



T.C.  
Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KAUÇUK BURCUN HİPERELASTİK  
MODELLENMESİ VE ŞEKİL  
OPTİMİZASYONU**

**Caner GÜVEN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**KAUÇUK BURCUN HİPERELASTİK  
MODELLENMESİ VE ŞEKİL  
OPTİMİZASYONU**

**Caner GÜVEN**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAUÇUK BURCUN HİPERELASTİK MODELLENMESİ VE ŞEKİL  
OPTİMİZASYONU**

**Caner GÜVEN**

Doç. Dr. Necmettin KAYA  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2014

## TEZ ONAYI

Caner GÜVEN tarafından hazırlanan “Kauçuk Burcun Hiperelastik Modellenmesi ve Şekil Optimizasyonu” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Necmettin KAYA

**Başkan:** Doç. Dr. Necmettin KAYA

İmza

Uludağ Ü. Müh. Fak.,

Mak. Müh. Anabilim Dalı

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Fatih KARPAT

İmza

Uludağ Ü. Müh. Fak.,

Mak. Müh. Anabilim Dalı

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Erol Solmaz

İmza

Uludağ Ü. Müh. Fak.,

Otomotiv Müh. Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**

**Prof. Dr. Ali Osman Demir**

**Enstitü Müdürü**

## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**

**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.**

**30/01/2014**

**Caner GÜVEN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KAUÇUK BURCUN HİPERELASTİK MODELLENMESİ VE ŞEKİL OPTİMİZASYONU

**Caner GÜVEN**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Necmettin KAYA

Kauçuk malzemeler endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Ancak kauçuk ürünlerin çoğunluğu malzeme karakteristiklerinin karmaşıklığı nedeniyle tecrübe ve deneylere dayanarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada araçlarda kullanılan kauçuk burç optimize edilecektir. Burçlar, içi boş iki metal silindir arasına yerleştirilen silindirik kauçuk malzemedir oluşmaktadır. Kauçuk burçların temel fonksiyonu rijit bağlantıların mafsallarla birleştirilmesi ve şasiye aktarılan titreşim ve gürültünün sönmelenmesidir.

Sonlu elemanlar yöntemi ürün ve proses tasarımında kullanılmaktadır. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi, deney tasarımı tablosu için deplasman ve reaksiyon kuvvetlerinin elde edilmesinde kullanılacaktır. Malzeme özellikleri sonlu elemanlar analizinin girdisidir. Kauçuk bir malzeme tanımlamak için bazı testler ve bir hiperelastik malzeme modeli gereklidir. Hiperelastik malzeme sabitleri test sonuçları ve matematik model ile elde edilir. Bu sabitler analiz programlarında kauçuk malzemelerin tanımlanmasında kullanılırlar. Sonuç olarak burç optimizasyonu belirlenen bir rijitlik karakteristiğine göre yapılacaktır.

Bu çalışma kapsamında bir kauçuk burç geometrisi için şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Amaç tasarım kriteri olarak belirlenen hedef rijitlik eğrisinin sağlanmasıdır. İki farklı hedef rijitlik eğrisi için şekil optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Kauçuk burç, optimizasyon, sonlu elemanlar analizi, Ansys, hiperelastik malzemeler.

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **HYPERELASTIC MODELING AND SHAPE OPTIMIZATION OF RUBBER BUSHING**

**Caner GÜVEN**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Doç. Dr. Necmettin KAYA

Rubber materials are widely used in industry. However, most of rubber components have been designed by experiences or experiments because of complicated characteristics of rubber materials. In this study, rubber bushing which is used in vehicle will be optimized. Rubber bushing consists of a rubber tube bonded on their outer and inner surfaces to rigid metal layers. The main function of a rubber bushing is basically to join the elements between rigid structures in the system, isolate vibration through to chassis and avoid the transmission noise.

Finite element method is used for product and process design. In this study, finite element analysis will be used to get displacement and reaction force results for design of experiment table. Material properties are input of finite element analysis. Some experimental tests and a hyperelastic material model are needed to define a rubber material. A hyperelastic material constants' are calculated with experimental test results and mathematical material model. These constants are used to define rubber materials in analysis softwares. Finally, bushing optimization will be done in order to a desired stiffness characteristic.

In this study, shape optimization was carried out for a rubber bushing. The target is to obtain a target stiffness curve as a design criteria. Shape optimization was carried out for two different target stiffness curves.

**Anahtar Kelimeler** : Rubber bushing, optimization, finite element analysis, Ansys, hyperelastic materials.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Necmettin Kaya' ya teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşime ve aileme çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kauçuğun Tarihçesi.....	3
2.2. Kauçuk Malzeme Bilgisi.....	4
2.3. Kauçuk Malzemelerin Kullanım Alanları.....	9
2.4. Kauçuk Burçlar ve Yapılan Çalışmalar.....	10
3. KAUÇUK MALZEMELERDE SONLU ELEMENLAR ANALİZİ.....	15
3.1. Hiperelastisite Terimleri.....	15
3.1.1. Uzama Oranı (Stretch Ratio).....	15
3.1.2. Temel İnvaryantlar ve Hacim Oranı.....	16
3.2. Hiperelastik Malzemeler İçin Test Yöntemleri.....	16
3.2.1. Tek Eksenli Çekme Testi.....	17
3.2.2. Safi Kayma Testi.....	17
3.2.3. Basit Basma Testi.....	18
3.2.4. İki Eksenli Eş Çekme Testi.....	19
3.3. Hiperelastik Malzeme Modelleri.....	21
3.3.1. Mooney-Rivlin Modeli.....	21
3.3.2. Neo – Hooken Modeli.....	22
3.3.3.Ogden Modeli.....	22
3.3.4.Yeoh Modeli.....	22
3.3.5. Katsayıların Elde Edilmesi.....	23

4. KAUCUK BURCUN ŞEKİL OPTİMİZASYONU.....	24
4.1. Uygulama 1.....	24
4.2. Uygulama 2.....	36
5. SONUÇLAR.....	39
KAYNAKLAR.....	40
EKLER.....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	56

## SİMGELER ve KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
$\epsilon$	Gerinme
$L_0$	İlk Boy
L	Son Boy
$\lambda$	Uzama Oranı
I	İnvariant
J	Hacim Oranı
$\sigma$	Gerilme
W	Şekil değiştirme Enerjisi

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
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
PTFE	Politetrafloroetilen
HNBR	Hidrojen Nitril Kauçuk
CO, ECO	Epiklorohidrin Kauçuk
IR	Isopren Kauçuk
TPU	Termoplastik Polüretan
PA	Poliamid

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kauçuk hammaddesinin elde edilişi.....	3
Şekil 2.2. Çeşitli polimerlerin gerilme-uzama eğrileri.....	5
Şekil 2.3. Vulkanizasyon.....	6
Şekil 2.4. Çapraz bağlanma öncesi ve sonrasında gerilme-gerinme eğrileri.....	6
Şekil 2.5. Kauçuk parçaların otomobil üzerinde kullanıldığı yerler.....	9
Şekil 2.6. Kauçuk Burç.....	10
Şekil 2.7. Süspansiyon Montajı ve kauçuk burçlar.....	10
Şekil 2.8. Salıncak kolu üzerinde bulunan kauçuk burçlar .....	11
Şekil 2.9. Rotilli kol üzerinde bulunan kauçuk burçlar.....	11
Şekil 2.10 Dönme momenti etkisi altında burçların davranışı.....	13
Şekil 2.11 Test ve Analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	14
Şekil 3.1 Tek eksenli çekme testi.....	17
Şekil 3.2 Safi kayma testi.....	18
Şekil 3.3 Basit basma testi.....	19
Şekil 3.4 Basma ve iki eksenli eş çekme testlerinin eşitliği.....	19
Şekil 3.5 İki eksenli eş çekme testi ve numunesi.....	20
Şekil 3.6 Farklı testler ile elde edilmiş gerilme yüzde şekil değişimi grafikleri.....	21
Şekil 4.1 Hedef rijitlik eğrisi ve denklemleri.....	25
Şekil 4.2 Deney Tasarımı Parametreleri.....	25
Şekil 4.3 Hiperelastik malzeme tanımı ve katsayıları.....	28
Şekil 4.5 Sınır şartı - hareket kısıtı.....	28

Şekil 4.6 Sınır şartı – Deplasman.....	29
Şekil 4.7 Sonuçlar – Deplasman dağılımı.....	30
Şekil 4.8 Sonuçlar – Reaksiyon kuvveti.....	30
Şekil 4.9 Maksimum- minimum rijitlik aralığı.....	32
Şekil 4.10 Hedef ve optimum eğrilerin örtüşmesi.....	35
Şekil 4.11 Maksimum-minimum ve hedef rijitlikler.....	36
Şekil 4.12 Hedef ve optimum rijitlik eğrileri.....	37
Şekil 4.13 Boşluklu kauçuk burç geometrisi ve şekil değişimi.....	38
Şekil 4.14 Boşluklu burcun farklı doğrultulardaki rijitlikleri.....	38

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Sentetik Kauçuklarda İlkler.....	4
Çizelge 2.2 Kauçukların temel özellikleri.....	8
Çizelge 4.1 Deney tasarımı tablosu.....	26
Çizelge 4.2. 1 numaralı model analiz sonuçları.....	31
Çizelge 4.3. Denklemden elde edilen kuvvet değerleri.....	34

## 1.GİRİŞ

Elastomerler şekilsiz polimerlerdir ve değişik malzemeler eklenip ısıtma ve sertleştirme işlemleri yapılarak kauçuk malzeme haline gelirler. Elastomerler yük altında boylarından daha büyük oranlarda uzama gösterebilmekte ve yük kaldırıldığında ilk boylarına geri dönebilmektedirler.

Kauçuk, günümüz endüstrisinde kullanımı yaygın bir mühendislik malzemesidir. Kauçuk sızdırmazlıkta, titreşim ve şok sönümlemede, yük ve yataklama uygulamalarında kullanılır. Çalışmamızda incelenen kauçuk-metal burçlar araçların süspansiyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Uzun ömürlü parça tasarımının sürecinde başarılı olabilmek için polimerler, kauçuk durumları ve genel tasarım prensipleri konularının iyi anlaşılması gerekmektedir.

Elastomerler temel olarak süper yoğun gazlardır. Yoğunlukları gazlara göre üç kat, viskoziteleri 14 kat daha büyüktür. Polimere dönüştürme işlemi sırasında uzun zincir molekülü oluşur. Elastomerler rastsal bir moleküler yapıya sahip şekilsiz polimerler olarak sınıflandırılır.

Tüm malzemeler için katılık ve enerji sönümleme olmak üzere iki çeşit mekanik özellik vardır. Herhangi bir deformasyon olması durumunda bir miktar enerji ısıya dönüşerek kaybolur. Viskoelastik davranış bir yay ile viskoz davranış ise bir sönümleyici ile modellenebilir. Yaylar için gerilme değeri gerilme değeri ile orantılıdır (Hooke Kanunu). Sönümleyici için uygulanan gerilme, gerilme oranı ile orantılıdır. Bir sönümleyicinin direnci zaman ve viskoziteye bağlıdır. Deforme olmuş elastomerlerin serbest bırakıldıktan sonra orjinal hallerine dönme oranı iç sürtünme katsayısının fonksiyonudur. Zaman ve sıcaklık parametreleri elastomerler için çok önemlidir. (Gent, 2001)

Kauçuk malzemeler, hiperelastiktirler ve viskoelastik özelliklerinden dolayı enerjiyi sönümlerler. Kayma ve basma yüklerine karşı dayanımları yüksektir. Mekanik yüklenmeden dolayı yorulma meydana gelebilmektedir.

Elastomerler çekme, basma ve kayma durumlarında izotropik davranan şekilsiz katılardır. Bu durumlar için elastik davranışları elastisite modülü E, kayma modülü G ile tanımlanır. Poisson oranı sıkıştırılmaz katılar için 0.5 tir. Elastomerler için bu değer 0.49 dur. Çelikler de bu değer 0.3 tür. İzotropik sıkıştırılmaz malzemeler için;  $E=3G$ . (Gent, 2001)



Kauçuk malzemeler doğal ve sentetik olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğal kauçuk maliyetinin daha fazla olması nedeniyle sentetik kauçuk üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Kauçuklarda maliyeti düşürmek ve mekanik özellikleri iyileştirmek gibi amaçlar doğrultusunda çeşitli dolgu maddeleri kullanılarak sentetik kauçuklar elde edilmektedir.

2010 yılı dünya kauçuk üretimi 24,5 milyon tondur. Bunun yüzde 42'si doğal kauçuk, yüzde 58'si de yapay kauçuktur. Doğal kauçuğun ana kaynağı Asya olup 2010 yılında dünya üretiminin yüzde 93'ü burada gerçekleşmiştir. Doğal kauçuk üretimi yapan başlıca ülkeler Tayland, Endonezya, Malezya, Hindistan ve Vietnam'dır.

Bugün Türkiye'nin yıllık kauçuk tüketimi 400 bin ton olup dünya tüketiminin %3'ünü oluşturmaktadır. Artan otomotiv üretimine paralel olarak kauçuk talebinin katlanarak artması beklenmektedir. Tüketimin %56'sı araç lastiği üretiminde kullanılmaktadır. Kauçuk sanayinin temel girdileri tabii kauçuk, sentetik kauçuk ve karbon siyahıdır. Türkiye doğal kauçukta %100; sentetik kauçukta ise %99 ithalata bağımlıdır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kauçuğun Tarihçesi

Avrupalıların; Christopher Columbus'un Amerika'yı keşfiyle tanıdığı kauçuk malzemesi, esasında yeni kıta Amerika'da yaşayan Aztek toplumunda çok önceden beri bilinmekteydi. Avrupalıların, 16. yüzyılın başlarında tanıştıkları kauçuk, ancak 19. yüzyılın ortalarına doğru Charles Macintosh, Thomas Hancock ve Charles Goodyear gibi araştırmacı ve girişimcilerin özel gayret ve keşifleriyle günlük yaşamın ayrılmaz bir mühendislik malzemesi olmuştur. 1888 yılındaki otomobil tekerleklerinin icadı ve 1895 yılında da tekerleklerin motorlu vasıtalarda kullanılmaya başlanması, kauçuğun önemini tamamen ortaya koymuştur. Bu nedenle dönemin güçlü Avrupa devletleri, sömürgeleri altındaki, doğal kauçuk yetiştirmeye elverişli, uzak doğu ülkelerinde 1876 yılından itibaren büyük doğal kauçuk plantasyon çiftlikleri kurmaya başladılar. Böylece doğal kauçuk ihtiyaçları 1900 yılından itibaren bu plantasyonlardan sağlanmaya başlanırken, 1913 yılından itibaren ise Brezilyadan, daha çok ve daha kaliteli doğal kauçuk elde edilmeye başlandı. (Vahapoğlu, 2006).



Şekil 2.1 Kauçuğ hammaddesinin elde edilişi (Anonim, 2013)

Kauçuk ilk kez teknik anlamda 1751 yılında kullanılmıştır. İlk kauçuk üretimi yapan fabrika 1803 yılında Paris'te kurulmuştur. Charles Goodyear 1803 yılında vulkanizasyon işlemini keşfetmiştir. 1888 yılında John Boyd Dunlop tarafından ilk havalı bisiklet lastiği üretilmiştir. Holman tarafından 1909 yılında Bayer Laboratuvarlarında ilk sentetik kauçuk üretilmiş ve ilk patenti alınmıştır. 1912 yılında Almanya'da sentetik kauçuktan ilk otomobil lastiği üretilmiştir. 1916 yılında ilk sentetik kauçuk tesisi 150 ton/ay kapasite ile üretime başlamıştır. 1929 yılında Hermann Staudinger butadien'den SBR ve NBR kauçuklarını elde etmiş ve bu kauçukların üretimine başlamıştır. Amerikalı kimyagerler Sperks ve Thomas tarafından 1937 yılında Butil kauçuğu elde edilmiştir. 1963 yılında EPDM kauçuğu ilk kez ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. (Erkek, 2007)

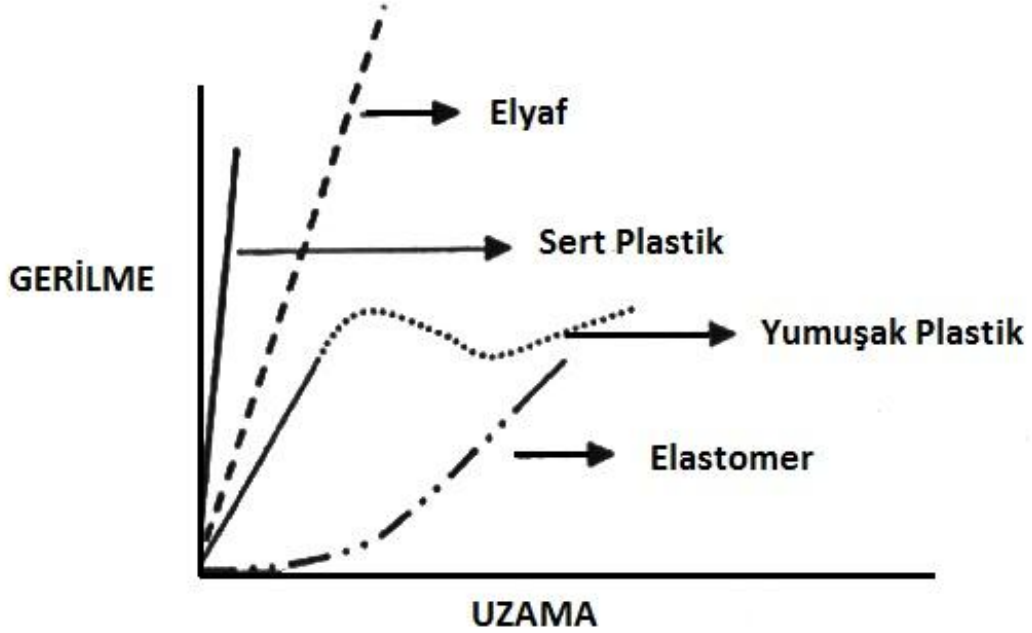
<u>Ticari İsmi veya Marka ismi</u>	<u>ASTM 1418</u>	<u>Kimyasal İsmi</u>	<u>İlk Üretildiği Yıl</u>	<u>İlk Üretildiği Ülke</u>	<u>İlk Üreten Kişi</u>	<u>İlk Üretici Firma</u>
<i>Doğal Kauçuk</i>	NR	<i>Doğal İsopren</i>	—	—	—	—
<i>Metil Kauçuk</i>	—	<i>Dimetilbütaadien</i>	1915	Almanya	Fritz Hofman	Bayer & Co.
<i>Thiokol</i>	PTR	<i>Polisülfid</i>	1922	A.B.D.	Joseph C. Patrick	Thiokol Corporation
<i>Üretan</i>	BG	<i>Poliester</i>	1930	—	Otto Bayer	—
<i>Neopren</i>	CR	<i>Kloropren</i>	1931	A.B.D.	Arnold Collins	Du Pont Corporation
<i>GRS veya Buna-S</i>	SBR	<i>Stiren Bütaadien</i>	1933	Almanya	Eduard Tschunkur ve Walker Bock	I.G. Farben
<i>Nitril veya Buna-N</i>	NBR	<i>Nitril Bütaadien</i>	1934	Almanya	Eric Kondrad ve Eduard Tschunkur	I.G. Farben
<i>Butil</i>	IIR	<i>İsobuten İsopren</i>	1937	A.B.D.	Robert M. Thomas ve William Joseph Sparks	Standart Oil Development Comp.
<i>Silikon</i>	VMQ, PVMQ, MQ, PMQ	<i>Polisiloksan</i>	1944	A.B.D.	—	Dow Corning Corporation ve General Electric Company
<i>Akrilik</i>	ACM, ANM	<i>Poliakrilate</i>	1948	A.B.D.	—	B.F. Goodrich Corporation
<i>Hypalon</i>	CSM	<i>Klorosülfone Polietilen</i>	1955	A.B.D.	—	Du Pont Corporation
<i>Sentetik Doğal Kauçuk</i>	IR	<i>İsopren</i>	1956	A.B.D.	F.W. Staveley Samuel Emment Horne, Jr.	Fire Stone Tire and Reserach Co. B.F. Goodrich Corporation
<i>Fluorokarbon</i>	FKM	<i>Florlu Hidrokarbon</i>	1956	A.B.D.	—	Du Pont Corporation
<i>Polibütadien</i>	BR	<i>Bütadien</i>	1961	—	—	—
<i>EPDM</i>	EPDM	<i>Etilen-Propilen Dien Monomer</i>	1963	—	—	—
<i>Vamac</i>	—	<i>Etilen / Akrilik</i>	—	A.B.D.	—	Du Pont Corporation

Çizelge 2.1 Sentetik Kauçuklarda İlkler (Vahapoğlu, 2006).

## 2.2. Kauçuk Malzeme Bilgisi

Polimerler; plastikler, elastomerler ve elyaflar olmak üzere üç grupta incelenir. (Savran 2001) Elastomerler, doğal ve sentetik olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Plastik, kauçuk ve elyaflar malzemenin gerilme-uzama eğrisine bakılarak ortaya çıkartılır. Bu amaçla, bir doğrultuda

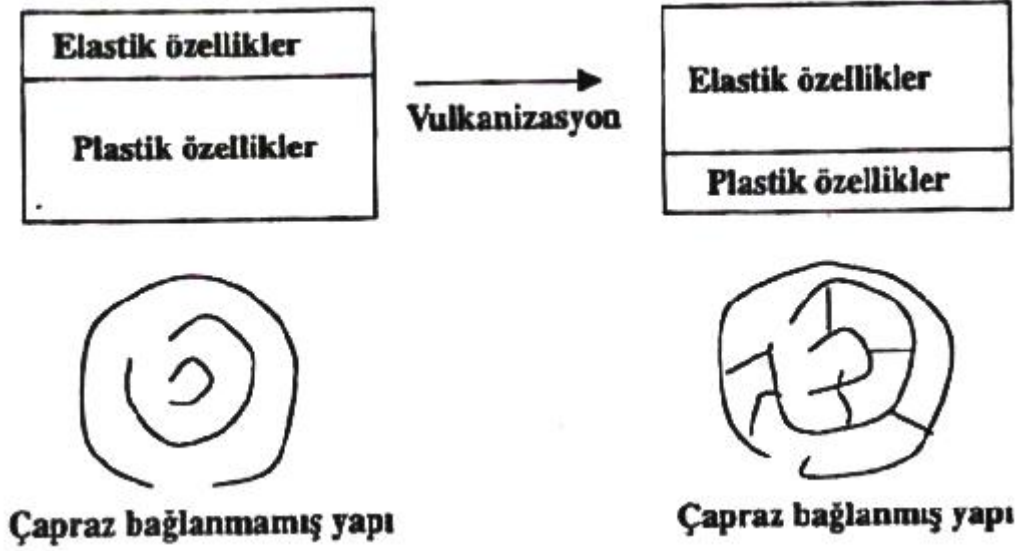
gerilen polimer örneğinin kopma noktasına kadar uzaması sırasındaki davranışı gözlenir. Şekil 2.2' de çeşitli polimerlerin gerilme-uzama eğrileri görülmektedir.



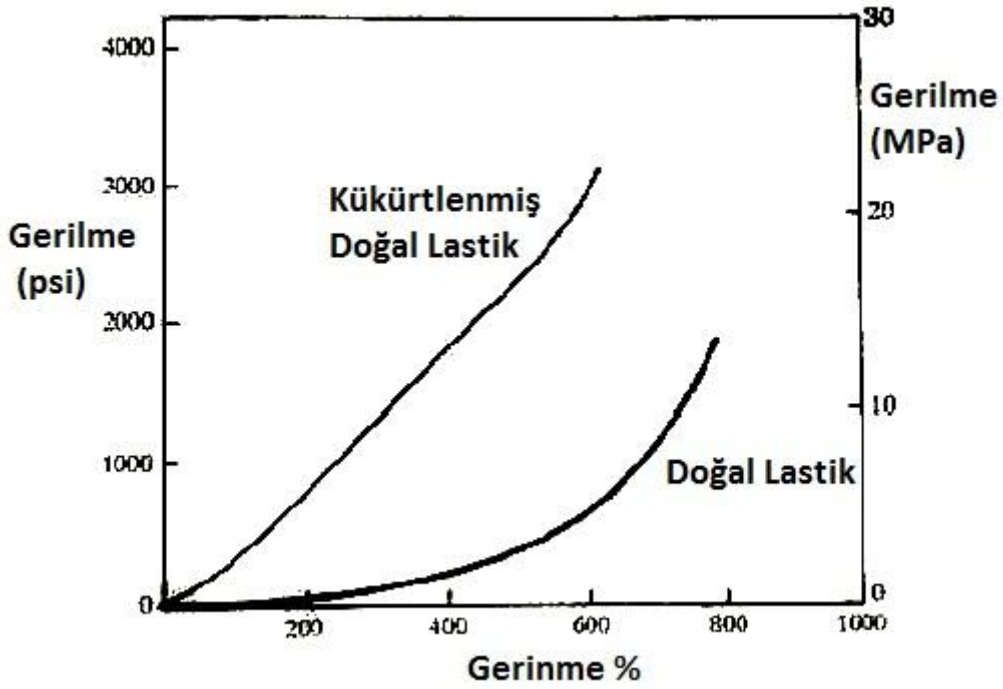
Şekil 2.2. Çeşitli polimerlerin gerilme-uzama eğrileri (Erkek, 2007)

Günümüzde birçok alanda sentetik kauçuklar kullanılmasına rağmen doğal kauçuklar ve kullanımları üzerine yapılan çalışmalar da önem taşımaktadır. Kauçukların yüksek sıcaklıklarda yumuşama, düşük sıcaklıklarda sertleşme durumlarını önlemek için çapraz bağlanmayı sağlayacak vulkanizasyon işlemi uygulanmaktadır.

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.



Şekil 2.3. Vulkanizasyon (Erkek, 2007)



Şekil 2.4. Çapraz bağlanma öncesi ve sonrasında gerilme-gerinme eğrileri (Kınıkoğlu, 2006)

Şekil 2.4'de vulkanizasyon işlemi esnasında gerçekleşen çapraz bağlanma öncesi ve sonrasındaki durumlar için gerilme-gerinme eğrileri görülmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi, vulkanizasyon işlemi esnasında kükürt atomlarının çapraz bağlanmalarıyla malzeme rijitliği, çekme dayanımı artmıştır.

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 sağlamış maddeler topluluğu reçete veya formül olarak adlandırılır.

Kauçuk karışımında kullanılan maddeler; proses özellikleri, son üründen istenen özellikler ve maliyet gibi özellikleri kontrol etmekte kullanılırlar. Bunlar;

- Doğal ya da sentetik elastomerler,
- Vulkanizasyon ajanları,
- Akseleratörler ve aktivatörleri , geciktiriciler,
- Yaşlanmaya karşı koruyucular(antioksidant ve antiozonatlar),
- Proses yardımcıları, plastikleştiriciler,yumuşatıcılar ve yapıştırıcılar,
- Güçlendirici pigmentler ve reçineler,
- Dolgu maddeleri ve maliyet düşürücüler,
- Özel amaçlı kullanılan maddeler (aşındırıcı, şişirici ajanlar, renklendiriciler ve kokular)

Her kauçuk karışımı, yukarıdaki maddelerin tamamının kullanılmasını gerektirmez; ancak kauçuk ile vulkanizasyon sistemini oluşturan maddelerin mutlaka bulunması gerekir. (Erkek, 2007)

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

Karbon siyahı, yüksek sıcaklıklarda bozunma ile elde edilen hidrokarbon buharındaki elementel karbonun bir yüzey üzerinde toplanması ile üretilir. Üretim tekniğine bağlı olarak dört farklı karbon siyahı tanımlanır;

1) Fırın siyahı; petrol rafinerilerindeki aromatik atıkların 1200°C-1700°C arası sıcaklıklarda aşırı hava ile yakılmasıyla üretilirler, beslemenin bir kısmı yanarken çoğu karbon ve hidrojene parçalanır. Fırın siyahı asidiktir ve kauçukların vulkanizasyonunu yavaşlatır.

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

3) Isı siyahı; doğal gazın havasız ortamda 1300°C dolayında ısıl parçalanması ile üretilir. İri taneciklidir ve kauçukları takviye açısından zayıftır.

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

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

Başlıca kauçuk çeşitleri; doğal kauçuk (NR), nitril kauçuk (NBR), stiren butadien kauçuk (SBR), butadien kauçuk (BR), 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) şeklinde sıralanabilir. En çok kullanılan kauçukların temel özellikleri 2.2 nolu çizelgede verilmiştir.

	NR	EPDM	NBR	SBR	CR	BR
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	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

Çizelge 2.2 Kauçukların temel özellikleri (Özgün, 2010)

### 2.3. Kauçuk Malzemelerin Kullanım Alanları

Doğal kauçuk, endüstrinin her alanında yaygın bir kullanıma sahiptir. Titreşim, gürültü ve şok emici olarak tampon, amortisör parçaları, kayar kapı durdurucu, motor ve makine takozları gibi alanlarda kullanılır. Otomotiv sektöründe contalar, köpükler, cam silecekleri, paspaslarda kullanılır. Bunun dışında 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) gibi alanlarda da kullanılmaktadır.

Kauçuk malzemedен yapılan taşıt elemanları, titreşim sönümleyici olarak taşıtların birçok bağlantı bölgesinde kullanılmaktadır. Kullanım yerlerinden bazıları; motor takozları, süspansiyon bağlantıları, gövde bağlantıları, radyatör bağlantıları, egzoz destek parçası olarak sayılabilir.



Şekil 2.5. Kauçuk parçaların otomobil üzerinde kullanıldığı yerler

Yoldan ve motordan gelen titreşim yolcu ve şasi bölümüne gelmeden bağlantı bölgelerinde sönümlenmesi burçlar ve takozlar tarafından sağlanır. Bu tür elemanların bir diğer fonksiyonu da bağlantı bölgelerinde gerekli esneklik sağlamaktır. Titreşim sönümleme özelliklerinin yanına yüksek burulma ve uzama elastikiyetleri önemli rol oynar. Kauçuk burçlar taşıt araçlarında özellikle süspansiyon ve gövde bağlantılarında kullanılırlar ve yük altındaki davranışlarının bilinmesi gerekir. Taşıt dinamiği açısından da rijitlik değerlerinin istenilen



değerde olması istenir. Taşıt dinamiği hesaplamalarında burçların ve motor takozlarının rijitlikleri doğrusal kabul edilse de gerçekte doğrusal olmayan yük-deformasyon eğrileri mevcuttur.

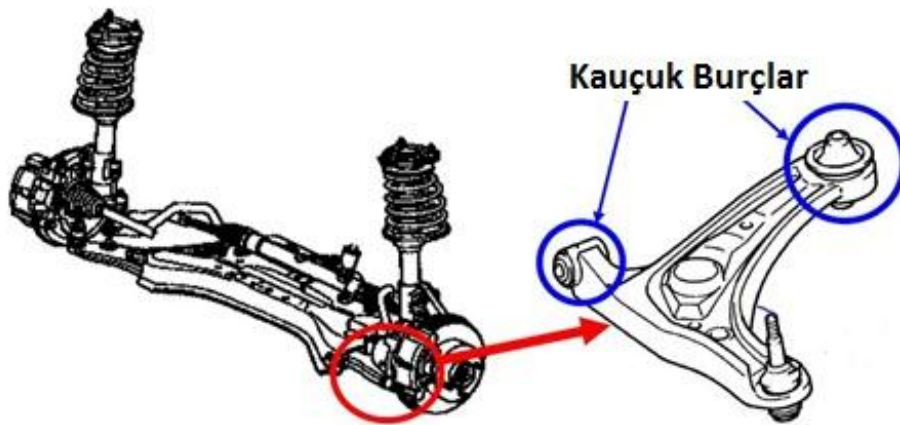
#### 2.4. Kauçuk Burçlar ve Yapılan Çalışmalar

Kauçuk burçlar, otomotiv sektöründe titreşim ve gürültü kontrolü amaçlı geniş kullanım alanına sahiptir.



Şekil 2.6. Kauçuk Burç

Burçlar, içi boş iki silindirik metal arasına yerleştirilen silindirik malzemedir. Şekil 2.6’ da kauçuk burç örneği görülmektedir. Burçların aksel ve burulma elastikiyetleri büyüktür. Titreşim sönümlenme özellikleri nedeniyle araçlarda süspansiyon, salıncak kolları, rotilli kollar ve birçok bağlantı noktalarında kullanılırlar.



Şekil 2.7. Süspansiyon Montajı ve kauçuk burçlar (Ito ve arkadaşları, 2010)



Şekil 2.8. Salıncak kolu üzerinde bulunan kauçuk burçlar

Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’ de Teknorot firmasının ürettiği kauçuk burçların en çok kullanıldığı parçalardan olan salıncak kolu ve rotilli kol görülmektedir. Bu parçalar tekerleğin düşey hareketini kısıtlayarak, tekerlekleri araç şasisine bağlayan süspansiyon parçalarıdır. Sürüş güvenliğini ve konforunu direkt etkilediklerinden dolayı süspansiyon sistemlerinin en önemli parçalarıdır. Öngörülen araç sürüş dinamiğine bağlı olarak, 3 nokta(salıncak) veya 2 nokta (rotilli kol) bağlantı gözetilerek tasarımları yapılır.



Şekil 2.9. Rotilli kol üzerinde bulunan kauçuk burçlar

Paige (2002), kauçuk burçların tasarım sürecinde sonlu elemanlar analizi konulu çalışmasında Adkins ve Gent'in (1954) çalışmalarını referans alarak radyal rijitliği analitik bir bağıntı ile tanımlamıştır. Sonrasında Rivlin'in (1949) çalışması referans gösterilerek eksenel rijitlik tanımlanmıştır. Böylelikle ölçüleri ve malzemesi tanımlı olan bir burç için rijitlikler hesaplanabilir olmuştur. Aynı burçlar için Abaqus paket programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen rijitlik eğrileri analitik sonuçlarla karşılaştırılarak büyük oranda doğru sonuçların elde edildiği gösterilmiştir.

Soyel (2008), sonlu elemanlar metodu ile NR/SBR tipi elastomer esaslı malzemelerin davranış modellerinin belirlenmesi konulu çalışmasında malzemenin matematiksel modellenmesi üzerinde durmuştur. Çalışma kapsamında iki tip kauçuk malzeme için mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Abaqus 6.7.1 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak test verileri ile yazılım içerisinde yer alan malzeme modelleri için hiperelastik malzeme katsayıları hesaplanmıştır. Her bir hiperelastik malzeme modeli için eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler test verisini temsil eden eğri ile kıyaslanarak en uygun hiperelastik malzeme modeli belirlenmeye çalışılmıştır.

Centeno G.(2009), çarpışma simülasyonları için kauçuk burçların sonlu elemanlar modellenmesi konulu çalışmasında çarpışma simülasyonları için kauçuk burç modellenmesi üzerinde durmuştur. Sonlu elemanlar modelinde malzeme özelliklerini tanımlamak için Yeoh modelini kullanmıştır. Malzeme katsayıları;

$$C10 = 0,55 \text{ MPa}$$

$$C20 = -0,05 \text{ MPa}$$

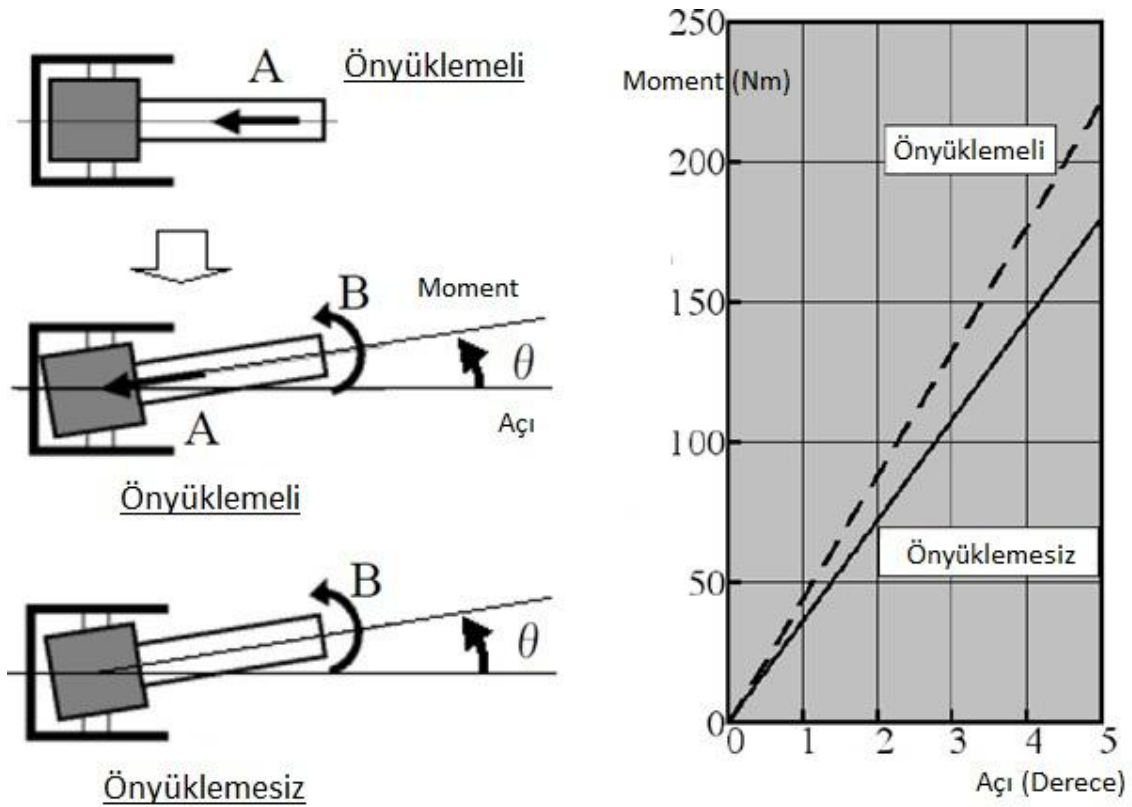
$$C30 = 0,95 \text{ MPa}$$

olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı olarak Ls-Dyna kullanılmıştır.

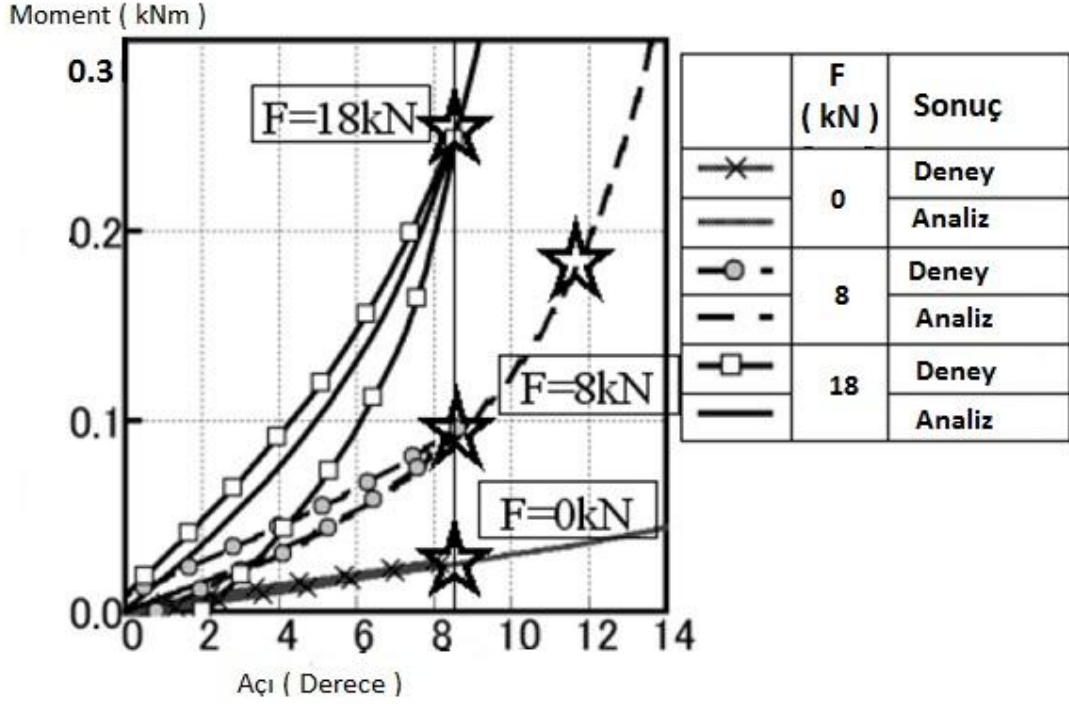
Özgün (2010), kauçuk burçlarda kauçuk sertliği ve çaplama işleminin kopma mukavemetine etkisinin araştırılması konulu çalışmasında kauçuk burç üretimi, malzeme seçimi ve mukavemeti üzerinde durmuştur. Farklı sertliklerde seçtiği kauçuk malzemelerle farklı çaplama işlemleri kullanarak prototipler üretmiştir. Çaplama işlemi burç üretildikten sonra çapının pres yardımıyla belli oranda daraltılması işlemidir. Sonrasında bu burçları kopma testine tabi tutarak en mukavemetli burç için sertlik ve çaplama işlem tipini belirlemeye

çalışmıştır. Bu çalışma sonucunda kopma mukavemetinin maksimum değerinin, 65 Shore A kauçuk sertliği ve % 4 çaplama değerinde elde edildiği görülmüştür.

Ito ve arkadaşları (2010), kauçuk süspansiyon burçları için analiz ve modelleme teknikleri konulu çalışmalarında aksel ön yüklemeli ve ön yüklemesiz burç modellerinin dönme momentleri etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonrasında Şekil 2.10'da görüldüğü gibi ön yüklemeli burç geometrisi dönme momenti etkisi altında daha çok dönmektedir. Bu çalışma kapsamında analizler Simulia sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında elde edilen analiz sonuçları Şekil 2.11'de görüldüğü gibi test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Değişik ön yükleme durumları için yapılan test ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında yüksek bir doğruluk oranının yakalandığı görülmektedir. Grafiklerden özellikle deformasyon miktarı arttıkça daha tutarlı sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.10 Dönme momenti etkisi altında burçların davranışı(Ito ve arkadaşları, 2010)



Şekil 2.11 Test ve Analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Ito ve arkadaşları, 2010)

Vahapoğlu (2013), kauçuk mekaniğinde yapılan deneyler konulu çalışmasında kauçuk malzemeler için yapılan tüm deneyleri sınıflandırarak detaylı bir biçimde incelemiştir. Bu çalışmada testler yükleme ve numune şekillerine göre detaylı bir şekilde gruplandırılarak incelenmiştir. Yapılan testlerin geçmişten günümüze ulaşana kadar uğradığı değişikliklere de yer verilmiştir. Çalışmamızda bu testlerden en çok bilinen ve uygulananlarına yer verilmiştir.

### 3. KAUÇUK MALZEMELERDE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi ürün tasarımında oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sonlu elemanlar yöntemi gerekli parametrelerin istenen şartlara ulaşmasını sağlayan güçlü bir araçtır. Analiz sonuçları, karmaşık tasarımların ürün gereksinimlerine hızlı bir şekilde ulaşmasını sağlar.

Doğru tasarımlar yapılabilmesi için analiz esnasında kullanılan malzeme bilgilerinin doğruluğu çok önemlidir. Çelikler için bu bilgiler tek eksenli bir çekme testi ile elde edilebilmektedir. Lineer elastik bir analiz için elastisite modülü ve poisson oranı bilgisi yeterlidir. Malzeme plastik bölgeye geçiş yaptığında ise tek eksenli çekme deneyinde elde edilen eğrinin akma mukavemeti sonrasında kalan kısmı programa tanımlanmalıdır.

Kauçuk malzemelerde elastik uzama miktarı çok büyüktür. Hiperelastik malzeme olarak adlandırdığımız bu malzemeler elastik ve plastik malzeme modelleri ile tanımlanamazlar. Kauçuk türü malzemelerin kimyasal mekanik ve termal özelliklerinin metallere farklı olması nedeniyle bünye denklemlerinin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Bu malzemelerin bünye denklemleri direkt olarak gerilme-şekil değiştirme bağıntılarıyla istenen doğrulukta tanımlanamamaktadır. Bunun için birçok araştırmacı, kauçuk türü malzemeler için şekil değiştirme enerji fonksiyonları tanımlamışlardır. Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunda, kauçuk malzemelere özgü testlerin sonuçları kullanıldığında malzeme katsayıları elde edilmektedir. Bu katsayılar sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlarda kauçuk malzemeler tanımlanırken kullanılmaktadır.

#### 3.1. Hiperelastisite Terimleri

Hiperelastik bir malzemenin mekanik özelliklerinin belirtmek için diğer malzemelerden farklı olarak bazı terimler kullanılmaktadır.

##### 3.1.1. Uzama Oranı (Stretch Ratio)

Deplasmanın ilk boya oranı gerinme(strain) diye adlandırılmaktadır. Gerinme ifadesi 3.1 numaralı denklemde görülmektedir.

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

Deplasmandan sonraki boyun ilk boya oranına uzama oranı denir. Matematiksel ifadesi 3.2 numaralı denklemde görülmektedir.

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

### 3.1.2. Temel İnvaryantlar ve Hacim Oranı

Temel invaryantlar, koordinat sisteminden bağımsız gerinmeleri ölçmek için kullanılır. Matematiksel ifadeleri 3.3, 3.4 ve 3.5 numaralı denklemlerde verilmiştir.

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

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

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

3.6 numaralı denklem görüldüğü gibi, hacim oranı deforme olmuş hacmin ilk hacme oranıdır. Bu da temel invaryantların çarpımına eşit olmaktadır.

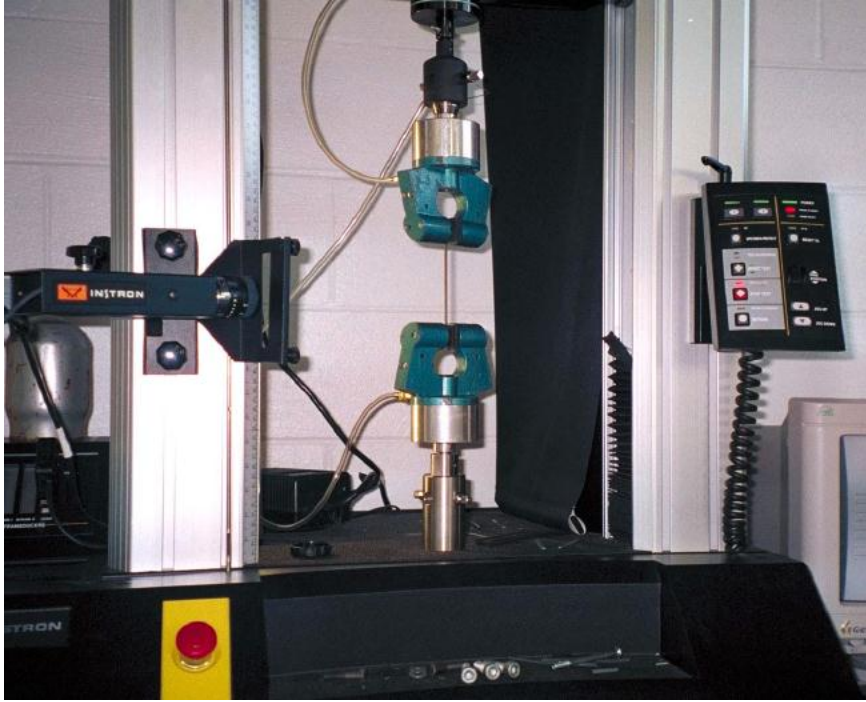
$$J = \frac{V}{V_0} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (3.6)$$

### 3.2. Hiperelastik Malzemeler İçin Test Yöntemleri

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

### 3.2.1. Tek Eksenli Çekme Testi

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



Şekil 3.1 Tek eksenli çekme testi (Miller, 2000)

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

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

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

### 3.2.2. Safi Kayma Testi

Safi kayma testinde de tek doğrultuda kuvvet uygulanmaktadır. Bu testte boyu çok kısa ve geniş bir numune kullanılmaktadır. Safi kayma testinde, kuvvetin uygulandığı doğrultuda



uzama meydana gelmektedir ancak tek eksenli çekme deneyinden farklı olarak ikinci boyutta kısılma meydana gelirken, üçüncü boyutta değişiklik görülmemektedir.

$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$
$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 1/\lambda$$



Şekil 3.2 Safi kayma testi (Miller, 2000)

### 3.2.3. Basit Basma Testi

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

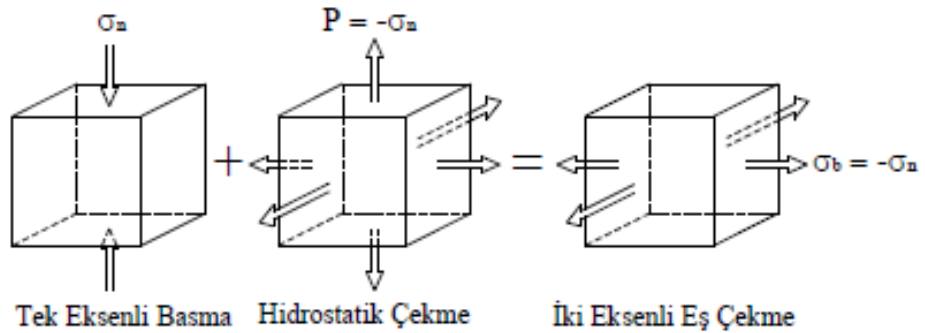
$$\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$
$$\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$$



Şekil 3.3 Basit basma testi (Miller, 2000)

### 3.2.4. İki Eksenli Eş Çekme Testi

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



Şekil 3.4 Basma ve iki eksenli eş çekme testlerinin eşitliği (Vahaoğlu, 2013)

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

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = 0$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

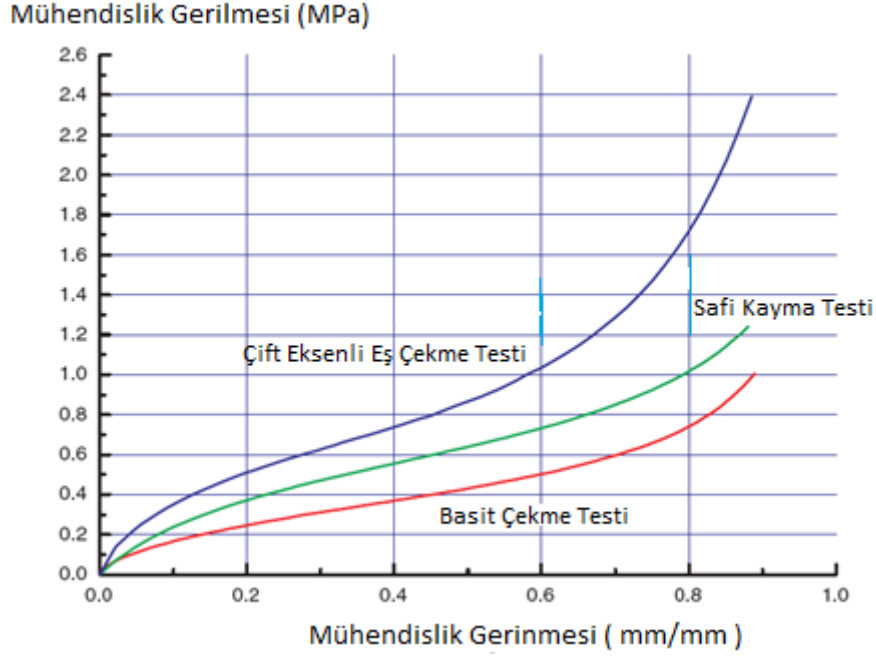
Kalınlık boyunca uzama oranı sıkıştırılmazlık konumundan bulunur.

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



Şekil 3.5 İki eksenli eş çekme testi (Miller, 2000)

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



Şekil 3.6 Farklı testler ile elde edilmiş gerilme yüzde şekil değişimi grafikleri(Miller, 2000)

### 3.3. Hiperelastik Malzeme Modelleri

Hiperelastik malzemeler küçük yükler altında özelliklerini koruyarak elastik büyük şekil değişikliklerine uğrarlar. Bir hiperelastik malzemeye uygulanan yük ve elde edilen şekil değişikliği doğrudan orantılı değildir. Benzer şekilde gerilme ve şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlayacak bir oran yoktur. Bu ilişkileri tanımlamak için şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu gereklidir. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunu farklı şekillerde tanımlamışlardır. Bu fonksiyonlardan en çok kullanılanları çalışmamızda sıralanmıştır.

#### 3.3.1. Mooney-Rivlin Modeli

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

Mooney-Rivlin modelinin sonsuz seri şeklindeki gösterimi (3.7) numaralı denklemde verilmiştir (Garcia R. ve arkadaşları, 2005).

$$W(I_1, I_2) = \sum_{ij=1}^{\infty} c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3.7)$$

(3.8) numaralı denklemde Mooney – Rivlin modelinin iki parametrelili hali görülmektedir.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (3.8)$$

### 3.3.2. Neo – Hooken Modeli

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

Mooney Rivlin modelinin tek terimli hali bize Neo- Hooken modelini vermektedir (Garcia R. ve arkadaşları, 2005).

$$W(I_1) = c_{10}(I_1 - 3) \quad (3.9)$$

### 3.3.3.Ogden Modeli

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

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

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{\mu_r}{\alpha_r} (\lambda_1^{\alpha_r}, \lambda_2^{\alpha_r}, \lambda_3^{\alpha_r} - 3) \quad (3.10)$$

### 3.3.4. Yeoh Modeli

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

Bu Şekil değiştirme enerji fonksiyonunun en büyük faydası sonlu elemanlar paket programlarından birçoğunda üçüncü dereceden deformasyon modelinin bulunmasıdır. Yeoh çalışmalarını vulkanize edilmiş, kauçuğa karbon siyahı katılmış ve katılmamış numuneler için yapmıştır. Her ikisinde de kayma modülünün, Neo-Hookean ve Mooney-Rivlin malzeme modelinin aksine, deformasyonla değiştiğini belirtmiştir. Yeoh önermiş olduğu malzeme modelinde tek eksenli çekme deneyinden elde edilen verilerin farklı deformasyonlardaki gerilme-Şekil değiştirme davranışını yeterli ölçüde tanımladığını bu nedenle diğer deneylerin özellikle de iki eksenli çekme deneyine gerek kalmadan malzemenin davranışının tek eksenli çekme deneyi ile belirlenebileceğini belirtmiştir. (Soyel, 2008)

Yeoh malzeme modeline göre Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonu (3.11) numaralı denklemde görölmektedir.

$$W(I_1, I_2, I_3) = \sum_{i,j,k=0}^{\infty} c_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad (3.11)$$

### 3.3.5. Katsayıların Elde Edilmesi

Kauçuk bir malzemenin mekanik davranışı, malzemeye uygun bir Şekil değiştirme enerjisi modelinin seçimi ile tanımlanmaktadır. Seçilen hiperelastik malzeme modeli ve test verileri ile Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunda yer alan katsayılar elde edilir.

Sonlu elemanlar analizleri paket programlarında bir hiperelastik malzemenin tanımlanabilmesi için iki yöntem bulunmaktadır. İlk yöntem olarak malzeme test sonuçları sonlu elemanlar paket programlarına girilir. Test verilerine en iyi uyum gösteren hiperelastik bir malzeme modeli seğilir ve katsayılar hesaplanır. İkinci yöntem olarak da daha önce elde edilmiş hiperelastik malzeme katsayıları direkt olarak programa girilebilir.

#### 4. KAUÇUK BURCUN ŞEKİL OPTİMİZASYONU

Bu çalışmamızdaki amaç, kauçuk burç için tasarım kriteri olarak belirlenen rijitlik eğrisinin sağlanmasıdır. Diğer bir ifade ile burç üzerine düşen kuvvete bağlı olarak burcun yapacağı deplasman miktarının kontrol edilmesidir.

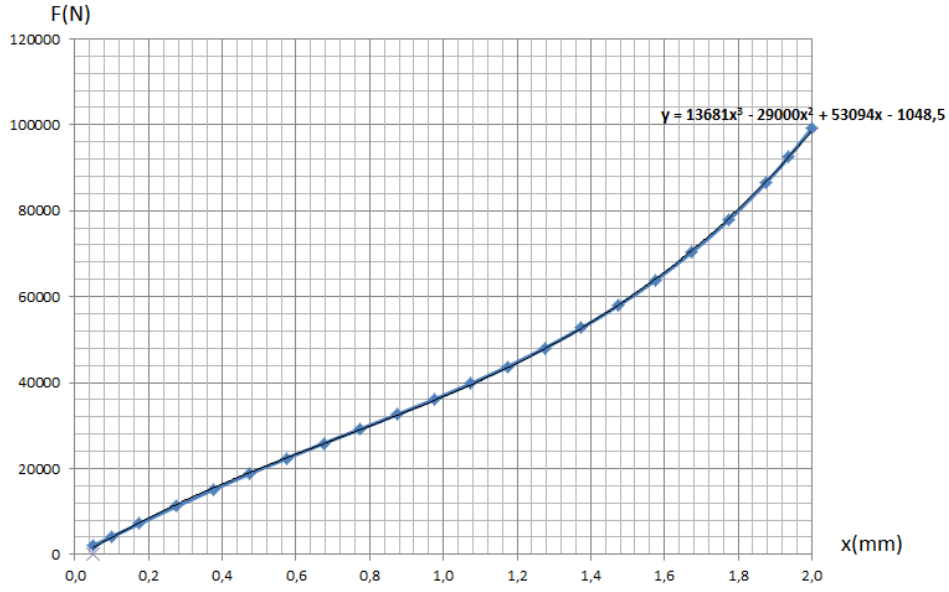
Bir burç tasarımının sonlu elemanlar paket programlarında hiperelastik malzemenin tanımlı olduğu bir analizde yük uygulanarak deplasman değerlerinin elde edilmesi ve rijitlik eğrisine ulaşılması mümkündür. Sonlu elemanlar yazılımlarının optimizasyon modülleri kullanılarak şekil değiştirme, gerilme gibi analiz çıktılarının ekstrem durumları için analiz girdileri yani tasarım parametrelerinin optimum değerleri elde edilebilir. Çalışmamızda olduğu gibi analiz çıktısı olarak elde edilen eğrinin hedef bir eğri ile örtüştürülmesi için optimum girdi değerlerinin bulunması sadece sonlu elemanlar paket programları ile mümkün olmamaktadır. Optimizasyon çalışmamızda izlenen yol bu bölümde iki uygulama ile detaylandırılmıştır. Çalışma kapsamında kauçuk burç hiperelastik modellemesi yapılmıştır. Burç geometrisinde iki parametre belirlenerek istenen rijitliği sağlayacak optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır.

##### 4.1. Uygulama 1

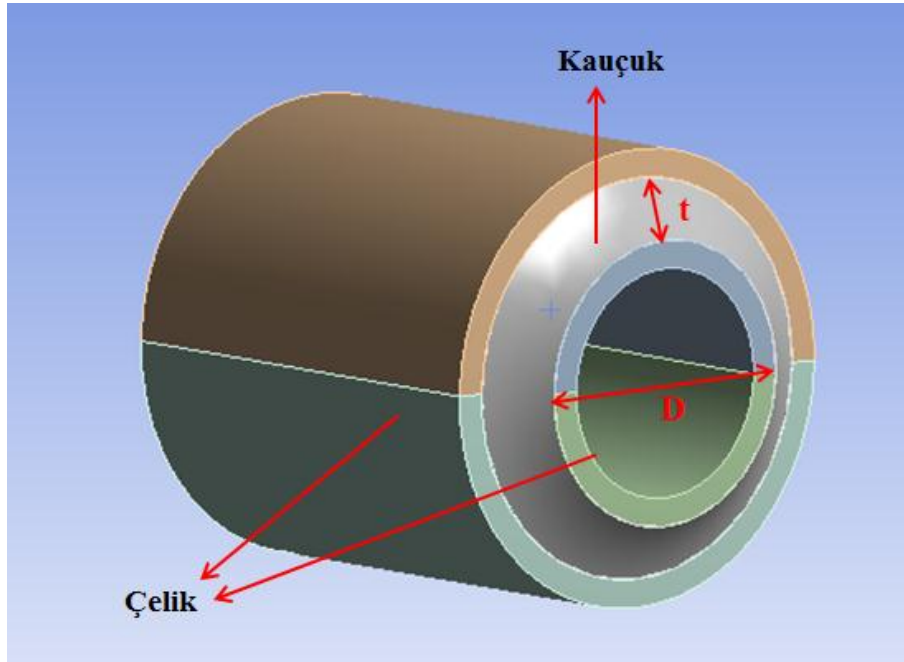
Çalışmamızda tasarlanan kauçuk burcun Şekil 4.1’de görülen hedef rijitlik eğrisi ile uyuşması amaçlanmaktadır. Bu eğri burç üzerine düşen kuvvet ile birlikte burcun sergilemesi gereken deplasman davranışını temsil etmektedir. Hedef rijitlik eğrisinin denklemi (4.1) numaralı bağıntıda görülmektedir.

$$F_H = 13681x^3 - 29000x^2 + 53094x - 1048,5 \quad (4.1)$$

Kauçuk burç tasarlanırken rijitliğine etki eden iki parametre deney tasarımı tablosu için seçilmiştir. Bu parametreler Şekil 4.2 ‘den de görüldüğü gibi ‘**D**’ ve ‘**t**’ parametreleridir. ‘**D**’ parametresi burcun kauçuk kısmının iç çapını, ‘**t**’ parametresi ise kauçuk malzeme kalınlığını temsil etmektedir.



Şekil 4.1 Hedef rijitlik eğrisi ve denklemi



Şekil 4.2 Deney Tasarımı Parametreleri

Seçilen deney tasarımı parametrelerinin değer aralıkları belirlenmiştir. Her iki parametrenin bu aralıkta alabileceği beş farklı değer deney tasarımı tablosuna eklenmiştir. İki parametrenin 5'er farklı durumu içim toplamda 25 farklı model kurularak sonlu elemanlar analizine hazırlanmıştır. Deney tasarımı tablosu Çizelge 4.1'de görülmektedir.



Çizelge 4.1.'den de görüldüğü gibi kauçuk iç çapı 40 ile 56 mm arasında seçilecektir. Kauçuk malzeme kalınlığı ise 8 ile 16 mm arasında seçilecektir.

Deney tasarım tablosunda bulunan 25 farklı geometri için sonlu elemanlar modeli ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak kurulmuştur.

<b>Model No</b>	<b>t(mm)</b>	<b>D(mm)</b>
1	8	40
2	8	44
3	8	48
4	8	52
5	8	56
6	10	40
7	10	44
8	10	48
9	10	52
10	10	56
11	12	40
12	12	44
13	12	48
14	12	52
15	12	56
16	14	40
17	14	44
18	14	48
19	14	52
20	14	56
21	16	40
22	16	44
23	16	48
24	16	52
25	16	56

Çizelge 4.1 Deney tasarımı tablosu

Analiz için Şekil 4.2’de görülen burç geometrisi için sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Burcun dış kısmında bulunan çelik malzeme için elastisite modülü ve poisson oranı programa girilerek lineer elastik malzeme tanımlanmıştır. Kauçuk malzeme için ise hiperelastik malzeme tanımlanmıştır. Hiperelastik malzeme tanımlamak için öncelikle gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyi ve safi kayma deneyinin gerilme-gerinme eğrileri programa girilmiştir. Sonrasında her iki test verisine de en iyi uyum gösteren 3. dereceden Yeoh hiperelastik malzeme modeli seçilmiştir. Ansys ile girilen test dataları ve seçilen malzeme modeli referans alınarak malzeme katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.3’ de görüldüğü gibi katsayılar;

$$C10 = 0,665777 \text{ MPa}$$

$$C20 = -0,1084 \text{ MPa}$$

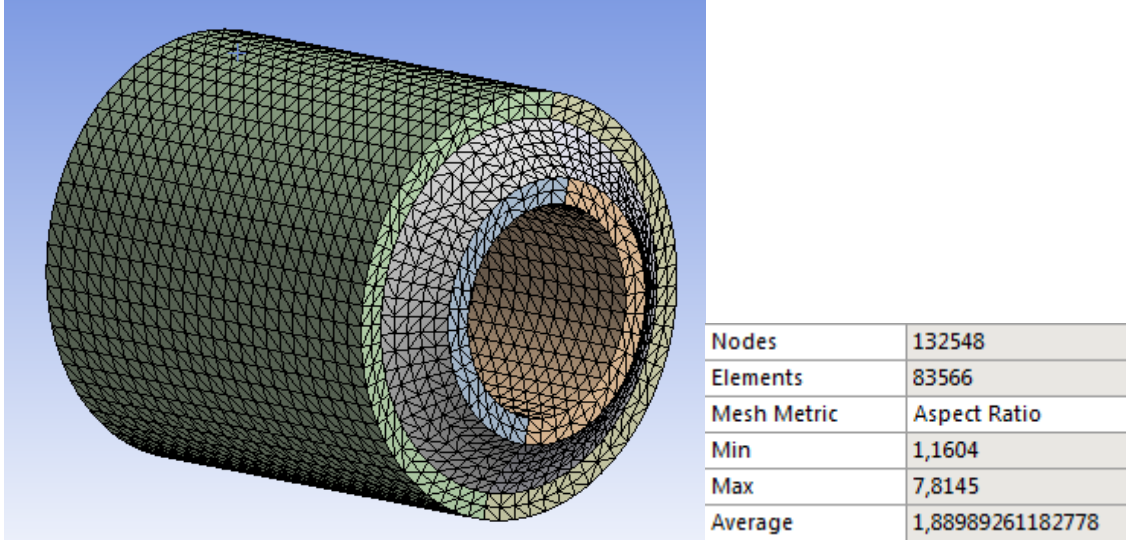
$$C30 = 0,032029 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Properties of Outline Row 3: kauçuk			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Uniaxial Test Data	Tabular	
3	Scale	1	
4	Offset	0	MPa
5	Shear Test Data	Tabular	
6	Scale	1	
7	Offset	0	MPa
8	Yeoh 3rd Order		
9	Material Constant C10	6,5777E+05	Pa ▼
10	Material Constant C20	-1,0854E+05	Pa ▼
11	Material Constant C30	32029	Pa ▼

Şekil 4.3 Hiperelastik malzeme tanımı ve katsayıları

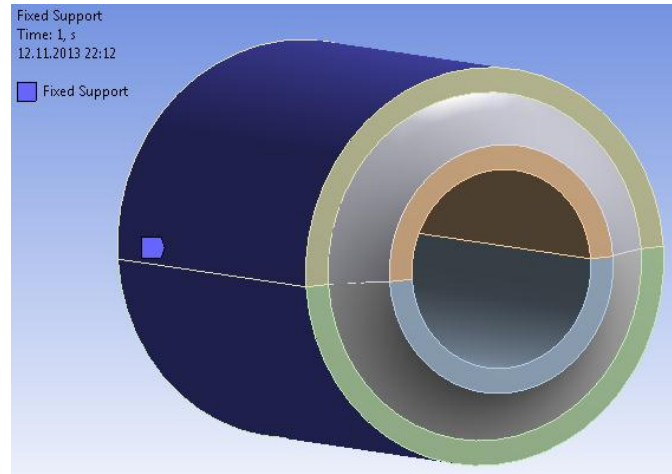
Kauçuk burç için oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 4.4’de görülmektedir. Sonlu elemanlar modeli 132548 eleman ve 83566 düğüm noktasından meydana gelmektedir. Sonlu elemanlar modelinde elemanın köşe düğüm noktaları arasında da düğüm noktası bulunduran ikinci dereceden eleman(quadratic) kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Sonlu elemanlar modeli

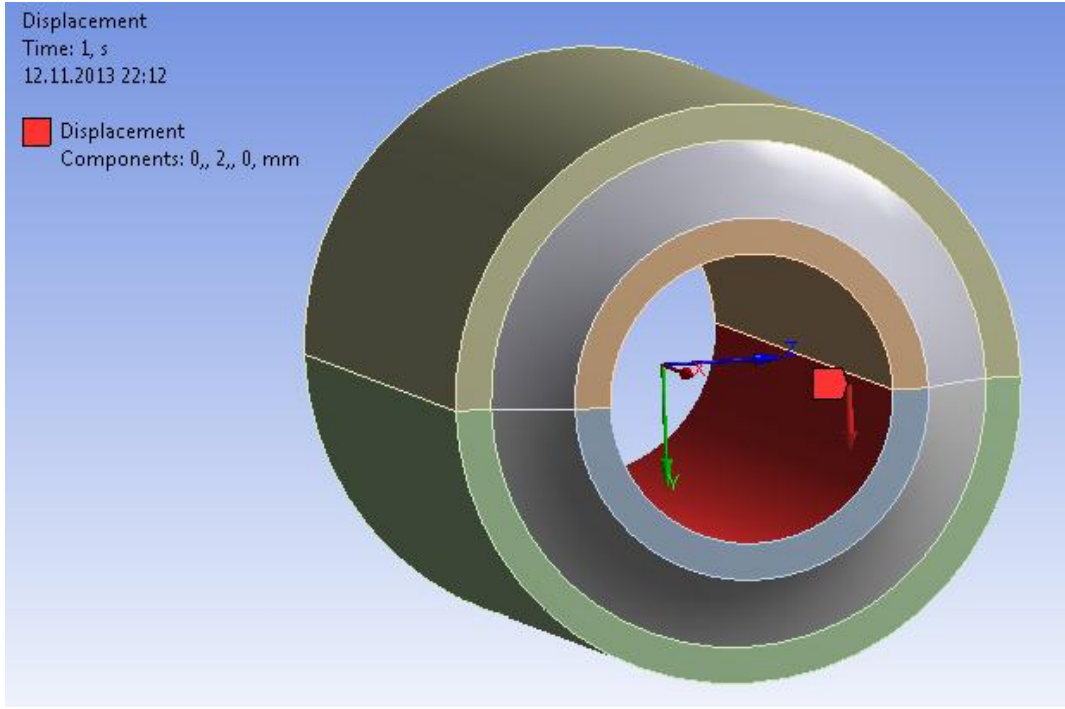
Kauçuk burçlarda kauçuk ve metal kısım pres yardımıyla ayrılmayacak şekilde yapıştırılır ve birbiri içerisinde hareket etmez. Bu nedenle sonlu elemanlar modelinde bu iki malzeme arasında hareketi tamamen kısıtlayacak kontak tanımlanmıştır.

İlk sınır şartı olarak Şekil 4.5’de görüldüğü gibi burç dış yüzeyi bütün serbestlik derecelerinde harekete kısıtlanmıştır. İkinci sınır şartı olarak da Şekil 4.6’da görüldüğü gibi ortasından geçeceğini düşündüğümüz bir milin temas edip deplasmana zorlayacağını varsaydığımız iç yüzeyin yarısına şekilde görülen koordinat sisteminin Y eksenini doğrultusunda deplasman uygulanmıştır.



Şekil 4.5 Sınır şartı - hareket kısıtı

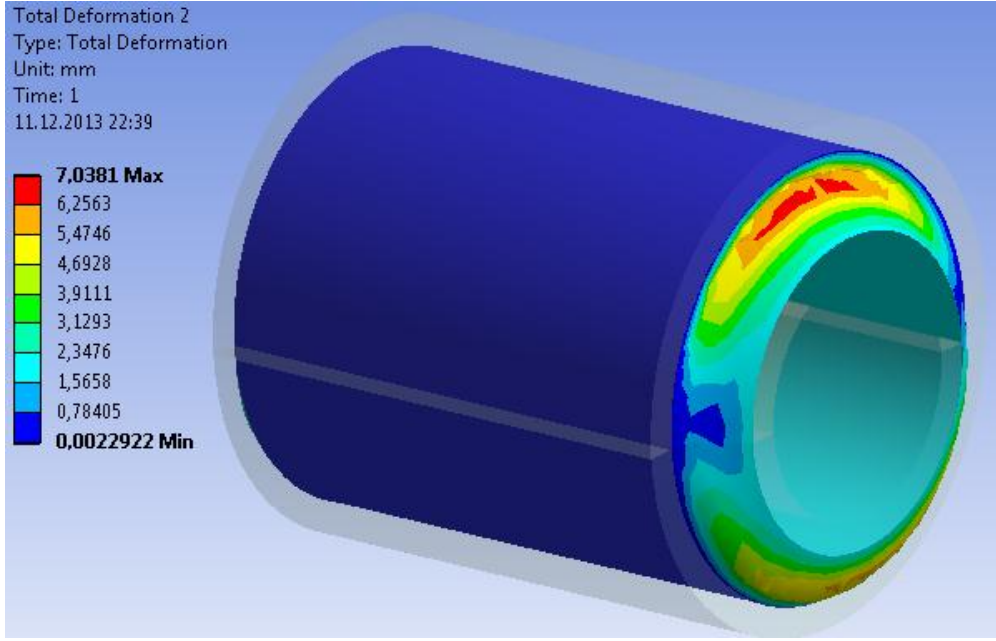
Yüzeyle uygulanan sınır şartları sonlu elemanlar modelinde bu yüzeyler üzerinde bulunan düğüm noktalarına uygulanır.



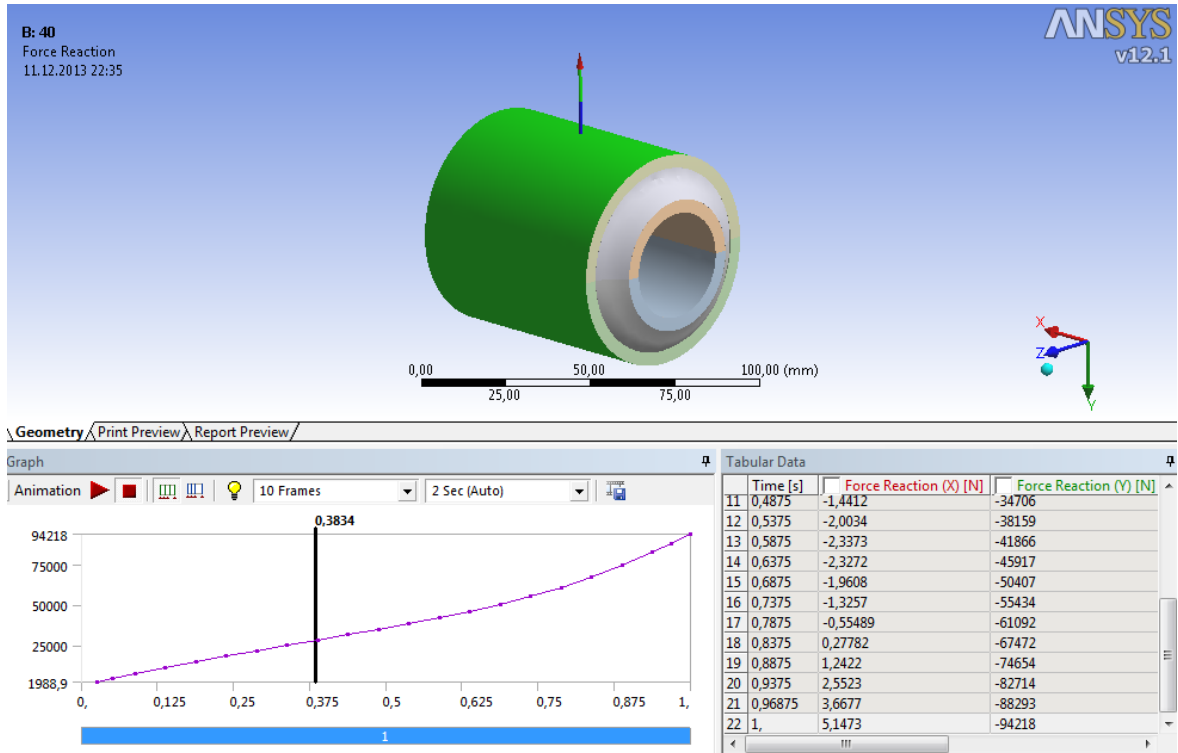
Şekil 4.6 Sınır şartı – Deplasman

Sonlu elemanlar analizinde problem çözümünde kullanılan ve her bir düğüm noktası için yazılan denklemlerde bilinmeyenler deplasmandır. Sonlu elemanlar modelinin elemanlarının düğüm noktası sayısı ve bu noktalarının serbestlik dereceleri çarpılarak bilinmeyen sayısı elde edilir. Serbestlik derecesi eleman tipine göre değişir. Üç boyutlu elemanlarda serbestlik derecesi 3 iken, kabuk(shell) elemanlarda serbestlik derecesi 6'dır. Örneğin kauçuk burcun sonlu elemanlar modeli 132548 eleman ve 83566 düğüm noktası içermektedir. Kullanılan üç boyutlu elemanların serbestlik dereceleri üçtür. Analizin çözümü için 250698 bilinmeyenli bir denklem sisteminin çözümü gerekmektedir. Programda sınır şartı olarak tanımladığımız hareket kısıtları ile bilinmeyen sayısını bir miktar azaltmış oluruz. Oluşturulan denklem takımlarının çözümüyle deplasman değerleri elde edildiğinde gerilme de bulunmuş olur. Gerilme dağılımı elde edildikten sonra program (4.2) numaralı bağıntıyı kullanarak gerilme değerlerine ulaşır.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.2)$$



Şekil 4.7 Sonuçlar – Deplasman dağılımı



Şekil 4.8 Sonuçlar – Reaksiyon kuvveti

İlk sonlu elemanlar modeli için gerçekleştirilen hiperelastik analiz sonucunda elde edilen deplasman dağılımı Şekil 4.7' de görülmektedir. Maksimum deplasman değeri yaklaşık 7 mm

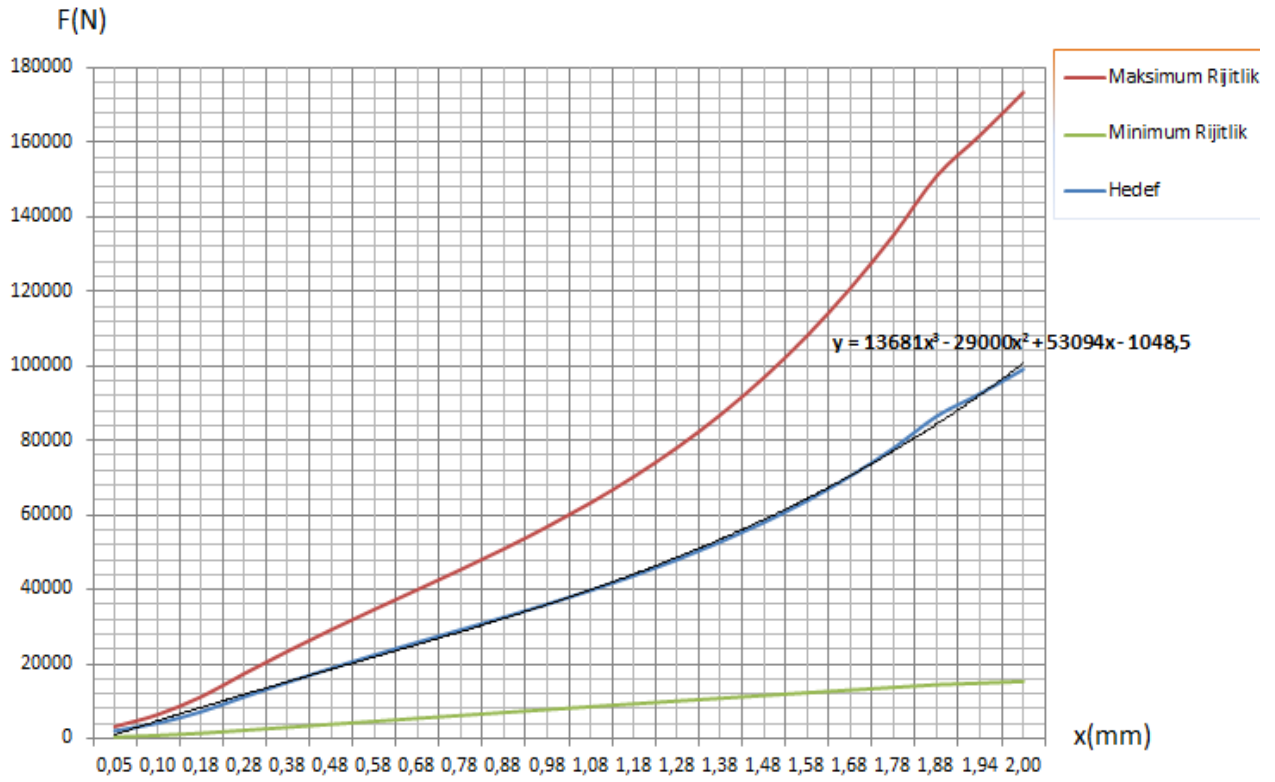
olarak elde edilmiştir. Kauçuk, sıkıştırılmaz bir malzeme olduğu için deplasmanın uygulandığı y koordinatı doğrultusu dışında da hareket ederek elde edilen deplasman sonucunun uygulanan deplasman değerinden büyük olmasına sebep olmuştur.

<b>t(mm)</b>	<b>D(mm)</b>	<b>x(mm)</b>	<b>F<sub>Analiz</sub>(N)</b>
8	40	0	0
8	40	0,05	1989
8	40	0,10	3971
8	40	0,18	6924
8	40	0,28	10793
8	40	0,38	14552
8	40	0,48	18171
8	40	0,58	21637
8	40	0,68	24965
8	40	0,78	28200
8	40	0,88	31417
8	40	0,98	34706
8	40	1,08	38159
8	40	1,18	41866
8	40	1,28	45917
8	40	1,38	50407
8	40	1,48	55434
8	40	1,58	61092
8	40	1,68	64472
8	40	1,78	74654
8	40	1,88	82714
8	40	1,94	88293
8	40	2,00	94218

Çizelge 4.2. 1 numaralı model analiz sonuçları

Çalışmamızda, uygulanan deplasman sonucunda oluşan rijitlik eğrisi elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle Şekil 4.5’ de gösterilen hareket kısıtı üzerine düşen reaksiyon kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Reaksiyon kuvvetinin zamana bağlı değişimi ve doğrultusu Şekil 4.8’de görüldüğü gibi analiz sonucu olarak elde edilmiştir. Diğer bir sınır şartı olan deplasmanın da zamana bağlı değişimi bilindiğinden reaksiyon kuvvetinin deplasmanla değişimini gösteren eğriye ulaşılmaktadır. Her bir model için sonuçlar Çizelge 4.2’ de görüldüğü şekilde elde edilmiştir.

Deney tasarım tablosunda listelenen modeller için çözdürülen analizler sonucunda elde edilen maksimum ve minimum rijitlik eğrileri aralığı Şekil 4.9’ da görülmektedir. Hedef rijitlik eğrisi maksimum ve minimum rijitlik eğrileri arasında yer almaktadır. Buradan tasarım parametreleri için deney tasarım tablosunda belirlenen aralıkların, hedef eğriye ulaşabilmek için yeterli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9 Maksimum- minimum rijitlik aralığı

Analiz sonuçlarında elde edilen deplasman ve kuvvet değerleri deney tasarımı tablosuna eklenmiştir. Çizelge 4.2’ de görülen tablo tüm modeller için alt alta yazılarak girdi ve çıktılardan oluşan 4 parametrelilik EK 1’ de görülen tablo elde edilmiştir.

Deney tasarım tablomuzdaki sayısal verileri temsil etmesini istediğimiz bir fonksiyon bulunması amaçlanmıştır. Bu fonksiyon  $F(D,t,x)$  şeklinde kuvvet değerinin tasarım boyutları ve deplasmanla olan ilişkisini tanımlamalıdır. Bu fonksiyonu bulmak amacıyla Mathematica 9.0 yazılımı kullanılmıştır. EK 1' de paylaşılan tablonun her bir satırı programa uygun formatta tanıtılmıştır. Böylece her bir kuvvet değerine karşılık gelen parametre ve deplasman değerleri tanımlanmıştır. Sonrasında istenilen derecede bir denklem elde edilmesi mümkündür. Uygulamamız için 4.3 numaralı bağıntıdaki 4. dereceden denklem elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
F = & -4,50082 * 10^6 + 5807,25 D - 106,308 D^2 + 0,711881 D^3 - 0,000139865 D^4 + \\
& 1,56815 * 10^6 t - 38,5829 Dt - 204799 t^2 + 11640,5 t^3 - 242,971 t^4 + \\
& 353853 x - 12879,9 Dx - 6130,35 tx + 1121,03 Dtx + 26,1921 D^2tx - \\
& 0,086177 D^3tx - 189,462 Dt^2x - 0,00301672 D^3t^2x + 6,6704 Dt^3x - \\
& 0,0219646D^2t^3x - 269591x^2 + 1334,46 Dtx^2 - 0,0560729 D^3tx^2 - \\
& 2,37745D^2t^2x^2 + 0.0105209D^3t^2x^2 - 1,20861Dt^3x^2 + 0.0746284D^2t^3x^2 + \\
& 70622x^3 - 440,653Dtx^3 + 4,38138D^2tx^3 + 10,9473Dt^2x^3 - \\
& 0.00535638D^2t^2x^3 - 0,0000805684D^3t^3x^3 + 2115,74x^4
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Denklem elde edildikten sonra EK1'de ki deney tasarımı tablosunun her bir satırındaki kuvvetin denklemden elde edilen değeri excel programı yardımıyla formül çoğaltılarak hesaplanmıştır. Elde edilen denklemin analiz sonuçlarını tam olarak temsil edip etmediğini kontrol etmek amacıyla denklem ile elde edilen verilerin korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Denklemimiz ile elde ettiğimiz ve EK1' listelenmiş kuvvet verileri için korelasyon katsayısı ;

$$r^2 = 0,982,$$

$$r = 0,99$$

şeklinde elde edilmiştir. Korelasyon katsayısının 1'e eşit olması mükemmel ilişki anlamına geldiği için elde edilen değerlerin 1'e olan yakınlığı denkleminizin analiz sonuçlarını iyi temsil ettiğini göstermektedir.



<b>t(mm)</b>	<b>D(mm)</b>	<b>x(mm)</b>	<b>F<sub>analiz</sub>(N)</b>	<b>F (N)</b>
8	40	0	0	-2976
8	40	0,05	1989	-27
8	40	0,10	3971	2754
8	40	0,18	6924	6628
8	40	0,28	10793	11287
8	40	0,38	14552	15433
8	40	0,48	18171	19148
8	40	0,58	21637	22516
8	40	0,68	24965	25627
8	40	0,78	28200	28575
8	40	0,88	31417	31461
8	40	0,98	34706	34389
8	40	1,08	38159	37471
8	40	1,18	41866	40820
8	40	1,28	45917	44559
8	40	1,38	50407	48811
8	40	1,48	55434	53707
8	40	1,58	61092	59383
8	40	1,68	64472	65980
8	40	1,78	74654	73643
8	40	1,88	82714	82522
8	40	1,94	88293	88759
8	40	2,00	94218	95571

Çizelge 4.3. Denklemden elde edilen kuvvet değerleri

Hedef eğriye ulaşılabilmesi için (4.3) numaralı bağıntıda verilen denklemin, (4.1) numaralı bağıntıda verilen denkleme eşit olması gerekmektedir. Bu nedenle (4.3) numaralı bağıntıda yer alan ve bu iki denklem arasındaki farkı minimum yapan tasarım parametreleri (D,t) , optimizasyon problemimizin optimum değerleri olacaktır.

Hedef eğri ve deney tasarım tablosu denklemlerinin arasındaki toplam farkı (D,t) parametrelerinin alabileceği tüm değerler için hesaplamak amacıyla;

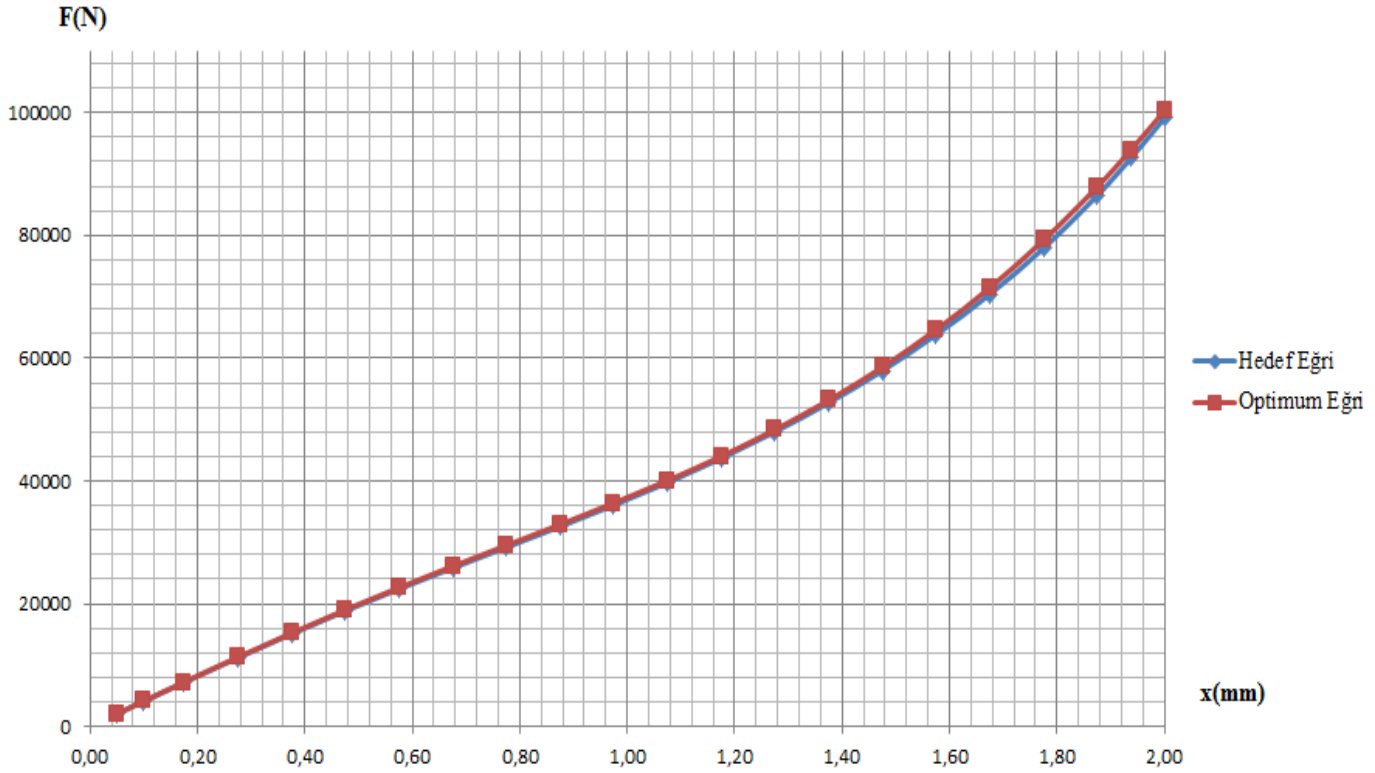
$$F - F_H$$

şeklindeki ifade Excel'de formül olarak oluşturulduktan sonra (D,t) parametrelerinin 0,1 adımlarla büyütüldüğü listede çoğaltılarak tüm aralık için hesaplanmıştır. Kauçuk iç çapı(D) 40 ile 56 mm, kauçuk malzeme kalınlığı(t) ise 8 ile 16 mm arasında değerler almaktadır. Bu ifadenin minimum sonuç verdiği (D,t) ikilisi optimum değerler olarak elde edilmiştir;

$$D=41,3 \text{ mm}$$

$$t=8 \text{ mm.}$$

Elde edilen optimum değerler kullanılarak burç geometrisi yeniden oluşturulmuştur(D=41,3mm, t= 8 mm). Yeni geometri için sonlu elemanlar analizi tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen rijitlik eğrisi Şekil 4.10' da görülmektedir. Optimum değerler ile elde edilen rijitlik eğrisi hedef rijitlik eğrisi ile örtüşmektedir.

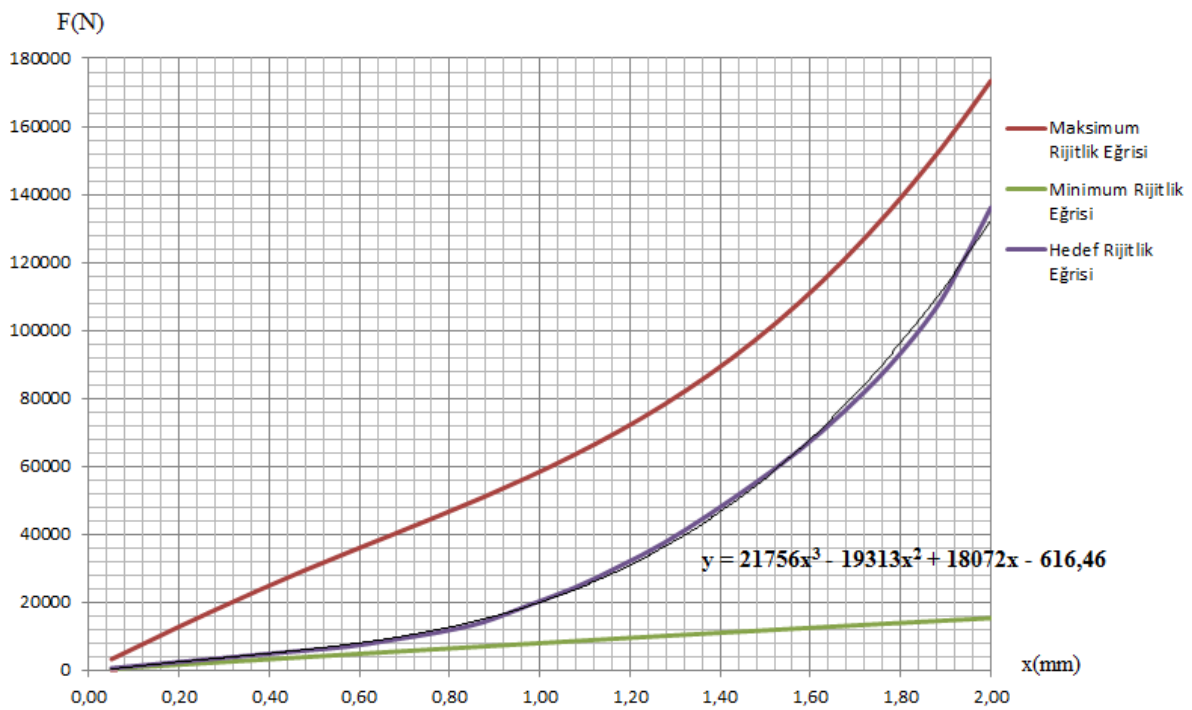


Şekil 4.10 Hedef ve optimum eğrilerin örtüşmesi

## 4.2. Uygulama 2

Çalışmamızda kullandığımız mevcut geometri ve parametrelerle karşımıza çıkan her türlü rijitlik eğrisine ulaşmak mümkün müdür? Bu sorunun cevabını bulabilmek amacıyla farklı bir hedef rijitlik eğrisi için yaptığımız işlemler bu uygulamada tekrarlanmıştır.

İlk uygulamamızda, tasarım parametreleri için belirlenen Çizelge 4.1' de görülen aralık korunmuştur. Yeni seçilen hedef rijitlik eğrisi de Şekil 4.11'de görüldüğü gibi bu aralığı temsil eden maksimum-minimum rijitlik eğrileri arasındadır.



Şekil 4.11 Maksimum-minimum ve hedef rijitlikler

Yeni hedef rijitlik eğrisinin denklemi (4.4) numaralı bağıntıda görülmektedir.

$$F_H = 21756x^3 - 19313x^2 + 18072x - 616,46 \quad (4.4)$$

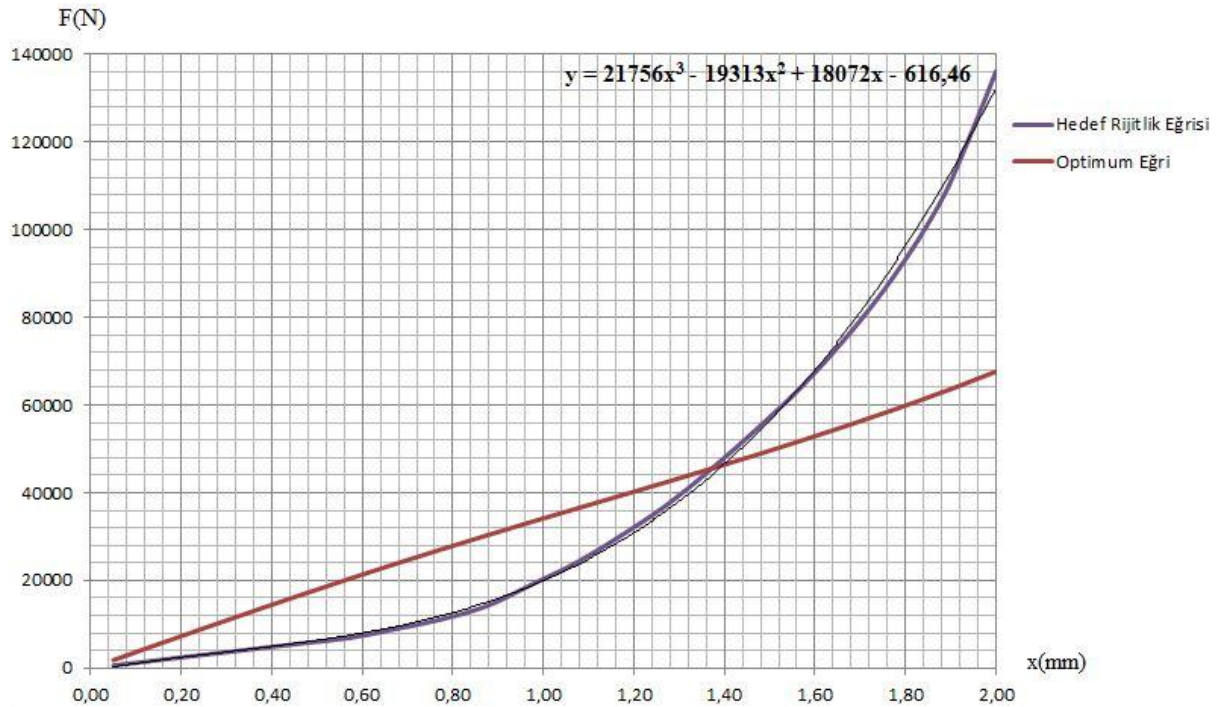
Bir önceki uygulamada kullanılan analiz sonuçları ve (4.3) nolu bağıntıdaki genel denklem aynı şekilde kullanılmıştır. Daha sonra hedef rijitlik eğrisi ile genel denklem ifadesi arasında oluşacak farkı;

$$F - F_H$$

minimize eden (D,t) ikilisi aranmıştır.

Sonuç olarak (D,t) ikilisi **D=56 mm** ve **t= 11,2 mm** olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler için sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Kurulan model için analiz çözdürülerek model için rijitlik eğrisi elde edilmiştir.

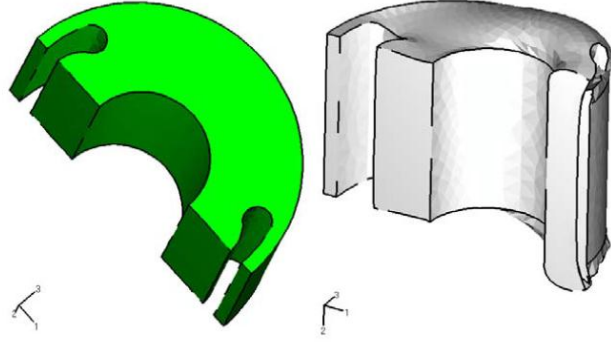
Hedef rijitlik eğrisi ve optimum rijitlik eğrisi Şekil 4.12’de görüldüğü gibi aynı grafik üzerinde görüntülendiklerinde örtüşmemektedirler.



Şekil 4.12 Hedef ve optimum rijitlik eğrileri

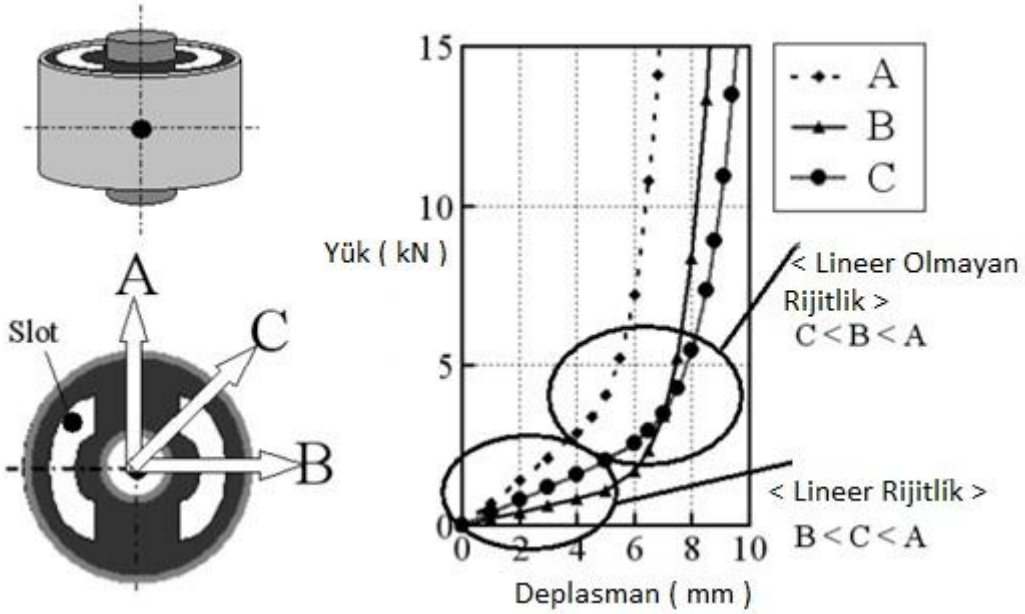
Mevcut burç geometrisi ve belirlenen tasarım parametrelerinin ikinci uygulama için belirlenen hedef rijitlik eğrisini elde etmek için uygun olmadığı anlaşılmaktadır.

Hedef rijitlik eğrisi incelendiğinde belli bir deplasman gerçekleştikten sonra rijitliğin daha büyük bir oranla artış gösterdiği görülmektedir. Bu şekildeki eğriler için burç geometrisinin kauçuk kısmında boşluklar oluşturulması gerekmektedir.



Şekil 4.13 Boşluklu kauçuk burç geometrisi ve şekil değişimi (Paige, 2002)

Kauçuk kısmında boşluk bulunan burç geometrilerinde Şekil 4.13 'de görüldüğü gibi deplasman başladıktan sonra boşluk kapanıncaya kadar elde edilen kuvvet değerleri küçük olacaktır. Ancak deplasman ile boşluk kapanıp malzemeler temas etmeye başladığında elde edilen kuvvet değerleri çok daha büyük olacaktır.



Şekil 4.14 Boşluklu burcun farklı doğrultulardaki rijitlikleri (Ito ve arkadaşları 2010)

Yapılan bir diğer çalışmada ise boşluklu burç geometrileri için farklı radyal doğrultularda rijitliklerin farklı olduğu Şekil 4.14' de görülmektedir. Tasarım esnasında bu noktaya da dikkat edilmelidir.

## 5. SONUÇ

Çalışmamız kapsamında bir kauçuk burç geometrisi oluşturulmuştur. Hiperelastik malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Hiperelastik malzeme modeli oluşturulurken test verilerimizle uyum gösteren Yeoh hiperelastik malzeme modeli kullanılmıştır.

Çalışmamız kapsamında kauçuk burç için iki adet şekil optimizasyonu uygulaması yapılmıştır. Burç geometrisinde iki adet parametre belirlenmiştir. Bu parametreler, istenilen burç rijitliğini sağlayabilecek şekilde optimize edilmeye çalışılmıştır.

İlk uygulamada parametreler için elde edilen optimum değerlerin 1. hedef rijitlik eğrisini sağladığı görülmüştür. İkinci uygulamada ise aynı rijitlik aralığında aynı burç geometrisi ile başka bir rijitlik eğrisine ulaşılmaya çalışılmıştır. Fakat elde edilen optimum değerlerin 2. rijitlik eğrisini sağlamadığı görülmüştür. Örnek çalışmalar da incelendikten sonra bu tarz eğrilerin sağlanabilmesi için boşluklu burç geometrilerinin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Çalışmamızda optimizasyon için burç geometrisinden iki adet parametre seçilmiştir. Bu parametreler için belirlenen aralıklarda beşer farklı değer için model oluşturulmuştur. Dolayısıyla deney tasarım tablosu toplamda 25 farklı model içermektedir. Parametrelere bir yenisi eklenmek istendiğinde toplam model sayısı 125'e ulaşacaktır. Bu da bu sayıda analiz gerçekleştirilmesi anlamına gelir. Böyle bir durumda tüm analizleri gerçekleştirip büyük zamanlar harcamak yerine bazı ara değerler sayısal yöntemlerle hesaplanmalıdır.

Hiperelastik malzeme kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin, çelikler için gerçekleştirilen lineer analizlere göre daha uzun sürdüğü görülmüştür.

## KAYNAKLAR

**Anonim, 2009.** Ansys Workbench Users' Guide. Ansys, Inc., USA.

**Anonim, 2012.** İzmir Atatürk Organize Sanayi Bölgesi Proje ve İş Geliştirme Birimi, 2012. Haber Dergisi Mayıs 2012, İzmir.

**Anonim, 2013.** Kauçuk burç resimleri. [http://www.beksankaucuk.com.tr/titresim\\_sonum\\_leyici.htm](http://www.beksankaucuk.com.tr/titresim_sonum_leyici.htm) (Erişim tarihi: 30.09.2013).

**Anonim, 2013.** Kauçuk burç resimleri. <http://www.teknorot.com/content/blogcategory/49/225/lang,tr/> (Erişim tarihi: 30.09.2013).

**Anonim, 2013.** A critical View to Elastic and Plastic Technology Program. Düzce Üniversitesi Kaynaşlı Meslek Yüksekokulu Lastik ve Plastik Teknolojisi Programı, Düzce.

**Anonim, 2013.** Wolfram Mathematica 9 Documentation Center. <http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>

**Centeno, G.O.J. 2009.** Finite Element Modeling Of Rubber Bushing For Crash Simulation Experimental Tests and Validation. Master's Dissertation, Lund University, Department of Construction Sciences Structural Mechanics, Sweden.

**Erkek, S. 2007.** Karbon Siyahı/Yağ ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde EPDM, NBR ve SBR Elastomerlerinin Fiziko-Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Adana.

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

**Gent, A.N. 2001.** Engineering With Rubber. Hanser Gardner Publications Inc., Ohio,USA, 386 pp.

**Ito, S., Koishikura, T., Suzuki, D. 2010.** Modeling and Analysis Techniques for Suspension Rubber Bushings. Simulia Customer Conference, 2010.

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

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

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

**Paige, R.E. 2002.** FEA in the Design Process of Rubber Bushings. Abaqus Users' Conference, 2002.

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

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

**Vahapoğlu, V. 2006.** Kauçuk Türü Malzemeler II. Sentetik Kauçuk. *KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1): 44-55.



### EK1 DENEY TASARIMI TABLOSU

<b>t(mm)</b>	<b>D(mm)</b>	<b>x(mm)</b>	<b>F<sub>Analiz</sub>(N)</b>	<b>F<sub>DOE</sub>(N)</b>
8	40	0	0	-2976
8	40	0,05	1989	-27
8	40	0,10	3971	2754
8	40	0,18	6924	6628
8	40	0,28	10793	11287
8	40	0,38	14552	15433
8	40	0,48	18171	19148
8	40	0,58	21637	22516
8	40	0,68	24965	25627
8	40	0,78	28200	28575
8	40	0,88	31417	31461
8	40	0,98	34706	34389
8	40	1,08	38159	37471
8	40	1,18	41866	40820
8	40	1,28	45917	44559
8	40	1,38	50407	48811
8	40	1,48	55434	53707
8	40	1,58	61092	59383
8	40	1,68	64472	65980
8	40	1,78	74654	73643
8	40	1,88	82714	82522
8	40	1,94	88293	88759
8	40	2,00	94218	95571
8	44	0,00	0	-1787
8	44	0,05	2294	1051
8	44	0,10	4580	3754
8	44	0,18	7983	7573
8	44	0,28	12437	12269
8	44	0,38	16755	16579
8	44	0,48	20903	20580
8	44	0,58	24872	24354
8	44	0,68	28688	27987
8	44	0,78	32423	31571
8	44	0,88	36176	35202
8	44	0,98	40054	38984
8	44	1,08	44161	43023
8	44	1,18	48601	47431
8	44	1,28	53482	52326
8	44	1,38	58926	57830

8	44	1,48	65057	64069
8	44	1,58	71998	71178
8	44	1,68	79851	79293
8	44	1,78	88705	88557
8	44	1,88	98636	99117
8	44	1,94	105510	106444
8	44	2,00	112780	114375
8	48	0,00	0	-1045
8	48	0,05	2604	1806
8	48	0,10	5197	4543
8	48	0,18	9056	8450
8	48	0,28	14101	13340
8	48	0,38	18981	17930
8	48	0,48	23657	22301
8	48	0,58	28126	26537
8	48	0,68	32434	30726
8	48	0,78	36681	34964
8	48	0,88	40993	39350
8	48	0,98	45495	43988
8	48	1,08	50303	48989
8	48	1,18	55535	54466
8	48	1,28	61318	60541
8	48	1,38	67791	67336
8	48	1,48	75098	74983
8	48	1,58	83377	83617
8	48	1,68	92740	93378
8	48	1,78	103280	104410
8	48	1,88	115090	116865
8	48	1,94	123230	125440
8	48	2,00	131850	134670
8	52	0,00	0	-486
8	52	0,05	2913	2486
8	52	0,10	5815	5351
8	52	0,18	10132	9469
8	52	0,28	15768	14675
8	52	0,38	21209	19634
8	52	0,48	26414	24430
8	52	0,58	31389	29158
8	52	0,68	36207	33914
8	52	0,78	41003	38801
8	52	0,88	45930	43926
8	52	0,98	51123	49403

8	52	1,08	56705	55348
8	52	1,18	62803	61885
8	52	1,28	69563	69141
8	52	1,38	77154	77250
8	52	1,48	85745	86350
8	52	1,58	95493	96583
8	52	1,68	106520	108098
8	52	1,78	118920	121048
8	52	1,88	132760	135592
8	52	1,94	142290	145563
8	52	2,00	152350	156261
8	56	0,00	0	152
8	56	0,05	3228	3335
8	56	0,10	6442	6408
8	56	0,18	11221	10833
8	56	0,28	17452	16452
8	56	0,38	23454	21836
8	56	0,48	29186	27088
8	56	0,58	34667	32311
8	56	0,68	40005	37619
8	56	0,78	45373	43125
8	56	0,88	50948	48953
8	56	0,98	56878	55226
8	56	1,08	63290	62078
8	56	1,18	70318	69645
8	56	1,28	78127	78066
8	56	1,38	86906	87490
8	56	1,48	96846	98068
8	56	1,58	108110	109956
8	56	1,68	120840	123316
8	56	1,78	135120	138315
8	56	1,88	151020	155124
8	56	1,94	161940	166628
8	56	2,00	173430	178953
10	40	0,00	0	3536
10	40	0,05	1966	5713
10	40	0,10	3925	7822
10	40	0,18	6842	10867
10	40	0,28	10658	14716
10	40	0,38	14355	18347
10	40	0,48	17905	21792
10	40	0,58	21298	25084

10	40	0,68	24559	28264
10	40	0,78	27750	31376
10	40	0,88	30957	34472
10	40	0,98	34270	37607
10	40	1,08	37768	40840
10	40	1,18	41527	44238
10	40	1,28	45615	47871
10	40	1,38	50107	51814
10	40	1,48	55083	56149
10	40	1,58	60640	60961
10	40	1,68	66903	66340
10	40	1,78	74030	72384
10	40	1,88	82200	79193
10	40	1,94	87942	83883
10	40	2,00	94171	88941
10	44	0,00	0	4417
10	44	0,05	2280	6613
10	44	0,10	4552	8764
10	44	0,18	7935	11906
10	44	0,28	12362	15955
10	44	0,38	16652	19863
10	44	0,48	20772	23657
10	44	0,58	24712	27370
10	44	0,68	28498	31039
10	44	0,78	32201	34708
10	44	0,88	35924	38423
10	44	0,98	39779	42238
10	44	1,08	43876	46211
10	44	1,18	48323	50405
10	44	1,28	53230	54887
10	44	1,38	58711	59732
10	44	1,48	64879	65016
10	44	1,58	71842	70825
10	44	1,68	79686	77244
10	44	1,78	88485	84370
10	44	1,88	98308	92299
10	44	1,94	105070	97709
10	44	2,00	112230	103500
10	48	0,00	0	4850
10	48	0,05	2585	7198
10	48	0,10	5160	9504
10	48	0,18	8991	12892

10	48	0,28	14000	17292
10	48	0,38	18844	21581
10	48	0,48	23486	25791
10	48	0,58	27922	29958
10	48	0,68	32199	34123
10	48	0,78	36417	38332
10	48	0,88	40705	42639
10	48	0,98	45189	47098
10	48	1,08	49990	51771
10	48	1,18	55229	56727
10	48	1,28	61035	62035
10	48	1,38	67546	67774
10	48	1,48	74900	74026
10	48	1,58	83224	80877
10	48	1,68	92614	88419
10	48	1,78	103140	96751
10	48	1,88	114880	105973
10	48	1,94	122950	112238
10	48	2,00	131460	118919
10	52	0,00	0	5101
10	52	0,05	2890	7707
10	52	0,10	5769	10264
10	52	0,18	10051	14015
10	52	0,28	15643	18881
10	52	0,38	21041	23623
10	52	0,48	26206	28284
10	52	0,58	31142	32910
10	52	0,68	35922	37552
10	52	0,78	40677	42266
10	52	0,88	45563	47114
10	52	0,98	50717	52163
10	52	1,08	56267	57483
10	52	1,18	62342	63152
10	52	1,28	69088	69251
10	52	1,38	76660	75867
10	52	1,48	85213	83093
10	52	1,58	94881	91024
10	52	1,68	105760	99764
10	52	1,78	117930	109418
10	52	1,88	131460	120101
10	52	1,94	140740	127351
10	52	2,00	150510	135077

10	56	0,05	3192	8382
10	56	0,10	6371	11264
10	56	0,18	11098	15465
10	56	0,28	17265	20874
10	56	0,38	23210	26108
10	56	0,48	28891	31226
10	56	0,58	34325	36290
10	56	0,68	39614	41365
10	56	0,78	44925	46525
10	56	0,88	50437	51846
10	56	0,98	56299	57411
10	56	1,08	62647	63308
10	56	1,18	69621	69628
10	56	1,28	77384	76470
10	56	1,38	86112	83935
10	56	1,48	95978	92132
10	56	1,58	107130	101173
10	56	1,68	119650	111176
10	56	1,78	133640	122264
10	56	1,88	149150	134565
10	56	1,94	159760	142928
10	56	2,00	170920	151850
12	40	0,00	0	-8659
12	40	0,05	761	-7604
12	40	0,10	1521	-6552
12	40	0,18	2660	-4986
12	40	0,28	4171	-2929
12	40	0,38	5671	-918
12	40	0,48	7155	1039
12	40	0,58	8620	2941
12	40	0,68	10062	4793
12	40	0,78	11478	6601
12	40	0,88	12867	8381
12	40	0,98	14227	10151
12	40	1,08	15559	11934
12	40	1,18	16863	13760
12	40	1,28	18145	15662
12	40	1,38	19409	17680
12	40	1,48	20663	19858
12	40	1,58	21916	22245
12	40	1,68	23177	24895
12	40	1,78	24454	27867

12	40	1,88	25756	31227
12	40	1,94	26587	33554
12	40	2,00	27431	36077
12	44	0,00	0	-8087
12	44	0,05	866	-6977
12	44	0,10	1732	-5861
12	44	0,18	3027	-4183
12	44	0,28	4746	-1948
12	44	0,38	6451	270
12	44	0,48	8137	2464
12	44	0,58	9799	4628
12	44	0,68	11433	6765
12	44	0,78	13037	8880
12	44	0,88	14607	10984
12	44	0,98	16143	13096
12	44	1,08	17646	15234
12	44	1,18	19120	17427
12	44	1,28	20570	19706
12	44	1,38	22004	22108
12	44	1,48	23433	24674
12	44	1,58	24866	27452
12	44	1,68	26314	30493
12	44	1,78	27787	33854
12	44	1,88	29294	37598
12	44	1,94	30260	40162
12	44	2,00	31243	42919
12	48	0,00	0	-7962
12	48	0,05	973	-6673
12	48	0,10	1946	-5385
12	48	0,18	3401	-3459
12	48	0,28	5331	-914
12	48	0,38	7245	1598
12	48	0,48	9135	4072
12	48	0,58	10997	6508
12	48	0,68	12826	8910
12	48	0,78	14619	11290
12	48	0,88	16372	13663
12	48	0,98	18086	16049
12	48	1,08	19764	18474
12	48	1,18	21410	20969
12	48	1,28	23035	23569
12	48	1,38	24647	26315

12	48	1,48	26260	29253
12	48	1,58	27885	32435
12	48	1,68	29534	35915
12	48	1,78	31218	39756
12	48	1,88	32948	44023
12	48	1,94	34059	46937
12	48	2,00	35194	50065
12	52	0,00	0	-8021
12	52	0,05	1081	-6456
12	52	0,10	2161	-4913
12	52	0,18	3778	-2641
12	52	0,28	5921	307
12	52	0,38	8044	3161
12	52	0,48	10140	5927
12	52	0,58	12203	8616
12	52	0,68	14227	11243
12	52	0,78	16208	13829
12	52	0,88	18144	16398
12	52	0,98	20036	18983
12	52	1,08	21889	21618
12	52	1,18	23710	24345
12	52	1,28	25512	27209
12	52	1,38	27307	30262
12	52	1,48	29110	33559
12	52	1,58	30934	37161
12	52	1,68	32793	41136
12	52	1,78	34697	45554
12	52	1,88	36660	50491
12	52	1,94	37925	53877
12	52	2,00	39219	57518
12	56	0,00	0	-8000
12	56	0,05	1189	-6091
12	56	0,10	2377	-4236
12	56	0,18	4155	-1554
12	56	0,28	6512	1843
12	56	0,38	8845	5051
12	56	0,48	11146	8091
12	56	0,58	13409	10989
12	56	0,68	15626	13776
12	56	0,78	17795	16490
12	56	0,88	19912	19172
12	56	0,98	21982	21868



12	56	1,08	24010	24630
12	56	1,18	26007	27515
12	56	1,28	27989	30585
12	56	1,38	29972	33907
12	56	1,48	31972	37553
12	56	1,58	34003	41599
12	56	1,68	36078	46129
12	56	1,78	38211	51230
12	56	1,88	40417	56993
12	56	1,94	41841	60974
12	56	2,00	43301	65278
14	40	0,00	0	6027
14	40	0,05	540	6178
14	40	0,10	1080	6366
14	40	0,18	1889	6710
14	40	0,28	2965	7253
14	40	0,38	4036	7862
14	40	0,48	5101	8504
14	40	0,58	6158	9153
14	40	0,68	7206	9787
14	40	0,78	8242	10390
14	40	0,88	9267	10952
14	40	0,98	10279	11465
14	40	1,08	11277	11930
14	40	1,18	12261	12349
14	40	1,28	13232	12732
14	40	1,38	14189	13094
14	40	1,48	15133	13452
14	40	1,58	16067	13833
14	40	1,68	16993	14265
14	40	1,78	17912	14783
14	40	1,88	18828	15425
14	40	1,94	19402	15910
14	40	2,00	19976	16474
14	44	0,00	0	6290
14	44	0,05	611	6483
14	44	0,10	1221	6717
14	44	0,18	2136	7135
14	44	0,28	3352	7785
14	44	0,38	4563	8507
14	44	0,48	5766	9265
14	44	0,58	6959	10031

14	44	0,68	8141	10779
14	44	0,78	9310	11490
14	44	0,88	10465	12151
14	44	0,98	11605	12751
14	44	1,08	12728	13287
14	44	1,18	13836	13759
14	44	1,28	14928	14173
14	44	1,38	16005	14541
14	44	1,48	17069	14879
14	44	1,58	18121	15208
14	44	1,68	19166	15553
14	44	1,78	20206	15948
14	44	1,88	21244	16427
14	44	1,94	21895	16788
14	44	2,00	22547	17209
14	48	0,00	0	6107
14	48	0,05	682	6445
14	48	0,10	1364	6814
14	48	0,18	2386	7414
14	48	0,28	3744	8274
14	48	0,38	5095	9169
14	48	0,48	6437	10068
14	48	0,58	7768	10942
14	48	0,68	9085	11772
14	48	0,78	10387	12540
14	48	0,88	11672	13235
14	48	0,98	12939	13851
14	48	1,08	14187	14385
14	48	1,18	15417	14843
14	48	1,28	16630	15232
14	48	1,38	17826	15567
14	48	1,48	19008	15867
14	48	1,58	20180	16155
14	48	1,68	21344	16461
14	48	1,78	22506	16820
14	48	1,88	23668	17270
14	48	1,94	24399	17617
14	48	2,00	25131	18029
14	52	0,00	0	5739
14	52	0,05	754	6293
14	52	0,10	1507	6855
14	52	0,18	2636	7705

14	52	0,28	4136	8830
14	52	0,38	5628	9919
14	52	0,48	7110	10949
14	52	0,58	8578	11901
14	52	0,68	10031	12762
14	52	0,78	11465	13524
14	52	0,88	12880	14184
14	52	0,98	14275	14743
14	52	1,08	15649	15209
14	52	1,18	17002	15593
14	52	1,28	18336	15913
14	52	1,38	19653	16191
14	52	1,48	20957	16455
14	52	1,58	22251	16736
14	52	1,68	23540	17073
14	52	1,78	24828	17507
14	52	1,88	26120	18087
14	52	1,94	26934	18546
14	52	2,00	27750	19097
14	56	0,00	0	5451
14	56	0,05	825	6257
14	56	0,10	1650	7040
14	56	0,18	2885	8165
14	56	0,28	4526	9561
14	56	0,38	6158	10824
14	56	0,48	7778	11945
14	56	0,58	9382	12918
14	56	0,68	10968	13742
14	56	0,78	12533	14424
14	56	0,88	14075	14973
14	56	0,98	15595	15404
14	56	1,08	17090	15738
14	56	1,18	18563	16000
14	56	1,28	20014	16220
14	56	1,38	21449	16434
14	56	1,48	22869	16683
14	56	1,58	24281	17012
14	56	1,68	25690	17471
14	56	1,78	27101	18118
14	56	1,88	28520	19012
14	56	1,94	29414	19725
14	56	2,00	30313	20578

16	40	0,00	0	-117
16	40	0,05	405	-91
16	40	0,10	809	11
16	40	0,18	1416	290
16	40	0,28	2223	862
16	40	0,38	3028	1614
16	40	0,48	3831	2501
16	40	0,58	4629	3481
16	40	0,68	5424	4519
16	40	0,78	6213	5584
16	40	0,88	6997	6649
16	40	0,98	7774	7695
16	40	1,08	8545	8705
16	40	1,18	9308	9668
16	40	1,28	10064	10579
16	40	1,38	10812	11438
16	40	1,48	11551	12250
16	40	1,58	12284	13023
16	40	1,68	13008	13773
16	40	1,78	13725	14519
16	40	1,88	14436	15287
16	40	1,94	14877	15790
16	40	2,00	15317	16323
16	44	0,00	0	-162
16	44	0,05	454	-106
16	44	0,10	909	35
16	44	0,18	1590	387
16	44	0,28	2496	1080
16	44	0,38	3400	1977
16	44	0,48	4301	3025
16	44	0,58	5197	4179
16	44	0,68	6088	5397
16	44	0,78	6973	6643
16	44	0,88	7851	7886
16	44	0,98	8722	9099
16	44	1,08	9585	10262
16	44	1,18	10439	11358
16	44	1,28	11284	12377
16	44	1,38	12120	13313
16	44	1,48	12947	14165
16	44	1,58	13765	14937
16	44	1,68	14574	15640

16	44	1,78	15376	16286
16	44	1,88	16171	16897
16	44	1,94	16665	17271
16	44	2,00	17157	17648
16	48	0,00	0	-655
16	48	0,05	504	-501
16	48	0,10	1009	-264
16	48	0,18	1766	230
16	48	0,28	2773	1107
16	48	0,38	3777	2181
16	48	0,48	4776	3400
16	48	0,58	5771	4718
16	48	0,68	6759	6091
16	48	0,78	7740	7485
16	48	0,88	8713	8866
16	48	0,98	9677	10209
16	48	1,08	10632	11491
16	48	1,18	11576	12697
16	48	1,28	12510	13814
16	48	1,38	13434	14837
16	48	1,48	14347	15765
16	48	1,58	15250	16600
16	48	1,68	16144	17353
16	48	1,78	17030	18037
16	48	1,88	17910	18671
16	48	1,94	18457	19052
16	48	2,00	19002	19430
16	52	0,00	0	-1331
16	52	0,05	555	-1052
16	52	0,10	1110	-698
16	52	0,18	1941	-42
16	52	0,28	3048	1027
16	52	0,38	4151	2270
16	52	0,48	5249	3639
16	52	0,58	6341	5089
16	52	0,68	7426	6583
16	52	0,78	8503	8087
16	52	0,88	9570	9574
16	52	0,98	10628	11020
16	52	1,08	11674	12407
16	52	1,18	12709	13723
16	52	1,28	13732	14960

16	52	1,38	14743	16114
16	52	1,48	15743	17188
16	52	1,58	16731	18190
16	52	1,68	17710	19132
16	52	1,78	18680	20032
16	52	1,88	19643	20912
16	52	1,94	20243	21464
16	52	2,00	20840	22027
16	56	0,00	0	-1927
16	56	0,05	606	-1536
16	56	0,10	1211	-1080
16	56	0,18	2118	-290
16	56	0,28	3326	926
16	56	0,38	4529	2288
16	56	0,48	5727	3753
16	56	0,58	6918	5285
16	56	0,68	8100	6852
16	56	0,78	9273	8428
16	56	0,88	10436	9992
16	56	0,98	11586	11528
16	56	1,08	12725	13025
16	56	1,18	13850	14476
16	56	1,28	14962	15881
16	56	1,38	16061	17244
16	56	1,48	17148	18574
16	56	1,58	18222	19885
16	56	1,68	19287	21196
16	56	1,78	20342	22533
16	56	1,88	21391	23925
16	56	1,94	22045	24837
16	56	2,00	22697	25794

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Caner GÜVEN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bulanık / 30.12.1986  
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Gemlik Celal Bayar Anadolu Lisesi (2001-2005)  
Lisans : İstanbul Üniversitesi Makine Müh. (2005-2009)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Makine Müh. (2010-Halen)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Rollmech Automotive (Haziran 2013 - Halen)  
Kırpart Otomotiv (Aralık 2011 – Haziran 2013)  
Figes Mühendislik (Temmuz 2010 –Aralık 2011)

İletişim (e-posta) : gvncnr@gmail.com