



**T.C.**  
**Uludağ Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**ARAÇ AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE SIZDIRMAZLIK  
CONTASI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

**ÖNDER YÜCEL**

**Yüksek Lisans Tezi**



ARAÇ AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE SIZDIRMAZLIK  
CONTASI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

ÖNDER YÜCEL



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE SIZDIRMAZLIK  
CONTASI TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

**Önder YÜCEL**

Prof. Dr. Necmettin KAYA

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2018

## TEZ ONAYI

Önder YÜCEL tarafından hazırlanan "Araç Aydınlatma Sistemlerinde Sızdırmazlık Contası Tasarımı ve Optimizasyonu" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliğiyle ~~çokluğu~~ ile 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  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Erol SOLMAZ  
Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Mühendisliği Bölümü  
Taşıt Tasarımı Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Erdem UZUNSOY  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

2...5.1.2018

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

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

**beyan ederim.**

.../.../...

Önder YÜCEL

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## ARAÇ AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE SIZDIRMAZLIK CONTASI TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

**Önder YÜCEL**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Kauçuk malzeme türlerinden EPDM esaslı elastomerler elastisite ve sızdırmazlık gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada MS403 ya da 76-0 ticari isimleri ile EPDM ailesinde bulunan kauçuk malzemeden imal edilen conta sızdırmazlık açısından incelenmiştir. Otomotiv aydınlatma sistemlerinde arka stop lambalarında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan conta, ilişkili olduğu conta kanalı ve üzerine baskı yapan feder parçası ile birlikte tanımlanan parametreler ve sınır şartlar altında deneylere, sonlu elemanlar ile analize ve deneysel tasarım çalışmalarına tabi tutulmuştur.

Sızdırmazlık kalitesinin federin contaya basması sonucu, feder-counta arasındaki yüzeyde oluşan basınç değeri ile ölçüldüğü bu çalışmada; Mullin etkisinin de dikkate alındığı çekme deneyi ile elde edilen veriler malzeme karakterizasyonunda ve sonrasında non-lineer statik sonlu elemanlar analizlerinde kullanılarak en uygun tasarım bulunmaya çalışılmıştır. Abaqus yazılımı ile yapılan toplam 27 simülasyonda tüm 3 ana parametrenin (kanalın iç açısı, federin kalınlığı ve federin conta içine gömülme miktarı) ve bunların her birine bağlı 3' er farklı alt seviyenin tamamının dikkate alınması ile tam faktöryel deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır.

Analizlerden elde edilen sonuçlar, yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon çalışmalarında kullanılmış; sızdırmazlık problemi, Matlab yazılımında lineer ve non-lineer regresyon modelleri kullanılarak bulunan fonsiyonlar ile formüle edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Stop lambası, sızdırmazlık, EPDM kauçuk, malzeme karakterizasyonu, Mullin Etkisi, Abaqus non-lineer sonlu elemanlar analizi, tam faktöryel deneysel tasarım, yanıt yüzey yöntemi, Matlab, optimizasyon.

## ABSTRACT

MSc. Thesis

### MECHANICAL DESIGN AND OPTIMIZATION STUDY OF SEALING GASKETS IN AUTOMOTIVE LIGHTING SYSTEMS

**Önder YÜCEL**

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor: Prof. Dr. Necmettin KAYA**

EPDM based elastomers are widely used in the automotive industry because of their good physical and mechanical properties such as elasticity and tightness. In this study, gasket made from EPDM rubber material called as MS403 or 76-0 was examined in terms of sealing. The sealing gasket, which is used in the rear lamps in automotive lighting systems, has been analyzed with finite element methods and experimental design studies within defined parameters and boundary conditions together with its channel on bulbholder and pressing rib on housing components.

In this study, it was aimed to measure the sealing quality by the pressure generated on the surface between the feder and the gasket. The most suitable design was tried to be found by analyzing the material characterization data, obtained by the tensile test which takes the Mullins effect into account, where is being also used in nonlinear static finite element analysis. A full factorial experimental design method has been applied for 27 simulations run via Abaqus software by taking 3 main parameters in consideration (draft angle of channel, feder thickness and penetration of feder through gasket) in 3 different sub-levels.

The results were used in optimization studies with response surface method; the sealing problem is formulated in general empirical expressions which were found out via Matlab software in linear and nonlinear regression models.

**Keywords:** Rearlamp, sealing, EPDM rubber, material chracterization, Mullins Effect, Abaqus non-linear static analysis, full factorial exprimental design, response surface method, Matlab, optimization.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimiimde ve tez çalışmalarımııda bana her zaman destek ve rehber olan çok değerli hocam Prof. Dr. Necmettin KAYA' ya, çalışmada malzeme deneylerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Mako A.Ő. çalışanı BarıŐ EDİZ'e, optimizasyon çalışmalarına yaptığı değerli katkılardan dolayı Bosch A.Ő. çalışanı Tolga CANGAR'a ve son olarak bu süreçte her zaman yanımda destekçim olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



Önder YÜCEL

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



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	4
2.1. Kauçuk Malzemeler .....	4
2.1.1. Doğal Kauçuk.....	5
2.1.2. Sentetik Kauçuk Malzemeler .....	6
2.2. Kauçuk Malzemelerin Karakterizasyonu ve Deney Yöntemleri .....	15
2.2.1. Tipik elastomer malzeme deneyleri .....	15
2.2.2. Numune hazırlık.....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	23
3.1. Çekme Deneyi.....	23
3.1.1. Mullin etkisi .....	25
3.1.2. Çekme deneyi çıktıları .....	26
3.1.3. Malzeme potansiyel enerji formları .....	34
3.2. Deney Tasarımı için Parametreler ve Yöntem .....	38
3.2.1. 3D CAD modeller .....	41
3.2.2. Deney tasarımı .....	44
3.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz.....	55
3.3.1. Abaqus ile non-linear analiz yönteminde süreçler .....	57
3.3.2. EPDM conta malzemesinin non-linear statik analizi .....	57
4. BULGULAR .....	64
4.1. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Sonuçları .....	64
4.2. Lineer Regresyon Modeli.....	67
4.3. İkinci Dereceden Polinomial Non-Linear Regresyon Modeli .....	69
4.4. N' nci Dereceden Polinomial Non-Linear Regresyon Modeli.....	71
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	73
KAYNAKLAR .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

### Açıklama

$\sigma$	: Gerilim direnci
$\varepsilon$	: Birim şekil değiştirme, uzama oranı
E	: Elastisite modülü
A	: Uzama sonunda oluşan kesit alanı (mm <sup>2</sup> )
A <sub>0</sub>	: İlk kesit alanı (mm <sup>2</sup> )
$\Delta L$	: Boydaki değişim oranı
L	: Çekmede numunenin son boyu
L <sub>0</sub>	: Çekmede numunenin ilk boyu
F <sub>n</sub>	: Nominal kuvvet
X <sub>1</sub>	: Feder kalınlığı
X <sub>2</sub>	: Kanal açısı
X <sub>3</sub>	: Federin conta içerisinde düşey ekseninde yer değiştirmesi
R	: Yarıçap
U	: Birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi
$\lambda_i$	: Başlıca uzamalar
N	: Bir malzeme parametresi
$\mu_i, \alpha_i, D_i$	: Sıcaklığa bağlı malzeme parametreleri
$\mu_o$	: Ön kayma katsayısı
K <sub>o</sub>	: Hacimsel basınç katsayısı

### Kısaltmalar

### Açıklama

LED	: Light emitted diod
OEM	: Original equipment manufacturer (Orjinal ekipman üreticisi)
3D	: 3 dimensional (boyutlu)
SBR	: Stiren butadien kauçuk
BR	: Butadien kauçuk
IIR	: Butil kauçuk
EPM	: Etilen propilen kauçuk
EPDM	: Etilen propilen dien monomer kauçuk
IR	: İzopren kauçuk
CR	: Kloropren kauçuk
NBR	: Akrilonitril butadien kauçuk
PTR	: Polisülfid kauçuk
GR	: Government rubber
CAD	: Computer aided design (Bilgisayar destekli tasarım)
ANOVA	: Varyasyon analizi
S/N	: Signal/ noise (Sinyal/ gürültü)
CYY	: Cevap yüzeyi yöntemi
FEM	: Finite element method (Sonlu elemanlar yöntemi)
MPa	: Mega paskal
CH <sub>2</sub>	: Metilen
psi	: Pounds per square inch (pound/mm <sup>2</sup> : basınç ölçü birimi)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Deney türleri ve oluşan gerilme-şekil değirtirme eğrileri.....	15
Şekil 2.2. Basit çekme deneyi kaşık numune taslağı (specimen).....	15
Şekil 2.3. Lazer ekstansometresi ve optik camı ile birlikte basit çekme deney cihazı ...	16
Şekil 2.4. Düzlemsel çekme numunesi taslağı.....	16
Şekil 2.5. Lazer ekstansometresi ile donatılmış düzlemsel çekme (saf kesme) cihazı ...	17
Şekil 2.6. Eşit iki eksenli çekme deney numunesi ve çekme deney cihazı.....	17
Şekil 2.7. Hacimsel sıkıştırma deney cihazı.....	18
Şekil 2.8. Basit sıkıştırma deney cihazı .....	18
Şekil 2.9. Levhalardan çıkarılan numune şekilleri.....	19
Şekil 2.10. Yığın malzemeden kauçuk levha oluşturmaya yarayan dilimleme sistemi ..	19
Şekil 3.1. Testlerde kullanılan MS403 EPDM spesimenler (kaşık numune).....	20
Şekil 3.2. Çekme deneyinde kullanılan cihaz, AUTOGRAPH 5kN.....	21
Şekil 3.3. Çekme deneyi sonrası kopan numune.....	21
Şekil 3.4. Dolgulu kauçuklarda Mullin etkisi sonucu gerilme-şekil değıştirme eğrileri	22
Şekil 3.5. Mullin etkisi olmadan mühendislik gerilme-şekil değıştirme grafiğı.....	25
Şekil 3.6. Mullin etkisi olmadan gerçek gerilme-şekil değıştirme grafiğı.....	25
Şekil 3.7. Mullin etkisi altında oluşan mühendislik gerilme-şekil değıştirme grafiğı ....	28
Şekil 3.8. Mullin etkisi altında oluşan gerçek gerilme-şekil değıştirme grafiğı .....	28
Şekil 3.9. Mullin etkisi olmadan ve dikkate alınarak çıkan grafiklerin karşılaştırılması	29
Şekil 3.10. Mooney–Rivlin formu Abaqus sonuç ekranı.....	31
Şekil 3.11. Ogden N=2 formu Abaqus sonuç ekranı .....	31
Şekil 3.12. Tüm enerji potansiyellerinin ve deney verisinin karşılaştırmalı eğrileri .....	32
Şekil 3.13. Ogden N=2 ve deney verisinin karşılaştırmalı eğrileri .....	32
Şekil 3.14. Deneylerde kullanılan elemanlar; conta, kanal ve federin CAD modelleri ..	33
Şekil 3.15. Deneylerde kullanılan elemanlar; conta, kanal ve federin 3D kesiti .....	33
Şekil 3.16. Model no.1 isometrik görünüş ve teknik resim .....	35
Şekil 3.17. Model no.2 isometrik görünüş ve teknik resim .....	36
Şekil 3.18. Model no.3 isometrik görünüş ve teknik resim .....	36
Şekil 3.19. Model no 4 isometrik görünüş ve teknik resim .....	36
Şekil 3.20. Model no.5 isometrik görünüş ve teknik resim .....	37
Şekil 3.21. Model no.6 isometrik görünüş ve teknik resim .....	37
Şekil 3.22. Model no.7 isometrik görünüş ve teknik resim .....	37
Şekil 3.23. Model no.8 isometrik görünüş ve teknik resim .....	38
Şekil 3.24. Model no.9 isometrik görünüş ve teknik resim .....	38
Şekil 3.25. Bir sistem veya sürecin genel gösterimi .....	40
Şekil 3.26. Klasik yöntem ile yapılan deney tasarımı ve ölçümü .....	41
Şekil 3.27. Tek boyutlu, iki boyutlu üçgen ve dörtgen, üç boyutlu eleman örnekleri ....	50
Şekil 3.28. Kanal ve conta için sınır şartlar .....	52
Şekil 3.29. Feder için yer değıştirme sınır şartı .....	53
Şekil 3.30. C3D8H hex eleman tipi .....	53
Şekil 3.31. Elemanlara ayrılmış conta, feder ve kanal.....	54
Şekil 3.32. Elemanlara ayrılmış komple geometri.....	55
Şekil 4.1. Deney no. 1 basınç dağılımı ve oluşan maksimum basınç .....	56
Şekil 4.2. Deney no. 1 maksimum basınç bölgesi ve elemanlardaki deformasyon .....	57
Şekil 4.3. Deney no. 27 basınç dağılımı ve maksimum basınç.....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Sentetik kauçuk malzemelerinde ilkler.....	7
<b>Çizelge 3.1.</b> Deney cihazından alınan, Mullin etkisi olmadan yapılan test verileri.....	27
<b>Çizelge 3.2.</b> Mullin etkisi hesaba katılmadan bulunan mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri.....	29
<b>Çizelge 3.3.</b> Deney cihazından alınan, Mullin etkisi altında yapılan test verileri .....	31
<b>Çizelge 3.4.</b> Mullin etkisi altında bulunan mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri .....	32
<b>Çizelge 3.5.</b> Rasgele düzen için veri tablosu .....	48
<b>Çizelge 3.6.</b> Tam faktöryel deney tasarım tablosu.....	50
<b>Çizelge 3.7.</b> Çalışmada dikkate alınan tam faktöryel deney tasarım parametreleri.....	52
<b>Çizelge 4.1.</b> Tüm deneylerin özet tablosu.....	66
<b>Çizelge 4.2.</b> Lineer regresyon modelinde bulunan katsayılar.....	67
<b>Çizelge 4.3.</b> Simülasyon ile lineer regresyon modelinin karşılaştırılması.....	68
<b>Çizelge 4.4.</b> İkinci derece non-lineer regresyon modelinde bulunan katsayılar .....	69
<b>Çizelge 4.5.</b> Simülasyon ile 2. derece polinomyal non-lineer regresyon modelinin karşılaştırılması .....	70
<b>Çizelge 4.6.</b> N' nci derece non-lineer regresyon modelinde bulunan katsayılar .....	71
<b>Çizelge 4.7.</b> Simülasyon ile N' nci derece polinomyal non-lineer regresyon modelinin karşılaştırılması .....	72

## 1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv sanayiinde gelişen teknoloji ile birlikte üretilen mamüllerin kalite sınırları da genişlemekte, uygulanan standartlar her gün değişmektedir. Bugün araçlar üzerinde bulunan her bir parçanın araç üzerine takılmadan önce sayısız testi gerçekleştirilmekte, ürünlere, 'validasyon' olarak ifade edilen onay süreci tamamlanıp seri imalata uygun oldukları tescillendikten sonra kullanım serbestisi verilmektedir.

Araçlar üzerinde bulunan yüzlerce parça içerisinde dış aydınlatma fonksiyonunu gören temelde iki farklı ürün mevcuttur. Bunlar, ön aydınlatma (far) ve arka aydınlatma (stop lambaları) olarak iki farklı grup altında incelenebilir. Her ikisinin de ana fonksiyonu, yasalar ile belirlenmiş sınırlar içerisinde fotometrik olarak görünme ve görme görevlerini yerine getirmektir. Bu işlevler sağlanırken, görünen ve arka planda çalışan birçok alt sistem bulunmaktadır. Bu sistemlerin birlikte çalışması için komple ürün ve yarı mamül ürünlerin çeşitli kalite testlerinden geçerek yeterli performansı göstermesi gerek ve yeter şarttır. Bu çalışmada, arka aydınlatma grubunda bulunan komponentlerden; stop lambasının taşıyıcı gövdesi üzerinde bulunan feder, ampülleri taşıyan parça üzerindeki conta kanalı ve bunun içerisine giren conta arasındaki sızdırmazlık ilişkisi incelenecektir.

Aracın ömür testleri düşünüldüğünde sızdırmazlık şartı teknik açıdan önem verilen çok kritik bir parametredir. Araç üreticileri tasarladıkları ve ürettikleri ürünlerin belli ölçütlerde akışkan, sıvı ya da hava ve yahut ışık geçirgenliğini ölçmek için çeşitli yöntemler kullanabilirler. Çalışmada kastedilen sızdırmazlık ilişkisi sıvı akışkan maddeler için dikkate alınacak türde problemler içindir.

Arka aydınlatma ürünlerinde bir akışkanın bir yerden başka bir yere doğru nüfuz etmesi sonucu istenmeyen birçok durum meydana gelebilir. Bunlar ürünün çalışmasını ya da fonksiyonunu tam olarak yerine getirmesini engelleyebilir. Örnek olarak su sızdırması sonucu ürünün içerisinde bulunan elektrik aksamın kısa devre yapıp ampül ya da LED'lerin çalışmaması, ürün içerisinde istenmeyen kondense (buğu) neden olması hatta araç için en tehlikelisi sayılabilecek yangına neden olması yanında yağ veya kimyasal kaçağı sonucu ürünün içerisindeki ekipmanın gerek estetik gerekse fonksiyonel olarak zarar

görmesi; erimesi, komponentlerin bağlantı yerlerinin kopması sonucu ana fonksiyonların yerine getirilememesi yanında ses problemi yaşanmasına neden olabilir.

Tüm bu olumsuz şartları engellemek için çeşitli sızdırmazlık testleri geliştirilmiş ve ürün araca takılmadan önce bu testlere maruz bırakılmıştır. Burada sıklıkla tercih edilen yöntem, aydınlatma ürününün arka kısmında bulunan boşluklardan ki bunlar genelde ventilasyon (havalandırma) için bırakılan ve kondens oluşmaması için düşünülen deliklerdir; belli bar basınçta (müşteriden müşteriye değişkenlik gösterebilir ancak genelde 2 bar referans alınan optimum değerdir) hava vermek sureti ile herhangi bir yerden kaçak olup olmadığını özel kapalı havuzlarda tespit etme yöntemidir. Uygulanan bu test büyük oranda çoğu araç üreticisi tarafından geçer ve yeter bir şart olarak kabul edilebilir ancak bazı OEM firmaları araçlarının gerçek şartlarda sızdırmazlık kalitelerini daha iyi test etmek amaçlı olarak 'Karcher' olarak adlandırılan 18 bar basınç altında gerçekleştirilen farklı bir teste de tabi tutmaktadırlar. Bu test bir araç yıkama servisinde kullanılan basınçlı su uygulamasına çok benzer bir yöntemle yapılmaktadır ve sonucunda sızdırmazlık garanti edilmelidir. 18 bar değeri zorlu bir sınır şartıdır fakat bir aracın ve alt parçalarının da ömür testleri sonrasında fonksiyonlarını belli oranda yerine getirmesi düşünüldüğünde başarılması istenen bir test olarak karşılaşılmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın bir amacı; sızdırmazlık açısından ürünü en çok zorlayan testlerden biri olan Karcher Testi karşısında, ürün üzerindeki gövde federleri, ampül taşıyıcı kanalı ve conta tasarımında dikkate alınan parametreleri inceleyerek, hangi tasarımın 18 barlık sınır şartı karşısında nasıl bir davranış gösterdiğini ortaya koymaktır. Bu davranışlar incelenirken bahsi geçen parçalar 3D tasarım programlarında modellenip sonlu elemanlar analiz yöntemleri ile simüle edilmiştir. Toplamda 27 farklı durum için gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen analiz çıktılarından hareketle; tüm deneyleri kapsayan ve hatta ara değerler için de referans olacak genel bir formül geliştirmek, bunu belirli sınır değerler içerisinde geçerli olacak şekilde optimize etmek, çalışmanın bir diğer amacıdır.

Bu çalışmada üzerinde çok fazla durulan kritik komponent contadır. Conta hammaddesi olarak, ticari ismiyle MS403 (Mebant Firması) ya da 76-0 (Interep Firması) olarak bilinen EPDM esaslı kapalı gözenekli kauçuk elastomer kullanılmıştır. Mekanik ve fiziksel özellikleri bakımından sızdırmazlık şartı aranan problemler için çok uygun bir

malzemedir. Ürün geliştirme projelerinde bu özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Conta malzemesinin hiperelastik kabiliyeti, gövde federleri olarak adlandırılan komponent ile üzerinde farklı değerler için bası oluşturmaya imkan tanımaktadır. Deneysel tasarım çalışmasında dikkate alınan bir parametre de bu basıyı oluşturan federin conta içerisine olan penetrasyonudur. Yukarıda bahsi geçen 27 farklı durum; kanalın iç açısı, federin kalınlığı ve federin contaya penetrasyonunun her birinin üç alt değeri dikkate alınarak oluşturulmuş ve ileride daha detaylı bahsedilecek deneysel tasarım yöntemlerinden tam faktöryel tasarım yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm durumlar için genelleyici amprik ifadelerin bulunması ise yanıt yüzey optimizasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, 3D CAD modellerin oluşturulmasında Catia yazılımından, sonlu elamanlar ile analiz için non-lineer analiz problemlerinde sık kullanılan Abaqus' ten ve optimizasyon çalışmalarında formüllerin elde edilmesinde Matlab' tan yararlanılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kauçuk Malzemeler

Kauçuklar, endüstriyel alanda iyi mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde birçok kullanım alanına sahip elastomer grubuna ait malzemelerdir. Temelde doğal ve sentetik kauçuk olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilen kauçuk türünün birçok alt sentetik türevi de bulunmaktadır. Özellikle askeri ve otomotiv endüstrilerindeki gelişmeler, birçok sentetik kauçuk türünün bulunmasını sağlamıştır. Böylece, doğal kauçuğa nazaran daha az maliyetle elde edilebilen farklı sentetik türevler üretilmiştir.

Kauçuk, bazı tropik bitkilerin özütünden doğal olarak ya da petrol ve alkolün ilavesi ile elde edilen bir malzemedir. Kauçuk terim olarak, Hevea Brasiliensis ağacından elde edilen hammaddeyi ifade etmede kullanılmaktadır. Ancak günümüzde bu isim, uygulanan kuvvetin bırakılmasıyla malzemenin tekrar eski konumuna geri dönebilen malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Anonim 1989).

Kauçuk esaslı malzemeler, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleriyle günümüzün vazgeçilmez mühendislik malzemesi olmuşlardır. Amerika' nın keşfiyle başladığı kabul edilen kauçuk hakkında yapılan araştırmalar, aslında Aztek toplumu ile ilgili yapılan arkeolojik kazılarda, bu malzemenin çok daha önceki devirlerde bulunup kullanıldığını ortaya koymaktadır. 16. yüzyılın başlarında avrupalıların dünyaya tanıtmaya başladıkları kauçuk, ancak bundan üç asır sonra, 1900' lerin ortalarında T. Hancock, C. Goodyear ve C. Macintosh girişimcilerin keşifleriyle ve özel çabaları ile, günümüzün mühendislik alanının çok önemli malzemelerinden birisi olmuştur. Özellikle Charles Goodyear'ın 1840 yılında vulkanizasyon işlemini bulmasıyla kauçuğun soğukta sertleşmesi ve sıcakta yumuşayarak yapışkan hale gelmesi gibi olumsuz özellikleri giderilerek kauçuk alanında teknolojik çalışmaların başlamasına olanak sağlamıştır.

1845 yılında Rober William Thomson, pnömomatik lastikler için bir patent almıştır. Thomson' ın icadı; içi kauçuk ile kaplanmış, meşin gövdeli lastiğin hava ile doldurulmasına imkan sağlamaktaydı. Bu buluş maliyetli bir yatırım gerektirdiği için yarım asır boyunca pnömomatik lastikler üzerine yoğun çalışmalar yapılamamıştır. Yüzyılın sonlarına doğru bisiklete olan ilginin artması ile lastik tasarımı üzerine



çalışmalar yeniden hız kazanmıştır. 1888' de John Boyd Dunlop, bisiklet ve diğer araçlar, için pnömatik bir lastik üzerine patent almıştır. Ancak Dunlop' un bu çalışmada, Thomson' ın 1845 yılındaki patentli lastik prensibini kullandığı keşfedildikten sonra ana patenti elinden alınmıştır (<https://www.britannica.com/biography/Robert-William-Thomson>, 2018).

Kauçuk teknolojisindeki gelişmeler o yılların güçlü devletlerini doğal kauçuk yetiştiriciliği gerçekleştirilmesi fikrine yöneltmiş ve İngiltere başta olmak üzere, Avrupa'daki birçok devletin kendi egemenlikleri altındaki kolonilerde büyük kauçuk yetiştiriciliği (tarım arazisi) kurmalarına sebep olmuştur. Bu çalışmaların yanında, kurmuş oldukları çiftliklerde yetiştirdikleri Hevea kauçuk ağacından ayrı olarak, alternatif bitkilerin bulunması çalışmalarına da yönelmişlerdir.

Doğal kauçuğun tedarikinde diğer ülkelere olan bağımlılık, 1850' li yıllardan başlayarak kauçuğun sentetik olarak üretimini doğurmuştur. I. ve II. Dünya Savaşları esnasında doğal kauçuk üretim alanlarının ambargo altına alınması, Almanya, Rusya ve Amerika gibi ülkelerde, sentetik kauçuk üretim çalışmalarına ağırlık verilmesine neden olmuştur. Bugün kullanılan birçok sentetik kauçuk malzemesi, savaş yıllarındaki gerekliliklerden doğmuştur (Vahapoğlu 2007).

Günümüzde de kauçuk türü malzemeler birçok sanayi alanında mamül ve yarı mamül olarak kullanılmaktadır. Kauçuğun, ısıya dayanım ve sızdırmazlık özellikleri yanında, elastikliği ile rahat montaj özelliği sayesinde otomotivde; kapı cam fitilleri gibi sızdırmazlık ürünlerinde, silecekler, oto lastikleri ve darbe emici parçalar gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

Kauçuk esaslı malzemeler başta belirtildiği üzere doğal ve sentetik kauçuklar olarak iki ana başlıkta toplanmışlardır. Bu başlıklar ve alt türevlerine ait özellikler aşağıda verilmektedir.

### **2.1.1. Doğal Kauçuk**

Günümüzde doğal kauçuğun üretimi, Hevea Brasiliensis ağacının özütünden elde edilmektedir. Bu tip kauçuk hammaddesinin kaynağı olan ağaç, tropikal iklimde,

yağışın bol olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Dünya' da üretimin büyük bir çoğunluğu Asya kıtasından sağlanmaktadır.

Kullanma sıcaklık aralığı:  $-60^{\circ}\text{C}$ ' den  $+100^{\circ}\text{C}$ ' ye kadardır. Ortam dayanımı yönünden Stiren bütadien kauçuğu (SBR) ile benzer özellikler gösterir. Yüksek esneklik ve yüksek mekanik özellikler gerektiren yerlerde kullanılır. Bazı genel özellikleri;

- Yüksek derecede kopma mukavemeti
- Yüksek yırtılma mukavemeti
- Yüksek çig dirilik (mukavemeti)
- İyi dinamik özellikler
- Yüksek aşınma direnci
- Düşük kalıcı deformasyon değerleri
- Düşük sıcaklık direnci
- Yüksek elastikiyet

Doğal kauçuğun %66' sı otomobil lastik üretiminde, diğer kısmı mekanik parça imalatında, ayakkabı tabanı, sünger, taşıyıcı bant, hortum, ve yapıştırıcı yapımında kullanılmaktadır (Soyel 2008).

### **2.1.2. Sentetik Kauçuk Malzemeler**

1900' lü yılların başından itibaren artan teknolojik gelişmeler, farklı teknolojik ürünlerin geliştirilmesini beraberinde getirmiştir. Gelişen bu durum, teknolojik ürünlerde kauçuk malzemelerin kullanılmasını da hızlandırmıştır. Artan kauçuk ihtiyacı ile birlikte doğal kauçuktaki üretiminin sınırlı ve sadece belirli ülkelerde olması yanında savaş yıllarının ihtiyaçları, bilim insanlarını yapay yollardan kauçuk üretimine sevk etmiştir. Kauçuk üründen beklenen kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerin sadece doğal kauçuk tarafından karşılanamaması farklı malzeme özelliklerine sahip sentetik kauçuk malzemelerin araştırılıp geliştirilmesine ve sonuç olarak yeni türlerde sentetik kauçukların bulunmasına sebep olmuştur.

Çalışmanın bu bölümünde bugünün teknolojisi ile en çok tüketilen, sırasıyla; Stiren bütadien kauçuğu (SBR), Bütadien kauçuğu (BR), Butil kauçuğu (IIR), Etilen propilen kauçuğu (EPM ve EPDM), İsoopren kauçuğu (IR), Kloropren kauçuğu (CR), Akrilonitril

bütadien kauçuğu (NBR) ve Polisülfid (PTR) türü sentetik kauçuklar incelenerek genel malzeme özellikleri hakkında bilgi verilmektedir. Kauçuk malzeme türleri için; ilk üretildiği yıl, ülke, bulan kişi ve firma bilgileri Çizelge 2.1.' de ayrıca sunulmuştur.

**Çizelge 2.1.** Sentetik kauçuk malzemelerinde ilkler (Vahapoğlu 2006).

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

## **Stiren bütadien kauçuğu (SBR)**

Government rubber-styrene olarak da isimlendirilen kauçuk türü günümüzde sanayide en çok kullanım alanı bulan kauçuk esaslı malzemedir. Dünya' da SBR üretimi 1960'lı yıllarda doğal kauçuk üretimini geçerek, günümüzde de iki katına ulaşmıştır. Almanya'da Interessengemeinschaft Farbenindustrie A.G. şirketi çalışanları; Walker Bock ve Eduard Tschunkur tarafından 1930 yılında geliştirilmiştir; Alman Patent Nr. 570, 980 (1933). Amerikan Esso ile Alman I.G. Farben firmaları arasında yapılan anlaşma gereğince; yeni bulunan ürüne ayrıca Amerikan patenti de alınmıştır; Amerikan Patent Nr. 1.81.731 (1933). 2. Dünya Savaşı sırasında, Amerika' daki üreticilerin kauçuk tedariki problemi, Tschunkur ve Bock' un patenti kullanarak aşılmıştır (Kauffman ve Seymour 1991).

Sıcak SBR kauçukları daha iyi renk tutma özelliği sebebiyle mekanik parçalarda daha çok kullanılmaktadır. Soğuk SBR kauçukları ise, sıcak SBR kauçuklarına göre daha iyi fiziksel özelliklere sahip olduğundan otomobil lastiklerinde kullanılmaktadır (Anonim 1961).

SBR kauçuk türü malzemeler genellikle doğal kauçuk yerine kullanılabilir. SBR kauçuk karışımları, doğal kauçuk türüne göre kolay ve kısa sürede gerçekleşir. Kalıp içerisinden daha kolay geçirilebilirler. Elastikiyet olarak doğal kauçuk kadar iyi değillerdir ancak ömür ve ısıya dayanım olarak doğal kauçuktan daha iyi özelliklere sahiptirler. Polar olmayan sıvılara, seyreltik asit ve bazlara karşı dayanıklıdır ancak yakıt ve yağlara karşı dayanımları düşüktür. Endüstride en fazla oto tekerleklerinde kullanılmaktadırlar. Bunun yanında V kayış, ayakkabı tabanları, elektrik yalıtım malzemesi, o-ring conta, fren, körük ve debriyaj balatası, şeffaf bantlar, yapıştırıcılar ve taşıyıcı bant malzemesi olarak kullanılmaktadır (Savran 2001). SBR kauçukları farklı firmalar tarafından Buna Hüls, Plioflex, Pliolite, Cariflex S ticari isimleri altında üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).

## **Bütadien kauçuk (BR)**

İlk kez üretimi 1930'larda yapılmıştır ancak sanayide kullanımı 1960' larda başlamıştır. Bütadien' in diğer senterik bir tür olan İsoopren' e göre daha kolay imal edilebilmesi ve

ucuz oluşu nedeniyle uzun yıllar boyunca bütadien türü kauçuk üzerine çalışılmıştır. Fakat mevcut katalizörler ile yapılan polimerizasyon neticesinde elde edilen kullanışlı bütadien tür kauçuk malzeme daha az kullanışlı bulunmuştur (Kauffman ve Seymour 1991). Spektroskopik polimerizasyonun geliştirilmesi ve alkali metallerin de katalizör olarak kullanımının gerçekleşmesi ile günümüzde kullanılan bütadien türü kauçuk malzemeler üretilmiştir.

Bütadien türü kauçukların kopma mukavemeti düşüktür. Bu sebeple doğal ve SBR kauçuklar ile birlikte kullanılırlar. Aşınma ve çatlama dayanımlarının gelişmiş olmasından dolayı oto lastik imalatında kullanılır. Camsı geçiş sıcaklığının düşük oluşu nedeniyle düşük sıcaklıklardaki elastik özellikleri de oldukça iyidir. Dinamik ısı oluşumu, doğal kauçuğa kıyasla daha düşüktür. Doğal ve SBR türü ile beraber kullanılması, düşük ısılardaki elastik kabiliyeti ve düşük ısı oluşumu özelliğinden dolayı avantaj sağlamaktadır. Bütadien kauçuğun, doğal ve SBR türü ile birlikte kullanılmasının diğer bir nedeni ise işlenme zorluğudur. Bu yolla karışımın karbon ve yağ oranı arttırılabilir. Bunun yanında ekstrüze edilebilme ya da diğer deyişle kalıpta ilerleme özellikleri iyileştirilebilir (Savran 2001).

BR tür kauçuk malzemelerin %90' ı oto lastik üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanında ayakkabı tabanları, hortum ve taşıyıcı bantların imalatı, aşınma mukavemetinin yüksek olmasının istendiği parçaların imalatında, yer döşemeleri ve golf toplarının üretimlerinde kullanılmaktadır. BR kauçukları farklı firmalar tarafından Budene, Buna CB, Amaripol CB, Diene, Trans 4, Cis 4, Duragen, Polysar, Tacktene ve E-Br ticari isimleri altında üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nadgi 1993).

### **Bütıl kauçuk (IIR)**

İsobütülen isopren ya da Government rubber-isobutylene olarak isimlendirilen butil kauçuk isobütülenin ve isopreninin kopolimerleridir. 1937 yılında Standard Oil Development firması çalışanlarından (Exxon) Robert M. Thomas ve arkadaşı William J. Sparks, yaptıkları deney sonucunda elde ettikleri doymamış isobütülen-isopren karışımının vulkanizasyonu sonucu butil kauçuk üretimi gerçekleştirmişlerdir (Kauffman ve Seymour 1991; Savran 2001).

Butil kauçuğun mukavemetini ve elastisite modülünü arttırmak maksadıyla karbon siyahı ve bazı farklı katkıları katılabilir (Anonim 1961). Butil kauçuğun en belirgin ve önemli parametrelerinden biri gaz geçirgenliğinin düşük olmasıdır. Neme ve havaya karşı dayanıklılığı çok yüksektir. Yüksek şok emme yeteneği yanında dielektrik özellikleri de yüksektir. Isıl dayanımı iyidir. Asit ve bazlara, yağlara ve esterlere karşı mukavemetleri yüksektir. Halobutillerin butil kauçuğa göre daha hızlı pişme sağlaması sonucu, doğal kauçuk, SBR, NBR, CR, EPDM gibi diğer elastomerler ile karıştırılarak kullanılması sağlanmaktadır (Savran 2001).

Başlıca kullanım alanları; bahçe hortumu, orta ve yüksek gerilim kabloların yapımında, tank kaplama malzemesi olarak, iç lastik, yapışkan madde ve şok emici takoz üretiminde, spor malzemeleri ve pişirme takımları imalatında kullanılmaktadır. Diğer taraftan farklı olarak; sünger, ayakkabı tabanı, konveyör bandı üretiminde de kullanılmaktadır. IIR kauçukları farklı firmalar tarafından Exxon Butyl, Bucar Butyl, Polstar Butyl, Enjay ve Hycar 2202 ticari isimleri altında üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).

### **İsopren kauçuğu (IR)**

Sentetik doğal kauçuk şeklinde de tabir edilen isopren türü kauçuk malzeme, 1954 yılında uzun araştırmalar sonucunda bulunmuştur (Morton 1981).

Kullanılan katalizör cinsine göre farklı mekanik özellikler gösteren isopren elde edilebilmektedir. Günümüzde ise isopren üretimi için kullanılan katalizörler genelde lityum ve Ziegler-Natta' dır (Savran 2001).

İsopren kauçuğu genel olarak doğal kauçuk ile aynı özelliklere sahiptir. Bunun yanında renginin iyi oluşu, kokusunun olmayışı, kalite olarak az değişkenlik göstermesi ve kolay parçalanabilmesi ve çözünmesi ile birlikte daha kolay kalıplanarak ekstrüzyonlanabilmesi doğal kauçuğa göre kıyaslandığında daha üstün özellikleridir. Diğer yandan yapışkanlığının zayıf oluşu ve doğal kauçuğa göre üretiminin maliyetli oluşu zayıf yanlarıdır (Savran 2001). Bu sebepten dolayıdır ki doğal kauçuk üretiminin daha az maliyetli oluşu daha fazla tercih edilmesine neden olmaktadır (Budinski 1989).

İsopren türü kauçuk malzemelerin %60' ı oto lastiği yapımında, diğer geri kalanı conta, konveyör bandı, yer döşeme malzemesi ve ayakkabı altlığı olarak kullanılmaktadır.

Farklı amaçlı olarak; kauçuk ip, emzik ve bazı tıbbi malzemelerin yapımında da kullanılmaktadır. IR türü kauçuklar çeşitli firmalar tarafından Natsyn ve Coral, Shell Isoprene ve Ameripol SN isimleri ile üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).

### **Kloropren kauçuğu (CR)**

Neopren veya Government rubber-monovinyl acetylene ismi ile de bilinen kloropen türü kauçuk malzemeler ilk defa Wallace H. Carothers' in çalışma ekibinde çalışan kimyager Arnold Collins tarafından Birleşmiş Milletler' de 1931 yılında üretilmiş ve ilk olarak Duprene ismi ile çağırılmıştır (Wallace ve ark. 1932).

Kullanılan katkı maddelerinin çeşidine göre farklı özelliklerde kloropren türü kauçuk malzemeler üretilmektedir. Kloropren tür kauçukların en önemli özelliği karbon siyahı katılmadan da çekme mukavemetlerinin iyi olmalarıdır. Ancak gereken durumlarda özellikle aşınma ve yırtılma mukavemetini arttırmak adına katkı olarak karbon siyahı yanında farklı katkı maddeleri de kullanılmaktadır (Anonim 1961). Havaya karşı dayanıklıdır. Yapıda klor atomunun olması, polar özelliklerinin iyi olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle yağlara karşı çoğunlukla dirençlidir ve yanmaya karşı da dayanıklıdır. Su ve bazı kimyasallara karşı uzun süre bozulmadan dayanabilir. Gaz geçirgenliği düşüktür, metallere karşı yapışkanlık özelliği yüksektir (Savran 2001). Tüm bu avantajlı yanları doğal kauçuğun uygulamada eksik kaldığı alanlarda kloroprenin kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Diğer yandan, donma noktasının yüksek oluşu ve üretim maliyetleri kullanım alanını sınırlamaktadır (Anonim 1961).

Bu dezavantajlı durumlarına karşın CR türü kauçuk malzemeler çok fazla alanda kullanım bulmuştur. Başlıcaları; contalar, membranlar, silecek lastikleri, yüksek basınçlı hidrolik hortum yapımında, fren hortumlarında, tamponlar, motor takozları, elektrik kablo imalatında ve triger kayışlarında kullanılmaktadırlar (Savran 2001). CR türü kauçuk malzemeler farklı firmalar tarafından Thiacril, Petro-Texneoprene, Polysar, Baypren, Neoprene, Cyanacryl, Butactor, Hycar 1042 ve Krynac isimleri ile üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).





### **Akrilonitril bütadien kauçuğu (NBR)**

Government Rubber-Nitril ismi ile de bilinen akrilonitril bütadien kauçuk türü malzemeler bütadien ile akrilonitrilin kopolimerleridir. Almanya I.G. Farben şirketi çalışanları Eduard Tschunker ve Erich Kondrad tarafından ilk kez 1930 yılında geliştirilmiştir. Patent No: 658.980 (1933-Almanya) ve Patent No: 1.973.000 (1933 Amerika). NBR, doğal kauçuk ve SBR' ye kıyasla bazı mineral yağlara ve benzene karşı dayanıklıdır (Kauffman ve Seymour 1991).

NBR' nin mekanik özellikleri içerisinde bulunan akrilonitrile bağlı olarak değişkenlik gösterir. Akrilonitril oranının artması yakıt ve yağlara karşı direnci artırır. Bu oran azaldıkça elastik kabiliyeti ve gaz geçirgenlik özellikleri de azalır (Savran 2001).

Bazı yüksek oksitlenme özelliğine sahip asit ve bazlar dışında asit ve bazlara karşı dayanıklıdır. Yüksek dayanım istendiği durumlarda katkı maddeleri katılmalıdır. Aşınma mukavemeti ve ömür özellikleri iyi olmasına karşın elektrik yalıtımı ile yırtılma direnci doğal kauçuğa kıyasla düşüktür. Petrolden elde edilen yağlar, gazlar ile aromatik hidrokarbonlara karşı direnç aranan yerlerde kullanılır (Anonim 1989).

Yukarıda da belirtilen yağ ve yakıtlara karşı dirençli olmaları nedeniyle conta yapımında; sızdırmazlık contaları, o-ringler, kaplinler ve membranlar, hortum yapımında; benzin, pnömatik ve hidrolik hortumlar, bağlantı parçası yapımında, konveyör bantlarının yapımında, işçi elbisesi ve bot imalatında, lastik klişelerde ve mühürlerde kullanılır (Savran 2001). NBR türü kauçuk malzemeler farklı firmalar tarafından Buna-N, Hycar, Fr-N, Paracil, Krynac, Tylac, Nysyn, Butaprene ve Chemigum isimleri ile üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).

### **Polisülfid (PTR) kauçuğu**

Thiokol veya Government rubber-polysulfide ismi ile de bilinen polisülfid türü kauçuk malzemeler, fizik alanında çalışan mucit Joseph C. Patrick tarafından 1922 yılında bulunmuştur (Patrick 1936). Thiokolün ilk üretimi, New Jersey' de 1930 yılında gerçekleştirilmiştir (Kauffman ve Seymour 1991).

Bu türden kauçuk malzemeler yağlara ve çözücülere karşı dayanıklıdırlar ancak kötü kokuludurlar. Elastik özellikleri de zayıftır ve ısıl direçleri vasat düzeydedir. Bunun yanında nem ve havayı geçirmezler (Budinski 1989). Aromatik hidrokarbonlara, oksijenli sıvılara ve ozona karşı dayanıklıdırlar.

Başlıca kullanım alanları; gaz hortumu yapımında, conta imalatında, binalarda sızdırmazlık aranan yerlerde kullanılmaktadır. Çekme ve aşınma dayanımının diğer türden sentetik kauçuklara nazaran düşük olması nedeni ile kullanımı oldukça sınırlıdır. Yukarıda bahsi geçen koku problemi de sınırlı alanda kullanım bulmasını sağlamaktadır (Savran 2001; Anonim 1961).

Polislfid türü kauçuk malzemeler çeşitlik üreticiler tarafından Thiokol, FA, LP, ZR-300 ve ST isimleri ile imal edilmektedir (Clauser ve ark.1967; Nagdi 1993).

### **EPM ve EPDM kauçukları**

Etilen ve propilenin kopolimerizasyonu ve bazı katalizör malzemelerin de ilavesi ile elde edilen EPM ve EPDM türü kauçuk malzemeler ilk defa 1963 yılında üretilmiştir. EPM, etilen ve propilenin; EPDM ise bunların yanında bir diğer monomer, dienin de ilave edilerek reaksiyona sokulması ile elde edilir (Savran 2001).

Her iki kauçuk türü de ısı, ışık ve oksitlenmeye karşı çok dayanıklıdır. Çok iyi elektrik özellikleri vardır. Yüksek dolgu ve yağ tutma özelliklerinden dolayı düşük maliyetli karışımlar oluştururlar. Sulu yanında konsantre asit ve alkalilere karşı dirençleri iyidir. Yoğunlukları düşüktür bu sayede hafif malzemeler üretilebilir. Mekanik özellik olarak, butil tür sentetik kauçuk ile doğal kauçuk arasındadırlar (Savran, 2001; Budinski 1989).

Butil türünde olduğu gibi petrol esaslı yağlara karşı direçleri zayıftır dolayısı ile kullanımları otomotiv endüstrisi ile sınırlıdır (Savran 2001). Başlıca kullanım alanları; fitiller; kapı, cam, sünger fitilleri, radyatör hotumları, körükler, bazı özel contalar, konveyör bantları ve tank kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

EPM ve EPDM türü kauçuk malzemeler üreticiler tarafından; Buna AP, Nordel, Royalene, Buna EP, Enjay EPR, Olemiene, Dural N, Epsyn, Vistalon, Epcar ve Kelton isimleri ile üretilmektedir (Clauser ve ark. 1967; Nagdi 1993).

Tez çalışmasında referans alınan kauçuk malzeme de EPDM türü sentetik kauçuk malzemeler arasında yer almaktadır. Malzeme, 76-0 referans numarası ile Fransız Interep firması, MS403 ticari ismi ile de Türk, Mebant firması tarafından üretilmektedir.

## **2.2. Kauçuk Malzemelerin Karakterizasyonu ve Deney Yöntemleri**

Hiperelastik malzemelerin rijit yapıdaki malzemelere göre deney davranışları oldukça farklıdır. Örneğin bir çeliğin çekme deneyinde akma bölgesi çok net görülebilirken bunun bir kauçuk malzeme için tespiti oldukça zordur. Bu bölümde, hiperelastik ürünler grubunda olan elastomerler için malzeme karakterizasyonunda kullanılan deney yöntemleri incelenmiştir.

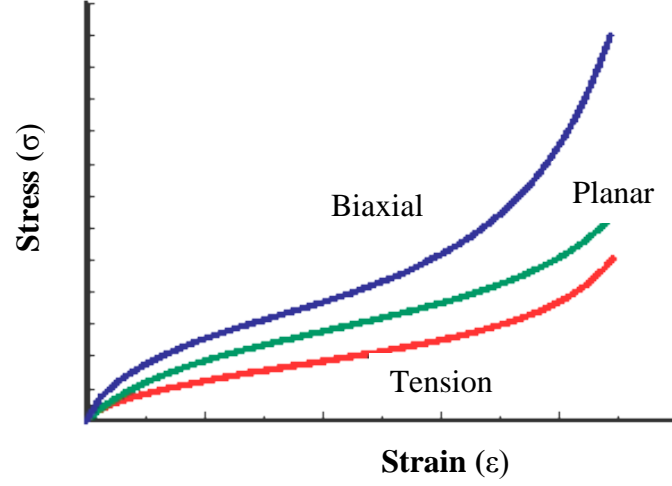
Sonlu elemanlar analizinde, elastomerlerin analizi çoğunlukla hiperelastik malzeme modellerinin kullanılmasını gerektirir. Bu modeller, söz konusu malzemenin numunelerini germeyi ve gerilme-şekil değiştirme verilerinin toplanmasını gerektirir. Çoğu hiperelastik model, birden fazla şekil değiştirme durumu incelendiğinde daha iyi performans gösterir. Elastomerler, uygulama sıcaklığında karakterize edilmelidir (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### **2.2.1. Tipik elastomer malzeme deneyleri**

Elastomerlerin karakterizasyonunda özellikle faydalı olan üç şekil dayanım deneyi vardır. Bunlar; basit çekme, kesme ve çift eksenli çekmedir. Bu temel deney türleri ile ilgili gerilme - şekil değiştirme davranışları sembolik olarak Şekil 2.1.' deki grafikte gösterilmiştir. Elastomer kullanıldığı alanda hapsedilmiş olarak bulunuyorsa ve sıkıştırılabilirlik bir kriter olarak ortaya çıkıyor ise, hacimsel sıkıştırma deneyi (hacim modülü) de önerilebilir.

Tipik elastomer malzeme deneyleri aşağıdaki alt başlıklarda incelenmektedir;

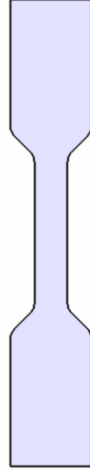
- Basit çekme deneyi
- Düzlemsel kesme deneyi
- Çift eksenli eşit çekme deneyi
- Hacimsel sıkıştırma deneyi
- Basit sıkıştırma deneyi



**Şekil 2.1.** Deney türleri ve oluşan gerilme-şekil değirtirme eğrileri (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### **Tek eksenli çekme deneyi**

Basit çekme deneyleri elastomerler için çok popülerdir. Elastomerlerin çekme deneyi için birkaç standart vardır. Bununla birlikte, analiz için deneysel gereklilikler standartlaştırılmış deney yöntemlerinden bir miktar farklıdır. En önemli gereklilik; saf çekme gerginliğinin elde edilmesi için, numunenin genişlik ve kalınlığına kıyasla gerdirme yönünde çok daha uzun boyda olmasıdır. Amaç, numune incelirken eksenel kısıtlamanın olmadığı bir deney yaratmaktır. Basit çekme deneyi testinde kullanılan kaşık numune olarak bilinen deney parçasının taslak görüntüsü Şekil 2.2.' de verilmiştir. Bu tür deneyler için kullanılan bir test cihazına ait görüntü ayrıca Şekil 2.3.' te gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Basit çekme deneyi kaşık numune taslağı (specimen)

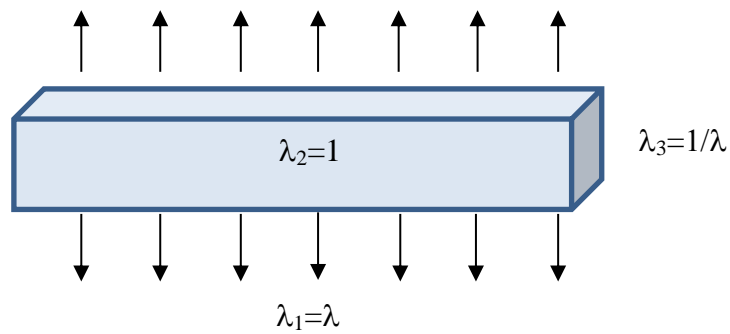




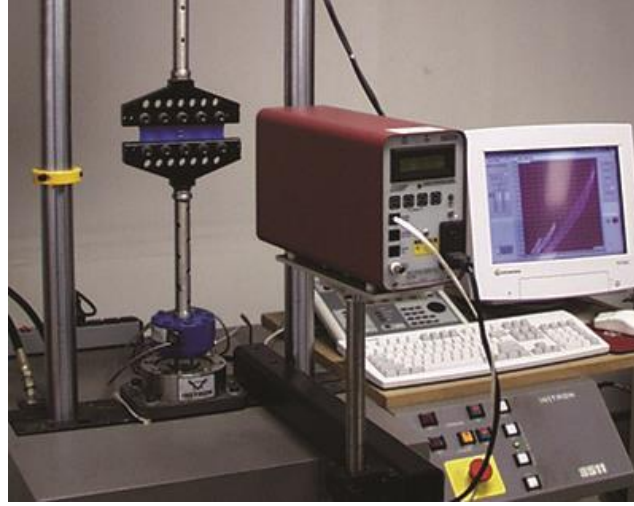
**Şekil 2.3.** Lazer ekstansometresi ve optik camı ile birlikte basit çekme deney cihazı (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

#### **Düzlemsel çekme (saf kesme) deneyi**

Analiz için kullanılan düzlemsel kesme deneyi beklenenin aksine ilk bakışta çok geniş bir çekme deneyi izlenimi vermektedir. Bununla birlikte, malzeme neredeyse sıkıştırılmaz olduğu için, numunede germe doğrultusuna 45 derecelik bir açıyla saf bir kesme gerilmesi meydana gelmektedir. Numunenin en önemli özelliği, genişlik yönüne göre gerdirme yönünde çok daha kısa olmasıdır. Amaç, numunenin tüm incelmelerin meydana geldiği yanal yönde mükemmel biçimde sınırlandırıldığı bir deney yaratmaktır. Deneyin sembolik olarak numune üzerine uygulaması ile kullanılan deney cihazı, Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.' te gösterilmiştir.



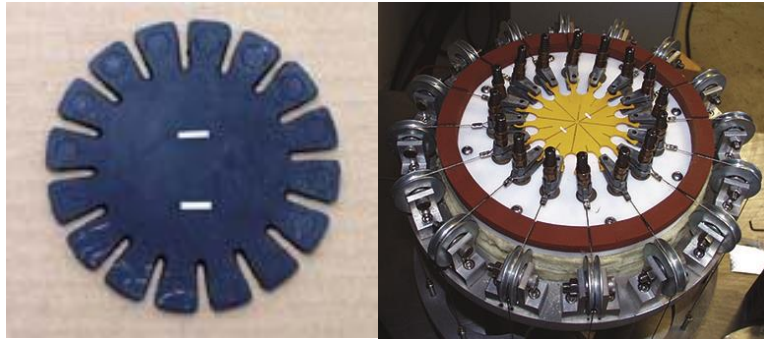
**Şekil 2.4.** Düzlemsel çekme numunesi taslağı



**Şekil 2.5.** Lazer ekstansometresi ile donatılmış düzlemsel çekme (saf kesme) cihazı (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### **Eşit iki eksenli çekme deneyi**

Sıkıştırılmaz veya neredeyse sıkıştırılmayan malzemeler için, bir numunenin eşit iki eksenli uzaması, saf sıkıştırmaya eşdeğer bir gerilme durumu yaratır. Mevcut deney, basit bir sıkıştırma deneyinden daha karmaşık olsa da, daha hassas olarak dikkate alınacak bir malzeme modeli ile saf bir gerilme çıktısı yakalanabilir. Eşit iki eksenli kesme deneyinin numunesi ve bu test için kullanılan deney cihazı, Şekil 2.6.' da gösterilmiştir.

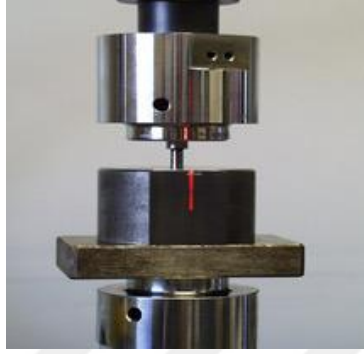


**Şekil 2.6.** Eşit iki eksenli çekme deney numunesi ve çekme deney cihazı (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### **Hacimsel basma (hacim modülü) deneyi**

Hacimsel sıkıştırma, malzemenin sıkışabilirliğinin incelendiği bir deneydir. Bu deneyde, silindirik bir numune bir fikstür içine konular ve sıkıştırılır. Sıkıştırma

sırasında gerçek yer değiştirme çok küçüktür ve yalnızca numunenin davranışını ölçmek için büyük zen gösterilmelidir; cihazın kendisinin sertliği llmemelidir. Oluşan gerilme-şekil değiştirme fonksiyonunun başlangıç eğimi, hacim modülüdür. Bu değer yoğun elastomerler için genellikle kayma modülünden 2-3 misli daha büyüktür. Bu tür deneyler için kullanılan deney cihazı rneği Şekil 2.7.' de gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Hacimsel sıkıştırma deney cihazı  
(<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### **Basit sıkıştırma deneyi**

Sıkıştırma deneyi de elastomerler için sık tercih edilen bir deneydir. Analiz deneyi yapılırken saf gerginlik durumu arzu edilir ve bu durumun, yoğun materyallerin kompresyonunda özellikle deneysel olarak elde edilmesi zordur. Bununla birlikte, köpük malzemeleri için, numune ve plaka arasındaki sürtünmeden kaynaklanan hata ihmal edilebilir. Basit sıkıştırma deneylerinde kullanılan bir test cihazı Şekil 2.8.' de verilmiştir.

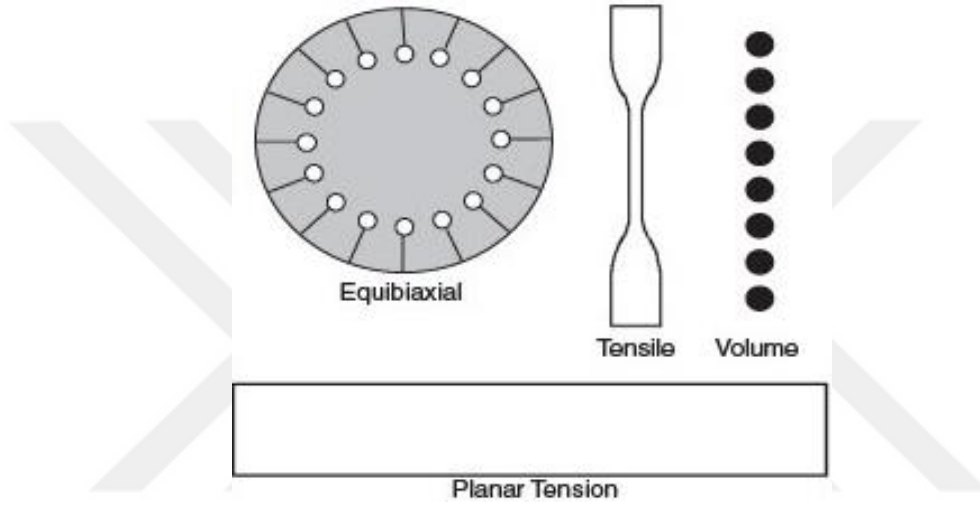




**Şekil 2.8.** Basit sıkıştırma deney cihazı  
(<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018)

### 2.2.2. Numune hazırlık

Elastomerlerin malzeme deneyleri için tipik olarak, test edilecek numunelerinin kesildiği levhalara ihtiyaç duyulur. Elastomer tabakalar mevcut değilse, bazen tabakalar daha kalın plakalardan veya gerçek parçalardan çıkarılabilir. Malzeme karakterizasyonu için yapılan deneylerde kullanılan bazı temel numune örnekleri ve yığın malzemelerden kauçuk levha oluşturmaya yarayan dilimleme sistemi cihazı Şekil 2.9. ve Şekil 2.10.' da görülmektedir.



**Şekil 2.9.** Levhalardan çıkarılan numune şekilleri (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).



**Şekil 2.10.** Yığın malzemeden kauçuk levha oluşturmaya yarayan dilimleme sistemi (<http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html>, 2018).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde çalışmanın amacına yönelik kullanılan malzeme ve materyaller için yapılan deney, simülasyon ve deneysel tasarım yöntemleri hakkında detay bilgiler verilecektir.

Çalışmalar ilk adım olarak, kullanılan malzemeyi karakterize etmek için basit çekme deneyi ile başlamıştır. Çekme deneyi sonrasında elde edilen veriler deney simülasyonlarında girdi olarak dikkate alınmış ve uygun potansiyel enerji formu tespit edilmiştir. Sonrasında oluşturulan 27 farklı analiz senaryosu için deney tasarımı çalışması gerçekleştirilmiş ve problem, sonuç bölümünde daha detaylı tartışılacak optimizasyon teknikleri ve regresyon yöntemleri ile formüle edilmiştir.

#### 3.1. Çekme Deneyi

Test edilecek numune, aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibi çekme test cihazı çenelerine yerleştirildikten sonra, cihaza girilen hızda (500mm/dk.) çenelerin düşey ekseninde hareketi ile çekilmeye başlanmıştır. Burada önemli bir husus, ‘Mullin Etkisi’ olarak adlandırılan, hiperelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme karakterini tespit etmede kullanılan, tekrarlı çekme olarak da ifade edilebilen yöntemin de dikkate alındığı testin gerçekleştirilip sonucunun girdi olarak alınmasıdır. Deney sonuçlarında Mullin etkisi altında ve Mullin etkisi olmadan elde edilen sonuçlar arasındaki farklar dikkat çekmektedir. Malzeme kopuncaya kadar uygulan çekme işlemi sonucunda, cihazdan alınan çıktılar kullanılarak mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi bulunmasında kullanılmıştır. Bu sonuçlar daha sonra formüller yardımı ile gerçek gerilme-şekil değiştirmeye dönüştürülüp, simülasyonlarda kullanılmıştır. Çalışmada malzeme çekme deneylerinde kullanılan EPDM malzemeler aşağıda Şekil 3.1.’ de ayrıca gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Testlerde kullanılan MS403 EPDM spesimenler (kaşık numune)



Malzeme çekme deneylerinde kullanılan Mako A.Ş.' ye ait ve kalite biriminin bünyesinde bulunan cihazın ve test sonrasında makine çenelerinde kalan malzemenin görüntüleri Şekil 3.2.ve Şekil 3.3.' te verilmektedir.



**Şekil 3.2.** Çekme deneyinde kullanılan cihaz, AUTOGRAPH 5kN



**Şekil 3.3.** Çekme deneyi sonrası kopan numune

Yukarıda kısaca değinilen Mullin Etkisi ile ilgili, yapılan deneylerde ortaya çıkan sonuçların daha iyi anlaşılması için bu etki aşağıda verilen başlıkta detaylı olarak anlatılmıştır.

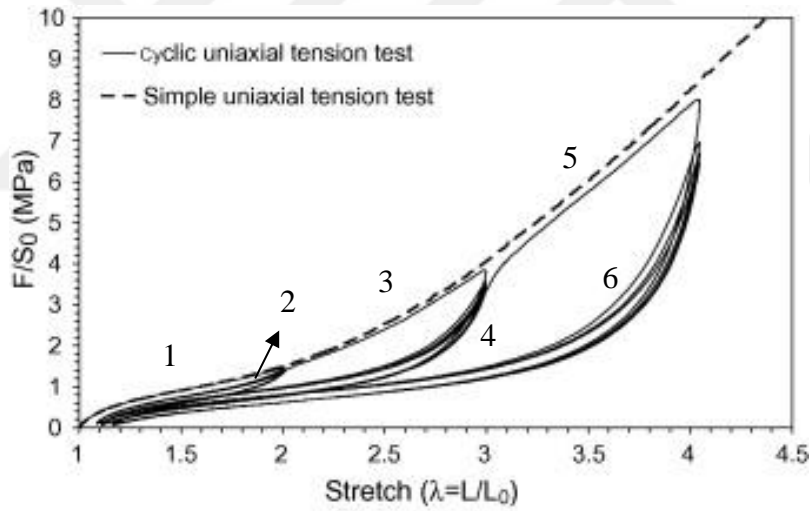
### **3.1.1. Mullin etkisi**

Mullins etkisi, endüstriyel kauçuk malzemelerin karmaşık davranışının iyi mekanik modellenmesini sağlamak için kullanılan bir fenomendir. Mullin' in tezini ortaya koyuşundan beri süre gelen kırk yılda, bu etkinin mekanik modellenmesi üzerinden genel

bir anlaşma olmaması ile birlikte bu ve farklı bazı teoriler, fiziksel temelli mekanik davranış yasalarının ortaya çıkmasını desteklemektedir.

Mullins etkisi en genel ifade ile; kauçuklarda ilk deformasyon sonucunda meydana gelen yumuşamadır. Bu deformasyon, kalıcı birim şekil değiştirme ve indüklenmiş anizotropi ile giderilir. Mullins efektinin, dolgulu ve dolgulu olmayan kauçuklarda yaygın olarak gözlemlendiği bildirilen iddiaların aksine, şimdiye kadar sadece dolgulu kauçuklar ve kristalize olan saf zamkların Mullin efekti ile yumuşatılabildiğini gözlenmiştir. Bu malzemeler geri dönüşümlüdür, çünkü malzemeler vakumda yüksek sıcaklığa maruz kaldığında veya solvent şişmesinde iyileşir.

Ardışık olarak yapılan çekmeler ve malzemeyi geri bırakma sonucunda oluşan gerilme-şekil değiştirme ya da diğer bir deyişle Mullin etkisine maruz bırakılan bir numunenin gösterdiği davranışlar, Diani ve ark. (2009) tarafından Şekil 3.4. ile gösterilmektedir.



**Şekil 3.4.** Dolgulu kauçuklarda Mullin etkisi sonucu gerilme-şekil değiştirme eğrileri

### 3.1.2. Çekme deneyi çıktıları

Tek eksenli çekme deneyi sonrası oluşan mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme davranışları, Mullin etkisi altında ve olmadan olmak üzere iki farklı deneyde incelenmiştir. Bu deneylerden, Mullin etkisi altında gerçekleştirilen deneyin gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri analizlerde girdi olarak kullanılmıştır.

## Mullin etkisi olmadan yapılan çekme deneyi

Yapılan malzeme deneyleri sonrasında cihazının arayüzünden alınan veriler Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.' de gösterilmiştir. Çekme deneyi verilerinde, başlangıç (sıfır) adımından 439. adımına kadar malzemenin uzamasına bağlı olarak üzerinde oluşan yük, çizelgelerden de görülebileceği üzere yeşil bölgeye kadar artma eğiliminde bulunmuş, bu bölge boyunca bu artış devam etmiş ve nihayetinde mavi bölgenin başlangıcında numunenin koptuğu gözlemlenmiştir.

**Çizelge 3.1.** Deney cihazından alınan, Mullin etkisi olmadan yapılan test verileri

Test name	Test mode	Shape	Unit	Loading span	Support span	Batch No.	Sub No.	Test speed	Test speed2	Change point
MS403st1_500m m/min	Ten.	Plate	mm	100	200	1	1	500	500	100
Shape: Plate										
Name	Width (mm)	Thick (mm)	GL (mm)							
Specimen 1 - 1	10	10	42							
Data conditions	Max-Stress	Max-Strain	Break Stress	Break-Strain	Elastic	YS-Stress	YS-Strain	YP-Stress	YP-Strain	
Parameter					1	1	1	1	1	
ParameterUnit					MPa	%	%	%/FS	%/FS	
Unit	MPa	%	MPa	%	GPa	MPa	%	MPa	%	
1 - 1	0,23	347,59						0,03	20,85	

Deney sonrası çıkan verilerin, mühendislik gerilme-şekil değiştirme ve gerçek gerilme-şekil değiştirme olarak hesaplamaya yardımcı olan formüller aşağıda verilmiştir.

Mühendislik birim şekil değiştirme ifadesi,

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) \quad (3.1)$$

gerçek birim şekil değiştirme ifadesi,

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (3.2)$$

gerçek gerilme ifadesi,

$$\frac{Fn}{A} \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (3.3)$$

olarak tanımlanmaktadır.

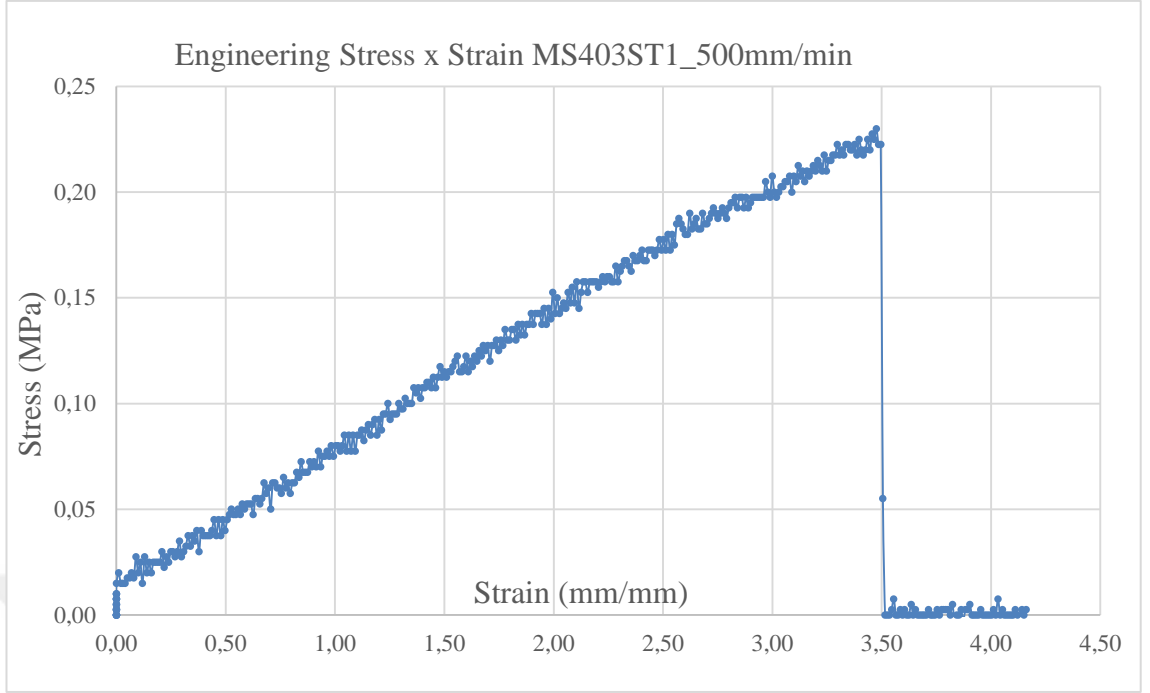




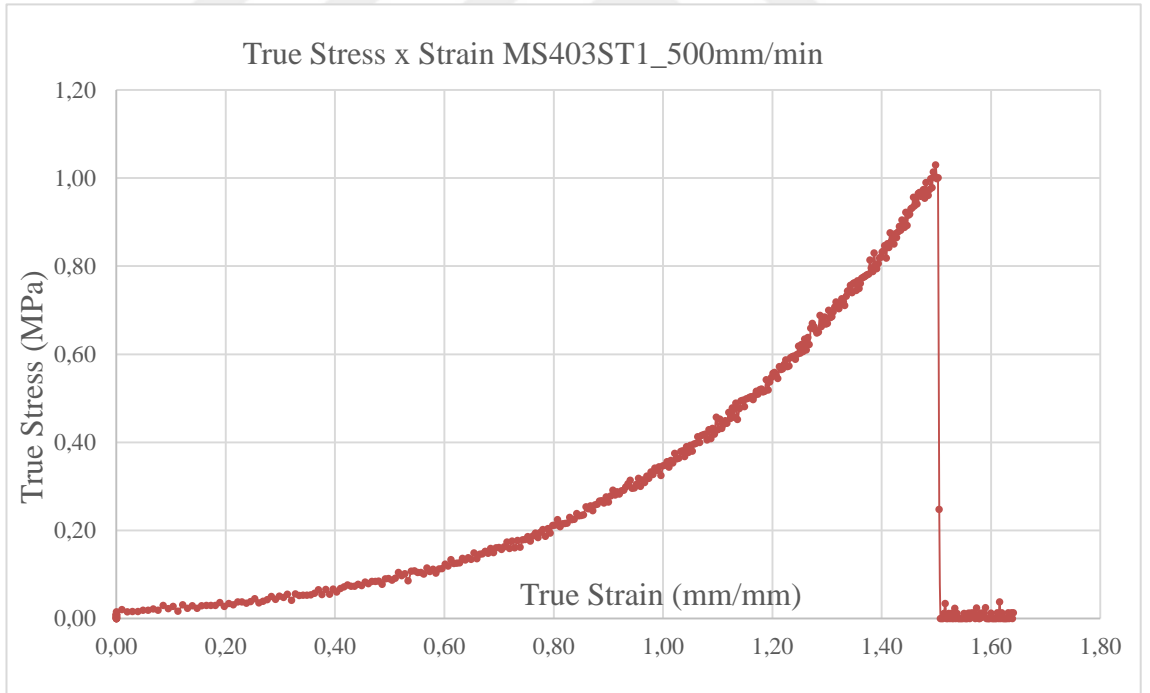
**Çizelge 3.2.** Mullin etkisi hesaba katılmadan bulunan mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri

Test Verisi (Test Data)			Mühendislik Verisi (Engineering Data)		Gerçek Veri (True Data)	
Step	Load (Mpa)	Position (mm)	Strain (mm/mm)	Stress (Mpa)	Strain (mm/mm)	Stress (Mpa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,00750	0,00000	0,00000	0,00750	0,00000	0,00750
3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
363	0,22000	143,06800	3,40638	0,22000	1,48305	0,96940
364	0,21750	143,48470	3,41630	0,21750	1,48530	0,96055
365	0,22000	143,90170	3,42623	0,22000	1,48755	0,97377
366	0,22500	144,31870	3,43616	0,22500	1,48979	0,99814
367	0,22000	144,73730	3,44613	0,22000	1,49203	0,97815
368	0,22750	145,15330	3,45603	0,22750	1,49426	1,01375
369	0,22500	145,57170	3,46599	0,22500	1,49649	1,00485
370	0,23000	145,98830	3,47591	0,23000	1,49871	1,02946
371	0,22250	146,40500	3,48583	0,22250	1,50092	0,99810
372	0,22250	146,82170	3,49575	0,22250	1,50313	1,00031
373	0,05500	147,24030	3,50572	0,05500	1,50535	0,24781
374	0,00000	147,65630	3,51563	0,00000	1,50754	0,00000
433	0,00000	172,26470	4,10154	0,00000	1,62954	0,00000
438	0,00000	174,35100	4,15121	0,00000	1,63923	0,00000
439	0,00250	174,76900	4,16117	0,00250	1,64116	0,01290

Bu tabloya göre oluşan mühendislik gerilme-şekil değiştirme ve gerçek gerilme-şekil değiştirme grafikleri aşağıda Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.' da gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.5. Mullin etkisi olmadan mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 3.6. Mullin etkisi olmadan gerçek gerilme-şekil değiştirme grafiği

### Mullin etkisi altında yapılan çekme deneyi

Mullin etkisi bölüm 3.1.1.' de de bahsedildiği üzere dolgulu kauçuk malzemeler üzerinde gerilmelerin, tekrarlanan yüklemeler sonucunda bir miktar yumuşamasına neden olmaktadır. Mullin etkisi hesaba katılarak yapılan malzeme deneylerinde oluşan mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi, Mullin etkisi hesaba katılmayan deneye göre kıyaslandığında, bu deneyde Şekil 3.4.' teki 1-3-5 eğrileri ile 6 nolu eğri arasındaki ilişkiye benzer bir durum olduğu gözlenmiştir. Numune tekrarlı olarak toplamda 10 kez %100 boyu kadar çekilip bırakılmış ve son çekildiğinde oluşan eğri 6 nolu eğridekine benzer şekilde çıkmıştır. Test cihazı geri dönüşlerin kaydedilip incelenmesine olanak tanımadığı için Şekil 3.4.' teki 2 ve 4 nolu eğrilerdekine benzer oluşumlar izlenememiştir ancak Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.' de son çekme sonrası durum grafikler ile gösterilmiştir.

Yapılan malzeme deneyleri sonrasında cihazının arayüzünden alınan veriler Çizelge 3.3. ve Çizelge 3.4.' te gösterilmiştir. Çizelge 3.4.' te, başlangıç adımından son adıma (329.) kadar malzemenin uzamasına bağlı olarak üzerinde oluşan yük, diğer teste benzer şekilde, yeşil bölgeye kadar ve bu bölge boyunca artış göstermiş ve nihayetinde mavi bölgenin başlangıcında numunenin koptuğu gözlenmiştir. Numunenin koptuğu an, malzeme kesitinde oluşan gerilmenin aniden sıfıra düşmesinden anlaşılmaktadır. Etki olmadan yapılan deneye göre, bu deneyde malzeme daha az bir boyca uzama göstererek kopmuş ve kopma gerilmesinin diğerine göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

**Çizelge 3.3.** Deney cihazından alınan, Mullin etkisi altında yapılan test verileri

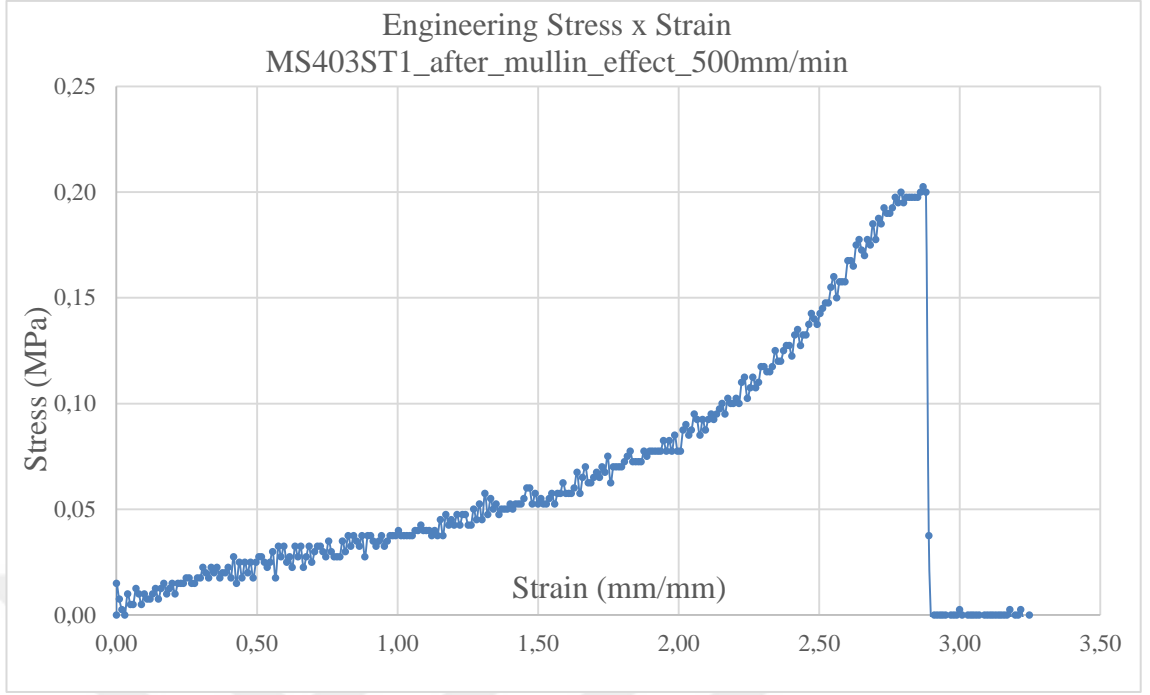
Test name	Test mode	Shape	Unit	Loading span	Support span	Batch No.	Sub No.	Test speed	Test speed2	Change point
ms403st1_after mullineffect	Ten.	Plate	mm	100	200	1	1	500	500	100
Shape: Plate										
Name	Width (mm)	Thick. (mm)	GL (mm)							
Specimen 1 - 1	10	10	42							
Data conditions	Max-Stress	Max-Strain	Break Stress	Break-Strain	Elastic	YS-Stress	YS-Strain	YP-Stress	YP-Strain	
Parameter					1	1	1	1	1	
ParameterUnit					MPa	%	%	%/FS	%/FS	
Unit	MPa	%	MPa	%	GPa	MPa	%	MPa	%	

1 - 1	0,2025	286,98					0,0225	30,78	
-------	--------	--------	--	--	--	--	--------	-------	--

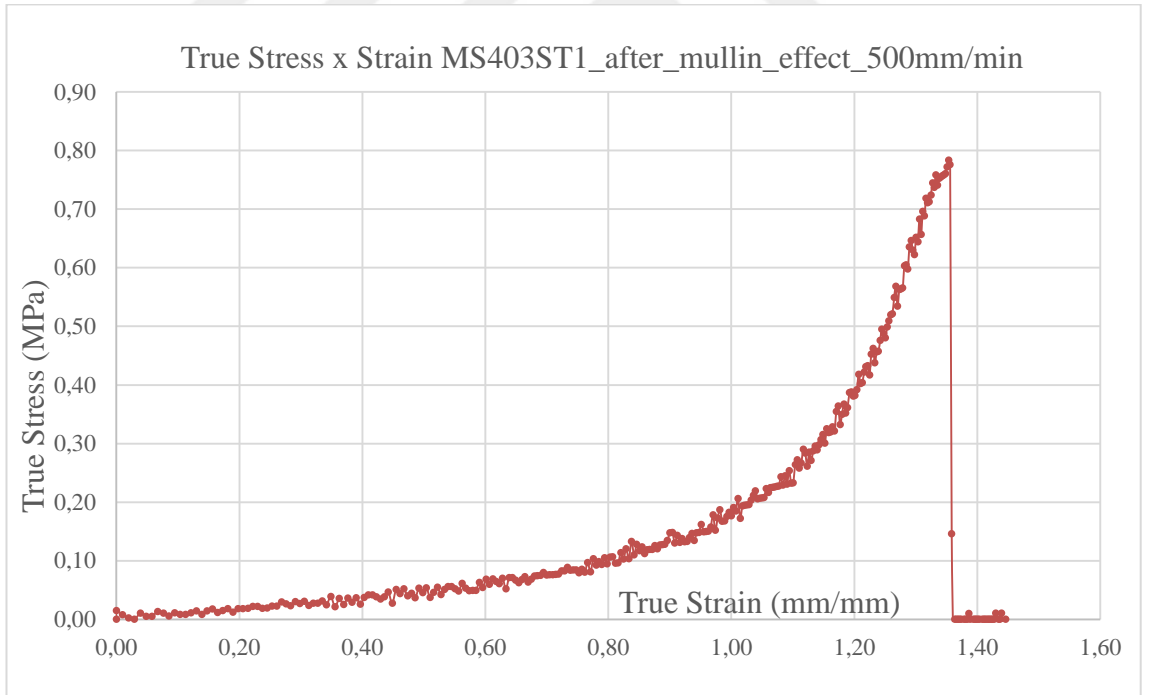
**Çizelge 3.4.** Mullin etkisi altında bulunan mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri

Test Verisi (Test Data)			Mühendislik Verisi (Engineering Data)		Gerçek Veri (True Data)	
Step	Load (Mpa)	Position (mm)	Strain (mm/mm)	Stress (Mpa)	Strain (mm/mm)	Stress (Mpa)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
1	0,01500	0,00000	0,00000	0,01500	0,00000	0,01500
2	0,00750	0,41567	0,00990	0,00750	0,00985	0,00757
3	0,00250	0,83300	0,01983	0,00250	0,01964	0,00255
282	0,20000	117,20000	2,79048	0,20000	1,33249	0,75810
283	0,19500	117,61730	2,80041	0,19500	1,33511	0,74108
284	0,19750	118,03430	2,81034	0,19750	1,33772	0,75254
285	0,19750	118,45170	2,82028	0,19750	1,34032	0,75451
286	0,19750	118,86870	2,83021	0,19750	1,34292	0,75647
287	0,19750	119,28400	2,84010	0,19750	1,34550	0,75842
288	0,19750	119,70170	2,85004	0,19750	1,34808	0,76038
289	0,20000	120,11830	2,85996	0,20000	1,35066	0,77199
290	0,20250	120,53570	2,86990	0,20250	1,35323	0,78365
291	0,20000	120,95270	2,87983	0,20000	1,35579	0,77597
292	0,03750	121,37070	2,88978	0,03750	1,35835	0,14587
293	-0,00750	121,78870	2,89973	-0,00750	1,36091	-0,02925
294	0,00000	122,20370	2,90961	0,00000	1,36344	0,00000
328	0,00000	136,38670	3,24730	0,00000	1,44628	0,00000
329	-0,00250	136,80330	3,25722	-0,00250	1,44862	-0,01064

Yukarıdaki tabloya göre oluşan mühendislik gerilme-şekil değiştirme ve gerçek gerilme-şekil değiştirme grafikleri aşağıda Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.' deki grafiklerde gösterilmiştir.



**Şekil 3.7.** Mullin etkisi altında oluşan mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği

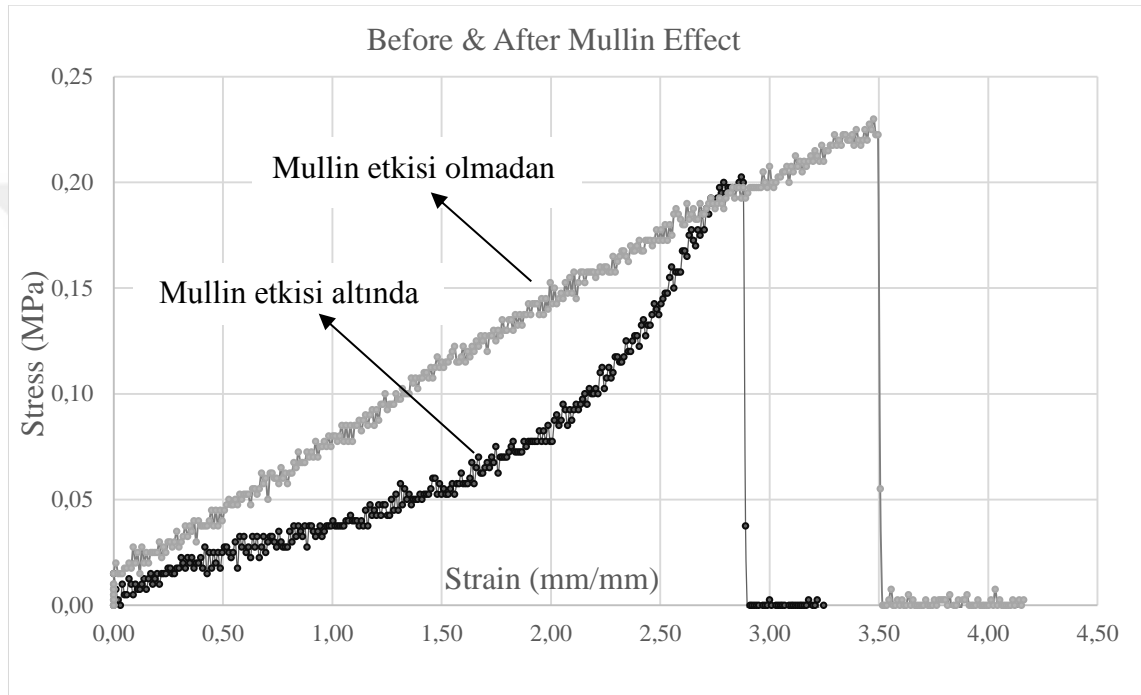


**Şekil 3.8.** Mullin etkisi altında oluşan gerçek gerilme-şekil değiştirme grafiği

Mullin etkisi altında yapılan deney çıktılarından gerçek gerilme-birim şekil değiştirme verileri bir sonraki bölümde anlatılacak malzeme potansiyellerinin belirlenmesinde

dikkate alınacaktır. Ayrıca bulunan uygun form daha sonraki adım olan sonlu elemanlar simülasyonlarına girdi teşkil edecektir.

Aşağıda Şekil 3.9.' da verilen grafikte Mullin etkisi olmadan yapılan deney sonucu ile Mullin etkisinin hesaba katıldığı son çekme çevrimini temsil eden deneyin karşılaştırmalı grafik sonuçları gösterilmiştir. Etki altında yapılan deneyde gerilme-şekil değiştirme yönündeki farklılık açıkça görülmektedir.



Şekil 3.9. Mullin etkisi olmadan ve dikkate alınarak çıkan grafiklerin karşılaştırılması

### 3.1.3. Malzeme potansiyel enerji formları

Yukarıdaki bölümde anlatılan çekme deneylerin yapılmasının altında yatan neden, bu bölümde bahsedilecek malzeme enerji potansiyellerinin belirlenmesinde faydalanılacak olmalarıdır. Malzeme enerji formları belirlenirken prensip olarak deney eğrisine en çok yakınsayan ve stabil davranış gösteren form dikkate alınır. Doğru sonuca ulaşmak için daha fazla tipte ve sayıda deney yapılması önerilmektedir ancak bu çalışmadaki kriter, tek eksenli çekme deneylerinden Mullin etkisi altında yapılan test sonucunun gerçek gerilme-şekil değiştirme çıktıları olmuştur.

Abaqus yazılımında standart olarak sunulan ve otomatik olarak malzeme potansiyel formu tanıtılmasına imkan tanıyarak hesaplamalarda kullanılan başlıca potansiyel enerji formları aşağıda verilmiştir. Bunlar;

1. Arruda-Boyce formu
2. Marlow formu
3. Mooney-Rivlin formu
4. Neo-Hookean formu
- 5. Ogden formu**
6. Polynomial formu
7. Reduced polynomial formu
8. Yeoh formu
9. Van der Waals potansiyel enerji formlarıdır.

Yapılan deney sonrasında yapılan karşılaştırma neticesinde, malzeme potansiyel enerji formlarından deney malzemesine en çok uyan form Ogden potansiyel enerji formu olarak bulunmuştur. Seçilen conta malzemesi ile yapılan tek eksenli çekme deney sonucunda elde edilen değerler dikkate alındığında, malzenin karakterini en iyi yansıtan form olma özelliğini göstermektedir. Bunun nedeni, hem tüm deney türleri için simülasyon içerisinde yapılan malzeme stabilite testinde stabil davranış göstermesi, hem de tek eksenli çekme deneyinde elde edilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisine en çok yakınsayan form olmasından kaynaklanmaktadır.

Ogden modeli yapısı gereği deneysel verilere eğri uydurma yaklaşımını kullanmaktadır. Herhangi bir gerilme durumu istenilen derecede hassasiyet ile temsil edilebilmektedir. Modeldeki sabitler tek veya iki eksenli çekme deneylerinin sonuçları kullanılarak elde edilebilmektedir. Ogden metodu; ogden malzeme modeli üç terime kadar açılır ise basit tek eksenli, eş-iki eksenli ve basit kayma deneylerinin sonuçları yeterli oranda temsil edilebilmektedir (Vahapoğlu 1998).

Ogden Formu birim şekil değiştirme potansiyel enerjisi,

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left( \overline{\lambda_1^{\alpha_i}} + \overline{\lambda_2^{\alpha_i}} + \overline{\lambda_3^{\alpha_i}} - 3 \right) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (3.4)$$

$\lambda_i$ , başlıca uzamalar ve N bir malzeme parametresidir.

$\mu_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $D_i$  sıcaklığa bağlı malzeme parametreleridir. Ogden için başlangıç kayma modülü ve hacimsel basınç katsayıları aşağıda verilmektedir.

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (3.5)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (3.6)$$

Simülasyon programında stabil davranış göstermeyen potansiyel formlardan Mooney-Rivlin Formu' nun Abaqus analiz çıktısı Şekil 3.10.' da bilgi amaçlı olarak gösterilmiştir.

Polynomial, N = 1 (Mooney-Rivlin)	HYPERELASTICITY - MOONEY-RIVLIN STRAIN ENERGY		
Polynomial, N = 2	D1	C10	C01
Ogden, N = 1	-0.219690183	0.174242354	-0.219913238
Ogden, N = 2			
Ogden, N = 3			
Ogden, N = 4			
Ogden, N = 5			
Ogden, N = 6			
Reduced Polynomial, N = 1 (Neo Hooke)	STABILITY LIMIT INFORMATION		
Reduced Polynomial, N = 2	WARNING: UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL		
Reduced Polynomial, N = 3 (Yeoh)	UNIAXIAL TENSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
Reduced Polynomial, N = 4	UNIAXIAL COMPRESSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
Reduced Polynomial, N = 5	BIAXIAL TENSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
Reduced Polynomial, N = 6	BIAXIAL COMPRESSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
Van Der Waals	PLANAR TENSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
	PLANAR COMPRESSION:	UNSTABLE FOR ALL STRAINS	
	VOLUMETRIC TENSION:	UNSTABLE AT A VOLUME RATIO LARGER THAN	1.0000
	VOLUMETRIC COMPRESSION:	UNSTABLE AT A VOLUME RATIO LESS THAN	1.0000

Şekil 3.10. Mooney–Rivlin formu Abaqus sonuç ekranı

Tüm deney tiplerinde stabil davranış gösteren Ogden N=2' nin malzeme analizi sonrası potansiyel form sonuç ekranı ise Şekil 3.11.' de gösterilmiştir.



Polynomial, N = 1 (Mooney-Rivlin)	HYPERELASTICITY - OGDEN STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 2			
Polynomial, N = 2	I	MU_I	ALPHA_I	D_I
Ogden, N = 1	1	4.142507866E-05	14.5699807	0.674655964
Ogden, N = 2	2	2.970246025E-02	3.85343222	0.00000000
Ogden, N = 3				
Ogden, N = 4				
Ogden, N = 5				
Ogden, N = 6				
Reduced Polynomial, N = 1 (Neo Hooke)				
Reduced Polynomial, N = 2				
Reduced Polynomial, N = 3 (Yeoh)				
Reduced Polynomial, N = 4				
Reduced Polynomial, N = 5				
Reduced Polynomial, N = 6				
Van Der Waals				

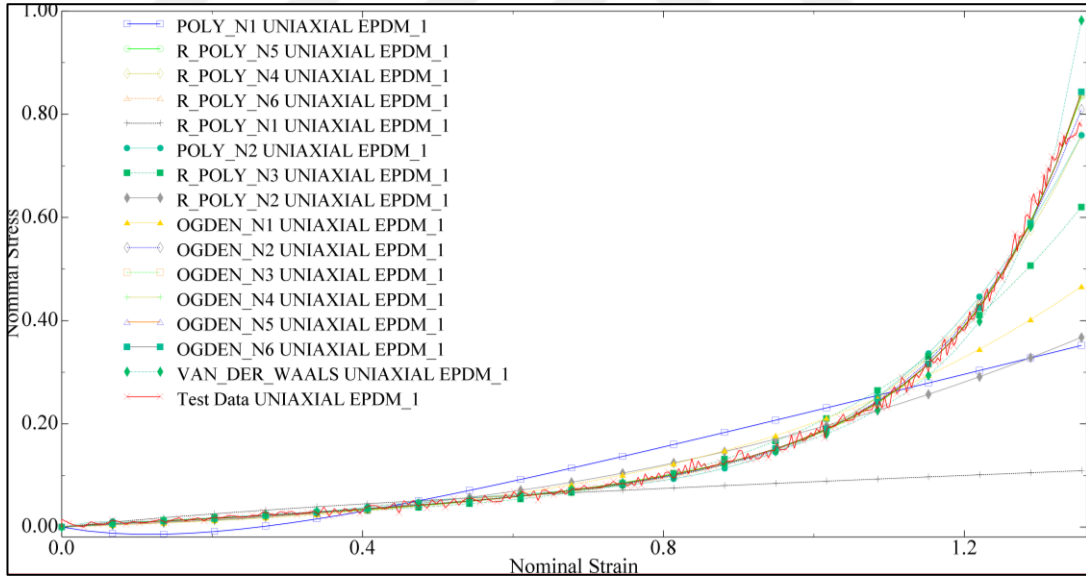
  

STABILITY LIMIT INFORMATION	
UNIAXIAL TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
UNIAXIAL COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
BIAXIAL TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
BIAXIAL COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
PLANAR TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
PLANAR COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
VOLUMETRIC TENSION:	STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS
VOLUMETRIC COMPRESSION:	STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS

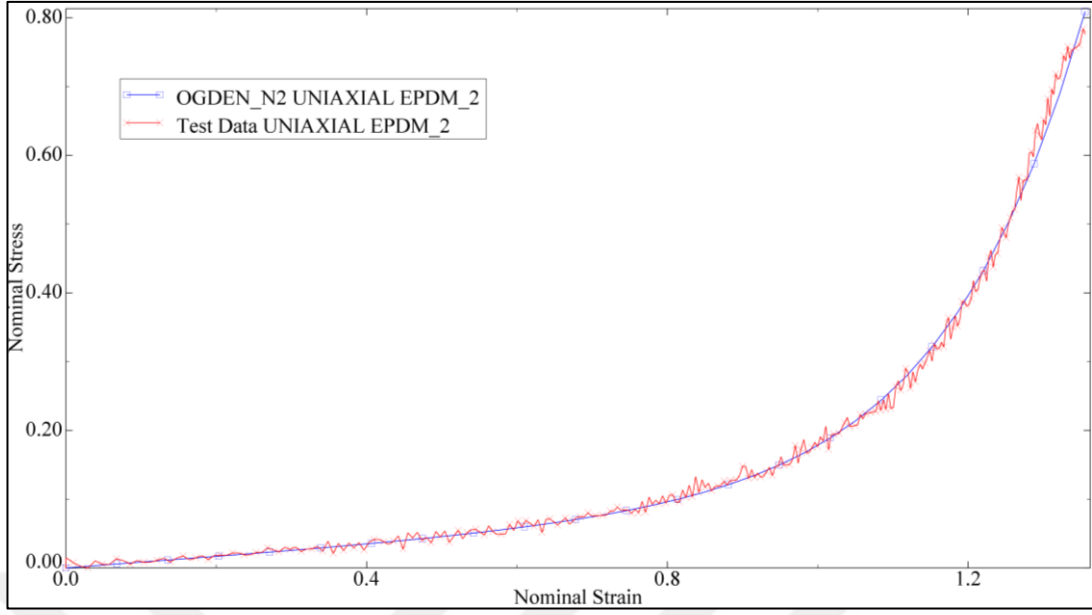
Şekil 3.11. Ogden N=2 formu Abaqus sonuç ekranı

Simülasyon programında yer alan malzeme potansiyel formları ile test verisinin karşılaştırmalı grafik sonuçları ise Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.' de gösterilmiştir.

Buradan bakıldığında Ogden N=2 potansiyel formunun, çekme deneyi eğrisine en çok yakınsayan form olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. Tüm enerji potansiyellerinin ve deney verisinin karşılaştırmalı eğrileri



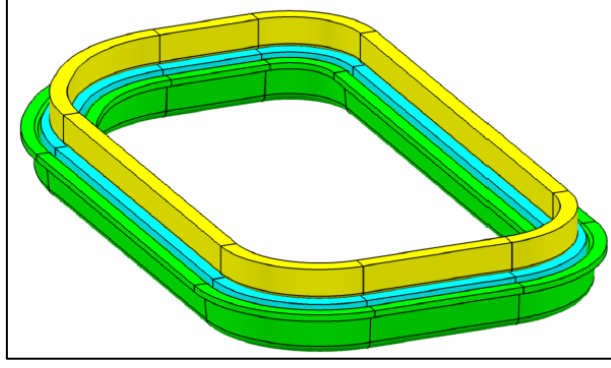
Şekil 3.13. Ogden N=2 ve deney verisinin karşılaştırmalı eğrileri

### 3.2. Deney Tasarımı için Parametreler ve Yöntem

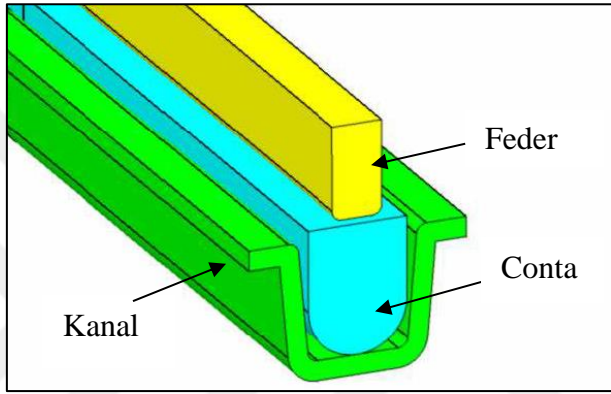
Bu bölüme kadar olan başlıklarda çalışmada kullanılan materyalle ilgili detay bilgiler verilmiş, hangi yöntemler ile ne çeşit test ve deneylere tabi tutulduğu ve nasıl karakterize edildiği anlatılmıştır.

Bu bölümde ise, çalışmada dikkate alınan 3D CAD modeller ve bunların hangi varyasyonlar ile deneysel tasarım çalışmasında yer buldukları, ne çeşit deneysel tasarım yöntemleri olduğu ve bu çalışmada hangisinin dikkate alındığı anlatılacaktır.

Sızdırmazlık problemi tanımlanırken, giriş kısmında da bahsedildiği üzere, yola aşağıda Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.' te gösterilen 3 temel parçadan hareketle çıkılmıştır. Bunlar EPDM malzemeden ve hiperelastik yapıya sahip conta ile rijit plastik olarak tanımlanan conta kanalı ve feder elemanlarından oluşmaktadır.



**Şekil 3.14.** Deneylerde kullanılan elemanlar; conta, kanal ve federin CAD modelleri



**Şekil 3.15.** Deneylerde kullanılan elemanlar; conta, kanal ve federin 3D kesiti

Yukarıdaki 3D modeller için geçerli, deneysel tasarım çalışmalarını şekillendiren ve sonlu elemanlar simülasyonlarında dikkate alınan temelde üç farklı değişken bulunmaktadır. Bu parametrelerden ikisi komponentlerin geometrileri ile ilişkilidir. Üçüncü değişken ise federin düşey ekseninde (yukarıdaki kesit görünüşte conta-feder temas yüzey normali yönü) yer değiştirme parametresinin farklı değerlerini temsil etmektedir.

Çalışmanın amacı olan sızdırmazlık için ideal durumun belirlenmesi, yukarıdaki belirtilen 3 ana parametrenin kendi içinde 3 ayrı değeri için toplamda 27 farklı analizin simüle edilmesi ile yapılmıştır. Bu ve sonraki bölümlerde  $X_1$ ,  $X_2$  ve  $X_3$  olarak ifade edilecek değişken parametreler şu şekilde ifade edilmektedir;

- $X_1$ : Feder parçasının kalınlık değeri

Toplamda 3 farklı alt seviye için 3D geometrileri oluşturulmuştur. Bunlar; 1mm, 2mm ve 3mm değerleri içindir.

- $X_2$ : Kanal parçasının açıklığı ya da kalıp çıkma açısı değeri

1,5°, 5° ve 10° değerleri için toplamda 3 farklı alt seviyesi dikkate alınarak 3D modeller oluşturulmuştur.

- $X_3$ : Federin conta parçasının içerisine doğru olan penetrasyonu (düşey ekseninde yer değiştirmesi)

Feder olarak tanımlanan geometrinin düşey ekseninde contanın içerisine gömülme miktarını ifade eden değer için toplamda 3 farklı seviye dikkate alınmıştır. Bunlar; 3mm, 4mm ve 5mm olarak tanımlanmıştır.

Toplamda 27 farklı deney içerisinde 3D model kombinasyonlarına bakıldığında,  $X_3$  parametresi dışarda tutulursa;  $X_1$  ve  $X_2$  parametrelerinin kendi içindeki varyantları ile oluşan 9 farklı 3D model bulunmaktadır. Bir sonraki kısımda bu dokuz farklı temel 3D model incelenecektir.

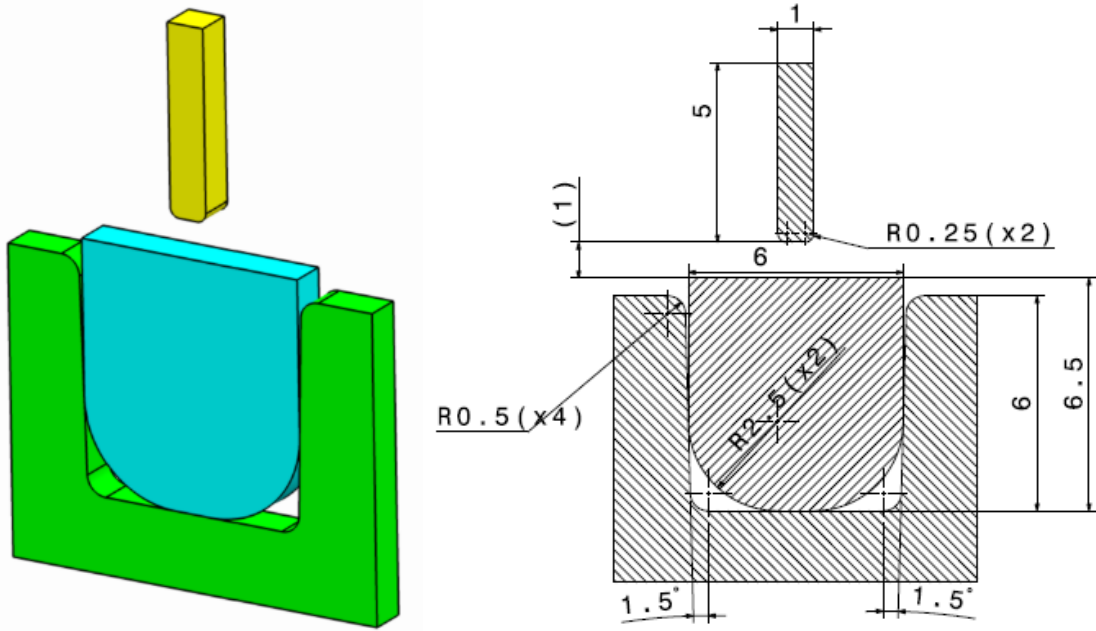
Simülasyonlarda dikkate alınan son parametre  $X_3$  ise, deney tasarım yöntemi belirlenirken irdelenecektir.

### 3.2.1. 3D CAD modeller

Abaqus sonlu elemanlar analizlerinde dikkate alınan CAD modeller, yukarıda Şekil 3.14.' te gösterilen ana elemanların türetilmesi ile oluşturulmuştur. Simülasyonlarda kullanılan conta, feder ve kanal elemanları, Şekil 3.15' teki kesit normal yönünde 1 mm' lik katı modellerden oluşmaktadır. Bundaki amaç sonlu elemanlar simülasyon süresini kısaltmaktır. Geometrinin hesaba katılmayan kısmı ile ilgili sonlu elemanlar yazılımı içerisinde gerekli sınır şartlar tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bunun için kesite normal yöndeki aksenal ve dönel hareketler, Abaqus yazılımı içerisinde gerekli tanımlamalar yapılarak kısıtlanmıştır.

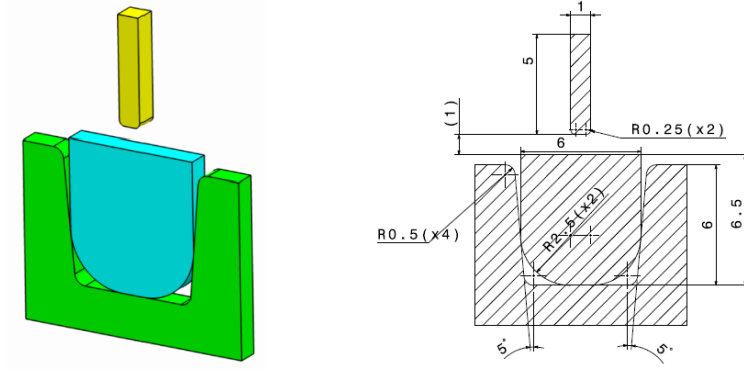
Tüm 3D kombinasyonları için  $X_1$  ve  $X_2$  parametreleri dikkate alınarak ve CatiaV5 yazılımı kullanılarak oluşturulan dokuz temel 3D CAD model, aşağıda Şekil 3.16. – Şekil 3.24. arasında isometrik görüntüleri ve teknik resimleri ile birlikte verilmiştir.

- Model No.1 için parametreler;  $X_1$ : 1mm,  $X_2$ : 1,5<sup>0</sup>



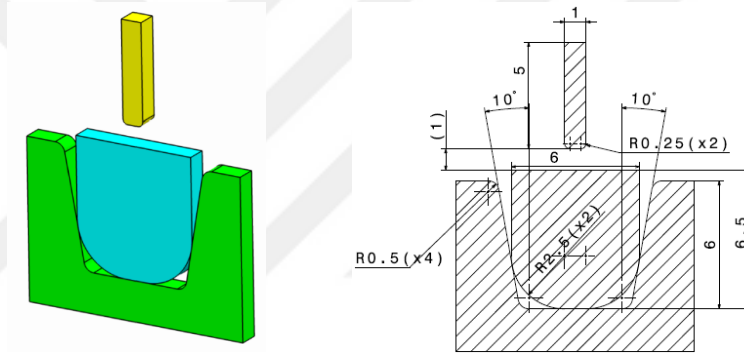
Şekil 3.16. Model no.1 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.2 için parametreler:  $X_1: 1\text{mm}$ ,  $X_2: 5^\circ$



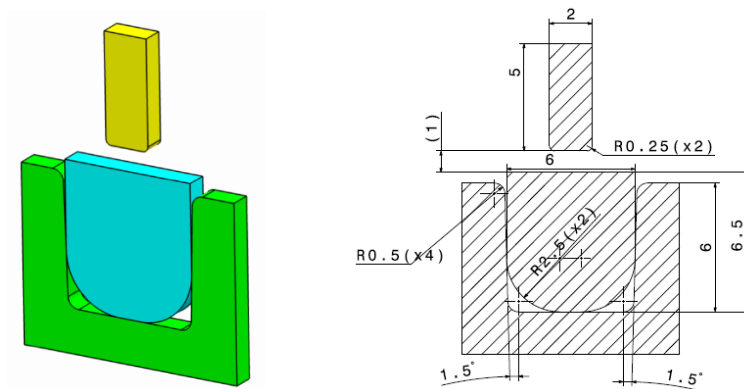
Şekil 3.17. Model no.2 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.3 için parametreler;  $X_1: 1\text{mm}$ ,  $X_2: 10^\circ$



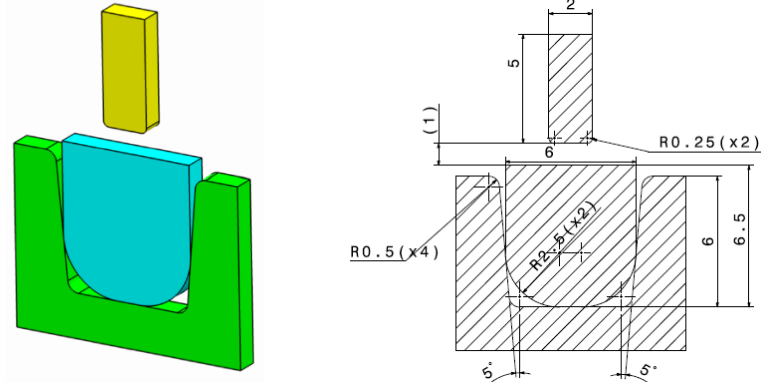
Şekil 3.18. Model no.3 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.4 için parametreler;  $X_1: 2\text{mm}$ ,  $X_2: 1,5^\circ$



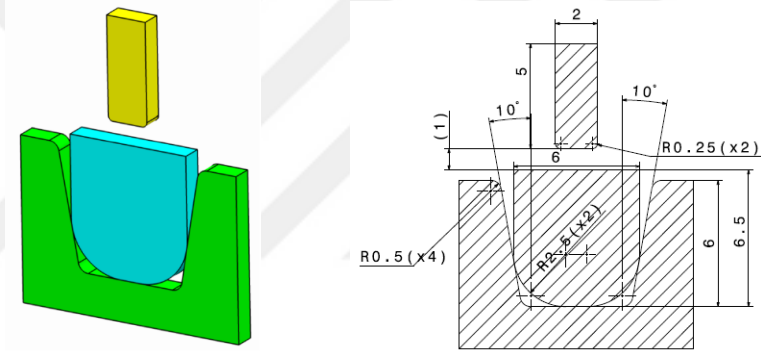
Şekil 3.19. Model no.4 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.5 için parametreler;  $X_1: 2\text{mm}$ ,  $X_2: 5^\circ$



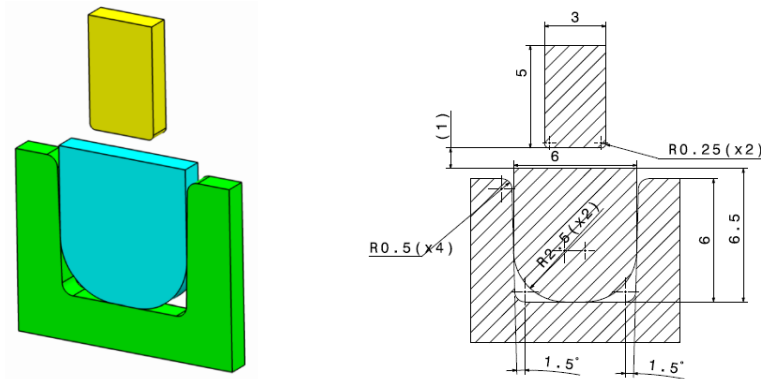
Şekil 3.20. Model no.5 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.6 için parametreler;  $X_1: 2\text{mm}$ ,  $X_2: 10^\circ$



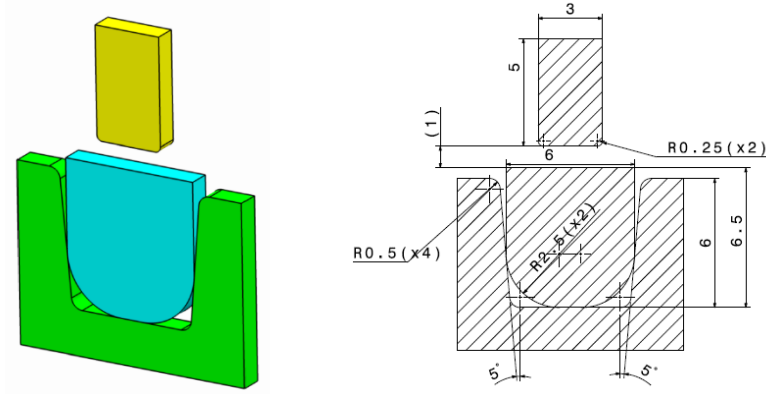
Şekil 3.21. Model no.6 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.7 için parametreler;  $X_1: 3\text{mm}$ ,  $X_2: 1,5^\circ$



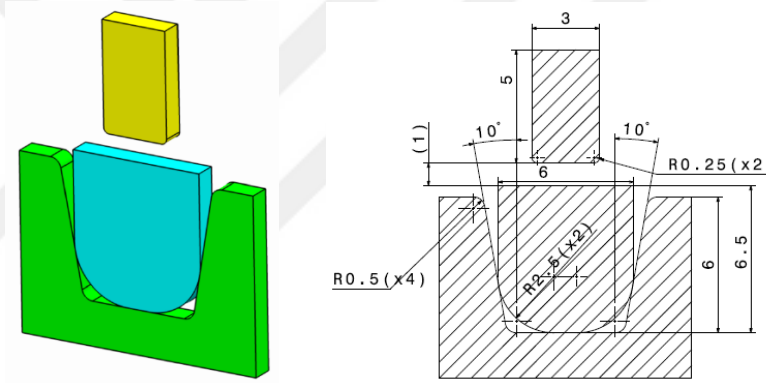
Şekil 3.22. Model no.7 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.8 için parametreler;  $X_1$ : 3mm,  $X_2$ :  $5^0$



Şekil 3.23. Model no.8 isometrik görünüş ve teknik resim

- Model No.9 için parametreler;  $X_1$ : 3mm,  $X_2$ :  $10^0$



Şekil 3.24. Model no.9 isometrik görünüş ve teknik resim

### 3.2.2. Deney tasarımı

Çalışmada referans alınan fiziki ve geometrik parametrelerden hareket ile kurgulanacak deneysel tasarım konsepti ve seçilecek yöntem bu bölümde ele alınacaktır.

Seçilem yöntemin detaylarına geçilmeden önce deney tasarımının tarihçesi ve kapsamı ile ilgili olarak genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Deney tasarımı 1920' lerde İngiliz istatistikçi 'Sir Ronald Fisher' tarafından tarım alanında üretim verimini arttırmak amacıyla araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Yöntem kısa bir süre içinde Amerika' da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için uygulanmış ve Amerika' nın bu alanda lider konuma gelmesine büyük



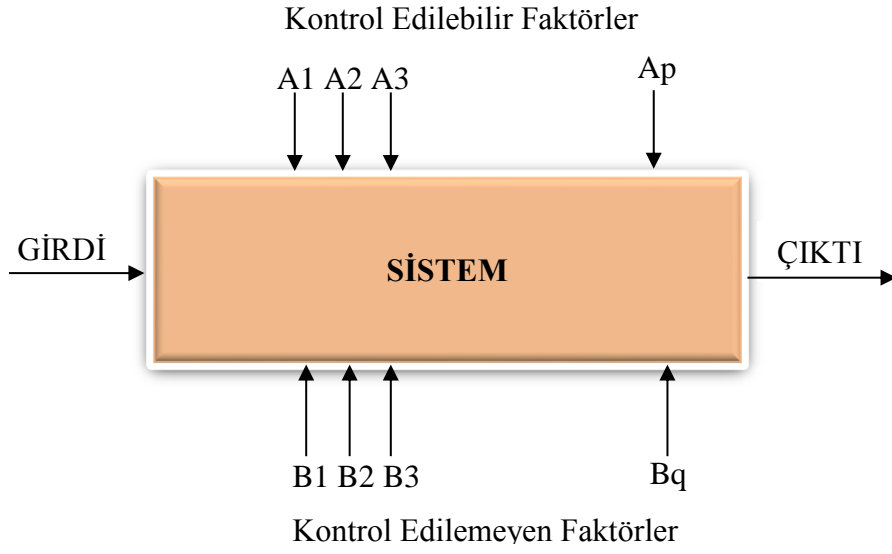
katkıda bulunmuştur. Yöntem özellikle tarım alanında, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama yüzeylerinin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere uygulanmıştır (Şirvancı 1997).

Herhangi bir ürün veya süreç tasarımında karşılaşılan problemlerde en iyi sonuçların elde edilebileceği şartları sağlayabilmek için performans özelliği belirlenerek bu özelliği etkileyen faktörler incelenmektedir. Bu faktörlerin performans çıktısı üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunabilmesi için kontrol edilemeyen faktörler ile deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek en uygun şartlar tespit edilmektedir. Bu yaklaşım ile deneyler sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta, doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasıdır (Scheffler 1997).

Deney Tasarımı; deney, düzen ve çözümleme olarak üç aşamaya ayrılmaktadır. Deney tasarımının süreç adımları genel olarak aşağıda verilmektedir:

1. Etkileri arasındaki gerçek farkların araştırılması istenen faktörler ve seviyelerinin belirlenmesi.
2. Deneyde her faktör için kaç tekrar yapılacağına karar verilmesi.
3. Veri analizinde kullanılacak tekniklerin belirlenmesi.
4. Belirlenen deney tasarımıyla elde edilen deneysel veri sonuçlarının yorumlanması.

Deney tasarımı, herhangi bir süreçteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin gerçekleştirilmesiyle cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir (Besterfield ve ark. 1995). Deney tasarımı süreç iyileştirmelerinde, süreç değişkenlerinin tanımlanmasında ve süreçteki değişkenliğin azaltılmasında önemli bir yöntemdir. Bir sürecin ya da sistemin genel modeli Şekil 3.25.' te gösterilmektedir. Süreç değişkenlerinden A1, A2, A3....., Ap kontrol edilebilir değişkenler iken B1, B2, B3....., Bq kontrol edilemeyen değişkenler olarak adlandırılabilir (Lunani ve ark. 1997).



**Şekil 3.25.** Bir sistem veya sürecin genel gösterimi

Deney tasarımı teknikleri, yeni bir süreç geliştirmede ve iyileştirme amacıyla mevcut süreci düzeltmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Burada amaç, sağlam (robust tasarım: çeşitli koşullarda uygun işlev gören ürün tasarımı) bir süreç geliştirmektir. Değişkenliğin kaynağı olan, kontrol edilemeyen değişkenlerin (B1, B2, ..., Bq) etkisinin en az olduğu bir süreç ile en iyi koşullar sağlanmaktadır (Montgomery 1991).

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

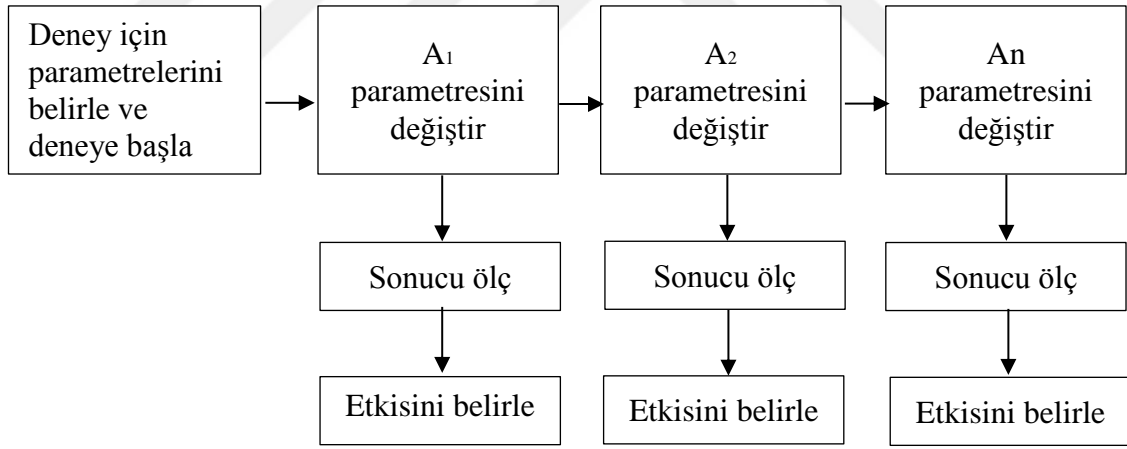
Çalışmada 27 farklı deney yapılmış ve buradan elde edilen tüm sonuçlar dikkate alındığı üzere tam faktöryel deney tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Diğer deneysel tasarım yöntemleri ve tam faktöryel deneysel tasarım yöntemi ile ilgili genel bilgiler aşağıdaki başlıklar altında ayrıca verilmiştir.

### Klasik metod ile deney tasarımı

Klasik ya da geleneksel yöntem ile yapılan deney çalışmalarında, her seferinde bir parametre değiştirilir ve diğer bağımsız parametreler sabit tutulur. Bu yöntemde sistemin parametrelerin arasında o anda değiştirilen parametrenin sisteme etkisinin araştırılması yapılır. Bu metod her bir parametre için bir başlangıç noktası yada temel seviye seçmekle başlar. Seçilen parametre dışındaki diğer parametreler kendi temel seviyesinde sabit tutulur. Seçilen parametreler kendi aralığı içerisinde değiştirilerek deneye etkisi araştırılır (Güngör 2003).

Şekil 3.26.' da da görüldüğü gibi bir ürün geliştirmede yada üretim problemini çözmek için klasik metodoloji ile yapılan deney tasarımında, deney için parametreler belirlenir ve deneye başlanır. Deneyde  $A_1$  parametresi değiştirilir, deneyin sonucu ölçülür ve deneye etkisi belirlenmeye çalışılır bu sırada diğer parametreler sabit tutulur. Klasik metodoloji ile yapılan deney çalışmasında deneyi etkileyen dış faktörler (kontrol edilemeyen) çok fazla hesaba katılmaz.



Şekil 3.26. Klasik yöntem ile yapılan deney tasarımı ve ölçümü

Klasik metodoloji ile yapılan deney çalışmasında, deneyin parametreleri niceliksel ise o zaman deneyin seviye skalasının dışındaki bir değer deneye olan etkisi hesaplanabilir. Ancak deney parametresi niteliksel ise parametreye ait seviye skalasının dışındaki bir değeri tahmin etmek mümkün değildir. Geleneksel yöntemler ile yapılan deneysel çalışmalarda parametreler arasındaki etkileşim göz ardı edilmektedir. Aynı zamanda çok zaman harcanmakta ve daha pahalıya mal olmaktadır (Breyfogle 2003).

İstatistiksel olmayan deney tasarım yöntemleri kullanıldığında varyasyon ve regresyon analizi sonuçları bazen etkin süreci ya da işlemi belirlemeyebilir. Örneğin bir regresyon analizi bir işlemin sonucu etkileyecek sıcaklığın etkisini tam olarak belirlemeyebilir. Bundan dolayı bir araştırmacı işlemin sonucunu iyileştirmek için bir sıcaklık ayarlaması yapmaz. İşlem sırasında sıcaklığın normal dalgalanmasından dolayı sapmalar meydana gelebilir. Bu dalgalanma istatistiksel olarak bulunabilecek büyüklükte değildir. Bu tür kısıtlar ve hatalar istatistiksel deney tasarımı yöntemi ile giderilir (Breyfogle 2003).

Deney tasarımında klasik yöntemlerin yetersizliği istatistiksel deney tasarım yöntemleri ile giderilmiştir.

### **Rasgele blok düzeni**

Bir deneyde amaç çoğunlukla ölçülen Y gibi bir değişken üzerinde bir ya da birden çok etkenin etkisini incelemektir. Etkisi incelenmek istenen etken dışında birçok başka etken de ölçülen Y değişkeni üzerinde etkili olabilir. Örneğin, kan basıncı (Y) üzerinde günlük yapılan aktivite süresinin (etken) etkisinin araştırıldığı düşünüldüğünde, bunun için kurulabilecek en basit düzen, aktivite süresini örneğin üç grupta, “az” , “orta” ve “çok” gibi üç grupta gruplamak ve her gruptan rasgele seçilen sırasıyla n1, n2 ve n3 kişinin kan basıncı değerlerini kaydetmektir. Bu durumda ortaya Çizelge 3.5.’ teki gibi bir veri seti çıkar.

**Çizelge 3.5.** Rasgele düzen için veri tablosu

Aktivite Düzeyi		
Az	Orta	Çok
Y11	Y21	Y31
Y12	Y22	Y32
Y13	Y23	Y33
:::	:::	:::
:::	:::	:::
Y1n1	Y2n2	Y3n3

Bu gösterimde ölçülen değişken  $Y_{ij}$  olup i indisi grubu, j indisi de i. gruptaki j. bireyi tanımlar. Böyle bir deney tasarımı, her gruptaki bireylerin ait oldukları kitleden rasgele seçildikleri varsayımı altında “rasgele düzen” olarak adlandırılır. Aktivite düzeyinin, kan basıncı üzerinde etkili olup olmadığını, başka bir değişle üç grup arasında kan

basıncı düzeyleri arasında fark olup olmadığını, koşulların sağlanıp sağlanamamasına göre varyans analizi ya da Kruskal Wallis varyans analizi yöntemi ile test edilebilir. Kan basıncı üzerine etki edebilecek, günlük aktivite düzeyi dışında daha birçok etken olabilir. Ancak rasgele seçim yapıldığından kan basıncına etki edebilecek diğer etkenlerin, örneğin yaş, yeme ve içme alışkanlıkları, şişman olup olmama, sigara içip içmeme v.b. gruplar arasında benzer dağıldığı varsayılır. Ancak diğer etkenlerin gruplarda benzer dağıldığını garanti etmek olanaklı değildir. Başka bir deyişle gruplar, asıl etkisi incelenen etken aktivite düzeyi dışında, ölçülen değişkene (kan basıncı) etki edebilecek diğer etkenler açısından homojen olmayabilir. Rasgeleliğe bağlı olarak bir grubun yaş ortalaması diğerlerinden daha farklı olabilir, ya da bir grupta obezlerin oranı diğer gruplara göre çok daha fazla çıkabilir. Böyle bir durumda aktivite düzeyleri arasında kan basıncı bakımından fark bulunması ya da bulunamaması durumunda, grupların yaş dağılımları benzer olmadığından ya da gruplardaki obez oranlarının farklı olmasından, gruplar arasında farklılık bulundu ya da bulunamadı sonucuna varıldığı net olarak anlaşılamaz. Yaş, obezite gibi kan basıncına etki eden diğer etkenlerin etkisi, asıl ilgilenilen aktivite düzeyinin etkisi ile karıştığından varılacak sonucun doğruluğu tartışılır olacaktır. Bu nedenle denemeyi homojen birimler üzerinde uygulamak sonuçların güvenilirliğini artırıcı bir yoldur.

Ölçülen değişken üzerinde etkili olabilecek diğer etkenler bakımından homojen yapılar oluşturup, her homojen yapıda asıl ilgilenilen etkenin etkisi test edilirse daha doğru bir sonuca ulaşılabilir, başka bir deyişle deneysel hata azaltılabilir. Deney düzenleme tekniğinde bu homojen yapılar blok olarak adlandırılır ve her bloktan denemelere rasgele atama yapıldığında ortaya çıkan deney tasarımına da rasgele blok düzeni denir.

İncelenen etkenin etkisini daha doğru bir şekilde test etme olanağı sağladığından rasgele blok düzeni değişik alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Rasgele blok düzeninin sağladığı bir diğer avantaj da örnek genişliğinde sağladığı tasarruftur. Rasgele düzene göre daha küçük örnekleme aynı doğrulukta (aynı güçte) etken etkisini test etmek olanaklıdır. Aynı blok üzerinde tüm denenecek denemeleri denemek her zaman olanaklı olmadığından rasgele blok düzeninin kullanımı bir miktar kısıtlanmış olsa da tamamlanmamış rasgele blok düzeni adı verilen bir yöntemle bu sorunun üstesinden gelinebilmektedir (Karaağaoğlu 2013).

### Tam faktöryel yöntemi

En az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyenin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile oluşan kombinasyondur. Çizelge 3.6.' da örnek bir deney modeli verilmiştir. Bu deney modeline göre 3 adet parametre bulunmaktadır. Her bir parametrenin de 2 adet seviyesi bulunmaktadır. Bu durumda her bir parametre ve seviye kombinasyonu denendiğinde toplam 8 adet deney yapılmalıdır. Aynı şekilde 4 parametrelili bir deneyde her bir parametre 3 seviyeye sahipse  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  adet deney yapılması gerekmektedir. Çizelge 3.6.' da P1, P2 ve P3 parametreleri, 1-2 parametrelere ait seviyeleri göstermektedir. Her bir deneyin sonucu Sn olarak deney satırı sonuna yerleştirilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Tam faktöryel deney tasarım tablosu

Deney sayısı	Parametre ve seviyeleri			Sonuç
	P1	P2	P3	
1	1	1	1	S1
2	1	1	2	S2
3	1	2	1	S3
4	1	2	2	S4
5	2	1	1	S5
6	2	1	2	S6
7	2	2	1	S7
8	2	2	2	S8

Tam faktöryel deney tasarımı istatistiksel metotlar ile birleştirildiğinde analiz aşamasında araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Çizelge 3.6.' daki örneğe göre her bir parametrenin etkisi ve birbirleri ile olan etkileşimi araştırıldığında basit olarak ortaya şöyle bir denklem ortaya çıkar (Lazic 2004).

$$EX1 = (S1+S2+S3+S4)/4 - (S5+S6+S7+S8)/4$$

$$EX2 = (S1+S2+S5+S6)/4 - (S3+S4+S7+S8)/4$$

$$EX3 = (S1+S4+S5+S7)/4 - (S2+S3+S6+S8)/4$$

$$EX1X2 = (S1+S2+S7+S8)/4 - (S3+S4+S5+S6)/4$$

$$EX1X3= (S1+S4+S6+S8)/4-(S2+S3+S5+S7)/4$$

$$EX2X3= (S1+S3+S5+S8)/4-(S2+S4+S6+S7)/4$$

$$EX1X2X3= (S2+S4+S5+S8)/4-(S1+S3+S6+S7)/4$$

Bilimsel olarak deney tasarımı 3 temel prensibe sahiptir. Bunlar; deney tekrarı, deneyin sırasının rastgele yapılması ve deneyin bloklanmasıdır (Hinkelmann ve Kempthorne 2005).

Tam faktöriyel deney tasarımında rastsal tam bloklamalar kullanılır. Bloklamanın temel amacı bilinmeyen ve kontrol edilemeyen hataların deneyi etkilemesini önlemesidir. Eğer bu temel prensipler yerine getirilmezse deneyde bilinmedik hataların ortaya çıkması muhtemeldir. Deney esnasında oluşabilecek hatalardan ve sapmalardan sakınmak için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar deneylerin rastgele yapılması ve geriye dönük detayların incelenerek gerekli düzeltmelerin yapılmasıdır (Cox ve Reid 2000).

Deney sonrasında varyasyon analizinin yapılabilmesi için deneyin en az üç kez tekrar edilmesi gerekmektedir. Böylece deney istatistiksel olarak yorumlanabilir. Tam faktöriyel deneylerin analizinde ANOVA (Varyasyon Analizi) ve regresyon analizi kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile bir parametrenin deney üzerindeki etkisi hesaplanabilir. Varyasyon ve regresyon analizi teknikleri işlem sırasınca bir değişiklik yapmadan farklılıkların kaynağının belirlenmesine yardımcı olur (Breyfogle 2003).

Bu tez çalışmasında da daha evvel bahsedildiği üzere  $X_1$ ,  $X_2$  ve  $X_3$  değişkenlerinin her biri için belirlenen 3 farklı seviye hesaba katılarak  $3 \times 3 \times 3 = 27$  deney üzerinde araştırma yapılmış ve deney tasarımında tam faktöriyel yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada referans alınan, tam faktöriyel deney kombinasyonları Çizelge 3.7.' de gösterilmiştir. Burada, CAD datalar ve teknik resimler üzerinde de gösterilen  $X_1$  ve  $X_2$  dışında, etkisi ancak analizler sonrasında gösterilebilecek  $X_3$  parametresi de görülmektedir.

**Çizelge 3.7.** Çalışmada dikkate alınan tam faktöryel deney tasarım parametreleri

Deney Sayısı	Parametre Seviyeleri		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	1	1,5	3
2	1	1,5	4
3	1	1,5	5
4	1	5	3
5	1	5	4
6	1	5	5
7	1	10	3
8	1	10	4
9	1	10	5
10	2	1,5	3
11	2	1,5	4
12	2	1,5	5
13	2	5	3
14	2	5	4
15	2	5	5
16	2	10	3
17	2	10	4
18	2	10	5
19	3	1,5	3
20	3	1,5	4
21	3	1,5	5
22	3	5	3
23	3	5	4
24	3	5	5
25	3	10	3
26	3	10	4
27	3	10	5

### **Kesirli faktöryel tasarım**

Kesirli faktöryel deney tasarımı tam faktöryel deney tasarımının bir alt türevidir. Tam faktöryel deney tasarım yönteminin uygulanmasının verimli olmadığı diğer bir ifade ile maliyet ve zaman açısından sınırlamaların bulunduğu ve kazanım elde edilmek istenen, yüksek sayıda seviye bulunan faktöryel tipi deneylerde belirli kesir oranlarında seçim yapılarak daha hızlı ve ekonomik olarak uygulanabilir. Bunun için deney sayısı orantılı olarak azaltılır ve kesirli faktöryel deney tasarımı uygulanmış olur.

Örnek olarak 5 değişken parametrelili ve 3 alt seviyeli bir deney tam faktöryel olarak yapıldığında  $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 243$  128 deney yapılması gerekir. Bunun yerine 1/2 kesiri ile



81, 1/4 kesiri ile 27 ya da 1/8 kesiri ile 9 deney yapılabilir. Deney miktarını kesirli olarak azaltmak bu şekilde mümkündür.

### **Taguchi yöntemi**

Taguchi Yöntemi, parametre tasarımı, sistem tasarımı ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş bir deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir. En yaygın olarak, kalite güvence sistemleri kapsamında toplanan verilerin, istatistiksel analizinde kullanılmaktadır. Taguchi' nin deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu saptamak adına oldukça yararlı bir yöntemdir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yöntemi kullanılarak, çok daha az sayıda deneysel çalışma ile sonuca ulaşmak mümkün olmaktadır. Taguchi deneysel tasarım metodunda geliştirilen metodoloji üç temel kavramdan oluşur, bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır (Güral 2003).

Genichi Taguchi, kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesindeki verimliliği artıracak bir çözüm getirmiştir (Ross 1989). Bu sayede deney öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olmuştur. Taguchi metodu bir deney tasarım tekniği olmanın ötesinde yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir tekniktir. Diğer taraftan deney sayısında elde edilen azalma, faktörler arasındaki etkileşimlerin belirli ölçüde gözardı edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Taguchi deney tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal/gürültü oranı değeri; küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir.

Hangi S/N oranı değerlendirilmede kullanılırsa kullanılsın, sonuç olarak karşımıza çıkan değerlerde daha büyük olan S/N oranı daha iyi deney sonucunu ifade eder. Böylelikle deneylerde ele alınan faktörlerin seviyeleri içerisinde en yüksek S/N oranına sahip olan değerler en iyi performansı verecektir. Bunun yanı sıra varyans analizi

(ANOVA) ile hangi proses üzerinde hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konulur (Yang ve Tarng 1998). Hem S/N oranı, hem de varyans analizi yardımı ile de faktörlerin, prosesi optimum performansa ulaştırarak kombinasyonu tespit edilir.

Diğer önemli bir nokta deney tasarımının dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlaması ve bunun için de tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi' nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur (Ross, 1989).

Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir (Yang ve Tarng 1998);

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (Beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanılarak).
2. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi.
3. Doğru dengeli tasarımın seçimi.
4. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi.
5. Deneyle daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi.
6. Sonuçların analizi.
7. Onama deneylerinin yapılması.

Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için optimum performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve optimum deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir (Savaşkan ve ark. 2004).

### **Cevap yüzeyi yöntemi**

Cevap Yüzey Yöntemi (CYY) ilk olarak Wilson ve Box tarafından endüstriyel deneyler için geliştirilmiştir. Box ve Wilson' dan önceki dönemde genel olarak modelleme çalışmaları üzerinde durulmuştur. Çalışılan alan cevap yüzeyleri yerine cevap eğrileri olmuştur. Cevap eğrileri ilk kez bitki ve hayvanların büyümelerini göstermek için büyüme eğrileri yerine kullanılmıştır.

CYY, bazı etken değerlerinin, cevap değişkeni üzerindeki etkisini ortaya koymak ve etken değerlerinin kombinasyonları arasından cevap değişkenini maksimum ya da minimum yapan değeri ya da değerleri bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem cevap ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin tanımlanması için kullanılan bir dizi matematiksel ve istatistiksel teknikten oluşmaktadır. Bu teknikler işlemdeki bağımsız değişkenlerin tek başına ya da kombinasyonlu olarak cevap üzerindeki etkilerini araştırır. CYY' de ilk adım cevap değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen etkenleri yani bağımsız değişkenleri belirlemektir. Bu adımdan sonra, CYY' de deney tasarımı, regresyon modelleme ve optimizasyon teknikleri içiçe kullanılır.

CYY' de, birinci dereceden modellerin yanında karmaşık sistemlerin modellenmesi için ikinci dereceden ve daha yüksek dereceden polinomların da kullanılması mümkündür. (Baş ve Boyacı 2007).

Yöntemin genel fonksiyonu denklem 3.7 ile ifade edilir;

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i X_i) + \sum_{i<j}^k (\beta_{ij} X_i X_j) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} X_i^2) + \dots \quad (3.7)$$

CYY, bu tez çalışması sonucunda elde edilen çıktıların formüller ile optimize edilmesinde kullanılmıştır. Problemi formüle etmek için farklı regresyon analizleri yapılmıştır. Bu sayısal analizlerin çıktıları, sonuç bölümünde ayrıntıları ile birlikte verilmektedir.

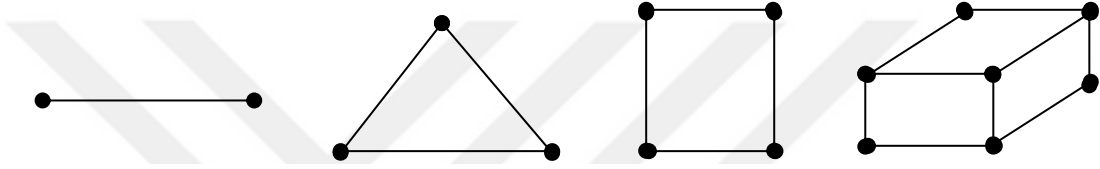
### 3.3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Analiz

Bu bölümde daha önce yapılan çekme deney çıktılarının ve bununla birlikte belirlenen deneysel tasarım konseptinin, sonlu elemanlar yöntemi (FEM: Finite Element Method) ile analiz konusu ele alınacaktır.

FEM, konvansiyonel yöntemler ile çözülmesi uzun zaman alan problemlerin, daha metodik ve kısa zamanda çözmek için geliştirilmiş bilgisayar destekli ileri bir mühendislik çözüm metodudur. FEM' de problemin çözümüne başlamadan önce genellikle bazı kabüller yapılır ve basitleştirmeye gidilir. Bu, zaman açısından avantaj sağladığı gibi çıkan sonuçlarında doğruluğuna önemli ölçüde etki eden bir parametredir.

FEM sonunda elde edilen sonuçlar belli bir tolerans değeri aralığında değerlendirilir ve gerçek değerlerden belli ölçüde sapma olduğu bilinmelidir.

FEM' in temelinde çözdürülecek sistem için yapının ya da parçaların belirli geometrik şekillerde ve boyutlarda sonlu elemanlara ayrılması yatar. Belirlenen eleman tipleri ve boyutları çözümün doğruluğuna ve süresine doğrudan etki eden en önemli parametrelerden biridir. Belirli, diğer deyişle sonlu sayıda elemanlara ayrılan sistem elemanları birbirlerine düğüm noktaları (node) olarak tanımlanan bölgelerden bağlanmışlardır. FEM' de yaygın olarak kullanılan eleman tipleri Şekil 3.27.' de gösterilmiştir.



**Şekil 3.27.** Tek boyutlu, iki boyutlu üçgen ve dörtgen, üç boyutlu eleman örnekleri

Problemlerin çözümünde sıkça kullanılan bu eleman tiplerinin, düğüm nokta sayısı ve geometrik şekil olarak farklı alt türevleri de mevcuttur. FEM ile analizi yapılacak geometride kullanılacak eleman tipi, problemin ve geometrinin cinsine göre en uygun olanı seçilmelidir.

Günümüzde FEM' in uygulanabildiği; akış problemleri, modal analizler, ısı analizler, dinamik davranış problemleri, lineer ve lineer olmayan (non-linear) malzeme statik ve dinamik analizleri gibi birçok mühendislik alanı mevcuttur. Bunlardan sıklıkla karşılaşılan mühendislik problemi malzeme statik analizleridir. Bu çalışmada FEM, hiperelastik EPDM contanın non-linear malzeme gerilme analizinde uygulanmıştır.

Yukarıda verilen uygulama alanları için bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları, Abaqus, Ansys, MSC Nastran&Patran, Marc, Actran; Adams; Apex, Altair HyperWorks CAE, Dytran paket programlarıdır.

Bu çalışmada non-linear analizler konusunda başarılı sonuçlar veren Abaqus yazılımı kullanılmıştır.

### 3.3.1. Abaqus ile non-linear analiz yönteminde süreçler

Bu kısımda Abaqus programı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda izlenen yöntem anlatılacaktır.

Tüm girdilerin analiz edilecek problemde doğru olarak tanıtılması için aşağıda verilen adımların dikkatlice izlenmesi gerekmektedir. Abaqus terminolojisi ile izlenen adımlar şu şekildedir;

1. **Part (Parça):** 3D CAD dataların Abaqus yazılımı içerisinde tanıtılması.
2. **Property (Nicelik):** Tanıtılan CAD datalar için malzeme girdilerin belirlenmesi.
3. **Assembly (Montaj):** Farklı geometrilerin birbirleri ile etkileşimlerinin gerçekleşebilmesi için montaj mantığı ile yazılım içerisinde tanıtılmaları.
4. **Step (Çözüm basamağı):** Simülasyondaki çözüm adımlarının hangi aralıklarda olacağını belirlenmesi ve yakınsama kriterinin belirlenmesi.
5. **Interaction (Etkileşim):** Birbiri ile etkileşimde olan ilgili geometrilerin; etkileşimli kısımlarının belirlenmesi.
6. **Load (Yük):** Yer değiştirme, yükleme gibi geometriler üzerine uygulanan sınır şartların belirlenmesi.
7. **Mesh (Elemanlara ayırma):** Simüle edilecek geometrilere uygun sonlu elemanların seçimi ve elemanlara ayırma işlemi.
8. **Optimization (Eniyileme):** İyileştirmelerin tanımlanabildiği kısım.
9. **Job (İşletme):** Simülasyonun seçilecek işlemci ve performans parametrelerine göre başlatılması sağlayan kısım.
10. **Visualization (Sonuç görselleri):** Çıkan sonuçların görüntülenerek yorumlandığı bölüm.

### 3.3.2. EPDM conta malzemesinin non-linear statik analizi

Bölüm 3.2.1.' de detayları verilen 3D CAD modeller (conta, kanal ve feder), Abaqus yazılımı içerisine alınmasının ardından, bölüm 3.1.2.' deki çekme deneyi verileri hesaba

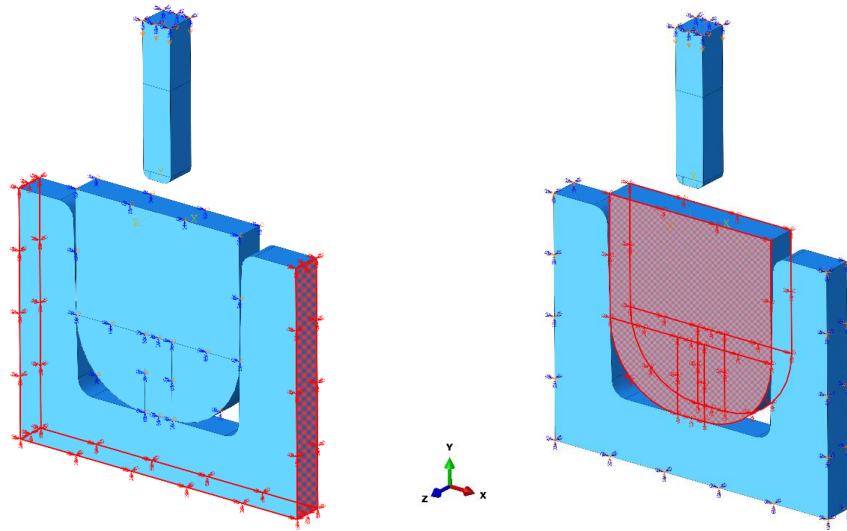
katılmış ve malzeme enerji potansiyel formu olarak daha önce aynı bölüm içerisinde detaylı olarak bahsedildiği üzere Ogden N2 olarak seçilmiştir.

Yapılan analizlerde dikkate alınan simülasyon süresi ve artım aralıkları için; 1 saniye toplam simülasyon zamanı içerisinde, 0,01s' lik çözüm aralıkları dikkate alınmıştır.

Montaj elemanı olarak bir araya getirilen sistemin bu aşamadan sonra birbiri ile etkileşim içerisinde bulunacağı bölgeleri ve sınır şartları belirlenmiştir.

Çalışmada conta ile kanal yüzeyi ve yine conta ile federin ilgili temas yüzeyleri etkileşim halindedir. Deformasyona uğraması beklenen contanın üst yüzeyi federin çevre alt ve yan yüzeyleri ile benzer şekilde contanın çevre alt ve yan yüzeyleri ile kanalın contanın içine oturduğu ve sıvanacağı kısma denk gelen çevre çeper yüzeyi etkileşim içerisinde olacak geometriler olarak tanımlanmıştır.

Sınır şartlar (Boundary condition) olarak ifade edilen tanımlamalar aşağıda Şekil 3.28. ve Şekil 3.29.' da gösterilmektedir. Bunlardan ilki, kanalın alt ve yan yüzeylerinin simülasyon boyunca X, Y ve Z eksenlerinde hem öteleme hem de dönme hareketlerine kısıtlanması için yapılmıştır. Bir diğer sınır şart ise, contanın kesit normali yönünde ötelenmesinin ve diğer eksenlerde ise dönmesinin kısıtlanması ile gerçekleştirilmiştir.

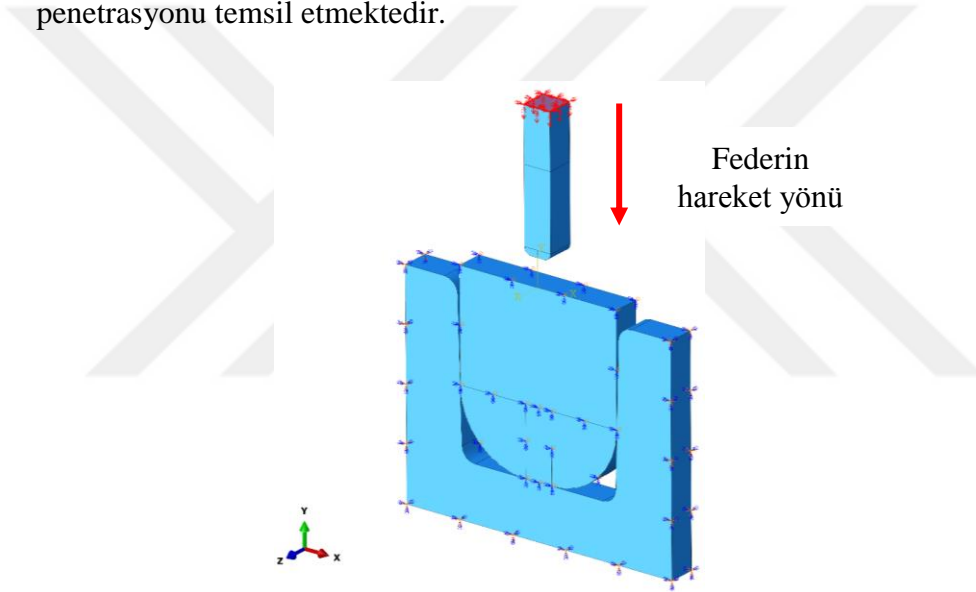


**Şekil 3.28.** Kanal ve conta için sınır şartlar

Son olarak verilen sınır şart; federin üst yüzeyine tanımlanan ve düşey eksendeki (Şekil 3.29.' da verilen eksen takımına göre Y eksenini) yer değiştirme olarak ifade edilmektedir.

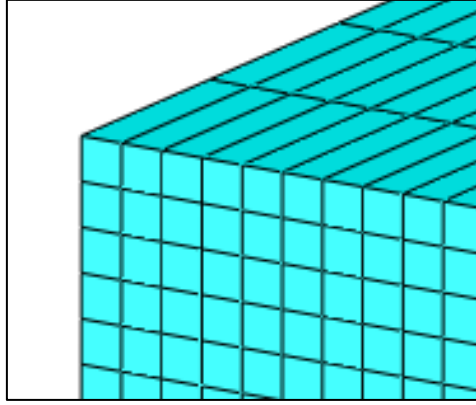
Federden conta üst yüzeyine doğru düşey ekseninde gerçekleşecek yer değiştirme ile ilgili tanım, hatırlanacağı üzere  $X_3$  parametresi olarak Bölüm 3.2.' de gösterilmişti.

İlk simülasyon takımında 4mm, sonrakinde 5mm ve son grupta 6mm olmak üzere 3 farklı yer değiştirme incelenmiştir. Nominal pozisyonda feder alt yüzeyi ile conta üst yüzeyleri arasında 3D datalarda 1mm' lik bir boşluk bulunduğu için yukarıda belirtilen simülasyonlarda kullanılan değerlerin 1mm eksiği olan değerler, conta içine doğru olan penetrasyonu temsil etmektedir.



**Şekil 3.29.** Feder için yer değiştirme sınır şartı

Bu çalışmada 1mm kalınlığındaki kesitler analiz edilmektedir. Bu sebeple 3 boyutlu eleman tipleri seçilmiştir ancak aşağıdaki Şekil 3.30.' da da görüleceği üzere, elemanlara ayırma yapılırken 3 boyutlu eleman tiplerinden Abaqus' te C3D8H olarak ifade edilen, hibrit, 6 yüzlü, 8 düğüm noktalı (hex) 3 boyutlu elemanlar kullanılmıştır. Conta, feder ve kanalın elemanlara ayırma işlemleri aşağıda detayları ile birlikte verilmektedir.



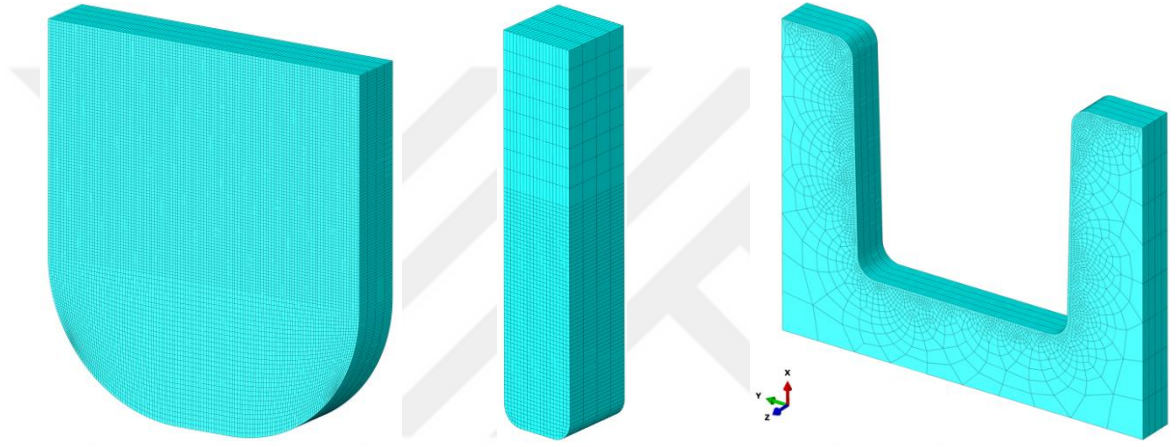
**Şekil 3.30.** C3D8H hex eleman tipi





- **Contanın elemanlara ayrılması**

Contanın radyüslü geometrisinden dolayı yarım daire şeklinde olan köşeleri, mesh kalitesini artırmak amacıyla ana katıdan bölgesel olarak ayrılmıştır. Aşağıda Şekil 3.31.' de elemanlara ayrılmış tüm geometriler ile birlikte görülebileceği üzere, bu aşamadan sonra daha sağlıklı sonuçlar alabilmek adına conta çevresi 0,1 mm' lik aralıklara ayrılmış, 1 mm' lik kesit ise 4 eşit parçaya bölünmüştür. Bu işlemin ardından C3D8H eleman tipi seçilerek komple geometrinin elemanlara ayrılması işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.31.** Elemanlara ayrılmış conta, feder ve kanal

- **Federin elemanlara ayrılması**

Feder parçasının sonlu elemanlara ayrılması için contadakine benzer yöntem izlenmiştir. Federin ucundaki radyüslü kısmı bölgesel olarak ayrılmış ve daha hassas ve düzgün hex elemanların kullanılabilmesi için 0,1 mm' lik aralıklara bölünmüştür. Federin contanın içine gömüldükten sonra etkileşimde bulunmayacak üst bölgesi ise daha geniş aralıklara ayrılmıştır. Bu bölgede daha kaba olarak nitelendirilebilecek 0,25 mm aralıklar dikkate alınarak analizlerdeki hesaplama süresi kısaltılmıştır.

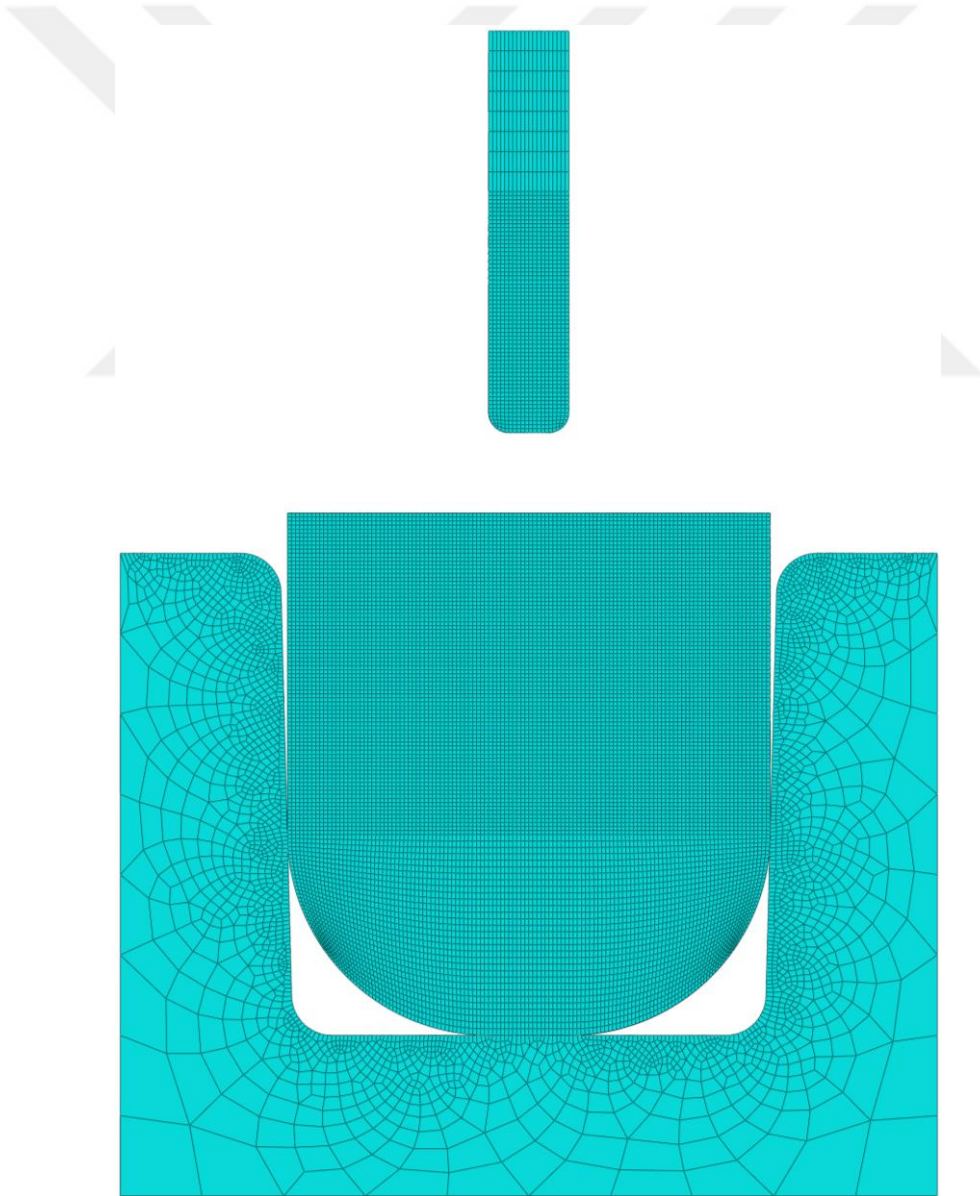
- **Kanalın elemanlara ayrılması**

Kanal elemanlara ayrılırken dikkat edilen presip diğer iki parça için izlenen yöntemin aynısıdır. Kullanılan eleman tipi aynıdır ve fakat kanal-conta etkileşim yüzeyinden uzaklaştıkça 'hex' tipi sonlu elemanlar kaba yapıda göze çarpmaktadır. Bunun sebebi

etkileşim içerisinde olan yüzey 0,1 mm' lik eleman aralıklarına bölünürken, geri kalan bölgelerde 1 mm' lik geniş boyutlarda sonlu elemanlar oluşturulmuştur ve böylece analiz süresinde bir kez daha iyileştirme yapılmıştır.

Elemanlara ayrılan tüm geometrilerin bir bütün olarak görülebildiği resim, aşağıda Şekil 3.32.' de verilmiştir.

Elemanlara ayırma ve diğer simülasyon girdilerinin tanıtılması işlemlerinden sonra analiz işlemine geçilmiştir. Yapılan analizler sonucunda görülmek istenen conta ve feder arasında oluşan yüzey basıncı değerleri, Bölüm 4. Bulgular ana başlığı altında detaylı olarak incelenecektir.



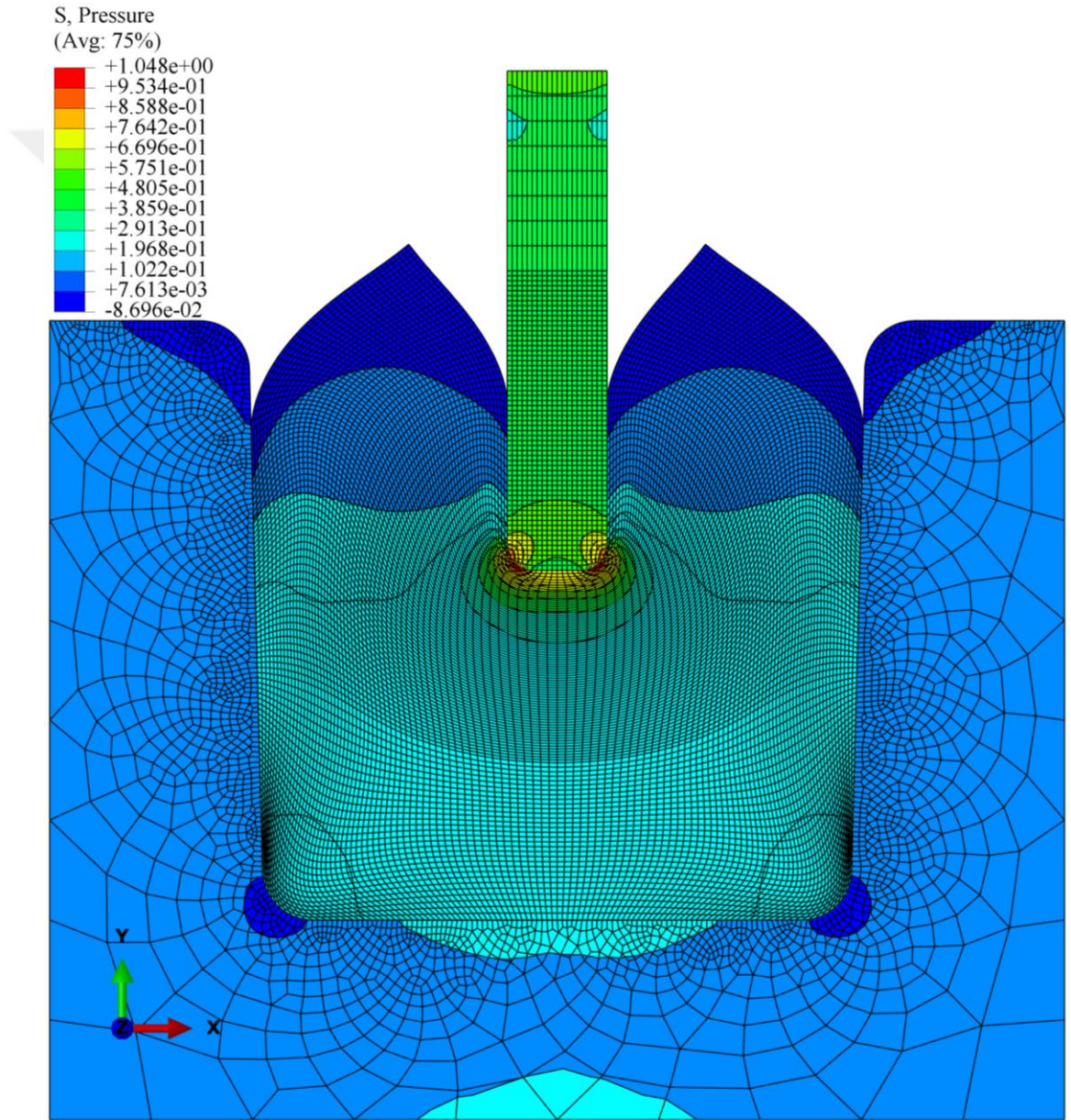
**Şekil 3.32.** Elemanlara ayrılmış komple geometri



## 4. BULGULAR

### 4.1. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Sonuçları

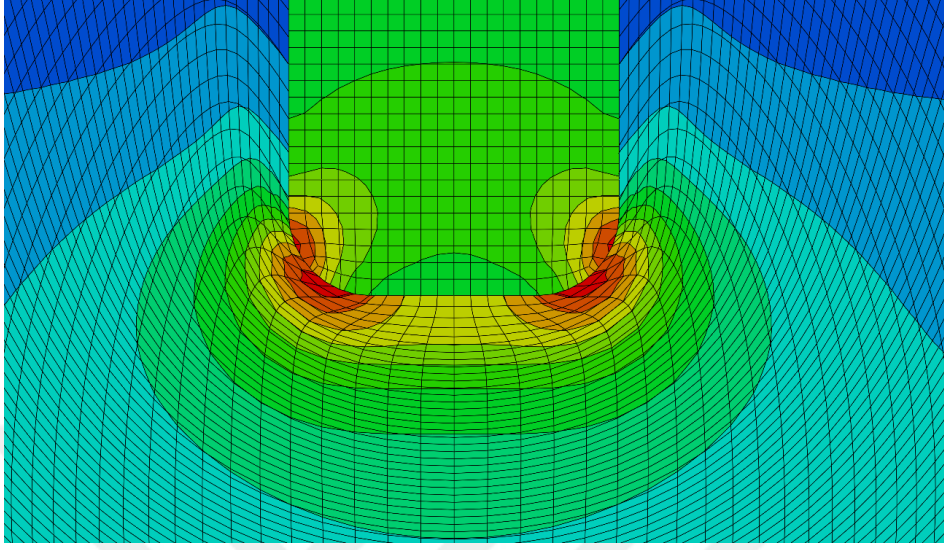
1 nolu sızdırmazlık problemi analizinde dikkate alınan  $X_1:1\text{mm}$ ,  $X_2:1,5^0$  ve  $X_3: 3\text{mm}$  parametreleri ile federin conta içine penetrasyonu neticesinde oluşan maksimum basınç değeri, aşağıda Şekil 4.1.' de kırmızı renk ile gösterilen bölgede ve **1,048MPa** olarak federin köşe radyüslerinin olduğu bölgede çıkmıştır.



Şekil 4. 1 Deney no. 1 basınç dağılımı ve oluşan maksimum basınç



Deney no. 1' deki analizde en yüksek basıncın çıktığı bölgedeki sonlu elemanların uğradığı deformasyon Şekil 4.2.' de daha net bir şekilde görülmektedir.

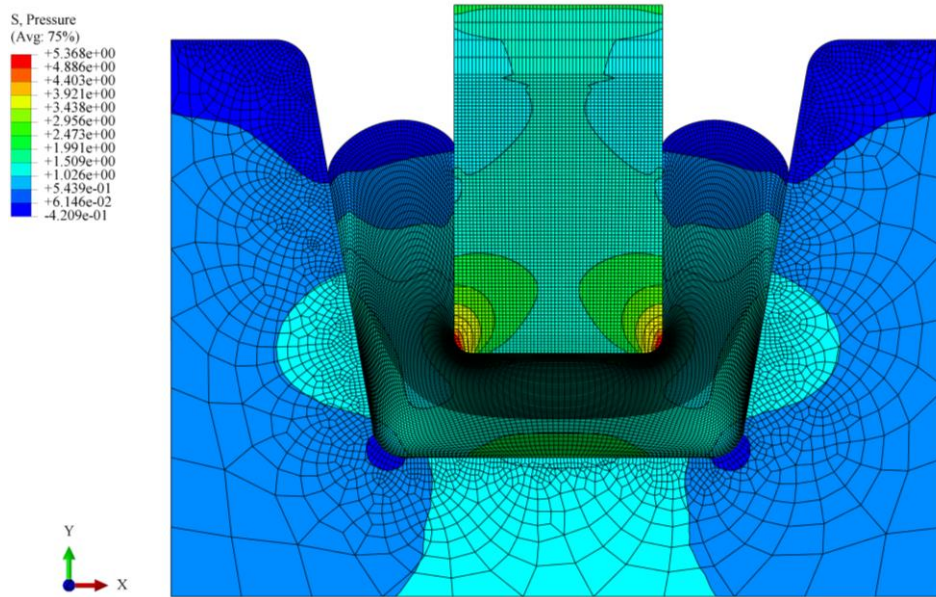


Şekil 4.2. Deney no. 1 maksimum basınç bölgesi ve elemanlardaki deformasyon

Tüm analizler arasında en yüksek basınç değerini veren 27 numaralı son deneyin basınç bölgesi dağılımı ve değeri ise aşağıdaki Şekil 4.3.' te gösterilmiştir.

- Deney No.27' nin sonuçları

Parametreler:  $X_1$ : 3mm,  $X_2$ :  $10^0$ ,  $X_3$ : 5mm Maksimum Basınç: **5,368MPa**



Şekil 4.3. Deney no. 27 basınç dağılımı ve maksimum basınç

Yapılan tüm deneylerin girdi ve çıktıları Çizelge 4.1.' de toplu olarak gösterilmektedir.

**Çizelge 4.1.** Tüm deneylerin özet tablosu

Deney No.	Parametre ve seviyeleri			P: Oluşan maksimum yüzey basınç değeri (MPa)
	X <sub>1</sub> : Federin kalınlığı (mm)	X <sub>2</sub> : Kanalın iç açısı (°)	X <sub>3</sub> : Federin conta içindeki yer değiştirme miktarı (mm)	
1	1	1,5	3	<b>1,048</b>
2	1	1,5	4	<b>2,275</b>
3	1	1,5	5	<b>4,630</b>
4	1	5	3	<b>1,102</b>
5	1	5	4	<b>2,406</b>
6	1	5	5	<b>4,759</b>
7	1	10	3	<b>1,148</b>
8	1	10	4	<b>2,523</b>
9	1	10	5	<b>4,866</b>
10	2	1,5	3	<b>1,600</b>
11	2	1,5	4	<b>2,785</b>
12	2	1,5	5	<b>4,665</b>
13	2	5	3	<b>1,735</b>
14	2	5	4	<b>3,008</b>
15	2	5	5	<b>4,899</b>
16	2	10	3	<b>1,839</b>
17	2	10	4	<b>3,225</b>
18	2	10	5	<b>5,133</b>
19	3	1,5	3	<b>2,283</b>
20	3	1,5	4	<b>3,385</b>
21	3	1,5	5	<b>4,770</b>
22	3	5	3	<b>2,413</b>
23	3	5	4	<b>3,670</b>
24	3	5	5	<b>5,104</b>
25	3	10	3	<b>2,610</b>
26	3	10	4	<b>3,910</b>
27	3	10	5	<b>5,368</b>

Yukarıdaki tabloda gösterilen sonuçlar, analizlerde dikkate alınan girdi değerleri için 2 boyutlu yüzey grafikler (MatLab®) kullanılarak grafik metoduyla görselleştirilmiştir. Burada kullanılan değişkenler;

X<sub>1</sub>: Federin kalınlığı (mm),

X<sub>2</sub>: Kanalın iç açısı (°),

X<sub>3</sub>: Federin conta içindeki yer değiştirme miktarı (mm)

ve hedef fonksiyonu;

$P_{max}$ : Oluşan maksimum yüzey basınç değeri (MPa) verilmektedir.

Tablodan gözlemlendiği şekilde yüzey basınç değeri artan kanal açısı, federin yer değiştirme miktarındaki artış ve federin kalınlığı ile birlikte orantılı olarak artmaktadır. Bu bağıntıyı ampirik olarak hesaplayabilmek için 3 farklı model önerilmiştir;

- Lineer regresyon modeli
- 2' nci dereceden polinomial non-linear regresyon modeli
- N' nci dereceden polinomial non-linear regresyon modeli

Tanımlanan modellerde MatLab® fonksiyonları kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve 'uyumluluk' (fitness) miktarları tablo halinde gösterilmiştir.

#### 4.2. Lineer Regresyon Modeli

Lineer regresyon modelinde hedef fonksiyonu katsayılarıyla birlikte lineer formda tanımlanmaktadır. Hedef fonksiyonu,

$$P_{max} = b_1 + b_2x_1 + b_3x_2 + b_4x_3$$

şeklinde modellenirse, katsayılar aşağıda verilen Çizelge 4.2.' deki gibi bulunur.

**Çizelge 4.2.** Lineer regresyon modelinde bulunan katsayılar

$b_1$	-4,2853
$b_2$	0,4864
$b_3$	0,0411
$b_4$	1,5787

Denklemden yerine konulursa aranan Lineer Regresyon Modeli;

$$P_{max} = -4,2853 + 0,4864x_1 + 0,0411x_2 + 1,5787x_3$$

Şeklinde yazılır.

Hesaplama için kullanılan MatLab® kodu aşağıda verilmiştir;

```
''tbl = readtable("C:\Deneme\Kitap1.xlsx"); %Verileri oku
% Linear regression modeli: P ~ b1 + b2*x1 + b3*x2 + b4*x3
```

```

modelfun = @(b,x)b(1) + b(2)*x(:,1) + ...
b(3)*x(:,2) + b(4)*x(:,3); % fonksiyon modeli tanımlama
beta0 = [1 1 1 1]; %başlangıç katsayı matrisi
mdl = fitnlm(tbl,modelfun,beta0); %hesaplama
disp(mdl); %sonuçları göster''

```

Lineer regresyon modelinin uygunluğunu araştırabilmek için deneysel olarak verilen veri noktaları ile model ile hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.3.' te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Simülasyon ile lineer regresyon modelinin karşılaştırılması

$P_{sim}$	$P_{model}$	$ \%Hata $
1,048	0,9988	%4,92
2,275	2,5775	%11,74
4,63	4,1562	%11,40
1,102	1,1425	%3,55
2,406	2,7212	%11,58
4,759	4,2999	%10,68
1,148	1,3478	%14,82
2,523	2,9265	%13,79
4,866	4,5052	%8,01
1,6	1,4852	%7,72
2,785	3,0639	%9,10
4,665	4,6426	%0,48
1,735	1,6289	%6,51
3,008	3,2076	%6,22
4,899	4,7863	%2,35
1,839	1,8342	%0,26
3,225	3,4129	%5,51
5,133	4,9916	%2,83
2,283	1,9717	%15,79
3,385	3,5504	%4,66
4,77	5,1291	%7,00
2,413	2,1154	%14,07
3,67	3,6941	%0,65
5,104	5,2728	%3,20
2,61	2,3206	%12,47
3,91	3,8993	%0,27
5,368	5,4780	%2,01
	ORTALAMA	%7,10

Lineer regresyon modelinin yorumlanmasında formülle hesaplanan değerlerin simülasyon sonucu ile farkına oranı, yani  $|\%Hata|$  miktarı ekteki tabloda verilmektedir.



Ortalama hata değeri %7,10 olarak bulunmuştur. Bu değeri, seçilen modelin uygunluk (fitness) değeri olarak diğer modeller ile karşılaştırılmasında kullanılacaktır.

### 4.3. İkinci Dereceden Polinomiyal Non-Linear Regresyon Modeli

2. derece polinomiyal non-linear regresyon modelinde hedef fonksiyonu;

$$P_{max} = b_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2^2 + b_4x_3^2 + b_5x_1 + b_6x_2 + b_7x_3$$

şeklinde modellenirse katsayılar Çizelge 4.4.' te gösterildiği gibi bulunur.

**Çizelge 4.4.** İkinci derece non-linear regresyon modelinde bulunan katsayılar

$b_1$	0,526
$b_2$	0,0273
$b_3$	-0,0022
$b_4$	0,311
$b_5$	0,3771
$b_6$	0,0668
$b_7$	-0,9093

Denklemden yerine konulursa aranan 2. derece polinomiyal non-linear regresyon modeli;

$$P_{max} = 0,526 + 0,0273x_1^2 - 0,0022x_2^2 + 0,311x_3^2 + 0,3771x_1 + 0,0668x_2 - 0,9093x_3$$

Şeklinde yazılır. Formülün oluşturulmasında dikkate alınan Matlab® kodu aşağıda verilmiştir;

```

''tbl = readtable("C:\Deneme\Kitap1.xlsx"); %Verileri oku
% Nonlinear model: P ~ b1 + b2*x1^2 + b3*x2^2 + b4*x3^2
% + b5*x1 + b6*x2 + b7*x3
modelfun = @(b,x)b(1) + b(2)*x(:,1).^2 + b(3)*x(:,2).^2+
b(4)*x(:,3).^2+ ...
b(5)*x(:,1)+b(6)*x(:,2)+b(7)*x(:,3) ; % fonksiyon modeli
tanımlama
beta0 = [1 1 1 1 1 1 1]; %başlangıç katsayı matrisi
mdl = fitnlm(tbl,modelfun,beta0); %hesaplama
disp(mdl);%sonuçları göster''

```

2. dereceden polinomyal regresyon modelinin uygunluğunu araştırabilmek için deneysel olarak verilen veri noktaları ile model ile hesaplanan sonuçların karşılaştırması Çizelge 4.5.' te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Simülasyon ile 2. derece polinomyal non-linear regresyon modelinin karşılaştırılması

$P_{sim}$	$P_{model}$	$ \%Hata $
1,048	1,09675	%4,44
2,275	2,36445	%3,78
4,63	4,25415	%8,83
1,102	1,2805	%13,94
2,406	2,5482	%5,58
4,759	4,4379	%7,24
1,148	1,4495	%20,80
2,523	2,7172	%7,15
4,866	4,6069	%5,62
1,6	1,55575	%2,84
2,785	2,82345	%1,36
4,665	4,71315	%1,02
1,735	1,7395	%0,26
3,008	3,0072	%0,03
4,899	4,8969	%0,04
1,839	1,9085	%3,64
3,225	3,1762	%1,54
5,133	5,0659	%1,32
2,283	2,06935	%10,32
3,385	3,33705	%1,44
4,77	5,22675	%8,74
2,413	2,2531	%7,10
3,67	3,5208	%4,24
5,104	5,4105	%5,66
2,61	2,4221	%7,76
3,91	3,6898	%5,97
5,368	5,5795	%3,79
	ORTALAMA	%5,35

Bu modelde ortalama hata oranı %5,35 olarak bulunmuştur. Lineer regresyon modeline göre daha iyi sayılabilecek düşük bir hata ortalaması bulunmakla birlikte bazı ölçüm noktalarında %20,8' e varan hata oranı gözlemlenmektedir.

#### 4.4. N' nci Dereceden Polinomiyal Non-Linear Regresyon Modeli

N' nci derece polinomiyal non--linear regresyon modelinde hedef fonksiyonu;

$$P_{max} = b_1 + b_2x_1^{b_3} + b_4x_2^{b_5} + b_6x_3^{b_7} \quad (4.3)$$

Şeklinde modellenirse, katsayılar Çizelge 4.6.' daki gösterildiği gibi bulunur.

**Çizelge 4.6.** N' nci derece non-linear regresyon modelinde bulunan katsayılar

$b_1$	-0,6119
$b_2$	0,34696
$b_3$	1,2161
$b_4$	0,17774
$b_5$	0,50745
$b_6$	0,066174
$b_7$	2,5936

Denkleminde yerine konulursa aranan N' nci derece non-linear regresyon modeli;

$$P_{max} = -0,6119 + 0,34696x_1^{1,2161} + 0,17774x_2^{0,50745} + 0,066174x_3^{2,5936}$$

Şeklinde yazılır.

Formülün oluşturulmasında kullanılan Matlab® kodu aşağıda verilmiştir;

```
''tbl = readtable("C:\Deneme\Kitap1.xlsx"); %Veriler okunur
% Nonlinear regression modeli: P ~ b1 + b2*x1^b3 + b4*x2^b5 +
b6*x3^b7
modelfun = @(b,x)b(1) + b(2)*x(:,1).^b(3) + ...
    b(4)*x(:,2).^b(5) + b(6)*x(:,3).^b(7) ;
beta0 = [1 1 1 1 1 1 1];
mdl = fitnlm(tbl,modelfun,beta0);
disp(mdl);''
```

N' nci derece non-linear regresyon modelinin uygunluğunu araştırabilmek için deneysel olarak verilen veri noktaları ile model ile hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.7.' de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Simülasyon ile N' nci derece polinomyal non-lineer regresyon modelinin karşılaştırılması

$P_{sim}$	$P_{model}$	%Hata
1,048	1,0967	%4,44
2,275	2,3644	%3,78
4,63	4,2541	%8,84
1,102	1,2806	%13,94
2,406	2,5483	%5,58
4,759	4,4380	%7,23
1,148	1,4501	%20,83
2,523	2,7178	%7,17
4,866	4,6075	%5,61
1,6	1,5558	%2,84
2,785	2,8235	%1,36
4,665	4,7132	%1,02
1,735	1,7397	%0,27
3,008	3,0073	%0,02
4,899	4,8971	%0,04
1,839	1,9092	%3,68
3,225	3,1769	%1,51
5,133	5,0666	%1,31
2,283	2,0695	%10,32
3,385	3,3372	%1,43
4,77	5,2269	%8,74
2,413	2,2534	%7,08
3,67	3,5211	%4,23
5,104	5,4108	%5,67
2,61	2,4230	%7,72
3,91	3,6906	%5,94
5,368	5,5804	%3,81
	ORTALAMA	%5,35

Son modelde ortalama hata oranı 5,35% olarak bulunmuştur. Bu modelde de bazı ölçüm noktalarında %20.83' e kadar çıkan hata oranı gözlemlenmektedir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Deneylede ulaşılan tüm sonuçlar incelendiğinde, her bir sonucun Giriş Bölümü' nde belirtilen genel şartları sağlayan özellikte olduğu yargısına varılabilir. 2 bar olarak bir sızdırmazlık şartı yeter şart olarak kabul edildiğinde tüm deneyler bu testten başarı ile geçmiştir denilebilir. Zira sonuçlara bakıldığında en düşük çıkan yüzey basıncı değeri 10,48 bar olarak 1. deneyde gözlemlenmektedir.

Diğer yandan kalite kriteri olarak Karcher Testi referans alındığında durum bundan bir miktar farklıdır. Sonuçlar incelendiğinde, test geçer şartı olarak verilen 18 barlık basınca dayanımın; **1, 4, 7, 10 ve 13** numaraları deneylerde sağlanamadığı görülmektedir. Bunlar dışındaki analizlerde Karcher Testi sağlanmakta ve ürün sızdırmazlık açısından yüksek kaliteli olarak değerlendirilebilmektedir.

Bununla birlikte çıkan sonuçların basınç ölçümlerinin deneysel olarak ölçülmesinin teknik olarak çok zor olması nedeni ile ilaveten bir doğrulaması yapılamamıştır.

Böylece yapılan deney simülasyonlarında elde edilen sonuçlar üç ayrı ampirik model ile formüle edilmiştir;

- Lineer regresyon modeli
- 2' nci dereceden polinomial non-lineer regresyon modeli
- N' nci dereceden polinomial non-lineer regresyon modeli

Bu modeller kullanılarak simülasyon sonuçları için optimize edilmiş ve formüller verilmiştir. Sonuç olarak en ideal kullanım olarak **N' nci dereceden polinomial non-lineer regresyon modeli** önerilmiştir. Bu model kullanılarak formülde verilen değişkenlere göre analitik olarak istenilen yüzey basınçları hesaplanabilmektedir.

Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere, daha çok feder kalınlığındaki ve düşey eksendeki yer değişim değerlerinin yükselmesi ile birlikte artış eğiliminde olan yüzey basıncı değerinin bu parametrelerden hareketle nasıl değişim gösterdiğini incelemek ve değişen sınır şartlara göre modeller üzerinde oluşan maksimum basınç değerini bulmak, bu değerlere göre kalite standartlarını belirlemek üzere hazırlanan deneysel tasarım

çalışmaları sonucunda elde edilen bu amprik ifade, basınç kriterinin esas alındığı benzer sızdırmazlık problemlerinin çözümüne de ışık tutmaktadır.

Dikkate alınan 27 kombinasyon içerisindeki ara değerler için de lokal bir minimum ya da maksimum basınç değeri çıkması beklenmemektedir. Böylece genel olarak artan parametre değerleri ile orantılı bir basınç artışı olduğu yorumu yapılabilir. Çalışma, başlangıç ve bitişi belli sınır değer aralığında, optimum ya da istenilen basınç değerinin bulunmasında, tasarım parametrelerinin kolayca belirlenmesine olanak sağlamaktadır.

Bulunan bu formül yardımıyla, teknik olarak yapılabilirliği mümkün olan benzer geometrilerde ve aynı malzeme seçildiğinde belli bir hata payı ile optimal yüzey basıncı değeri hesaplanabilmektedir.

Sızdırmazlık kriterinin, otomotiv endüstrisinde önemli bir parametre olduğu düşünüldüğünde, yapılan tüm çalışmalar farklı türde sızdırmazlık problemlerine olan yaklaşım için de referans teşkil edebilir. Simülasyonların ve modellerin çeşitliğindeki ve sayısındaki artış ile hata payı çok daha aza indirgenebilir.

Sonraki adımlar için öneri olarak, kesitin sabit tutularak sonuca etkiyen parametrelerin şiddetini daha iyi görmek amacıyla, deneysel tasarım yönteminde referans alınan seviyelerin genişletilmesi düşünülebilir. Üç ana parametre yerine daha fazla parametre ile problem ele alınabilir. Conta, feder ve kanal geometrileri ile ilgili, analizlerde çıkan basınç dağılımı göz önünde bulundurularak mekanik tasarım değişikliğine gidilebilir.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 1961.** Encyclopedia of Science and Tecnology. Vol.:11, Mc Graw Hill, New York, 634-647.
- Anonim, 1989.** Elastomers and Rubbers. *Machine Design*, 61: 294-327.
- Anonim, 2018.** Elastomer (hyperelastic) Characterization. <http://www.axelproducts.com/hyperelastic.html> - (erişim tarihi: 23.01.2018).
- Anonim, 2018.** Robert William Thomson. <https://www.britannica.com/biography/Robert-William-Thomson> - (erişim tarihi: 27.04.2018).
- Baş, D., Boyacı, İ. H. 2007.** Modelling and Optimization II: Comparison of Estimation Capabilities of Response Surface Methodology with Artificial Neural Networks in a Biochemical Reaction, *Journal of food engineering*, 78: 846-854.
- Besterfield, D.H. Besterfield, C., Besterfield, G.H., Besterfield, M. 1995.** Total quality management. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Breyfogle F. W. 2003.** Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods. Second Edition John Wiley & Sons, Inc. 549-570.
- Budinski, K.N. 1989.** Engineering Materials: Properties and Selection. 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 855s.
- Clauser, H.R., Fabian, R., Peckner, D., Riley, M.W. 1987.** The Encyclopdia of Engineering Materials and Processes. 2<sup>nd</sup> ed., Reinhold Publishing Corporation, New York.
- Cox, D.R., Reid, N. 2000.** The Theory of the Design of Experiments. Chapman & Hall/CRC Pres 28-30.
- Diani, J., Fayolle, B., Gilormini P. 2009.** A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*, 45(3): 601-612.
- Güngör, B. V. 2003.** Genetik Algoritmalarla Optimizasyon ve Bir Örnek Uygulama. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Güral, G. 2003.** Gazaltı Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Hinkelmann, K., Kempthorne, O. 2005.** Design and Analysis of Experiments Volume 2 Advanced Experimental Design. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, New Jersey.
- Karaağaoğlu E. 2013.** Bir Deney Tasarımı Türü: Rasgele Blok Düzeni. *Türk Biyokimya Dergisi*, 38(1): 1-4.
- Kauffman, G.B., Seymour, R.B. 1991.** Elastomers 2. Synthetic Rubber. *Journal of Chemical Education*, 68(3): 217/220.
- Lazic, Z. R. 2004.** Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide. WILEY-VCH, 157-165.
- Lunani, M., Nair, V.N., Wasserman, G.S. 1997.** Graphical metods for robust design with dynamic characteristics. *Journal of Quality Technology*, Vol.29, 327-338.
- Montgomery, D.C. 1991.** Design and analysis of experiment. John Wiley& Sons, Newyork.
- Morton, M. 1981.** History of Synthetic Rubber. *Journal of Macromolecular Science-Chemistry*, A15 (7): 1289-1302.
- Nagdi, K. 1993.** Rubber as an Engineering Material: Guideline for Users. Hanser Publishers, Munich, 302s.

- Patrick, J. C. 1936.** The Formation of High Polymers by Condensation Between Metallic Polysulfides and Dihalogenated Hydrocarbons and Ethers. *Rubber Chemistry and Technology*, 9 (3): 373-382.
- Ross, P. J. 1989.** Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. McGraw-Hill International Book Company, ISBN 0-07-053866-2, 1-66, 167-202.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. 2004.** Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *itiüdergisi*, Cilt:3(6): 117-128.
- Savran, H.Ö. 2001.** Elastomer Teknolojisi-1. Kauçuk Derneği Yayınları, İstanbul, 158s.
- Scheffler, E. 1997.** Statische versuchplanung und auswertung, Eine Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, ISBN 3-342-00366-9, 1-50.
- Soyel, D. 2008.** Sonlu Elemanlar Metodu ile NR/SBR Tipi Elastomer Esaslı Malzemelerin Davranış Modellerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Şirvancı, M. 1997.** Kalite İçin Deney Tasarımı. Literatür Yayınları, 110s, İstanbul.
- Vahapoğlu, V. 1998.** Kauçuk Türü Malzemelerin Malzeme Sabitlerinin Eş-iki Eksenli Çekme Deneyi ile Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Vahapoğlu, V. 2006.** Kauçuk Türü Malzemeler II. Sentetik Kauçuk. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1): 44-55.
- Vahapoğlu, V. 2007.** Kauçuk Türü Malzemeler I. Doğal Kauçuk. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1): 57-70 s.
- Wallace, H., Carothers, W. H., Williams, I., Collins, A.M., Kirby, J.E. 1932.** Acetylene Polymers and Their Derivatives. II. A New Synthetic Rubber: Chloroprene and Its Polimers. *Rubber Chemistry and Technology*, 5(1): 7-29.
- Yang, W. H., Tarng, Y. S. 1998.** Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122-129.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Önder YÜCEL  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 20.03.1984  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Gazi Anadolu Lisesi / 1994 - 2002  
Lisans : Uludağ Üniversitesi / Mak. Müh. / 2003 - 2007  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi / Fen Bil. Ens. /  
Mak. Müh. ABD. / 2007 - halen

Çalıştığı Kurum/ Kurumlar ve Yıl : Bosch A.Ş. / 2014 - halen  
: Mako A.Ş. / 2009 - 2014  
: Demirdöküm A.Ş. / 2009  
: Biltim Ltd. Şti. / 2007 - 2008

İletişim (e-posta) : [oyucelo@gmail.com](mailto:oyucelo@gmail.com)