2012), yaptığı araştırmalarda tek eksenli, düzlemsel ve çift eksenli çekme deney verilerini kullanarak kloropren kauçuğu için malzeme modelini belirlemeyi

amaçlamışlardır. Test sonuçlarını Abaqus programına girerek Neo-Hookean, Mooney Rivlin ve Ogden modelleri ile karşılaştırmalar yapmış ve en uygun modelin Ogden N=3 modeli olduğunu tespit etmişlerdir.

Uğuz ve ark. (2020), çalışmalarında metal-kauçuk bileşenli motor kasnak parçasının yapısal davranışlarını incelemiştir. Kauçuk test numunelerinden elde ettikleri kuvvet-uzama grafiklerini kullanarak ANSYS programı yardımıyla Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme katsayılarını elde etmişlerdir. Modelleme ile deneysel verileri doğrulayıp kauçuk parça üzerinde en düşük gerilme değerine sahip bir tasarım elde etmişlerdir.

Erkek (2016), çalışmasında kauçuk kapı stoperlerinin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizini gerçekleştirmiştir. Hiperelastik malzeme modelini deneysel test verilerini Abaqus programına girerek elde etmiştir. Daha sonra kauçuk stoperleri z ekseninde sıkıştırarak gerilme ve yer değişimi değerlerini incelemiştir. Zaman alanında viskoelastik modellemesi yaparak gerilme gevşemesi değerlerini elde etmiştir.

Yavuz Erkek ve ark. (2015), çalışmalarında kauçuk burçların sonlu elemanlar yöntemi ile hiperelastik modellemesini ve statik analizlerini incelemiştir. Hiperelastik malzeme modelini yaptıkları kauçuk malzeme testlerini Abaqus programına girerek belirlemişlerdir. Araştırmaları sonucunda kauçuk burcun burulması ile oluşan gerilme-yer değişimlerini inceleyerek statik rijitlik eğrilerini elde etmişlerdir.

Soyel (2008), çalışmasında kullandığı NR/SBR türü kauçuk malzemenin farklı dolgu malzemeleri ile yapılan kauçuk formundan elde ettiği çekme test değerlerini sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiştir. Yaptığı çalışmada ilk olarak farklı oranlarda dolgu maddesi koyduğu karışımların çekme testlerini yapmıştır. Daha sonra elde ettiği tüm değerleri Abaqus sonlu elemanlar paket programına girmiştir. Abaqus programında bütün hiperelastik malzeme formlarını tek tek test verileri ile değerlendirerek uygun olan modelleri tespit etmiştir.

Saraç (2019), araştırmasında sızdırmazlık elemanı olan döner mil keçesinin sonlu elemanlar modelini oluşturarak termal ve gerilme analizini gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yaptığı keçenin ve prototip montaj halinin karşılaştırmasını yapmıştır. Analiz yapılmış keçe ile üretilmiş keçe arasında uyum olduğunu tespit etmiştir.

Yüce (2018), çalışmasında çamaşır makinesi körüğünün üç farklı şekil değiştirme durumunda testlerini yapmış elde ettiği test verileri ile hiperelastik malzeme modelini belirlemiştir. Daha sonra sonlu elemanlar modelini oluşturup analiz etmiştir. Analizler ile test sonuçlarının birbirine yakın olduğunu tespit etmiştir.

Song ve ark. (2020), çalışmalarında traktör koruma mekanizması altındaki kauçuk takozların özelliklerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Yaptıkları araştırmada dört farklı sertlikte kauçuk malzemelerin tek eksenli çekme, çift eksenli çekme, düzlemsel çekme ve hacimsel sıkıştırma testlerini yaparak hiperelastik malzeme modelini belirlemişlerdir.

Güven (2014), çalışmasında kauçuk burcun hiperelastik modellenmesi ve şekil optimizasyonunu incelemiştir. Çalışmasında yaptığı malzeme testleri ile hiperelastik malzeme modelini Yeoh olarak belirlemiştir. Oluşturduğu burç geometrisi için iki farklı parametre belirlemiştir. Parametreler ile hedef rijitlik eğrisini sağlamak için şekil optimizasyonunu belirlemiştir.

Zhao ve ark. (2019), çalışmalarında dolgulu kauçuk malzeme üzerinde yaptıkları tek eksenli ve eş eksenli çekme test verilerini kullanarak hiperelastik malzeme modeli belirlemiştir. Belirledikleri model ile kauçuk bir burcun statik rijitliğini incelemek için sonlu elemanlar programı ile modellemesini yapmışlardır.

Yapılan kaynak araştırmalarında; kauçuk türü malzemelerin hiperelastik ve viskoelastik davranışlarını belirlemek için çeşitli malzeme testlerine ihtiyaç olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan malzeme testlerinin sonlu elemanlar programlarına girilerek malzeme modelinin belirlendiği tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile kauçuk malzemelerin

davranışlarını önceden belirlemeyi, tasarım aşamasında istenilen özelliklere uygun malzeme üretimini ve zamandan kazanç sağlayabildikleri tespit edilmiştir.

2.2. Kauçuğun Tarihçesi

Kauçuk tarihsel süreçte ilk olarak Christopher Colombus'un Amerika'ya yaptığı seferler sonucunda keşfedilmiştir. Colobus'un 1493 yılında yaptığı ikinci seferi sırasında tuttuğu notlarında Haiti yakınlarında yerlilerin topa benzeyen kauçuk bir malzeme ile oynadığından bahsedilir. (Vahapoğlu, 2007)

Fransız Bilimler Akademisi dünyanın şeklini araştırması için 1735 yılında La Condamine adlı bilim insanını Güney Amerika'ya göndermiştir. La Condamine yaptığı geziler sırasında Amazon ormanlarında kauçuk ağaçlarını ve yerlilerin kauçuk ağaçlarının sıvısını kullandığını keşfetmiştir (Şekil 2.1). Yerel halk bu ağaçlara göz yaşı anlamında gelen 'Cao ochu' ve 'have' adını veriyorlardı. La Condamine kauçuk sıvısını (lateks) çıkarıp kurutarak elde ettiği malzemeleri incelenmesi için Fransa'ya gönderdi.



Şekil 2.1. Kauçuk ham maddesinin elde edilmesi (<https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2012/11/kaucuk-nedir-kaucuk-tarihcesi.html>,2022.)

Josep Priestly 1770 yılında kauçuğun kurşun kalem izlerini yok ettiğini fark ederek silgiyi buldu.

1823 yılında İskoçyalı kimyacı Charles Macintosh kauçuk ile yaptığı çalışmalar sonucunda su geçirmez malzemelerin yapım metodunu buldu. Ancak bu malzemelerde kullanılan kauçuk sıcak havalarda yumuşayarak eriyordu. Soğuk havalarda ise sertleşip esnek yapısını kaybediyordu.

1840'lı yıllara kadar kauçuk kullanımı silgi ve su geçirmez kıyafetlerden ileriye gidememiştir. 1839 yılında Charles Goodyear adlı Amerikalı kauçuğu kükürtle karıştırıp ısıtarak vulkanizasyon işlemini keşfetmiştir. Vulkanizasyon işleminden sonra kauçuğun yapışkanlık özelliğini kaybettiğini ve elastik özellik kazandığı anlaşıldı. Bu işlemten sonra kauçuğun kullanım alanları ve fiyatı arttı.

1907 yılında Seylan'da gizlice yetiştirilen Brezilya kauçuk ağaçlarının tohumları Malezya'ya aktarıldı. İngiliz botanikçi H.N. Ridley'in çalışmaları sonucu yılda yaklaşık 6000 ton miktarında kauçuk dünya pazarına sunuldu. Bu işlemin sonucunda Brezilya ve Afrikalı tüccarların kazançları azalmaya başladı. Kauçuk üretiminde Fransızların Çin ve Hindistan, Amerikalıların Liberya ve Brezilya, Hollandalıların Endonezya'da kurdukları kauçuk çiftlikleri ile uluslararası bir yarış başlamıştır.

Goodyear'ın vulkanizasyon işlemine bulmasından sonra neredeyse bütün kauçuk ürünler kükürt ile karıştırılarak üretilmeye başlandı. Artan kauçuk ihtiyacını çözmek ve maliyeti düşürmek için 1900'lü yıllarda sentetik kauçuklar üretilmeye başlandı.

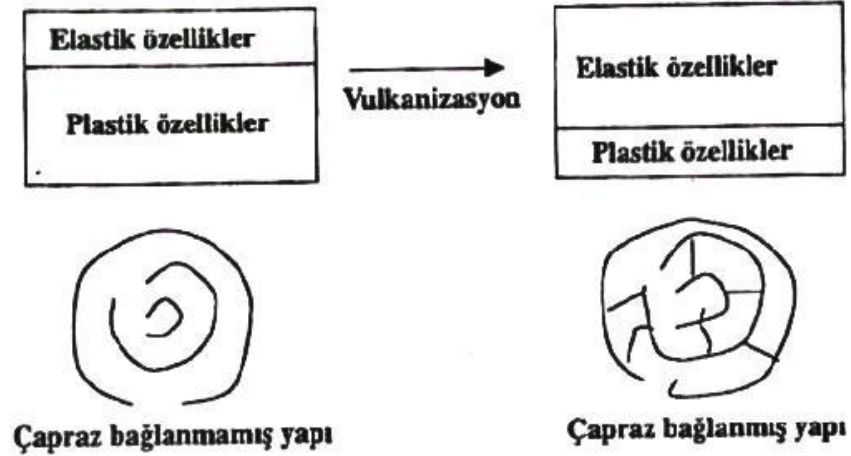
1909 yılında ilk olarak Alman Kimyacı F.Holman petrolden elde ettikleri bütadieni polimerleştirerek sentetik kauçuğu üretti. Sentetik kauçuğun üretimiyle kauçuk kullanımı çok fazla artmıştır.

2.3. Kauçuk Malzeme Bilgisi ve Vulkanizasyon İşlemi

Plastik ve kauçuk malzemeler polimer bileşik sınıfına girerler. Polimerler; plastikler, elastomerler ve termosetler olmak üzere üç gruba ayrılır. Kauçuklar genellikle elastik özellik gösteren malzemelerdir. Elastik malzemelerin polimer grubunda yer alması elastomer ismini oluşturmuştur.

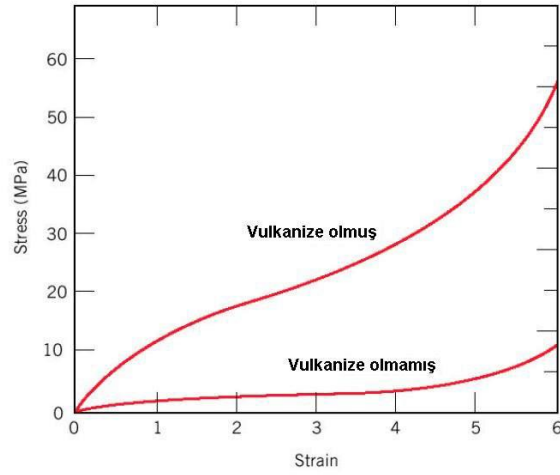
Elastomerler, kauçukların çapraz bağlanması yoluyla oluşan bileşiklerdir. Polimer malzemelerin elastomer malzeme olabilmesi için, yüksek molekül ağırlığına, zincirler arası düşük kuvvete, rastgele dizilmiş zincir yapısına ve çapraz bağlanabilme(vulkanizasyon) özelliklerine sahip olması gerekir.

Kauçuk kavramı: “ Kauçuklar çapraz bağlanmamış ama çapraz bağlanabilme özelliğine sahip, yani vulkanize olabilen polimerlerdir. Yüksek sıcaklıkta ve deforme edici kuvvetlerin etkisi altında koyu sıvımsı akış özelliği gösterirler. Böylece uygun şartlarda şekillendirilebilirler. Lastik kavramı, yukarıda tarifi yapılan elastomer kavramı ile eş anlamlıdır. Çapraz bağlanabilme özelliği vulkanizasyonla açıklanabilir.”(Savran, 2001) Vulkanizasyon, tabi kauçuk ve elastomer malzemelere kalıcı elastik özellikler kazandırmak için yapılan bir işlemdir. Vulkanizasyon işleminden önce yüksek plastik özellik gösteren kauçuk malzemeler, vulkanizasyon (çapraz bağlanma) işleminden sonra kimyasal yapısında değişim yaşayarak yüksek elastik özellik kazanırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Vulkanizasyon öncesi ve sonra oluşan çapraz bağ yapısı (Savran, 2001)

“Çapraz Bağlanma özelliği, vulkanizasyonu sağlayan maddenin miktarına, aktivitesine ve reaksiyon zamanına bağlıdır. Bu özellik vulkanizasyon derecesi ve çapraz bağlanma yoğunluğu olarak ifade edilir. En çok kullanılan kükürt vulkanizasyonunda, diğer katkı maddelerinin, özellikle kullanılan hızlandırıcıların cins ve miktarına bağlı olarak, farklı çapraz bağlanma şekilleri oluşabilmektedir. Vulkanize kauçuğun özellikleri büyük ölçüde çapraz bağlanma şekline ve yoğunluğuna bağlıdır.”(Savran, 2001)



Şekil 2.3. Vulkanizasyon işlemi öncesi ve sonrası gerilme-gerinme eğrileri (Erkek, 2016)

Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi kauçuk malzemelerin elastisite modülü vulkanizasyon işlemi ile doğru orantılıdır. Kauçuktaki çapraz bağ sayısının artışı elastikiyet, rijitlik ve çekme dayanımı özelliklerinin de artışı sağlamaktadır.

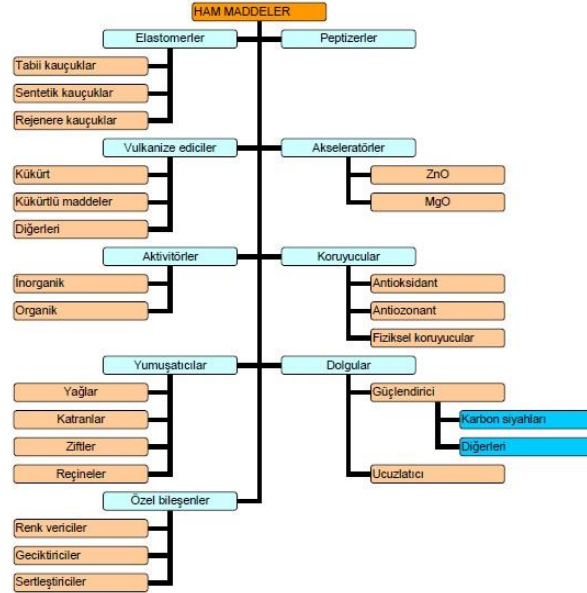
Kauçuk karışımı, kauçuk malzemelerin kullanıldığı ortamda istenilen özellikleri sağlaması için kauçuk, dolgu maddeleri ve diğer yardımcı katkı maddelerinin birleştirilmesiyle elde edilen bir işlemdir. Kauçuk karışım işlemi vulkanizasyon işleminden önce gerçekleştirilir. İyi bir kauçuk karışımından istenilen özellikler:

- Üretilecek kauçuk parçanın kullanılacağı çalışma ortamına uygun özellikler göstermesi
- Üretim sırasında işlem sürecine, metoda ve kullanılan makinelere uygun olması
- Ürünün maliyet miktarlarının kontrol edilebilmesi

Üretilecek ürünün istenilen özellikleri sağlayabilmesi; seçilecek kauçuk, hammadde ve katkı maddelerinin özellikleri ve bunların karışım oranlarına bağlıdır. Bu seçilen malzemelerin birbirleri ile belirli oranlarda karışabilmesi ile oluşan forma formül veya reçete adı verilir.

Bir kauçuk reçetesi; elastomerler (tabi kauçuk, sentetik kauçuk), dolgu maddeleri (karbon siyahları), yumuşatıcılar(yağ), pişiriciler (kükürt, kükürtlü maddeler), geciktiriciler,

hızlandırıcılar, aktivatörler (inorganik, organik), yaşlanmayı önleyiciler, proses kolaylaştırıcılar ve özel bileşenler (renklendirici, koku, vb.) bileşenlerinden oluşur (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Lastik hamurunda kullanılan hammaddelerin sınıflandırılması (Megep, 2011)

2.4. Kauçuk Çeşitleri

2.4.1. Doğal Kauçuk (NR):

Tabi kauçuk, Hevea brasiliensis adı verilen kauçuk ağacının akışkan sıvısından(lateks) elde edilir. Lateks sıvısının yapısında %60-65 su, %30-40 cis-1,4 polyisoprene (lastik), %2-5 lipid ve %2 reçine bulunur.



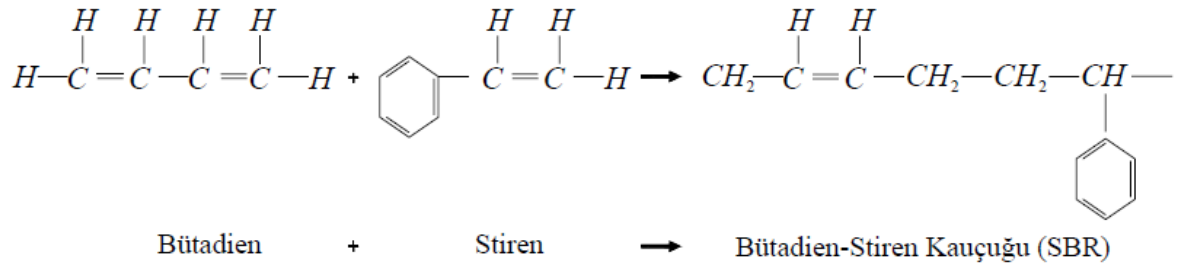
Şekil 2.5. Doğal Kauçuk (<https://www.vibracoustic.com/en/vibracoustic-svr-l-natural-rubber/>,2022)

Tabii kauçuğun çalışma sıcaklığı -60° C ile +100° C arasındadır. Tabii kauçuğun, elastikiyet, yırtılma direnci, kopma direnci, aşınma direnci ve dinamik özelliklerinin yüksek olması üstün özellikleri olarak gösterilebilir.

Tabii kauçuğun, kauçuk ağacından doğal olarak üretilmesi maliyette dalgalanmalara neden olur. Ayrıca düşük ozon dayanımı, düşük kalıcı deformasyon değerleri, hava geçirgenliği, düşük sıcaklık dayanımı tabii kauçuğun eksik özellikleri olarak sıralanabilir. Tabii kauçuk günümüzde en çok araç lastik ve ayakkabı üretiminde kullanılmaktadır. Bunların dışında mekanik özelliği yüksek parçalarda, konveyör kayışlarda, titreşim takozlarında, hortumlarda, yer döşemelerinde, eldiven ve tıbbi bazı ürünlerin üretiminde kullanılır.

2.4.2. Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR):

Stiren bütadien kauçuğu üretimi en çok yapılan sentetik kauçuktur. SBR, Stiren ve bütadien monomerlerinin polimerizasyonu ile elde edilmektedir (şekil 2.6.). Polimer yapısında %75 bütadien, %25 stiren içerir. Düzensiz bir yapıya sahip olduğu için kristallenmeyi engeller.



şekil 2.6. Stiren Bütadien kauçuğunun molekül yapısı (Dal, 2015)

Sbr kauçuğu çoğu zaman tabii kauçuğun yerine kullanılır. Sbr kauçuğunun karışımı tabii kauçuğa göre daha kolay ve daha kısa zamanda hazırlanır. Fiziksel özelliklerini arttırmak için dolgu maddeleri ve karbon siyahı ilavesine ihtiyaç duyar.

Sbr kauçuğunun çalışma sıcaklığı -50°C ile $+100^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Yırtılmaya, aşınmaya, ısıya ve düşük sıcaklıklara karşı dayanımları tabii kauçuğa göre daha iyidir. Elastikiyet özellikleri tabii kauçuğa göre daha düşüktür. Fiyatının ucuz olması tabii kauçuk yerine kullanımını arttırmaktadır.

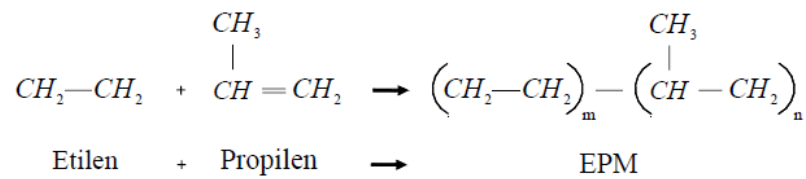
Sbr kauçuğu, ayakkabı tabanlarında, araç lastiklerinde, hortum, araç paspasları, taşıyıcı bantlarda, yer döşemesi gibi malzemelerde kullanılır.



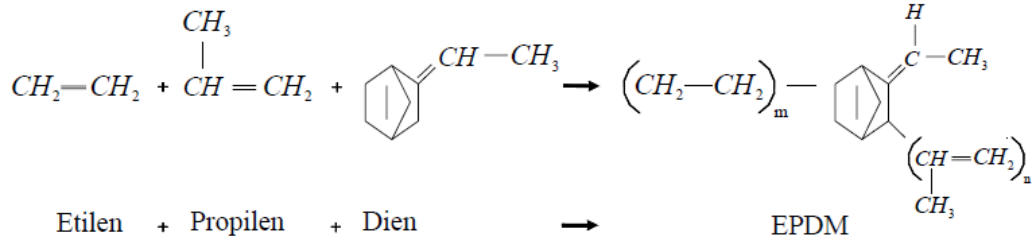
Şekil 2.7. SBR kauçuk ile üretilen yer döşemesi (https://www.titizkaucuk.com/sbr-dokme-kaucuk-zemin-kaplama#sbr_dokme_kaucuk-5,2022)

2.4.3. Etilen Propilen Kauçuğu (EPM-EPDM):

Etilen propilen kauçuğu ilk olarak 1963 yılında üretilmeye başlanmıştır. Yapısındaki etilen ve propilenin kopolimerizasyonu ile üretilir (Şekil 2.8). Etilen ve propilen reaksiyonunda çift bağ olmaması epm kauçuğunun doymuş bir yapıda olmasını sağlar. Doymuş yapısı sayesinde ozon ve oksijene karşı dayanımı çok yüksektir. Epdm ise etilen ve propilene ilave olarak üçüncü bir dienin reaksiyona girmesi ile üretilir (Şekil 2.9.).



Şekil 2.8. EPM kauçuğunun molekül yapısı (Dal, 2015)



Şekil 2.9. EPDM kauçuğunun molekül yapısı (Dal, 2015)

Etilen propilen kauçuğu çalışma sıcaklığı -40°C ile $+150^\circ\text{C}$ olup, diğer kauçuk türlerine göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Yapısında yüksek dolgu ve yağ alabilmesi, ısı dayanımı, ozon dayanımı, oksijen dayanımı, yaşlanma dayanımı, yüksek elektrik izolasyonu, kimyasallara karşı dayanımı üstün özellikleri olarak sıralanabilir.

Etilen propilen kauçuğu; kapı ve cam fitilleri, radyatör hortumları, körükler, contalar, yer döşemeleri ve beyaz eşya sektöründe bazı sızdırmazlık elemanlarında tercih edilir.

2.4.4. Nitril Kauçuğu (NBR):

Nitril kauçuğu yapısında %25-40 oranında akrilonitril bulundurulur. Polimer akrilonitril birimlerindeki polar nitril gruplarından dolayı yağlara ve çözücülere karşı dirençlidir. Nitril kauçuğu içerisindeki akrilonitril oranı ayarlanarak kauçuğun farklı alanlarda kullanımı sağlanabilir. Yapısındaki akrilonitril miktarını arttırılırsa yağlara, çözücülere ve gazlara karşı dayanımı, mekanik özellikleri, yoğunluğu, sertliği ve vulkanize hızı artar. Nitril kauçuğunun çalışma sıcaklığı -40°C ile $+100^\circ\text{C}$ arasındadır. Yakıt ve yağlara karşı dayanımı ve geçirgenlik üstün özellikleridir. Zayıf elektrik izolasyonuna, düşük resilens, ve düşük ısı özellikleri eksi yönleridir.

Kullanım alanları genellikle yağ hortumları, yakıt hortumları, hidrolik hortumlar, contalar, keçeler ve yağ dayanımı yüksek sızdırmazlık elemanlarıdır.

2.4.5. Butil Kauçuğu (IIR):

Butil kauçuğu, çok miktarda izobütülenin (%97-99), az miktarda izopren (%0,5-3) ile kopolimerizasyonu sonucunda üretilir. Bu polimerizasyon metilen klorür çözeltisi içerisinde çözünmüş bulunan alüminyum klorür katalizörü etkisiyle -90°C sıcaklıkta meydana gelir(Öztürk, 2008).

Yapısında az miktarda çift bağ bulundurmasından dolayı ozon ve oksijene karşı dayanımı diğer kauçuk türlerine göre çok iyidir. Çift bağ sayısının az olması düşük vulkanizasyon hızına sebep olmaktadır.

İç yapısı sıkıdır, düşük geçirgenliğe sahiptir. Ozon, oksijen ve kimyasal dayanımı yüksektir. Yağ ve yakıtlara karışı dayanımı düşüktür. Vulkanizasyon süresi uzundur bu özelliğinden dolayı diğer kauçuk türleri ile karışımı yapılamaz.

Kullanım alanları iç lastikler, çatı kaplamaları, hortumlar, kablo kaplamaları gibi düşük geçirgenliğe sahip olunması istenilen uygulamalarda tercih edilir.

2.4.6. Polibütadien Kauçuğu (BR):

Polibütadien kauçuğu SBR kauçuğundan sonra kullanımı en yaygın olan sentetik kauçuktur. Polibütadien kauçuğunun üretimi bütadienin kütle polimerizasyonu işlemi ile gerçekleştirilir (Meb, 2011).

İşlenmesi zor ve kopma mukavemeti değerleri düşüktür. Bu yüzden genellikle polibütadien kauçuğu; doğal kauçuk (NR) ve stiren bütadien kauçuğuyla (SBR) birlikte kullanılır. Aşınma ve çatlamaya karşı çok dayanaklı olduğundan araç dış lastiklerinde kullanılmaktadır.

2.4.7. Kloropren Kauçuğu (CR):

Asıl adı kloropren kauçuğu olmasına karşın neopren kauçuğu olarak da adlandırılır. Kloropren kauçuğu emülsiyon polimerizasyonu işlemi ile üretilir (Mazlum, 2008).

Yapısal olarak tabii kauçuğa benzer yönleri vardır. Kloropren kauçuğunun polimer yapısında klor bulunmasından dolayı yağlara, havaya, ozona ve yanmaya karşı dayanımı yüksektir. Esneme dayanımı ve elektrik izolasyonu yüksektir. Yüksek maliyeti, düşük ısı dayanımı ve mekanik özelliklerinin düşük olması eksi yönleridir.

Araç lastikleri dışında tabii kauçuk kullanılan yerlerde, ozon, hava, yağ ve yanma direnci istenilen yerlerde kullanılır.

2.4.8. Silikon Kauçuğu (SI):

Silikon kauçuklar diğer kauçuk türlerinden farklı olarak polimer yapıları oksijen ve silisyum zincirlerinden oluşur. Bu zincirler arası bağlar zayıf oldukları için gerilme sırasında kristalleşme olmaz. (Soyubol, 2006).

Silikon kauçuğunun çalışma sıcaklığı -60°C ile 300°C arasındadır. Oksijene, ısıya, ozona ve UV ışınlarına karşı dayanımı çok yüksektir. Esneme dayanımı ve elektriktik izolasyonları yüksektir. Fiyatının pahalı olması, aşınma dayanımının, fiziksel özelliklerinin, yakıt ve yağ dayanımlarının kötü olması eksi yönleridir.

Silikon kauçuklar elektrik kablolarında, kablo uçlarında, buji kablolarında, tıbbi aletlerde, O-ring, yağ contaları, fırın uygulamaları ve inşaat sektöründe sıklıkla kullanılır.

2.4.9. Poliüretan Kauçuğu (AU):

Poliüretanlar isosiyanat ile alkolün reaksiyona girmesi sonucu oluşmaktadır. Sonsuz değişkenliğe sahip yapıları vardır. Su ile birleştiğinde CO_2 çıkararak süngerleşirler. Yağ ve yakıt dayanımı iyidir ancak hidrolize olurlar.

Oksijene, ozona, yağlara ve yakıtlara karşı dirençlidir. Aşınma, yırtılma ve kopma değerleri yüksektir. Fiyatının pahalı olması ve hidrolize olması eksi yönleridir.

Poliüretan kauçuklar genellikle keçelerde, ayakkabı tabanlarında, aşınma direnci istenilen yerlerde, yağ dayanımı olan dolgu tekerleklerinde kullanılır.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Hiperelastik Malzeme Modelleri

Hiperelastik malzemeler, metal malzemelere göre bir yük altında doğrusal davranış göstermeyen malzemelerdir. Bu yüzden uygulanan yük-şekil değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi gösteren belirli bir oran yoktur.

Kauçuk malzemelerin modellenmesi için birçok araştırmacı şekil değiştirme enerji fonksiyonları kullanmıştır. Şekil değiştirme enerji fonksiyonlarında, kauçuk malzemelere uygulanan testlerin sonuçları kullanılarak malzeme kat sayıları elde edilir. Şekil değiştirme enerji fonksiyonunda, uzama oranı ve invaryant değerleri tanımlanır (Güven, 2014).

Çekme testinden sonra boydaki değişimin ilk boya oranı gerinme (strain) olarak ifade edilir.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{u}{L_0} \quad (3.1)$$

Uzama oranı (λ) parçanın çekme testinden sonraki boyunun, ilk boya oranı ile ifade edilir.

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{u + L_0}{L_0} = 1 + \varepsilon \quad (3.2)$$

“İnvaryantlar, koordinat sisteminden bağımsız gerinmeleri ölçmek için kullanılmaktadır. Gerinme enerjisi potansiyelinin tanımlanması için üç yönde uzama ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) oranları yazılır. Burada λ_1 ve λ_2 düzlemdeki uzamaları temsil ederken, λ_3 ise düzlem dışı uzamayı temsil etmektedir. Üç yöndeki gerinme invaryantları şu şekilde yazılabilir:” (Erkek ve ark., 2015).

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3.3)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3.4)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (3.5)$$

“İzotropik ve mükemmel sıkıştırılamaz bir malzeme için $I_3=1$ ’dir. Gerinme enerjisi potansiyeli (W), uzama oranları ve gerinme invariantlarının fonksiyonudur” (Erkek ve ark., 2015).

Kauçuk tipi malzemelerin modellenmesi için birden fazla hiperelastik malzeme modeli geliştirilmiştir. Bu modellerden en çok kullanılanları Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Ogden, Yeoh, Gent ve Marlow modelleridir.

3.1.1. Mooney-Rilvin Hiperelastik Malzeme Modeli

Melvin Mooney ve Ronald Rivlin tarafından 1940 yılında ilk çalışmalar yapılmıştır. Bu modelde malzemenin sıkıştırılamaz ve izotrop olduğu kabul edilmektedir. Malzemenin tek eksenli uzama değerleri ile iyi sonuçlar vermektedir diğer deneysel testler ile yapılan modellemeler doğru sonuçlar vermemektedir.

Mooney-Rivlin malzeme modeli şekil değiştirme enerji denklemi:

$$W(I_1, I_2) = \sum_{ij=0}^{n \rightarrow \infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3.6)$$

3.1.2. Neo-Hookean Hiperelastik Malzeme Modeli

Neo-Hookean malzeme modeli malzemenin gerilme-gerinim (stress-strain) davranışını tahmin etmek için kullanılır. Bu model Hooke yasasına benzer. Uygulanan gerilme ile gerinim arasında başlangıçta doğrusal bir ilişki vardır ancak belirli bir noktadan sonra doğrusal ilişki ortadan kalkar (Kim ve ark., 2012).

Treolar, Neo-Hookean şekil değiştirme enerji fonksiyonu ile yaptığı çalışmalarda farklı test yöntemlerini kullanarak deneysel ve teorik verileri değerlendirmiştir.

Değerlendirmeler sonucunda deneysel şekil değişimi ile teorik şekil değişimi benzerlik oranları tek eksenli çekme testinde %40, basit kayma testinde %90 ve iki eksenli çekme testinde %200 şekil değişimine kadar yakın sonuçlar vermektedir. Tek eksenli basma testinde ise teorik ve deneysel veriler çok yakın sonuçlar vermektedir (Soyel, 2008).

Neo-Hookean malzeme modeli şekil değiştirme enerji denklemi:

$$W(I_1) = C_{10}(I_1 - 3) \quad (3.7)$$

3.1.3. Ogden Hiperelastik Malzeme Modeli

Ogden modeli hiperelastik malzeme modelleri arasında kauçuk malzemeler için en çok kullanılan modeldir. 1972 yılında Ogden tarafından geliştirilmiştir. Ogden modeli çekme testinde %700 uzamalara kadar yüksek benzerlik gösterir (Kim ve ark., 2012).

Ogden modelinde tek eksenli veya iki eksenli çekme testlerinden çıkan verilere, eğri uydurma yöntemi kullanılmaktadır.

Ogden malzeme modeli şekil değiştirme enerji denklemi:

$$W(I_1, I_2, I_3) = \sum_{r=0}^{n \rightarrow \infty} \frac{u_r}{a_r} (\lambda_1^{ar} + \lambda_2^{ar} + \lambda_3^{ar} - 3) \quad (3.8)$$

Denklemdaki a_r ve u_r değerleri malzeme testlerinden bulunacak katsayılardır.

3.1.4. Yeoh Hiperelastik Malzeme Modeli

Araştırmacılar genellikle dolgu maddesi katılmamış vulkanize olmuş kauçuk malzeme ile testler yaparken, Yeoh çalışmaların dolgu maddesi olarak karbon siyahı eklenmiş ve vulkanize olmuş kauçuk malzemeyi kullanmıştır. Çalışmalarını tek eksenli çekme testi ve basma testi üzerinde gerçekleştirmiştir (Soyel 2008).

Yeoh malzeme modeli şekil değiştirme enerji denklemi:

$$W(I_1) = \sum_{n=1}^i c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (3.9)$$

3.1.5. Polinom Hiperelastik Malzeme Modeli

İzotropik ve sıkıştırılabilir kauçuk malzemeler için polinom model şekil değiştirme enerji denklemi (Shahzad 2015):

$$W = \sum_{i,j=0}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3.10)$$

c_{ij} =Malzeme testlerinden belirlenen katsayılar

D_i =Sıkıştırılmaz kauçuk için sıfıra ayarlanan malzeme sabiti

J_{el} =Elastik hacim oranı

N =Şekil değiştirme enerji fonksiyonundaki terim sayısı

3.1.6. İndirgenmiş Polinom (Reduced Polynominal) Hiperelastik Malzeme Modeli

İndirgenmiş polinom model şekil değiştirme enerji denklemi:

$$W = \sum_{i=0}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3.11)$$

c_i =Malzeme testlerinden belirlenen katsayılar

D_i =Sıkıştırılmaz kauçuk için sıfıra ayarlanan malzeme sabiti

J_{el} =Elastik hacim oranı

N =Şekil değiştirme enerji fonksiyonundaki terim sayısı

3.2. Katsayıların Belirlenmesi

Hiperelastik modelleme yaparken kauçuk malzemelere uygulanan testlerden elde edilen değerler ile en uygun hiperelastik malzeme modeli seçilir. Bu çalışmada katsayılar belirlenirken; kauçuk malzeme test değerleri sonlu elemanlar paket programına girilir. Test değerlerine uygun olan malzeme modeli eğri uydurma yöntemi ile seçilir ve program modele göre katsayıları hesaplar.

3.3. Hiperelastik Malzeme Modelinin Belirlenmesi İçin Yapılan Testler

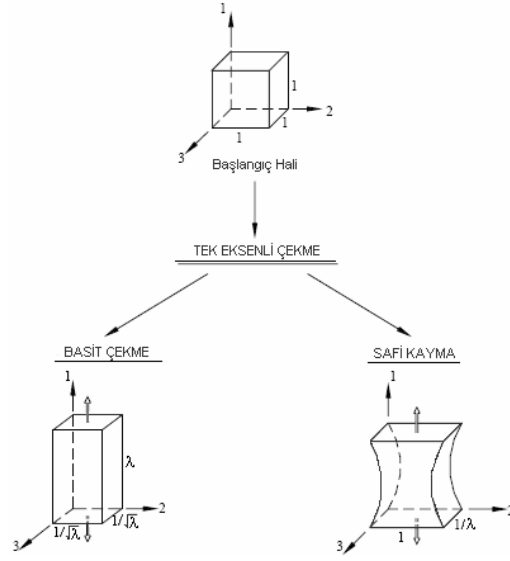
Hiperelastik malzeme modelini belirlemek için birtakım deneysel verilere ihtiyaç vardır. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, elastomer malzemeler üzerinde yapılan çeşitli testlerden elde edilen gerilme-gerinme verileri modelin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu testlerden en kolayı ve en çok tercih edileni tek eksenli çekme testidir. Fakat tek eksenli çekme testi tek başına yeterli ve sınırlı bilgi veremeyebilir. Kauçuk malzemenin kullanım alanı ve kullanılan kauçuk çeşidine göre doğru modelleme yapabilmek için birden fazla test verisine ihtiyaç olabilir. Bu yüzden tek eksenli çekme testi dışında safi kayma, düzlem çekme testi, basit basma testi, iki eksenli çekme testi uygulanmaktadır.

3.3.1. Tek Eksenli Çekme Testleri

Basit ve kolay yapılabilirliği açısından en yaygın kullanılan test yöntemidir. Robert Hooke tarafından 17. yüzyılda metaller üzerinde ilk çalışmalar yapılmıştır. Robert Hooke metaller üzerinde yaptığı çalışmada gerilme ve şekil değiştirme arasında doğrusal bir oran olduğunu tespit etmiştir. Kauçuk malzemelerde ilk çalışmalar 1805 yılında Gough tarafından yapılmıştır (Vahapoğlu, 2013).

Kauçuk malzemelerin, metal malzemelerden farklı olarak uzama oranı %300-500 miktarlarına göre ulaşabilmektedir. Ayrıca gerilme ve şekil değiştirme arasında doğrusal bir oran olmadığı tespit edilmiştir (Uğuz, 2020).

Literatürde kauçuk türü malzemeler için yapılan tek eksenli çekme deneyleri basit çekme ve safi kayma deneyleridir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Tek eksenli çekme deformasyonları (Vahapoğlu, 2013).

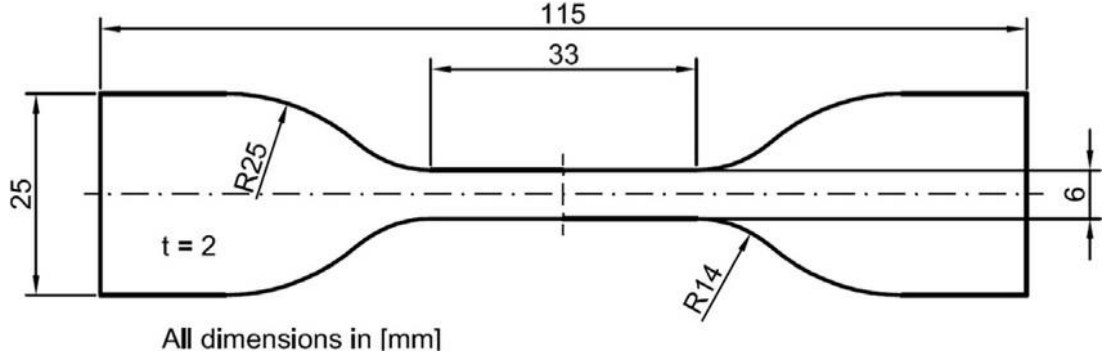
3.3.1.1. Basit Çekme Testi

Basit çekme testinin deneyleri çok eskilerden günümüze kadar yapılmış olması sonucu test numunesi boyutları ve test talimatları standartlara bağlanmıştır. Kauçuk malzemeler için ASTM D412, DIN 53504 ve ISO 37 standartları referans alınabilir.



Şekil 3.2. Basit tek eksenli çekme testi

Çekme testi yapılacak numunenin boyu genişliğinin en az 10 katı olmalıdır (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Basit çekme testinde kullanılan test numunesi (ASTM D412)

Çekme kuvveti sadece bir doğrultuda uygulanır ve çekme uygulanan doğrultuda uzama, yanal doğrultuda incelmeye meydana gelmesi istenilir. Deney sırasında deney numunesi üzerinde oluşan gerilemeler aşağıdaki gibidir;

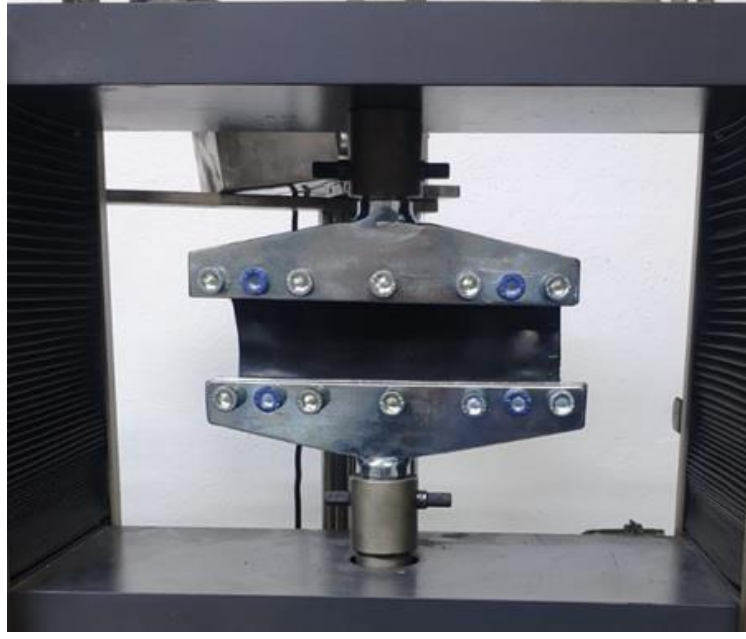
$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.12)$$

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.13)$$

3.3.1.2. Düzlem Çekme (Safi Kayma) Testi

Bu test yönteminde de basit çekme testinde olduğu gibi kuvvet tek yönde uygulanır. Basit çekme testinden farklı olarak test numunesinin uzunluğu genişliğine göre çok kısadır.

“Kauçuk malzeme sıkıştırılmaz olduğundan dolayı çekme yönüne göre 45° açıda saf kayma meydana gelir.” (Erkek ve ark., 2015)



Şekil 3.4. Düzlem çekme testi

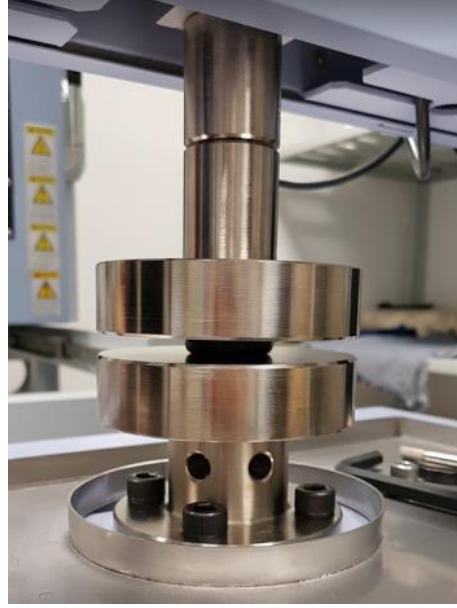
Düzlem çekme testinde bir yönde herhangi bir değişiklik olmazken kuvvetin uygulandığı yönde uzama meydana gelirken üçüncü yönde kısılma meydana gelir.

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.14)$$

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.15)$$

3.3.1.3. Basit Basma Testi

Basma testi kuvvetin test numunesi üzerindeki etkilerini görmek için yapılan ve çekme deneyinin tam tersi olan bir işlemdir. Basma testi de Universal çekme deneyi cihazlarında yapılabilir. Silindirik şeklindeki kauçuk test numunesin iki metal plaka arasına konularak sıkıştırılması işlemi ile yapılır (Şekil 3.5.). Fakat plaka ile kauçuk parça arasında oluşacak sürtünme katsayısının büyük olmasından dolayı kayma şekil değişimi oluşabilmektedir. Bu durumda hatalı test verileri elde edileceğinden bu test yöntemi yerine iki eksenli eş çekme testi tercih edilir (Yavuz Erkek, 2018).



Şekil 3.5. Basit basma testi (Yavuz Erkek, 2018)

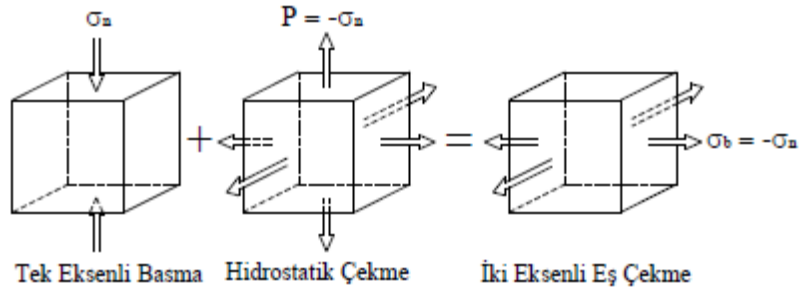
Basma deney sonucunda yük-kısalma eğrisi elde edilir. Yük-kısalma eğrisi çekme testindeki yük-uzama eğrisi ile aynıdır. Ancak basma testinde uzama değeri numunenin kısalma değeri ile ölçülür. Deney sırasında deney numunesi üzerinde oluşan gerilemeler çekme testindeki gibidir;

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.16)$$

$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (3.17)$$

3.3.2. İki Eksenli Eş-Çekme Testi

Kauçuk malzeme modeli belirlenirken tek eksenli çekme deneyi bazı durumlarda yeterli olmayabilir. Bu durumlarda kauçuk malzemenin basma kuvveti etkisindeki davranışları tespit edilerek malzeme sabitleri bulunabilir. Fakat tek eksenli basma deneyinde oluşan sürtünmeden dolayı hatalı sonuçlar vermesi araştırmacıları farklı bir deney yöntemi bulmaya yönlendirmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda iki eksenli eş çekme testinin basma testine göre daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Kauçuk malzemeler için iki eksenli eş çekme deformasyonun elde edilmesi (Vahapoğlu, 2013)

Kauçuk malzemelerin sıkıştırılmaz yapısından dolayı tek eksenli basma deformasyonuna, hidrostatik çekme deformasyonu ekleyerek iki eksenli eş çekme deformasyonu elde edilir (Şekil 3.6.).

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

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \sigma_3 = 0 \quad (3.18)$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad (3.19)$$

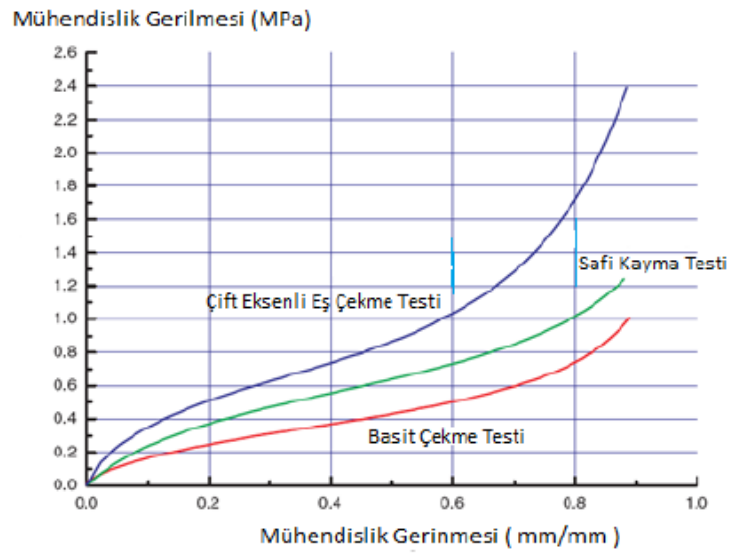
Kalınlık boyunca uzama oranı sıkıştırılmazlık oranından bulunur.

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1, \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (3.20)$$



Şekil 3.7. İki eksenli eş çekme testi (Miller, 2000)

İki eksenli eş çekme testi hiperelastik malzeme modelinin belirlenmesi için yapılan testler arasında en az kullanılan yöntemdir. Test yönteminin zor ve karmaşık olmasından dolayı tercih edilmez (Şekil 3.7.).

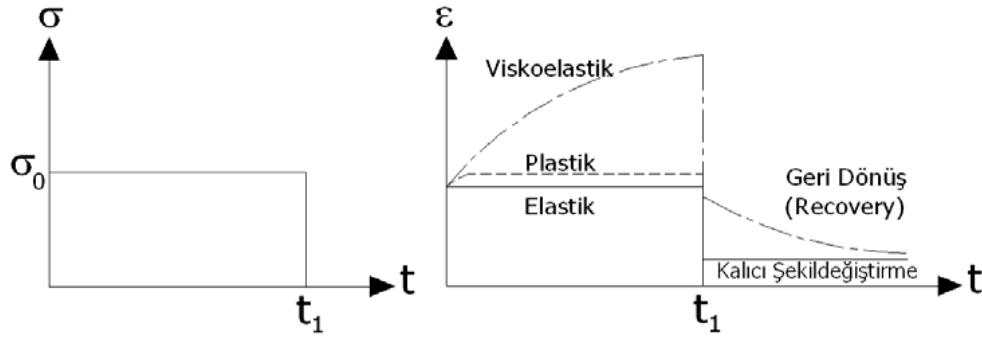


Şekil 3.8. Farklı çekme testleri ile elde edilen gerilme-şekil değişimi grafiği (Yavuz Erkek, 2018)

3.4. Viskoelastik Davranış

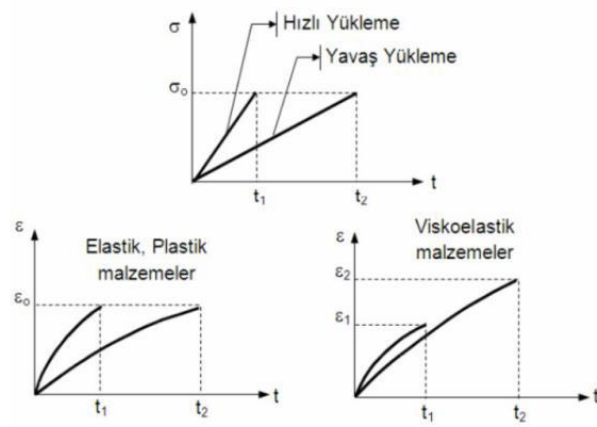
Elastomer malzemelerin bir özelliği de aynı anda hem viskoz hem de elastik anlamına gelen viskoelastik davranış göstermeleridir. Viskoelastik davranış gösteren malzemelere sabit bir gerilme uygulayınca elastik uzama, daha sonra zamanla sürekli artan uzama görülür. Yük kaldırılınca ani elastik toparlanma ve gecikmiş toparlanma meydana gelir (Şekil 3.9.). Uzama değeri sabit tutulursa gerilme değerinde zamanla gevşeme (azalma) meydana gelir. Bu yüzden metal malzemelerden farklı olarak elastomer malzemelerde sürünme ve gevşeme özellikleri görülür.

Sürünme, malzemenin sabit bir yük altında sürekli şekil değiştirmesi durumudur. Gevşeme ise malzemenin sabit bir şekil değiştirme miktarındayken gerilme değerinin zamanla azalması durumudur (Ay, 1992).



Şekil 3.9. Sabit gerilme altında şekil değiştirme davranışı (Seçer, 2010)

Viskoz davranışta zaman önemli bir parametre iken elastik davranış zamandan bağımsızdır. Viskoelastik davranış ise viskoz ve elastik davranışın birleşimi olduğu için zamana bağlıdır. Elastik ve plastik şekil değiştirmede yükleme hızının herhangi bir etkisi yokken viskoelastik malzemede yükleme hızı arttıkça şekil değiştirme hızı azalır (Şekil 3.10.).



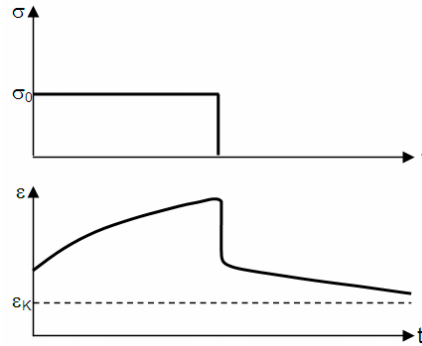
Şekil 3.10. Yükleme hızının şekil değişimine etkisi (Yavuz Erkek, 2018)

Bu özelliğinden dolayı viskoelastik malzemelerin davranışlarını matematiksel olarak tanımlarken, gerilme ve şekil değiştirme parametrelerine ilave olarak zaman parametresini de eklemek gerekir (Seçer, 2010).

3.4.1. Cisimlerde Sürünme Davranışı

Sürünme davranışı sabit bir gerilme altındaki malzemelerin yavaş ve sürekli şekil değiştirmesi durumudur. Sürünme etkisi Şekil 3.11.'de gösterilmektedir.

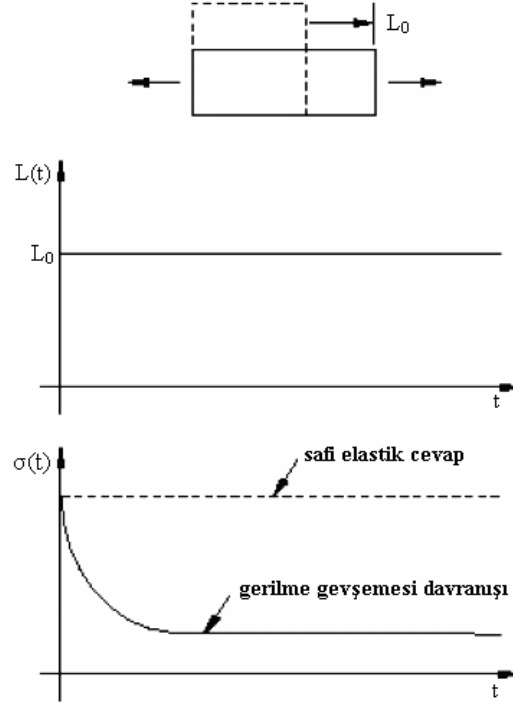
Gerilmenin kuvvetinin kaldırılması durumunda cismin elastik şekil değiştirmesinde hızlı bir azalma meydana gelir. Fakat elastik şekil değişiminin gecikmesi sonucunda cisimde kalıcı bir plastik şekil değişimi oluşur (Yavuz Erkek, 2018).



Şekil 3.11. Gerilme kuvvetinin kaldırılması durumunda ϵ - t davranışı (Yavuz Erkek, 2018)

3.4.2. Gerilme Gevşemesi

Sabit şekil değiştirme uygulanan bir cisimde gerilmenin zamanla azalması durumuna gerilme gevşemesi veya gevşeme denir. Gerilme gevşemesi de sürünme gibi zamana bağlı değişen bir davranıştır. Gerilme gevşemesi değeri elastomer malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır.



Şekil 3.12. Gerilme gevşemesi deneyi (Mazlum, 2008)

Gerilme gevşemesi deneyi viskoelastik davranışın belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Gerilme gevşemesi deneyinde numune sabit şekil değişimi seviyesinde sabit tutulur. Şekil değişimi sabit haldeyken uygulanan gerilmenin zamanla değişimi incelenir (Şekil 3.12.).

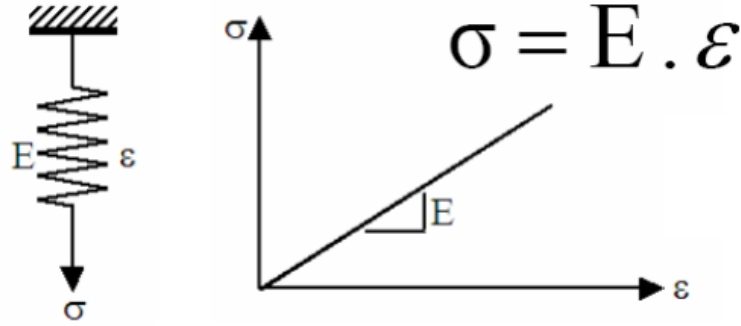
3.4.3. Zamana Bağlı Viskoelastik Modelleme

3.4.3.1. Lineer Elastik Davranış Modeli

Gerilme değeri ile şekil değiştirme miktarı lineer olup eş zamanlı değişmektedir. Yay şeklindeki mekanik modelle temsil edilir (Şekil 3.13.). Bu modele uyan cisimlere Hooke cismi denir. Bu model aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.21)$$

Bu denklemde σ değeri gerilmeyi, ε birim şekil değiştirmeyi, E değeri ise yay katsayısıdır ve elastisite modülü ile aynı değerdir.



Şekil 3.13. Hooke cismi ve elastik davranış modeli (Yavuz Erkek, 2018)

3.4.3.2. Viskoz Davranış Modeli

Viskoz davranış modelinde gerilme ile şekil değiştirme hızı orantılıdır. Bu özelliğe sahip cisimlere “Newton” cismi denir. Şekil 3.14.’te gösterilen yağlı amortisörle ifade edilir. Viskoz davranış modelinin bünye denklemi:

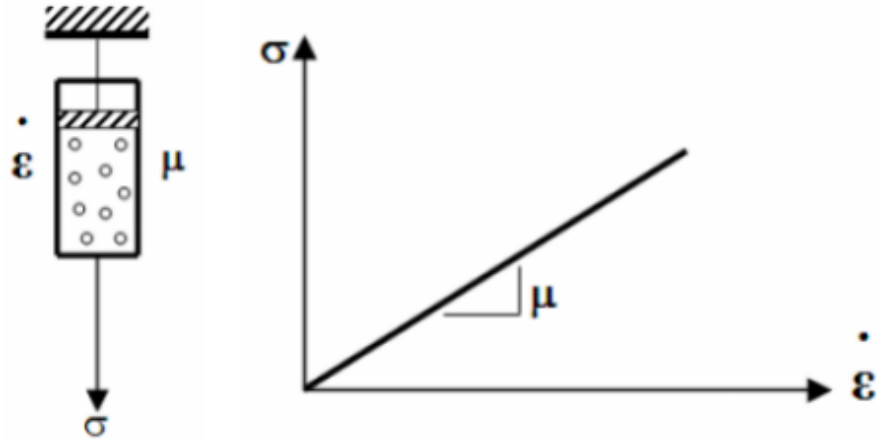
$$\sigma = \mu \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3.22)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.23)$$

σ : Gerilme

μ : Viskozite Katsayısı

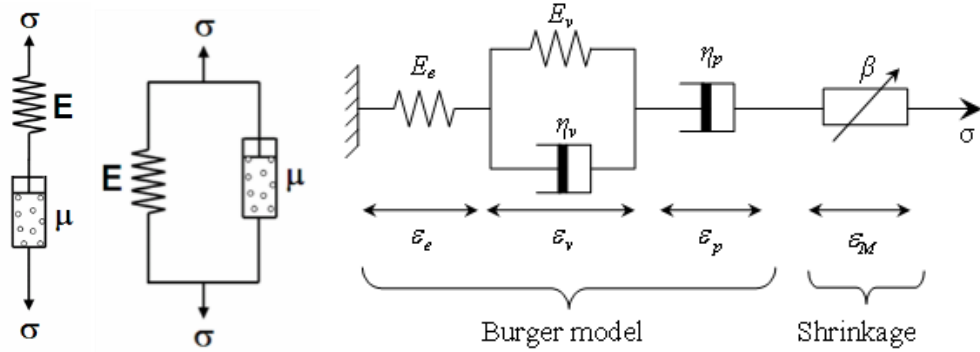
$\dot{\varepsilon}$: Birim şekil değiştirmenin zamana göre türevi



Şekil 3.14. Newton cismi ve viskoz davranış modeli (Yavuz Erkek, 2018)

3.4.3.3. Maxvell Modeli, Kelvin Modeli ve Karışık Model

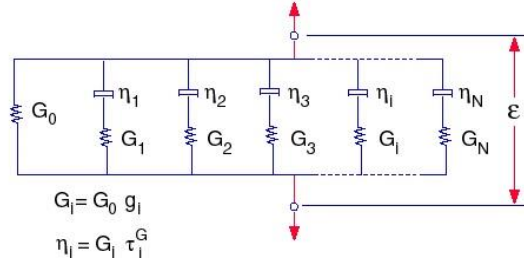
Plastik malzemelerin viskoelastik davranışlarını matematiksel olarak ifade etmek için yapılan çalışmalarda üç yöntem kullanılmıştır. Bunlar Maxvell modeli, Kelvin-Voight modeli ve bu iki modelin birleşimi olan karışık modeldir (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Maxvell modeli, Kelvin-Voight modeli ve Karışık model (<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>, 2022)

Zamana bağlı viskoelastik modelleme yöntemlerinde yay ve sönümleyici elemanlardan faydalanılır. Kullanılan yay ve sönümleyici eleman seri bağlı ise bu model Maxvell modeli paralel bağlı ise Kelvin-Voight modeli olarak tanımlanır.

Maxvell modeli genellikle akışkan olan malzemelerde, Kelvin modeli ise daha çok katı malzemeleri modellemede tercih edilir. Kauçuk malzemelerin sünme-gevşeme davranışlarını modellemek için ‘‘Genelleştirilmiş Maxvell’’ modeli geliştirilmiştir.



Şekil 3.16. Genelleştirilmiş Maxvell Modeli (http://help.solidworks.com/2018/turkish/SolidWorks/cworks/c_Viscoelastic_Model.htm?id=cafa636b978047e699d2056915e41748#Pg0,2022)

Bu modelde belirli sayıda Maxvell modeli seri bağlanmıştır. Ayrıca modele ek olarak kalıcı durumu modellemesi için yay elemanı (G_∞) da eklenmiştir (Şekil 3.16.). Genelleştirilmiş Maxvell modelinin zamana göre viskoelastik davranışı Prony serisi katsayıları ile şu şekilde ifade edilir (Yavuz Erkek, 2018):

$$G(t) = G_\infty \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i e^{\left(\frac{-t}{\tau_i^G}\right)} \right) \quad (3.24)$$

Bu denklemde:

G_∞ : kalıcı zaman modülü;

g_i, τ_i : Prony serisi katsayıları (malzeme katsayıları);

n : Terim sayısı;

t : zaman

3.5. Kullanılan Kauçuk Malzeme Testleri ve Kauçuk Takozlar

Bu çalışmada kullanılan ürünler ve malzeme testlerini yapmak için alınan test numuneleri 55 Shore A sertliğine sahip tabii kauçuk (NR) kullanılarak üretilmiştir. Malzeme modelini belirlemek için tek eksenli çekme testi, düzlem çekme testi ve gerilim gevşemesi testleri yapılmıştır. Çalışmada ürün olarak kauçuk takoz kullanılmıştır.

3.5.1. Tek Eksenli Çekme Testinde Kullanılan Kaşık Test Numunesi

Malzeme modelini belirlemek için yapılan tek eksenli çekme testi ve gerilim gevşemesi testleri Şekil 3.3.'te ölçüleri verilen kaşık test numunesi ile yapılmıştır. Kaşık test numunesi için ASTM D412 standartı referans alınmıştır. Kullanılan her bir numunenin kalınlığı $2,00 \pm 0,2$ mm'dir.

3.5.2. Düzlem Çekme Testinde Kullanılan Test Numunesi

Bu çalışmada 200x20 mm ölçülerinde $2,00 \pm 0,2$ mm kalınlığında test numunesi kullanılarak düzlem çekme testi yapılmıştır.

3.5.3. Kauçuk Takozlar

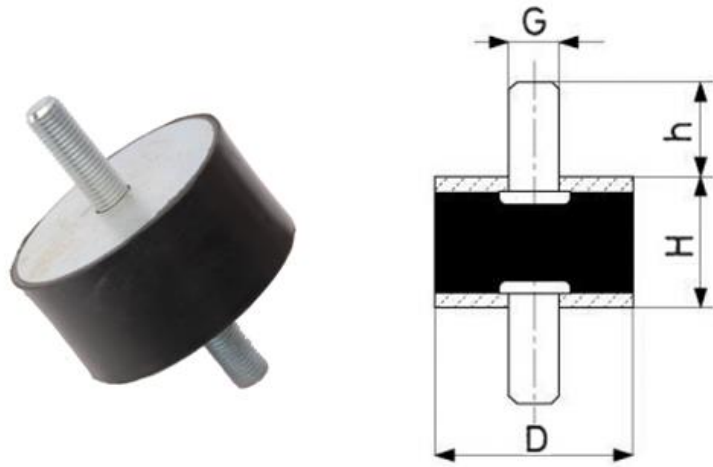
Bu çalışmada makine elemanlarında kullanılan kauçuk takozlar üzerinde analiz ve testler yapılmıştır (Şekil 3.17.). Kauçuk takozlar diğer bir adıyla titreşim takozları bağlı bulunduğu mekanizmalarda titreşim ve darbeleri sönmölemek için kullanılır. Ayrıca kullanıldığı yerlerde gürültüyü engeller, radyal ve eksenel kuvvetleri absorbe eder.



Şekil 3.17. Kauçuk takoz çeşitleri

(https://www.lassan.com.tr/wp-content/uploads/2021/06/titresim_takoz_003.jpg)

Bu çalışmada ölçüleri aşağıda verilen A tipi kauçuk takoz üzerinde çalışılmıştır (Şekil 3.18.). Kauçuk takozda kullanılan paslanmaz metal pul 37x8x2,5 mm ölçülerinde, paslanmaz cıvata ise M8x25 mm ölçülerindedir. Metal pul ve cıvata kaynak işlemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen malzemelerin üst yüzeyi kauçuk-metal proseslerinde kullanılan özel bir kimyasal ile boyanmıştır. Daha sonra üretilen iki adet yarı mamul metal ile kauçuk malzeme hidrolik preste kompresyon yöntemi ile $160\pm5^{\circ}$ ve 12 dakikada vulkanizasyon işlemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. A tipi kauçuk takoz
(<http://www.izkakaucuk.com/index.php/titre%C5%9Fim-takozu/dairesel-titre%C5%9Fim-takozu/a-tipi-titre%C5%9Fim-takozu-5-detayli-bilgi>)

Kauçuk takoz ölçüleri;

D=40 mm

H=40 mm

h=22,5±0,2 mm

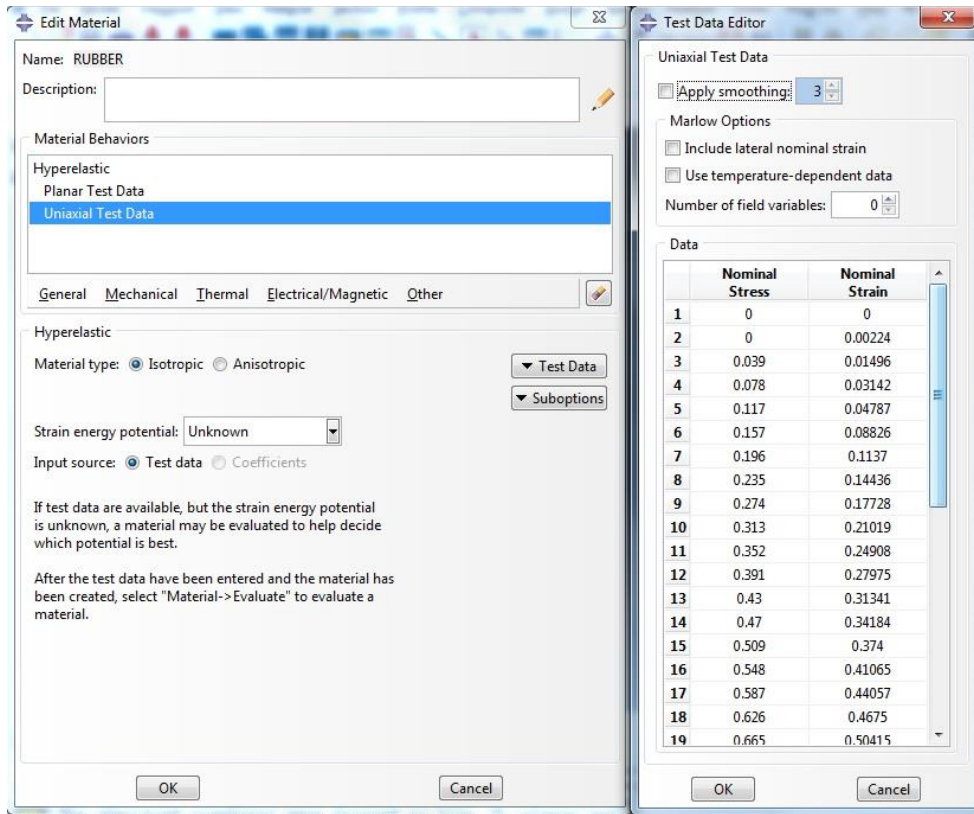
G=M8

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

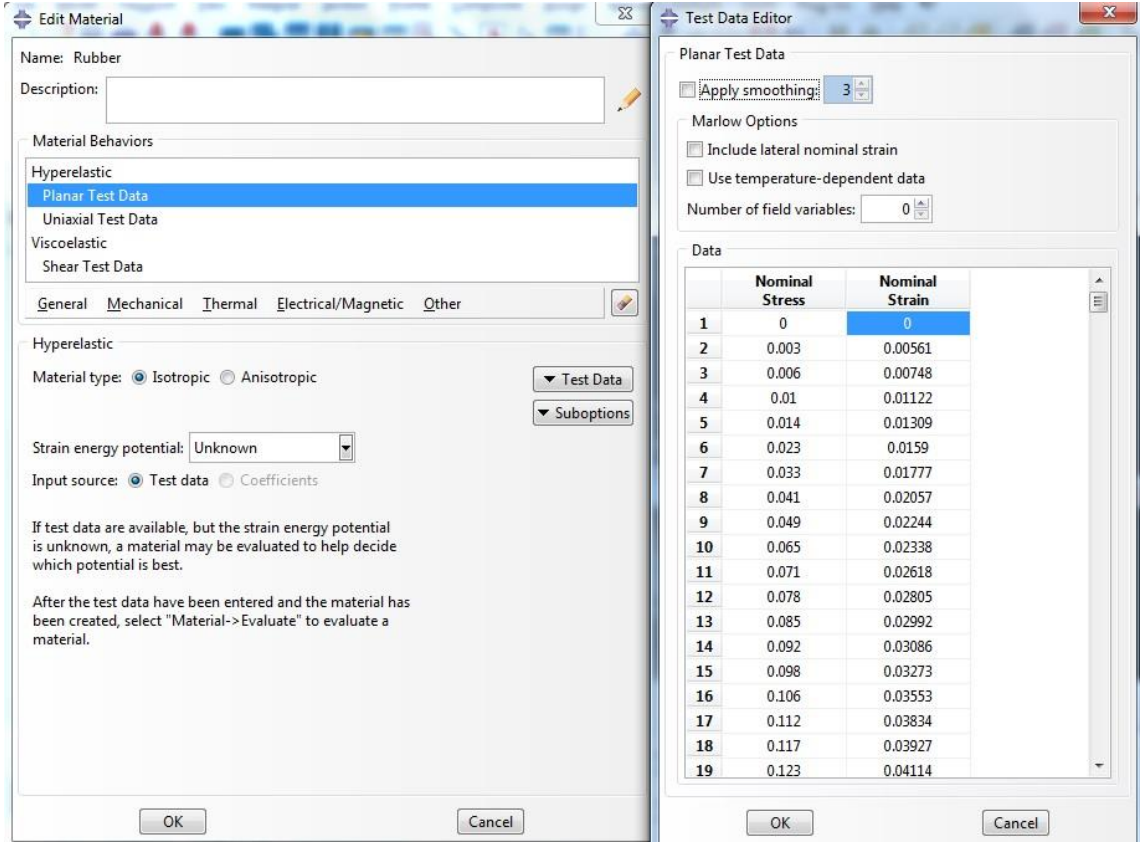
4.1. Hiperelastik Malzeme Modelinin Belirlenmesi

Hiperelastik malzemeler bir yük altında doğrusal davranış göstermediği için malzeme modelinin belirlenmesinde kauçuk numuneler üzerinde yapılan gerilme-gerinme test değerlerine ihtiyaç vardır. Çekme veya basma test verileri sonlu elmanlar paket programına girilerek hiperelastik malzeme modeli belirlenir.

Bu çalışmada hiperelastik malzeme modelini belirlemek için NR 55 Shore A sertliğine sahip kauçuk malzemeden numune alınarak tek eksenli çekme testi ve düzlem çekme testi yapılmıştır. Test sonucu elde edilen gerilme-gerinim değerleri Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi Abaqus sonlu elemanlar paket programına girilmiştir.

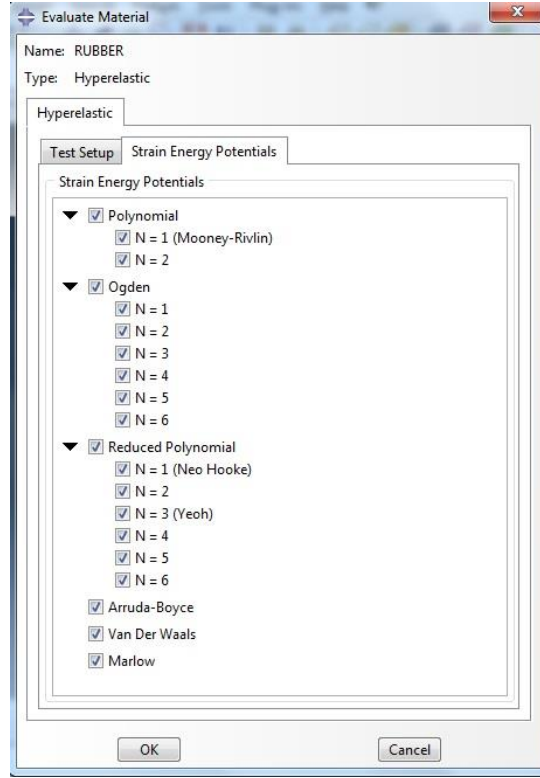


Şekil 4.1. Tek eksenli çekme testi verilerinin Abaqus programına girilmesi



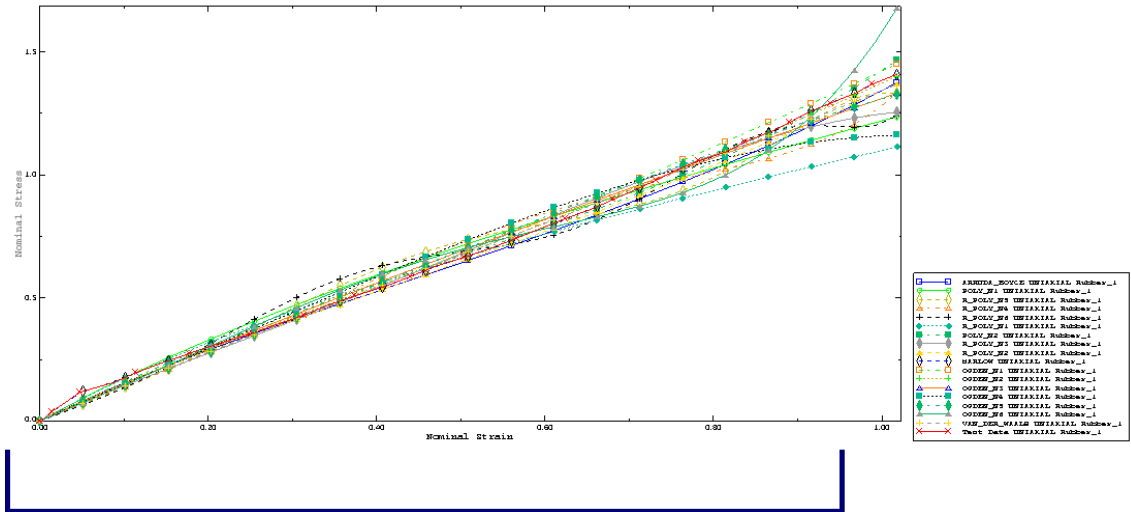
Şekil 4.2. Düzlem çekme testi verilerinin Abaqus programına girilmesi

Test verilerinden elde edilen gerilme-gerinim davranışları ile sonlu elemanlar programındaki hazır modellerden uyumlu olan modellerden biri seçilir ve şekil değiştirme enerji modeli elde edilir. Şekil 4.3.'te görüldüğü gibi test verileri Abaqus programına girildikten sonra tüm hiperelastik malzeme modelleri seçilerek analiz yapılır.

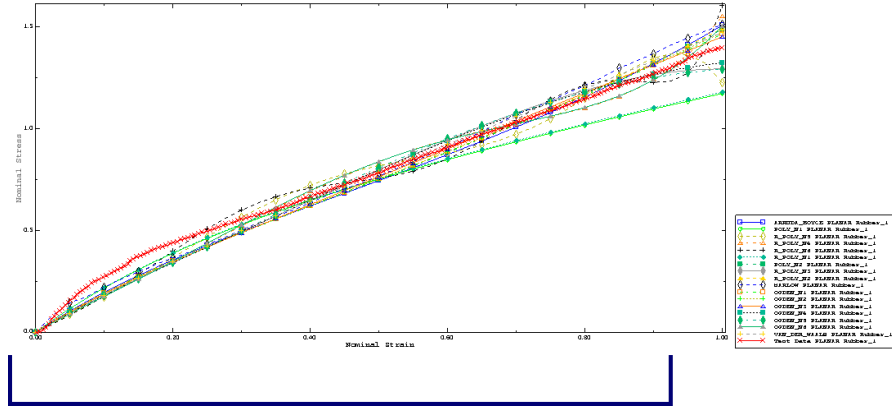


Şekil 4.3. Tüm hiperelastik malzeme modellerini seçilmesi

Analiz sonucunda Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.’te test eğrileri ile hazır modellerin eğrileri karşılaştırılarak uyumlu modeller arasında eğri uydurma yöntemiyle en uygun model seçilecektir.



Şekil 4.4. Tek eksenli çekme testi ve tüm modellerin test eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.5. Düzlem çekme test ve tüm modellerin test eğrilerinin karşılaştırılması

Hiperelastik malzeme modelini belirlerken Abaqus programı uyumlu modellere “stable” uygun olmayan modellere “unstable” uyarısı vermektedir. Bu çalışmada Abaqus programı tüm modeller içerisinde;

Ogden N=1,

Ogden N=2,

Ogden N=3,

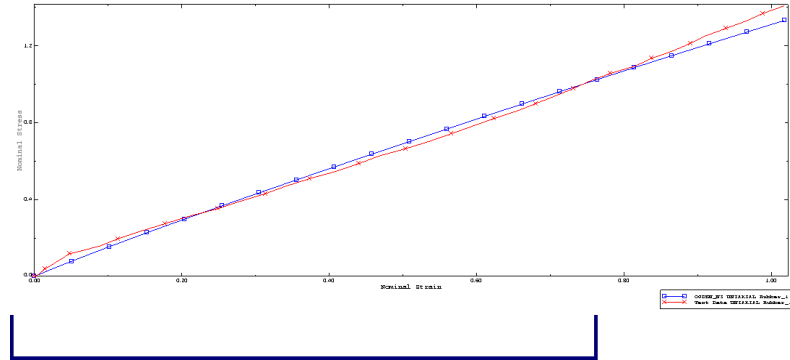
Reduced Polynomial N=1 (Neo Hooke),

Reduced Polynomial N=2,

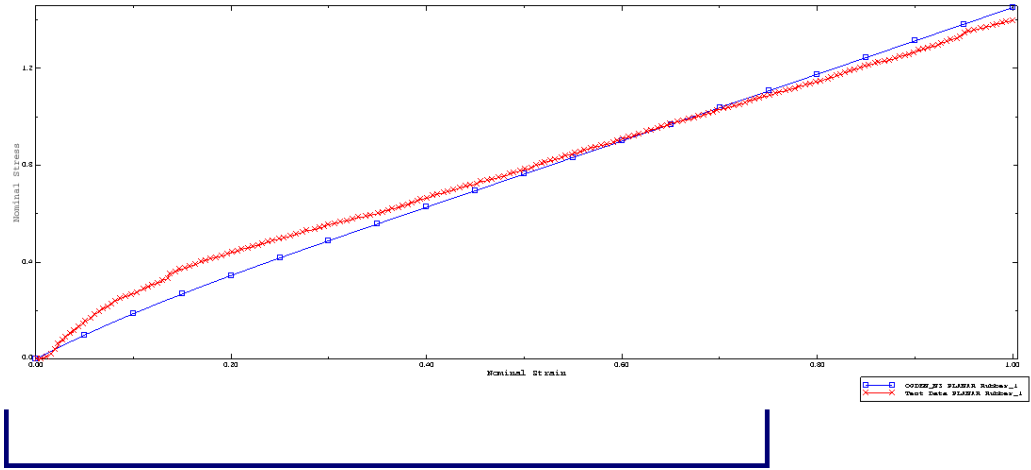
Reduced Polynomial N=4,

Reduced Polynomial N=6,

Arruda-Boyce modellerinin uyumlu (stable) olduğunu tespit etmiştir. Uyumlu modeller içerisinde Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.’de görüldüğü gibi test verilerine en yakın olan Ogden N=3 malzeme modeli seçilmiştir.



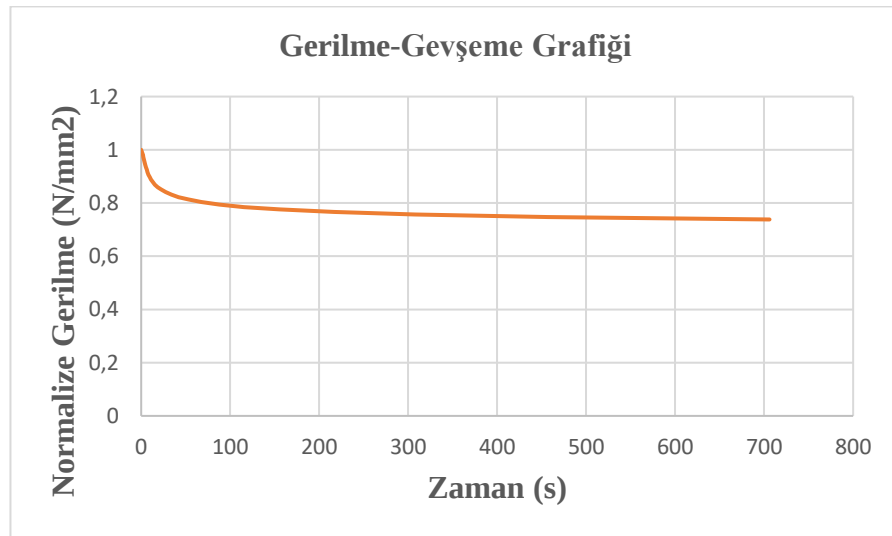
Şekil 4.6. Tek eksenli çekme test eğrisi ve hiperelastik malzeme modeli



Şekil 4.7. Düzlem çekme test eğrisi ve hiperelastik malzeme modeli

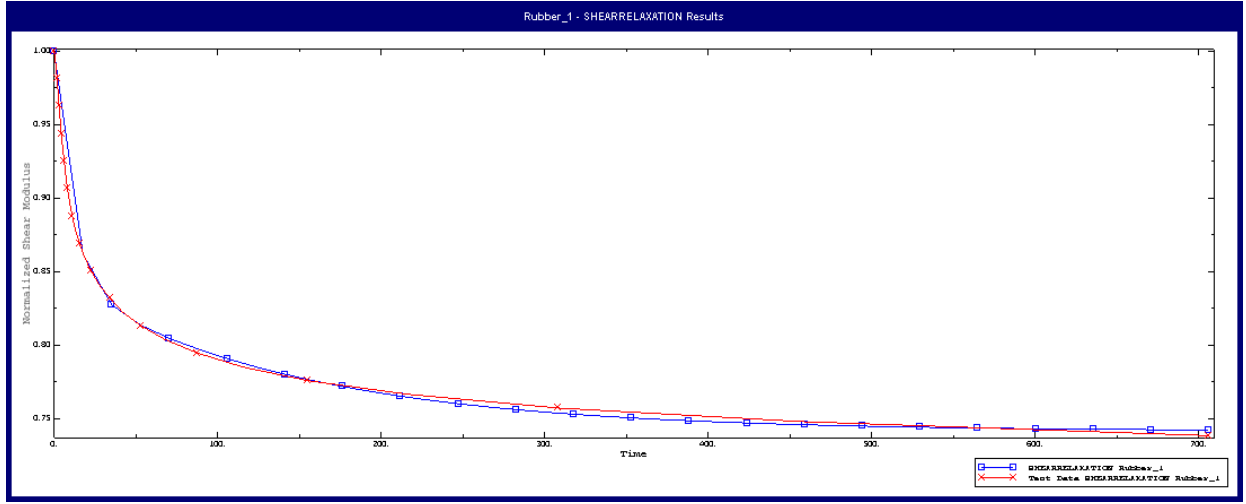
4.2. Viskoelastik Malzemenin Tanımlanması

Viskoelastik malzeme tanımlanırken kaşık test numunesi üzerinde yapılan gerilim gevşemesi-zaman test verileri kullanılmıştır. Bu çalışmada kaşık test numunesi 150 mm uzatılarak zamanla gerilmede meydana gelen gevşeme değeri ölçülmüştür. Maksimum gerilme değeri 3,877 MPa ölçülürken zamanla 2,862 MPa değerine düştüğü tespit edilmiştir. Test verilerinden elde edilen gerilme değerleri en büyük gerilme değerine bölünerek normalize edilmiştir (Şekil 4.8.).



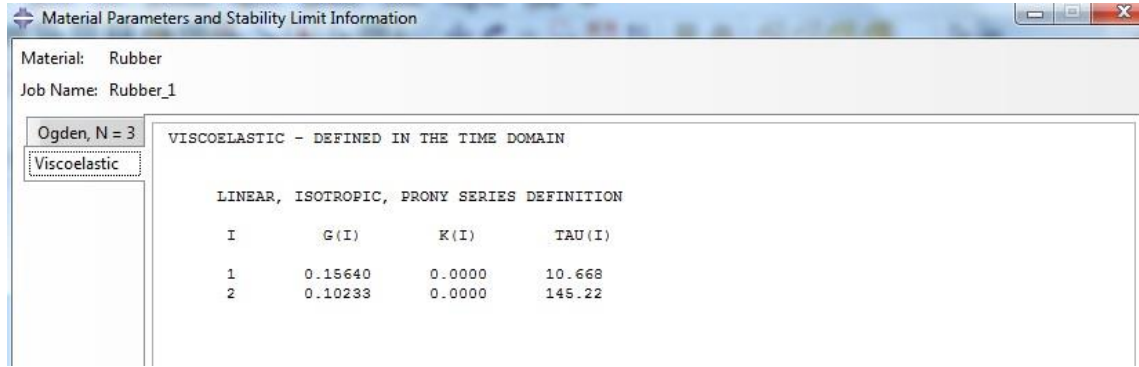
Şekil 4.8. Çekme testi normalize edilmiş gerilme gevşeme grafiği

Abaqus programına normalize edilmiş gerilme değerleri ve zaman değerleri girilerek uygun model belirlenmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. Gerilme gevşemesi test eğrisi ve elde edilen viskoelastik malzeme modeli

Gerilim gevşemesi-zaman değerleri ile viskoelastik model belirlendikten sonra Prony serisi katsayıları Abaqus programından elde edilmiştir (Şekil 4.10.).

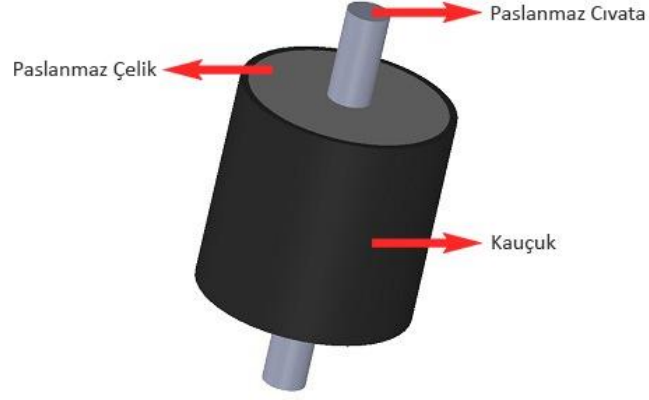


Şekil 4.10. Analiz sonucunda elde edilen Prony serisi katsayıları

4.3. Kauçuk Takozun Üç Boyutlu Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada 40 mm çapında ve 40 mm yüksekliğinde A tipi kauçuk takoz kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak üç boyutlu kauçuk takoz modeli Solidworks programında çizilmiş daha sonra Abaqus/CAE programına aktarılmıştır (Şekil 4.11).

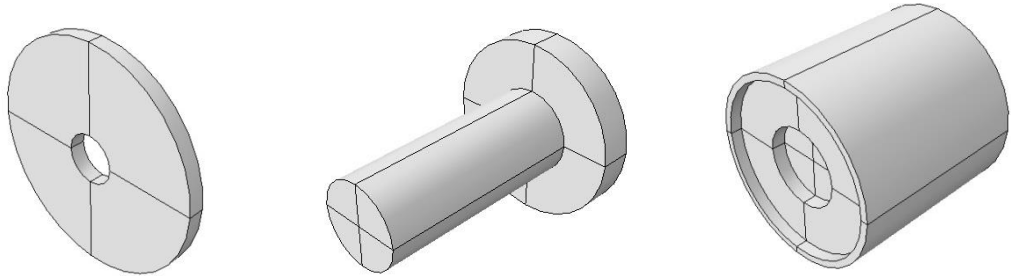
Kauçuk takoz metal pul, cıvata ve kauçuk olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 4.12.). Metal pul, cıvata ve kauçuk kısım ayrı ayrı çizilerek montaj işlemi ile birleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Kauçuk takozun üç boyutlu katı modeli

4.4. Kauçuk Takozun Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

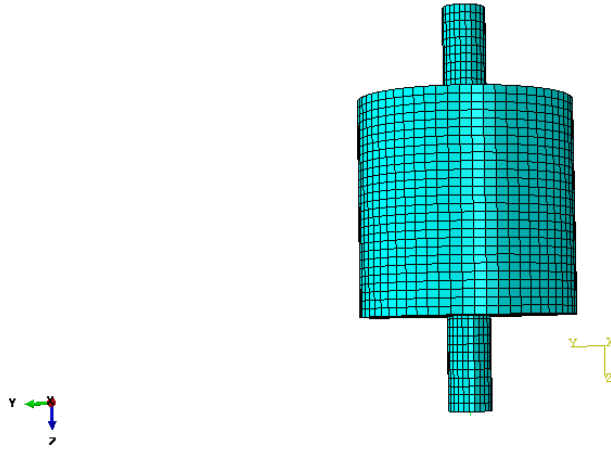
Sonlu elemanlar modeli oluştururken daha önce kauçuk üzerinde yapılan testler ile belirlenen Ogden N=3 hiperelastik malzeme modeli ve viskoelastik malzeme modeli ile elde edilen prony katsayıları Abaqus edit material kısmına girilmiştir. Kauçuk takozun metal pul ve cıvata özellikleri için Abaqus edit material kısmında elastik malzeme olarak seçilmiş ve 304 paslanmaz çeliğin elastisite modülü 193000 N/mm² ve poisson oranı 0,3 olarak girilmiştir.



Şekil 4.12. Kauçuk takoz elemanlarının üç boyutlu modeli

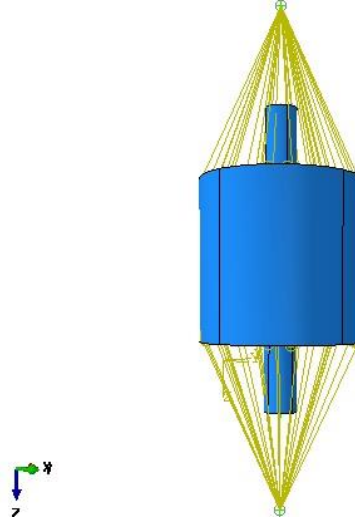
Kauçuk takoz modeli oluşturulurken deformable seçeneği kullanılmıştır. Analiz sırasında sıkıştırma işlemi uygulanırken metal kısımların kauçuk kısımla birlikte hareket etmesi için Abaqus programında Interaction>Create constraint-Tie adımları izlenerek metal yüzeyler ile kauçuk yüzeyin etkileşimi sağlanmıştır.

Kauçuk takozun sonlu elemanlar yapısında 27124 adet düğüm noktası, 22280 adet doğrusal hexahedral C3D8R tipi ve 2220 adet doğrusal wedge C3D6 tipi eleman kullanılmıştır. Her bir elemanın boyutu 1,5 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Kauçuk takozun sonlu elemanlar modeli

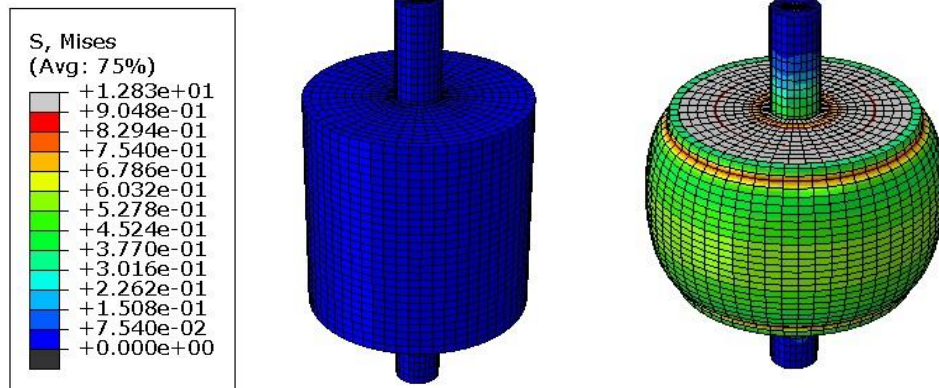
Sınır şartları belirlenmeden önce alt ve üst yüzeyde iki adet kontrol noktası oluşturulmuştur. Interaction>Create constraint-Coupling menüsünden kontrol noktaları ile alt ve üst yüzeyin etkileşimi sağlanmıştır. Alt yüzey ve kontrol noktası ankastre olarak tanımlanarak sabitlenmiştir. Üst yüzey ve kontrol noktasına z ekseninde 10 mm deplasman verilmiştir. (Şekil 4.14.)



Şekil 4.14. Kontrol noktaları ve sınır şartları

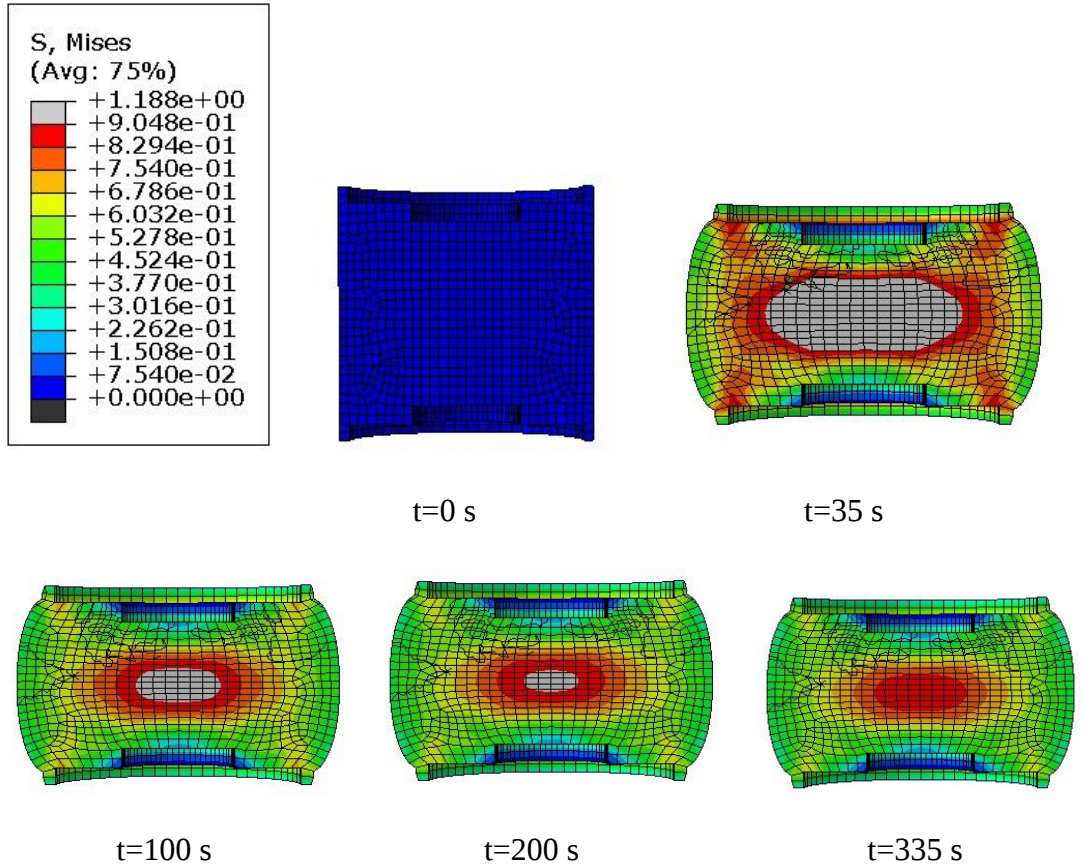
4.5. Kauçuk Takozun Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Zaman Alanında Gerilme Gevşeme Davranışının Analizi ve Test Sonuçları ile Korelasyonu

40 mm yüksekliğe sahip olan kauçuk takoz %25 oranında z ekseninde 10 mm sıkıştırılmıştır. Analiz sırasında 10 mm sıkıştırma işlemi için 35 saniye, sıkıştırma işleminden sonraki davranışını tespit etmek için 300 saniye süre tanımlanmıştır. Sıkışma sonucunda ilk anda kauçuk takozda maksimum gerilim 12,830 MPa iken 300 saniye sonra gerilimin 9,288 MPa olduğu tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi kauçuk takozda gerilmenin zamanla azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.16.).



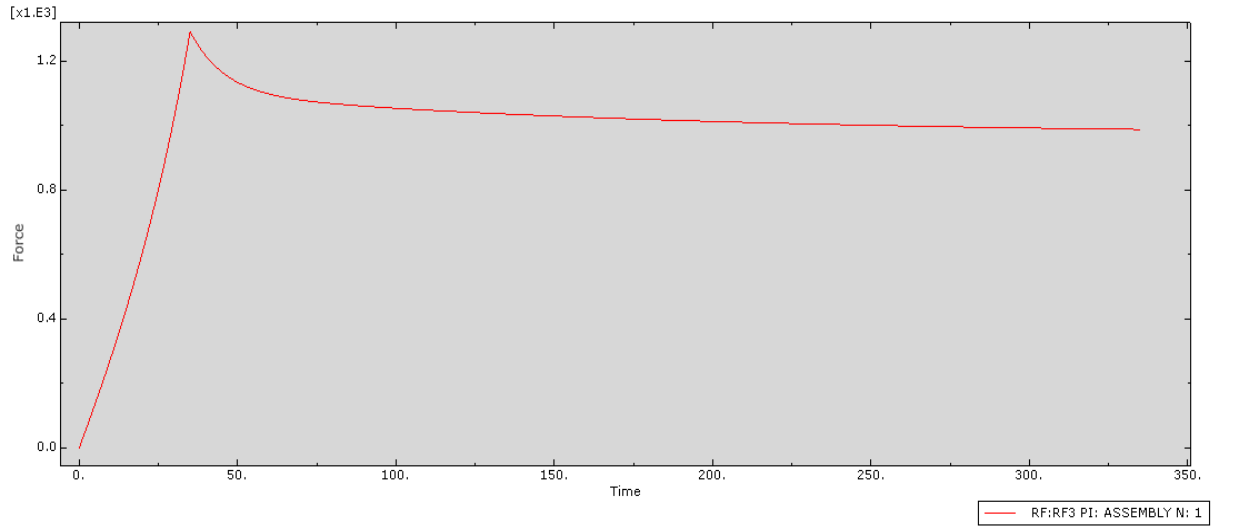
Şekil 4.15. Kauçuk takozun sıkıştırılmadan önceki ve sonraki görünümü

Şekil 4.15.'te görüldüğü üzere maksimum gerilme değerleri alt ve üst yüzeyde yani kauçuk takozun metal yüzeylerinde oluşmuştur. Ancak bu gerilme değerleri metal malzemelerin şekil değişimine etkisi olmadığı için dikkate alınmamıştır. Kauçuk takozun kauçuk kısmında sıkıştırılmaz yapısından dolayı gerilim değerinin iç kısmından başlayarak azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.16.'da kauçuk yüzeyin kesit görünümünde maksimum gerilmenin zamanla azaldığı görülmektedir. Kauçuk yüzeyde maksimum gerilme değeri 1,188 Mpa iken 300 saniye sonra 0,948 MPa düştüğü görülmektedir.



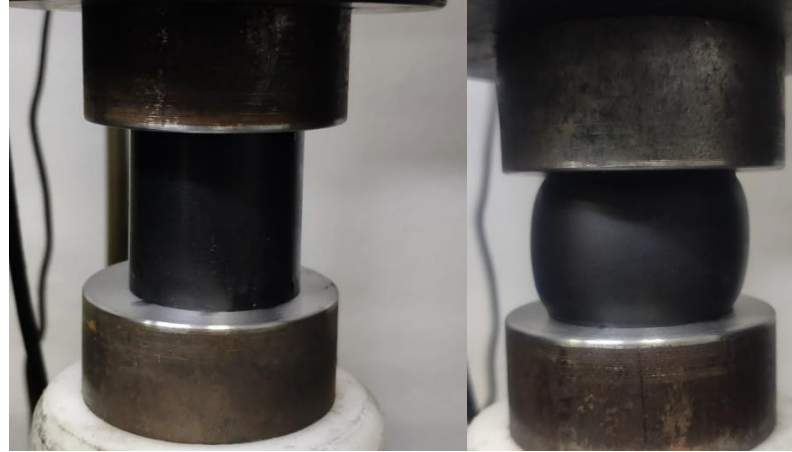
Şekil 4.16. Kauçuk yüzeyde oluşan gerilmenin zamanla azalması

Kauçuk takozun zaman alanında viskoelastik modellemesi yapılarak reaksiyon kuvvetinin zamanla azaldığı tespit edilmiştir. Analiz yapılarak 10 mm sıkıştırma sonucunda üst kontrol noktasında ölçülen kuvvet değeri 1291,85 N'dan 300 saniye sonra 988,051 N'a düştüğü görülmektedir (Şekil 4.17.).



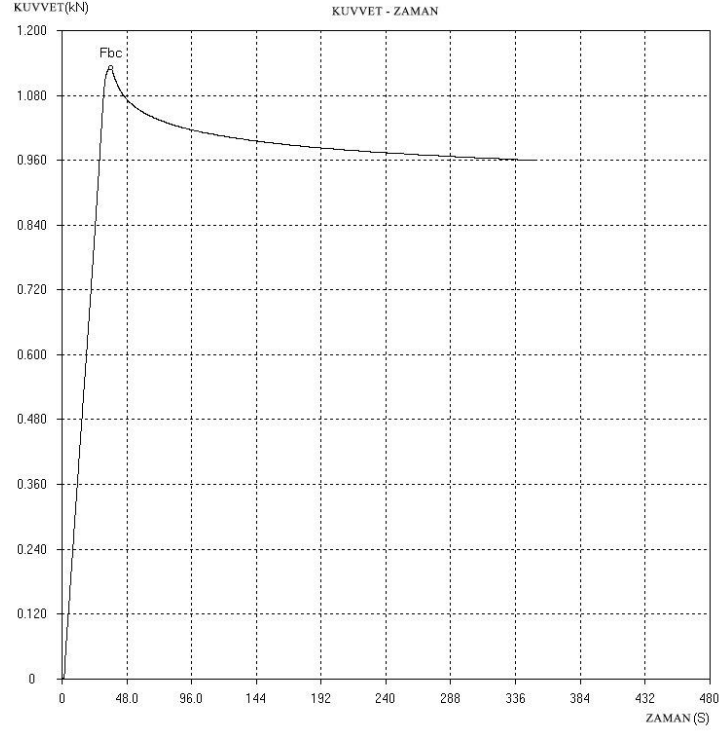
Şekil 4.17. Kauçuk takozun analiz sonucu elde edilen gerilim gevşeme grafiği

Analiz sonuçları ile karşılaştırmak için yapılan testlerde kauçuk takozu 20 mm/s hızla 10 mm deplasman verilmiştir (Şekil 4.18.). Deplasman süresi 35 saniye gevşeme davranışının incelenmesi için 300 saniye zaman değerleri çekme-basma testi cihazına tanımlanmıştır.



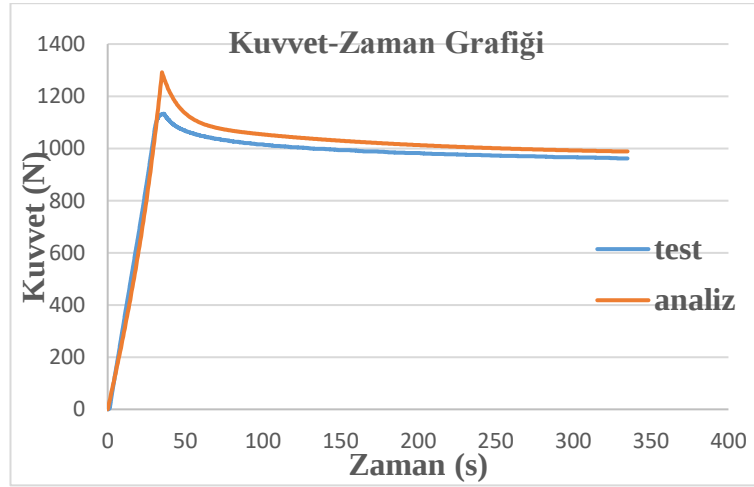
Şekil 4.18. Kauçuk takozun sıkıştırma öncesi ve sıkıştırılmış hali

Test sonucunda maksimum reaksiyon kuvvetinin 1133 N'dan 962 N'a düştüğü tespit edilmiştir (Şekil4.19.).



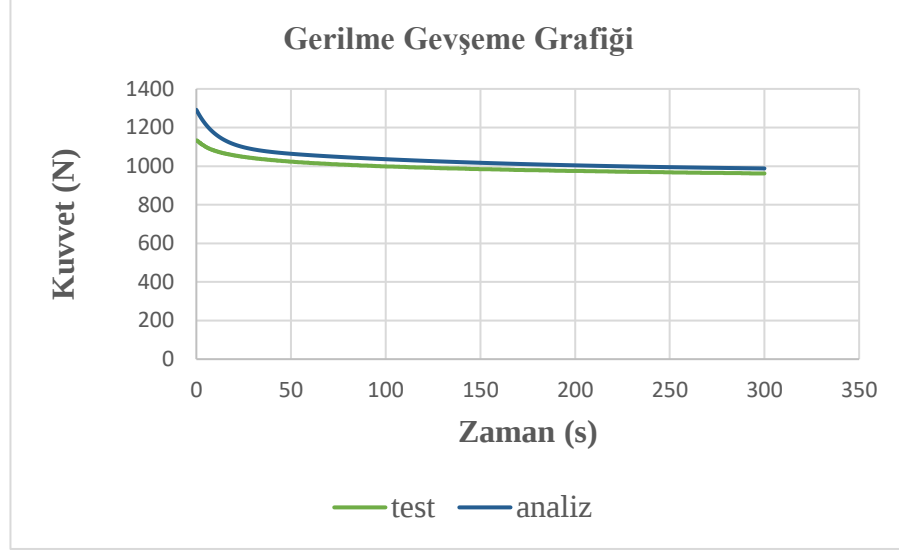
Şekil 4.19. Kauçuk takozun test sonucu elde edilen gerilim gevşeme grafiği

Abaqus programında analiz ile elde edilen (Şekil 4.17.) gerilim gevşeme grafiği ile test sonucunda elde edilen (Şekil 4.19.) gerilim gevşeme grafikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucu Şekil 4.20.'de görüldüğü üzere model analizi ve test eğrileri birbirine yakın çıkmıştır.



Şekil 4.20. Kauçuk takozun analiz ve test eğrileri

Kauçuk takozun sonlu elemanlar analizi ile test sonucu elde edilen gerilim-gevşeme değerlerinin korelasyonu oranı %95'tir (Şekil 4.21.). Gevşeme grafiklerinin birbirine yakın çıkması viskoelastik modelin doğru çalıştığını göstermektedir.



Şekil 4.21. Kauçuk takozun gerilme-gevşeme değerlerinin analiz ve test eğrileri

Kauçuk takoz üzerindeki maksimum reaksiyon kuvveti analiz çalışmasında 1291,85 N iken test çalışmasında 1131 N olarak ölçülmüştür. Analiz çalışmasında reaksiyon kuvvetinin maksimum değere ulaştıktan sonra başlangıçta test değerlerine göre daha hızlı gevşeme meydana gelmiştir. Daha sonraki sürelerde test ve analiz değerleri birbirine yakın olarak gevşeme değerleri göstermiştir. Analiz çalışmasında kuvvet 988,051 N'a düşerek %23'lük gevşeme, test çalışmasında ise 962 N'a düşerek %15'lik gevşeme değerleri ölçülmüştür. Analiz sırasında sürtünme katsayısı 0,01 olarak tanımlanmıştır fakat test değerlerinde sürtünme katsayısı farklı olabileceği için sonuçlar arasındaki fark oluşabilmektedir.

Kauçuk malzemelerin yapısındaki çapraz bağlar gerilmenin sıfıra inmesini engeller. Gevşeme değerlerinin önceden tespit edilmesi ile kauçuk malzemelerin formüllerinde değişiklikler yapılarak kullanım alanına uygun şekilde üretimi sağlanabilir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada kauçuk takozların sonlu elemanlar yöntemi ile hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi yapılmış ve yine sonlu elemanlar yöntemi ile zaman alanında davranışının modellenmesi yapılmıştır. Hiperelastik ve viskoelastik malzeme modelleri kauçuk malzeme testleri sonucu belirlenmiştir. Kauçuk malzeme deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim değerleri kullanılarak elde edilen Ogden $N=3$ hiperelastik malzeme modeli ve viskoelastik davranışı belirlemek için elde edilen Prony serisi katsayıları, kauçuk takoz üzerinde yapılan analiz ve testler sonucunda başarılı olmuştur.

10mm sıkıştırılan kauçuk takozun iç yapısında meydana gelen gerilme değerleri incelenmiştir. Kauçuk takozun zaman alanında viskoelastik analizi yapılarak gerilme gevşeme grafiği elde edilmiştir. Analiz sonuçları ile karşılaştırma yapmak için aynı ölçülerde üretilen kauçuk takoz 10mm sıkıştırılarak gerilim gevşemesi değerleri incelenmiştir. Analiz sonucunda kauçuk takoz üzerinde oluşan maksimum reaksiyon kuvvetinin 1291,85 N'dan 988,051 N'a düştüğü tespit edilmiştir. Kauçuk takoz üzerinde yapılan test sonucu ise maksimum reaksiyon kuvvetinin 1133 N'dan 962 N'a düştüğü tespit edilmiştir. Analiz sonucu elde edilen gerilim gevşemesi grafiği ile test sonucu elde edilen gerilim gevşemesi grafikleri karşılaştırıldıklarında eğrilerin birbiri ile uyumlu olduğu ve korelasyon değerinin %95 oranında olduğu tespit edilmiştir.

Kauçuk takoza uygulanan kuvvet sonucu oluşan gerilmenin zaman içinde azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma kauçuk takozun ömrünü ve özelliklerini etkiler ve bu durumun dikkate alınarak tasarım yapılması beklenir. Analiz sonucunda sıkıştırılan kauçuk takozun hangi bölgelerinde yüksek kuvvetlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu tespit ile yeni bir kauçuk parça tasarımı yapılmak istenirse optimizasyon yapmak mümkün olabilir.

Yapılan bu çalışma dinamik davranışının önceden tespit edilmesi zor olan kauçuk malzemelerin deneme yanılma yöntemiyle yapılan üretim yerine tasarım aşamasında istenilen değerlere göre tasarımını kolaylaştırabilir. Ayrıca maliyet ve zaman kaybını azaltacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2022. http://help.solidworks.com/2018/turkish/SolidWorks/cworks/c_Viscoelastic_Model.htm?id=cafa636b978047e699d2056915e41748#Pg0 (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Anonim, 2022. <https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2012/11/kaucuk-nedir-kaucuk-tarihcesi.html> (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Anonim, 2022. https://www.lassan.com.tr/wp-content/uploads/2021/06/titresim_takoz_003.jpg (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Anonim, 2022. <http://www.izkakaucuk.com/index.php/titre%C5%9Fim-takozu/dairesel-titre%C5%9Fim-takozu/a-tipi-titre%C5%9Fim-takozu-5-detayli-bilgi> (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Anonim, 2022. <https://www.vibracoustic.com/en/vibracoustic-svr-l-natural-rubber/> (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Anonim, 2022. https://www.titizkaucuk.com/sbr-dokme-kaucuk-zemin-kaplama#sbr_dokme_kaucuk-5 (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- ASTM D412. *American Society for Testing and Materials, ASTM D 412-06'a Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension*, USA, 2008.
- Ay, İ. *Plastik Malzemeler, Plastik Malzemeler Ders Notu*. Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, 47-56.
<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/pm/plastikte.mek2.pdf>
- Dal, Ş. F. 2015. *Kauçuk, Türleri, Özellikleri, Üretim Potansiyelleri, Kullanım Alanları, Atık Kauçuk Geri Kazanımı ve İşlenme Sistemlerinin Araştırması*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Erkek, M. Y., Kaya, N., & Güven, C. (2015). Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 20(1), 65. <https://doi.org/10.17482/uujfe.58533>
- 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*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Çukurova Üniversitesi.
- Erkek, S. 2016. *Kauçuk kapı stoperinin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

- Güven, C.2014. *Kauçuk burcun hiperelastik modellenmesi ve şekil optimizasyonu*. [Yüksek lisans tezi], Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Kınıkoğlu, N.G. 2006. *Polimer Malzemeler: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Editör: Özkal, S., Literatür Yayıncılık, İstanbul, s.370-371.
- Kim, B., Lee, S. B., Lee, J., Cho, S., Park, H., Yeom, S., & Park, S. H. (2012). A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for Chloroprene rubber. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 759–764. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0099-y>
- 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 Lastik Karışımı Oluşturma*. Ankara. <http://meslek.eba.gov.tr/moduller/Lastik%20Karisimi%20Olusturma.pdf>
- MEB, 2011. *Kimya Teknolojisi Sentetik Kauçuk Özellikleri ve Testleri*. Ankara. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Sentetik%20Kau%C3%A7uk%20C3%96zellikleri%20Ve%20Testleri.pdf (Erişim tarihi: 03.01.2022).
- Miller, K. 2000. *Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis*. Axel Products Inc., Ann Arbor, Michigan, USA.
- Öztürk, E. 2008. *Farklı Kauçuk Karışımlarının Vulkanizasyonuna Hızlandırıcıların Etkisi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Saraç, İ. 2019. *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Bir Dinamik Sızdırmazlık Elemanının Simülasyonu ve Deneysel Doğrulaması*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Savran, H. 2001. *Elastomer Teknolojisi-1*. Acar Matbaacılık, İstanbul, 136 s.
- Seçer, M. 2010. *Viskoelastik Malzemeler İçin Geliştirilmiş Bir Gerilme – Şekil Değiştirme -Zaman İlişkisinin Cam Elyaf Takviyeli Plastik Çubuk Sistemlere Uygulanması*. [Doktora tezi], Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Shahzad, M., Kamran, A., Siddiqui, M. Z., & Farhan, M. (2015). Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. *Materials Research*, 18(5), 918–924. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.320414>
- Song, H.-S., & Kim, Y.-Y. (2020). *Determination of the Properties of the Rubber Mounted Under the Agricultural Tractor Rollover Protective Structure Cabin*

Using a Hyperelastic Tensile Test and Finite Element Analysis.
<https://doi.org/10.1007/s42853-020-00060-z/Published>

- Soyel, D. 2008. *Sonlu Elemanlar Metodu ile NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modellerinin Belirlenmesi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Soyubol, B. 2006. *Elastomerlerin Statik ve Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi*, [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Uguz, A., & Penekli, U. (2020). Determination of mechanical behavior of metal-rubber compound pulley part, finite element analysis and verification with tests. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(4), 2113–2123. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.679206>
- Vahapoğlu, V. (2007). Kauçuk Türü Malzemeler I. Doğal Kauçuk. In *Journal of Science* (Vol. 3, Issue 1).
- Vahapoglu, V. (2013). Experiment Which is Done in Rubber Mechanics. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 19(1), 33–60. <https://doi.org/10.5505/pajes.2013.10820>
- Yavuz Erkek, M. 2018. *Kauçuk Ürünlerin Gerilme -Gevşeme Davranışının Modellenmesi, Analizi ve Optimizasyonu* [Doktora tezi], Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Yüce, A. 2018. *Çamaşır Makinesi Körüğünün Hiperelastik ve Viskoelastik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Dinamik Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi*. [Yayınlanmamış yüksek lisans tezi], İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhao, Z., Mu, X., & Du, F. (2019). Modeling and Verification of a New Hyperelastic Model for Rubber-Like Materials. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2832059>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fırat KORKMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Adıyaman-1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Akhisar Anadolu Lisesi 2012
Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği 2017

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : MAKELPORT MAK. LTD. ŞTİ.: EYLÜL 2017-Halen

İletişim (e-posta) : f.korkmaz111@gmail.com

Yayınları :