KAUÇUK BURÇLARIN ÇAPLAMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE ÜRÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN ANALİZİ

İbrahim Cem ÖNCÜ

T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAUÇUK BURÇLARIN ÇAPLAMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE ÜRÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN ANALİZİ

İbrahim Cem ÖNCÜ

Prof. Dr. Necmettin KAYA

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2018

TEZ ONAYI

İbrahim Cem ÖNCÜ tarafından hazırlanan **"KAUÇUK BURÇLARIN ÇAPLAMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE ÜRÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN ANALİZİ"** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Necmettin KAYA

Başkan : Prof. Dr. Necmettin KAYA İmza

Bursa Uludağ Üniv. Mühendislik Fakültesi,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Fatih KARPAT İmza

Bursa Uludağ Üniv. Mühendislik Fakültesi,

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE İmza

Bursa Teknik Üniv. Mühendislik ve Doğa Bil. Fak.

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

../../….(Tarih)

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

- 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.

../../….

İbrahim Cem ÖNCÜ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAUÇUK BURÇLARIN ÇAPLAMA İŞLEMİNİN MODELLENMESİ VE ÜRÜN PERFORMANSINA ETKİSİNİN ANALİZİ

İbrahim Cem ÖNCÜ

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Bu çalışmada bir süspansiyon sisteminin titreşim sönümleme elemanı olan kauçuk metal malzeme çiftinden üretilen bir burçta çaplama işleminin ömür üzerine etkisi incelenmiştir. Çaplama işlemi ve statik katılık değişimlerinin tespitinde sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan hiperelastik modelinin hazırlanmasında ve sonuçların değerlendirilmesinde Msc. Patran yazılımı, analizin çözümleyicisi olarak ise Msc. Marc yazılımı kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizde kullanılan malzeme modelinin ve uygulanan metodun doğrulanması için üretilen prototipler, analiz ile aynı sınır koşullarında test edilmiştir. Önce radyal yönde test edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son aşamada ise çaplamanın parça ömrü üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla üretilen prototipler ömür testine tabi tutulmuşlardır. Sonuç olarak uygulanan çaplama değerinin ömür üzerinde göstermiş olduğu etki belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kauçuk malzeme, kauçuk burç, titreşim, hiperelastik, çaplama, ömür, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi.

ABSTRACT
MSc Thesis

ANALYSIS OF THE RUBBER BUSHING CALIBRATION PROCESS AND EFFECT ON THE LIFE PERFORMANCE

İbrahim Cem ÖNCÜ

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Necmettin KAYA

In this study, the influence of the calibration process on the life of a bushing which is used as a vibration damping element in suspensions was investigated. Finite element analysis is performed to determine the change of the static stiffness and calibration prosess. The Msc.Patran software is used in the preparation of the hiperelastic nonlinear analysis model and evaluation of the results, Msc.Marc software is used as a solver. The prototypes produced for verification of the material model and the applied method were tested at the same boundary conditions as the analysis. Firstly prototypes were tested in radial direction and the results are compared to the analysis results. At the last stage, prototypes which are produced for examination the effect of calibration on the part are used for durability test. As a result, the effect of the applied calibration on life is determined.

Key words: Rubber material, rubber bushing, vibration, hyperelastic, calibration, durability, nonlinear finite element analysis.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli fikir ve önerileri ile yol gösterici olan, her aşamada yardımcı olan ve her türlü konuda manevi desteğini esirgemeyen Tez Danışmanım Sayın Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya,

Deneysel çalışmalarım için bana firmalarını açan ve her türlü hammadde ve teknik desteği sağlayan Coşkunöz Holding A.Ş. firmasına,

Hayatımın her alanında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her anlamda bana inanarak güç veren annem Hamide ÖNCÜ, babam Necip ÖNCÜ ve abim Tarık ÖNCÜ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

2005 yılında kaybettiğim abim Göksel ÖNCÜ' yü saygı ve özlem ile anıyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…… I
ABSTRACT…… II
TEŞEKKÜR…… III
SİMGELER ve KISALTMALAR…… V
ŞEKİLLER DİZİNİ…… VI
ÇİZELGELER DİZİNİ…… VII
1. GİRİŞ…… 1
2. KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARASTIRMASI…….....5
2.1 Kauçukların Genel Tanıtımı ve Kullanım Alanları……...5
2.2 Kauçuk Parça Tasarımı…… 8
2.3 Kauçuk-Metal Burçların Tasarımı…… 8
2.4 Kauçuk Metal Parçaların Üretimi……..10
2.5 Kauçuk Metal Yapışması……...11
2.6 Kauçuk Burç Çaplama İşleminin Gerekçeleri……...12
3. MATERYAL VE YÖNTEM…… 13
3.1 Burçların Üretimi……...14
3.2 Kauçuk Testleri…… 15
3.3 Burçların Çaplanması…… 16
3.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması……...17
3.5 Malzeme Modeli Oluşturma……..19
4. BULGULAR……21
4.1 Radyal Statik Analizler…… 21
4.2 Radyal Katılık Testleri…….. 23
4.3 Ömür Testleri…… 25
5. TARTIŞMA VE SONUÇ…… 28
KAYNAKLAR……30
ÖZGEÇMİŞ……..32

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler Açıklama

E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
ε	Gerinme
L_0	İlk Boy
L	Son Boy
λ	Uzama Oranı
I	İnvaryant
J	Hacim Oranı
σ	Gerilme
W	Şekil değiştirme Enerjisi

Kısaltmalar Açıklama

NR	Doğal Kauçuk
SBR	Stiren Butadien Kauçuk
NBR	Nitril Kauçuk
EPDM	Etilen Propilen Kauçuk
CR	Kloropren Kauçuk
BR	Bütadien Kauçuk
ACM	Poliakrilik Kauçuk
MQ	Silikon Kauçuk
FKM	Florokarbon Kauçuk
HNBR	Hidrojen Nitril Kauçuk
CO, ECO	Epiklorohidrin Kauçuk
IR	Isopren Kauçuk
TPU	Termoplastik Polüretan
PTFE	Politetrafloroetilen
PA	Poliamid
ASTM	American Society for Testing and Materials
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çeşitli kauçuk burçlar 1
Şekil 1.2. Bir iç burç, bir dış burç ve bu burçların arasını dolduran kauçuk malzemesinden oluşan parça 2
Şekil 1.3. a. Tasarlanan kauçuk burç ve b. Üretilen kauçuk burç 3
Şekil 1.4. Çaplama görseli 4
Şekil 3.1. a. Burç kesit görünümü ve boyutlar b. Üretilen burç 13
Şekil 3.2. a. İç burç yapıştırıcı uygulanmış görseller b. Dış burç yapıştırıcı uygulanmış görseller 14
Şekil 3.3. 9 gözlü transfer kalıp 15
Şekil 3.4. Kauçuk çekme testi numunesi (kaşık numune) 15
Şekil 3.5. Çaplama kalıbı 17
Şekil 3.6. Parçanın sonlu elemanlar modeli 17
Şekil 3.7. Parçanın 1/4 modelinde mesh yapısı gösterimi 18
Şekil 3.8. Kauçuk sınır şartların tanımlanmış yarım ve tam parça hali 18
Şekil 3.9. a. Çekme Test Numunesi b. Basma Test Numunesi c. Kesme Test Numunesi 19
Şekil 4.1. a. 72,8 mm (Çaplanmamış) radyal analizi, b. 1 mm çaplama, c. 1 mm çaplamalı parçanın radyal analizi, d. 1,75 mm çaplama, e. 1,75 mm çaplamalı parçanın radyal analizi 22
Şekil 4.2. SEA radyal katılık değerleri grafiği 22
Şekil 4.3. Radyal katılık testleri görseli 24
Şekil 4.4. Test radyal katılık değerleri 25
Şekil 4.5. Kauçuk burç ömür testleri. 25
Şekil 4.6. Parça ömründeki katılık değişimin grafiksel gösterimi 26

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Kauçukların temel özellikleri.....6
Çizelge 3.1 Kauçuk Burçta Kullanılan Malzemeler 13
Çizelge 3.1. Yapılan kauçuk testleri ve standartları.....16
Çizelge 4.1. SEA Radyal Katılık Değerleri 23
Çizelge 4.2. Test Parametreleri 23
Çizelge 4.3. SEA ve Radyal Katılık Testi Değerlerinin Karşılaştırılması 24
Çizelge 4.4. Ömür Testi Parametreleri.....26
Çizelge 4.5. Çevrim Sayısına Karşılık Gelen Katılık Değerleri Değişimi.....27

1. GİRİŞ

Kauçuk-metal burçlar her aracın süspansiyon sisteminde bulunur. Süspansiyon elemanları birbirlerine bağlanırken, ana gövdeye de burçlar yardımıyla bağlanırlar. Burçlar, süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi ve tasarlanması safhasında anahtar rol üstlenirler. Lastik burcun dinamik özelliklerinin belirlenmesi çok komplekstir. Bunun nedeni dinamik karakterin frekans, sıcaklık, önyükleme ve genlik gibi birçok parametreye bağlı olmasıdır.

Kauçuk-metal burçların tasarlanmasında burcun hareket mesafesi daha öncelikli bir parametre olmasına rağmen, uygulanan yükleme tipi ve şiddeti gibi kullanım şartları da göz önünde bulundurulmalıdır.

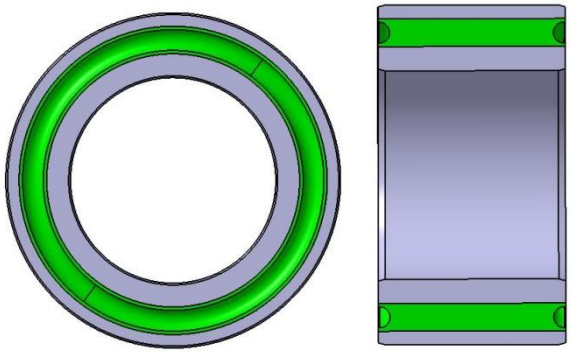
Kauçuk-metal burçlar aynı zamanda süspansiyon sisteminde titreşim sönümleme elamanı olarak da kullanılmaktadır. Yoldan ve aracın hareketli parçalarından gelen titreşim, şok ve darbe gibi etkileri sönümleyerek araç gövdesine iletilmesini engelleyen, sürüş konfor gereksinimini sağlayan en önemli parçalardan biridir. Bir araç üzerinde (otomobil) yaklaşık 50 adet kauçuk burç bulunmaktadır. Kauçuk burçlar otomobillerde olduğu gibi ticari araçlarda, ağır vasıta araçlarda, römorklarda, trenlerde, traktörler gibi süspansiyon sistemine sahip birçok araçta kullanılmaktadır. Şekil 1.1’ de çeşitli metal kauçuk burç parçaları gösterilmektedir.



Şekil 1. 1. Çeşitli kauçuk burçlar

Şekil 1.1’de gösterildiği gibi kauçuk burçlar genel itibari ile bir metal iç burç, bir metal dış burç ve bu burçların arasını dolduran kauçuk malzemesinden oluşmaktadır. Kauçuk parçalar vulkanizasyon yöntemi dediğimiz bir yöntem ile, kauçuk preslerinde özel

kalıplar içinde üretilmektedir. Şekil 1.2'de bir iç burç, bir dış burç ve onun arasını dolduran kauçuktan oluşan bir kauçuk burç modeli gösterilmektedir.



Şekil 1. 2. Bir iç burç, bir dış burç ve bu burçların arasını dolduran kauçuk malzemesinden oluşan parça

Elastomer terimi, elastik veya lastik benzeri polimerlerin tamamını kapsar (Boşnak 2010). Teknik tanımı ASTM' de verildiği üzere; elastomer, oda sıcaklığında orijinal uzunluğunun en az iki katına uzatılabilen ve kuvvet kaldırıldığında hızla orijinal uzunluğuna dönen polimer malzemedir.

Daha genel olarak, elastomer elastik ya da esnek olan herhangi bir madde olarak düşünülür ve genellikle görünüş ve dokunuş olarak doğal kauçuğu andırır. Bu maddelerden bazen kauçuk olarak bahsedilir.

Elastomerler daha kapsamlı olarak "çok düşük sıcaklıklarda cam gibi sert olan, çok yüksek sıcaklıklarda dahi koyu sıvımsı akışkan özellikler göstermeyen, oda sıcaklığından, parçalanma sıcaklığına kadar geniş bir alan içerisinde elastik özellikler gösteren, kauçukların seyrek çapraz bağlanması sonucu elde edilen polimerik malzemeler" seklinde tanımlanabilir.

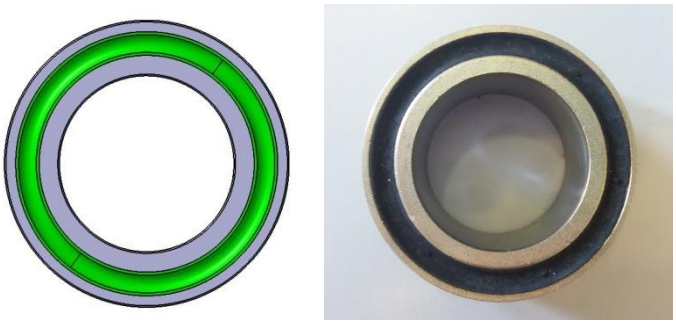
Elastomerleri, diğer polimer gruplarından ayıran en önemli özellikleri; yüksek kopma uzamaları, kabul edilebilir düzeyde kopma mukavemetleri, aşınma dirençleri, solvent ve dış hava şartlarına dayanım gibi özelliklerdir. Elastomer hal yapısı için polimerin; yüksek molekül ağırlığına, düşük zincirler arası kuvvete, gelişigüzel zincir yapısına ve çapraz bağlanabilme özelliğine sahip olması gerekir.

Moleküller yaygın olarak bağlanmıştır; bu nedenle bir kuvvet uygulandığında bağlar ya da zincirler açılır ve minimum kuvvetle boyca yaklaşık %100 uzatılabilirler ve kuvvet

kaldırıldığında orijinal şekillerine geri dönerler. Camsı geçiş sıcaklıkları oda sıcaklığının altında olduğundan, gevrekleşmeleri için oda sıcaklığının altına soğutulmalıdırlar.

Elastomerler esasen birbirine seyrek aralıklarla bağlanmış sarmal yapıya benzeyen spiral iplikler oluşturma eğilimindeki geniş moleküllerden oluşmuştur. Küçük bir gerilim uygulandığında bu zincirler uzama ya da sıkışma eğilimindedirler; fakat ek gerilimler uygulandığında artan direnç gösterirler. Bu özellik elastik bant tepkisi olarak tanımlanır (Boşnak 2010).

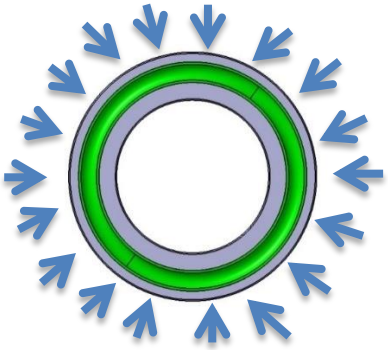
Yapılacak olan çalışmada kauçuk burç sürekli olarak bası yüklemesine maruz bırakılacaktır. Bunun için de üretilecek olan kauçuk burçlar montaj olacağı yuvadan belirli bir miktarda büyük üretilecek, daha sonra çaplama işlemi dediğimiz dış burca plastik şekil değişimine uğratılarak dış çap değeri küçültülecek ve ondan sonra çalışacağı yuvaya montaj edilecektir. Çalışmanın amacında müşteri gereksinimlerinde olan ömür beklentisini sağlayacak minimum çaplama değerlerinin bulunmasından oluşmaktadır. Aşağıda Şekil 1.3'te tasarlanan ve üretilen kauçuk burcu görülmektedir.



a. b.

Şekil 1.3. a. Tasarlanan kauçuk burç ve b. Üretilen kauçuk burç

Kauçuk burçlarda çaplama işlemini dıştan merkeze doğru yarı çap boyunca dış metale plastik şekil vererek uygulanmaktadır. Bu çaplama işlemi simetrik olarak kapanan çeneler ile yapılabileceği gibi, konik bir kalıp içerisinden de geçirilerek yapılabilmektedir. Şekil 1.4'te çaplama işlemini temsil eden görsel bulunmaktadır.



Şekil 1.4. Çaplama görseli

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARASTIRMASI

2.1 Kauçukların Genel Tanıtımı ve Kullanım Alanları

Kauçuk polimerik malzemelerin termosetler grubuna girmekte olup doğal ve sentetik kauçuklar olarak sınıflandırılır. Günümüzde birçok alanda sentetik kauçuklar kullanılmasına rağmen doğal kauçuklar ve kullanımları üzerine yapılan çalışmalar da önem taşımaktadır. Kauçukların yüksek sıcaklıklarda yumuşama, düşük sıcaklarda sertleşme durumlarını önlemek için çapraz bağlanmayı sağlayacak vulkanizasyon işlemi uygulanmaktadır.

Çapraz bağlanabilme özelliği vulkanizasyon ile açıklanabilir. Vulkanizasyon, kauçuğun kimyasal yapı değişikliğine uğrayarak (çapraz bağlanma reaksiyonu) ve geri dönüşümsüz olarak elastik özelliklere sahip bir duruma gelmesi ve getirilmesi işlemidir. Kauçuklar çapraz bağlanmamış, ama çapraz bağlanabilme özelliğine sahip yani vulkanize olabilen polimerlerdir. Yüksek sıcaklıkta ve deforme edici kuvvet etkisi altında koyu sıvımsı akış özelliği gösterirler. Böylece uygun şartlar altında şekillendirilebilirler. Vulkanizasyon öncesi yüksek plastik özellikler, vulkanizasyon sonrası, yerini yüksek elastik özelliklere bırakır (Erkek 2016).

Başlıca kauçuk çeşitleri; doğal kauçuk (NR), nitril kauçuk (NBR), stiren butadien kauçuk (SBR), etilen propilen kauçuk (EPM, EPDM), poliakrilik kauçuk (ACM), kloropren kauçuk (CR), silikon kauçuk (MQ, VMQ, PVMQ), florokarbon kauçuk (FKM), politetrafloroetilen (PTFE), hidrojene nitril kauçuk (HNBR), epiklorohidrin kauçuk (CO, ECO), isopren kauçuk (IR), termoplastik poliüretan (TPU), poliamid (PA) seklinde sıralanabilir.

En çok kullanılan kauçukların temel özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kauçukların temel özellikleri

	NR	EPDM	NBR	SBR	CR	BR
Yoğunluk(g/cm3)	0,93	0,86	1	0,94	1,23	0,94
Sertlik (Shore A)	30-100	40-95	20-100	40-100	40-95	45-80
Kopma Mukavemeti (MPa)	>30	>21	>24	>24	>28	>21
Max. Çalışma Sıcaklığı (°C)	100	145	105	100	100	100
Min. Çalışma Sıcaklığı (°C)	-60	-40	-30	-50	-45	-40

Doğal kauçuklar, kauçuk ağacından elde edilirler. Kauçuk özsuyu veya Latex dediğimiz yapı uzun moleküllüdür. Oksijen veya kükürt ile tepkimeye girerek daha sağlam ve sert bir yapıya dönüşür. Dünyada kullanılmakta olan tabii kauçuğun %91 i Malezya' dan temin edilmektedir. 1875 yıllarına kadar tabii kauçuk vahşi ormanlardan toplanmıştır. Daha sonra ise özel yetiştirilen ormanlardan elde edilmektedir. Günümüzde tabii kauçuk 33 kg'lık balyalar halinde seri üretimde kullanılmaktadır. Tabi kauçuğun özellikleri şu şekilde sıralanabilir. Pişmemiş halde; Meşin gibi sağlamdır, yumuşatmak için millemek gerekir. Kolay işlenir fakat çabuk pişer, iyi yapışır. Kopma mukavemeti iyidir (kristalleşmemiştir). Pişmiş Halde; kolay deforme olduğundan içindeki ısı birikimi azdır, yüksek kopma mukavemeti gösterir, yırtılma mukavemeti iyidir, ozona karsı mukavemeti düşüktür (anti ozonanta ihtiyaç duyar), ısıya mukavemeti düşüktür (antioksidant ve doğru hızlandırıcı ister).

Doğal kauçuğun kullanım alanlar; vibrasyon, ses ve sok emici malzemeler (tampon, amortisör parçaları, motor ve makine takozları), otomotiv parçaları (contalar, köpükler, cam silecekleri, paspaslar), konveyör bantlar, hortumlar, ayakkabı tabanları, kablolar, yer döşemeleri, demiryolu destekleri, diyaframlar, membranlar, yapışkan imalatı, silindir kaplama, sünger imalatı, gıda sanayi contaları, sağlık ürünleri, ebonit malzemeler, lateks üretimleri (eldiven, bebek emzikleri, balonlar).

Vulkanizasyon, polimerin serbest haldeki moleküler zincirlerinin kimyasal olarak çapraz bağ kurma yoluyla, üç boyutlu polimer zincirlerine dönüşme işlemidir. Vulkanizasyon 1839 yılında Charles Goodyear (Amerika) ve Thomas Hancock (İngiltere) tarafından bulunmuştur. Her ikisi de vulkanizasyon işlemi için sülfür ve beyaz dolgu kullanmıştır. Kauçukların sadece kükürt ile vulkanize olmaları yavaş ve verimsiz bir prosestir. Kükürt ve kauçuk hidrokarbonları arasındaki kimyasal reaksiyon C=C çift bağ atılması seklinde olur ve bağlanma işlemi 40-55 atom sayesinde gerçekleşir. Bu işlem 140 °C sıcaklık ve 6 saatlik bir sürede gerçekleşir. Bu durum ekonomik değildir. Belirli fonksiyonları yerine getirebilecek ürünler için hem ekonomik hem de fiziksel özellikleri yüksek kauçuk karışımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kauçuk karışımı istenilen özelliklere göre ayarlanmış, kauçuk ve diğer hammaddeler ile katkı maddelerinden oluşan, vulkanize edilebilen karışımlardır. Bu amaçla bir kauçuk karışımından beklenen özellikleri şu şekilde sıralamışlardır. Bitmiş mamulün çalışacağı ortama uygun özelliklerin yaratılması, karışımın uygulanacağı proses metot ve makinelere uygun olması, rekabet edilebilmesi için maliyet özelliklerinin belirlenmesi, bitmiş üründen istenilen özelliklerin sağlanabilmesi için uygun kauçuk (polimer) ve hammaddeler ile katkı maddelerinin seçilebilmesi ve birbirleriyle karıştırılmasıdır. Maksada uygun olarak seçilmiş ve birbirleriyle oransal bir bütünlük sağlamışlardır. Maddeler topluluğu reçete veya formül olarak adlandırılır.

Bir başka çalışmada kauçuk teknolojisindeki oranların, ana hammadde olan polimerin (kauçuk) ağırlıkça yüz birim kabul edildiği bir esasa dayandırmışlardır. Bu formül şu şekilde gösterilebilir (Özgün 2010):

Polimer (100), dolgu maddeleri (50), kükürt (2,25), yumuşatıcılar (6,50), stabilizanlar (2,50), aktivatörler (5), hızlandırıcılar (akseleratör) (1), geciktiriciler (0.10).

Kauçuk karışımında kullanılan maddeler proses özellikleri, son üründen istenen özellikler ve maliyet kontrolü gibi faktörleri kontrol etmede kullanılır. Bunlar:

Elastomerler (doğal ya da sentetik), vulkanizasyon ajanları (kükürt, kükürt verici akseleratörler, organik peroksitler, ikincil vulkanizasyon ajanları ve metalik oksitler), akseleratörler, akseleratör aktivatörleri ve geciktiriciler, yaslanmaya karsı koruyucular. (antioksidan ve antiozonatlar), proses yardımcıları, plastikleştiriciler, yumuşatıcılar ve

yapıştırıcılar, güçlendirici pigmentler ve reçineler, inert dolgu maddeleri ve maliyet düşürücüler, özel amaçlı kullanılan maddeler (aşındırıcı, şişirici ajanlar, renklendiriciler ve kokular) (Özgün 2010).

2.2 Kauçuk Parça Tasarımı

Kauçuk parçalar titreşim, ses ve gürültüyü engelleyen parçalardır. Kauçuk parçalar tasarlanırken parçada oluşacak nihai hataların tasarım aşamasında belirlenmesi gerekir. Çatlak oluşması, kimyasal bozulma, termal yaslanma, yapışma hataları ve parçaya akışkan girmesi parçanın çalışması esnasında ömrünü etkileyecek faktörlerdir. Bu hataların önüne malzeme testleri yapılarak, analitik ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak geçilebilir. Çatlak mekaniği, gerilme analizi, termal analiz ve difüzyon analizi yapılarak hata oranlarının dağılımına göre parça ömrü belirlenebilir.

Özgün (2010) yaptığı çalışmada kauçuk malzemelerdeki mekanik yorulmanın fiziksel özelliklerin sürekli zayıflamasıyla beraber, dinamik yük ve deformasyonlar altında oluşan küçük çatlaklar ile başladığını ispatlamıştır. Bu esnada meydana gelen değişimlerin en önemlisi azalan rijitliktir. Yükleme, gerilim azalmasına ve elastomerlerde zamana bağlı olarak çatlamayla sonuçlanır. Belirli yük altında tabii kauçuk kristalleşir ve kristalleşme çatlakların daha da artmasını engeller.

Yorulma sırasında değişik atomik ve moleküler prosesler meydana gelir. Ancak yorulma karakteristikleri genelde ampirik değerlerden oluşur. Buradaki esas kabul mekanik yorulma limitidir ve mekanik yorulma hatasının oluşmadığı gerilme şartlarını temsil eder.

Lastikteki yorulma çatlamalarının temel nedenleri mekanik, termal, çevresel (oksijen, ozon ve ultraviole) ve kimyasal faktörlerdir. Oluşan tipik hatalara araba lastiği sırt ve kat ayrışmaları ile motor takozları ve burçlarda oluşan hatalar örnek verilebilir. Çevresel kaynaklı çatlaklar küçük yüzey çatlakları şeklindedir (Özgün 2010).

2.3 Kauçuk-Metal Burçların Tasarımı

Medalia' ya (1978) göre, lastik malzemelerin ömrü ve fonksiyonları birinci olarak çalıştıkları frekans ve genlik değerlerine göre değişmektedir. İkinci olarak ise Fletcher-Gent etkisidir ki bu lineer olmayan dinamik özelliklere bağlıdır. Bu durum Payne ve

Wittaker (1971) tarafından bildirildiğine göre kauçuk içerisindeki dolgu maddelerine özellikle de karbon siyahının yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bu durum kayma modülü ve sönümleme oranında artışa yol açar. Bu nedenle kauçuk metal burçlarda dinamik özelliklerin belirlenmesinde genliğe olan bağımlılık artmakta ve bu husus önem kazanmaktadır.

Morman'a (1968) göre burçların davranışları statik rijitliklerine göre sonlu elemanlar analizi yoluyla belirlenebilir.

Bu metotta Fourier ve Bessel fonksiyonları (Hill 1975), prensip metotlar (Adkins,1954) ve üç boyutlu statik elastik teoremler, radyal, konik ve torsiyonal statik rijitlik formülleri kullanılabilir. Bununla birlikte statik rijitliklerin belirlenmesinde standart deneysel çalışmalar mevcuttur. (Lindley 1992, Gent 1992, Göbel 1974,)

Kari (2002) burçların yapısal özelliklerinin tüm eksenlerde belirlenmesi konusunda çalışmıştır. Yapılan bu çalışmaların hiçbirinde genlik bağımlılığı göz önüne alınmamıştır.

Kraus (1984) genliklerin hesaplanmasında, karbon siyahı ile diğer kimyasallar arasındaki Van der Wals bağlarının sürekli kırılması sonucunda genliklere bağımlılığın oluştuğunu savunmuştur. Ulmer (1998) ve Lion (2005) Kraus modelinin zamana bağlı formülleri üzerine çalışmıştır.

Fletcher-Gent etkisi aynı zamanda sürtünme modelleri yardımıyla yay ve sönümleme elemanı esasına göre modellenmiş ve daha sonra genişletilmiştir (Bruni ve Collina 2000, Olsson ve Austrell 2001, Brackbill 2000).

En basit kauçuk parça tasarım modeli Kevin-Voight modelidir. Burada bir yay ve sönümleyici piston birbirine paralel olarak bağlanır (Knothe ve Grassie 1993). Bu model hem rijitliği hem de yüksek frekanslardaki sönümlemeyi temsil eder. Üç parametreli Maxwell modelinde ise, sisteme paralel bir yay daha ilave edilir. Eklenen yay eleman yüksek frekanslarda daha iyi bir rijitlik elde edilmesini sağlar (Lodhia ve Esat 1996, Betz ve Spanier 1996). Ancak bu kadar fazla parametre olması parçada kullanılacak malzemelerin temsil edilmesini zorlaştırmaktadır.

2.4 Kauçuk Metal Parçaların Üretimi

Kauçuk metal parçaların vulkanizasyonu için üç temel parametreye ihtiyaç duyulur. Bunlar sıcaklık, süre ve basınçtır. Üç farklı üretim metodu kullanılmaktadır. Bunların ilki kompresyon kalıplama metodudur. Bu metotta, parçanın seklinin olduğu bos bir metal kalıbın içerisine ağırlığı belli miktarda kauçuk karışımı konur. Daha sonra pres yardımıyla belli surede kalıba sabit basınç uygulanır. Kauçuk hamuru vulkanize olduktan sonra kalıbın şeklini alır ve parça kalıptan çıkartılır. Üretim yönteminin avantajı sadece basit bir kalıp ve hidrolik prese ihtiyaç duyulmasıdır. Üretim, kalıbın basıncına bağlı olduğundan hidrolik basınçta düşüklük meydana gelirse kalıbın yanlarında oluşan çapak miktarı artacağından her baskıda farklı ölçülerde parça üretme dezavantajı vardır. Kalıp gözlerine gelen sıcaklık değerleri eşit olmadığı için her kalıp gözünden çıkan parçada farklı fiziksel özellikler görülebilir. Kauçuk hamurunun kalıbın içine konma zamanı ve hidrolik presin harekete geçirilmesi insana bağlı parametreler olduğundan, insan hatalarından direkt etkilenen bir üretim yöntemidir.

Diğer metot ise transfer kalıplama metodudur. Transfer kalıplama yönteminde kauçuk kalıbının üst transfer plakasından kalıp gözüne hamur akısını sağlayacak yolluklar bulunmaktadır. Kauçuk hamuru ön ısıtma yapılarak kalıbın üst haznesine konur ve hidrolik presin basıncı kullanılarak gözlere akış sağlanır.

Transfer kalıplamada kalıp ölçüleri daha hassastır ve parçanın üretim zamanı daha fazla kontrol altındadır. Kalıbın kendinin açılması ve kauçuk hamurunun kalıp içine kesilerek konması ortadan kalktığından insana bağlı parametreler iyileştirilmiştir. Metodun dezavantajı ise kalıpta yolluklardan akan kauçuk hamurunun sıcaklığının istenen şekilde ayarlanamamasıdır ve 100 °C'yi geçmez. Günümüzde transfer kalıplama metodu küçük parça ve conta imalatında kullanılmaktadır.

Enjeksiyon kalıplama metodunda ise bir enjeksiyon üniteli hidrolik pres ve yolluk plakası bulunan bir kauçuk kalıbına ihtiyaç bulunmaktadır. Kauçuk hamuru bir burgu yardımıyla akışkan hale getirilerek hamur haznesinde biriktirilir. Ardından kalıbın içine enjekte edilir. Bu esnada kalıp kapalı olmalı ve belirli bir sıcaklıkta olmalıdır. 1941 yıllarında bazı firmalar yüksek adetlerde ve hızlı üretim yapabilmek için bu metotla çalışmaya başlamışlardır. Dik enjeksiyon kalıplama üretimi II. Dünya Savasında radar

parçalarının üretimi için kullanılmıştır. Kalıp gözlerine homojen olarak dağılan kauçuk hamuru sayesinde deforme olmamış parçalar üretilmesi bu metodun zamanla gelişmesini sağlamıştır. Bu metodun avantajları arasında kauçuk hamurunun ön hazırlama, ısıtma ve tartma işlemleri olmadığı için insana bağlı parametrelerim en aza indirilmesi gösterilebilir. Vulkanizasyon zamanı diğer metotlara göre kalıp sıcaklıları ve enjeksiyon sıcaklıkları arttırılarak minimum yüzde üç düşürülmüştür. Parçalarda ölçüsel farklılık ve deformasyonlar olmadığı için ürünlerin kalitesi yükselmiş ve fiziksel özellikler her parça için aynı seviyede kalmıştır. Parçaların kenarlarında kalan fireler kalıp tarafından kesildiği için, parçalar çapaksız olarak üretilmekte ve ek isçiliklerden tasarruf sağlanmaktadır.

Çapak miktarının azaltılması ve hatalı parça sayısının azaltılması sayesinde malzeme maliyetleri düşürülmektedir. Sadece enjeksiyon kalıplama metoduyla üretilebilecek parçalar mevcut olduğunda bu yöntem insanlığa hizmetin arttırılması için kullanılmıştır. Bu metot günümüzde hassas ve her kalıp gözünden üretilen parçaların aynı fiziksel özellikleri göstermesi avantajı sunan ve en çok kullanılan kalıplama yöntemidir.

2.5 Kauçuk Metal Yapışması

Burçlar ve motor takozları gibi parçalar belirli et kalınlıklarına sahiptir ve genellikle metallere bağlanmaları gerekir. Bu bağlanma işlemi için kullanılacak yapıştırıcıların doğru seçilmesi ve metal yüzeyi hazırlamanın doğru yapılması gerekir. Metallere tek kat veya iki kat yapıştırıcı işlemi uygulanabilir. Metal yüzeylerin yapıştırıcı uygulanmadan önce metal oksidasyonunu önlemek için kimyasal olarak temizlenmesi gerekir. Kauçuk hamuru şarjları arasında oluşan viskozite farklılıkları, pişme oranları, scorch (ön vulkanizasyon) oranları ve kauçuk hamuru kimyasallarının dağılımı yapışmayı etkiler. Dolgu maddesinin çeşitleri, pişirici sistemin farklılığı ve antiozonantlar da yapışmada etkilidir. Enjeksiyon kalıplama yapılan imalatlarda yapıştırıcı uygulanmış parçanın kauçuk hamuru metal yüzeyine ulaşıncaya kadar sıcaklık ile temas etmesinde herhangi bir sorun yoktur. Metal yüzeyinin pürüzlendirilmesi ile yüzeyin temizlenmesi ve yapışma yüzey alanının arttırılması sonucu kauçuğun metale yapışma dayanımı artmaktadır. Bu etki en iyi olarak Chemosil yapıştırıcının kullanıldığı vulkanizasyon işlemi sırasında uygulanan yapıştırmada görülmüştür. Bunun sebebi, kauçuğun pres

altında pişirilmesi sırasında (vulkanizasyon) yüzeydeki kraterleri daha iyi doldurmasıdır (Durmuş ve ark. 2005).

Cox'un (1960) bildirdiğine göre yapıştırıcı uygulanmış metal parçalara 1 dakika süreyle 180 °C de, 30 saniye süreyle 190 °C de veya 30 saniye süreyle 200 °C de ön ısıtma uygulanırsa yapıştırıcılar yüzeyde tutunamazlar ve bağlayıcı özelliklerini kaybederler.

2.6 Kauçuk Burç Çaplama İşleminin Gerekçeleri

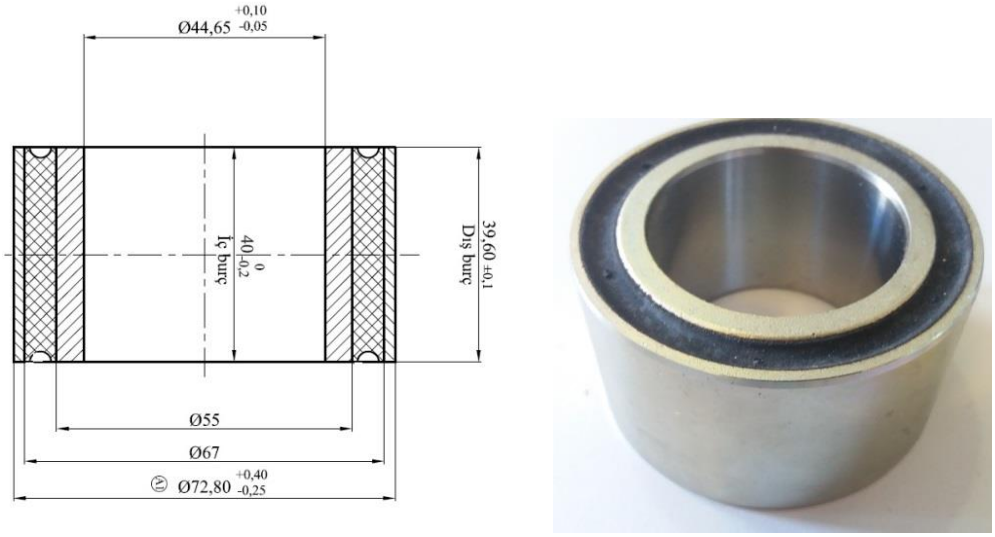
Çekme basma ve kesme etkisi altında çalışabilen kauçuk burçların deforme olmaları da bu yükleme türlerine göre değişiklik göstermektedir. Çekme etkisi altında çalışan kauçuk burçlar incelendiğinde uygulanan çeki kuvveti zamanla kauçuk yapısındaki bağların kopmasına sebep olmaktadır. Ayrıca vulkanizasyon işlemi sırasında metal parçalara iki kat boya sürülür. Bu sürülen boyalardaki kimyasala kauçuktaki kükürt halkaları ile etkileşime girerek kauçuk metal parçalara yapışmasını sağlamaktadır. Çeki yüklemesi altında çalışan parçalarda bu yapışma zorlanmakta ve bu yapışma bölgelerinden kopmalarda gözlemlenebilmektedir. Basma yükü altında çalışan parçalarda yapışma zorlanmamaktadır. Bu yüzden parça ömrü çeki yüklemesinde çalışan parçalara göre çok daha yüksek olmaktadır. (Kayacı 2017).

Parça tasarımında pratik olarak kauçuk parçalar için kesme yüklemeleri altında en fazla %75-100 birim şekil değişikliği, bası ve çeki yükleri altında en fazla %30 birim şekil değişikliği öngörülebilir. (Gent 2001)

Kauçuk burç üretimi göz önüne alındığında, kalıptan çıkan vulkanize parça soğumaya bırakılır ve bu soğuma esnasında da iç ve dış burca yakın olan bölgelerdeki kauçuk metallerin etkisi ile daha geç soğumakta ve kenarlara doğru çekilmektedir. Bu da kauçuk içerisinde iç gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu iç gerilmeler dinamik çalışma esnasında kauçuğun gerilmelerin fazla olduğu bölgelerden çatlamasına ve bağların daha çabuk yırtılmasına etki etmektedir. Bu bağlamda çaplama işlemi ile kauçuk içerisinde vulkanizasyon işleminden oluşan iç gerilmeler dengelenmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kauçuk sertliği ve çaplama işleminin burç ömür testlerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada kullanılan kauçuk-metal burç Şekil 3.1.'de görünmektedir. Görüldüğü gibi burç; dış boru, iç boru ve aradaki kauçuk malzemeden meydana gelmektedir.



a. b.

Şekil 3. 1. a. Burç kesit görünümü ve boyutlar b. Üretilen burç

Kauçuk burcu oluşturan parçaların malzeme bilgileri Çizelge 3.1 de verilmiştir. Kauçuk parça N506-B malzemesinden, iç ve dış burç ise St 37-2 çelik malzemeden üretilmiştir.

Çizelge 3. 1 Kauçuk Burçta Kullanılan Malzemeler

Parça Adı	Malzeme	Açıklama
Kauçuk	N506-B	NR 70±5 ShA
İç Burç	St 37-2 NBK	DIN 2393
Dış Burç	St 37-2 NBK	DIN 2393

Burç yapımında kullanılan metalik malzemeler boru seklinde olup dışta ve içte olmak üzere iki adettir. St37'den üretilen dikişli dış boru herhangi bir ısıl isleme tabi tutulmamıştır. Dış çapı 72,8 mm, et kalınlığı 2,9 mm olan dış boru malzemesinin ve dış çapı 55 mm, et kalınlığı 5,175 mm olan iç boru malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Dış borunun mekanik özellikleri

Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)
346	414	35

3.1 Burçların Üretimi

Burç üretimindeki ilk aşama Şekil 3.2'de verilen boyutlarda boruların kesilerek hazırlanmasıdır. Kesme işlemi sonrasında boru malzemelerin yüzeyleri fosfatlamıştır. Fosfatlamanın iki önemli amacı bulunmaktadır. Bunlar; yüzeylerin temizlenmesi ve kauçuğa bağlanmayı kolaylaştıracak şekilde metal yüzeyine bir pürüzlülük kazandırmaktır. Fosfatlama işlemi için 65-75 °C sıcaklık aralığında 420 s' lik 2 defa yağ alma işlemi ve ardından durulama işlemi yapılmıştır. Durulanan parçalar asit banyosunda 40 s aktive edilmiş ve ardından 420 s 50-60 °C aralığında fosfatlamıştır. Ardından tekrar durulama işlemi yapılmıştır. Gardolene D60 ile 30 s pasivasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından 85-95 °C sıcaklıkta 420 s süreyle kurutularak fosfatlama işlemi sona ermiştir.

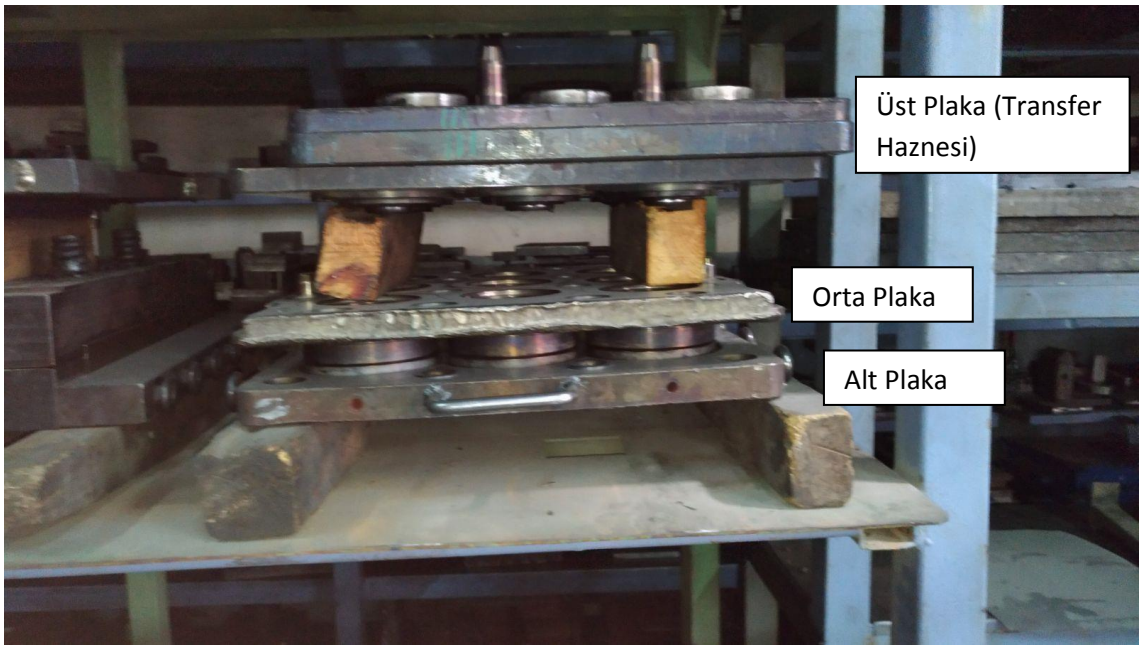
Kauçuk-metal yapışmasını sağlamak için kullanılan yapıştırıcı Chemosil'dir. Bu yapıştırıcı çift komponentli bir yapıştırıcı olup 211 (primer) ve 411 (sekonder) uygulanması otomatik makinede püskürtülerek yapılmıştır. Yapıştırıcı dış borunun iç yüzeyi ve iç borunun dış yüzeyine tatbik edilmiştir.



a. b.

Şekil 3. 2. a. İç burç yapıştırıcı uygulanmış görseller b. Dış burç yapıştırıcı uygulanmış görseller

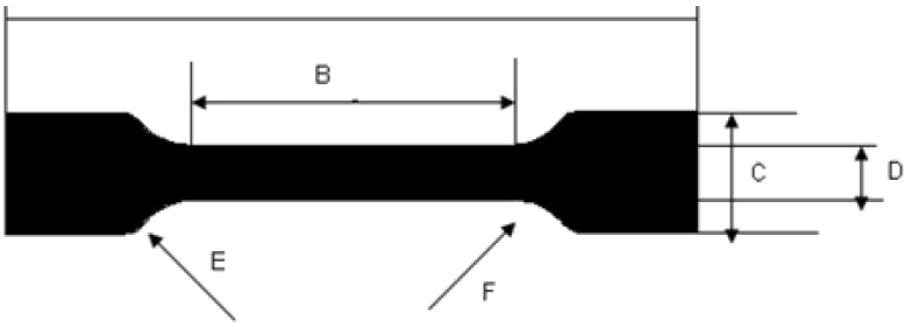
Kauçuk-metal burçların üretiminde kullanılan kalıp 9 gözlü transfer kalıbıdır. Kullanılan kalıbın fotoğrafı Şekil 4.2.'de görülmektedir. Kalıbın transfer haznesi ve orta plakası pres makinesine bağlanarak üretim yapılmıştır. Kalıp 3 parçalıdır. En üst plaka üst tablaya direkt olarak bağlanmakta, orta plaka alt yanlardaki çıkarıcı silindirlere ve alt plaka da presin alt tablasına bağlanmaktadır.



Şekil 3. 3. 9 gözlü transfer kalıp

3.2 Kauçuk Testleri

Özel olarak üretilen plaka kauçuklardan, 20 x 20 cm boyutlarında ve 40 mm kalınlığında test plakaları kesilerek 180 °C sıcaklıkta 10 dakika ve 100 tonluk pres kullanılarak vulkanize edilmiştir. Bu test plakalarından kesici kalıplar ve el presi kullanılarak sertlik, yoğunluk ve kalıcı deformasyon test numuneleri çıkartılmıştır. Çekme testlerinde kullanılan numunelerin boyutları sırasıyla Şekil 3.4.'de verilmiştir.



Şekil 3. 4. Kauçuk çekme testi numunesi (kaşık numune)

A: 75 mm, B :25 mm, C:12,5 mm, D: 4 mm, E: yarıçap 8 mm, F: yarıçap 12,5 mm, Kalınlık 2 mm

Uygulanan kauçuk testleri ve hangi standartlara göre yapıldıkları Çizelge 3.3.'de belirtilmiştir. Her test için en az 4 adet ölçüm yapılmıştır.

Çizelge 3. 3. Yapılan kauçuk testleri ve standartları

Uygulanan Testler	Test Standardı
Sertlik (Shore A)	ASTM D 2240
Yoğunluk (g/cm3)	ASTM D 297
Kopma Mukavemeti (MPa)	ASTM D 412
Yırtılma Dayanımı (N/mm)	ASTM D 624
Uzama (%)	ASTM D 412
Kalıcı Deformasyon (%) 70 C° sıcaklık ve 70 saat süre için	ASTM D 392
Ozon dayanımı (çatlamanın görsel olarak izlenmesi) 72 saat, 50 pphm, %10 gerdirme	ASTM C 1149

3.3 Burçların Çaplanması

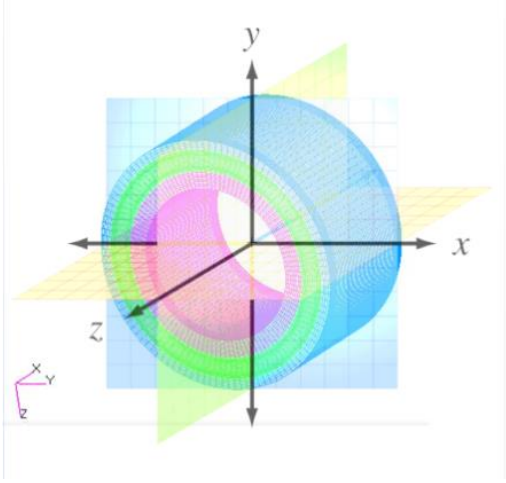
Kauçuk-metal burçların dış borularına uygulanan çaplama işlemi çaplama aparatı ve 100 tonluk eksantrik pres kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Dış borunun çapı %1,4 ve %2,5 oranlarında daraltma yönünde çaplama işlemine tabi tutularak deneysel çalışma parametresi oluşturulmuştur. Çaplama aparatının fotoğrafı Şekil 3.5.'de verilmiştir.



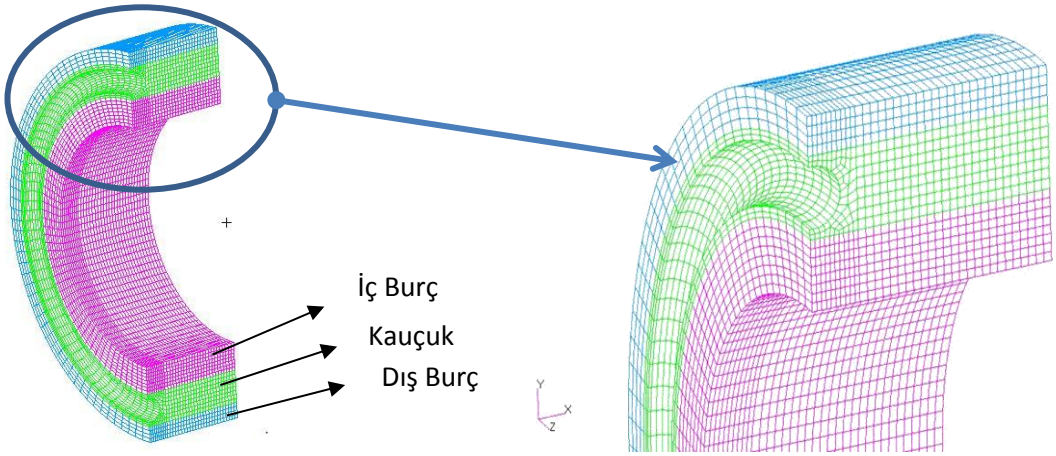
Şekil 3. 5. Çaplama kalıbı

3.4 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Tasarımı ve üretimi yapılan burcun Msc.Patran 2014 programında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.6.'da parçanın mesh yapısı görülmektedir ve bu yapıda 77178 hex 8 eleman kullanılmıştır. Farklı renkler ile gösterilen iç burç, dış burç ve kauçuk, analiz programı ara yüzünde oluşturulmuştur. Şekil 3.7.'de 1/4 model oluşturulurken deformasyonun ve şekil değişiminin daha yüksek olacağı bölgelere daha sık mesh atılarak analiz kolaylaştırılmış ve oluşacak deformasyonun daha belirgin görülmesi amaçlanmıştır.

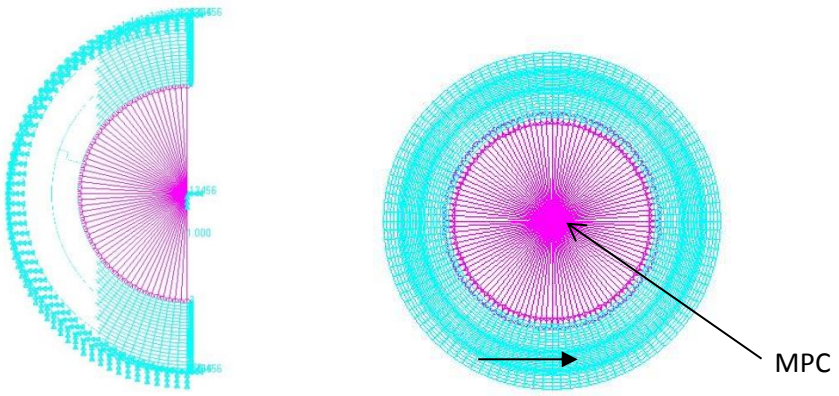


Şekil 3. 6. Parçanın sonlu elemanlar modeli



Şekil 3. 7. Parçanın 1/4 modelinde mesh yapısı gösterimi

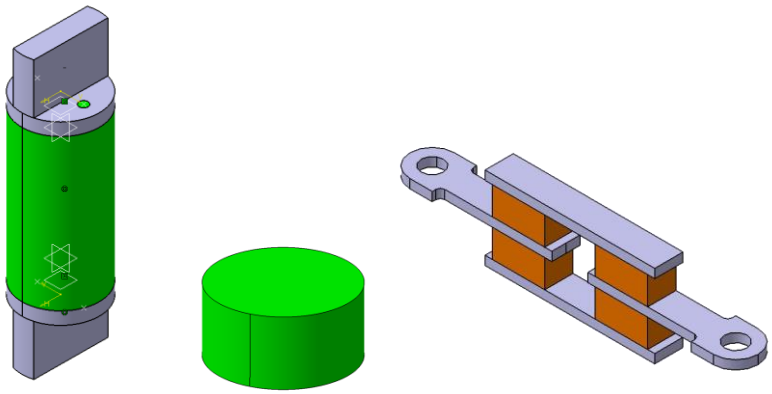
Analiz yapısı oluşturulurken parçanın simetrik olmasından yararlanılarak radyal hareket ölçümü için çeyrek parça modellenmiştir. Bu işlem model oluşturma ve çözümleme süresini kısaltmıştır. Bulunan sonuçlar çeyrek modele ait olacağı için, sonuçların kuvvet olarak 4 katının alınması gerekmektedir. Yapılan modelde çeyrek modele indirilirken kesilen yüzeyler Load/Boundary Conditions/Displacement komutu kullanılarak hareketleri sınırlandırılmıştır. Radyal hareketi sağlamak üzere ise iç burcun merkezinde yeni bir düğüm elemanı oluşturularak iç burcun iç yüzeyinde bulunan tüm düğüm elemanları merkezdeki düğüm elemanına bağlanarak MPC oluşturulmuştur. Radyal analizdeki hareket bu düğüm elemanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8.'de kauçuk sınır şartlarının tanımlanmış yarım ve tam parça hali ve MPC oluşturulmuş yapı görülmektedir.



Şekil 3. 8. Kauçuk sınır şartların tanımlanmış yarım ve tam parça hali

3.5 Malzeme Modeli Oluşturma

SEA (Sonlu Elemanlar Analizi) için malzeme verisinin tanımlanması gerekmektedir. Malzeme verisi özel oluşturulan numuneler test edilerek belirlenmiştir. Yapılan testlerde çekme, basma ve kesme malzeme verisi toplamak için numuneler oluşturulmuştur. Bu testlerden elde edilen kuvvet – deplasman verileri, daha sonra numenin boyutları dikkate alınarak gerilim – gerinim verilerine dönüştürülmüş ve analiz programına yüklenilmiştir. Analiz programında hiperelastik malzeme tanımı için Mooney Rivlin 2 malzeme modeli kullanılmıştır. Bilgisayar programı girmiş olduğumuz gerilim – gerinim değerlerini baz alarak malzeme modeli tanımında kullanılacak olan C10 ve C01 katsayıları otomatik olarak hesaplamaktadır. Şekil 3.9.'de malzeme verisi toplanan test numuneleri görülmektedir. Aynı zamanda çizelge 3.3' de belirtilen ASTM standardındaki testler yapılarak kauçuk malzemenin karakteristiği belirlenmiş olur.



a. b. c.

Şekil 3. 9. a. Çekme Test Numunesi b. Basma Test Numunesi c. Kesme Test Numunesi

Malzeme modelinin bulunumu matematiksel formüller kullanılarak da yapılabilir. Bunun için aşağıda belirtilen denklemler kullanılmaktadır.

Hiperelastik malzemeler;

Tek eksenli çekme testinde uzamadan sonraki uzunluğun, ilk uzunluğa oranı "uzama oranı" (λ) olarak tanımlanır:

$$\lambda = L/L0 = \varepsilon + 1 \qquad (3.5.1)$$

Hiperelastik bir malzemenin bünye denklemi için gerinme enerjisi potansiyeli kullanılır. Bu tanım için invaryant ve uzama oranı değerleri tanımlanır. İnvaryantlar, koordinat sisteminden bağımsız gerinmeleri ölçmek için kullanılır. Gerinme enerjisi potansiyelinin tanımlanması için üç yönde uzama ($\lambda 1$, $\lambda 2$, $\lambda 3$) oranı tanımlanır. Burada $\lambda 1$ ve $\lambda 2$ düzlemdeki uzamaları temsil ederken, $\lambda 3$ ise düzlem dışı uzamayı temsil etmektedir. Üç yöndeki gerinme invaryantları şu şekilde yazılır: (Karen ve ark. 2008).

$$I1 = \lambda 1^2 + \lambda 2^2 + \lambda 3^2 \quad (3.5.2)$$

$$I2 = \lambda 1^2 \lambda 2^2 + \lambda 2^2 \lambda 3^2 + \lambda 3^2 \lambda 1^2 \quad (3.5.3)$$

$$I3 = \lambda 1^2 \lambda 2^2 \lambda 3^2 \quad (3.5.4)$$

İzotropik ve mükemmel sıkıştırılamaz bir malzeme için I3=1'dir. Gerinme enerjisi potansiyeli (W), uzama oranları ve gerinme invaryantlarının fonksiyonudur. Literatürde birçok hiperelastik malzeme modeli tanımlanmıştır. Bunlardan bazıları; Mooney-Rivlin, Polynomial Form, Neo-Hookean, Ogden, Arruda-Boyce, Gent, Yeoh ve Marlow modelleridir (Karen ve ark. 2008).

Lastik modellerinde kauçuk için genel olarak Mooney-Rivlin hiperelastik malzeme modeli kullanılmasına rağmen doğrusal elastik malzeme modelleri de yakın sonuçlar vermektedir.

Mooney Rivlin:

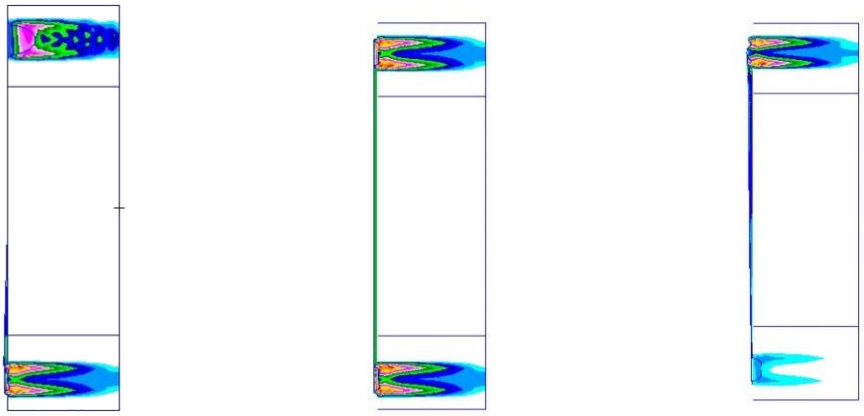
$$W(I1, I2) = \sum_{ij=0}^{n\to\infty} Cij \ \ (I_1 - 3)^i \ (I_2 - 3)^i \quad (3.5.5)$$

Burada ci, j katsayıları belirtmektedir. Mooney-Rivlin modeli %100 gerinmelere kadar çekme testleri için uygun olsa da bası şeklindeki deformasyonlarda gerinmede olduğu kadar başarılı sonuçlar vermemektedir.

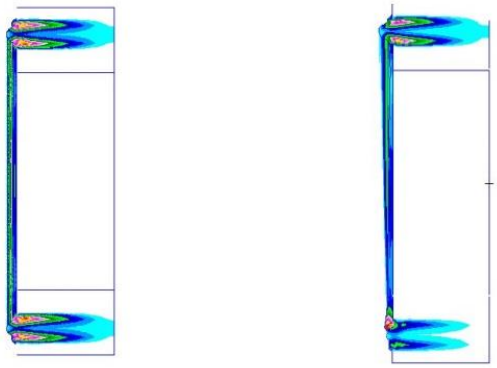
4. BULGULAR

4.1 Radyal Statik Analizler

Oluşturulan mesh modeline çaplamalı ve çaplamasız parçaların katılık (stiffness) değerlerinin belirlenebilmesi için, tanımlanan hareket yönünde (radyal yönde) 1 mm deplasman uygulanarak parça üzerinde oluşan kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Aynı zamanda parça da meydana gelen gerinim değerleri kontrol edilerek bu değerlerin uygunluğu teyit edilmiştir. Şekil 4.1.'de çaplamalı ve çaplamasız ¼ çeyrek parçalar için yapılan radyal analiz görselleri gözükmektedir. Çaplamalı parçalarda, çaplamasız parçaya göre sıkışmanın daha fazla olduğu Şekil 4.1.'de verilen ¼ çeyrek parça radyal analiz görsellerinde belirgin olarak fark edilmektedir. Yapılan analizlerde çaplamasız parça (72,8 mm dış burç çapına sahip olan parça), 1 mm çaplamalı parça ve 1,75 mm çaplamalı parça kullanılmıştır.



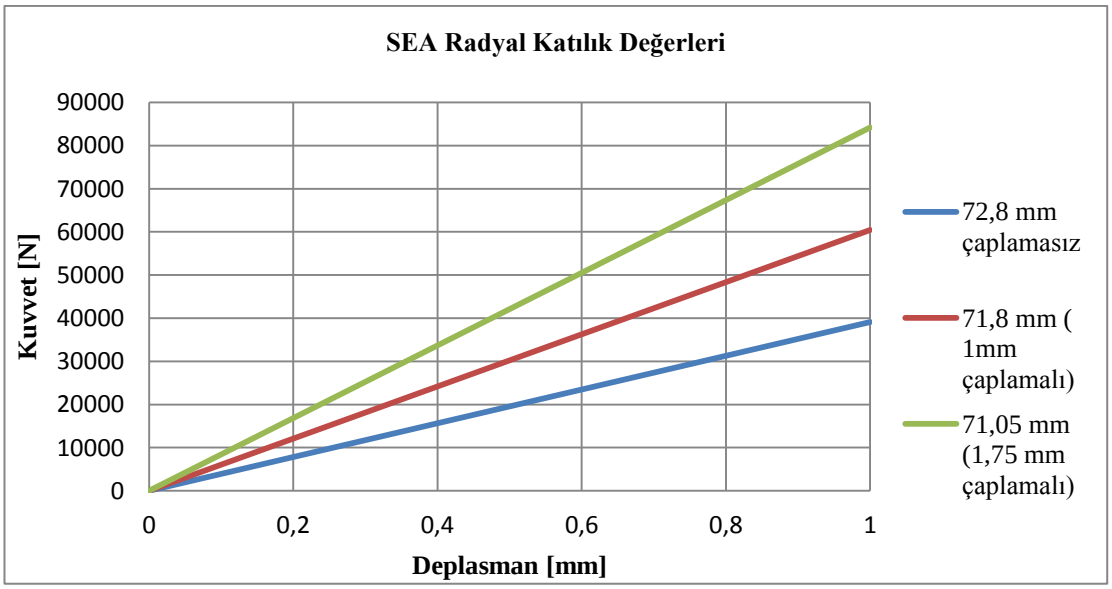
a. b. c.



d. e.

Şekil 4. 1. a. 72,8 mm (Çaplanmamış) radyal analizi, b. 1 mm çaplama, c. 1 mm çaplamalı parçanın radyal analizi, d. 1,75 mm çaplama, e. 1,75 mm çaplamalı parçanın radyal analizi

Radyal analiz sonucunda elde edilen kuvvet ve deplasman verileri kullanılarak Şekil 4.2' da gösterilen SEA radyal katılık grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.2' da yer alan grafikten de görüleceği üzere çaplama değeri arttıkça parça üzerinden 1 mm deplasmanda toplanan kuvvet değerinin artış gösterdiği görülmektedir. Çaplamanın radyal katılık değerlerini arttırıcı bir etkisinin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. SEA radyal katılık değerleri grafiği

Yapılan SEA analizleri sonucunda çaplamanın radyal katılık değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir ve elde edilen veriler aşağıda Çizelge 4.1.'deki gibidir. Çaplamasız

parçaya göre çaplama oranının %1,4 arttırılması parçada yaklaşık 1,5 kat, %2,5 arttırılmasında ise yaklaşık 2 kat katılık değerlerinde artışa sebep olmuştur.

Çizelge 4. 1. SEA Radyal Katılık Değerleri

	SEA Radyal Katılık Değeri [N/mm]	Çaplama Oranı [%]
72,8 mm çaplamasız	39104	0
71,8 mm (1mm çaplamalı)	60440	1,40
71,05 mm (1,75 mm çaplamalı)	84200	2,50

4.2 Radyal Katılık Testleri

Radyal katılık testleri Zwick test makinasında gerçekleştirilmiş ve Çizelge 4.2.' de belirtilen, test hızı, yorulma hızı, yorulma sayısı ve test yükleme noktası gibi testi gerçekleştirirken kullanılan değerler paylaşılmıştır. Kauçuk gibi elastomer parçalarda test yapılırken Mullin etkisinden parçayı arındırmak için 2 kere ön yükleme yapılmış ve 3. yüklemede test verileri elde edilmiştir.

Çizelge 4. 2. Test Parametreleri

Test hızı	5 mm/dak.
Yorulma hızı	5 mm/dak.
Yorulma sayısı	2
Test yükleme noktası	20 kN

Şekil 4.3.'de gerçekleştirilen radyal testler ile ilgili, testlerin gerçekleştiği Zwick-test düzeneği görülmektedir. Zwick test makinasında montaj yerini simüle eden aparatlar tasarlanmış ve Çizelge 4.2.' de verilen test parametreleri kullanılarak kauçuk parçaya ait radyal test gerçekleştirilmiştir.



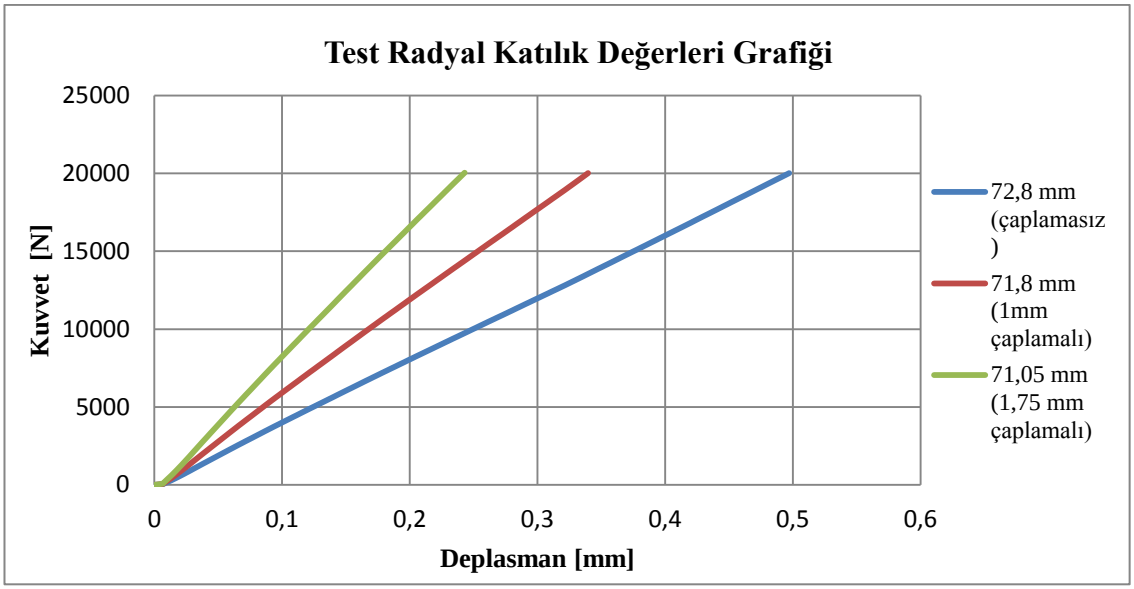
Şekil 4.3. Radyal katılık testleri görseli

Yapılan radyal statik testler sonucunda Çizelge 4.3.'de gösterilen değerler bulunmuştur. Radyal statik test sonucunda elde edilen bu değerler, SEA radyal analizleri ile karşılaştırıldığında ortalama %4 lük bir sapma tespit edilmiştir. Bu elde edilen değer elastomer grubu gibi doğrusal olmayan özellik gösteren parçaların analiz-test karşılaştırması için oldukça iyi bir sonuçtur.

Çizelge 4.3. SEA ve Radyal Katılık Testi Değerlerinin Karşılaştırılması

	SEA Radyal Katılık Değerleri [N/mm]	Test Radyal Katılık Değerleri [N/mm]	Sapma Oranı [%]
72,8 mm çaplamasız	39104	37782	3,3
71,8 mm (1mm çaplamalı)	60440	57858	4,2
71,05 mm (1,75mm çaplamalı)	84200	80452	4,4

Şekil 4.4.'de radyal test sonucunda elde edilen verilere göre hazırlanmış kuvvet – deplasman grafiği görülmektedir. Parçaların testleri Çizelge 4.2.'de tanımlanan test parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. 20kN yük altında parçaların deplasman değerleri tespit edilmiş ve elde edilen veriler kaydedilmiştir.



Şekil 4.4. Test radyal katılık değerleri

4.3 Ömür Testleri

Çaplama işleminin kauçuk burç parça ömrüne etkisinin incelendiği bu çalışmada ömür testleri Şekil 4.5.'de gösterilen MTS test sistemi kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çalışmada 50 kN kapasiteye sahip aktivatörler kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Kauçuk burç ömür testleri.

Çizelge 4.4.' de ömür testi için kullanılacak test parametreleri görülmektedir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen testlerde parçaya, 50.000 çevrim boyunca ±20 kN' luk sinüzoidal dinamik yükleme uygulanmıştır. Her 10.000 çevrimde dinamik test

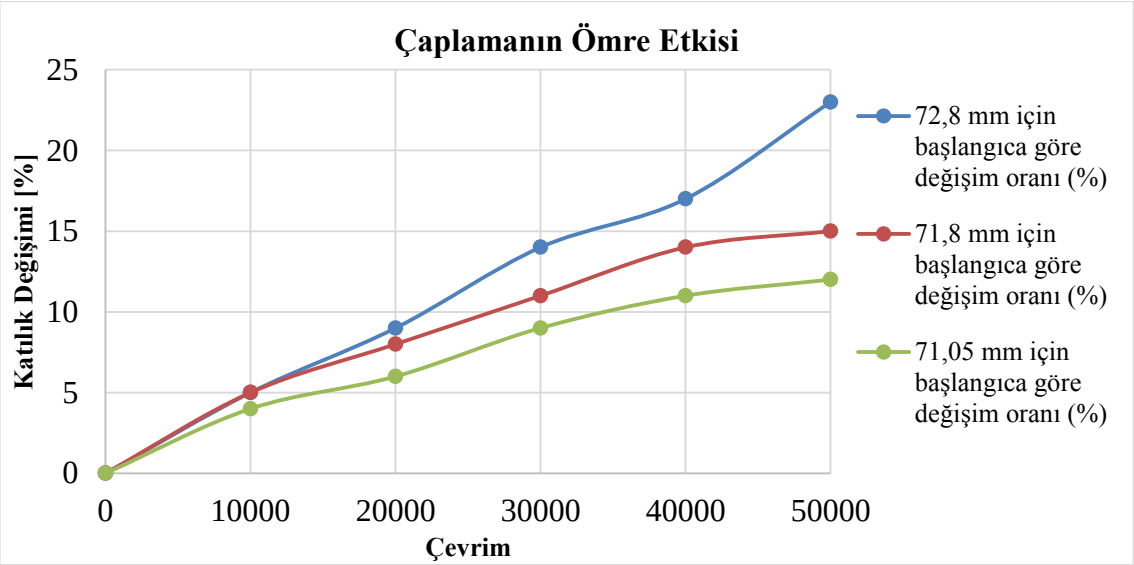
durdurulmuş, radyal statik teste tabi tutulmuş ve parçanın test sonucunda elde edilen katılık değerleri kaydedilmiştir.

Çizelge 4.4. Ömür Testi Parametreleri

Yük (Radyal)	50000 LW ile ±20 kN arasında x-yönünde (Gerilme)
İşletme sıcaklığı	Sürekli kullanım: (-25°C)+(+70°C) Nadir sıcaklık: (-40°C)+(+80°C)

Çizelge 4.5.' te her 10.000 çevrim sonucunda elde edilen katılık değerlerini ve bunların başlangıç durumuna göre değişim değerleri verilmiştir. Çaplamasız parçada 50.000 çevrim sonucunda %23 lük bir katılık değişimi gözlemlenirken, 1 mm çaplamalı parçada %15, 1,75 mm çaplamalı parçada ise %12 katılık değişimi görülmektedir.

Şekil 4.6.'da çaplamasız, 1 mm çaplamalı ve 1,75 mm çaplamalı parçaya ait 50.000 çevrim boyunca oluşan katılık değişimleri görülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere çaplamasız parça başlangıç durumuna göre %20'nin üzerinde katılık değişimi göstermektedir. Bu değişim oranı çaplamalı parçalara baktığımızda 1 mm çaplamalı parçada %15, 1,75 mm çaplamalı parçada ise %12 dolaylarındadır.



Şekil 4.6. Parça ömründeki katılık değişimin grafiksel gösterimi

Çizelge 4. 5. Çevrim Sayısına Karşılık Gelen Katılık Değerleri Değişimi

Çevrim Sayısı	Ø72,8mm Radyal Katılık Değeri (N/mm)	Ø72,8mm İçin Başlangıca Göre Değişim (N/mm)	Ø71,8mm İçin Radyal Katılık Değeri (N/mm)	Ø71,8mm İçin Başlangıca Göre Değişim (%)	Ø71,05 Radyal Katılık Değeri (N/mm)	Ø71,05mm İçin Başlangıca Göre Değişim (%)
0	37782	-	57858	-	80452	-
10000	35892,9	-5	54965,1	-5	77233,92	-4
20000	34381,62	-9	53229,36	-8	75624,88	-6
30000	32492,52	-14	51493,62	-11	73211,32	-9
40000	31359,06	-17	49757,88	-14	71602,28	-11
50000	29092,14	-23	49179,3	-15	70797,76	-12

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada SEA statik katılık analizleri ile statik katılık testleri karşılaştırılmıştır. Ortalama %4'lük bir sapma ile SEA analizlerinin doğruluğu sağlanmıştır. Kauçuk gibi elastomerlerin analizlerinde %4'lük bir korelasyon iyi olarak kabul edilmektedir.

Kauçuk malzemesinin içeriğinin metalden farklı olması ve birçok değişkenden etkilenmesinden dolayı doğrusal olmayan analizlerde test sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki korelasyonda belirli oranda sapma görülmektedir.

Kauçuk gibi hiperelastik malzemelerde sonlu elemanlar analizi yapılabilmesi için malzeme modeli tanımlama çok önemlidir. Birçok farklı malzeme modeli (Ogden, Mooney Rivlin …vb.) kullanılarak kauçuk karakteristiği çıkarılabilir. Bunun için aynı metal malzemelerde malzeme karakteristiği belirlerken kaşık testi dediğimiz yapıya benzer olan özel kauçuk malzeme testlerinin yapılması gerekmektedir. Kauçuk burcun kullanım alanına göre veya maruz kaldığı yüklemeye göre çekme, basma ve kesme testleri yapılarak malzeme verileri toplanır. Bu testlerin her bir yeni malzeme hamuru için yenilenmesi ve üründe kullanılacak olan hamur üzerinden yapılması gerekmektedir. Bu analiz ve test arasındaki sapmaları minimuma çekmektedir. Çünkü kauçuğa katılan katkı maddelerinin oranı veya miktarı, pişme süresi, kullanıldığı pres, hamur halindeyken bekleme süresi bile ürün vulkanizasyonundan sonra aynı parça üzerinden farklı verilerin elde edilmesine sebep olmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi ile parçanın tasarımının, müşterinin statik karakteristiklerdeki beklentilerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmektedir. Eğer müşteri beklentilerini sağlayan radyal, eksenel, torsiyonel ve kardanik statik değerler elde edilemiyorsa tasarım değiştirilerek, isterlere uygun tasarım tekrardan çalışılır. Sonlu elemanlar analizinin yapılması, tasarım aşamasında sorunların çözülmesine, kalıp ve ekipman yatırımı yapmadan önlemin alınmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca süreç olarak düşünüldüğünde isterleri sağlamayan bir parçanın kalıbının ve/veya ekipmanlarının revize edilmesi veya yeniden yapılması proje sürecini uzattığı gibi birçok işçilik ve malzeme giderini de beraberinde getirecektir. Bu düşünüldüğünde kauçuk burçlarda yapılan sonlu elemanlar analizi hem maddi zararın önüne geçmekte hem de süreci doğru yönlendirerek kısaltmaktadır.

Kauçuk parçaların dinamik karakteristiği sonlu elemanlar analizi ile tam olarak mevcut yapıda doğrulanamamaktadır. Bunda en büyük etkenler kauçuğun kimyasal yapısı ve içerisinde oluşan ısı ile karakteristiğinin değişimi, ortam koşulları, test şartlarının tam olarak sonlu elemanlar analizine aktarılamaması gibi sebepler mevcut yapıda kauçuklar için sonlu elemanlar analizinde ömür performansının yüksek doğrulukta yapılmasının önüne geçmektedir.

Kauçuk burçlarda çaplama işlemi parçayı bası yüklemesi altında çalışmaya maruz bıraktığı için, çeki yüklemesinde çalışan kauçuk burca oranla ömür performansı çok daha iyi olmaktadır. Çaplama belirli bir değere kadar pozitif yönde etki etse de, optimum çaplama değerinden sonra parça içerisinde bası yüklemesinden dolayı çatlaklar ve/veya kükürt bağlarında kopmalar yaşanabilmektedir. Bu da parçanın ömür performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Ömür testinde her 10.000 çevrim sonucunda test durdurulup, aynı sistem üzerinde statik radyal test yapılmış ve verileri kaydedilmiştir. Radyal statik test ölçümü yapıldıktan sonra parça yine dinamik yükleme altında 50.000 çevrim tamamlanıncaya kadar teste devam edilmiştir. 50.000 çevrim sonucunda maksimum %20 katılık değişimi isteği çaplamasız parçada sağlanamazken, çaplama işlemi uygulandıktan sonra sağlanmaya başlanmıştır. Çaplama değeri arttırıldıkça katılık değişimin azaldığı görülmüştür. %2,5'luk çaplama değerindeki katılık değişimi %12 iken, bu değer %1,4'lük çaplama değerinde %15 değerine ulaşmıştır. Parçanın çaplama değerinin arttırılması ile katılık değişimin düştüğü görülmüştür fakat çaplama değeri daha arttırıldığında kauçuk burç için %30'luk gerinim değişimini geçen bir ön gerilme uygulanmış olacaktır. Bu da parçanın 50000 çevrimden önce %20'lik katılık değişimini aşacağını ön görmektedir.

KAYNAKLAR

Adkins J. E. and A. N. Gent. 1954. Load Deflection Relations of Rubber Bush Mountings. pp. 354-358.

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

Brackbill C. R., Lesieutre G. A., Smith E. C. ve L. E. Ruhl. 2000. Characterization and Modelling Of The Low Strain Amplitude and Frequency Dependent Behaviour of Elastomeric Damper Materials, pp.34-42.

Cox D. R. 1969. Rubber Journal, pp. 4-49.

Durmuş A., Ülkü S., Güden M. ve Otnar F. Ö. 2005. Kauçuk Metal yapışma Mukavemetinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10:1.

Erkek, S., 2016. Kauçuk Kapı Stoperinin Hiperelastik Ve Viskoelastik Modellenmesi Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gent, A., 2001. Engineering with Rubber – How to Design Rubber Components. Hanser Publisher, Münih, 258 pp.

Hill J. M. 1975. Radical Deflections of Rubber Bush mountingıs of Finite Lengths.. Interscience Publishers, New York, pp 407-422.

Öncü, İ. C., DOVA, A. 2018. Kauçuk Burçlarda Kullanılan İç Yaprak Saclarının Parçanın Katılık Değişimine Etkisinin Analizi Ve Testlerle Doğrulanması. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), 24-26 October, 2018, Adana.

Öncü, İ. C., DOVA, A. 2018. Titreşim Sönümleme Elemanı Olan Kauçuk Burçta Çaplama İşleminin Ömre Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi ve Deneysel Çalışma İle İncelenmesi. Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 6 (2), 11-18. DOI: 10.21541/apjes.364545

Karen, İ, Kaya, N., Öztürk, F.ve Korkmaz, İ., 2008. Motor titreşim takozlarının istenen özelliklerde tasarımı ve doğrulaması, 4. Otomotiv Teknolojileri Kongresi – OTEKON' 08, 1-4 Haziran 2008, Bursa.

Kari, L. 2002. Dynamic Stiffness Matrix of a Long Rubber Bush Mounting, 356 pp.

Kayacı, S., Serbest, A., K., Tek-katmanli-kaucuk-metal-burclarda-on-sikistirmanin-statik-katilik-ve-parca-omrune-etkilerinin-arastirilmasi *http://www.kenstitu.com/2017/02/13/tek-katmanli-kaucuk-metal-burclarda-on sikistirmanin-statik-katilik-ve-parca-omrune-etkilerinin-arastirilmasi/* (Erişim zamanı; Aralık, 5, 2017)

Knothe K. L. ve S. L. Grassie. 1993. Modelling of Railway Track and Vehicle Interaction at High Frequencies. pp.209-262.

Kraus G. 1984. Mechanical Losses in Carbon Black Filled Rubbers. *Journal for Application of Polymer Science*. pp. 75-92.

Lodhia B. B. ve I. I. Esat. 1996. Vibration Simulation of Systems Incorporating Linear Viscoelastic Mounts Using Prony Series Formulation, ASME, Engineering System Design and Analysis Conference, p.171-176.

Medalia, A. I. 1978. Effects of Carbon Black on Dynamic Properties of Rubber. *Cabot Corporation, Pennsylvania*. pp. 437-523.

Morman K. N. and T. Y. Pan. 1988. Application of Finite-Element Analysis in The Design of Automotive Elastomeric Components. pp.503-533.

Olsson A. K. ve P. E. Austrell. 2001. A Fitting Procedure for a Viscoelastic Elastoplastic Material Model. Second European Conference on Constitutive Models for Rubber, pp.747-770.

Özgün, R. E., 2010. Kauçuk–Metal Burçlarda Kauçuk Sertliği Ve Çaplama İşleminin Kopma Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Payne A. R., and R. E.Whittaker.1971. Low Strain Dynamic Properties of Filled Rubbers. pp. 440-478.

Payne A. R. ve J. R. Scott. 1960. Engineering Design with Rubber 478 pp.

Ulmer J. D. 1998. Strain Dependence of Dynamical Mechanical Properties of Carbon Black Filled Rubber Compounds. Rubber Chemical Technologies. pp.637-667.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: İbrahim Cem ÖNCÜ
Doğum Yeri ve Tarihi	: Kırklareli / 1988
Yabancı Dili	: İngilizce
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)	
Lise	: Pınarhisar Anadolu Lisesi (2006)
Lisans	: Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği / Endüstri Mühendisliği (Yan Dal) (2011) Anadolu Üniversitesi Uluslararası İlişkiler (2017)
Yüksek Lisans	: Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı (2018)
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl	: Canel Otomotiv A.Ş. – Mühendislik ve Metot Yöneticisi (2018 – Devam Ediyor) Coşkunöz A.Ş. – Arge Proje Sorumlusu (2016 -2018) Laspar Angst Pfister - Arge Mühendisi (2013 – 2016)
İletişim (e-posta)	: i.cemoncu@gmail.com
Yayınları*	:

Öncü, İ. C., DOVA, A. 2018. Titreşim Sönümleme Elemanı Olan Kauçuk Burçta Çaplama İşleminin Ömre Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi ve Deneysel Çalışma İle İncelenmesi. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 11-18. DOI: 10.21541/apjes.364545

Öncü, İ. C., DOVA, A. 2018. Binek Araçlarda Kullanılan Çelik Ön Tampon Çarpma Parçasının Alüminyum Malzemeden Üretilmesi, Analiz ve Testler ile Doğrulaması. *3rd*

International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), 24-26 October, 2018, Adana

Öncü, İ. C., DOVA, A. 2018. Kauçuk Burçlarda Kullanılan İç Yaprak Saclarının Parçanın Katılık Değişimine Etkisinin Analizi Ve Testlerle Doğrulanması. *3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018)*, 24-26 October, 2018, Adana

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	İbrahim Cem ÖNCÜ
Tez Adı	Kauçuk Burçların Çaplama İşleminin Modellenmesi Ve Ürün Performansına Etkisinin Analizi
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Türü	Yüksek Lisans Tezi
Tez Danışman(lar)ı	Prof. Dr. Necmettin KAYA
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	☐ Tezimden fotokopi çekilmesine izin veriyorum ☒ Tezimin sadece içindekiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum ☐ Tezimden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	☒ Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin Veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 17.01.2019

İmza :