

**METAL-KAUÇUK BİLEŞENLİ PARÇALARIN TORSİYONEL
YÜK ALTINDA MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Ufuk PENEKLİ



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL-KAUÇUK BİLEŞENLİ PARÇALARIN TORSİYONEL YÜK ALTINDA
MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

UFUK PENEKLİ
0000-0002-5574-0247

Prof. Dr. Agâh UĞUZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ufuk PENEKLİ tarafından hazırlanan “Metal-Kauçuk Bileşenli Parçaların Torsiyonel Yük Altında Mekanik Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Agâh UĞUZ

Başkan: Prof. Dr. Agâh UĞUZ
0000-0002-9244-3671
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Cemal ÇAKIR
0000-0003-0816-4029
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Aslı HOCKENBERGER
0000-0003-3659-4771
Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Prof. Dr. Ali ORAL
0000-0002-9144-3821
Balıkesir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
0000-0003-3350-1509
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN

Enstitü Müdürü

.../ ... / 2021

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.

...../ ... / 2021

Ufuk PENEKLİ

ÖZET

Doktora Tezi

METAL-KAUÇUK BİLEŞENLİ PARÇALARIN TORSİYONEL YÜK ALTINDA MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ufuk PENEKLİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Agâh UĞUZ

Günümüz endüstrisinin önemli malzemelerinden olan kauçuklar farklı özelliklerinden dolayı çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu çalışmada, triger kayışı vasıtasıyla motorda hareket aktarımını sağlayan kasnak parçasının mekanik davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş, deneylerle doğrulanmış ve en iyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Kauçuk malzemelerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizinde kullanılan hiperelastik malzeme modellerinin oluşturulabilmesi için tek eksenli çekme ve kayma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen kuvvet-uzama eğrileri kullanılarak 3 parametrelili Mooney-Rivlin malzeme katsayıları hesaplanmıştır ve sonrasında kasnak geometrisi modellenerek farklı burulma açıları altındaki yer değiştirmeler, gerilmeler ve burulmadan kaynaklanan momentler incelenmiştir. Yapılan kasnak analizlerinin doğruluğunun teyit edilebilmesi için kasnak burulma test cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Aynı burulma açıları altında kasnak numuneleri test edilerek burulma momenti ve açı değerleri ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonunda, kasnak malzemesinin numerik olarak mekanik davranışının ifade edilebildiği görülmüştür. Kullanılan malzeme modeli ve analiz yöntemiyle elde edilen sonuçların deneylerle doğrulanmasından sonra kasnak geometrisi kesiti üzerinde en iyileme çalışması yapılarak aynı yükleme koşulları altında kauçuk malzeme üzerindeki gerilme mertebeleri %28 oranında düşürülmüştür. Böylelikle bu hesaplama yönteminin kullanımıyla kauçuk içerikli ürünlerin geliştirilebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar analizi, kauçuk, Mooney-Rivlin, hiperelastik malzeme, test

2021, xi+108 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF METAL-RUBBER COMPONENTS UNDER TORSIONAL LOADING

Ufuk PENEKLİ

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

Supervisor: Prof. Dr. Agâh UĞUZ

Rubber is one of the most important materials of modern industry and have a wide range of usage owing to a number of superior properties. In this study, the mechanical behavior of the metal-rubber combination pulley part transferring motion in the engine through the timing belt was examined by the finite element method, confirmed experimentally, and optimized. Uniaxial tension and pure shear tests were carried out physically to develop a hyperelastic material model. 3 parameter Mooney-Rivlin hyperelastic material constants were calculated by using force-elongation values obtained from uniaxial tension and, pure shear tests. Afterwards, pulley geometry was modelled, and displacements, stresses, reaction moments were examined under various torsional loadings. To confirm the accuracy of the pulley analysis, a servomotor driven pulley torsion testing machine was designed and manufactured. Then, torque and angle values were measured by testing the pulley parts at the same torsional angles. By this study, it was proven that mechanical behavior of pulley can be expressed numerically. After validation of the material model and the results obtained using analysis method, the pulley geometry was further improved the stress levels on the rubber material were reduced 28% under the same loading conditions by using optimization tools. Thus, it has been revealed that rubber containing products can be developed using this calculation method.

Keywords: Finite element analysis, rubber, Mooney-Rivlin, hyperelastic material, testing

2021, xi+108 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora alıőmam boyunca vaktini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr. Agâh UğUZ'a, tezim süresince beni motive eden ve destekleyen iş arkadaşlarım Hakan BALABAN'a, Elif FERİK'e teőekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca sevgili eőim Pınar Penekli'ye ve doktora eğitimime baőladıęımda henüz aramızda olmayan, ama Őuan ailemizde büyük yerleri olan kızım Irmak Penekli, oğlum Kıvanç Penekli'ye sevgilerimi sunuyorum.

Ufuk PENEKLİ

.../ ... / 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Kauçuk Malzemelerin Test Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar.....	15
2.1.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi (Uniaxial Tension Test).....	16
2.1.2. İki Eksenli Çekme Deneyi (Biaxial Tension Test).....	18
2.1.3. Şişirme Deneyi (Bulge Test).....	20
2.1.4. Safi Kayma Deneyi (Pure Shear Test).....	23
2.2. Hiperelastik Malzeme Modelleri.....	24
2.3. Mullins Etkisi.....	28
2.4. Hiperelastik Malzemelerde Sonlu Elemanlar Analizleri.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	42
3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi ve Deney Düzeneği.....	42
3.2. Safi Kayma Deneyi ve Deney Düzeneği.....	44
3.3. Kasnak Burulma Deney Düzeneği.....	45
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	57
4.1. Giriş.....	57
4.2. Tek Eksenli Çekme Deneyi, Safi Kayma Deneyi Sonuçları ve Kauçuk İçin Hiperelastik Malzeme Modeli Oluşturulması.....	58
4.3. Hiperelastik Malzeme Katsayılarının Doğrulanması.....	64
4.3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyinin Doğrulanması	64
4.3.2. Safi Kayma Deneyinin Doğrulanması	66
4.4. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Burulma Analizleri	69
4.4.1. Kasnak Parçası Sonlu Elemanlar Modeli	70
4.4.2. Kasnak Burulma Analizi Sınır Şartları.....	72
4.4.3. Kasnak Burulma Analiz Sonuçları.....	73
4.5. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Burulma Deneyi Sonuçları	85
4.6. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Tasarım İyileştirme Çalışmaları	91
5. SONUÇ.....	100
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
σ_a	Akma gerilmesi, <i>MPa</i>
σ_1	Akma gerilmesi, <i>MPa</i>
σ_2	Akma gerilmesi, <i>MPa</i>
<i>A</i>	Alan, <i>mm</i> ²
λ	Asal uzama oranı
λ_1	Asal uzama oranı
λ_2	Asal uzama oranı
λ_3	Asal uzama oranı
<i>E</i>	Elastisite modülü, <i>N/m</i> ²
ϵ	Gerinim
ϵ_1	Gerinim
ϵ_2	Gerinim
<i>I</i>	Gerinim değişmezi
<i>I</i> ₁	Gerinim değişmezi
<i>I</i> ₂	Gerinim değişmezi
<i>I</i> ₃	Gerinim değişmezi
<i>W</i>	Gerinim enerjisi,
τ	Kayma gerilmesi, <i>MPa</i>
<i>G</i>	Kayma modülü, <i>N/mm</i> ²
<i>R</i> ₁	Kesit değişkeni, <i>mm</i>
<i>R</i> ₂	Kesit değişkeni, <i>mm</i>
<i>D</i> ₁	Kesit değişkeni, <i>mm</i>
<i>F</i>	Kuvvet, <i>N</i>
σ^{eng}	Mühendislik akma gerilmesi, <i>MPa</i>
ϵ^{eng}	Mühendislik gerinimi
°C	Santigrat derece
%	Yüzde

Kısaltmalar Açıklama

ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Butadiene Rubber
CR	Chloroprene Rubber
dev/dk	Devir/Dakika
EPDM	Ethylene-Propylene-Diene Rubber
Hz	Hertz
IIR	Isobutylene-Isoprene Rubber
IR	Isoprene Rubber
kW	Kilowatt

MPa	Megapascal
mm	Milimetre
NR	Natural Rubber
N	Newton
Nm	Newton Metre
NBR	Nitrile-Butadiene Rubber
SBR	Styrene-Butadiene Rubber

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Doğal Kauçuk Molekül Yapısı (poliizopren, NR).....	6
Şekil 2.2. Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (BR).....	7
Şekil 2.3. Stiren Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (SBR)	7
Şekil 2.4. İzobütillen İzopren Kauçuk Molekül Yapısı (IIR)	7
Şekil 2.5. Nitril Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (NBR)	8
Şekil 2.6. Etilen Propilen Dien Kauçuk Molekül Yapısı (EPDM)	8
Şekil 2.7. Kloropren Kauçuk Molekül Yapısı (CR).....	8
Şekil 2.8. Kuvvetli Kükürt Çapraz Bağları Oluşmuş Kauçuk Moleküler Yapısı.....	11
Şekil 2.9. Temsili Kauçuk Mikser Makinası.....	12
Şekil 2.10. Ekstrüzyonla Şekil Verme	13
Şekil 2.11. Kalenderleme ile Şekil Verme.....	13
Şekil 2.12. Kaplama ile Şekil Verme.....	14
Şekil 2.13. Tipik Kauçuk Gerilim-Uzama Grafiği.....	15
Şekil 2.14. Tek Eksenli Çekme Deneyi Cihazı.....	17
Şekil 2.15. ISO37:2011 Standardına Göre Numune ve Numune Kesme Kalıbı Ölçüleri	17
Şekil 2.16. ASTM D412 Standardına Göre Numune Kesme Kalıbı Ölçüleri.....	18
Şekil 2.17. Venkatesh ve Murthy (2012)'nin İki Eksenli Çekme Deneyi ve Analizi ...	19
Şekil 2.18. Siebert ve Arkadaşlarının (2013) İki Eksenli Çekme Deneyi.....	19
Şekil 2.19. Axel Products Inc.'in Yaptığı İki Eksenli Çekme Deneyi.....	20
Şekil 2.20. Şişirme Deneyi Şematik Gösterimi (Bulge Test).....	20
Şekil 2.21. Ön Hazırlığı Yapılmış Numune ve Şişirilmiş Numune.....	21
Şekil 2.22. Optik Düzenek.....	21
Şekil 2.23. Analitik Hesaplama Kullanan Bölge.....	22
Şekil 2.24. ASTM D945-92 Standardında Belirtilen Kayma Deneyi Numunesi Boyutları	23
Şekil 2.25. Safi Kayma Deneyindeki Numunenin Başlangıç ve Yük Altındaki Son Hali.....	24
Şekil 2.26. Yüklemelelere Bağlı Gerinim Sabiti Hesabı.....	25
Şekil 2.27. Karbon Siyahı Dolgulu Kauçuğun 5 Çevrimlik Gerilim-Gerinim Eğrileri.....	29
Şekil 2.28. Karbon Siyahı Dolgulu Kauçuğun 5 Çevrimlik Gerilim-Gerinim Eğrileri	30
Şekil 2.29. İki eksenli çekme deneyi için farklı malzeme modelleri	30
Şekil 2.30. İki eksenli çekme deneyi ile Yeoh modelinin kıyaslanması.....	31
Şekil 2.31. 2 Boyutlu Eksenel Simetrik Modellemeyle Test Sonuçlarının Kıyaslanması	32
Şekil 2.32. 3 Boyutlu Modellemeyle Test Sonuçlarının Kıyaslanması.....	32
Şekil 2.33. Ön gerilmeli ve Ön gerilmemiş olarak radyal yük altındaki burç kuvvet-deplasman eğrileri kıyaslaması.....	33
Şekil 2.34. 3 Boyutlu tarama ve elde edilen nokta bulutu.....	33
Şekil 2.35. Elde Edilen Final Geometri ve Analizde Hesaplanan Kritik Bölge.....	34
Şekil 2.36. Tek eksenli ve düzlem çekme test sonuçları ile Ogden Malzeme Modeli. 34	34
Şekil 2.37. 16mm yüksekliğindeki stoperin 4mm sıkıştırılması sonuçları.....	35
Şekil 2.38. Tek eksenli ve düzlem çekme test sonuçları ile Ogden Malzeme Modeli. 35	35

Şekil 2.39. Radyal yükleme sonucu parça üzerindeki gerilme dağılımları.....	36
Şekil 2.40. Elde edilen rijitlik eğrileri.....	36
Şekil 2.41. Malzeme Testleri Sonuçları	37
Şekil 2.42. Deplasmana Bağlı Bölgesel Gerinim Değişimi.....	37
Şekil 2.43. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları.....	38
Şekil 2.44. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları	38
Şekil 2.45. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları.....	39
Şekil 2.46. Mevcut Burcun Sonlu Elemanlar Yapısı ve Gerinim Dağılımları.....	39
Şekil 2.47. Yapılan Optimizasyon Çalışmaları ve Parçalar Üzerindeki Gerinim Değerleri	40
Şekil 2.48. Motor Kasnak Parçası.....	41
Şekil 3.1. Çekme Deneyi Numuneleri.....	42
Şekil 3.2. Çekme Deneyi Öncesi ve Sonrası Numune Uzaması.....	43
Şekil 3.3. Çekme Deneyi Sonrası Kopan Numune Örneği.....	43
Şekil 3.4. Safi Kayma Deneyi Numune Örneği.....	44
Şekil 3.5. Safi Kayma Deney Düzenegi.....	45
Şekil 3.6. Burulma Hareketini Sağlayan Servomotor	46
Şekil 3.7. Kasnak Burulma Deney Cihazı Tasarımı.....	47
Şekil 3.8. Deney Yapılan Bölgenin Detay Görünümü.....	47
Şekil 3.9. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-1.....	48
Şekil 3.10. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-2.....	48
Şekil 3.11. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-3.....	49
Şekil 3.12. Kasnak Burulma Deney Cihazı Analizleri için Sınır Şartları.....	49
Şekil 3.13. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı Üzerindeki Eş Değer Gerilme Dağılımları.....	50
Şekil 3.14. Kasnak Parçası Sabitleme Pimleri Eş Değer Gerilme Dağılımları.....	51
Şekil 3.15. Bağlantı Parçaları Üzerindeki Eş Değer Gerilme Dağılımları.....	51
Şekil 3.16. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı İmalatı-1.....	52
Şekil 3.17. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı İmalatı-2.....	53
Şekil 3.18. Rulman, Kaplin ve Tork Sensörü Montajı.....	53
Şekil 3.19. Kasnak Burulma Deney Cihazı Genel Montaj Yapısı	54
Şekil 3.20. Kasnak Burulma Deney Cihazı Ana Montaj.....	55
Şekil 3.21. Kasnak Burulma Deney Cihazı Kontrol Panosu	55
Şekil 3.22. Kasnak Burulma Deney Cihazı.....	56
Şekil 4.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi Kuvvet-Uzama Grafikleri	58
Şekil 4.2. Tek Eksenli Çekme Deneyi Kuvvet-Uzama Grafikleri	58
Şekil 4.3. Tek Eksenli Çekme Deneyinde Kullanılan Bölge	59
Şekil 4.4. Safi Kayma Deneyi Sonuçları.....	60
Şekil 4.5. Safi Kayma Deneyi Sonucu Detay Görünümü.....	60
Şekil 4.6. Yeni Malzeme Tanımlanması	61
Şekil 4.7. Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonucu Eklenmesi.....	61
Şekil 4.8. Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonucunun Girilmesi.....	62
Şekil 4.9. Safi Kayma Deneyi Sonucu Eklenmesi.....	62
Şekil 4.10. Safi Kayma Deneyi Sonucunun Girilmesi	63
Şekil 4.11. Deney Verileri Üzerine Oturtulan Eğilim Çizgileri	63
Şekil 4.12. 3 Parametrelili Mooney-Rivlin Malzeme Modeli Katsayıları.....	64
Şekil 4.13. Tek Eksenli Çekme Numunesi Sonlu Elemanlar Ağı.....	64
Şekil 4.14. Tek Eksenli Çekme Analizi Sınır Şartları.....	65

Şekil 4.15. Tek Eksenli Çekme Analizi Uzama Sonuçları	65
Şekil 4.16. Mesafeye Bağlı Çekme Kuvveti Analiz Sonuçları	66
Şekil 4.17. Tek Eksenli Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması.....	66
Şekil 4.18. Safi Kayma Analizinde Kullanılan Sonlu Elemanlar Ağı.....	67
Şekil 4.19. Safi Kayma Analizinde Kullanılan Sınır Şartları.....	67
Şekil 4.20. Safi Kayma Analizi Uzama Sonuçları.....	68
Şekil 4.21. Mesafeye Bağlı Çekme Kuvveti Analiz Sonuçları.....	68
Şekil 4.22. Safi Kayma Deneyi ve Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması	69
Şekil 4.23. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Geometrisi	69
Şekil 4.24. Solid Eleman Tipleri.....	70
Şekil 4.25. Kasnak Parçası Sonlu Elemanlar Modeli.....	71
Şekil 4.26. Sabitleme Yüzeyi.....	72
Şekil 4.27. Dönme Açısı Tanımlama Yüzeyi.....	72
Şekil 4.28. 1° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları	73
Şekil 4.29. 1° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları.....	74
Şekil 4.30. 1° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları.....	74
Şekil 4.31. 1° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları.....	75
Şekil 4.32. 2° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları	75
Şekil 4.33. 2° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	76
Şekil 4.34. 2° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	76
Şekil 4.35. 2° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları	77
Şekil 4.36. 3° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları	77
Şekil 4.37. 3° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	78
Şekil 4.38. 3° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	78
Şekil 4.39. 3° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları	79
Şekil 4.40. 4° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları	79
Şekil 4.41. 4° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	80
Şekil 4.42. 4° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	80
Şekil 4.43. 4° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları	81
Şekil 4.44. 5° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları	81
Şekil 4.45. 5° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	82
Şekil 4.46. 5° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları	82
Şekil 4.47. 5° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları	83
Şekil 4.48. Kasnak Üzerindeki Maksimum Yer Değiştirme	83
Şekil 4.49. Metal Parça Üzerindeki Maksimum Gerilme Değerleri	84
Şekil 4.50. Kauçuk Parça Üzerindeki Maksimum Gerilme Değerleri.....	84
Şekil 4.51. Kauçuk Parça Üzerindeki Maksimum Gerinim Değerleri.....	85
Şekil 4.52. Kasnağın Burulması Esnasında Gereken Döndürme Momenti.....	85
Şekil 4.53. 1° Burulmaya Karşılık Açık ve Moment Değerleri.....	86
Şekil 4.54. 2° Burulmaya Karşılık Açık ve Moment Değerleri.....	87
Şekil 4.55. 3° Burulmaya Karşılık Açık ve Moment Değerleri.....	87
Şekil 4.56. 4° Burulmaya Karşılık Açık ve Moment Değerleri.....	88
Şekil 4.57. 5° Burulmaya Karşılık Açık ve Moment Değerleri.....	88
Şekil 4.58. Numunelerin Burulma Açısına Karşılık Moment Değerleri.....	89
Şekil 4.59. Numunelerin Burulma Açısına Karşılık Moment Değerleri.....	89
Şekil 4.60. Analiz Sonuçlarının ve Numunelerin Fiziki Deneydeki Burulma Açılarına Karşılık Moment Değerleri.....	90
Şekil 4.61. 5° Burulma Sonrası Mevcut Tasarımdaki Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme	

Dağılımları.....	91
Şekil 4.62. Mevcut Kasnak Tasarımı Kesit Görünümü.....	91
Şekil 4.63. Mevcut Kasnak Kesiti ve 5 Alternatif Kesit Görünümü.....	92
Şekil 4.64. Metal Parçalar Üzerindeki Gerilme Dağılımları.....	93
Şekil 4.65. Kauçuk Parçalar Üzerindeki Gerilme Dağılımları.....	94
Şekil 4.66. Alternatif Tasarımlara Göre Metal Parçalar Üzerindeki Gerilmeler.....	95
Şekil 4.67. Alternatif Tasarımlara Göre Kauçuk Parçalar Üzerindeki Gerilmeler.....	95
Şekil 4.68. Alternatif Tasarımlara Göre Döndürme Momentleri.....	96
Şekil 4.69. En iyilemesi gerçekleştirilecek kesit üzerindeki tasarım değişkenleri.....	97
Şekil 4.70. En iyileme analizleri sonucu elde edilmiş aday parametreler nokta bulutu.....	98
Şekil 4.71. Belirlenen değişkenlerle oluşturulmuş kesitin 5° burulma yükü altındaki gerilme dağılımı.....	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Doldurulmamış Doğal Kauçuk Formülü).....	2
Çizelge 1.2. Karbon Siyahı Doldurulmuş Genel Amaçlı Doğal Kauçuk Formülü.....	2
Çizelge 2.1. Kauçukların Temel Özellikleri.....	9
Çizelge 2.2. Kauçukların Temel Özelliklerinin Kıyaslaması	10
Çizelge 4.1. 5° Burulma Yüğü Altında Kesit Değişkenleri ve Amaç Değişkenleri.....	97
Çizelge 4.2. En iyileme sonucu elde edilmiş aday noktalar ve belirlenen tasarım değişkenleri	98
Çizelge 4.3. Mevcut tasarım ve en iyilemesi gerçekleştirilmiş tasarım sonuçları	99

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinin önemli malzemelerinden olan kauçuk, doğal bir malzeme olup, tropikal bir ağaç olan kauçuk ağacının lateks adı verilen öz suyundan elde edilir. Lateks, kauçuk ağacının içinden beyaz, yapışkan ve süte benzer bir sıvı şeklinde temin edilir. Bu haliyle toplanan lateks kendi halinde bekletildiğinde pıhtılaşır ve katı hale gelirse de özellikleri itibariyle bu şekilde kullanılmazlar. İstenilen mekanik özelliklerine bağlı olarak belirli oranlarda stearik asit (yumuşatıcı), çinko oksit (vulkanizasyonu hızlandırıcı), karbon siyahı (dolgu maddesi, aşınmaya karşı direnç), kükürt (vulkanizasyonda çapraz bağların oluşumunu sağlayan) gibi katkı maddeleriyle karıştırılarak işlem gördükten sonra kullanılırlar.

Kauçuk, poliizopren adı verilen $(C_5H_8)_n$ kimyasal formülüne sahip polimerlerdir. Bu haliyle zayıf çapraz bağlara sahip olduklarından sıvı kıvamlı, elastikiyetleri ve dayanımları bulunmayan maddelerdir. Bu çapraz bağların oluşturulup kauçuğa katılık, elastikiyet ve dayanım verme işlemi vulkanizasyondur. Vulkanizasyon temelde ham kauçuk ile kükürtün $120^\circ-200^\circ C$ sıcaklık aralığında pişirilmesidir. Bu işlem sırasında zayıf çapraz bağlara sahip kauçuk ile kükürt kimyasal tepkimeye girer ve oluşan kükürt köprüleri sayesinde kauçuk içerisinde kuvvetli çapraz bağlar oluşur. Vulkanizasyon sonunda elde edilen kauçuk artık katı, elastik ve dayanıklı bir malzemedir.

Vulkanizasyonda kullanılan diğer katkı maddelerinin oranları kauçuğun kazanacağı mekanik özellikleri belirlemektedir. Çizelge 1. ve Çizelge 2.'de Vanderbilt Kauçuk El Kitabında (Ohm, 1990) bahsedilen bazı kauçuk karışım formülleri ve buna bağlı kazanılan mekanik özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Doldurulmamış Doğal Kauçuk Formülü

İçerik	Miktar *
Doğal Kauçuk	100
Proses Yağı	2
Stearik Asit	2
Çinko Oksit	5
Antioksidant: 6PPD	1
Kükürt	2.75
Hızlandırıcı: Benzotiazil Disülfid	1
Hızlandırıcı: Tetrametil Tiuram Disülfid	0.1

* Ağırlıkça 100 birim doğal kauçuğa karşılık gelen ağırlık miktarı

Vulkanizasyon süresi 10 dakika, sıcaklık 150 °C

Shore A sertlik 39

Çekme Mukavemeti 24 MPa

Uzama (%) 750

Çizelge 1.2. Karbon Siyahı Doldurulmuş Genel Amaçlı Doğal Kauçuk Formülü

İçerik	Miktar *
Doğal Kauçuk	100
Proses Yağı	5
Stearik Asit	2
Çinko Oksit	5
N-550 Karbon Siyahı	25, 50, 75
Penilamin Antioksidant	1,5
Kükürt	2,5
Hızlandırıcı: Benzotiazil Disülfid	1
Hızlandırıcı: Tetrametil Tiuram Disülfid	0.1

* Ağırlıkça 100 birim doğal kauçuğa karşılık gelen ağırlık miktarı
Vulkanizasyon süresi 20 dakika, sıcaklık 150 °C

Karbon Siyahı Oranına Bağlı Olarak Mekanik Özellikler

Karbon Siyahı Miktarı*	25	50	75
Shore A sertlik	51	62	72
Çekme Mukavemeti (MPa)	22	24	25
Uzama (%)	700	600	550

* Ağırlıkça 100 birim doğal kauçuğa karşılık gelen ağırlık miktarı

Kauçuklar özelliklerinden dolayı çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Hortumlar, eldivenler, elektrik kablosu kılıfları, ayakkabı tabanları, kayışlar, konveyör bantları, sızdırmazlık contaları ve bunlara benzer birçok ürün kauçuk muhteviyatlıdır. Kauçuğun en yaygın kullanıldığı alan ise elastikiyeti, sızdırmazlık ve şok sönümleyici özelliklerinden dolayı otomotiv sektörüdür. Ulaşım araçlarında lastik tekerlekler, amortisör ve yaprak yay bağlantısında kullanılan burçlar, sızdırmazlık contaları, triger kayışı, motor kasnakları, motor titreşim takozları gibi birçok parçada kauçuk ve metal-kauçuk bileşenleri kullanılmaktadır.

Kauçukların mekanik özelliklerinin elde edilmesinde, basma (compression), basit çekme (simple tension), iki eksenli çekme (biaxial tension), safi kayma (pure shear) gibi testler uygulanmaktadır. Temelde bu testlerin yapıldığı cihazlarda yük hücresi (load cell) ve ekstansometreler kullanılır, test çıktısı olarak da yük-deplasman eğrileri elde edilir. Ancak elde edilen bu değerler kauçuk malzemesinden hazırlanan standart numune parçalar içindir. Son ürün haline gelmiş olan kauçukların nasıl davranacağını doğrudan cevabını vermezler. Otomotiv sektöründe hazırlanan şartnameler ise genellikle son ürünlerin gereksinimlerini tanımlamaktadırlar. Burç, kasnak, motor titreşim takozu gibi parçalarda belirli radyal yük veya eksenel yük altında deplasman sınırı, belirli tork altında açılı sınırı gibi kriterler bulunmaktadır. Son ürünün üretilip testlerinin yapılarak bu değerlerin elde edilmesi hem zaman hem de para kaybına sebebiyet verdiği için henüz

tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizi yöntemlerinden faydalanarak ürün geliştirme çalışmaları gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada; kauçuk-metal bileşenli motor kasnak parçasının torsiyonel yük altındaki mekanik davranışı incelenmiştir. Motor kasnağı, trigger kayışı yardımıyla güç aktarımı sağlayan bir parçadır ve motorun ilk çalışma, durma gibi ani hareketlerinde anlık burulmaya uğrayan komponentlerdir. Bu anlık hareketleri tolere edebilmesi ve sönümleyebilmesi için de genellikle metal-kauçuk bileşenli şekilde üretilmektedirler.

Otomotiv şartnamelerinde yer alan kasnak çalışma kriterlerinin üretici tarafından yerine getirilebilmesi için genellikle son ürün haline getirildikten sonra testlere tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, kasnak parçasının sonlu elemanlar yöntemiyle istenilen farklı dönme açıları altında vereceği karşı tork değerleri hesaplanmış ve doğrulanmıştır.

Çalışmada, kauçuk test numuneleri çekme, kesme gibi testlere tabi tutulmuştur ve kauçuk için geliştirilen malzeme modelleri üzerinden sonlu elemanlar yazılımında doğrulaması yapılmıştır. Sonrasında kasnak geometrisi için doğrulanmış malzeme modeli ile farklı açılar için torsiyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu hesaplamaların doğruluğunun teyit edilebilmesi için ise servomotor tahrikli bir test cihazı tasarlanıp imal edilerek kasnak parçasının testleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğu teyit edildikten sonra kasnak geometrisi üzerinde iyileştirme çalışması gerçekleştirilip kasnak yapısı geliştirilmiştir. Böylelikle son ürün haline getirilip üretilmesine gerek kalmadan, henüz tasarım safhasında ürünün geliştirilebileceği görülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Doğal kauçuk doğanın bizlere sunduğu en özel maddelerdendir. Yeni dünyanın kauçuk ile tanışması 1493'de Kristof Kolomb'un Haiti adasına yaptığı gezisi sırasında, yerlilerin ağaç reçinelerinden yaptıkları bir çeşit topla oynadıklarını görmesiyle başlamıştır (Kauffman ve Seymour, 1990). Ancak kauçuğun sanayi alanında kullanılabilmesi için aradan uzun bir süre geçmiştir. 1803'de ilk kauçuk fabrikası Paris'te kurulduktan sonra 1839 yılında Charles Goodyear vulkanizasyon prosesinin mucidi olmuştur (Anonim, 2011). Böylelikle kauçuk malzemesinin günümüzdeki teknolojik haline getirilebilmesinin temelleri atılmıştır.

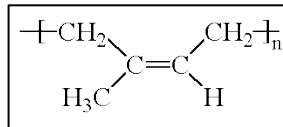
Kauçuk malzemesinin kullanıldığı parçalar olarak hortumlar, eldivenler, elektrik kablosu kılıfları, ayakkabı tabanları, kayışlar, konveyör bantları, sızdırmazlık contaları örnek olarak verile de en yaygın kullanıldığı alan otomotiv ve ulaştırma sektörüdür. Bu alanda kullanılan sentetik kauçukların yerine istenirse doğal kauçuklar kullanılabilse de tersi geçerli değildir. Yani yüksek performans beklentisi olunan komponentlerde sentetik kauçuk yerine doğal kauçuk kullanılmaktadır. Örneğin, kamyon lastiklerinde %90-100, uçak lastiklerinde %100 ve uçak gemilerinden kalkış-iniş yapan uçakların lastiklerinde tek kullanımlık %100 doğal kauçuk kullanılmaktadır (Cornish, 2017). Orta sınıf bir aracın lastikleri düşünüldüğünde 1km'de ortalama 500 dönüş yapmaktadır, bir lastiğin yaklaşık ömrünün 50,000 km kullanım olduğu dikkate alınırsa, bir lastik kullanım ömrü boyunca yaklaşık 25 milyar kez gibi ciddi dayanım gereksinimi isteyen tekrarlı yüklere maruz kalmaktadır (Lindenmuth, 2006). Bu yüzden de kauçuğun mekanik özelliklerinin istenilen gereksinimleri karşılayabilmesi çok önemlidir.

Kauçukların mevcut üstün özelliklerine sahip olabilmeleri kimyacılar ile diğer sektörlerin birlikte çalışması sonucu elde edilebilmiştir. Kullanılan sektörlerdeki ihtiyaçları sağlayabilmek adına kimyacılar devreye girerek kauçuklara bu özellikleri kazandırmışlardır. Kimyacılar, buldukları hızlandırıcı katkılarıyla daha homojen karışımlar elde ettiler, antioksidanlar ile uzama kabiliyetlerini artırdılar, karbon siyahı katkılarıyla yıpranmaya karşı direnci artırdılar, yapışabilme özelliği kazandırmalarıyla metal-kauçuk bileşenli ürünler elde edilebilmesini sağladılar (Cadwell ve ark., 1941).

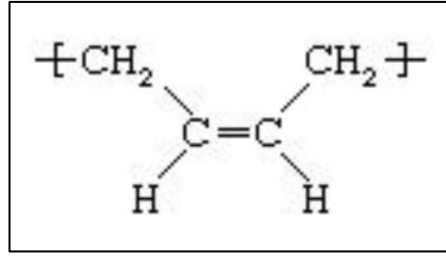
Böylelikle otomotiv alanında şok sönümleyici olarak kullanılmaları, tekstilde mont ve ayakkabılarda su geçirmezlikleri, medikal alanda kaydırmaz yüzeye sahip olmaları, elektrik alanında yalıtkan özellikleri, birçok alanda conta olarak sızdırmazlık özellikleri diğer mevcut malzemelere göre kauçukları avantajlı kılan özellikleri olmuştur (Anonim, 2015).

Yıllar geçtikçe kauçuğun hayatımızda büyük bir yer edinmesiyle birlikte hammadde temininde problemler yaşanmaya başlanmıştır. Ayrıca 1. Dünya savaşı sırasında İngiltere'nin Almanya'nın deniz kıyıları üzerindeki ablukası yüzünden Almanya doğal kauçuk temininde oldukça güç zamanlar geçirmiştir. Bu durum özellikle Alman kimyacıları harekete geçirerek sentetik kauçuğun geliştirilmesini hızlandırmıştır. Başlangıçta elde edilen sentetik kauçuklar doğal kauçuk kadar başarılı olmasa da, 1930'lu yılların başlarında Metil Kauçuğun geliştirilmesi başarılmıştır (Kauffman ve Seymour, 1991).

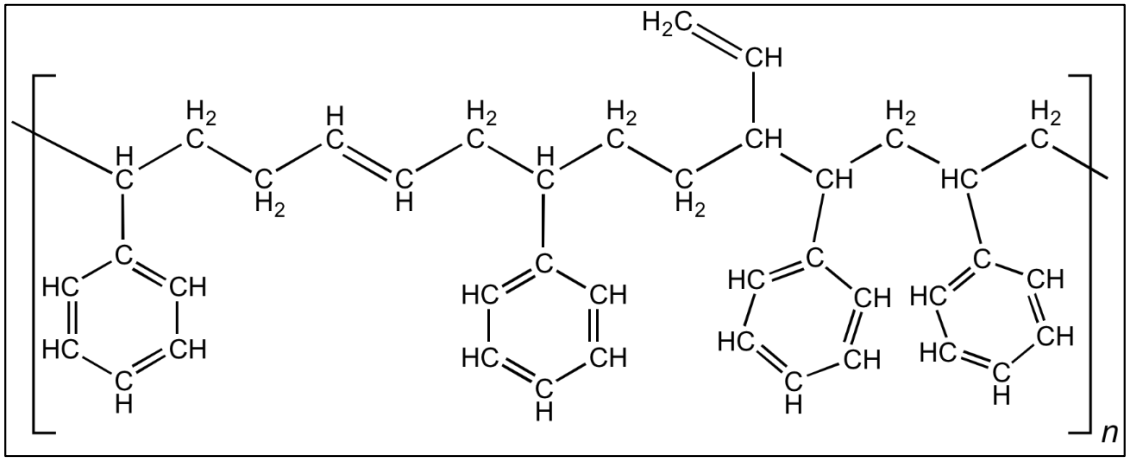
Doğal kauçuğun (Natural Rubber, NR, Şekil 2.1) yanında genel ve özel amaçlı kullanımlar için geliştirilen birçok sentetik kauçuk bulunmaktadır. Bunların başlıcaları, izopren kauçuk (Isoprene Rubber, IR), bütadien kauçuk (Butadiene Rubber, BR, Şekil 2.2), stiren bütadien kauçuk (Styrene-Butadiene Rubber, SBR, Şekil 2.3), izobütülen izopren kauçuk (Isobutylene-Isoprene Rubber, IIR, Şekil 2.4), nitril bütadien kauçuk (Nitrile-Butadiene Rubber, NBR, Şekil 2.5), etilen propilen dien kauçuk (Ethylene-Propylene-Diene Rubber, EPDM, Şekil 2.6), kloropren kauçuk (Chloroprene Rubber, CR, Şekil 2.7) (Halim ve Elsabee, 2011). Nigoyi (2007) çalışmasında endüstride kullanılan başlıca kauçukların kimyasal formüllerine yer vermiştir.



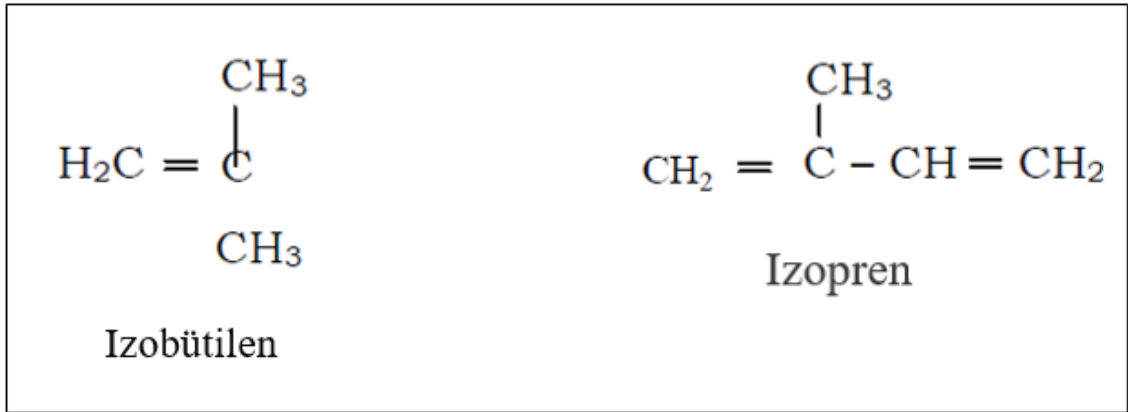
Şekil 2.1. Doğal Kauçuk Molekül Yapısı (poliizopren, NR)



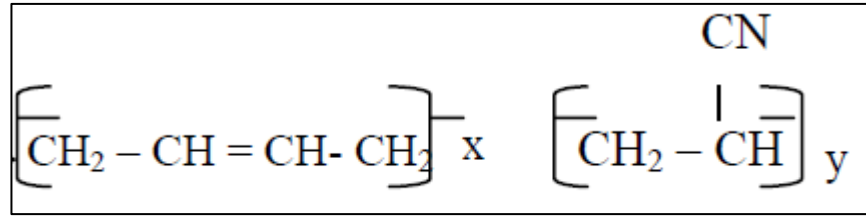
Şekil 2.2. Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (BR)



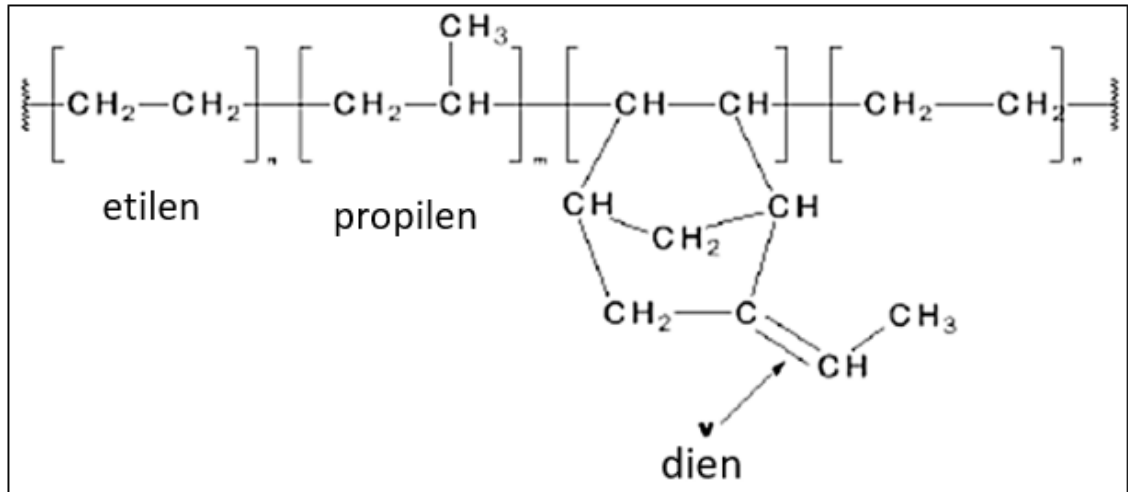
Şekil 2.3. Stiren Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (SBR)



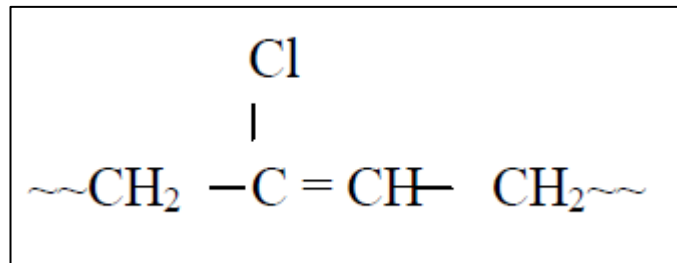
Şekil 2.4. İzobütülen İzopren Kauçuk Molekül Yapısı (IIR)



Şekil 2.5. Nitril Bütadien Kauçuk Molekül Yapısı (NBR)



Şekil 2.6. Etilen Propilen Dien Kauçuk Molekül Yapısı (EPDM)



Şekil 2.7. Kloropren Kauçuk Molekül Yapısı (CR)

Hanhi ve arkadaşları (2007) doğal ve sentetik kauçuklarla ilgili açıklayıcı bilgiler sunmuşlardır. Farklı kauçukların temel ve mekanik özellikleri Çizelge 3. ve Çizelge 4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kauçukların Temel Özellikleri

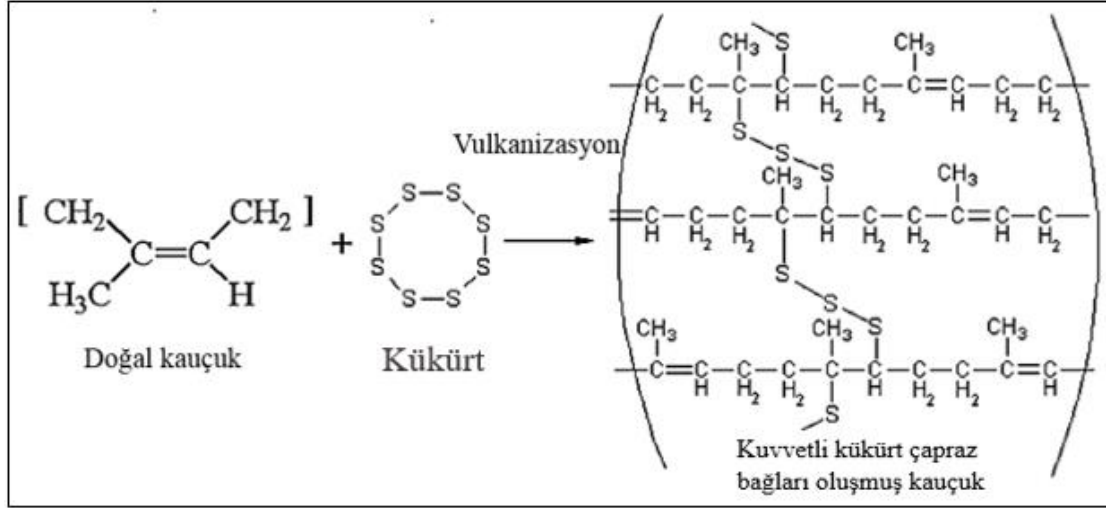
Kauçuk Çeşitleri	Temel Özellikleri	Çalışma Sıcaklıkları (°C)
Doğal Kauçuk NR	iyi işlenebilirlik, yüksek uzama kabiliyeti, yüksek mukavemet, aşınmaya karşı direnç, soğuğa karşı direnç, elektrik yalıtkanlığı	-55 / +80
Bütadien Kauçuk BR	aşınmaya karşı direnç, soğuğa karşı direnç, soğukta elastikiyetini koruyabilme	-70 / +80
Stiren Bütadien Kauçuk SBR	ucuz fiyat, iyi uzama kabiliyeti, yıpranmaya karşı direnç, termal yaşlanmaya karşı direnç	-45 / +100
İzobütilen İzopren Kauçuk IIR	sıcak ve soğuklarda elastikiyetini koruyabilme, ozona karşı direnç, hava şartlarından etkilenmeme, gaz ve su geçirmezlik	-40 / +140
Nitril Bütadien Kauçuk NBR	yağ ve ısıya karşı direnç, ozona karşı direnç, su geçirmezlik	-50 / +130
Etilen Propilen Dien Kauçuk EPDM	Aşınmaya karşı direnç, yüksek sıcaklığa karşı direnç, elektrik yalıtkanlığı	-50 / +160
Kloropren Kauçuk CR	aşınmaya karşı direnç, ozona karşı direnç, metale yapışabilme özelliği	-50 / +130

Çizelge 2.2. Kauçukların Temel Özelliklerinin Kıyaslaması

1=zayıf, 2=orta, 3=iyi, 4=çok iyi, 5=mükemmel					
Kauçuk Çeşitleri	Kopma Mukavemeti [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Elektrik Yalıtkanlığı	Ozon ve Güneş Işığı Direnci	Aşınma Direnci
NR	4-25	100-600	4	1-2	4-5
SBR	4-25	100-500	4	1-2	4
IIR	4-15	100-800	4-5	3-4	2-3
NBR	4-18	100-400	1-2	1-3	3-4
EPDM	4-18	100-400	4	5	3
CR	4-20	100-500	3	4	3-4

Kauçuk üretiminde kullanılan katkı maddeleri; dolgu maddeleri, yumuşatıcılar, proses kolaylaştırıcılar, vulkanizasyon hızlandırıcılar, aktivatörler diye sınıflandırılırlar. Dolgu maddelerinin temel işlevleri kauçuğa mukavemet katmaları, renk vermeleri ve maliyet azaltmasıdır. 10 mikrondan büyük partikül büyüklüğündeki dolgu malzemeleri lokal iç gerilmelere sebebiyet verdiği için yapının mukavemetini düşürür. 1-10 mikron arası partikül büyüklüğündeki dolgu maddelerinin mukavemete olan etkilerinin nötr olduğu söylenebilir. 0,01-0,1 mikron büyüklüğündeki dolgu maddeleri ise yapıya yüksek mukavemet katmaktadır (Brentin ve Sarnacke, 2011). En bilinen ve yoğun kullanıma sahip dolgu maddesi karbon siyahıdır. Kullanılan karbon siyahının partikül büyüklükleri 8-300 nanometre aralığında değişmektedir ve bu büyüklükteki partiküller kauçuğa oldukça iyi mukavemet özellikleri kazandırabilmektedir. Vulkanizasyon operasyonunun düzgün ve homojen bir şekilde gerçekleşebilmesi için hızlandırıcıların kullanılması gerekmektedir. En bilinen hızlandırıcı ise çinko oksittir. Çinko oksitin kauçuk içerisinde rahat çözünebilmesi için de yumuşatıcı olarak stearik asit kullanılır. Böylelikle kauçuk hızlı ve homojen şekilde vulkanize olabilmektedir (Datta ve Ingham, 2001). Kauçuğun en temel formunu alabilmesi için gerçekleştirilen pişirme işlemi yani vulkanizasyonda ihtiyaç duyulan en temel madde ise kükürtdür (Gent, 2016). Kükürt, 120°-200°C

aralığında vulkanizasyon işlemi esnasında kauçuk ile kimyasal reaksiyona girerek zayıf çapraz bağlara sahip kauçuk içerisinde kuvvetli kükürt köprülerinin kurulmasını sağlar (Şekil 2.8). Böylelikle vulkanizasyon işlemi öncesinde sıvı kıvamlı olan kauçuk karışımı, vulkanizasyon sonrasında katı, elastik ve dayanıklı bir form almış olur.



Şekil 2.8. Kuvvetli Kükürt Çapraz Bağları Oluşmuş Kauçuk Moleküler Yapısı

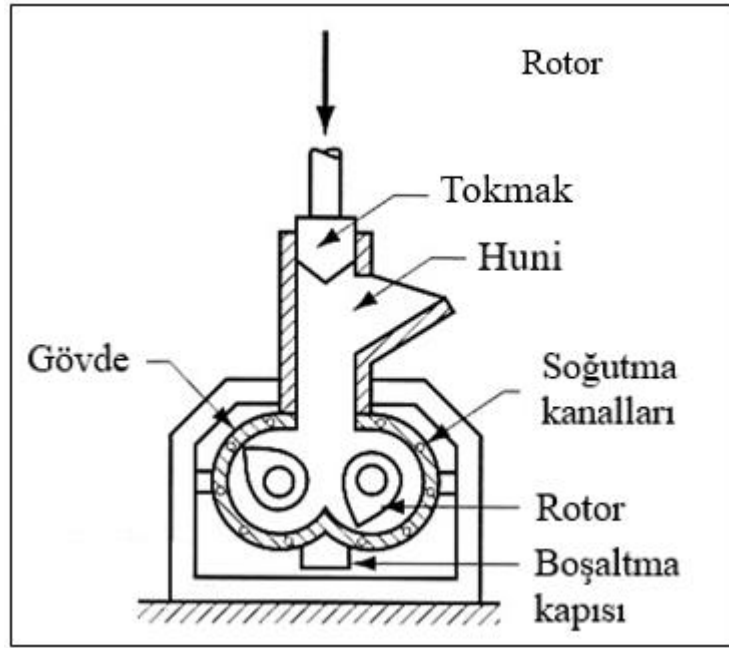
Kauçukların son ürün haline getirilebilmeleri için geçirmeleri gereken adımları Anonim (2004) aşağıdaki gibi sıralamıştır.

- Karışım Hazırlama
- Karıştırma
- Şekil Verme
- Vulkanizasyon

Karışım hazırlama adımında, kauçuk hammaddesi içerisine kükürt, çinko oksit, stearik asit, karbon siyahı gibi kimyasallar eklenmektedir. Kullanılan bu katkı maddelerinin oranları ve çeşitleri kauçuk ürününün istenilen fiziksel özelliklerine göre değişmektedir.

Karıştırma adımı, hazırlanan karışımından homojen bir yapı elde edilebilmesi için mekanik olarak karıştırma işlemidir (Anonim, 2006). Karıştırma adımında dikkat edilmesi gereken en önemli husus erken vulkanizasyondur. Kauçuk hamurunun

karıştırılması esnasında iç sürtünmelerden dolayı sıcaklığı 150°C'ye kadar çıkabilmektedir. Bu yüzden karıştırma işlemi 2 aşamada tamamlanır. İlk adımda vulkanizasyon işleminde etkisi olmayan katkı maddeleri (karbon siyahı gibi) eklenerek karışım başlatılır, ilk karıştırma işlemi bittikten sonra kauçuk hamuru soğumaya bırakılır. Daha sonra vulkanizasyonda etkili olan katkı maddeleri (kükürt gibi) eklenir ve karışım tamamlanır (Marinov, 2010). Karıştırma işlemi, mikser adı verilen karıştırma makineleriyle gerçekleştirilir (Şekil 2.9).

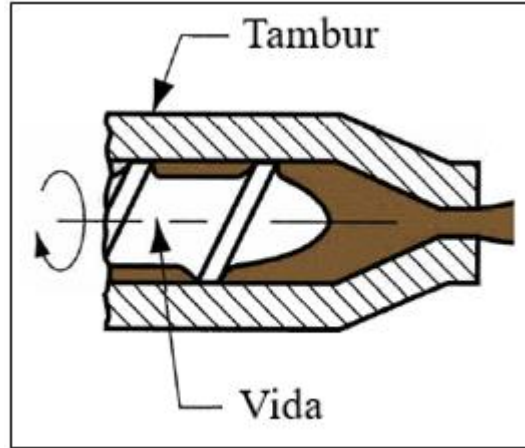


Şekil 2.9. Temsili Kauçuk Mikser Makinası

Şekil verme adımında, kauçuğun vulkanizasyon öncesinde istenilen şekli verilmektedir. Şekil verme işlemleri temel olarak 4 kategoriye ayrılmaktadır (Groover, 2002).

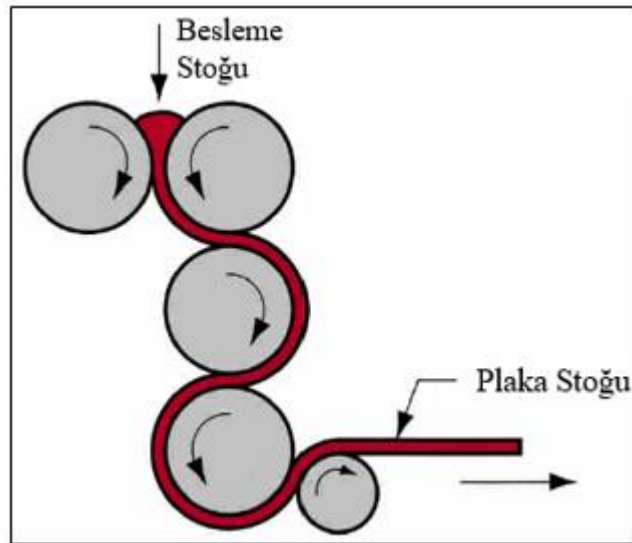
- Ekstrüzyon
- Kalenderleme
- Kaplama
- Kalıplama

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ekstrüzyonla şekil vermede kauçuk hamuru bir vidalı mil ile istenilen kesite doğru itilir ve istenilen kesitte ve boyda kauçuk hamuru elde edilir.



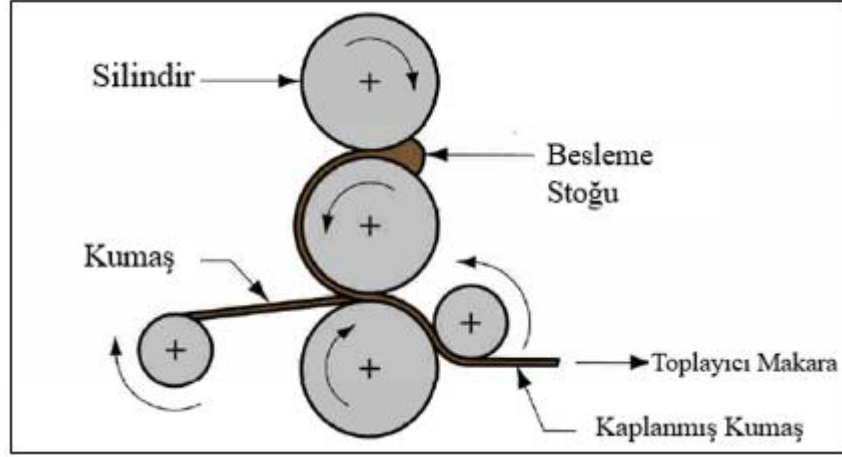
Şekil 2.10. Ekstrüzyonla Şekil Verme

Kalenderleme ile şekil vermede (Şekil 2.11), kauçuk hamuru ara mesafeleri değişken olan merdaneler arasından geçirilir, böylelikle istenilen kalınlıkta ve genişlikte kauçuk hamuru plakaları elde edilebilmektedir.



Şekil 2.11. Kalenderleme ile Şekil Verme

Kaplama ile şekil vermede (Şekil 2.12), temelde belirli bir düzende örülmüş ipliklerin kauçuk ile kaplanarak güçlendirilmiş bir yapının elde edilmesi sağlanmaktadır.

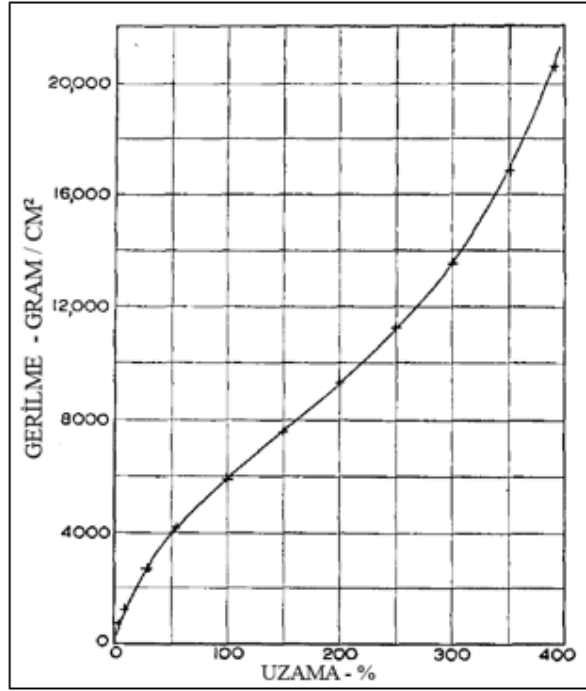


Şekil 2.12. Kaplama ile Şekil Verme

Kalıplama ile şekil vermede, en kompleks kauçuk formları bile elde edilebilmektedir. Enjeksiyon veya döküm gibi yöntemlerle istenilen kalıp şekli içerisine kauçuk hamuru doldurularak son şekli verilebilmektedir. Genellikle otomotivde sektöründe kullanılan birçok kauçuk parçanın şekil verilmesi işlemi kalıplama ile yapılmaktadır.

Vulkanizasyon adımı, karışımı hazırlanmış, homojen karıştırma işlemi tamamlanmış ve istenilen şekli verilmiş olan kauçuk hamurunun pişirilerek güçlü ve elastik bir yapıya kavuşturulmasıdır (Anonim, 2013). Temelde vulkanizasyon işleminin gerçekleşmesini sağlayan kimyasal kükürttür. Kauçuk ile sadece kükürtün vulkanize olabilmesi için 140°C - 150°C sıcaklık aralığında yaklaşık olarak 5 saat pişirilmesi gerekmektedir. Bu noktada hızlandırıcı kimyasallar devreye girerek pişirme süresini 15-20 dakikalara kadar indirmektedir.

Vulkanize olmuş kullanıma hazır kauçuk esneklik bakımından kıyaslanamaz özelliklere sahiptir. Kauçuk malzemeler, plastik ve diğer malzemelere kıyasla yüklemeye sonrasında aşırı deformasyona uğrayabilir ve sonrasında tamamen ilk şekline dönebilecek kapasitededir (Steinbüchel, 2003). Uzama kabiliyeti itibarıyla kauçuklar % 1000'e kadar uzama gösterebilmektedirler. Uzama karakteristikleri genellikle S formundadır. Tipik kauçuk Gerilim-Uzama grafiği incelendiğinde (Şekil 2.13) ilk 1/3'ünde artan yönde azalan bir eğilimdeyken, grafiğin kalan diğer kısımlarında artış göstererek son bölümde en yüksek eğime ulaşmaktadırlar (James ve Guth, 1943).



Şekil 2.13. Tipik Kauçuk Gerilim-Uzama Grafiği

Kauçukların kuvvet-uzama grafikleri en eski zamanlardan beri yol gösterici olmuştur. Birçok kauçuk test metodu olmasına rağmen en yaygın kullanılanı basit çekme testidir (Higuchi ve ark., 1948). Çekme testi, ASTM D412-98 “Vulkanize olmuş kauçuklar ve termoplastik kauçuklar için Standart Test Metodu” ile tanımlanmıştır ve dikdörtgen kesitli numunelerin universal çekme cihazlarında çekilmesiyle gerçekleştirilmektedir (Chatterjee ve Naskar, 2007). Kauçuklara temel isimlerinin verilmesini sağlayan sertlik ifadeleri ise durometre, sertlik ölçer veya shoremetre gibi isimler alan cihazlarla elde edilmektedir. Temelde küresel bir metalin kauçuğa bastırılmasıyla ne kadar kauçuğun içine gömüldüğünün değerlendirilmesidir (Schaefer, 2002). Bu testin sonunda kauçuk sertlik derecesi olarak Shore A 45, Shore A 65 gibi isimler almaktadırlar. Kauçukların mekanik özelliklerinin elde edilmesinde kullanılan test yöntemleri bir sonraki bölümde detaylı şekilde verilmiştir.

2.1. Kauçuk Malzemelerin Test Yöntemleri ve Kullanılan Cihazlar

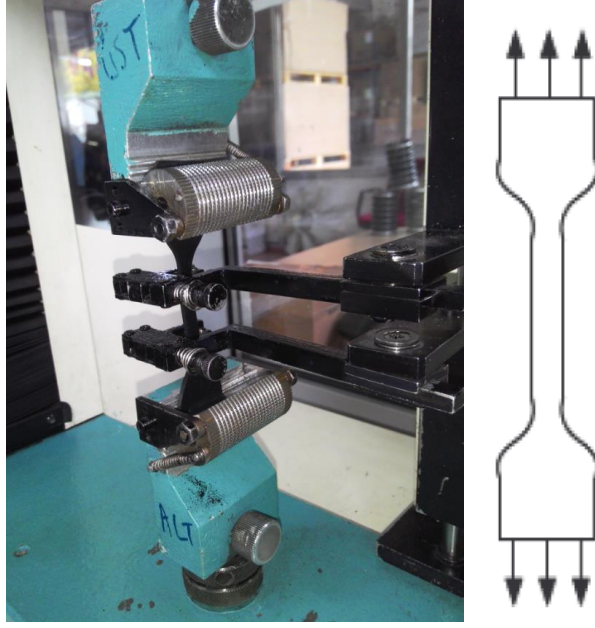
Malzemelerin genel mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için malzeme testlerinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi en önemli konulardan birisidir. Genel olarak çelik,

alüminyum gibi izotropik özelliklere sahip metallerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan test yöntemi basit tek eksenli çekme testidir. Bu çekme testi sayesinde malzemenin geri dönebilir elastik uzama bölgesi için “E, elastisite modülü”, kalıcı deformasyon bölgesinin başladığı “ σ_a , akma gerilmesi” gibi önemli değerler elde edilebilir.

Temel olarak kauçuk malzemelerde numune üzerinden malzeme testleri ve son ürün üzerinden ürün dayanım testleri gerçekleştirilmektedir (Anonim, 2007). Kauçuk malzemelerde numune üzerinden çalışırken gerinim enerjisi metotlarına göre malzeme modeli oluşturulmasında farklı birçok test yöntemi kullanılmaktadır. Guelon ve arkadaşları (2009) kauçuk malzemelerin önemli özelliklerinin elde edilmesinde temel 3 test üzerinde durmaktadırlar, tek eksenli çekme (uniaxial tension), iki eksenli çekme (biaxial tension) ve safi kayma (pure shear). Bu test metotlarının dışında ayrıca iki eksenli şişirme (bulge) testi için Treloar (1944) bir düzenek geliştirmiştir. Bahsi geçen tüm bu testlerin tarifleri ISO37:2011, ASTM D412 ve ASTM D945 gibi standartlarda belirtilmiştir.

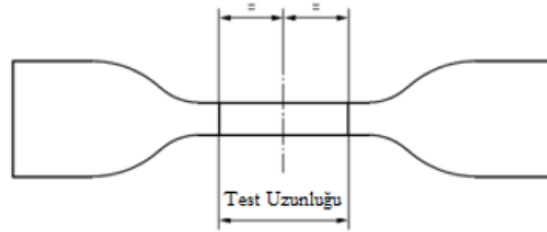
2.1.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi (Uniaxial Tension Test)

Tek eksenli çekme deneyi (Şekil 2.14), metal malzemelerin temel mekanik özelliklerinin belirlenmesinde oldukça yoğun bir şekilde kullanıldığından hemen hemen herkesin aşına olduğu bir test düzeneğidir. Bu testin gerçekleştirilmesinde basit evrensel çekme cihazı kullanılmaktadır (Muflikhun, 2015). Metal malzemelerin çekme testinden farklı olarak kauçukların uzama kabiliyetleri %300-500 mertebelerine kadar ulaşabildiğinden çekme cihazında uzamayı gösteren ekstansometreler büyük öneme sahiptir (Grellmann ve Seidler, 2013).



Şekil 2.14. Tek Eksenli Çekme Deneyi Cihazı

Tek eksenli çekme deneyinde kullanılan papyon şeklindeki kauçuk numunelerinin boyutlandırılmasında ISO37:2011 (Anonim, 2008) ve ASTM D412 (Anonim, 2011) referans alınabilir. Standartlarda yer alan ölçüler Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’da verilmiştir.

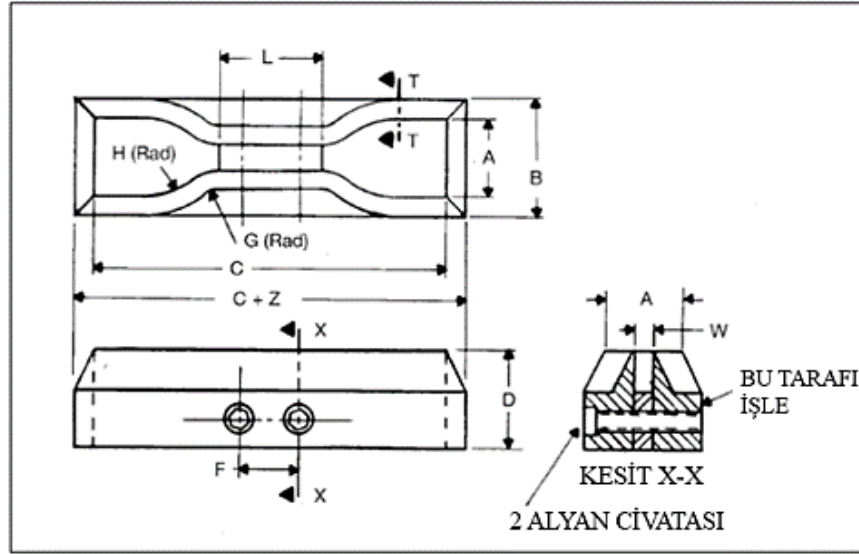


Test parçası tipi	Tip1	Tip 1A	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Test uzunluğu	25 ± 0,5	20 ± 0,5 ^a	20 ± 0,5	10 ± 0,5	10 ± 0,5

^a Test uzunluğu, test parçasının dar kısmının uzunluğunu aşmayacaktır

Boyut	Tip1	Tip 1A	Tip 2	Tip 3	Tip 4
A Toplam boy (minimum) ^a (mm)	115	100	75	50	35
B Bitiş genişliği (mm)	25 ± 1	25 ± 1	12,5 ± 1	8,5 ± 0,5	6 ± 0,5
C Dar kısım uzunluğu (mm)	33 ± 2	21 ± 1	25 ± 1	16 ± 1	12 ± 0,5
D Dar kısım genişliği (mm)	6,2 ± 0,2	5 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,1
E Geçiş bölgesi dış yarıçapı (mm)	14 ± 1	11 ± 1	8 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3 ± 0,1
F Geçiş bölgesi iç yarıçapı (mm)	25 ± 2	25 ± 2	12,5 ± 1	10 ± 0,5	3 ± 0,1

Şekil 2.15. ISO37:2011 Standardına Göre Numune ve Numune Kesme Kalıbı Ölçüleri



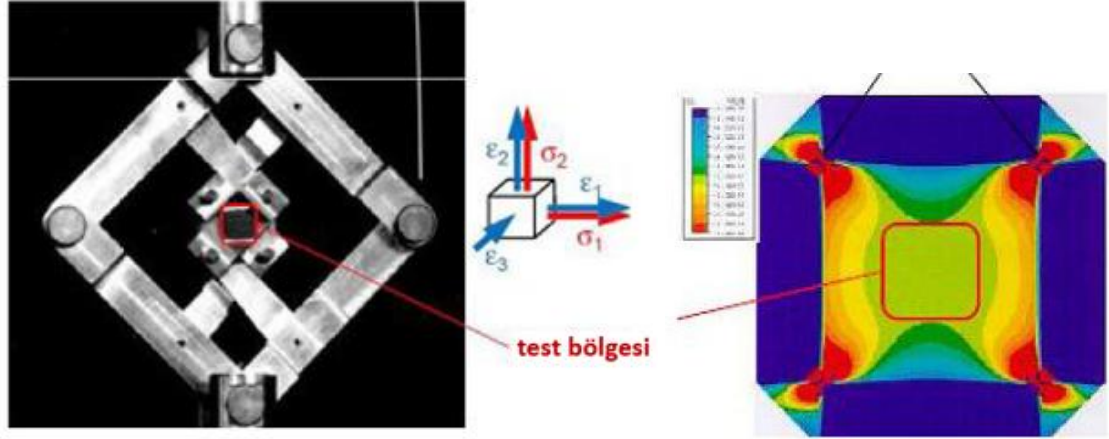
Standart – Kesme Kalıbı Boyutları (Metrik Birim)								
Boyut	Birim	Tolerans	Kalıp A	Kalıp B	Kalıp C	Kalıp D	Kalıp E	Kalıp F
A	mm	± 1	25	25	25	16	16	16
B	mm	maks.	40	40	40	30	30	30
C	mm	min.	140	140	115	100	125	125
D	mm	$\pm 6^8$	32	32	32	32	32	32
D-E	mm	± 1	13	13	13	13	13	13
F	mm	± 2	38	38	19	19	38	38
G	mm	± 1	14	14	14	14	14	14
H	mm	± 2	25	25	25	16	16	16
L	mm	± 2	59	59	33	33	59	59
W	mm	$\pm 0.05, -0.00$	12	6	6	3	3	6
Z	mm	± 1	13	13	13	13	13	13

Şekil 2.16. ASTM D412 Standardına Göre Numune Kesme Kalıbı Ölçüleri

2.1.2. İki Eksenli Çekme Deneyi (Biaxial Tension Test)

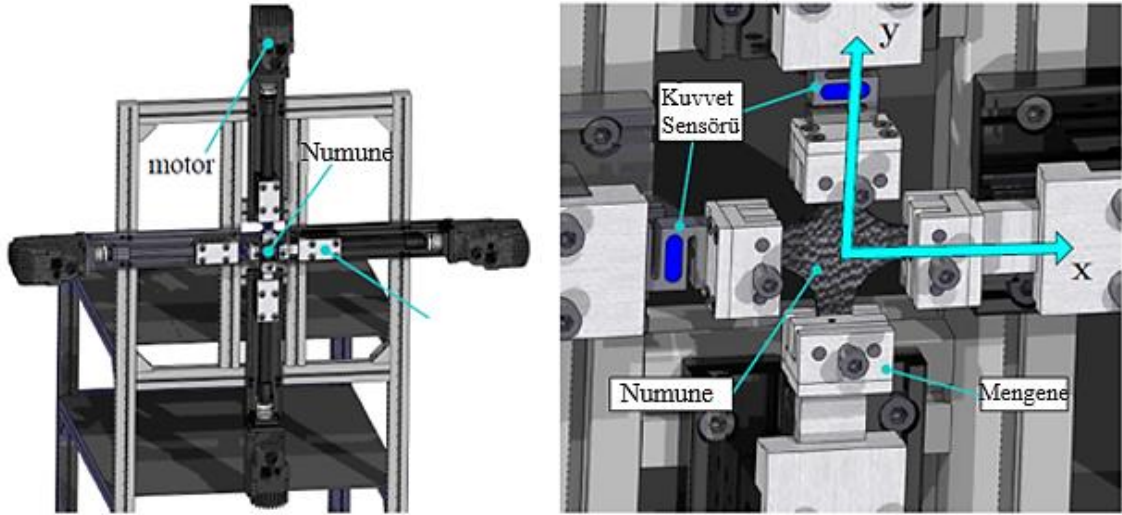
İki eksenli çekme deneyinde temel amaç, kauçuk malzemenin kalınlık yönü dışındaki iki yönde uzama karakteristiklerinin ve uzama oranlarının elde edilmesidir. Bu test yönteminde kullanılan cihazlar ve numuneler farklılık gösterebilmektedir. Ancak neticede test cihazından ve çalışma prensibinden bağımsız olarak numunenin orta kısmındaki uzamaların incelenmesi hedeflenmektedir. Tek eksenli çekme deneylerinde basit yöntem olarak ekstansometre ile numunenin uzaması ölçülürken, iki eksenli çekme deneylerinde bu durum biraz daha zordur. Bu yüzden genellikle kamera ile görüntü işleme teknolojisi kullanılarak malzemenin uzaması hesaplanır.

Venkatesh ve Murthy (2012), çalışmalarında iki eksenli çekme deneyinde makas mekanizması ile kauçuk numunenin iki eksende uzamasını sağlamışlardır ve analizler ile de testin doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Venkatesh ve Murthy (2012)'nin İki Eksenli Çekme Deneyi ve Analizi

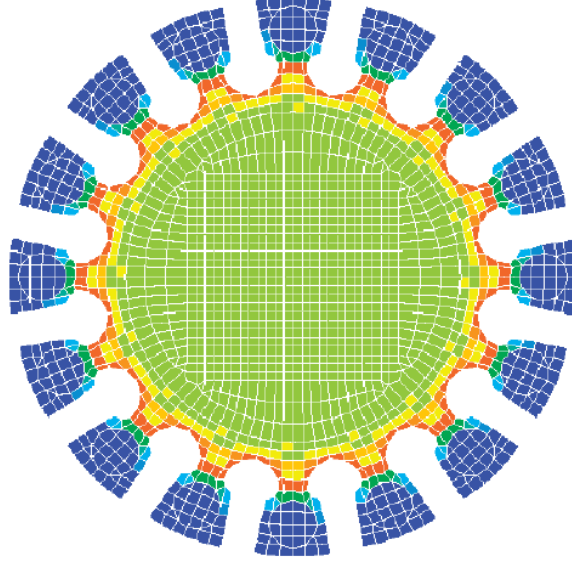
Siebert ve Arkadaşları (2013), iki eksenli çekme deneyinde Johlitz ve Diebels (2011)'in tariflediği düzeneği referans almışlardır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Siebert ve Arkadaşlarının (2013) İki Eksenli Çekme Deneyi

Axel Products Inc. genellikle ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS gibi sonlu elemanlar yazılımlarında kullanılan malzeme modellerinin hazırlanabilmesi için bu testleri gerçekleştiren bir firmadır. Axel Products'ın yaptığı iki eksenli çekme deneyinde numune

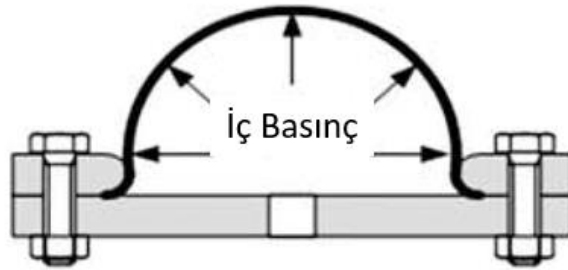
sadece yanal ve dikey yönde çekilmez, belirli açılarda tüm çevre boyunca numune çekilir (Şekil 2.19) ve merkezdeki kısım incelenir (Miller, 2000).



Şekil 2.19. Axel Products Inc.'in Yaptığı İki Eksenli Çekme Deneyi

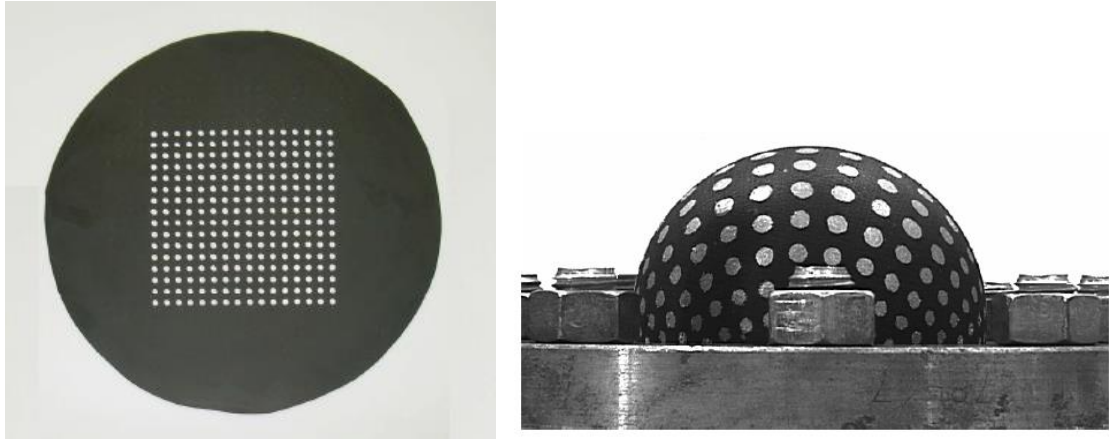
2.1.3. Şişirme Deneyi (Bulge Test)

Şişirme deneyi, yöntem itibariyle çok farklı gözükse de iki yönlü çekme deneyinin bir farklı türüdür. Sasso ve Arkadaşları (2008) çalışmalarında şişirme deneyini; dairesel olarak kesilmiş kauçuk parçasının iki adet flanş vasıtasıyla sıkıştırılarak kilitlenmesi ve kauçuğun iç kısımdan basınçlı sıvı vasıtasıyla şişirilmesi olarak tariflemektedir, bu tarifin şematik gösterimi Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



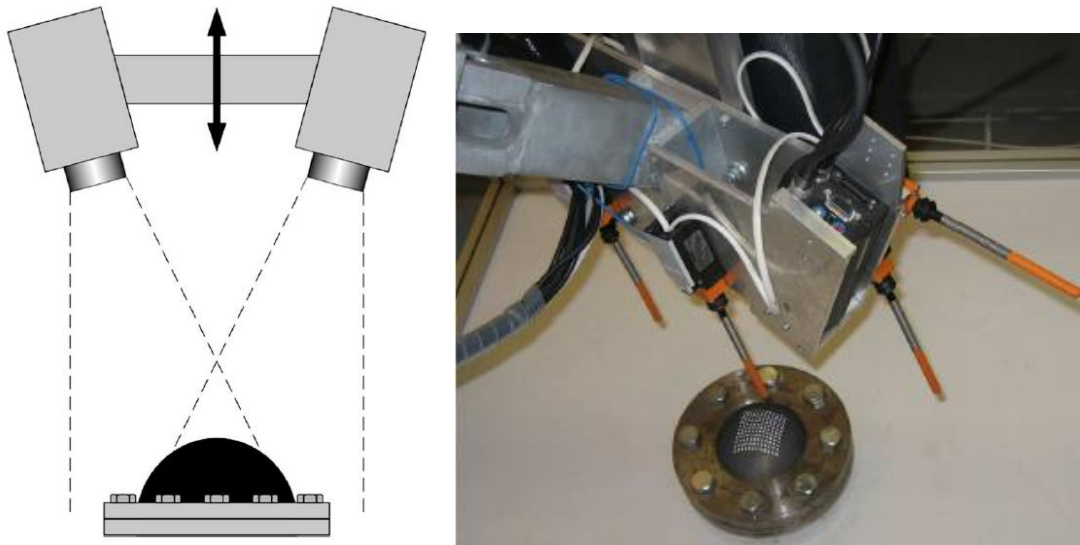
Şekil 2.20. Şişirme Deneyi Şematik Gösterimi (Bulge Test)

Sasso ve Arkadaşlarının (2010) alışmalarında ifade ettikleri gibi en önemli konulardan birisinin deney esnasında ölümün doğru yapılması gerekliliğidir. Bunun için de numune üzerinden ölüm alınabilmesi için öncelikle bir ön hazırlık yapılması gerekmektedir ve deney esnasında uzama kamera yardımıyla görüntü işleme teknolojisi kullanılarak hesaplanmaktadır. n hazırlık için Şekil 2.21’de gösterildiği gibi numune üzerine belirli aralıklarla düzgün bir desen oluşturulması gerekmektedir.



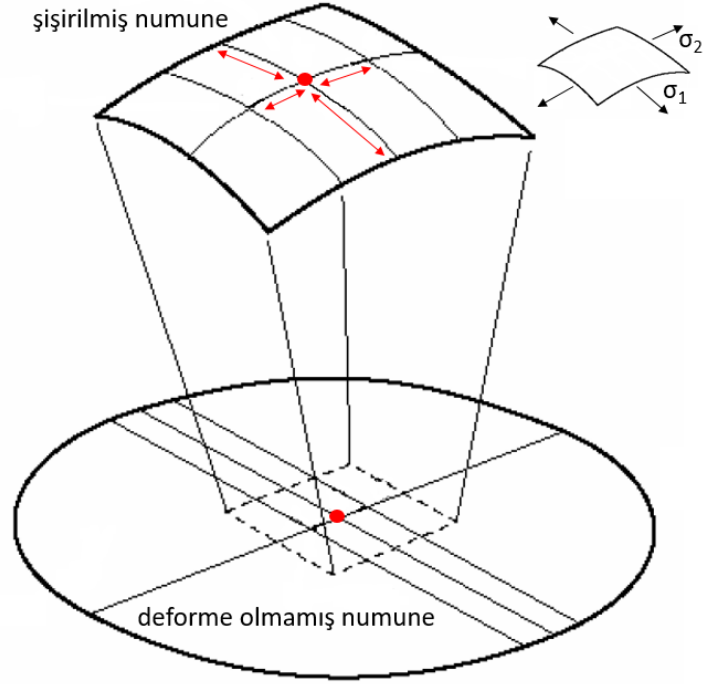
Şekil 2.21. n Hazırlığı Yapılmış Numune ve Őiřirilmıř Numune

Şişirme sonrasında kurulan optik düzenek ile oluşan kürenin tepe bölgesi incelenmektedir. Bunun için de Şekil 2.22’de gösterildiği gibi optik düzenekler numunenin st kısma konumlandırılmaktadır.



Şekil 2.22. Optik Düzenek

Yapılan deneyde kullanılan basit analitik hesap, kürenin tepe bölgesinin 2 yönde de eşit miktarda uzayarak genişlediği varsayımıdır (Şekil 2.23). Bu doğrultuda kullanılan formüller, 2 yönde uzama ve kürenin iç basınç altında şişirilmesinden kaynaklanan gerilme formülleridir.



Şekil 2.23. Analitik Hesaplama İçin Kullanılan Bölge

Numunenin şişmesiyle birlikte kürenin tepe noktasında oluşan gerilim formülü 2.1 eşitliğinde gösterilmiştir.

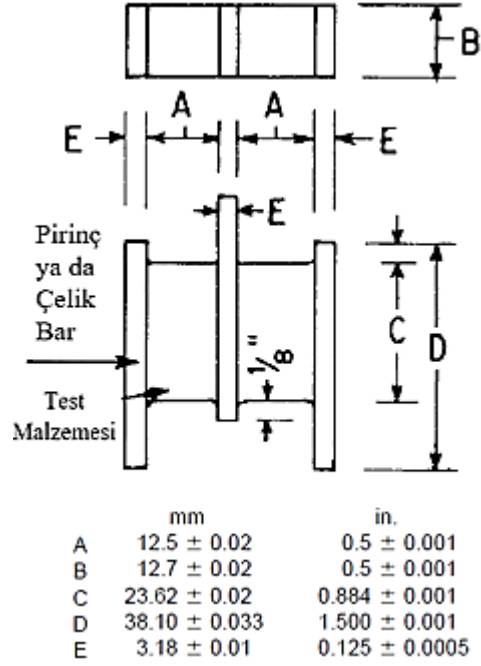
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{l_f - l_0}{l_0}\right) \quad (2.1)$$

Ayrıca bu bölgede oluşan gerilme değerleri de Boyle-Mariotte küresel tankların iç basınç altındaki gerilme eşitliği kullanılarak, eşitlik 2.2'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P \cdot r}{2 \cdot t} \quad (2.2)$$

2.1.4. Safi Kayma Deneyi (Pure Shear Test)

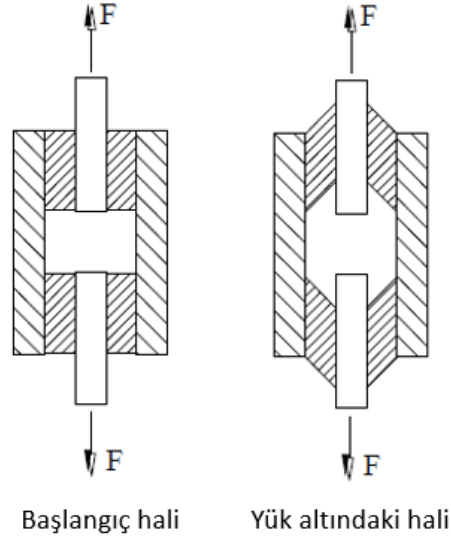
Negrete ve Arkadaşları (2005), kauçuk malzemelerin kayma davranışlarının incelenmesinde birçok teknik geliştirildiğini belirtmektedir. Ancak en temel haliyle kayma deneyi düşünüldüğünde Şekil 2.24'te verildiği üzere ASTM D945-92 standardında kayma deneyi için numune ölçüleri belirtilmiştir (Anonim, 2001).



Şekil 2.24. ASTM D945-92 Standardında Belirtilen Kayma Deneyi Numunesi Boyutları

Vahapoğlu (2013)'da safi kayma testini metal plakalara yapıştırılmış olan dikdörtgen kauçuk blokların çekilmesi olarak tanımlamaktadır (Şekil 2.25). Ayrıca kauçuk mekaniğinde kullanılan kayma gerilmesinin de temel olarak bilindiği haliyle eşitlik 2.3 eşitliğinde verildiği gibi olduğunu söylemektedir.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$



Şekil 2.25. Safi Kayma Deneyindeki Numunenin Başlangıç ve Yük Altındaki Son Hali

2.2. Hiperelastik Malzeme Modelleri

Hiperelastik diye tabir edilen kauçuk malzemelerin en önemli mekanik özellikleri çok düşük yüklemeler altında çok ciddi deformasyona uğrayıp şekil değiştirmeleridir. Ayrıca bu kadar uzayıp, ezilip, şekil değiştirmesinin sonunda üzerinden yük kaldırıldığında neredeyse hiç kalıcı deformasyon oluşmaksızın ilk formuna dönebilmeleridir.

Shahzad ve arkadaşlarının (2015), Boyce ve Arruda (2000) söylediği gibi hiperelastik malzemelerin temel davranışı birim hacimde depolanan gerinim enerjisi cinsinden ifade edilirler. Gerinim enerjisi “ W ” gösterilir ve I_1 , I_2 , I_3 gerinim değişmezlerinin bir fonksiyonudur. Gerinim değişmezleri de eşitlik 2.4, 2.5 ve 2.6’da verildiği üzere asal uzama oranlarının (λ_1 , λ_2 , λ_3) birer fonksiyonudur.

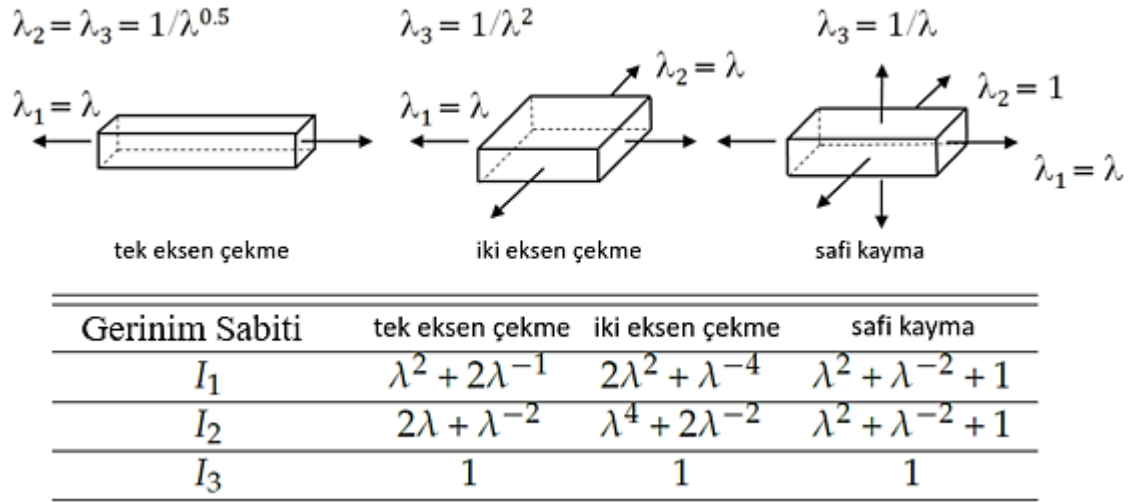
$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2 \quad (2.5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (2.6)$$

Genellikle hiperelastik malzemeler sıkıştırılmaz ve hacim değişikliğine uğramadıkları kabul edildiklerinden $I_3=1$ alınır (Elgström, 2014). Österlöf (2014) çalışmasında tek

eksenli çekme, iki eksenli çekme ve safi kayma durumları için gerinim sabitlerinin hesabını Şekil 2.26'da göstermiştir.



Şekil 2.26. Yüklemelere Bağlı Gerinim Sabiti Hesabı

Temelde kauçukların malzeme davranışı gerinim enerjisi fonksiyonuna dayansa da matematiksel olarak ifade edilirken daha kolay ve her durumu kapsayabilecek şekilde formülize edilebilmeleri için birçok malzeme modeli geliştirilmiştir (Khajehsaeid ve ark., 2013). Bunlardan en bilindik olarak Mooney-Rivlin, Ogden, Neo-Hookean, Arruda-Boyce ve Yeoh olarak sayılabilir.

Mooney-Rivlin Malzeme Modeli:

Mooney-Rivlin malzeme modeli Melvin Mooney ve Ronald Rivlin tarafından geliştirilmiş ve genellikle malzemenin çekiye maruz kaldığı durumlar için iyi sonuçlar vermektedir (Kim ve ark., 2012). 3 parametrelili Mooney-Rivlin gerinim enerjisi eşitliği 2.7'de verilmiştir.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (2.7)$$

Gerilmenin, gerinim enerjisi cinsinden ifadesi eşitlik 2.8'de verilmiştir.

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (2.8)$$

Gerinim enerjisi eşitliğindeki değişmezler (I , invariant'lar) uzama oranı cinsinden eşitlik 2.9, 2.10 ve 2.11'deki gibi yazılır.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.9)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} \quad (2.10)$$

$$I_3 = (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3)^2 \quad (2.11)$$

Uzama oranı eşitlikleri çekme durumunda eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir.

$$\lambda_1 = \lambda \quad \text{ve} \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.12)$$

$$\lambda = 1 + \varepsilon^{eng} \quad (2.13)$$

Gerilme eşitliğinde yerine yazıldığında uzama oranı cinsinden Mooney-Rivlin eşitliği eşitlik 2.14'deki gibi elde edilmektedir.

$$\sigma_1^{eng} = 2C_{10} \left(\lambda_1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1} \right) + 2C_{01} \left(\frac{1}{\lambda_1 \lambda_3^2} - \frac{1}{\lambda_1^3} \right) + 4C_{20} \left(\lambda_1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1} \right) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2.14)$$

$$\sigma^{eng} = 2C_{10} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) + 2C_{01} \left(1 - \frac{1}{\lambda^3} \right) + 4C_{20} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) (\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3) \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15'de görülen gerilim denklemi için numune deneylerinden elde edilen mühendislik gerilim-gerinim eğrileri üzerinden noktalar seçilir ve eğri uydurma yöntemi ile Mooney Rivlin hiperelastik malzeme katsayıları hesaplanır.

Ogden Malzeme Modeli:

Bu malzeme modelinde Ogden'in elastisite teorisi kullanılmaktadır (Martins ve ark., 2006).

$$W = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (2.16)$$

Neo-Hookean Malzeme Modeli:

Kullanılan en basit hiperelastik malzeme modelidir. Ancak uzama karakteristiği olarak %30-40 derecelerinde uzamalara kadar doğru yaklaşımı sergilemektedir. Bunun üzerinde uzamalarda hata ve sapma payı artmaktadır. Anonim (2010) Neo-Hookean malzeme modeli eşitliğini 2.9'daki gibi vermiştir. 2.9 eşitliğinde verilen G , kayma modülüdür.

$$W = \frac{1}{2} G \cdot (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2.17)$$

Arruda-Boyce Malzeme Modeli:

Arruda ve Boyce zincir istatistik yöntemine dayalı bir malzeme modeli geliştirmişlerdir. Burada eşit l uzunluğundaki bağlantılarla kurulmuş kauçuk zincir modeli oluşturulduğu varsayılmıştır (ANSYS Inc., 2018).

$$W = \mu \cdot \left[\frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_L^2} (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_L^4} (I_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_L^6} (I_1^4 - 81) + \frac{519}{637750\lambda_L^8} (I_1^5 - 243) \right] + \frac{1}{d} \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right) \quad (2.18)$$

Yeoh Malzeme Modeli:

Temelde Rivlin modeli baz alınarak hazırlanmış, ancak sıkıştırılmaz kauçuklar için sadece I_1 gerinim değişmezi kullanılmıştır.

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (2.19)$$

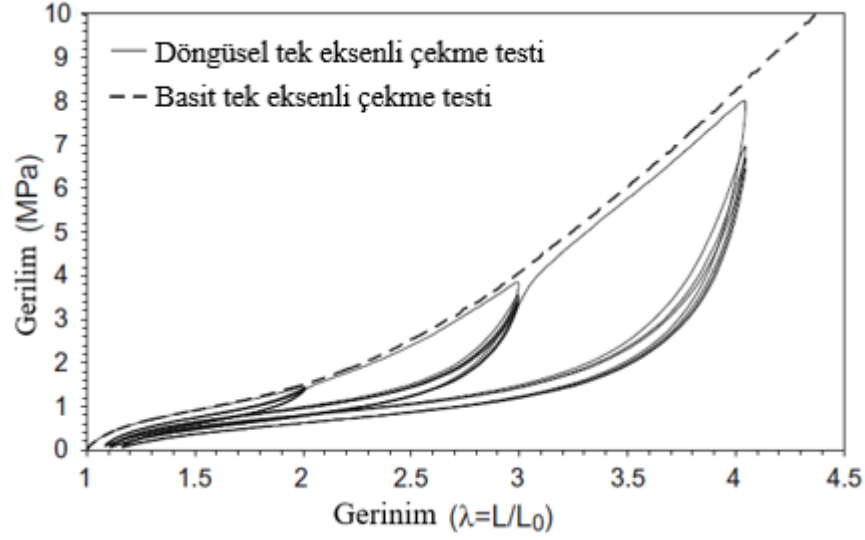
Burada N sayısı için bir kısıt yoktur, ne kadar büyük olursa eğriyi uydurma daha iyi olacaktır. Ancak bu durum malzeme sabitlerini bulurken numerik zorluklar çıkaracağından fazla büyük tutulmaması önerilir (ANSYS Inc., 2018).

2.3. Mullins Etkisi

Analizlerde kullanılmak üzere gerekli olan malzeme modelleri oluşturulurken tek eksenli çekme, iki eksenli çekme veya safi kayma deneyleri ile malzeme karakteristikleri ortaya çıkarılır. Ancak bu deneylerin yapılması esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan birisi Mullins Etkisi'dir. Kauçuk malzemenin deformasyon altında yumuşama durumuna "Mullins Etkisi" denir (Bueche, 1960). Uzun yıllardan beri bilinir ki kauçuklar üzerinde oluşturulan deformasyon onların yumuşamasını sağlar ve ilk seferde elde edilen gerilim-gerinim eğrisi hiçbir zaman tekrar yakalanamaz (Mullins, 1969).

Mullins etkisi moleküler ölçekte incelendiğinde bu durumun temelde iki nedeni olduğu söylenebilir. Birincisi yumuşak ve sert hacimlerin oranlarının şekillenmeyle birlikte değişmesi ve yumuşak hacimlerin oranının fazlalaşmasıyla malzemenin yumuşamasıdır. İkincisi de malzeme içerisinde moleküller arasında geri dönüşümü mümkün olmayan hasarların meydana gelmesi ve sonucunda malzemenin yumuşamasıdır (Cantournet ve ark., 2009).

Deneylerde gerçek gerilim-gerinim eğrisi elde edilebilmesi için yapılması gereken işlem kondisyonlama çevrimidir. Kondisyonlama çevriminde, kauçuk numunesi birkaç kez sıralı şekilde çekilip bırakılır. Böylelikle malzemedeki yumuşama etkisi gözlemlenir ve artık yumuşamanın durduğu noktada deney verileri kullanılır. Diani ve arkadaşlarının (2009) çalışmalarında gösterdikleri üzere Şekil 2.27'de 5 çevrim sonrasında karbon siyahı dolgulu kauçuk malzemenin yumuşama etkisiyle gerilim-gerinim eğrisinin değişmektedir ve sonunda yakınsayarak belirli bir çizgiye oturmaktadır.

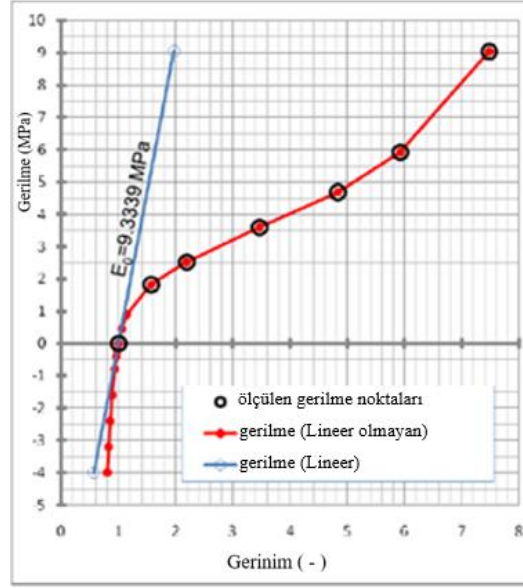


Şekil 2.27. Karbon Siyahı Dolgulu Kauçuğun 5 Çevrimlik Gerilim-Gerinim Eğrileri

2.4. Hiperelastik Malzemelerde Sonlu Elemanlar Analizleri

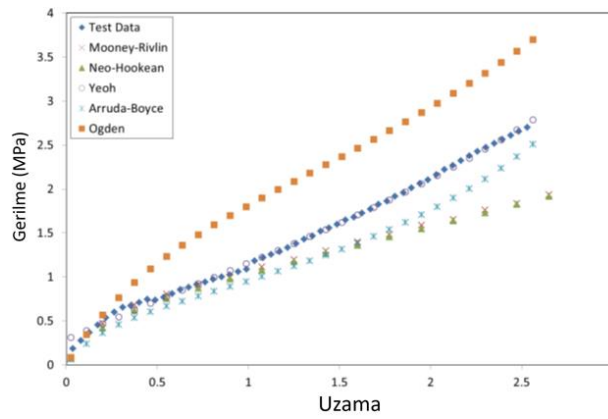
1970’li yılların başından beri ANSYS, ABAQUS, MARC gibi ticari yazılımların geliştirilmesiyle birlikte hiperelastik veya kauçuk türündeki malzemeler için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmeye başlandı. Başlangıçta bu çalışmalar yazılım geliştiriciler tarafından yapılırsa da gün geçtikçe kişisel uygulamalarda ve kişisel tasarımların doğrulanmasında da oldukça sık şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Gent, 2012).

Sonlu elemanlar analizleri temelde lineer (linear) ve lineer olmayan (nonlinear) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Hiperelastik malzemeler, düşük yükler altında yüksek deformasyona uğrayan ve yük-sehim davranışları incelendiğinde genellikle lineerlik göstermedikleri için hiperelastik malzemelerin analizleri gerçekleştirilirken lineer olmayan çözüm yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Jakel (2010)’un Şekil 2.28.’de gösterdiği üzere lineer yöntem olan sabit elastisite kullanımıyla lineer olmayan gerinim-gerilim eğrileri arasında oldukça büyük farklar bulunmaktadır.



Şekil 2.28. Karbon Siyahı Dolgulu Kauçuğun 5 Çevrimlik Gerilim-Gerinim Eğrileri

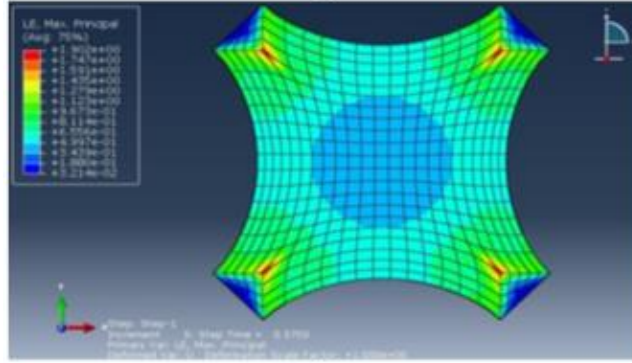
Shahzad ve arkadaşları (2015) çalışmalarında iki eksenli çekme numunesi üzerinde elde ettikleri yük-deplasman eğrilerinden Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Yeoh, Arruda-Boyce ve Ogden gibi farklı malzeme modelleri için katsayılar elde etmişler ve test sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Şekil 2.29. ve Şekil 2.30.'da gösterdikleri üzere elde ettikleri malzeme modellerinden kendileri için en uygun olanın Yeoh olduğuna karar vermişlerdir.



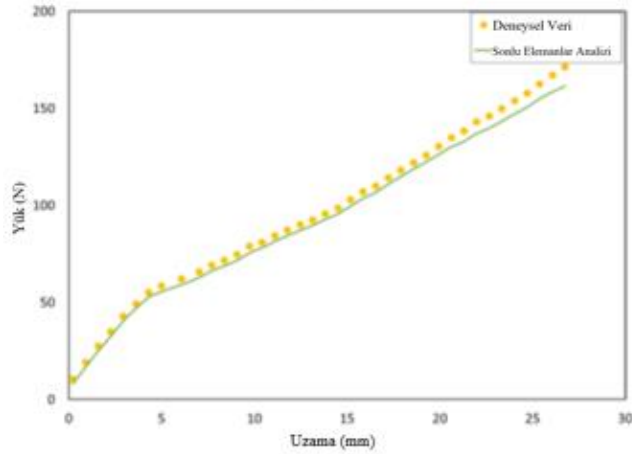
Şekil 2.29. İki eksenli çekme deneyi için farklı malzeme modelleri



(a)



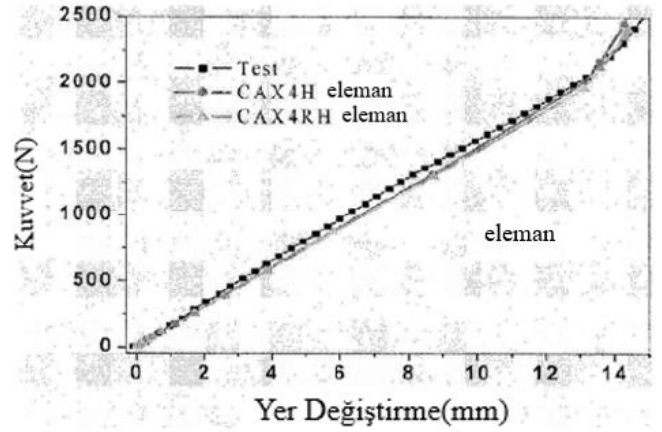
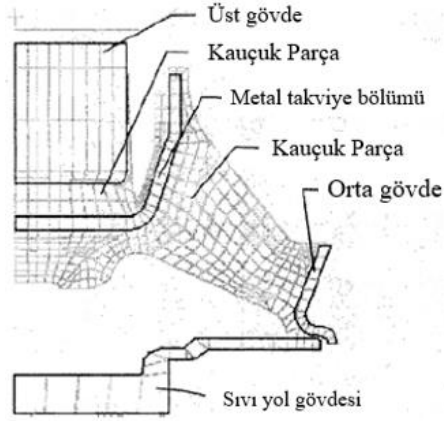
(b)



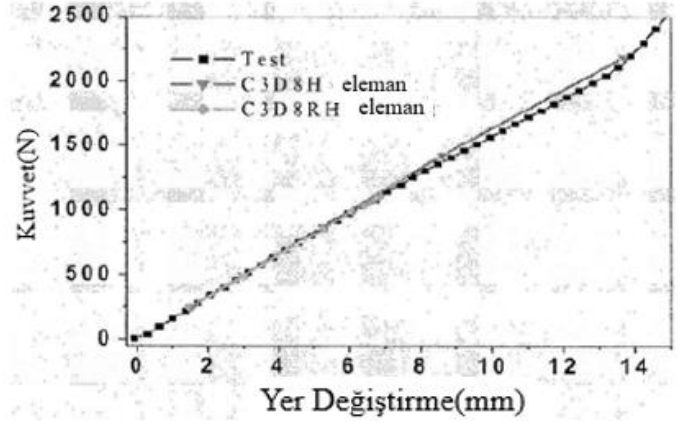
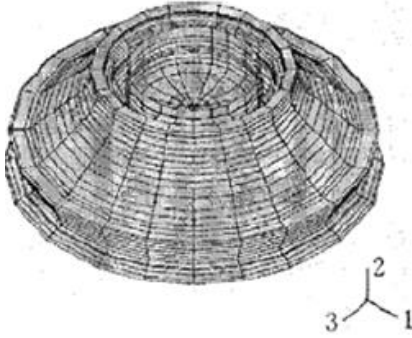
(c)

Şekil 2.30. İki eksenli çekme deneyi ile Yeoh modelinin kıyaslanması

Wang ve arkadaşları (2002) ise çalışmalarında hiperelastik burç modellenmesinde sonlu elemanlar analizinde kullanılan eleman yapılarının farklılıklarını incelemişlerdir. ABAQUS yazılımında kullanılan aksenal simetrik 2 boyutlu CAX4H eleman tipiyle, 3 boyutlu C3D8H eleman tiplerinin sonuçlarını Şekil 2.31. ve Şekil 2.32.'deki gibi göstermişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde 2 boyutlu modelleme ile 3 boyutlu modelleme arasında kabul edilebilir farklılıklar olduğu görülmektedir.

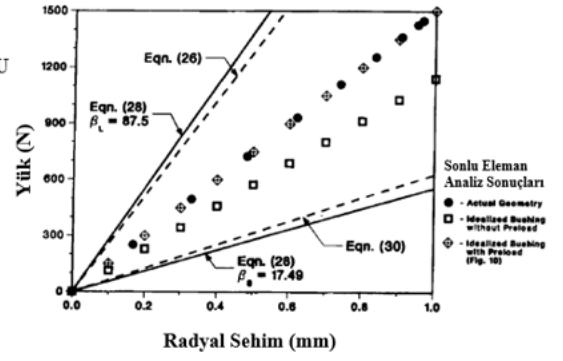
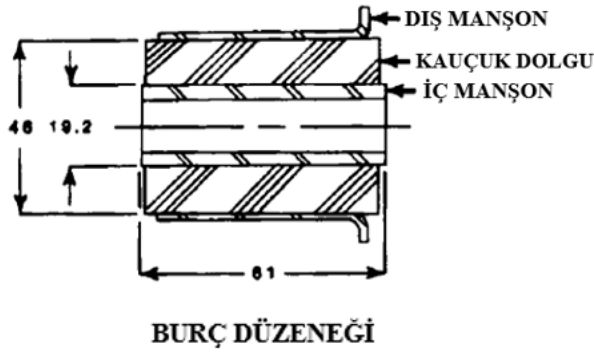


Şekil 2.31. 2 Boyutlu Eksenel Simetrik Modellemeyle Test Sonuçlarının Kıyaslanması



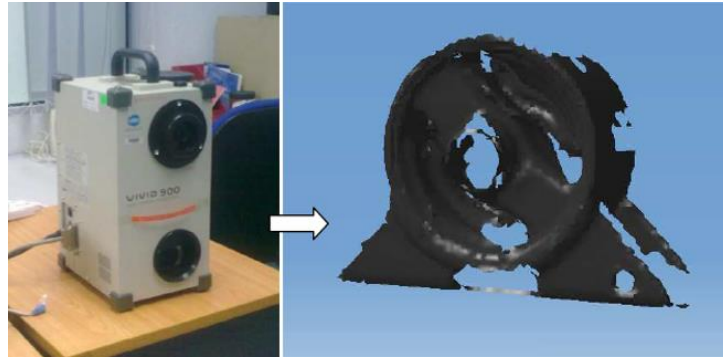
Şekil 2.32. 3 Boyutlu Modellemeyle Test Sonuçlarının Kıyaslanması

Morman ve Pan (1987) kauçukların sıklıkla kullanıldıkları burç parçası üzerine çalışmışlardır. Burç parçaları genellikle kullanıldıkları yere göre belirli bir toleransta daha küçük çaptaki yuvalara çakılırlar ve belirli ön gerilme altında çalışırlar. Morman ve Pan (1987)'da bu çalışmalarında ön gerilmeli ve ön gerilmemiş olarak kauçuk burçların radyal yük altındaki sehimlerinin değişimini Şekil 2.33.'deki gibi göstermişlerdir. Şekilde de görüldüğü üzere ön gerilmeli olarak radyal yüke maruz kalan burç aynı kuvvet altında daha az deformasyona uğramaktadır.

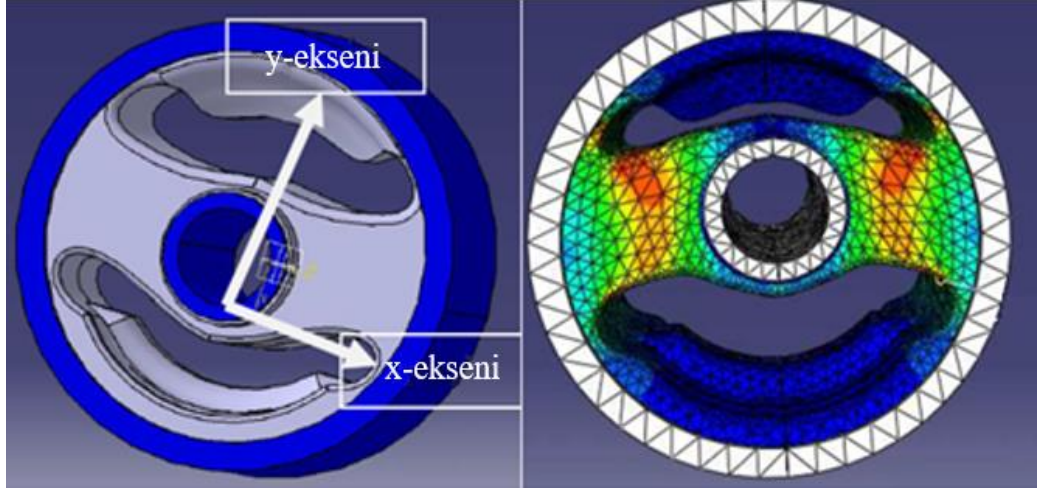


Şekil 2.33. Ön gerilmeli ve Ön gerilmemiş olarak radyal yük altındaki burç kuvvet-deplasman eğrileri kıyaslaması

Samad ve arkadaşları (2011) çalışmalarında dairesel motor titreşim takozunun en kritik bölgesinin tespit edilebilmesi için analiz çalışması gerçekleştirmişlerdir. Üzerinde çalıştıkları ürünün 3 boyutlu geometrisi ellerinde olmadığından tersine mühendislik araçlarından faydalanmışlar ve Şekil 2.34.'de görüldüğü üzere tarama cihazıyla ürünün nokta bulutunu bilgisayar ortamına aktarmışlardır. Sonrasında elde edilen geometri üzerinden analizlerini gerçekleştirerek motor titreşim takozu üzerindeki en yüksek gerilme yığılma bölgesini tespit etmişlerdir (Şekil 2.35).

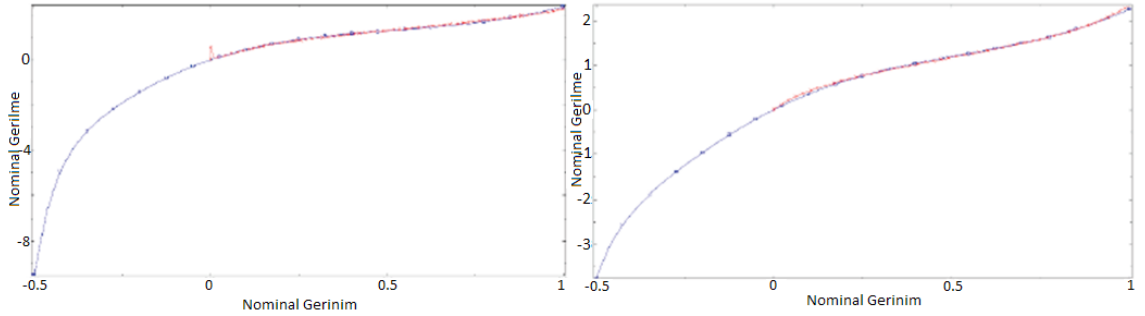


Şekil 2.34. 3 Boyutlu tarama ve elde edilen nokta bulutu

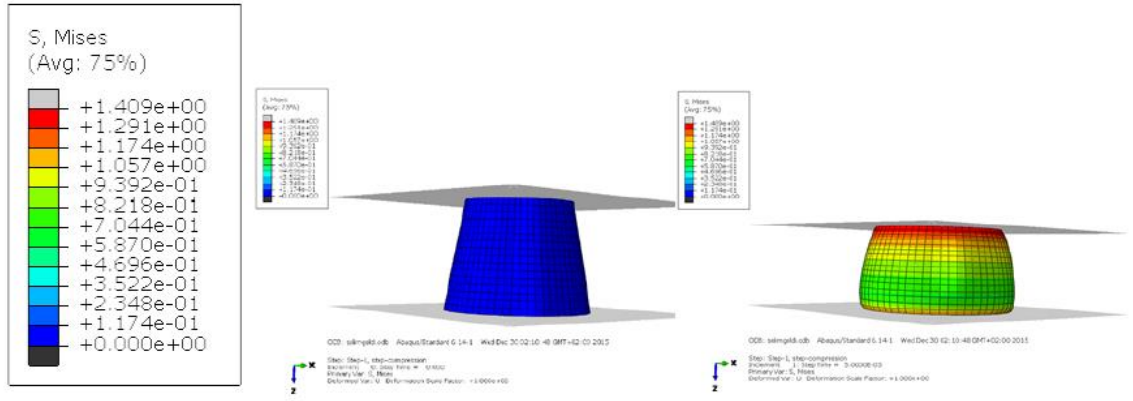


Şekil 2.35. Elde Edilen Final Geometri ve Analizde Hesaplanan Kritik Bölge

Erkek (2016) yüksek lisans tez çalışmasında kauçuk olan araç kapı stoperi parçasının test yoluyla malzeme karakteristiğini elde etmiştir (Şekil 2.36). Sonrasında hiperelastik malzeme modellerinden kendisi için en uygun olanına karar vererek katsayıları elde etmiş ve stoper parçası için yük-sehim analizleri gerçekleştirmiştir (Şekil 2.37).

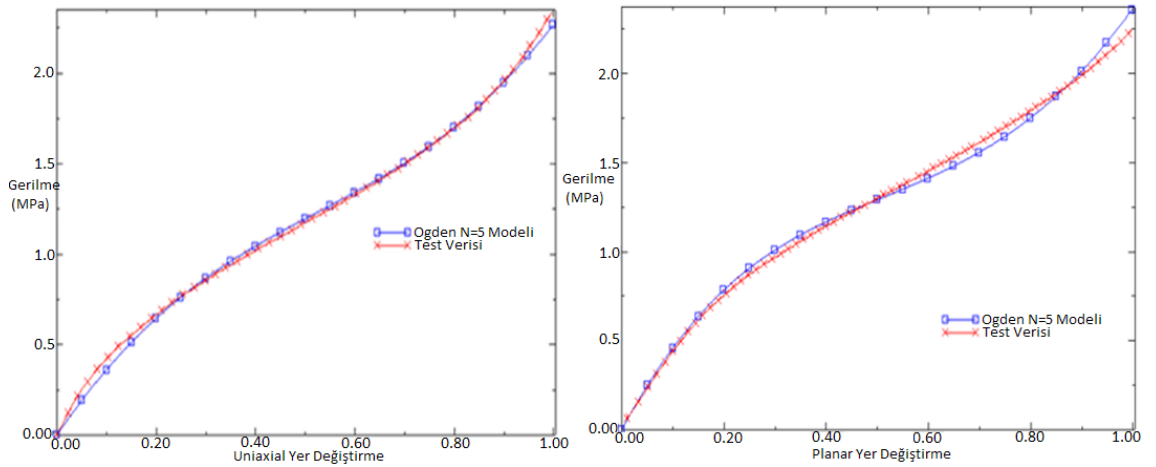


Şekil 2.36. Tek eksenli ve düzlem çekme test sonuçları ile Ogden Malzeme Modeli

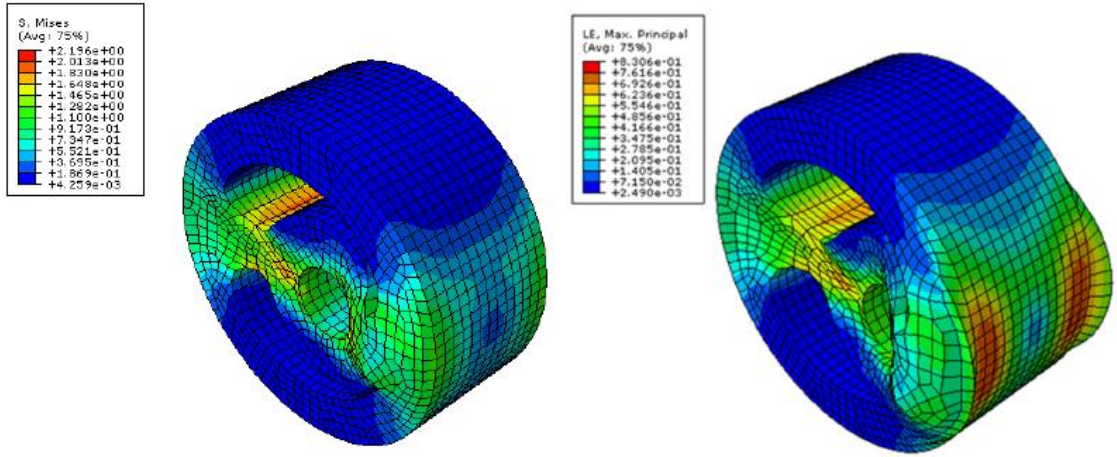


Şekil 2.37. 16mm yüksekliğindeki stoperin 4mm sıkıştırılması sonuçları

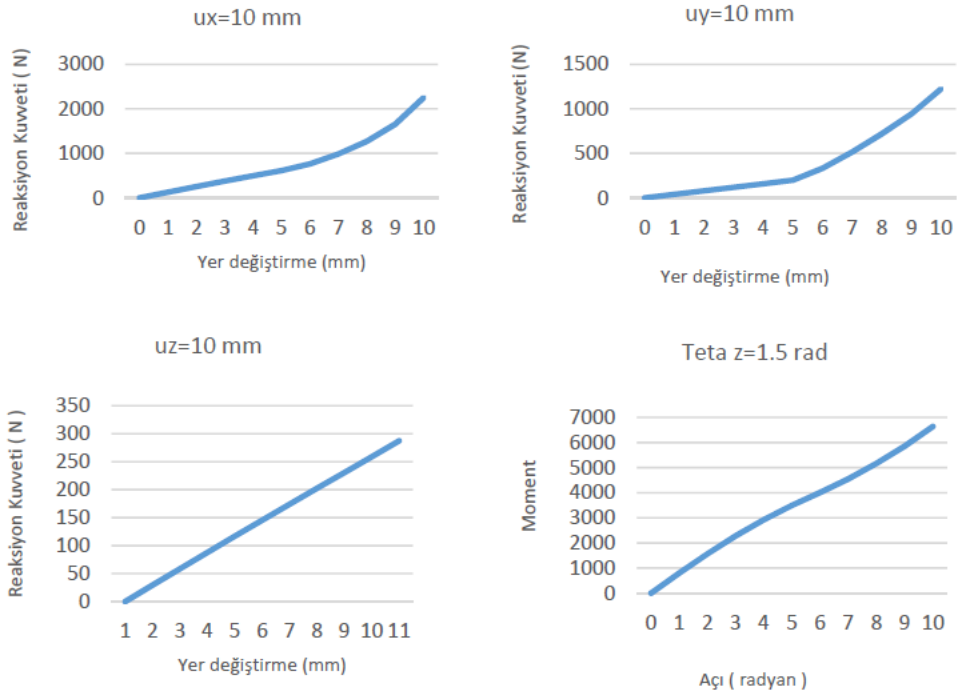
Erkek ve arkadaşları (2015) ayrıca kauçuk burçların radyal, aksenal ve torsiyonel rijitliklerinin elde edilmesi konusunda da çalışmışlardır. Aynı şekilde tek eksenli ve düzlem çekme deneylerinden elde ettikleri veriler üzerinden Ogden malzeme modeli oluşturmuşlar (Şekil 2.38) ve burcun 4 yönde yükleme analizlerini gerçekleştirerek (Şekil 2.39), rijitlik grafiklerini paylaşmışlardır (Şekil 2.40).



Şekil 2.38. Tek eksenli ve düzlem çekme test sonuçları ile Ogden Malzeme Modeli

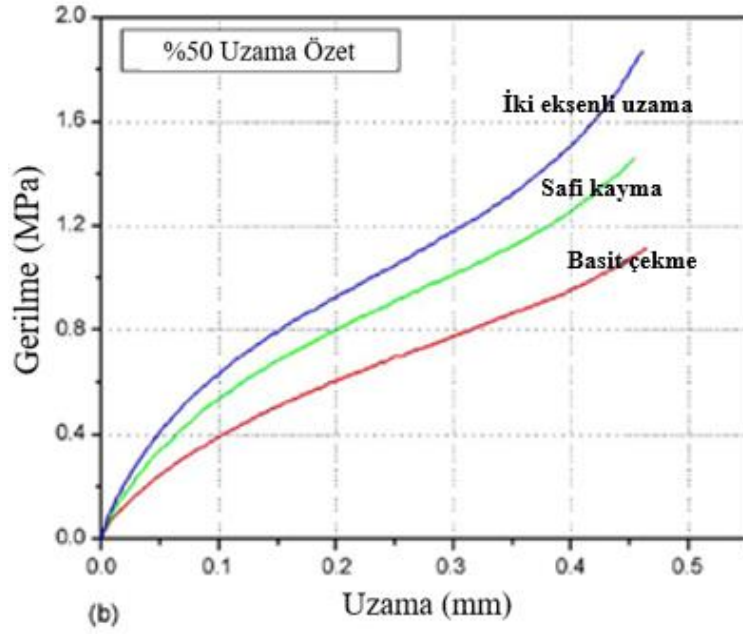


Şekil 2.39. Radyal yükleme sonucu parça üzerindeki gerilme dağılımları

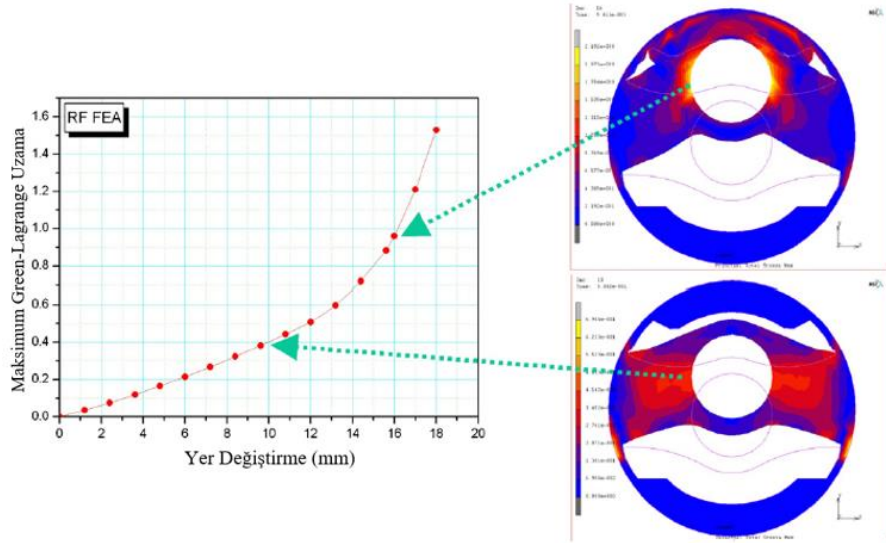


Şekil 2.40. Elde edilen rijitlik eğrileri

Woo ve arkadaşları (2008) benzer bir çalışma yaparak tek eksenli çekme, iki eksenli çekme deneyleri gerçekleştirmişler (Şekil 2.41) ve Ogden malzeme modeli ile kauçuk parça üzerindeki en yüksek gerininin yığıldığı bölgeleri tespit etmişlerdir (Şekil 2.42).

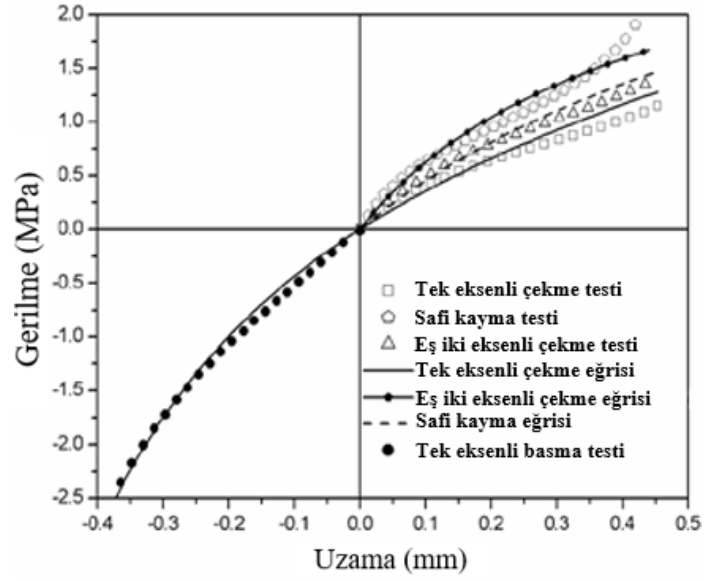


Şekil 2.41. Malzeme Testleri Sonuçları

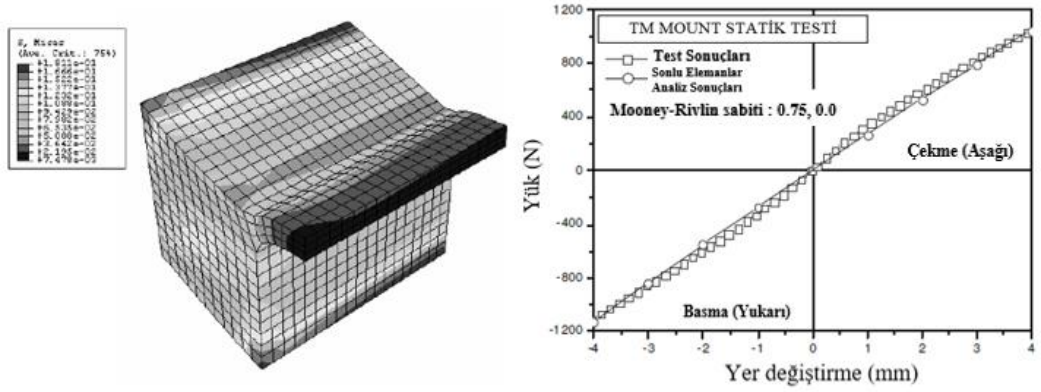


Şekil 2.42. Deplasmana Bağlı Bölgesel Gerinim Değişimi

Kim ve arkadaşları (2005) çalışmalarında malzeme doğrulamanın dışından ürün doğrulamayı da incelemişlerdir. Çalışma adımları olarak, numuneden malzeme testi yapılması (Şekil 2.43), malzeme için hiperelastik malzeme modeli oluşturulması, ürün analizlerinin gerçekleştirilmesi ve ürün testleri ile analizlerin doğrulanması şeklinde çalışmışlardır.



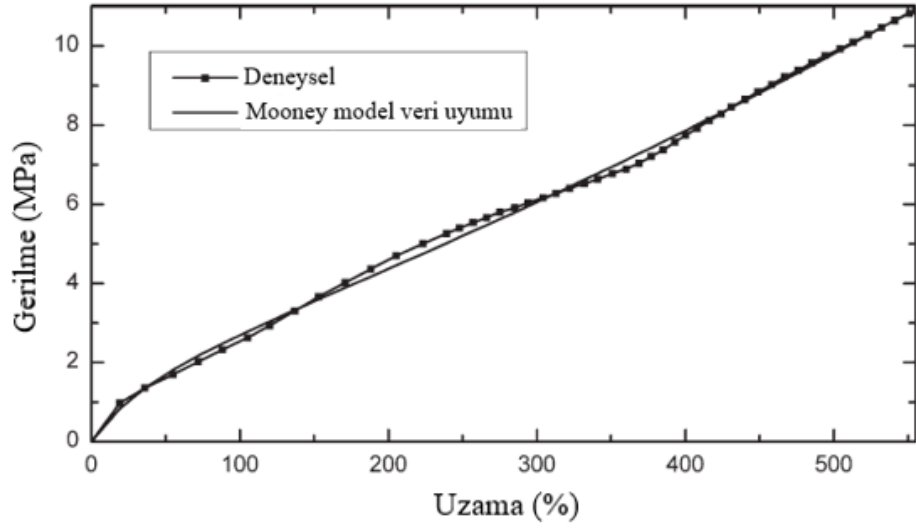
Şekil 2.43. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları



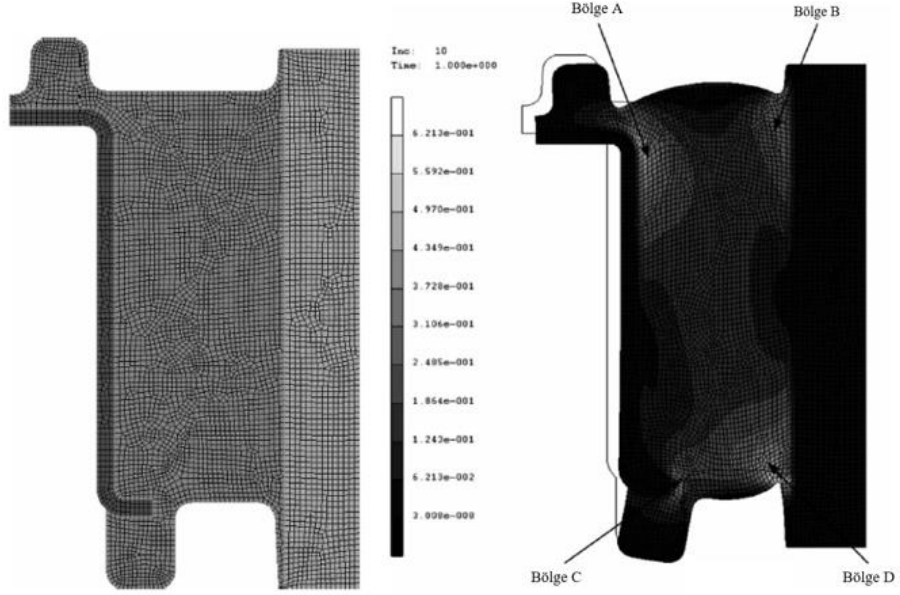
Şekil 2.44. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları

Şekil 2.44.'te de görüldüğü üzere kullanılan Mooney-Rivlin malzeme modeliyle ürün test sonuçları ile ürün analiz sonuçları birbirine oldukça yakındır.

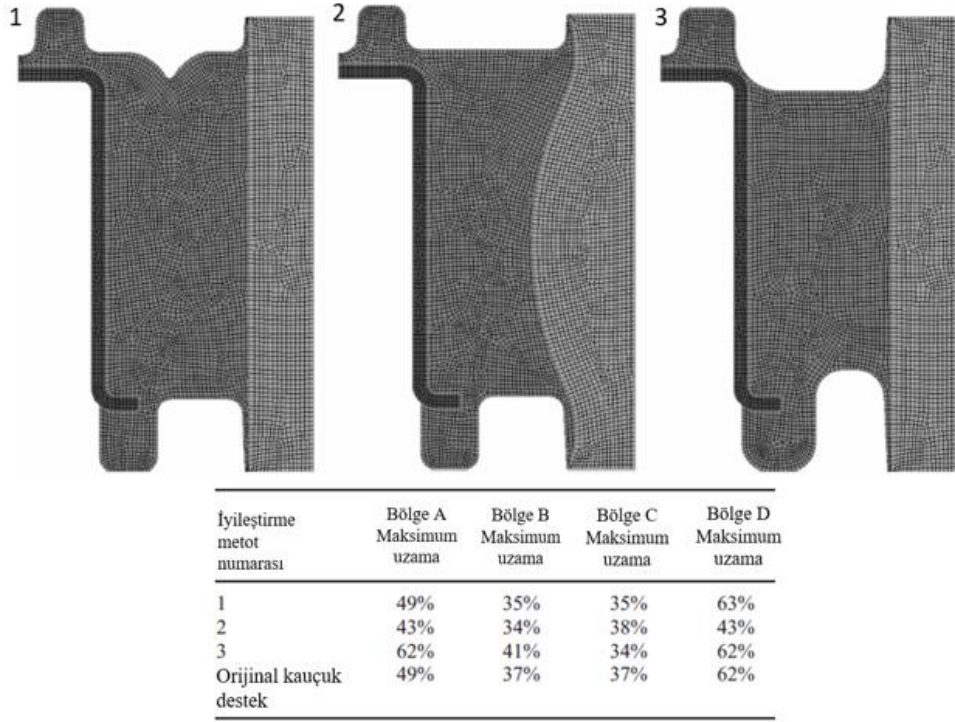
Zhao ve arkadaşları (2008) numune üzerinden elde ettikleri gerinim-gerilim eğrisi üzerine Mooney-Rivlin eğrisi uydurarak katsayıları hesaplamışlardır (Şekil 2.45). Sonrasında MARC yazılımı yardımıyla kauçuk burcun yük altındaki gerilmelerini incelediler (Şekil 2.46) ve elde edilen gerilim yığılmalarına bağlı olarak ürün geometrisi üzerinde optimizasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Böylelikle Şekil 2.47.'de de görüldüğü gibi kauçukla metal birleşim yerlerindeki gerilim değerlerini düşürmüş ve parçanın kullanım ömrünü uzatmış oldular.



Şekil 2.45. Numune Testlerinin Gerinim-Gerilim Sonuçları



Şekil 2.46. Mevcut Burcun Sonlu Elemanlar Yapısı ve Gerilim Dağılımları



Şekil 2.47. Yapılan Optimizasyon Çalışmaları ve Parçalar Üzerindeki Gerinim Değerleri

Literatürde hiperelastik malzemelerin sonlu elemanlar metoduyla lineer olmayan yöntemlerle hesaplanmasında izlenen adımlar genellikle aşağıdaki gibidir.

- Numune üzerinden belirlenen test yoluyla kuvvet-uzama veya gerinim-gerilim grafiklerinin elde edilmesi (bu yöntemler bölüm 2.1’de detaylı olarak gösterilmiştir).
- Tercih edilen hiperelastik malzeme modellerinin eğri uydurma yöntemiyle katsayılarının belirlenmesi (bu yöntemler bölüm 2.2’de detaylı olarak gösterilmiştir).
- Belirlenen malzeme modeli ile numunenin test koşullarının analiz edilerek malzeme katsayılarının doğrulanması.
- Doğrulanmış malzeme modeli ile kompleks geometriye sahip istenilen herhangi bir kauçuk ürünün sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi.
- Mümkünse ürün test sonuçları ile bu ürün analizlerinin doğrulanması.
- Mümkünse elde edilen ürün analizleri sonuçları üzerinden ürün geometrisinde iyileştirmeler yapılarak geometrinin optimize edilmesi ve daha iyi sonuçlar elde edilmesi.

Bu çalışmalarda genellikle son iki adım olan ürün doğrulaması ve bu doğrulama sonrasında iyileştirme çalışmalarına sık rastlanmamaktadır. Bu çalışmada yukarı bahsi geçen tüm adımlar gerçekleştirilmiştir ve son ürün olarak motor kasnak parçasının (şekil 2.48) en iyilenmiş (optimize edilmiş) geometrisine kadar ulaşılmıştır.



şekil 2.48. Motor Kasnak Parçası

3. MATERYAL VE YÖNTEM

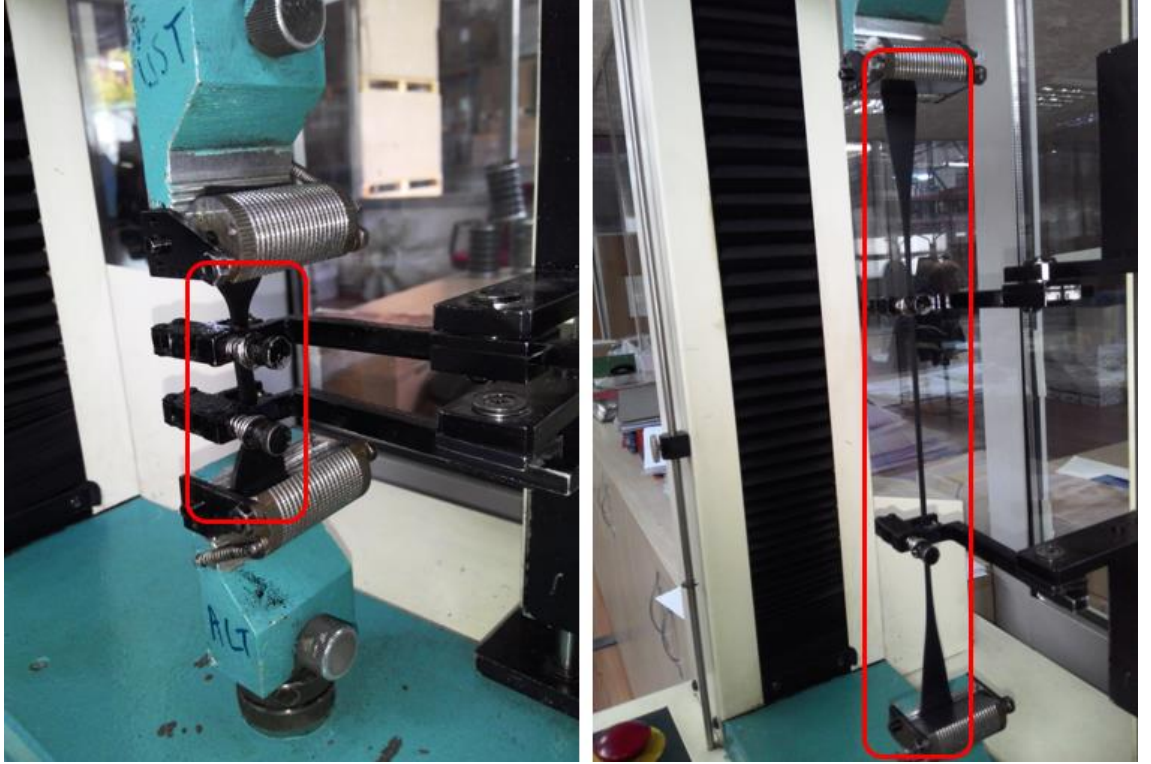
3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi ve Deney Düzenegi

Motor kasnağı metal ve kauçuk malzemelerden oluşan bir parçadır. Kasnak parçasında kullanılan metal malzeme St52 diye adlandırılan akma dayanımı 355 MPa olan kolaylıkla mekanik özelliklerinin elde edilebildiği oldukça bilindik bir malzemedir. Kauçuk için kullanılan malzeme ise 65 Shore sertliğe sahip doğal kauçuktur (NR). Kauçuk malzemesinin tek eksenli çekme deneyi sonunda kuvvet-uzama karakteristiğinin elde edilebilmesi için öncelikle ISO37 standartlarında belirtilen şekliyle (Şekil 2.15) numune hazırlanmıştır. Çekme numuneleri, düz plakalar şeklinde üretilen doğal kauçuk malzemesinin kesme kalıpları vasıtasıyla kesilmesiyle elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çekme Deneyi Numuneleri

Elde edilen numunelerin çekme deneyleri ise Zwick marka çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Numuneler çekme cihazına alt ve üst çenelerden bağlandıktan sonra çekme işlemi gerçekleştirilmiş ve numuneler kopana kadar çekme işlemi devam ettirilmiştir (Şekil 3.3). Böylelikle deney sonrasında 65 shore sertliğe sahip doğal kauçuğun kuvvet-uzama eğrileri elde edilmiştir.



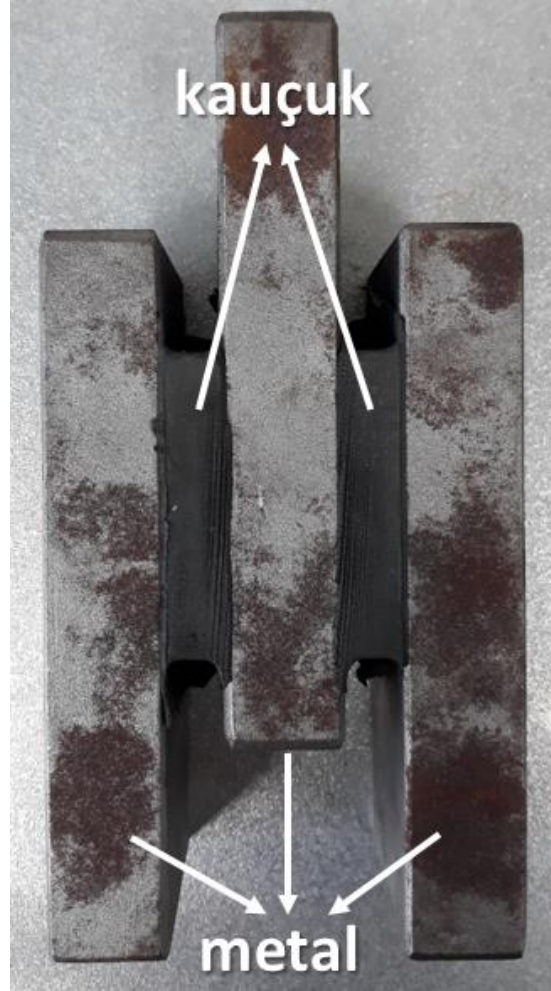
Şekil 3.2. Çekme Deneyi Öncesi ve Sonrası Numune Uzaması



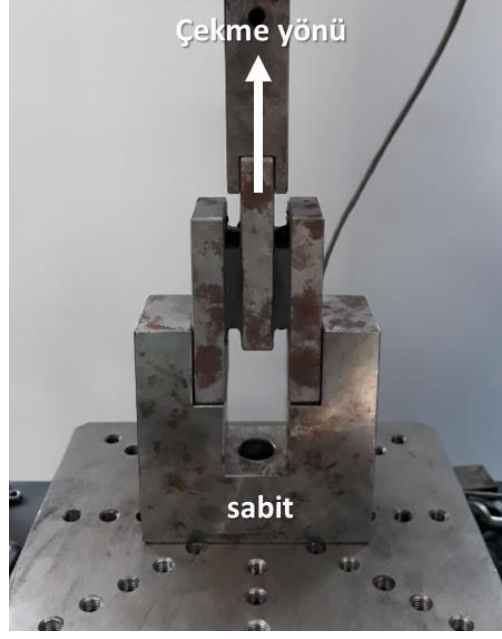
Şekil 3.3. Çekme Deneyi Sonrası Kopan Numune Örneği

3.2. Safi Kayma Deneyi ve Deney Düzenegi

65 shore sertlikteki dogal kauçuk malzemesinin kayma yüklemesi altında kuvvet-uzama eğrilerinin elde edilebilmesi için gerekli olan deney safi kayma deneyidir. Bu deneyin gerçekleştirilebilmesi için hazırlanan numune sadece kauçuk malzemesinden elde edilmemektedir. Konu başlığı 2.1.4’de detaylıca anlatıldığı üzere safi kayma deneyi için metal-kauçuk bileşenli numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler hazırlanırken kauçuk malzemesi ile birlikte metal malzemesi yapıştırıcı vasıtasıyla vulkanize edilmiş ve tek bir parça gibi davranması sağlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Safi Kayma Deneyi Numune Örneği



Şekil 3.5. Safi Kayma Deney Düzenegi

Kayma deneyi numuneleri çekme cihazına bağlanarak metal kısımlarından kauçuklar üzerinde kayma yüklemesi oluşturacak şekilde çekilerek uzatılmıştır (Şekil 3.5). Alt kısım sabit, üst çene hareketli olacak şekilde kauçuk numunelerinin kayma yüklemesi altındaki kuvvet-uzama karakteristikleri elde edilmiştir.

3.3. Kasnak Burulma Deney Düzenegi

Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamaları gerçekleştirilecek olan kasnak parçası için elde edilen sonuçların doğruluğunu görebilmek adına bir kasnak burulma deney düzenegi tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Yapılan çalışmanın gerçek hayatta uygulanabilir olabilmesi açısından kasnak üreticisi bir firma ile görüşülerek binek araçlarda kullanılan kasnakların geometrileri, hareket sınırları ve kasnağın dayanması beklenen tork değerleri gibi bilgiler elde edilmiştir. Alınan bilgilere göre kullanılan en büyük kasnak parçasının hareket kabiliyeti $\pm 10^\circ$ ve 700 Nm tork olduğu görülmüştür. Kasnak burulma deney cihazının tasarım kriteri olarak bu değerlerin üzerinde emniyetli açılar ve torklar seçilerek $\pm 15^\circ$ ve 1000 Nm tork üretebilen bir servomotor seçilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Burulma Hareketini Sağlayan Servomotor

Seçilen servomotorun özellikleri;

Burulma Momenti: 1000 Nm

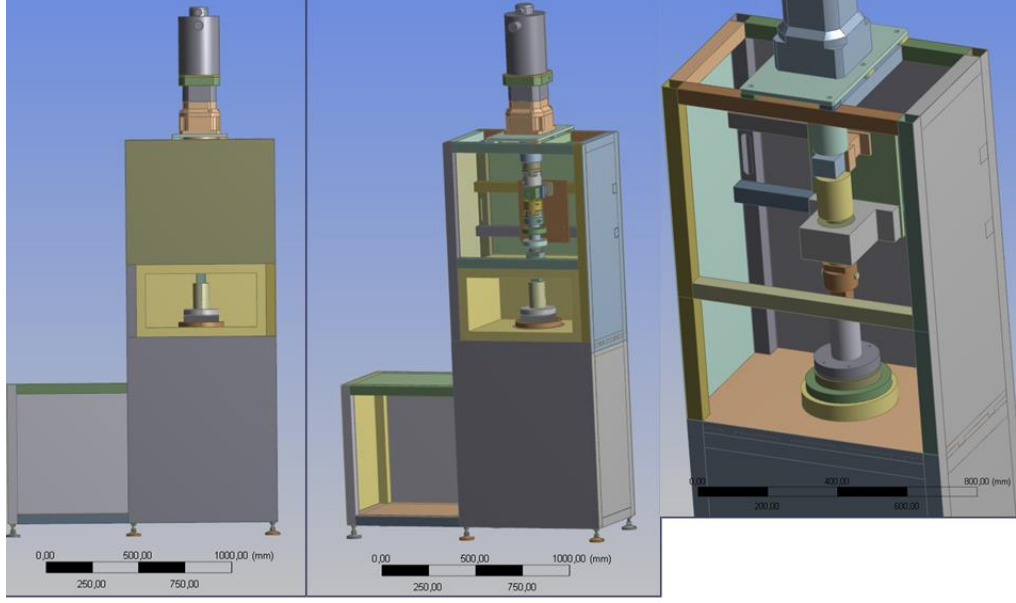
Maksimum Test Hızı : $\pm 15^\circ / 3,5$ Hz

Motor Gücü : 11 kW

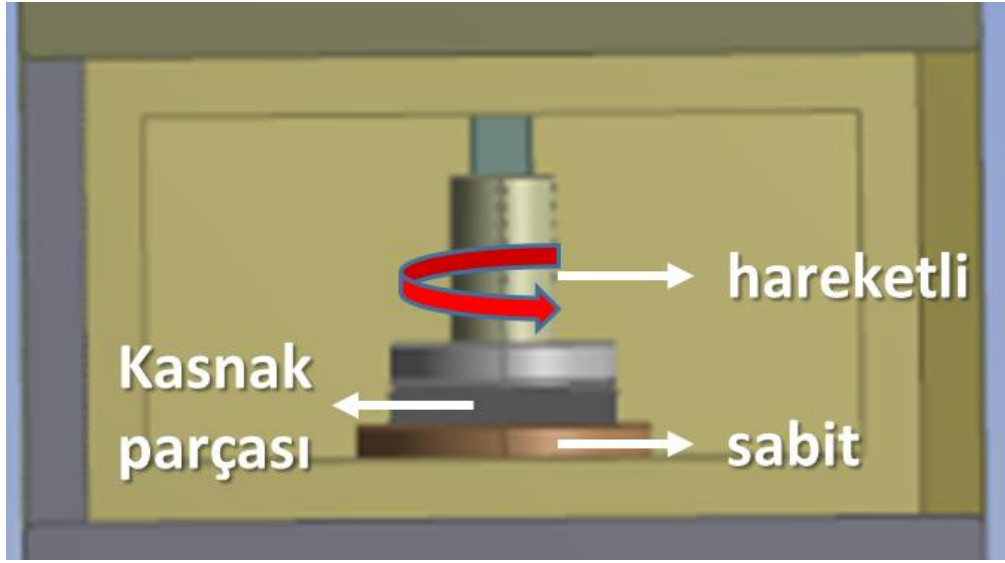
Motor Devri : 1500 dev/dk

Redüktör Çevrim Oranı : 1/15

Tasarımı yapılan burulma deney cihazı 50x50x2 mm ebatlara sahip profil karkas yapıya sahiptir (Şekil 3.7). Servomotorun, burulma hareketini kasnak parçasına aktarabilmesi için rulman gurubu kullanılmıştır (Şekil 3.8). Deney cihazının kullanımı için bilgisayar üzerinden kontrol edilebilen bir kontrol panosu oluşturulmuştur. Böylelikle deney esnasında elde edilen tüm çıktılar, bilgisayar ortamında görüntülenebilir ve muhafaza edilebilir hale gelmiştir.

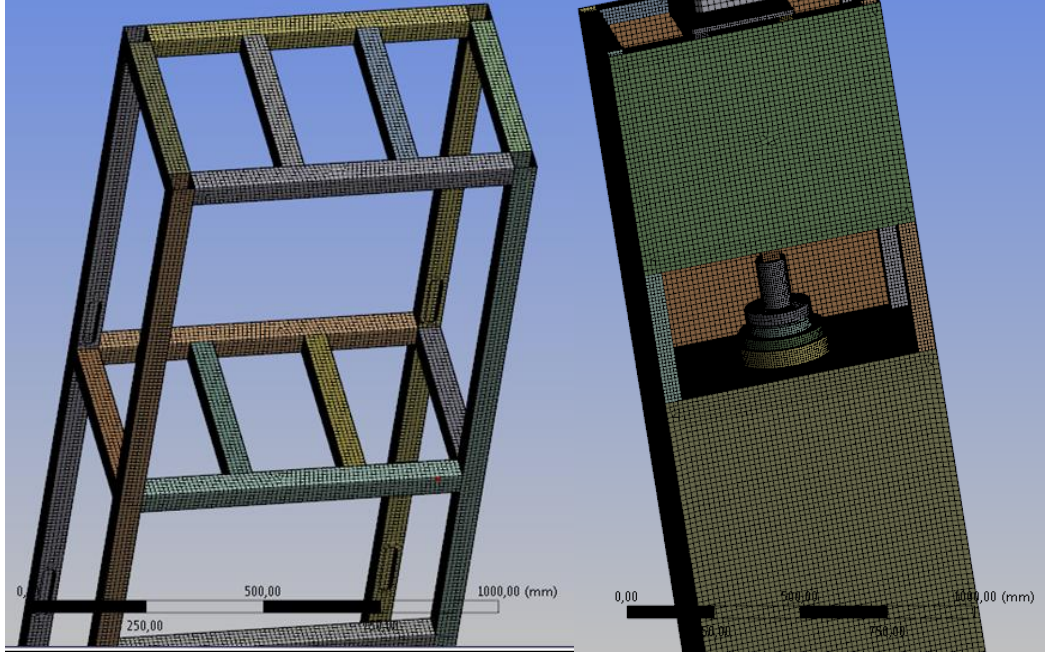


Şekil 3.7. Kasnak Burulma Deney Cihazı Tasarımı

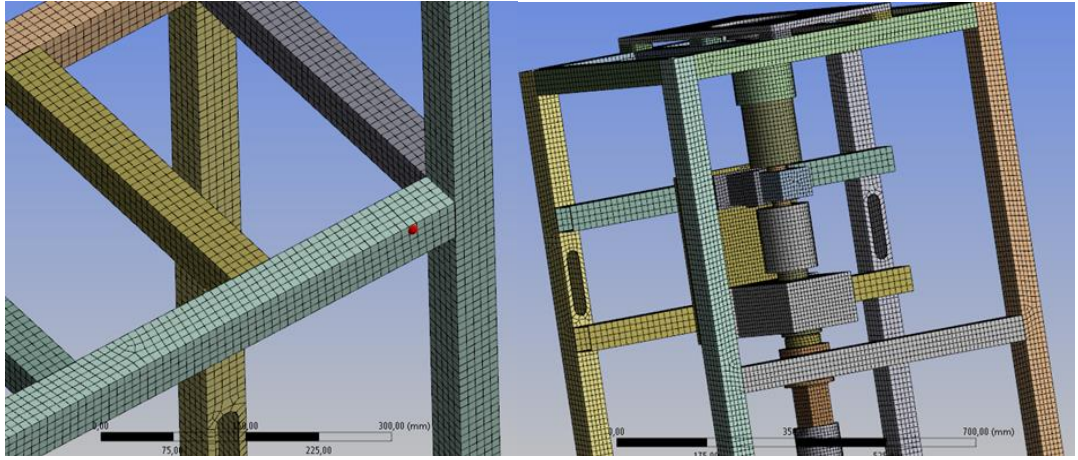


Şekil 3.8. Deney Yapılan Bölgenin Detay Görünümü

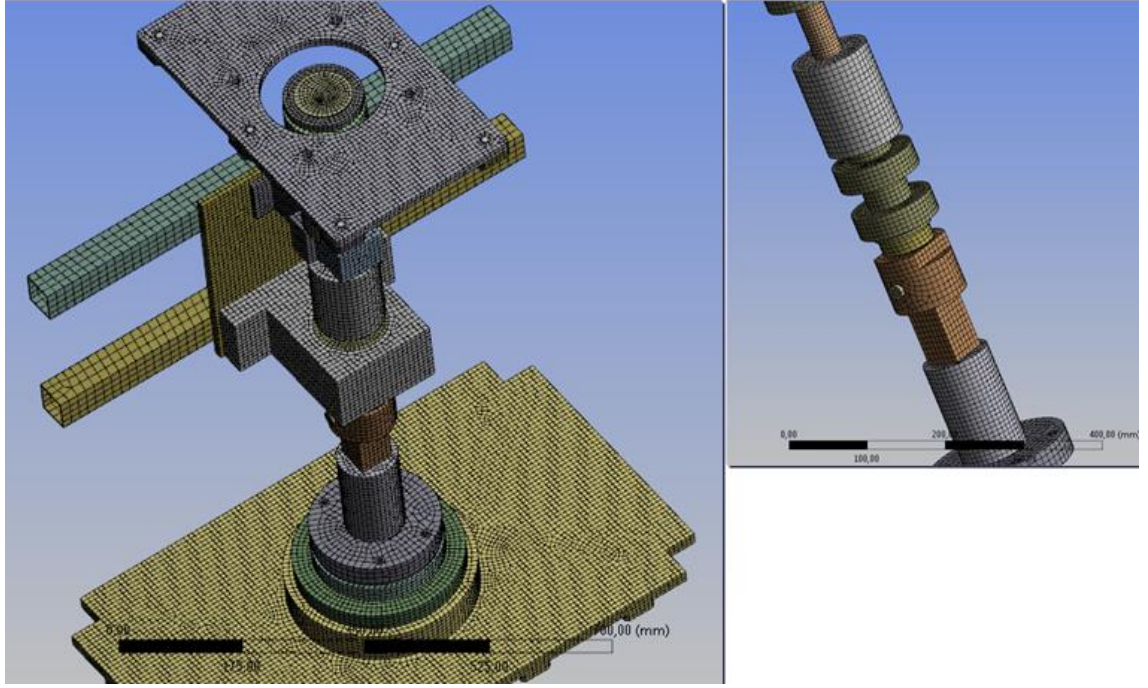
Tasarımı yapılan kasnak burulma test cihazının çalışması esnasında problemler yaşanmaması açısından ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir, model detayları ve analiz sonuçları Şekil 3.9 - Şekil 3.15 arasında gösterilmiştir. Sonrasında deney cihazını oluşturan parçalar üzerindeki deformasyonlar ve gerilmeler incelenmiştir. Böylelikle deney cihazının tasarımı doğrulanarak imal edilmiştir.



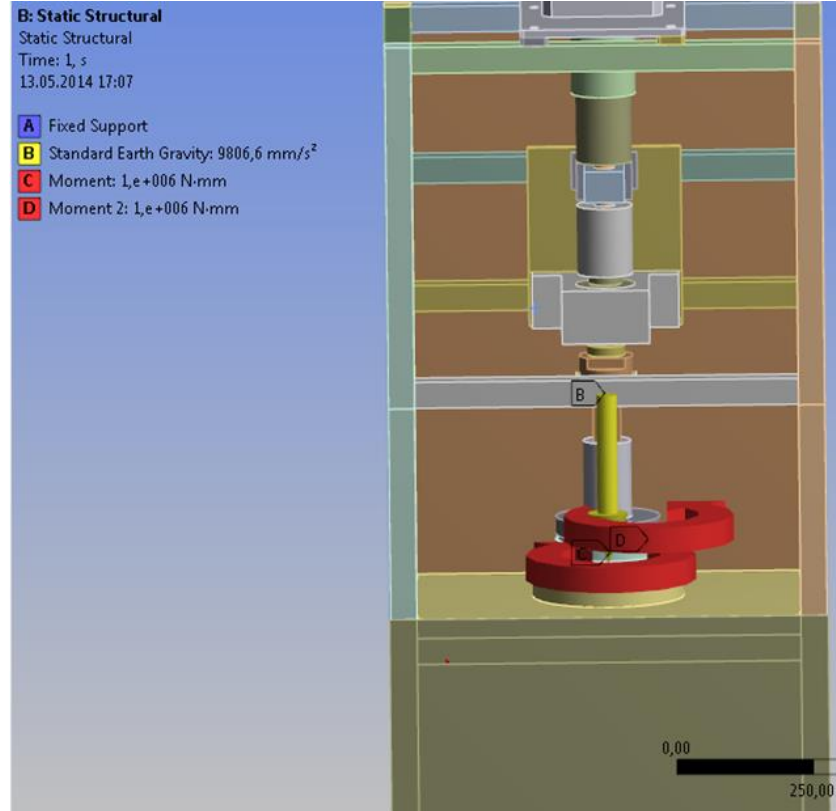
Şekil 3.9. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-1



Şekil 3.10. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-2

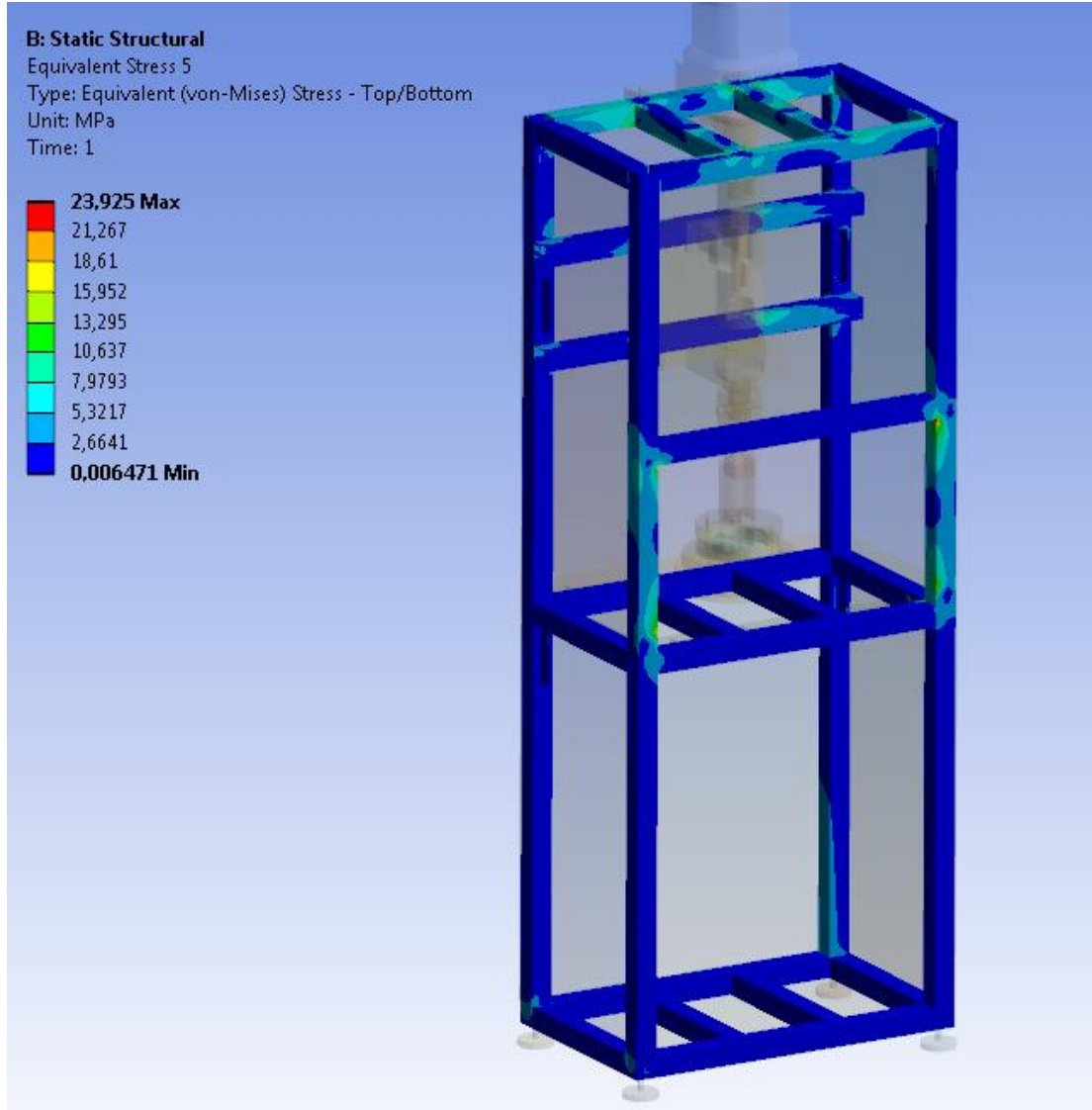


Şekil 3.11. Kasnak Burulma Deney Cihazının Sonlu Elemanlar Modeli-3

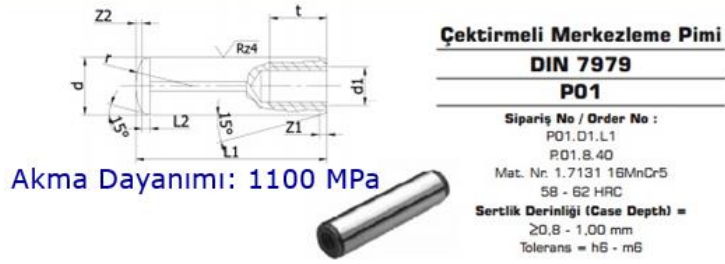
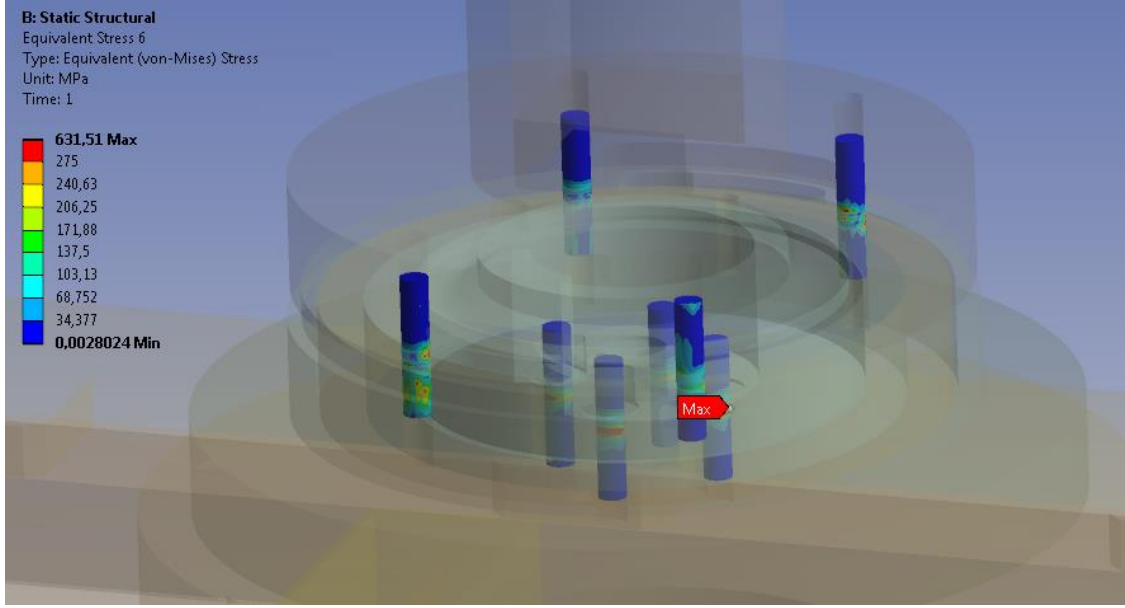


Şekil 3.12. Kasnak Burulma Deney Cihazı Analizleri için Sınır Şartları

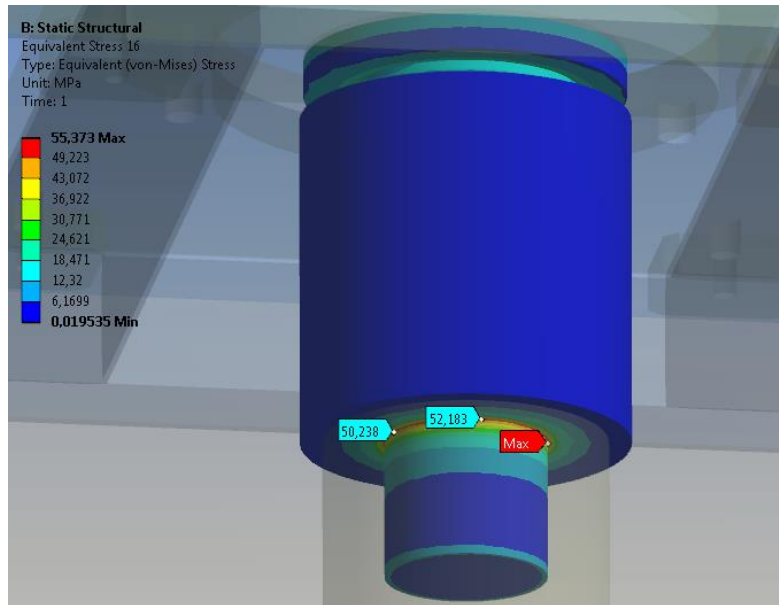
Kasnak burulma deney cihazının tasarım doğrulaması safhasında, cihazın yere basan ayaklarından sabit sınır şartı girilmiştir. Servomotorun maksimum kapasitesi olan 1000 Nm moment kasnağın iç sabitleme ve burulmaya maruz kalan dış kısmına ayrıca uygulanmıştır. Böylelikle deney esnasında cihazın karkas yapısı ve bağlantı bölgelerindeki zorlanmalar incelenerek tasarım gözden geçirilmiştir.



Şekil 3.13. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı Üzerindeki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 3.14. Kasnak Parçası Sabitleme Pimleri Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 3.15. Bağlantı Parçaları Üzerindeki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

Kasnak burulma deney cihazı sonlu elemanlar analizleri sonuçları incelendiğinde;

- Profil karkas yapısı üzerinde elde edilen maksimum gerilme $24\text{MPa} < 235\text{MPa}$ (malzeme akma dayanımı)
- Kasnak parçası sabitleme pimleri üzerinde elde edilen maksimum gerilme $632\text{MPa} < 1100\text{MPa}$ (malzeme akma dayanımı) olduğu görülmüştür.

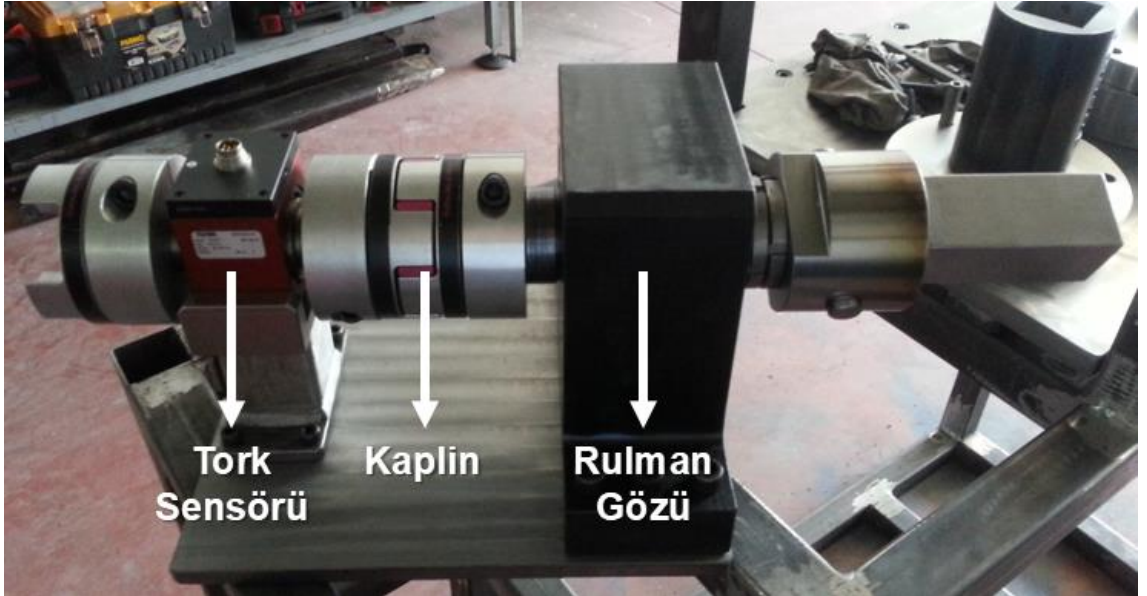
Böylelikle tasarımı yapılan kasnak burulma deney cihazının istenilen maksimum burulma momenti yükü altında mukavemet açısından sorunsuz çalışacağı değerlendirilmiş ve imalat safhasına geçilmiştir (Şekil 3.16 - Şekil 3.22).



Şekil 3.16. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı İmalatı-1



Şekil 3.17. Kasnak Burulma Deney Cihazı Profil Yapısı İmalatı-2



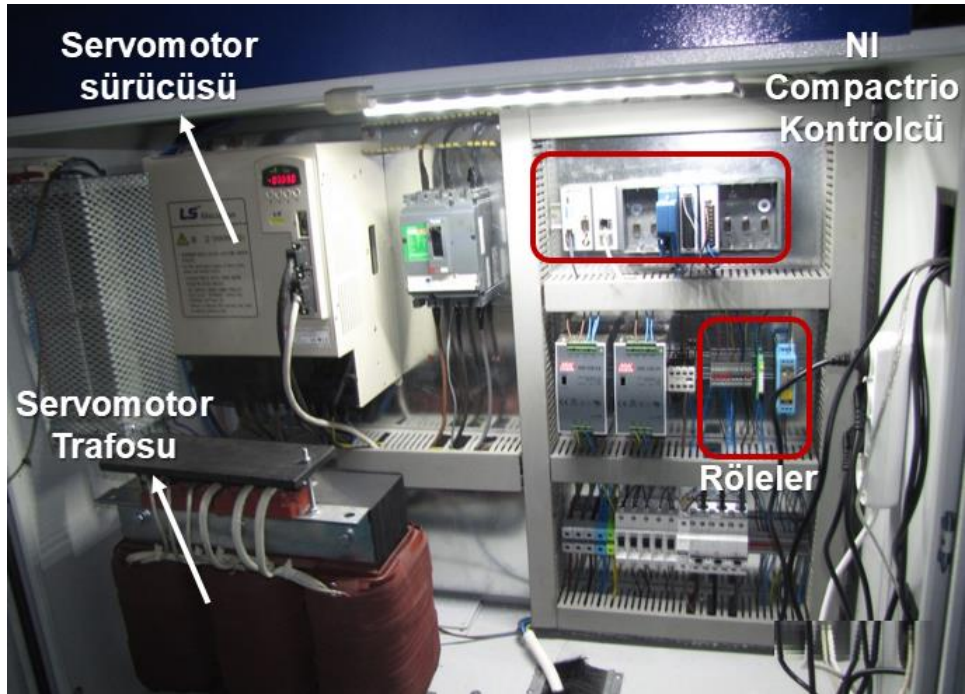
Şekil 3.18. Rulman, Kaplin ve Tork Sensörü Montajı



Şekil 3.19. Kasnak Burulma Deney Cihazı Genel Montaj Yapısı



Şekil 3.20. Kasnak Burulma Deney Cihazı Ana Montaj



Şekil 3.21. Kasnak Burulma Deney Cihazı Kontrol Panosu



Şekil 3.22. Kasnak Burulma Deney Cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde kauçuk-metal bileşenli motor kasnağı parçasının belirli açılarda döndürülerek burulmasıyla meydana gelen momentler ve kauçuk malzemede oluşan gerilmeler sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sonrasında yapılan sayısal çalışmaların doğruluğunun teyit edilebilmesi için aynı şartları temsilen kasnak parçası deney yöntemiyle de incelenmiştir. Son olarak kasnak parçasının geometrisi üzerinde tasarım optimizasyonu gerçekleştirilerek en iyilenmiş tasarım elde edilmiştir.

Hiperelastik malzemelerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerinde en önemli husus kauçuk malzemenin, malzeme katsayılarının elde edilmesidir. Bölüm 4.2’de kauçuk malzemenin çekme ve kayma deneyleri sonunda elde edilen değerlerle, ANSYS yazılımı içerisinde Mooney-Rivlin Hiperelastik malzeme modeli katsayıları elde edilmiştir.

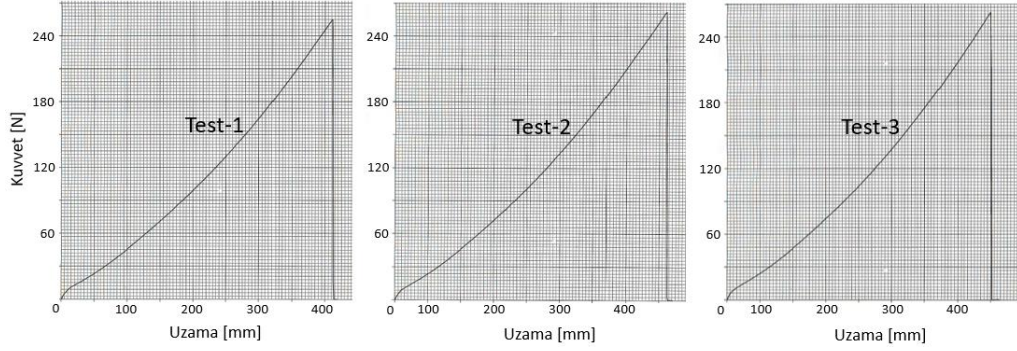
Bölüm 4.3’de ise elde edilen hiperelastik malzeme katsayılarının doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama çalışması için fiziksel deneyleri yapılan tek eksenli çekme ve safi kayma deneyleri sayısal olarak sonlu elemanlar metoduyla modellenmiş ve bu deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen malzeme modellerinin doğruluğunun teyidinden sonra Bölüm 4.4’de metal-kauçuk bileşenli kasnak parçasının belirli açılarda döndürülerek burulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4.5’de ise aynı şartlarda kasnak parçasının fiziki deneyleri gerçekleştirilerek döndürme momenti değerleri kıyaslanmıştır.

Son olarak, kullanılan sayısal malzeme modellerinin doğruluğunun ve gerçekleştirilen kasnak parçası analizlerinin doğruluğunun teyit edilmesinden sonra Bölüm 4.6’da kasnak geometrisinde değişiklikler yapılarak ve tasarım optimizasyonu gerçekleştirilerek en iyilenmiş geometri elde edilmiştir.

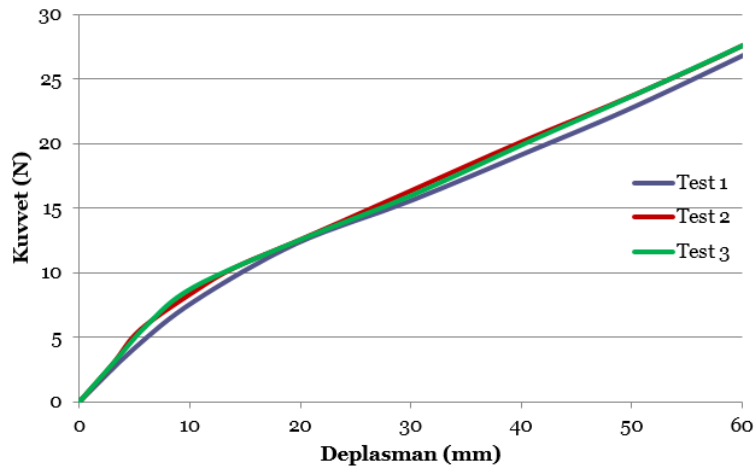
4.2. Tek Eksenli Çekme Deneyi, Safi Kayma Deneyi Sonuçları ve Kauçuk İçin Hiperelastik Malzeme Modeli Oluşturulması

İlk olarak tek eksenli çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinin doğruluğunu artırabilmek için 3 farklı numune çekme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.1. Tek Eksenli Çekme Deneyi Kuvvet-Uzama Grafikleri

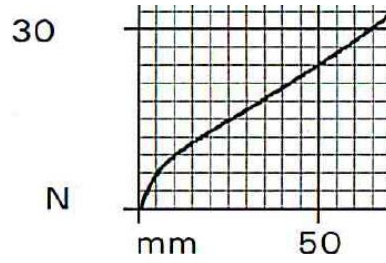
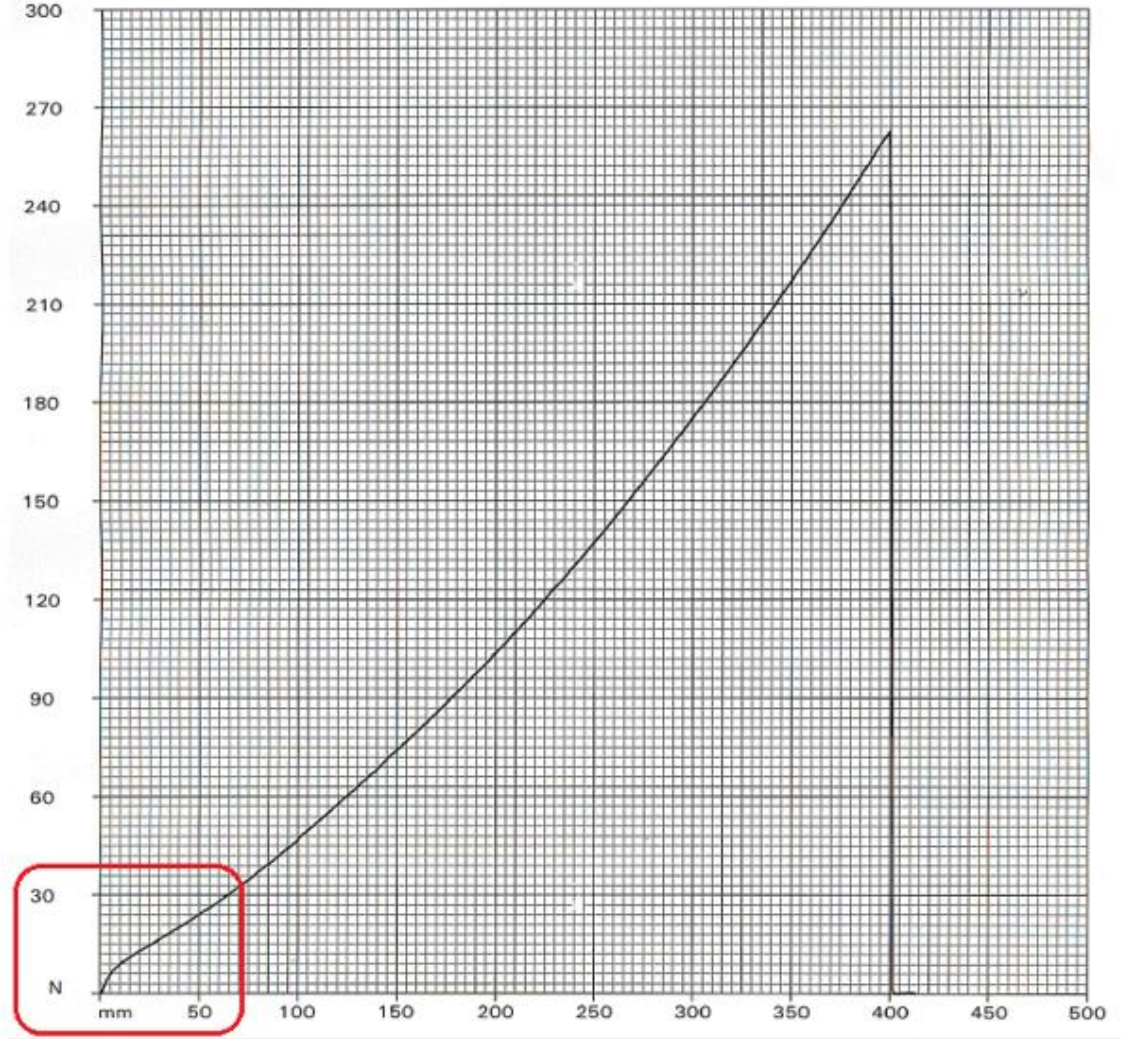
Şekil 4.1'de görüldüğü üzere numuneler birbirlerinden farklı davranış sergilemeyerek neredeyse aynı yük ve aynı uzama grafiklerine sahiptirler. Yapılan çekme deneylerinde numune koparılanaya kadar çekilse de kullanım şartlarında çok daha az uzamalara maruz kalacaklardır. Bu nedenle malzeme modeli oluşturulurken doğruluğu artırabilmek için çekme deneyindeki bütün kuvvet-uzama değerlerini kullanmak yerine 60mm uzamaya kadar olan bölüm incelenmiştir (Şekil 4.3). Şekil 4.2'de çekme deneyi sonuçları detaylıca gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tek Eksenli Çekme Deneyi Kuvvet-Uzama Grafikleri

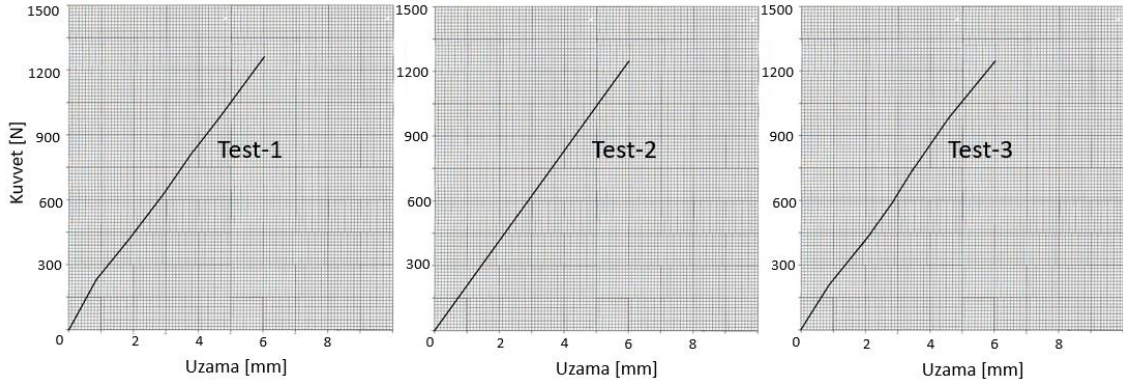
Test Hızı: 250.000{mm/min}

Maks MPa	Kopma MPa	Kopma uzaması mm	10.000 MPa	50.000 MPa	100.000 MPa	200.000 MPa	300.000 MPa	Kalınlık mm	Genişlik mm
22.159	0.032	412.921	0.784	2.053	3.968	8.726	14.739	1.980	6.000

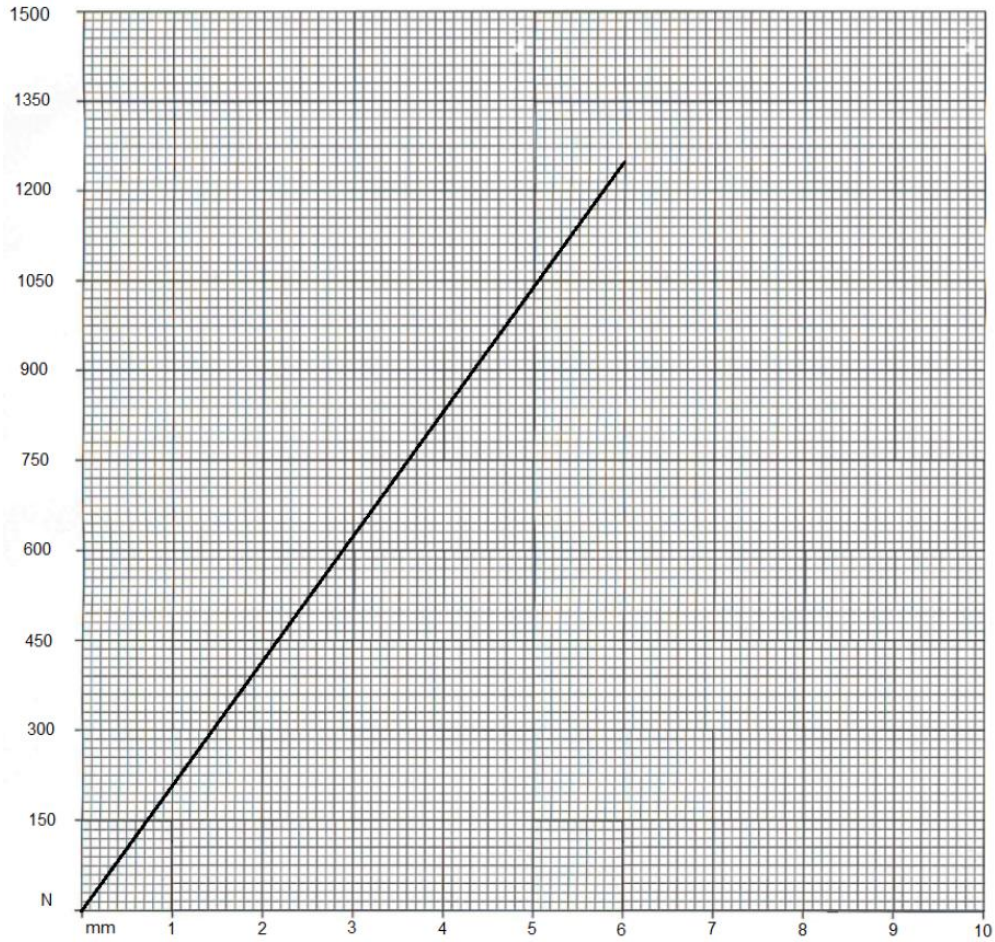


Şekil 4.3. Tek Eksenli Çekme Deneyinde Kullanılan Bölge

Safi kayma deneyi için kullanılan 3 farklı numunenin kuvvet-uzama eğrileri Şekil 4.4'deki gibidir. Bu deneyde yaklaşık olarak 6 mm kayma yönündeki uzamaya karşılık 1250 N kuvvet elde edilmiştir. Test sonucu detayı Şekil 4.5'te ayrıca gösterilmiştir.

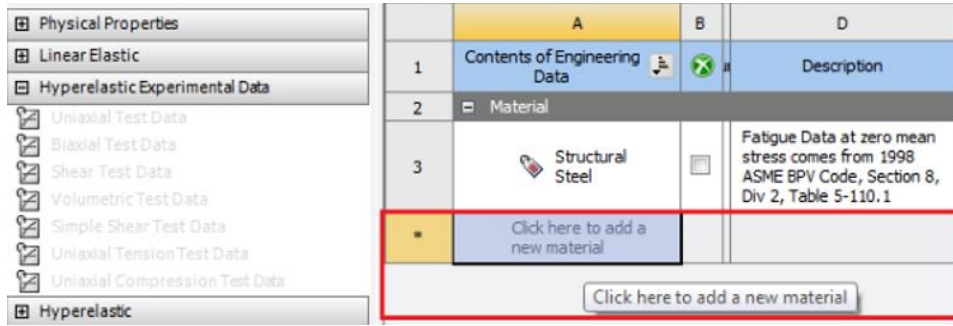


Şekil 4.4. Safi Kayma Deneyi Sonuçları

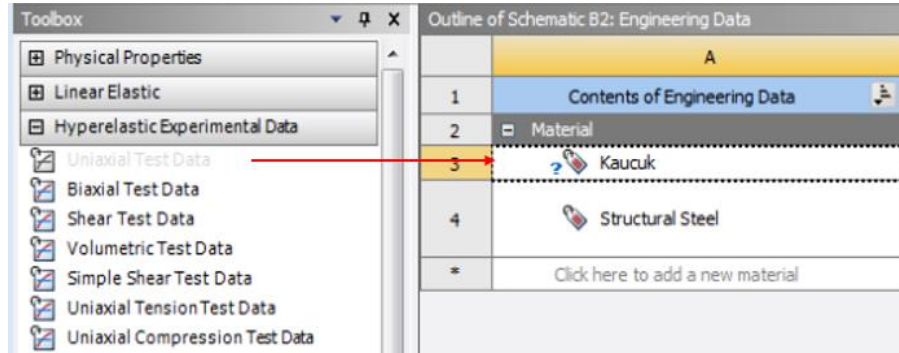


Şekil 4.5. Safi Kayma Deneyi Sonucu Detay Görünümü

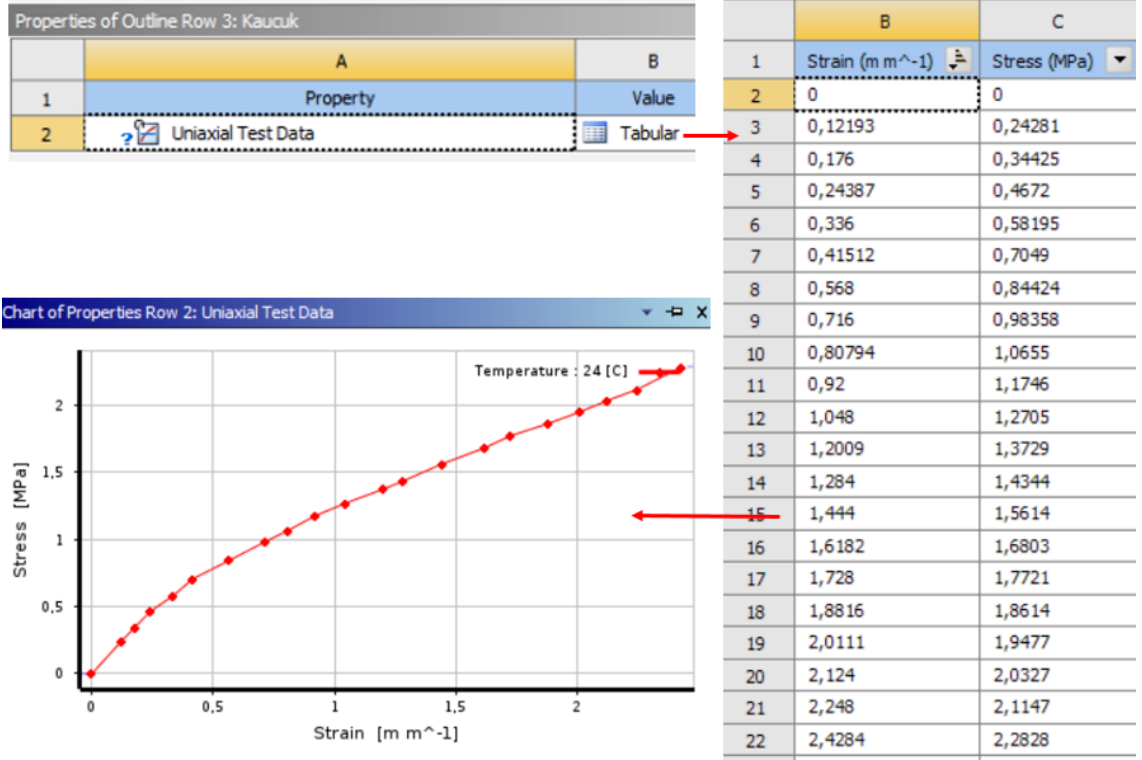
Kauçuk malzemelerin lineer olmayan sonlu elemanlar analizi yöntemi ile çözümünde en önemli adım, hiperelastik malzeme modeli katsayılarının elde edilmesidir. İstenilen malzeme modeline göre gerekli olan altyapılar ANSYS yazılımı içerisinde hazırlanmıştır. Bu çalışmada malzeme modeli olarak 3 parametrelili Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen çekme ve kayma deneyleri sonuçları tablolar halinde ANSYS programına girilmektedir. Sonrasında istenilen malzeme modeli için hiperelastik malzeme katsayıları program tarafından hesaplanmaktadır. Bu işlemin program üzerindeki adımları Şekil 4.6 - Şekil 4.11 arasında gösterilmiştir.



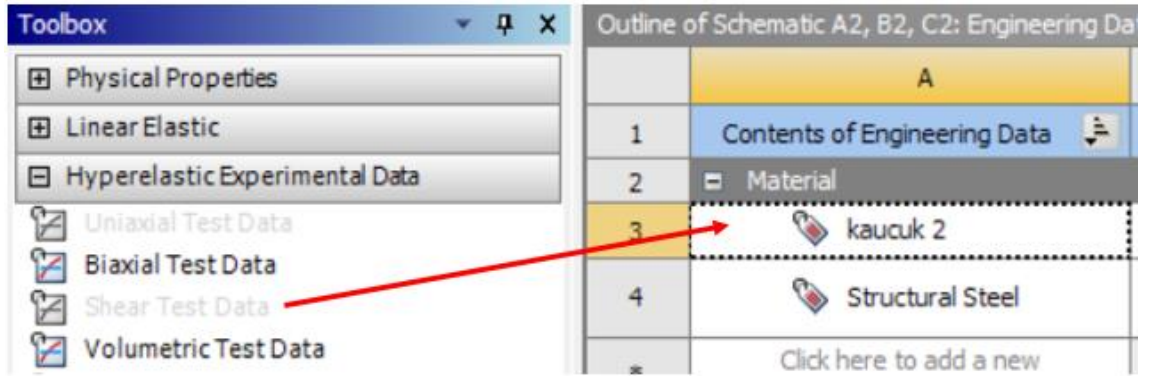
Şekil 4.6. Yeni Malzeme Tanımlanması



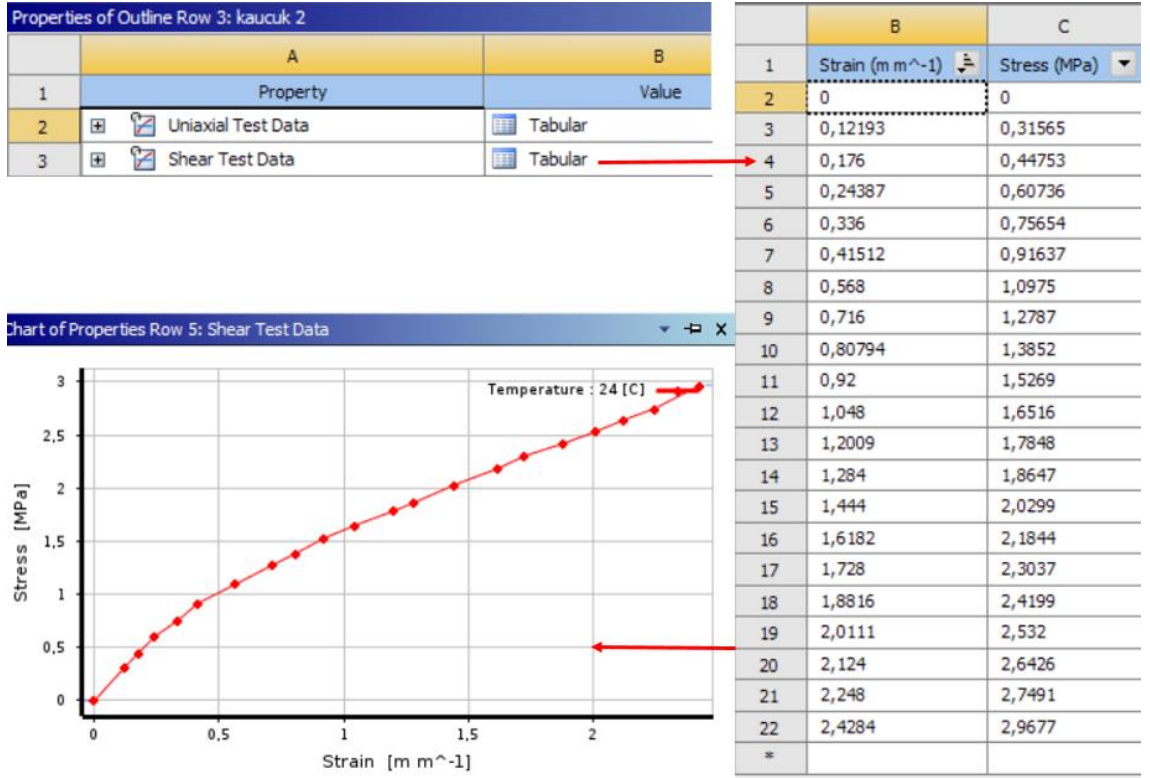
Şekil 4.7. Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonucu Eklenmesi



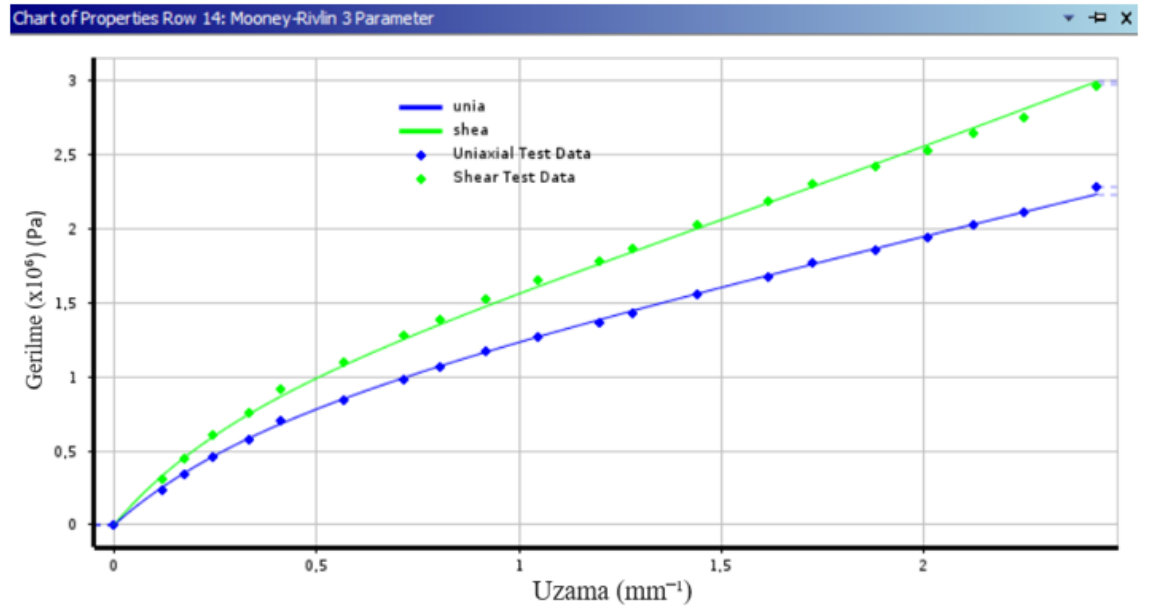
Şekil 4.8. Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonucunun Girilmesi



Şekil 4.9. Safi Kayma Deneyi Sonucu Eklenmesi



Şekil 4.10. Safi Kayma Deneyi Sonucunun Girilmesi



Şekil 4.11. Deney Verileri Üzerine Oturtulan Eğilim Çizgileri

Yukarıdaki program adımları izlendikten sonra ANSYS yazılımı içerisinde oluşturulan 3 parametrelili Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli katsayıları elde edilmiştir (Şekil 4.12).

3 Parametrelili Mooney-Rivlin		
Malzeme Katsayısı C10	0.284340	MPa
Malzeme Katsayısı C01	0.124140	MPa
Malzeme Katsayısı C11	0.001233	MPa

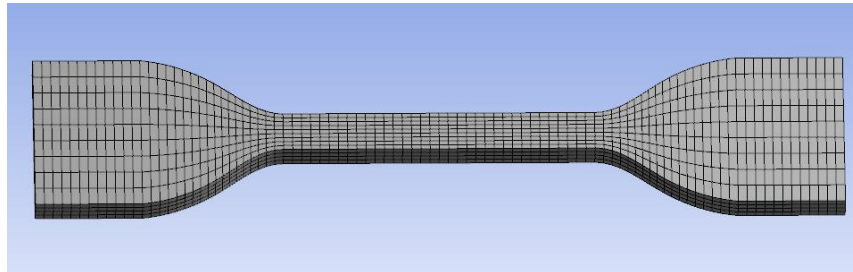
Şekil 4.12. 3 Parametrelili Mooney-Rivlin Malzeme Modeli Katsayıları

4.3. Hiperelastik Malzeme Katsayılarının Doğrulanması

Elde edilen malzeme modeli katsayılarının doğruluğunu görebilmek için tek eksenli çekme deneyi ve safi kayma deneyleri için sonlu elemanlar modelleri oluşturularak deney sonuçları ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır.

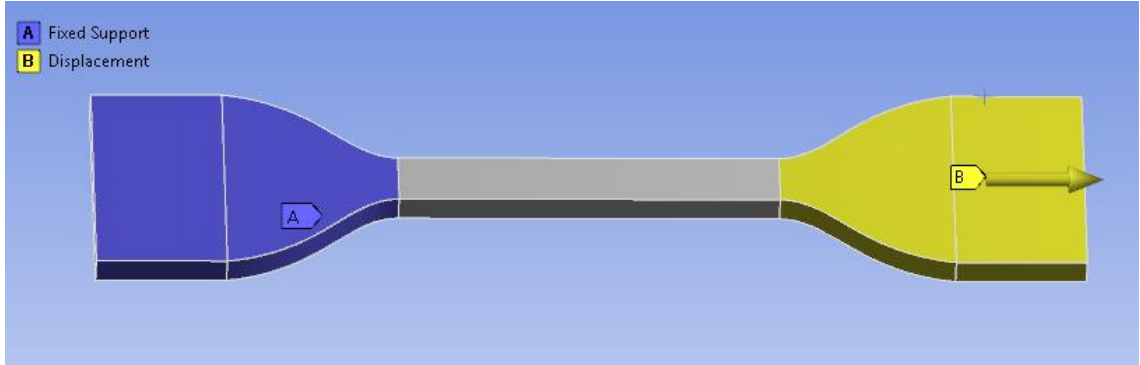
4.3.1. Tek Eksenli Çekme Deneyinin Doğrulanması

Tek eksenli çekme deneyinde kullanılan kauçuk numunesinin 3 boyutlu geometrisi hazırlanmıştır. Sonrasında SOLID186 elemanları ile sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.13). Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken doğruluk oranını artırmak açısından kalınlık boyunca 4 sıra eleman kullanılmıştır ve düzlemsel kısımlarda herhangi bir bozuk eleman olmayacak şekilde eleman geçişleri ayarlanmıştır.



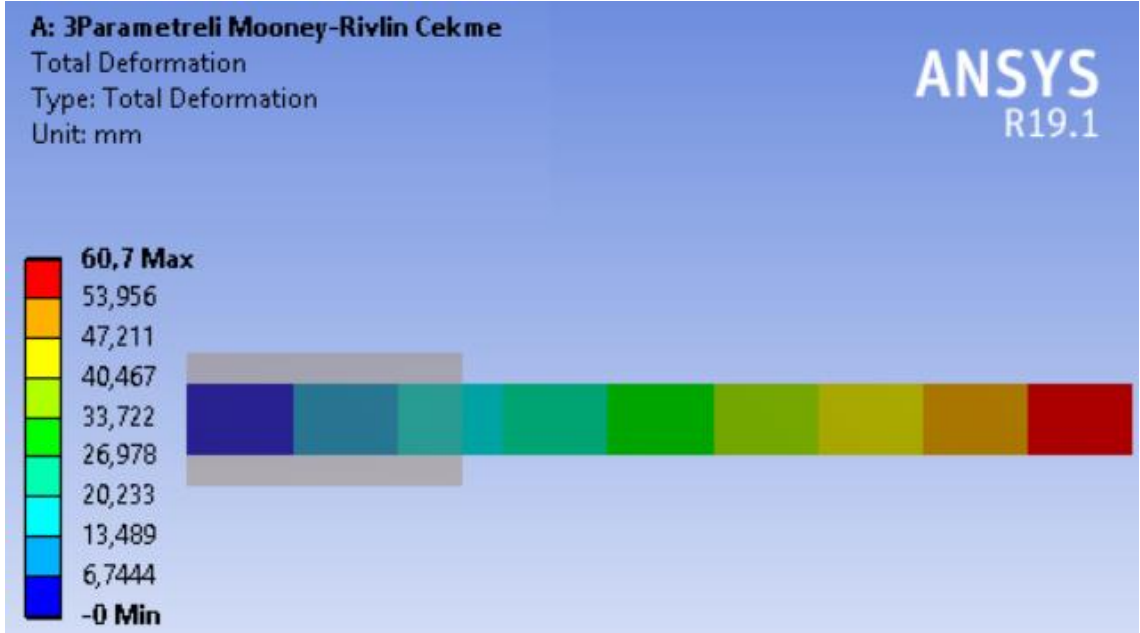
Şekil 4.13. Tek Eksenli Çekme Numunesi Sonlu Elemanlar Ağı

Çekme deneyinde olduğu gibi sabit olan çenenin yakaladığı kısımlar sabitlenmiş, hareketli olan çenenin yakaladığı kısımlardan ise yer değiştirme (displacement) sınır şartı uygulanmıştır (Şekil 4.14).

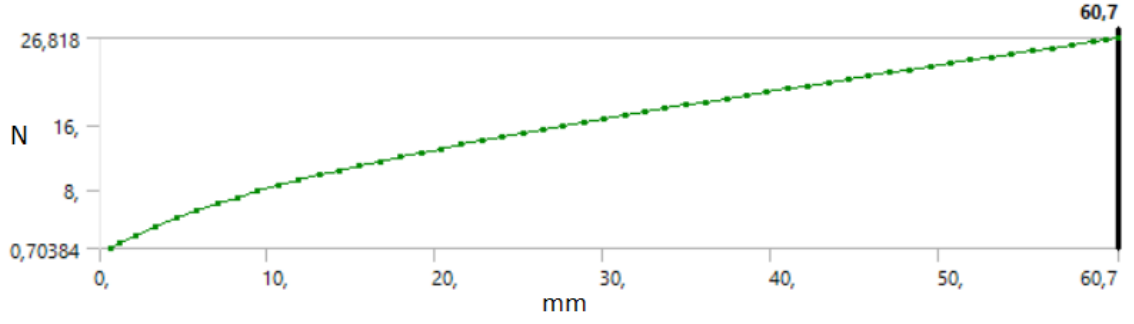


Şekil 4.14. Tek Eksenli Çekme Analizi Sınır Şartları

Yapılan lineer olmayan analiz sonucunda orta kısımdaki etkin bölgenin uzama dağılımı Şekil 4.15'te gösterildiği gibidir.

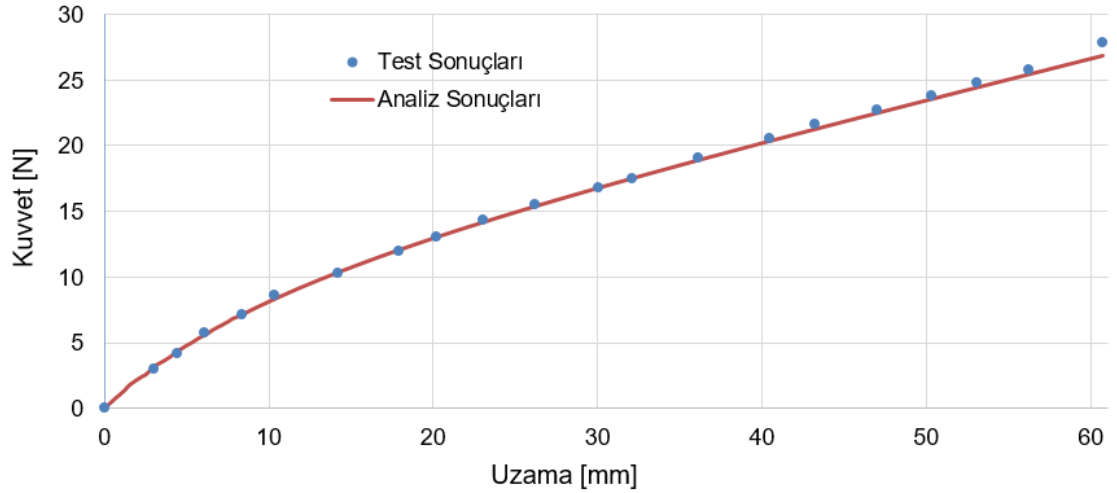


Şekil 4.15. Tek Eksenli Çekme Analizi Uzama Sonuçları



Şekil 4.16. Mesafeye Bağlı Çekme Kuvveti Analiz Sonuçları

Analiz sonuçlarından elde edilen mesafeye bağlı çekme kuvveti direnç kuvvetleri (Şekil 4.16) ile fiziksel deneyden elde edilen mesafeye bağlı çekme kuvvetleri kıyaslandığında grafiklerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.17). Böylelikle hesaplanan ve kullanılan malzeme katsayılarının doğruluğu bu kısım çalışma için görülmüştür.

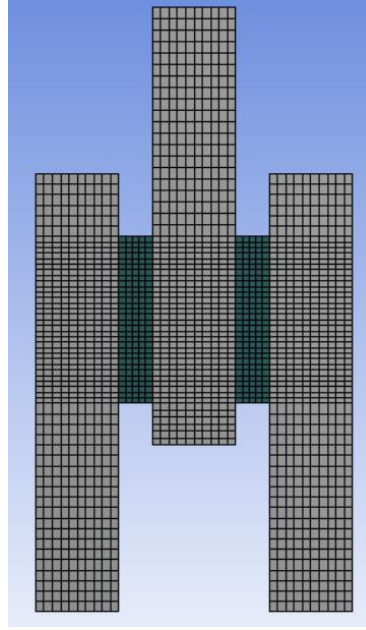


Şekil 4.17. Tek Eksenli Çekme Deneyi ve Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması

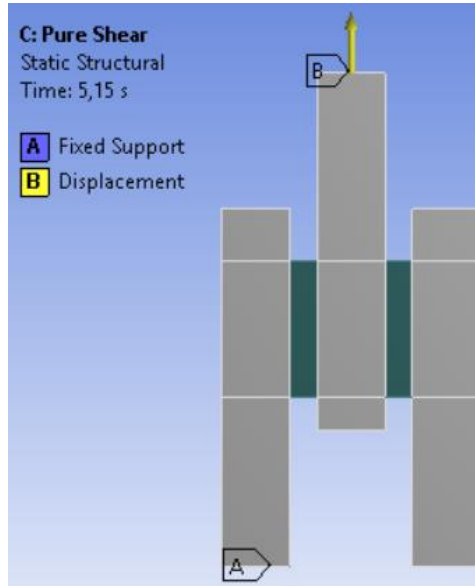
4.3.2. Safi Kayma Deneyinin Doğrulanması

Safi kayma deneyinde kullanılan metal-kauçuk bileşenli numunenin 3 boyutlu geometrisi hazırlanmıştır. Sonrasında SOLID186 elemanları ile sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.18). Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken doğruluk oranını artırmak açısından kalınlık boyunca 5 sıra eleman kullanılmıştır ve düzlemsel kısımlarda herhangi bir bozuk

eleman olmayacak şekilde eleman geçişleri ayarlanmıştır. Numune üzerinde kayma deneyinde olduğu gibi sabit olan çenenin yakaladığı kısımlar sabitlenmiş, hareketli olan çenenin yakaladığı kısımlardan ise yer değiştirme (displacement) sınır şartı uygulanmıştır (şekil 4.19).

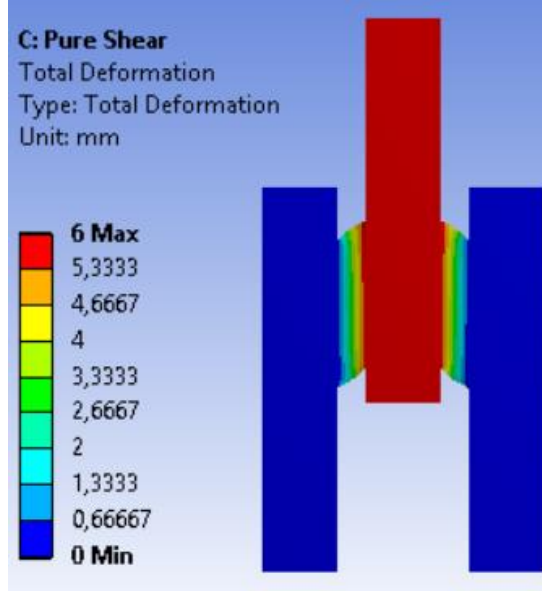


şekil 4.18. Safi Kayma Analizinde Kullanılan Sonlu Elemanlar Ağı

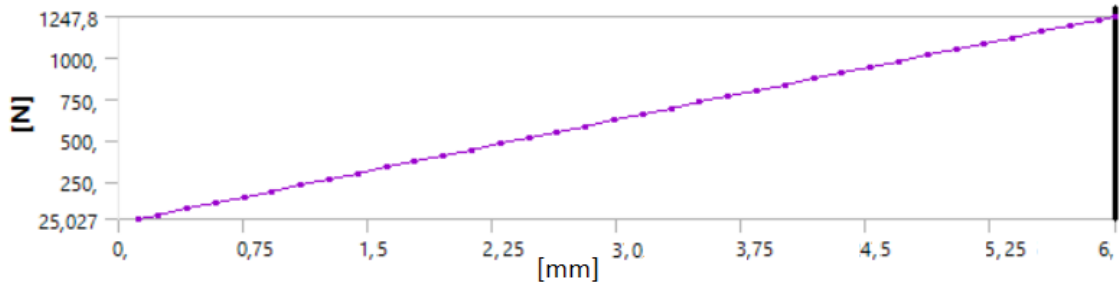


şekil 4.19. Safi Kayma Analizinde Kullanılan Sınır şartları

Yapılan lineer olmayan (non-linear) analiz sonucunda numunenin uzama dağılımı Şekil 4.20'deki gibidir.

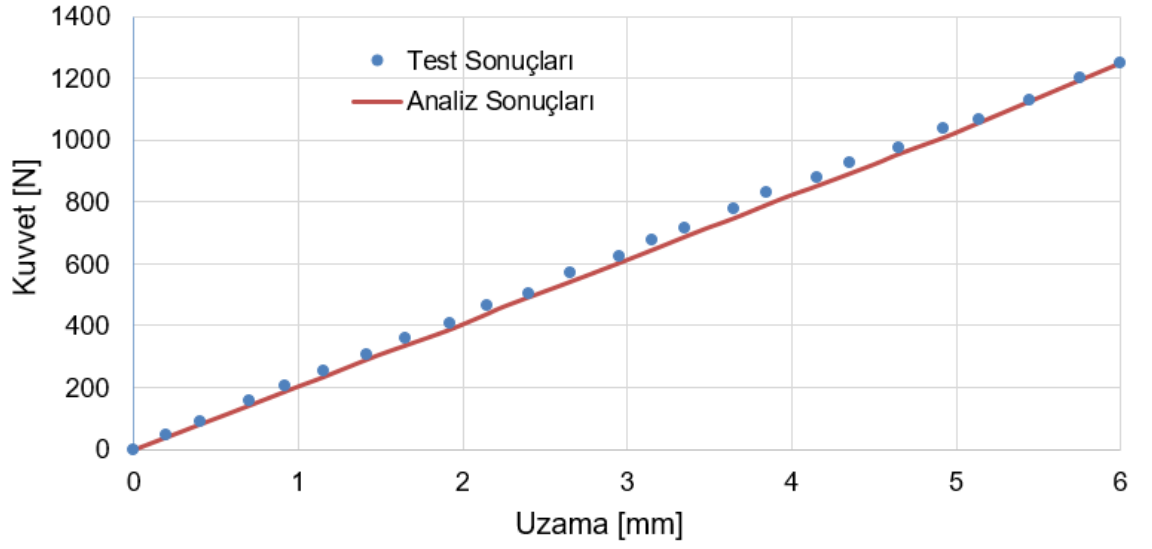


Şekil 4.20. Safi Kayma Analizi Uzama Sonuçları



Şekil 4.21. Mesafeye Bağlı Çekme Kuvveti Analiz Sonuçları

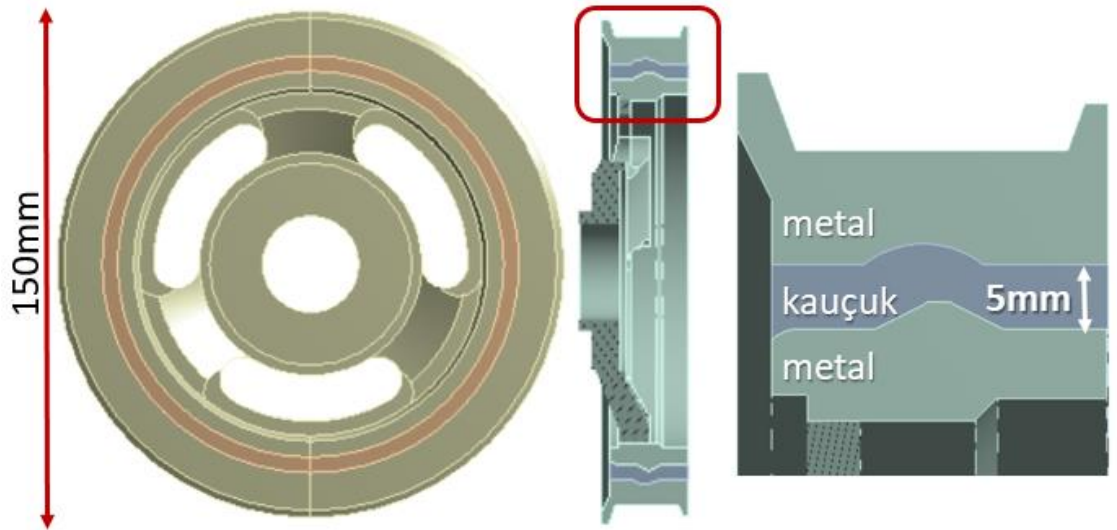
Analiz sonuçlarından elde edilen mesafeye bağlı çekme kuvveti direnç kuvvetleri (Şekil 4.21) ile fiziksel deneyden elde edilen mesafeye bağlı çekme kuvvetleri kıyaslandığında grafiklerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.22). Böylelikle hesaplanan ve kullanılan malzeme katsayılarının doğruluğu bu kısım çalışma için de ayrıca görülmüştür.



Şekil 4.22. Safi Kayma Deneyi ve Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması

4.4. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Burulma Analizleri

Metal-kauçuk bileşenli kasnak parçasının belirli burulma açıları altındaki göstermiş olduğu direnç momentleri, yer değiştirmeleri, gerilmeleri ve gerinimleri elde edebilmek için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

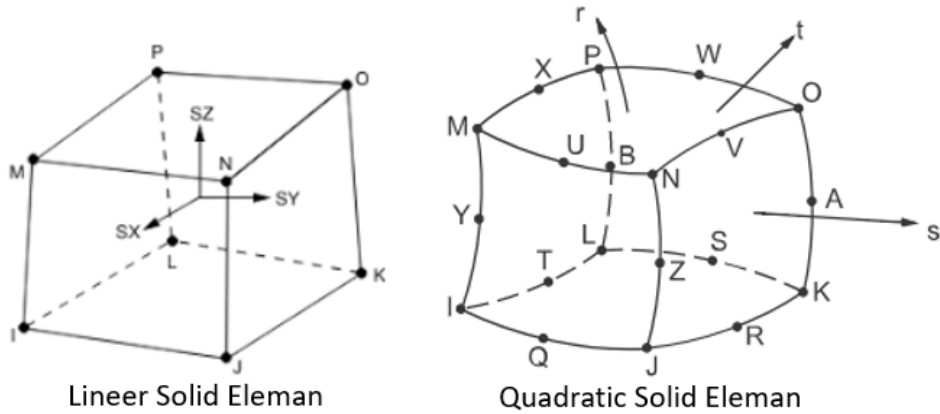


Şekil 4.23. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Geometrisi

Analizlerde kullanılan kasnak parçasının 3 boyutlu geometrisi Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Kasnak parçası dairesel şekle sahip olup merkezlemede ve bağlantıda kullanılan metal göbek, 5 mm kalınlığında kauçuk ara kısım ve kayışın temas ettiği dış metal gövde olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır.

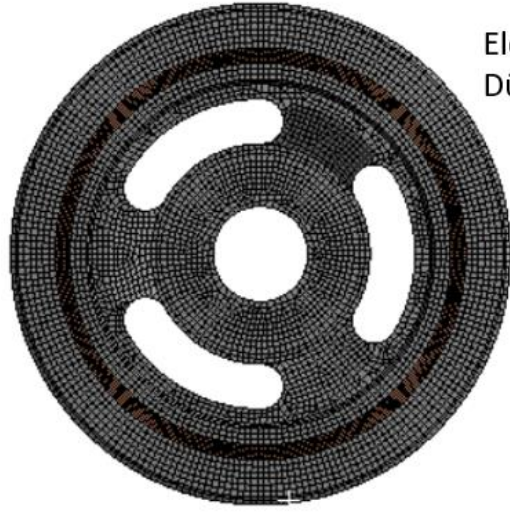
4.4.1. Kasnak Parçası Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi sonlu elemanlar tipinin seçimidir. Genel olarak ifade edilirse, ince sac malzemelerin modellenmesinde Shell denilen kabuk elemanlar kullanılır, kasnak yapısı gibi katı ve dolu malzemelerde ise Solid eleman tipleri kullanılmaktadır. Her tip eleman yine kendi içerisinde bazı özelliklerle ayrışır, birinci dereceden (lineer) ve ikinci dereceden (quadratic) diye çeşitleri bulunmaktadır.

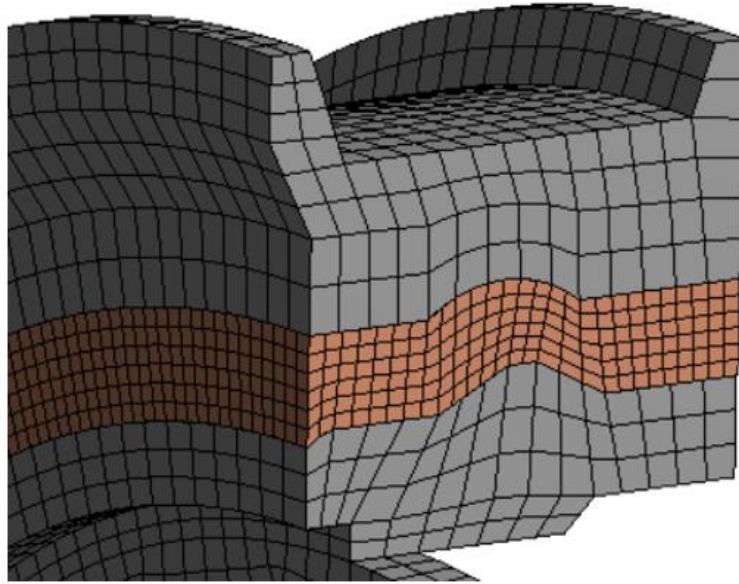
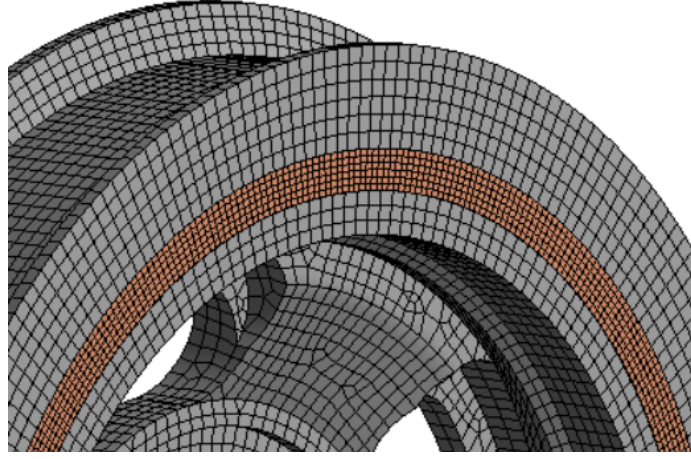


Şekil 4.24. Solid Eleman Tipleri

Şekil 4.24’de de görüldüğü üzere birinci dereceden solid eleman tipinde elemanın şeklini tanımlayan 8 adet düğüm noktası bulunmaktadır, ancak ikinci dereceden eleman tipinde ise 20 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Bu yüzden sonuçların doğruluğunu artırabilmek adına 20 düğüm noktalı ikinci dereceden solid eleman tipleri analizde kullanılmıştır (Şekil 4.24).



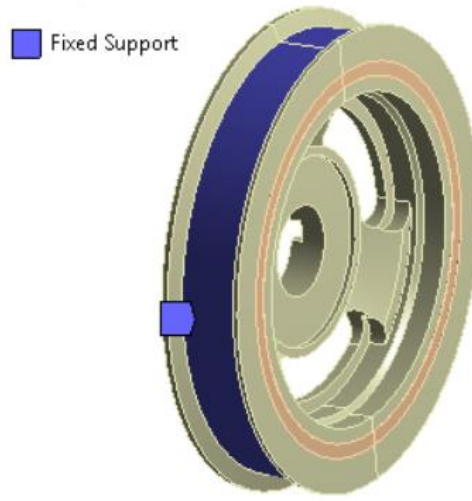
Eleman Sayısı : 102,414
Düğüm Noktası Sayısı : 471,622



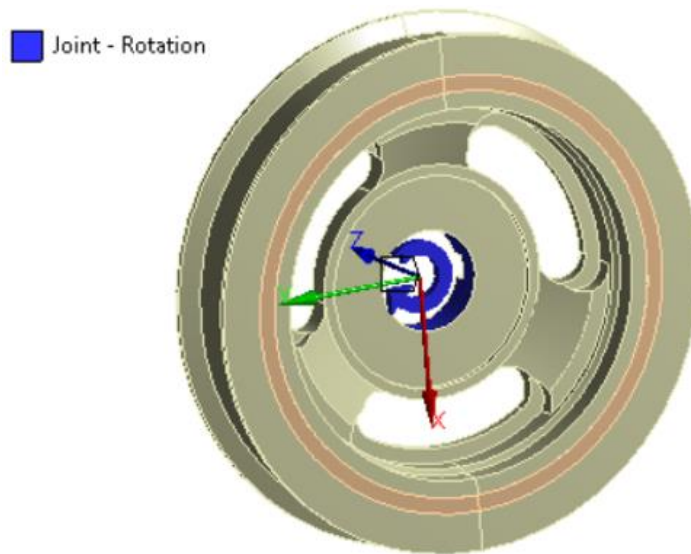
Şekil 4.25. Kasnak Parçası Sonlu Elemanlar Modeli

4.4.2. Kasnak Burulma Analizi Sınır Şartları

Kasnak parçasının burulma analizleri için sırasıyla 1° , 2° , 3° , 4° ve 5° dönme açıları kullanılmıştır. Böylelikle 5 farklı açı için reaksiyon momentleri ve kauçuk kısım üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Analizler fiziki test doğrulaması yapılırken kullanılacak olan sınır şartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kasnak parçası dış yüzeyinden Şekil 4.26'daki gibi sabitlenmiştir ve Şekil 4.27'deki gibi göbek kısmından dönme açısı yüklemesi tanımlanmıştır.



Şekil 4.26. Sabitleme Yüzeyi



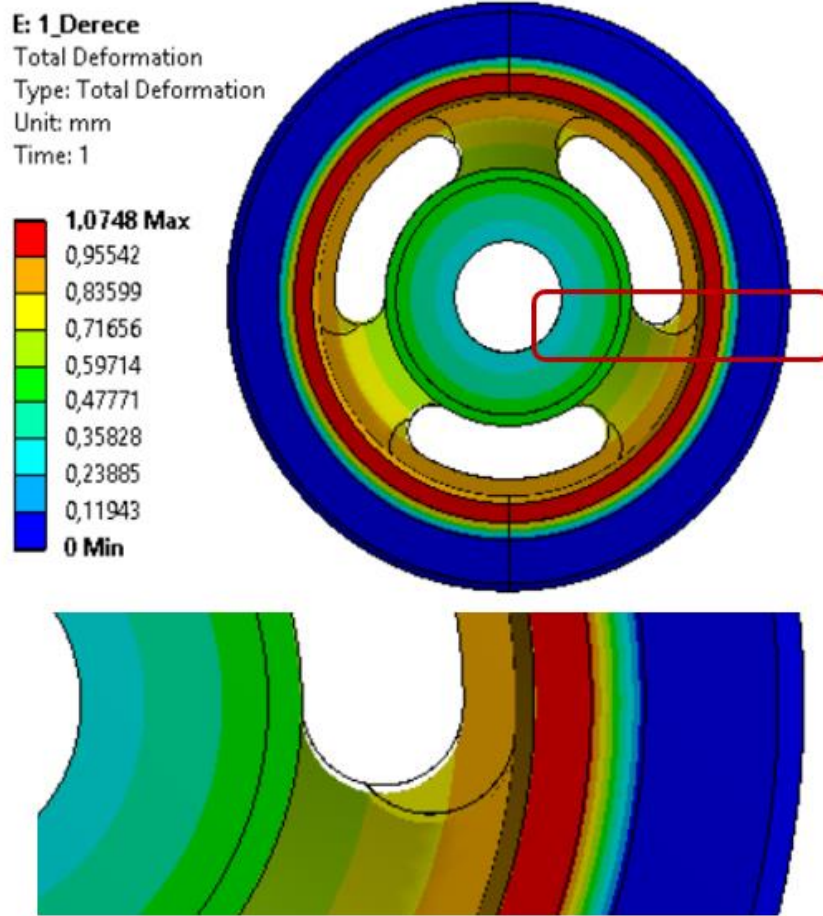
Şekil 4.27. Dönme Açısı Tanımlama Yüzeyi

Yapılan analizler lineer olmayan analiz tipleri olduğundan tek adımlı statik çözüm yerine çok adımlı analiz yöntemi tanımlanmıştır. Tanımlanan alt adım sayısı 1000 olarak ayarlanmış ve analizde girilen yüklemeler 1000 adımda çözdürülmüştür. Çözüm alınan bilgisayar 40 işlemcili 64GB ram belleğe sahip bir iş istasyonudur ve her bir analiz yaklaşık olarak 1 saat çözüm süresine sahiptir.

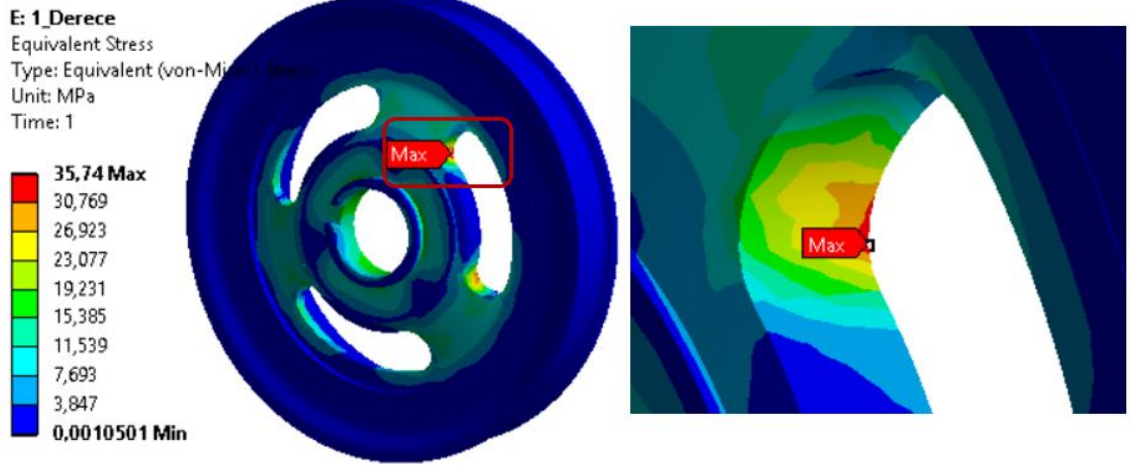
4.4.3. Kasnak Burulma Analiz Sonuçları

1° Burulma Sonuçları

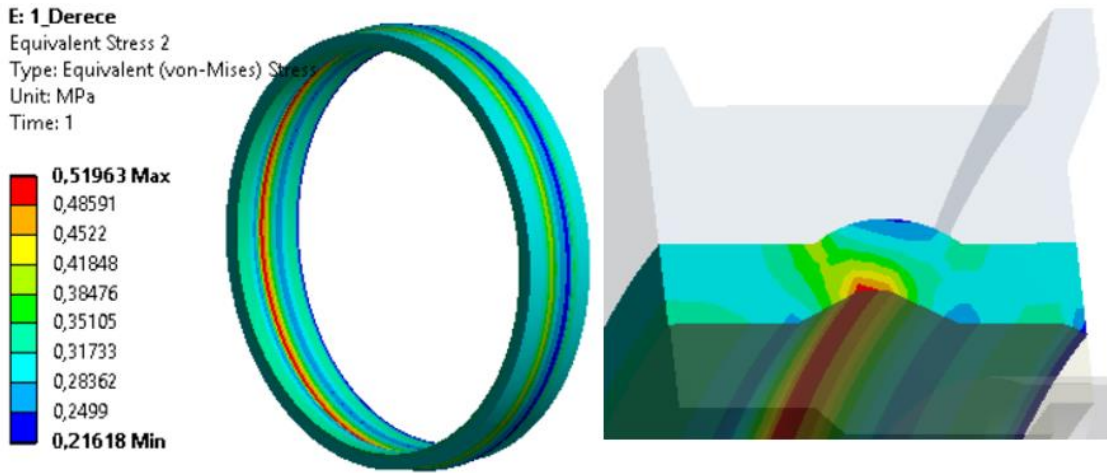
Gerçekleştirilen 1°'lik burulma analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.28 - Şekil 4.31 arasında gösterilmiştir.



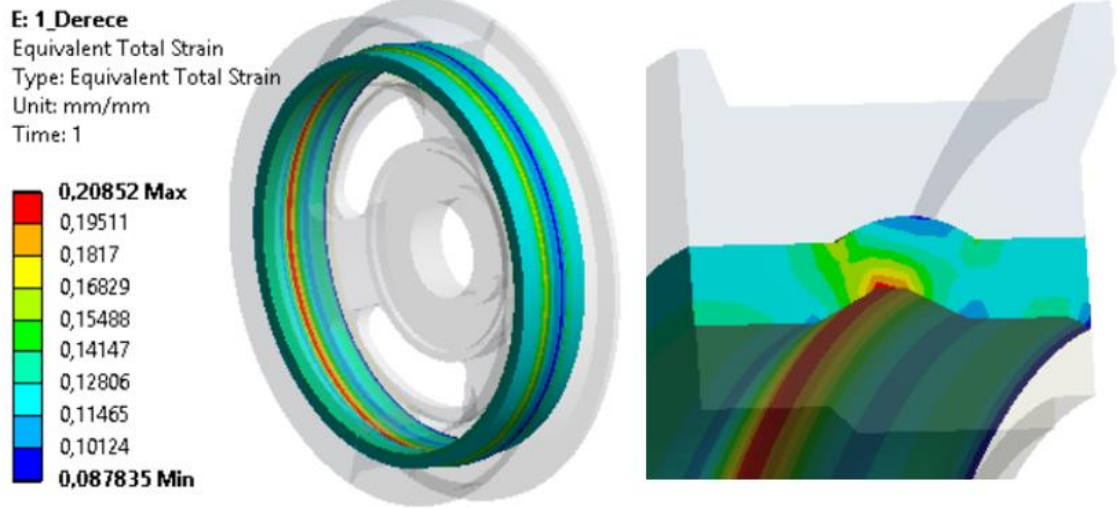
Şekil 4.28. 1° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları [mm]



Şekil 4.29. 1° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 4.30. 1° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

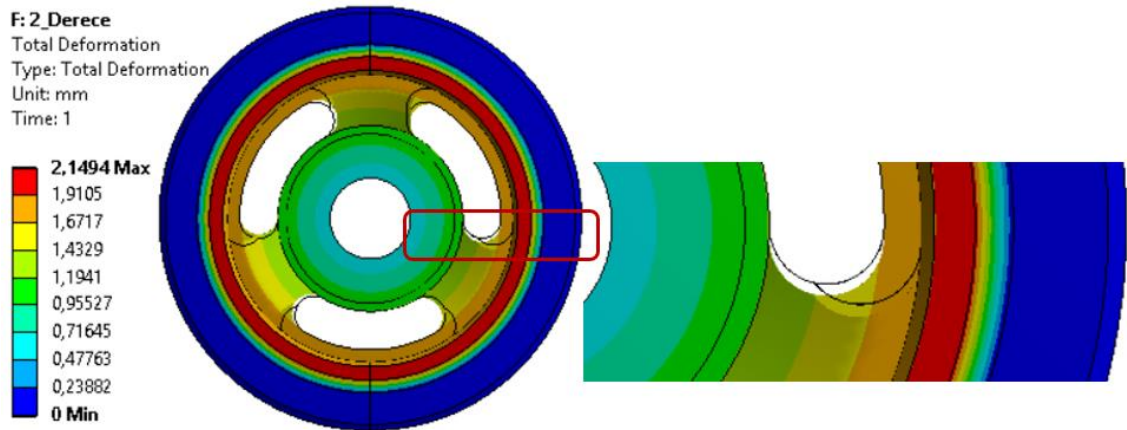


Şekil 4.31. 1° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları [mm/mm]

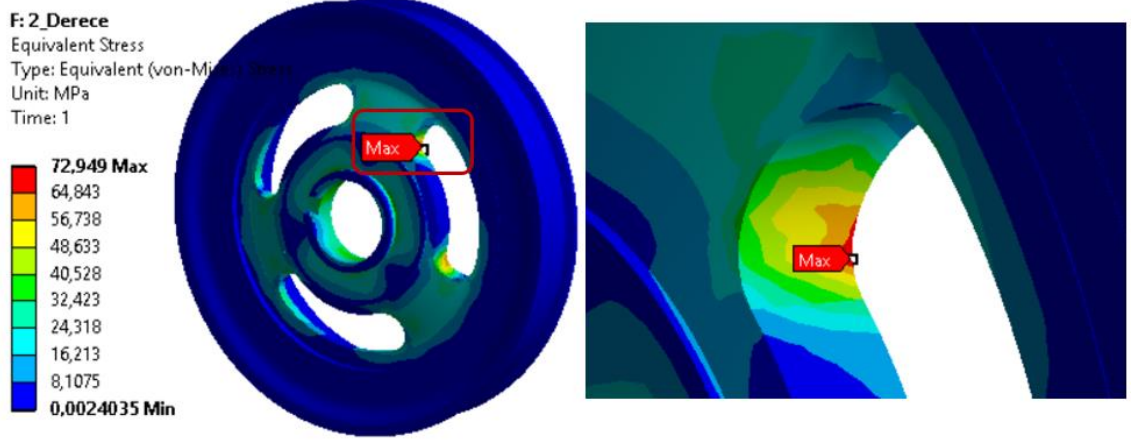
Kasnak parçasının 1° burulması için gereken moment değeri 116,1 Nm olarak hesaplanmıştır.

2° Burulma Sonuçları

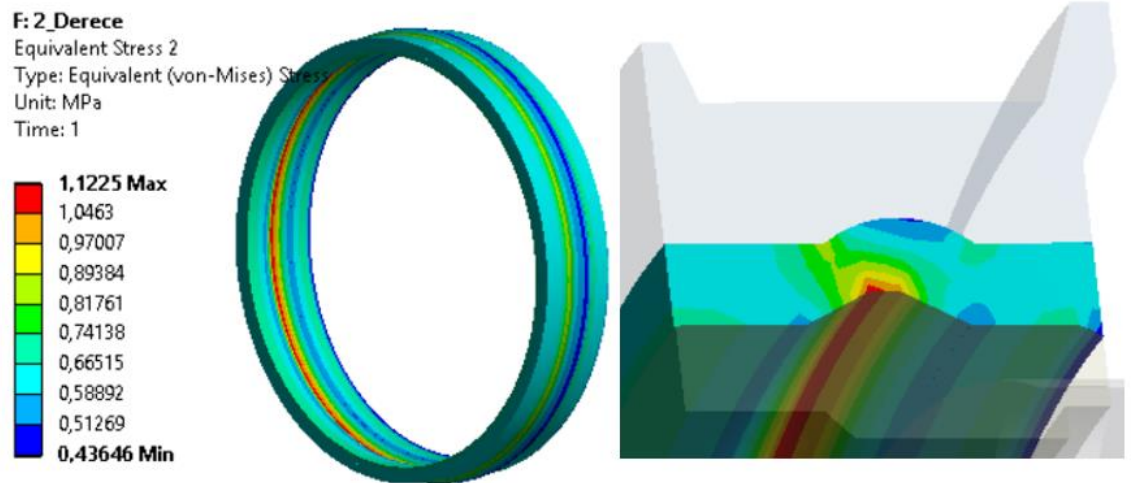
Gerçekleştirilen 2°'lik burulma analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.32 - Şekil 4.35 arasında gösterilmiştir.



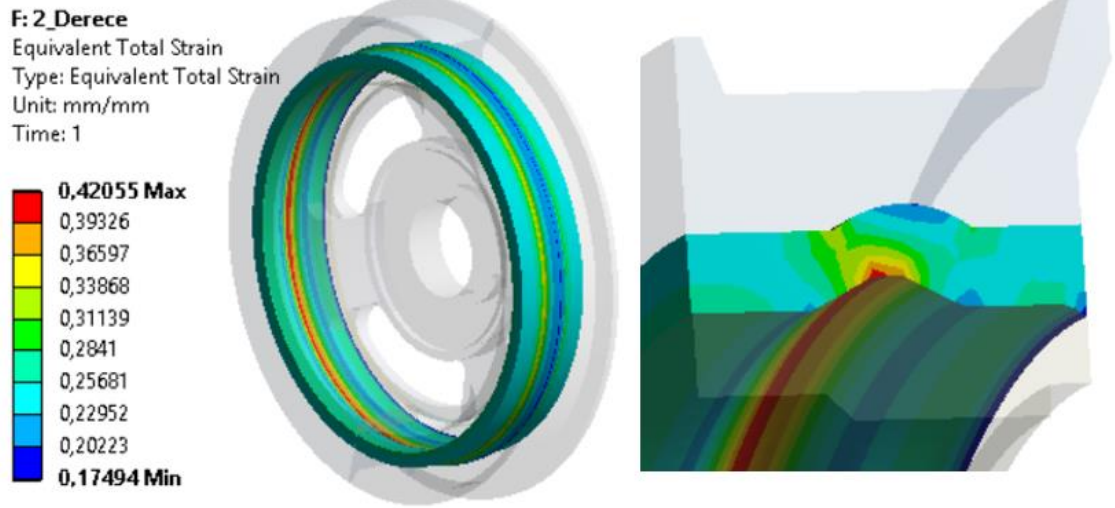
Şekil 4.32. 2° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları [mm]



Şekil 4.33. 2° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 4.34. 2° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

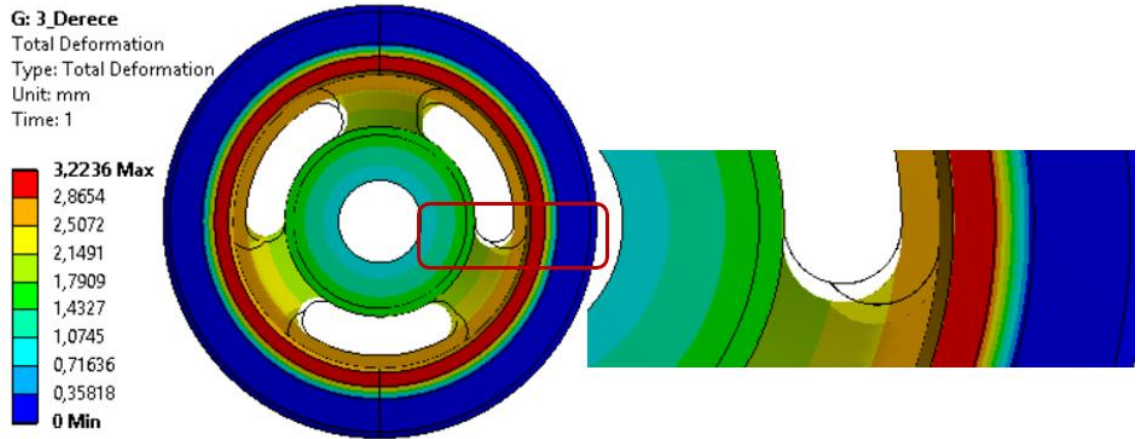


Şekil 4.35. 2° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları [mm/mm]

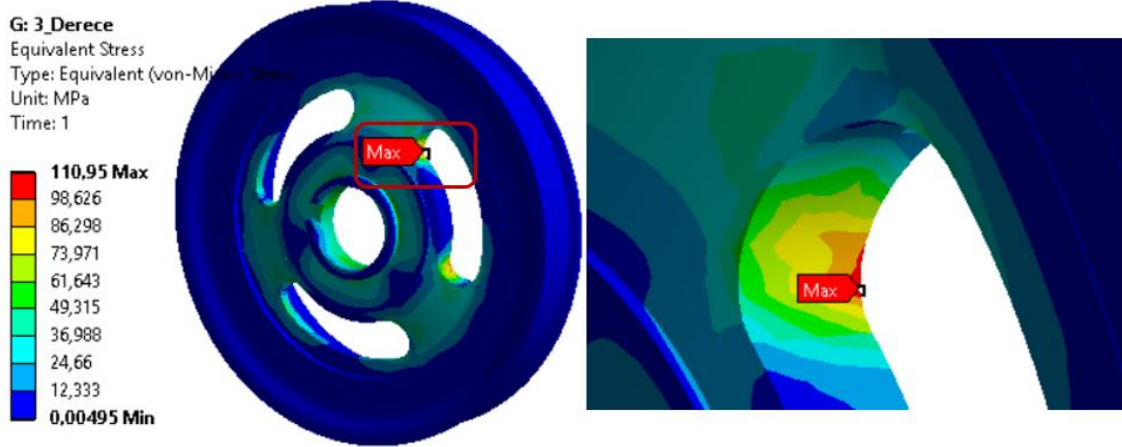
Kasnak parçasının 2° burulması için gereken moment değeri 236,4 Nm olarak hesaplanmıştır.

3° Burulma Sonuçları

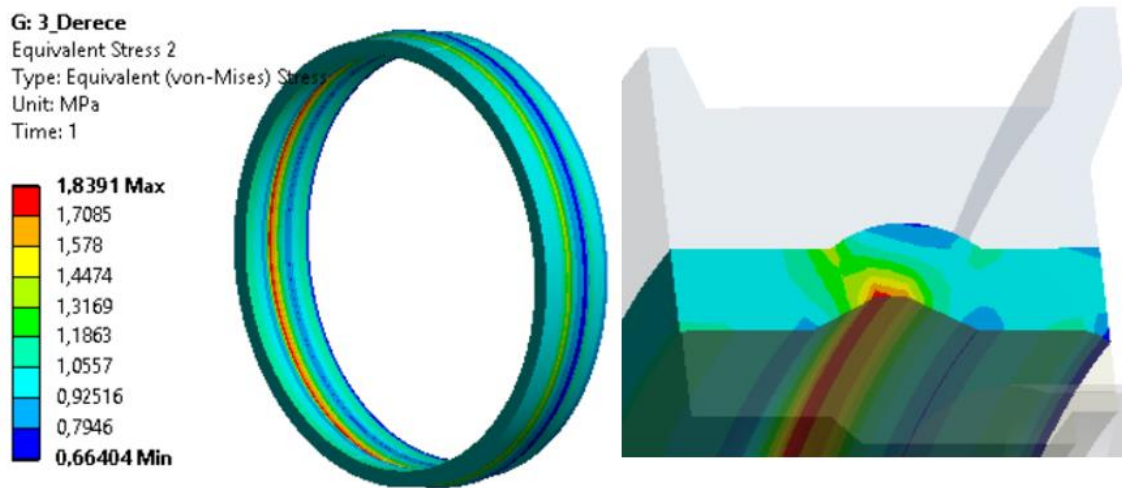
Gerçekleştirilen 3°'lik burulma analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.36 - Şekil 4.39 arasında gösterilmiştir.



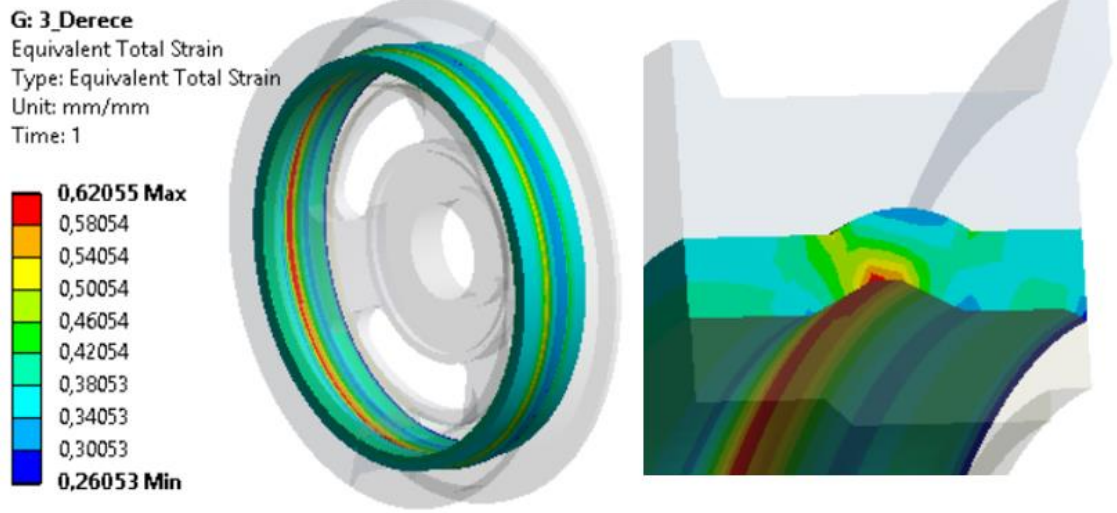
Şekil 4.36. 3° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları [mm]



Şekil 4.37. 3° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 4.38. 3° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

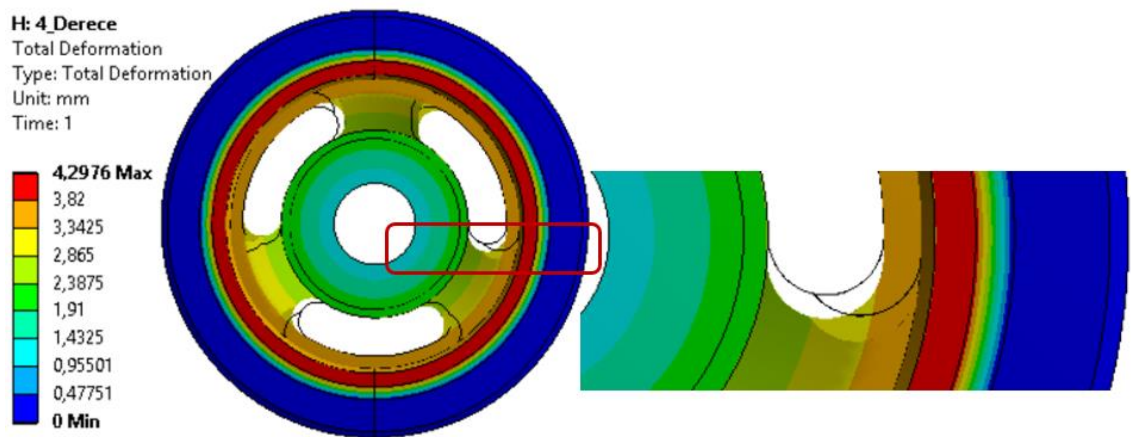


Şekil 4.39. 3° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları [mm/mm]

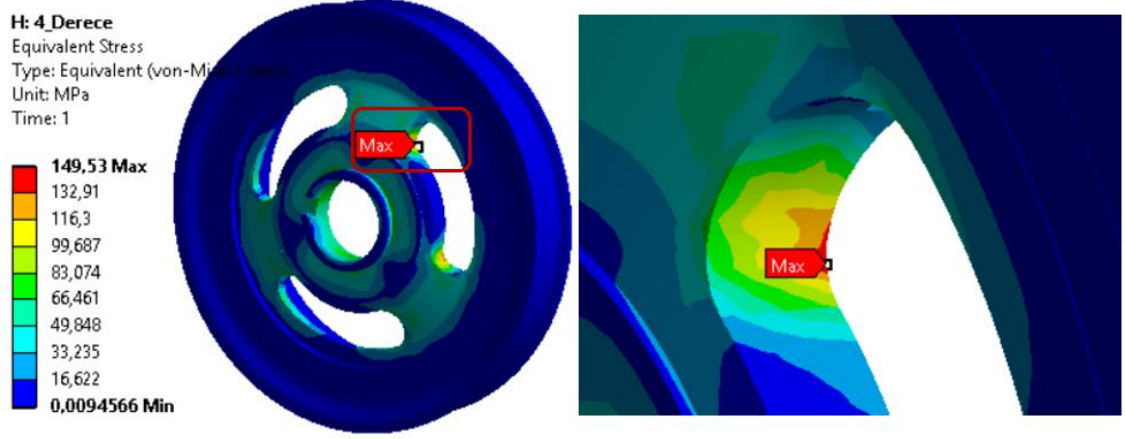
Kasnak parçasının 3° burulması için gereken moment değeri 358,3 Nm olarak hesaplanmıştır.

4° Burulma Sonuçları

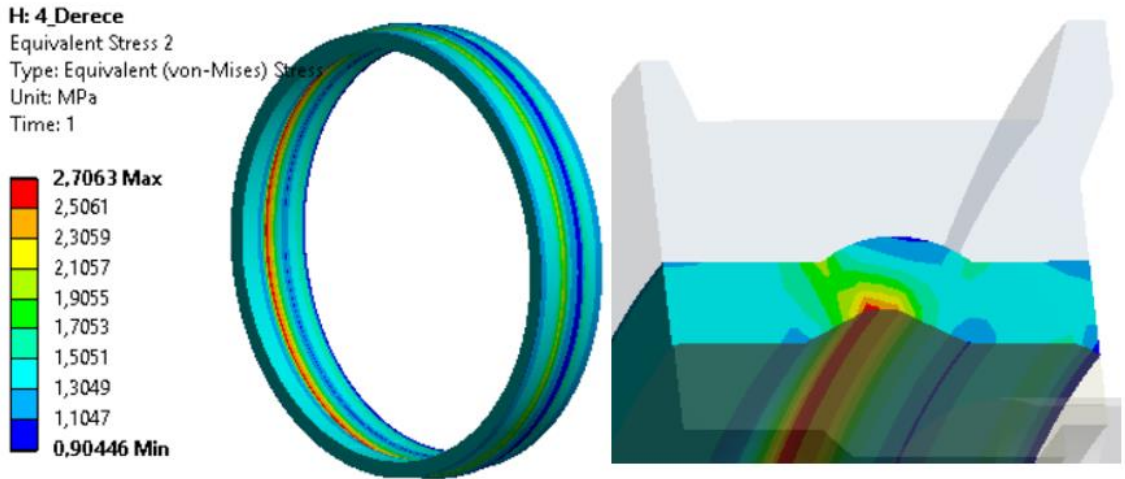
Gerçekleştirilen 4°'lik burulma analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.40 - Şekil 4.43 arasında gösterilmiştir.



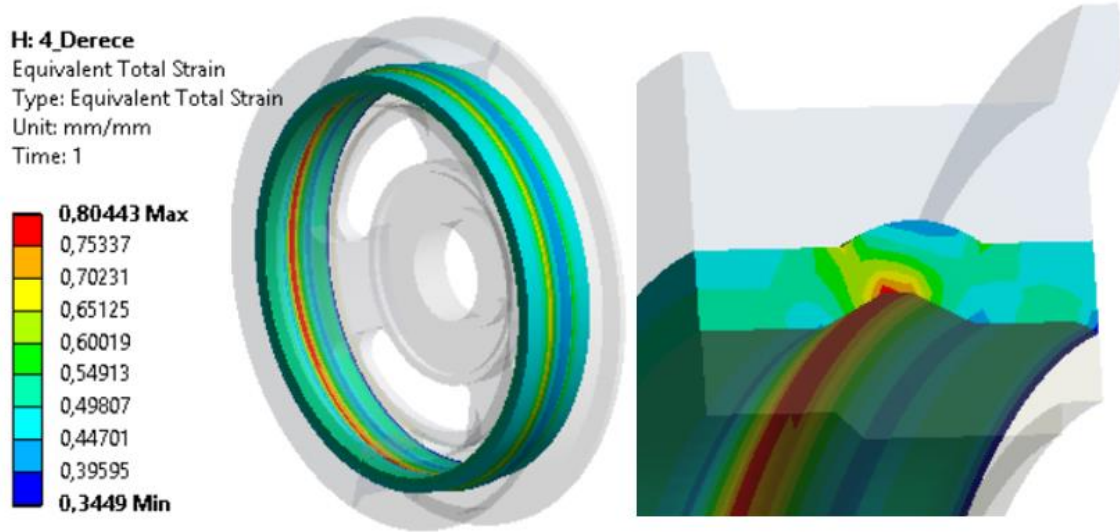
Şekil 4.40. 4° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları [mm]



Şekil 4.41. 4° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



Şekil 4.42. 4° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

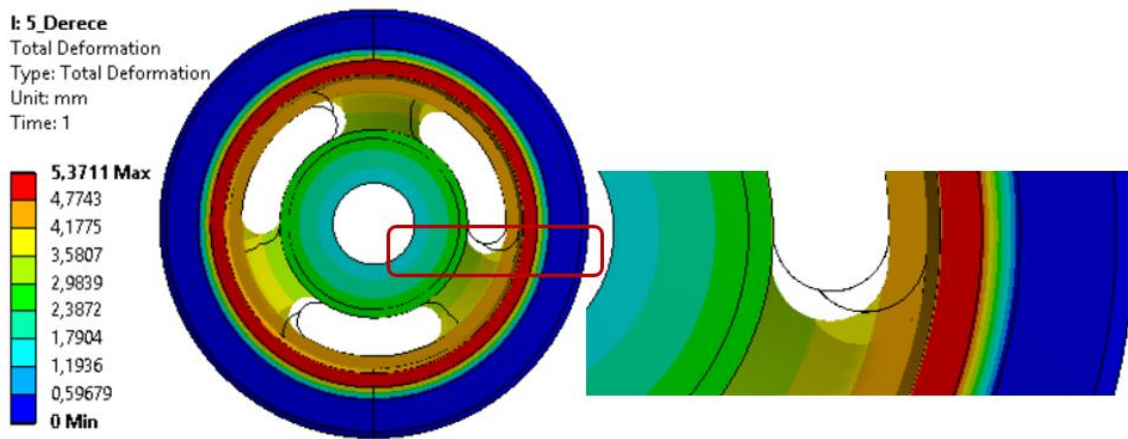


Şekil 4.43. 4° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları [mm/mm]

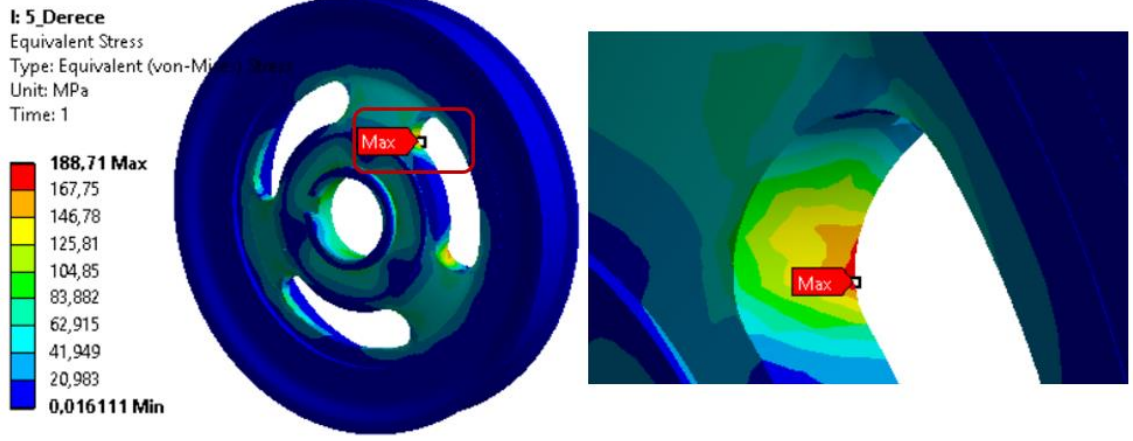
Kasnak parçasının 4° burulması için gereken moment değeri 481,2 Nm olarak hesaplanmıştır.

5° Burulma Sonuçları

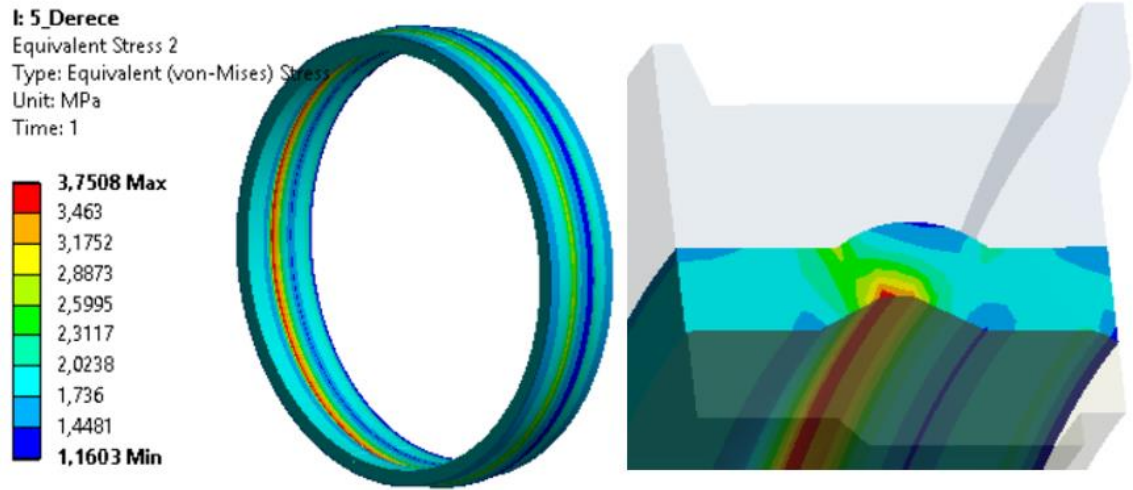
Gerçekleştirilen 5°'lik burulma analizi neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.44 - Şekil 4.47 arasında gösterilmiştir.



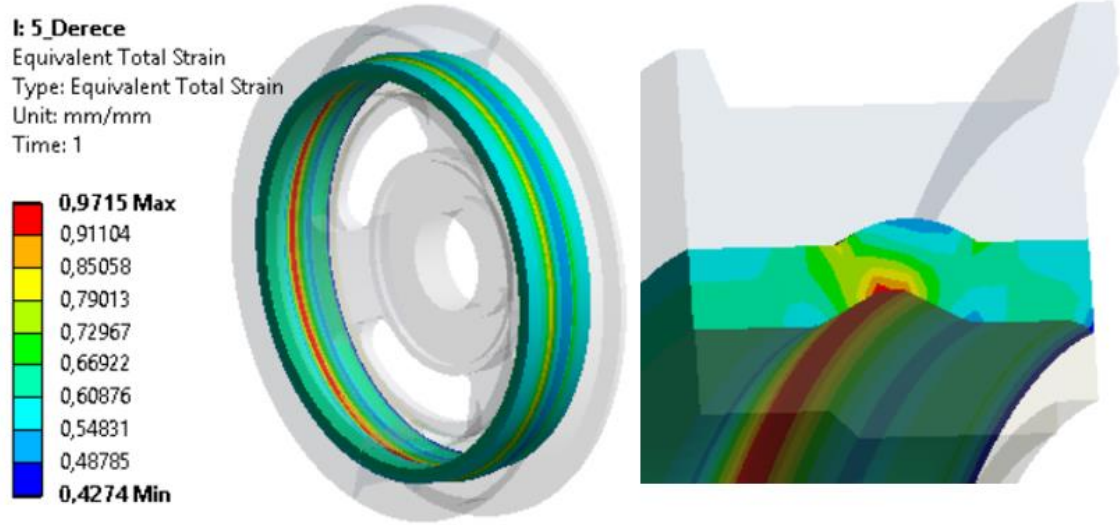
Şekil 4.44. 5° Burulma Sonrası Yer Değiştirme Dağılımları [mm]



Şekil 4.45. 5° Burulma Sonrası Metal Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



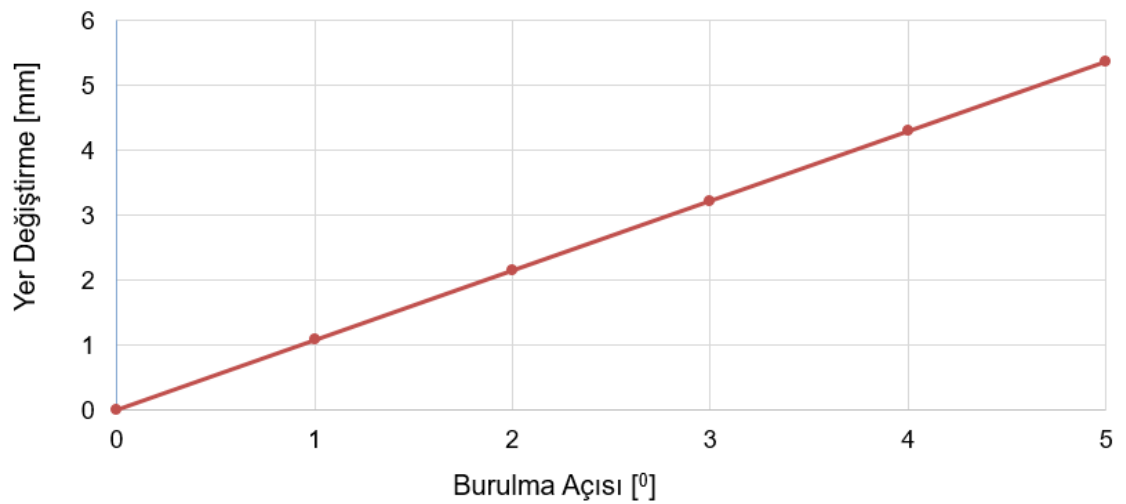
Şekil 4.46. 5° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]



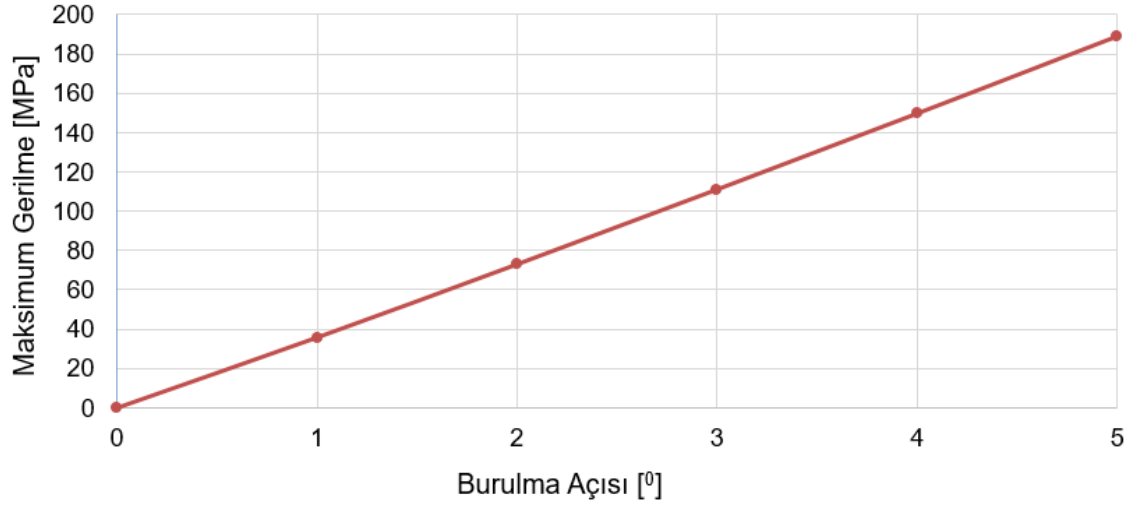
Şekil 4.47. 5° Burulma Sonrası Kauçuk Parçadaki Gerinim Dağılımları [mm/mm]

Kasnak parçasının 5° burulması için gereken moment değeri 605,1 Nm olarak hesaplanmıştır.

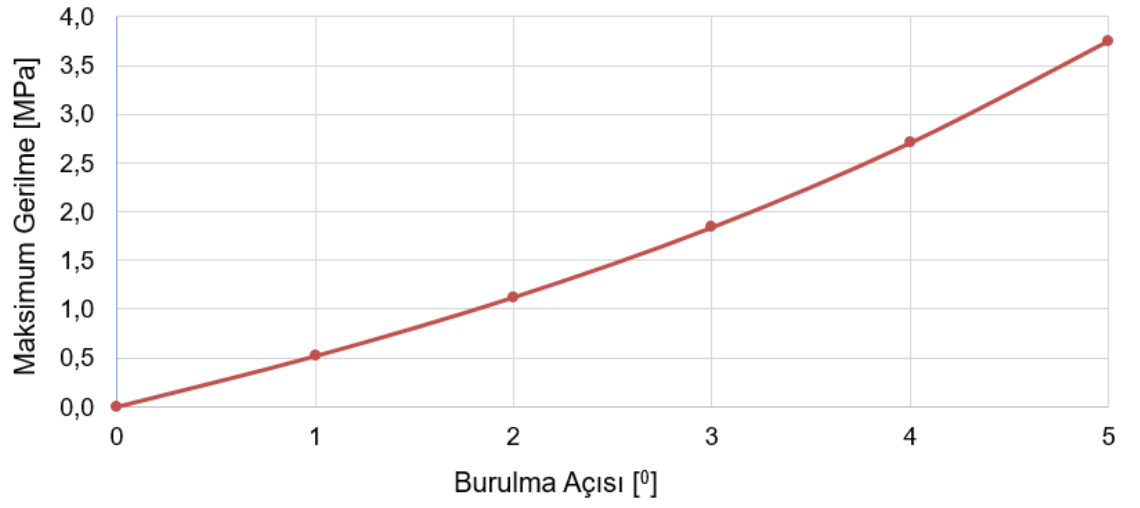
Yapılan analizler neticesinde burulma derecesi arttıkça parçalar üzerindeki yer değiştirmelerin (Şekil 4.48), gerilmelerin (Şekil 4.49, Şekil 4.50), gerinimlerin (Şekil 4.51) ve döndürme momentlerinin (Şekil 4.52) arttığı görülmüştür.



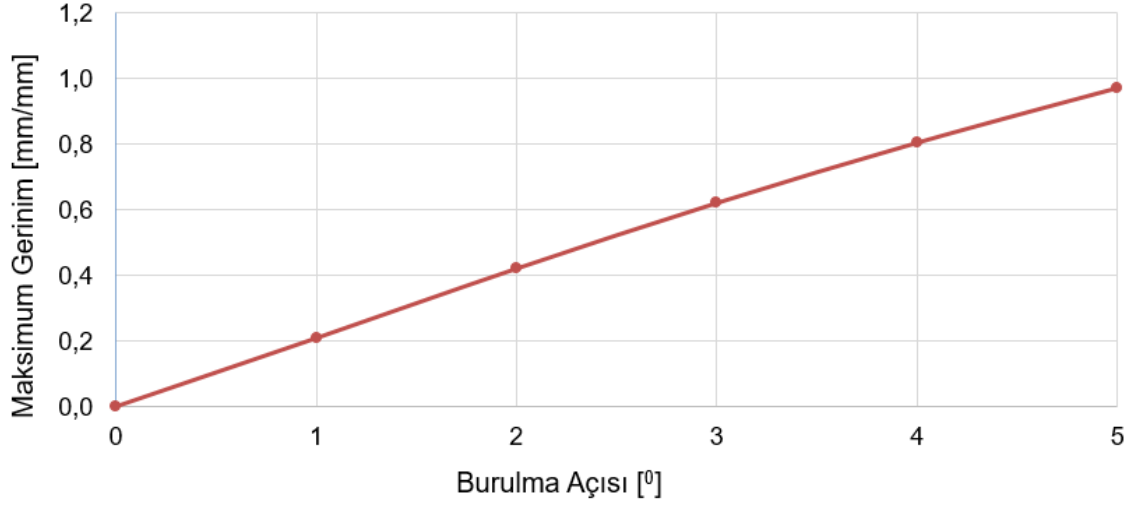
Şekil 4.48. Kasnak Üzerindeki Maksimum Yer Değiştirme [mm]



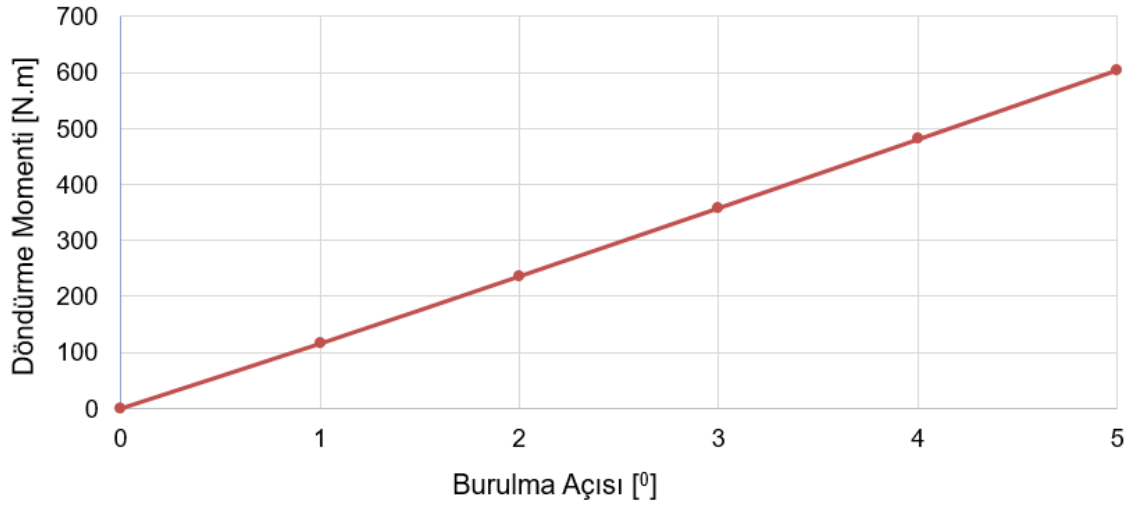
Şekil 4.49. Metal Parça Üzerindeki Maksimum Gerilme Değerleri



Şekil 4.50. Kauçuk Parça Üzerindeki Maksimum Gerilme Değerleri



Şekil 4.51. Kauçuk Parça Üzerindeki Maksimum Gerinim Değerleri



Şekil 4.52. Kasnağın Burulması Esnasında Gereken Döndürme Momenti [Nm]

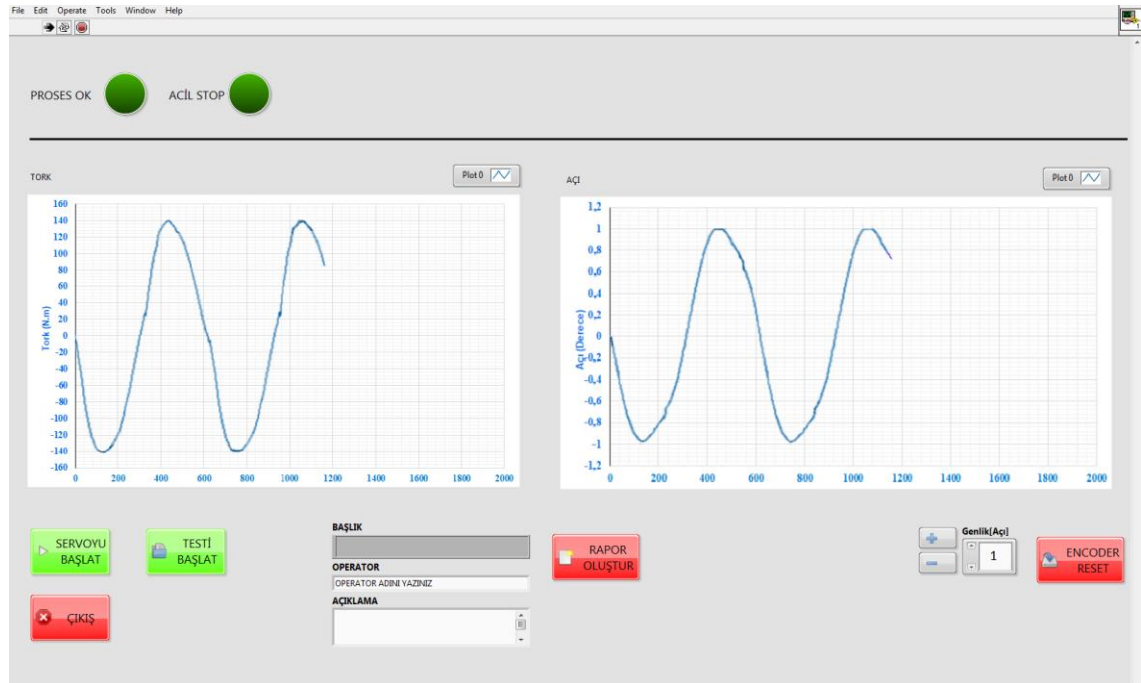
4.5. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Burulma Deneyi Sonuçları

Kasnak parçasının fiziki deneyleri için 5 adet numune hazırlanmıştır ve bu numuneler analiz şartlarında olduğu gibi sırasıyla 1°, 2°, 3°, 4° ve 5° dönme açılarına karşılık gelecek şekilde burulmuştur.

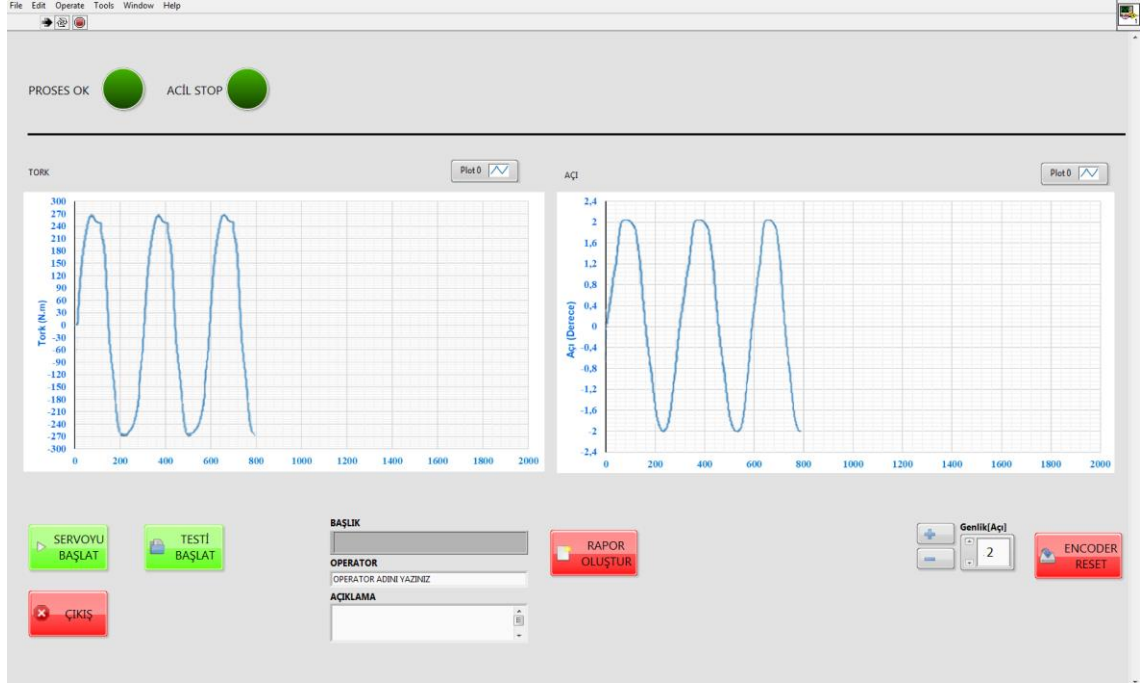
Sayısal analiz çalışmalarında yer değiştirme, metal parçalar üzerindeki gerilme, kauçuk parçada gerilme, kauçuk parçada gerinim ve burulma momenti gibi çıktılar elde

edilmiştir. Ancak yapılan fiziki deneyde bu sonuçlardan sadece burulma momenti çıktısı torkmetreden okunarak kıyaslanabilmiştir. Çünkü gerinim veya gerilim ölçülebilmesi için kasnak yapısı üzerine strain-gage gibi malzeme uzamasını ölçebilen bir sensör yerleştirilmesi mümkün değildir.

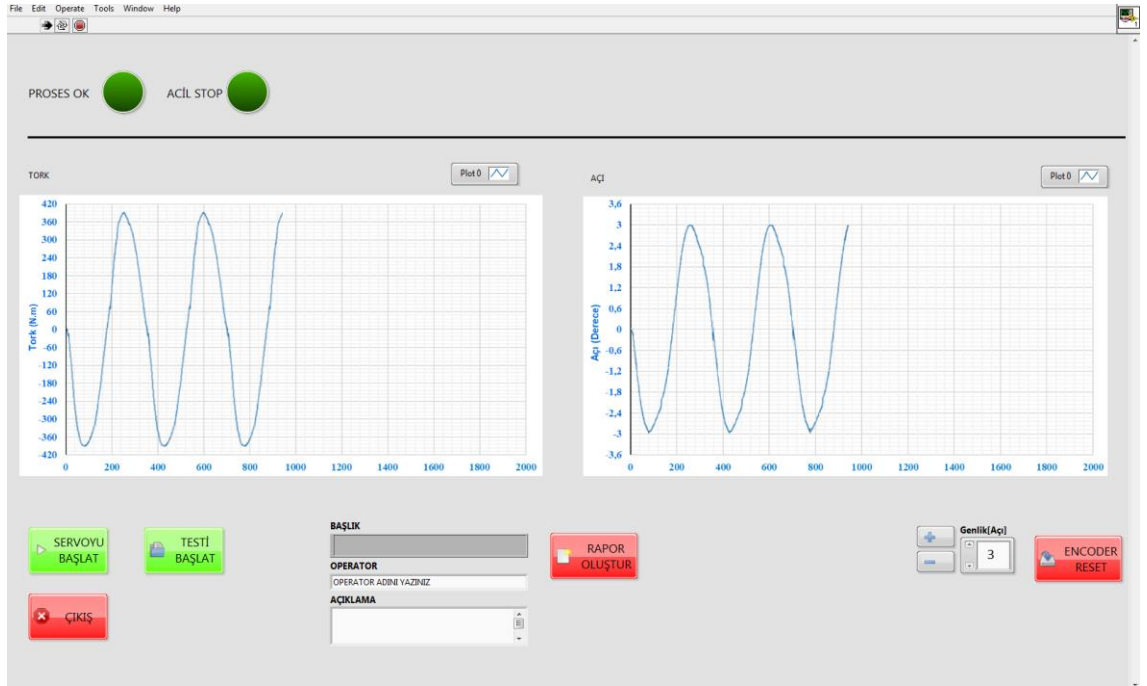
Hazırlanan numuneler içerisinde seçilen bir tanesinin sonuçlarını içeren ekran görüntüleri Şekil 4.53 - Şekil 4.57 arasında verilmiştir. Deney cihazının çalışması esnasında hazırlanan yazılım üzerinde dönme açısına karşılık gelen moment değerleri ekrana basılmıştır.



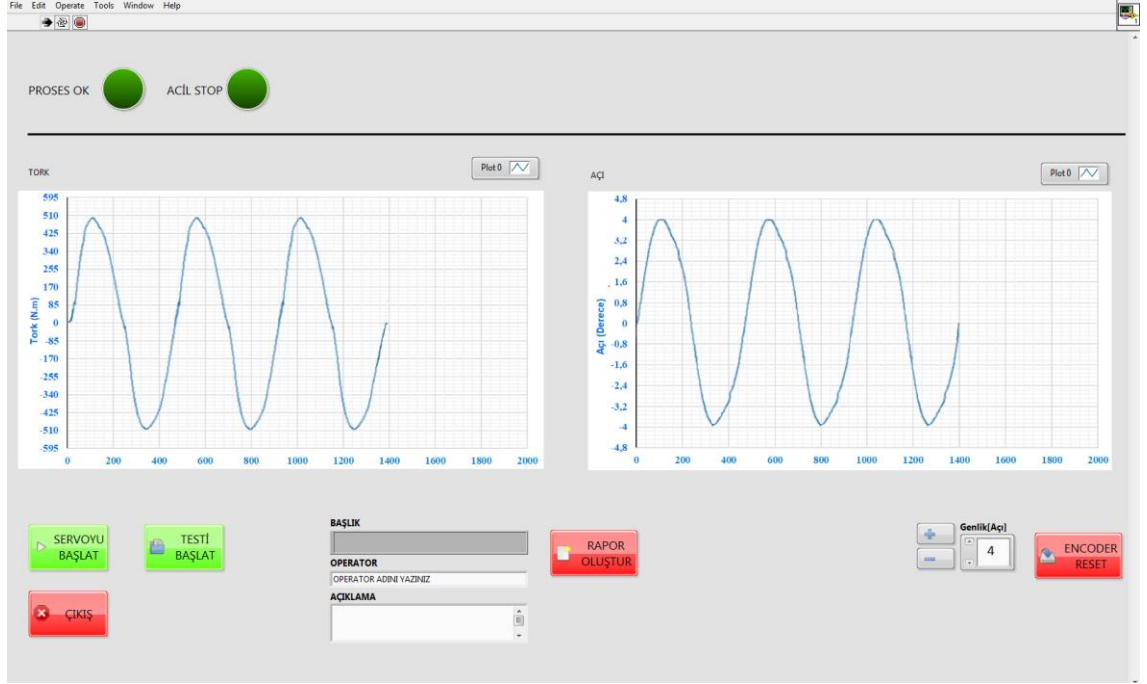
Şekil 4.53. 1° Burulmaya Karşılık Açılı ve Moment Değerleri



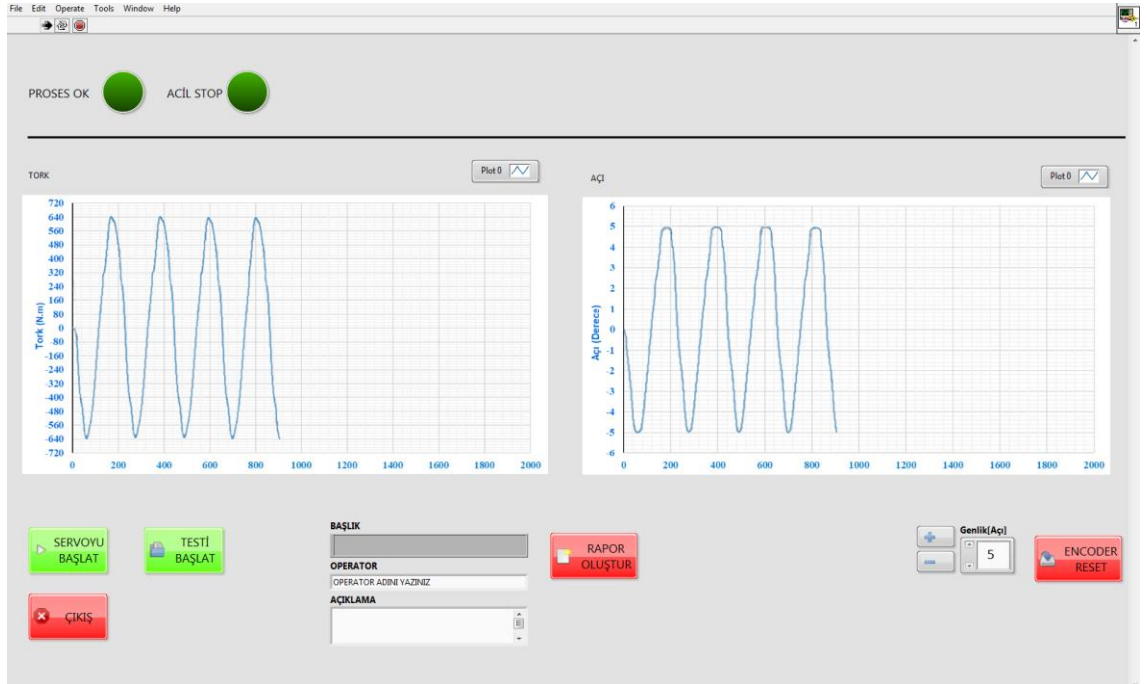
Şekil 4.54. 2° Burulmaya Karşılık Açı ve Moment Değerleri



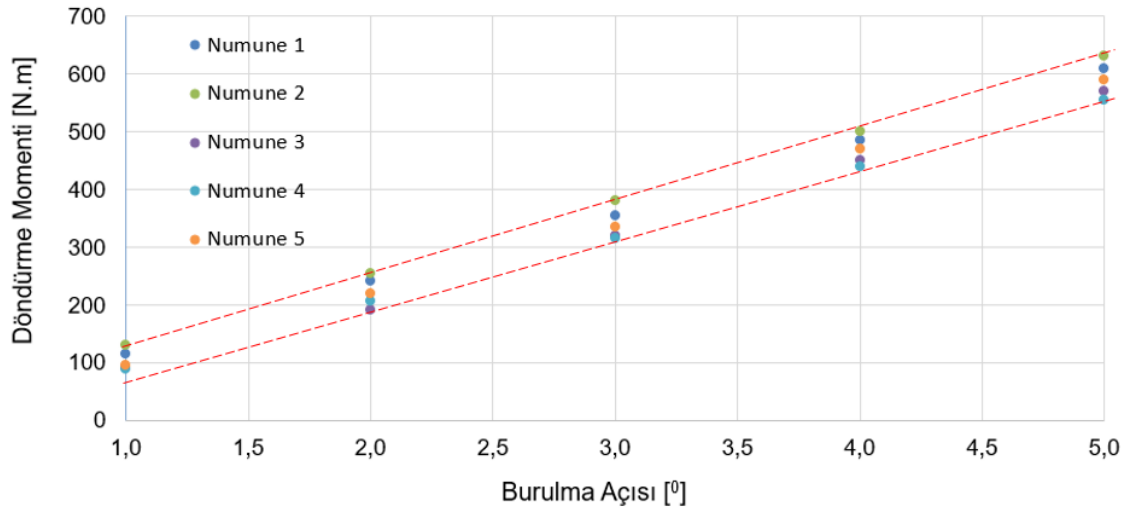
Şekil 4.55. 3° Burulmaya Karşılık Açı ve Moment Değerleri



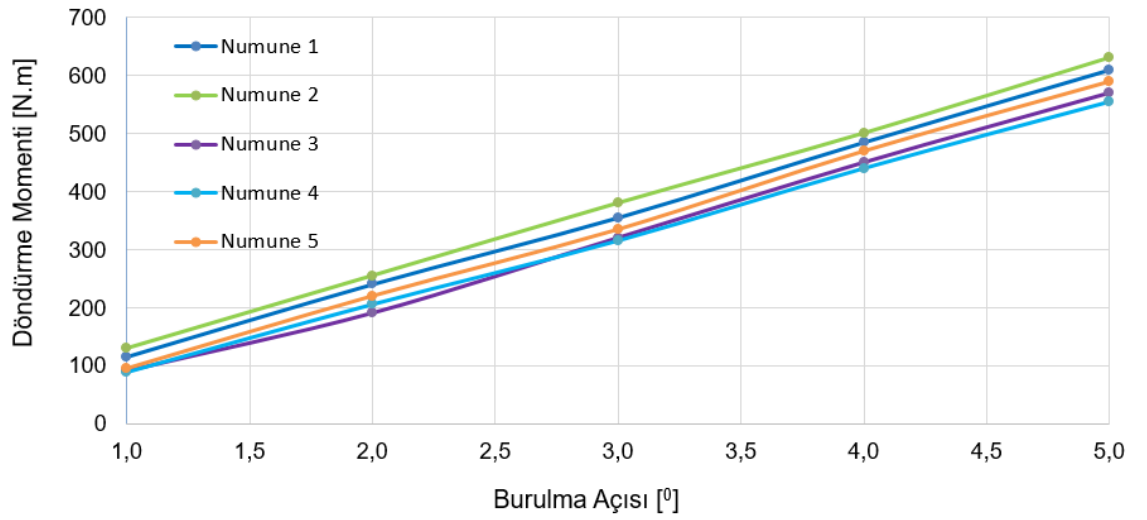
Şekil 4.56. 4° Burulmaya Karşılık Açı ve Moment Değerleri



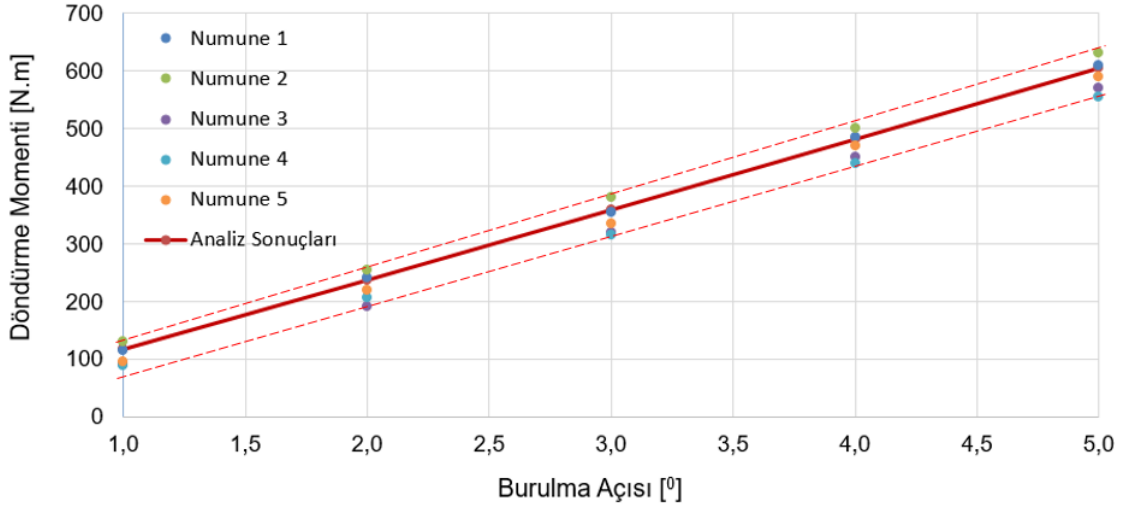
Şekil 4.57. 5° Burulmaya Karşılık Açı ve Moment Değerleri



Şekil 4.58. Numunelerin Burulma Açısına Karşılık Moment Değerleri



Şekil 4.59. Numunelerin Burulma Açısına Karşılık Moment Değerleri



Şekil 4.60. Analiz Sonuçlarının ve Numunelerin Fiziki Deneydeki Burulma Açıklarına Karşılık Moment Değerleri

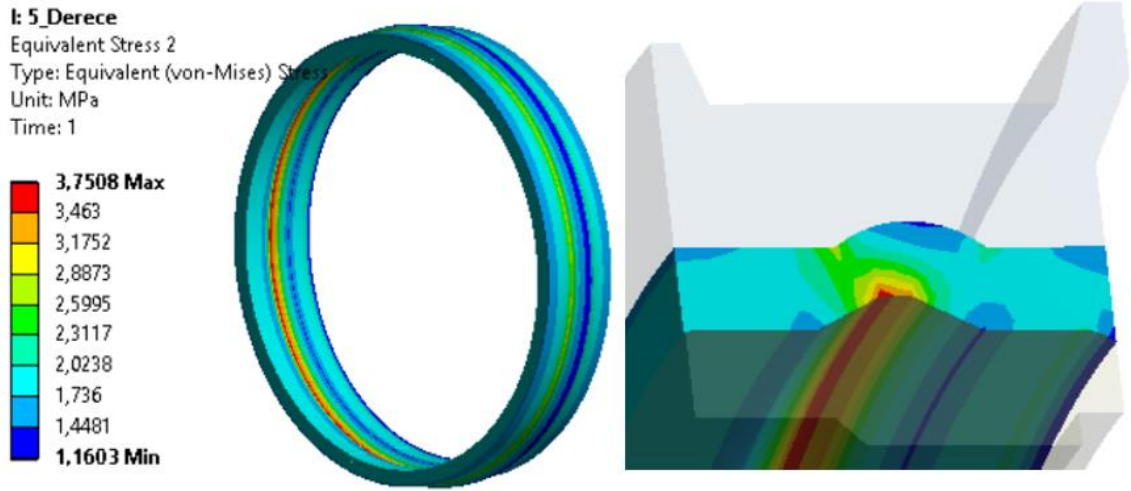
Şekil 4.58, Şekil 4.59 ve Şekil 4.60'da da görüldüğü üzere numunelerin her açı değerinde elde edilen moment değerlerinde $\pm 5\%$ 'lik sapmalar gözlemlenmektedir. Genel olarak kauçuk parçaların kullanım yerlerine de bağlı olarak bu sapma miktarı kabul edilebilir niteliktedir. Bu sapmaların genel sebepleri olarak; çok gözlü kalıplarda kauçuk parçaların üretilmesi esnasında yolluk tasarımlarına bağlı olarak kalıp gözlerinin dolmuş şekilleri ve zamanlarının değişmesi sayılabilir. Ayrıca kauçuk hamurunun hazırlanması esnasında karıştırma safhasında hamurun 100% homojen olarak karıştırılamaması da bir etkendir, böylelikle pişme sonrası kauçukların mekanik özellikleri birbirlerinden belli oranlarda farklılık göstermektedirler.

İzlenen yollar ve uygulanan yöntemler itibariyle elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde analizlerden elde edilen moment bilgisi ile fiziki deneylerden elde edilen moment değerlerinin kabul edilebilir nitelikte birbirlerine yakın ve doğru olduğu görülmektedir.

Bu sayede elde edilen malzeme karakteristikleri ve analiz yöntemi son ürün üzerinde doğrulanmıştır. Böylelikle, kasnak parçasının geometrisi analize dayalı şekilde optimize edilebilerek daha iyi sonuçların elde edileceği bir ürün haline getirilebilecektir.

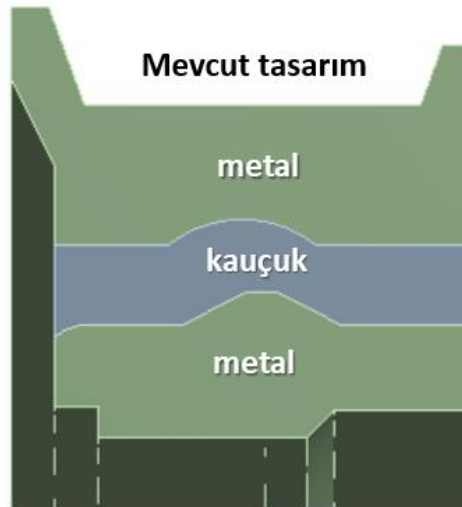
4.6. Metal-Kauçuk Bileşenli Kasnak Parçası Tasarım İyileştirme Çalışmaları

Mevcut tasarım üzerindeki analiz sonuçları incelendiğinde 5° burulma sonunda kauçuk malzemenin iç kısmındaki radyusta 3.75 MPa gerilme elde edilmektedir (Şekil 4.61).



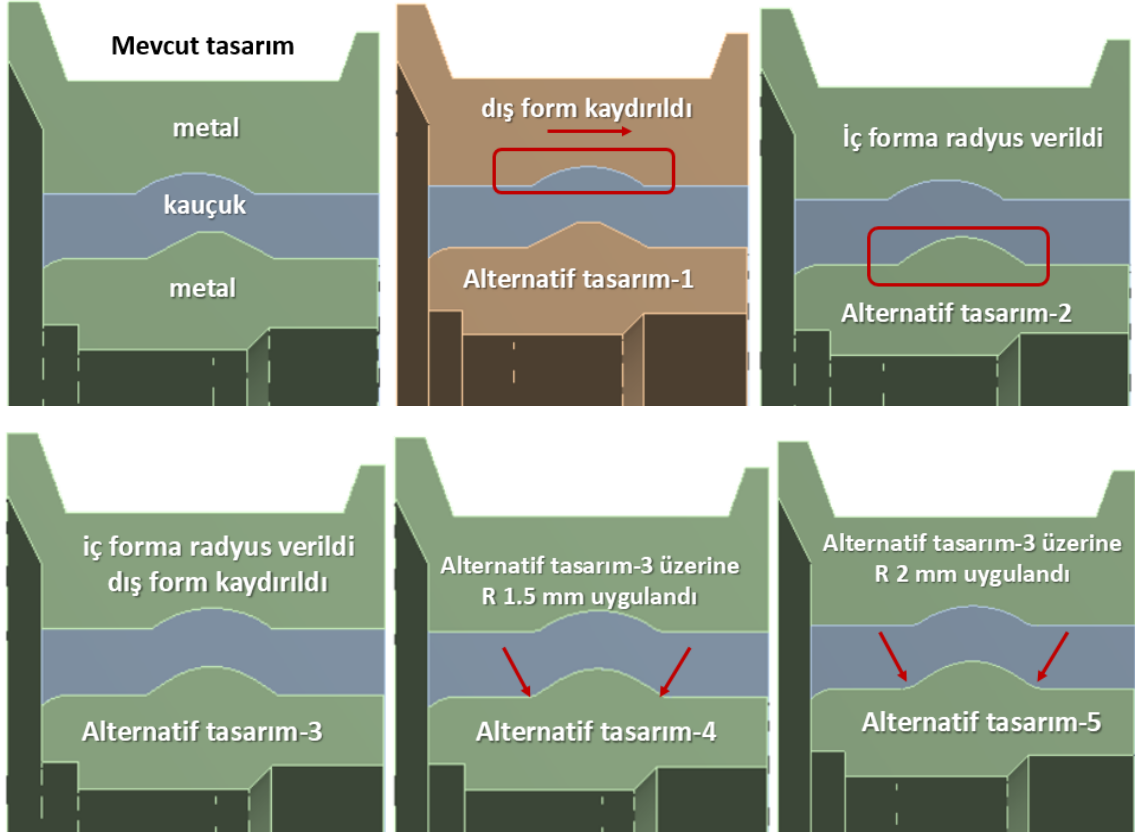
Şekil 4.61. 5° Burulma Sonrası Mevcut Tasarımdaki Kauçuk Parçadaki Eş Değer Gerilme Dağılımları [MPa]

Mevcut kasnak yapısının bu bölgedeki kesiti üzerinde (Şekil 4.62) form değişiklikleri yapılarak kauçuk malzeme üzerindeki gerilmelerin düşürülmesi hedeflenmiştir.



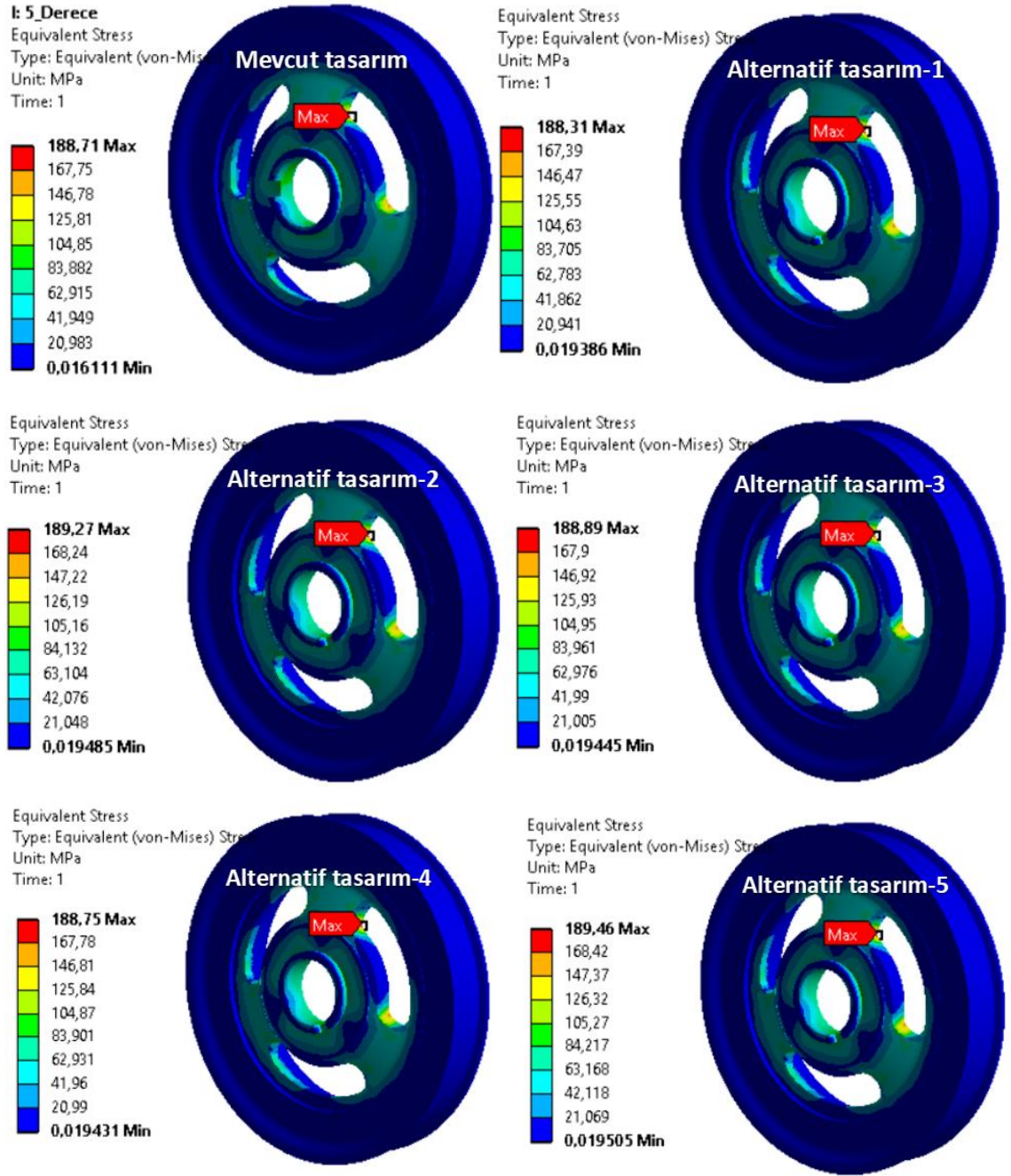
Şekil 4.62. Mevcut Kasnak Tasarımı Kesit Görünümü

Seçilen tasarım kriterlerinde kauçuk kesitinin dış formunda kaydırma, iç formunda geçişlerin köşeli olması yerine radyuslu olması ve ayrıca köşe radyusları eklenmesi gibi değişkenlerle tasarım alternatifleri değerlendirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen tasarım alternatifleri Şekil 4.63’de gösterilmiştir.

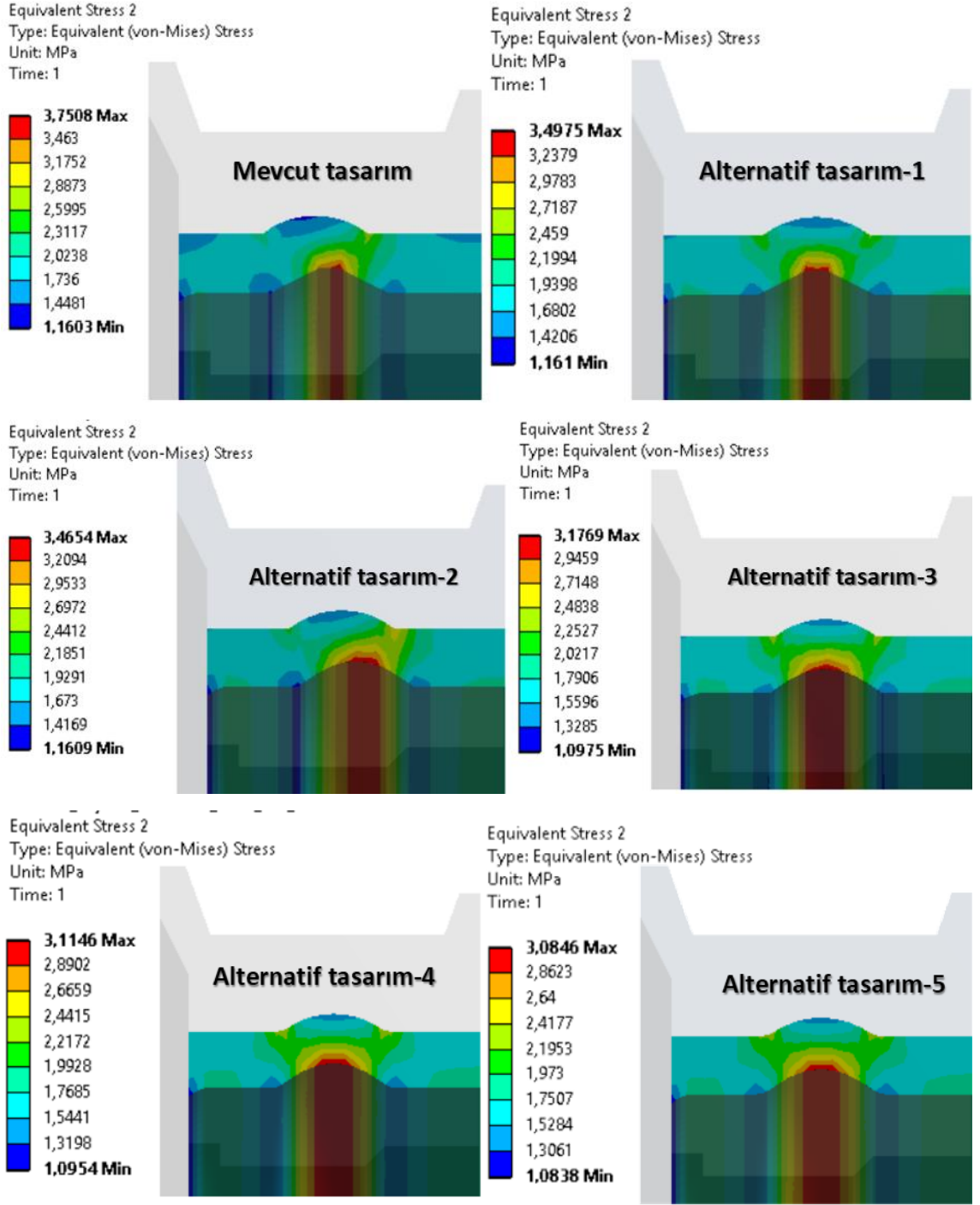


Şekil 4.63. Mevcut Kasnak Kesiti ve 5 Alternatif Kesit Görünümü

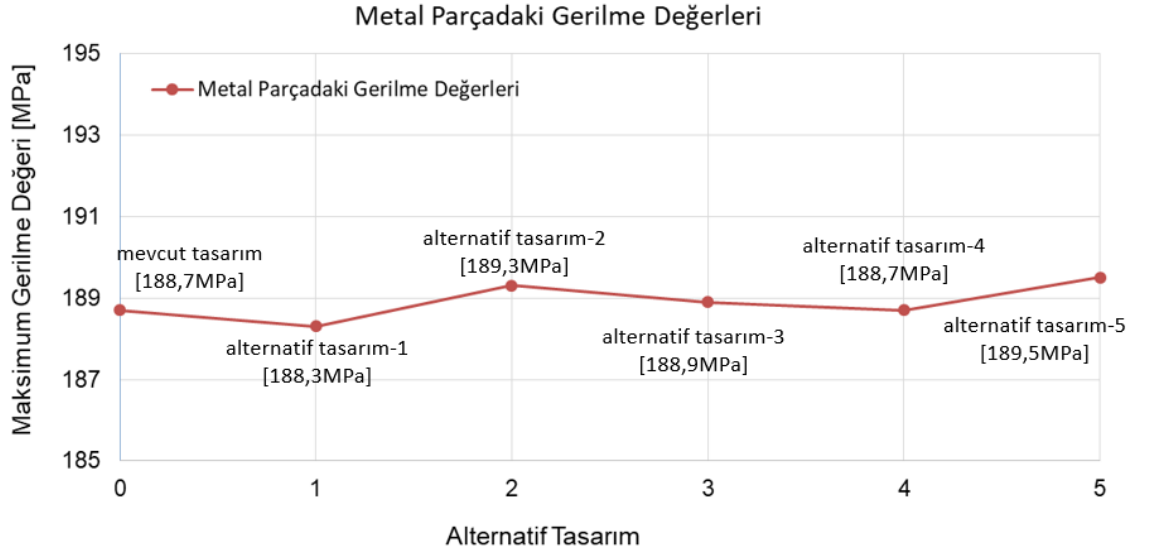
Yapılan analizler neticesinde kauçuk formlarındaki değişimlerden kaynaklı olarak sonuçlarda farklılıklar elde edilmiştir. Kıyaslama gerçekleştirilirken metal parçalar üzerindeki maksimum gerilme değerleri (Şekil 4.64), 5° burulma için gerekli döndürme momenti (Şekil 4.66) ve kauçuk parçalar üzerindeki maksimum gerilme değerleri (Şekil 4.65) kriter olarak alınmıştır.



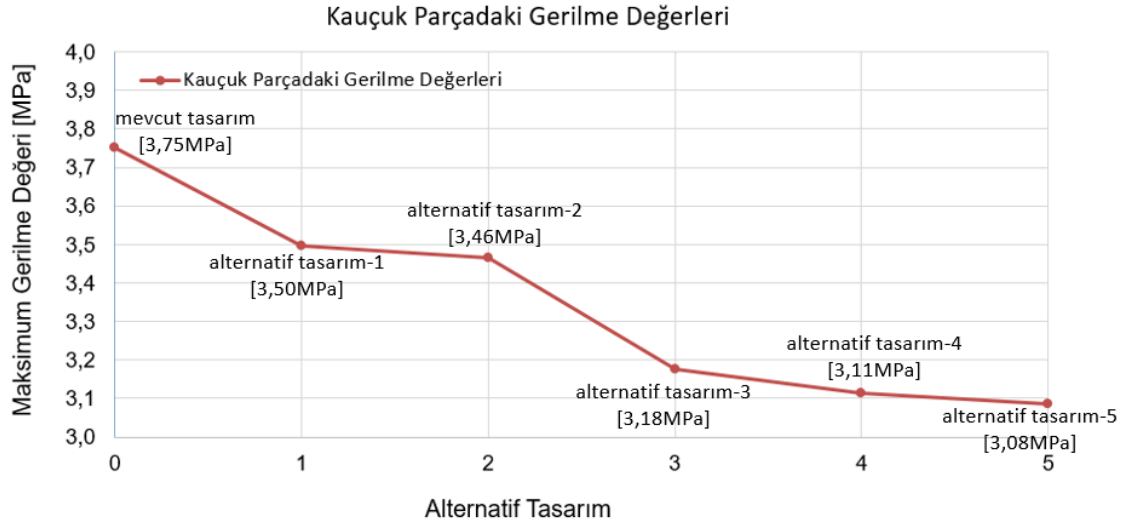
Şekil 4.64. Metal Parçalar Üzerindeki Gerilme Dağılımları



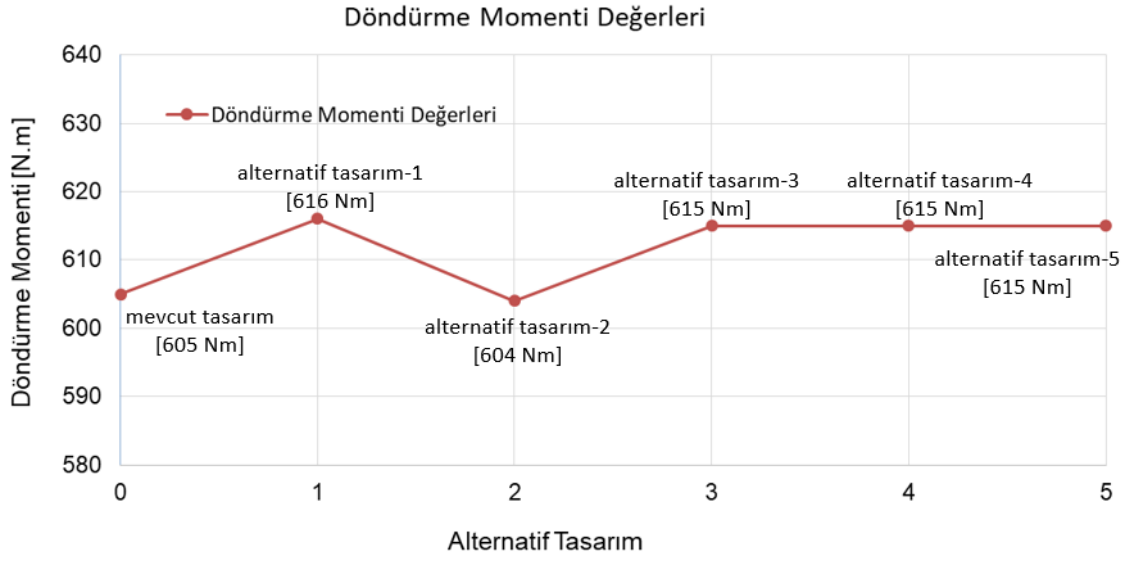
Şekil 4.65. Kauçuk Parçalar Üzerindeki Gerilme Dağılımları



Şekil 4.66. Alternatif Tasarımlara Göre Metal Parçalar Üzerindeki Gerilmeler [MPa]



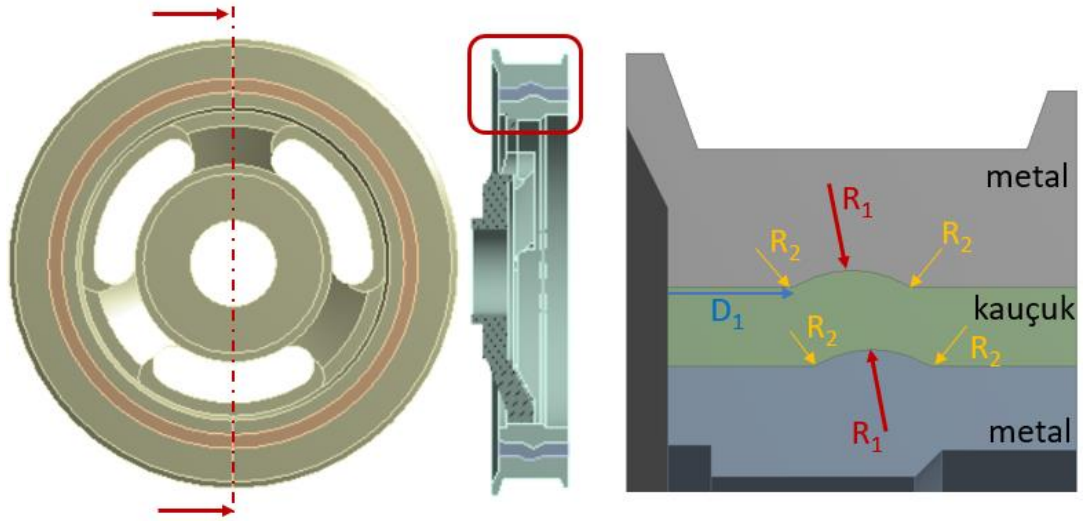
Şekil 4.67. Alternatif Tasarımlara Göre Kauçuk Parçalar Üzerindeki Gerilmeler [MPa]



Şekil 4.68. Alternatif Tasarımlara Göre Döndürme Momentleri [Nm]

Yapılan 5 farklı tasarım çalışmasına göre 5° döndürme analizlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.66, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68’de gösterilmiştir. Analizler sonucunda metal parçalar üzerinde oluşan gerilmelerde oldukça düşük mertebede değişim olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü metal kısımda herhangi bir geometrik değişiklik olmamıştır ve metal kısım kasnak yapısını tutan merkez kısım olduğundan üzerine gelen yükleme değişmemiştir. Döndürme momenti değerlerine bakıldığında tüm tasarım alternatiflerini 5° burmak için 605 Nm – 615 Nm aralığında momentler hesaplanmıştır ve neredeyse değişmediği kabul edilebilir. Yapının en kritik olan bölgesi olan kauçuk malzeme incelendiğinde ise mevcut durumda 3,75 MPa olan gerilme değeri %18 iyileşme ile 3,08 mertebelerine gerilemiştir.

Yapılan bu iyileştirme çalışmalarında her hangi bir sistematik takip edilmemiş, sadece öngörülse tahminlerle gerilme seviyelerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca en iyileme çalışmalarında daha sistematik bir yöntem izlenerek, ANSYS yazılımının optimizasyon araçları kullanılarak Şekil 4.69’da gösterildiği üzere tasarım kesitleri üzerinde en uygun değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır.

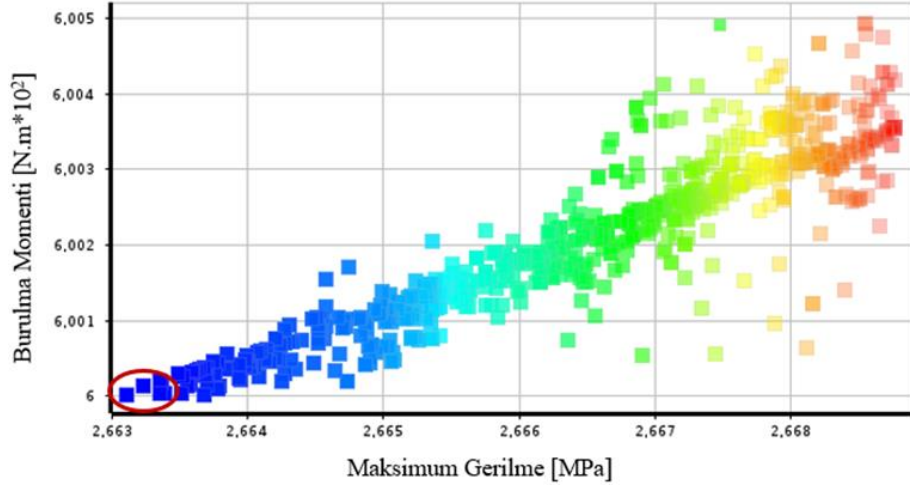


Şekil 4.69. En iyilemesi gerçekleştirilecek kesit üzerindeki tasarım değişkenleri

Çizelge 4.1. 5° Burulma Yüğü Altında Kesit Değişkenleri ve Amaç Değişkenleri

	Tasarım Değişkenleri		Amaç Değişkenleri	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
R₁	6,5 mm	8 mm		
R₂	1 mm	6 mm		
D₁	11 mm	14 mm		
Burulma Momenti			600 Nm	610 Nm
Maksimum Gerilme			Minimum	

Yapılan en iyileme analizinde, Çizelge 4.1.'de verilen tasarım değişkenlerinin verilen aralıklardaki değerlerinin kullanılmasıyla, amaç değişkenlerinde yer alan parametreler için sonuç nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 4.70). Amaç değişkeni olarak verilen parametreler belirlenirken kauçuk malzeme üzerinde elde edilen maksimum gerilmenin en aza indirilmesi temel hedeftir. Bu hedefe ulaşılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer amaç değişkeni de burulma momentidir. Burulma momentinin değişmesi istenilen bir çıktı değildir. Bu yüzden mevcut tasarımda 5° burulma yükü altında elde edilen burulma momentini olan 605 Nm değerinin korunabilmesi için 600 Nm – 610 Nm aralığı hedef olarak belirlenmiştir.



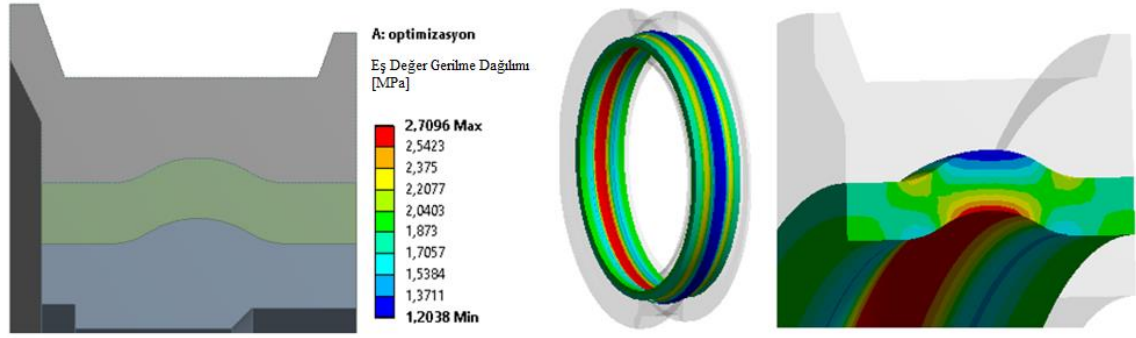
Şekil 4.70. En iyileme analizleri sonucu elde edilmiş aday parametreler nokta bulutu

En uygun 3 aday nokta incelendiğinde Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Ancak imalat şartları göz önünde bulundurulduğunda bu değerlerin kullanılabilmesi mümkün değildir. Bu yüzden tasarım değişkenleri belirlenirken imalata uygun şekilde nominal değerler seçilmiştir.

Çizelge 4.2. En iyileme sonucu elde edilmiş aday noktalar ve belirlenen tasarım değişkenleri

	R₁ (mm)	R₂ (mm)	D₁ (mm)	Burulma Momenti (Nm)	Maksimum Gerilme (MPa)
Aday Nokta-1	7,53	4,98	12,48	600	2,663
Aday Nokta-2	7,54	4,99	12,44	600	2,663
Aday Nokta-3	7,53	4,85	12,50	600	2,664
Belirlenen Değişkenler	7,50	5,00	12,50	600	2,710

Çizelge 4.2’de gösterilen aday noktalar dikkate alınarak belirlenen değişkenlerle analizler tekrarlandığında elde edilen burulma momentinin istenilen aralıkta ve maksimum gerilmenin de mevcut tasarıma göre beklenildiği gibi daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.71).



Şekil 4.71. Belirlenen değişkenlerle oluşturulmuş kesitin 5° burulma yükü altındaki gerilme dağılımı

Çizelge 4.3. Mevcut tasarım ve en iyilemesi gerçekleştirilmiş tasarım sonuçları

	Burulma Momenti (Nm)	Maksimum Gerilme (MPa)
Mevcut tasarım	605	3,75
En iyilenmiş tasarım	600	2,71

En iyileme çalışmalarında kasnak parçasının ana formunu oluşturan metal kısımda herhangi bir tasarım değişikliği yapılmadığından analizler sonucunda metal parçalar üzerinde oluşan gerilmeler değişmemiştir. Burulma momenti değerlerine bakıldığında kasnak parçasını 5° döndürebilmek için gereken momentin mevcut tasarımda 605 Nm, en iyilenmiş kesitte ise 600 Nm olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3). Yapının en kritik olan bölgesi olan kauçuk malzeme incelendiğinde mevcut tasarımda 3,75 MPa olan gerilme değeri %28 iyileşme ile 2,71 MPa değerine kadar düşürülebilmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, metal-kauçuk bileşenli motor kasnak parçasının burulma yükü altındaki yapısal davranışı incelenmiş, sayısal yöntemlerle ifade edilebildiği deneysel olarak da doğrulanarak gösterilmiştir ve sonrasında en iyileme çalışmaları gerçekleştirilerek kauçuk parça üzerinde en düşük gerilme mertebesine ulaşılan bir tasarım elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda aşağıda sıralan sonuçlara ulaşılmıştır;

Kauçuk numune deneylerinden elde edilen kuvvet-uzama grafikleri kullanılarak hesaplanan 3 parametrelili Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme katsayıları hem numune deney sonuçlarını hem de kasnak ürünü için gerçekleştirilen burulma deney sonuçlarını numerik olarak ifade etmekte başarılı olmuştur.

Kasnak parçasının 5° burulma yükü altında göstermesi gereken direnç 605 Nm'dir, ve bu yük altında kauçuk malzeme üzerinde elde edilen maksimum gerilme 3,75 MPa'dır. Öngörüselli olarak yapılan tasarım iyileştirme çalışmalarında kauçuk kısım üzerindeki gerilme değerleri 3,08 MPa mertebelerine kadar düşürülerek %18 oranında bir iyileştirme elde edilebilmiştir. Sonrasında optimizasyon araçlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilen en iyileme çalışmalarında 605 Nm olan burulma moment değerinin korunması ve kauçuk malzeme üzerindeki gerilmenin en düşük seviyeye indirilmesi amaç değişkeni olarak belirlenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda yapılan kesit geometrisi değişkenlerinin en iyileme çalışması sonucunda, $R1 = 7,5\text{mm}$, $R2 = 5\text{mm}$ ve $D1 = 12,5\text{mm}$ tasarım değişkenleri kullanılarak 600 Nm burulma direnci gösteren ve mevcut duruma göre %28 gerilme mertebesinde azalmayla 2,71 MPa maksimum gerilmeye sahip en iyilenmiş kasnak geometrisi elde edilmiştir.

İzlenilen bu yöntem ve adımlarla içerisinde kauçuk malzeme kullanılan başka ürünlerin de henüz tasarım safhasında, son ürün fiziki deneylerine ihtiyaç duyulmaksızın davranışları incelenebilir ve tasarım iyileştirme çalışmaları numerik olarak tamamlanabilir. Böylelikle geleneksel deneme-yanılma yöntemleriyle imalat süreçlerinde kaybedilen süre ve maliyetler büyük ölçüde ortadan kaldırılabilir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2001. ASTM D945-92 Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression or Shear (Mechanical Oscillograph). ASTM American Society for Testing and Materials, USA.

Anonim, 2004. Struktol Rubber Handbook. Struktol Company of America, <http://www.struktol.com/pdfs/rubberhb.pdf> -(Erişim Tarihi: 12.08.2017).

Anonim, 2006. The Complete Book of Rubber Processing and Compounding Technology, NIIR Board of Consultants and Engineers, 13-97.

Anonim, 2007. Test Methods of Rubber Materials And Products. Matador Rubber S.R.O., Slovakia.

Anonim, 2008. ASTM D 412-06a Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension. ASTM American Society for Testing and Materials, USA.

Anonim, 2010. Experimental Elastomer Analysis. MSC Software Corporation, USA.

Anonim, 2011. ISO 37:2011(E) Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Tensile Stress-Strain Properties. ISO International Standard Organization, Switzerland.

Anonim, 2011. Kimya Teknolojisi. Sentetik Kauçuk Özellikleri ve Testleri. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı.

Anonim, 2013. Skill Gap Analysis across Sub-Segments (Tyre and Non-tyre) for Rubber Industry – Manufacturing process of Rubber products, Rubber Skill Development Council.

Anonim, 2015. Introduction to Rubber. Stern Rubber Company USA, http://sternrubber.com/files/6814/1936/5017/Intro_to_Rubber_1-1-15.pdf-(Erişim Tarihi: 13.11.2017).

ANSYS Inc., 2018. ANSYS Help. Hyperelastic Material Models, https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/ans_mat/aQw8sq22dldm.Html-(Erişim Tarihi: 15.02.2018).

Boyce, M. C., & Arruda, E. M. 2000. Constitutive models of rubber elasticity: a review. *Rubber chemistry and technology*, 73(3), 504-523.

Brentin, R., Sarnacke, P. 2011. A Market Opportunity Study: Rubber Compounds, Omni Tech International Inc., Midland, Michigan, 28-36.

Bueche, F. 1960. Molecular basis for the Mullins effect. *Journal of Applied Polymer Science*, 4(10), 107-114.

Cadwell, S. M., Merrill, R. A., Sloman, C. M., & Yost, F. L. 1941. Rubber in the automotive industry. *Industrial & Engineering Chemistry*, 33(3), 370-374.

Cantournet, S., Desmorat, R., & Besson, J. 2009. Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model. *International Journal of Solids and Structures*, 46(11-12), 2255-2264.

Chatterjee, K., & Naskar, K. 2007. Development of thermoplastic elastomers based on maleated ethylene propylene rubber (m-EPM) and polypropylene (PP) by dynamic vulcanization. *Express Polymer Letters*, 1, 527-534.

Cornish, K. 2017. Rubber Production. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 3(2): 410-419.

Datta, R. N., & Ingham, F. A. A. 2001. Rubber Additives–Compounding Ingredients. Rubber Technologist’s Handbook, 167-208.

Diani, J., Fayolle, B., & Gilormini, P. 2009. A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*, 45(3), 601-612.

Elgström, E. 2014. Practical implementation of hyperelastic material methods in FEA models.

ERKEK, M., Necmettin, K. A. Y. A., & GÜVEN, C. 2015. Kauçuk Burçların Hiperelastik Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 20(1), 65-74.

Erkek, S. 2016. Kauçuk kapı stoperinin hiperelastik ve viskoelastik modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi (Master's thesis, Uludağ Üniversitesi).

Gent, A. N. 2012. Engineering with rubber: how to design rubber components. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Gent, A.N. 2016. Rubber Chemical Compound: Encyclopedia Britannica, Encyclopedia Britannica Inc., <https://www.britannica.com/science/rubber-chemical-compound-> (Erişim Tarihi: 19.10.2017).

Grellmann, W., Seidler, S. 2013. Polymer Testing. Hanser Publication, Munich, Germany, 22 pp.

Groover, M. P. 2020. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. John Wiley & Sons.

Guélon, T., Toussaint, E., Le Cam, J. B., Promma, N., & Grediac, M. 2009. A new characterisation method for rubber. *Polymer testing*, 28(7), 715-723.

Halim, S.F., Elsabee, M.Z. 2011. Rubber Types, Properties and Uses: Material Science and Technologies, Ed.: Popa, G.A., Nova Science Publishers Inc., New York, 267-304.

Hanhi, K., Poikelispaa, M., Tirila, H.M. 2007. Elastomeric Materials. Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 18-36.

Higuchi, T., Leeper, H. M., & Davis, D. S. 1948. Determination of Tensile Strength of Natural Rubber and GR-S. *Analytical Chemistry*, 20(11), 1029-1033.

Jakel, I. R. 2010. Analysis of hyperelastic materials with MECHANICA-Theory and Application examples.

James, H. M., & Guth, E. 1943. Theory of the elastic properties of rubber. *The Journal of Chemical Physics*, 11(10), 455-481.

Johlitz, M., & Diebels, S. 2011. Characterisation of a polymer using biaxial tension tests. Part I: Hyperelasticity. *Archive of Applied Mechanics*, 81(10), 1333-1349.

Kauffman, G. B., & Seymour, R. B. 1990. Elastomers: I. Natural rubber. *Journal of chemical education*, 67(5), 422.

Kauffman, G. B., & Seymour, R. B. 1991. Elastomers: II. Synthetic rubbers. *Journal of chemical education*, 68(3), 217.

Khajehsaeid, H., Arghavani, J., & Naghdabadi, R. 2013. A hyperelastic constitutive model for rubber-like materials. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 38, 144-151.

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.

Kim, W. D., Hur, S., Woo, C. S., Kim, W. S., & Lee, S. B. 2005. A study of the static and dynamic characteristics for automotive rubber mount by FEA and experiment. *In Key Engineering Materials* (Vol. 297, pp. 299-304). Trans Tech Publications Ltd.

Lindenmuth, B. E. 2006. An overview of tire technology. *The pneumatic tire*, 1, 13136.

Marinov, V. 2010. Rubber Processing Technology: Manufacturing Technology, Kendall Hunt Publishing, Iowa, USA, 51-52.

Martins, P. A. L. S., Natal Jorge, R. M., & Ferreira, A. J. M. 2006. A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone-rubber and soft tissues. *Strain*, 42(3), 135-147.

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

Morman, K.N., Pan, T.Y. 1987. Finite Element Analysis. *Rubber Chemistry and Technology*, 61: 503-532.

Muflikhun, M. 2015. Standard Testing for Elastomer (rubber) Part 1. General Rubber. Basic Rubber Testing, Gadjah Mada University, Indonesia.

Mullins, L. 1969. Softening of rubber by deformation. *Rubber chemistry and technology*, 42(1), 339-362.

Gil-Negrete, N., Rivas, A., & Vinolas, J. 2005. Predicting the dynamic behaviour of hydrobushings. *Shock and Vibration*, 12(2), 91-107.

Nigoyi, K.U. 2007. Introduction to Fibre Science and Rubber Technology: Polymer Science, Division of material Science Shri Ram Institute for Industrial Research, Delhi, 10-32.

Ogden, R. W., & Roxburgh, D. G. 1999. A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 455(1988), 2861-2877.

Ohm, R. F. 1990. The Vanderbilt Rubber Handbook, RT Vanderbilt Company. INC. ed. Norwalk.

Österlöf, R. 2014. Modelling of the Fletcher-Gent effect and obtaining hyperelastic parameters for filled elastomers (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).

Lopez-Pamies, O. 2010. A new I1-based hyperelastic model for rubber elastic materials. *Comptes Rendus Mecanique*, 338(1), 3-11.

Samad, M. S. A., Ali, A., & Arifin, M. K. A. 2011. Life Prediction of Rubber Automotive Components Using Finite Element Method. *In Key Engineering Materials (Vol. 462, pp. 535-540). Trans Tech Publications Ltd.*

Sasso, M., Palmieri, G., Chiappini, G., & Amodio, D. 2008. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods. *Polymer Testing*, 27(8), 995-1004.

Sasso, M., Papalini, S., Chiappini, G., Palmieri, G., & Meccanica, D. 2007, June. Characterization of time-dependent materials by biaxial stretching tests. In Proceedings of SEM Annual Conference. Springfield, MA.

Schaefer, R.J. 2002. Mechanical Properties of Rubber: Harris' shock and vibration handbook (Vol. 5, pp. 1025-1083). New York: McGraw-Hill.

Seibert, H., Scheffer, T., & Diebels, S. 2014. Biaxial testing of elastomers: experimental setup measurement and experimental optimisation of specimen's shape. *Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics*, 34(2), 72-89.

Shahzad, M., Kamranb, A., Siddiquia, M.Z., & Farhan, M. 2015. Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. *Materials Research*, 18, 918-924.

Steinbüchel, A. 2003. Production of rubber-like polymers by microorganisms. *Current Opinion in Microbiology*, 6(3), 261-270.

Treloar, L.R.G. 1944. Strains in an inflated rubber sheet, and the mechanism of bursting. *Rubber Chemistry and Technology*, 17(4), 957-967.

Vahapoğlu, V. 2013. Kauçuk Mekaniğinde Yapılan Deneyler. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 33-60.

Venkatesh, K., & Srinivasa Murthy, P. L. 2012. Experimental validation and data acquisition for hyperelastic material models in finite element analysis. *Int J Mech Ind Eng*, 2(4), 72-76.

Wang, L. R., Lu, Z. H., & Hagiwara, I. 2002. Finite element simulation of the static characteristics of a vehicle rubber mount. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 216(12), 965-973

Woo, C. S., Kim, W. D., & Kwon, J. D. 2008. A study on the material properties and fatigue life prediction of natural rubber component. *Materials Science and Engineering: A*, 483, 376-381.

Zhao, J., Li, Q., & Shen, X. 2008. Finite element analysis and structure optimization for improving the fatigue life of rubber mounts. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 45(6), 479-484.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ufuk PENEKLİ

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 19.07.1982

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Bursa Erkek Lisesi

Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği

Yüksek Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği

Çalıştığı Kurum(lar) : FİGES, CAE Mühendislik, FE-TECH İleri Mühendislik

İletişim (e-posta) : ufuk.penekli@fe-tech.com.tr

Akademik Çalışmalar : **Buyuk, M., Balaban, H., Penekli, U. 2019.** Blast Detonated by Impact Simulation. 12th European LS-DYNA Conference 2019, Koblenz, Germany.